

## **LT-CFB. Videreudvikling og kommerialisering**

Slutrapport for PSO-ForskEI projekt nr. 2007-7504

**Stoholm, Peder; Henriksen, Ulrik Birk; Ahrenfeldt, Jesper; Cramer, Jesper; Dietrich, Jørn; Christiansen, Knud; Krogh, Jørgen**

*Publication date:*  
2011

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Stoholm, P., Henriksen, U. B., Ahrenfeldt, J., Cramer, J., Dietrich, J., Christiansen, K., & Krogh, J. (2011). LT-CFB. Videreudvikling og kommerialisering: Slutrapport for PSO-ForskEI projekt nr. 2007-7504. DFBT.

## **DTU Library** Technical Information Center of Denmark

---

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



---

Slutrapport for PSO-ForskEl projekt nr. 2007-7504

# LT-CFB

## Videreudvikling og kommercialisering

Peder Stoholm, DFBT  
Ulrik Henriksen og Jesper Ahrentfeldt, Risø-DTU  
Jesper Cramer, Jørn Dietrich og Knud Christiansen, FORCE Technology  
Jørgen Krogh, Anhydro A/S

**December 2011**

DFBT - FORCE Technology - Anhydro - Risø-DTU

## Forord

I det her rapporterede PSO-ForskEl projekt nr. 2007-7504 er udviklingen af LT-CFB forgasseren blevet videreført af projektpartnerne Risø-DTU, FORCE Technology, Anhydro og DFBT. Udgangspunktet var PSO-ForskEl projekt nr. 4833, hvori der på DTU blev gennemført forsøg med en ca. 10 gange opskaleret (ca. 500 kW indfyret) LT-CFB forgasser. Udgangspunktet for 500 kW anlæggets design var erfaringerne fra det første og relativt simple 50 kW forsøgsanlæg, der fra 1999 ligeledes blev bygget og afprøvet på DTU. Dette med støtte fra først Energistyrelsen og dernæst PSO-ordningen.

Udover det aktuelle projekts fire nævnte projektpartnere deltog også DONG Energy i den forudgående indsats vedr. LT-CFB forgasseren, herunder forsøgene med 500 kW anlægget. Med henvisning til at næste skridt burde være demonstration omfattende en yderligere markant opskalering og at dette ikke var interessant for DONG Energy under de dengang gældende rammebetingelser, ønskede DONG Energy ikke en rolle som partner i PSO-2007 projektet. I løbet af projektperioden er der imidlertid sket en ændring af både væsentlige danske rammebetingelser og DONG Energys strategi, hvorfor DONG Energy nu har overtaget og investerer betydelige ressourcer i LT-CFB teknologien, som dog nu betegnes "Pyroneer". Som led i beslutningsprocessen har DONG Energy, Risø-DTU og DFBT gennemført det for nyligt afsluttede PSO-ForskEl projekt nr. 2009-10267 "LT-CFB demonstration plant, Phase 1" og på basis af positive konklusioner støttes den videre indsats af både PSO-ForskEl-2010 og ForskVE 2010 -programmerne. Indsatsen omfatter demonstration af et 6 MW (indfyret) samfyringsanlæg, der nu allerede er opført og indledende afprøvet på Asnæsværket i Kalundborg.

Ovennævnte meget positive udvikling kunne ikke forudses i det nærværende projekts planlægningsfase. Trods LT-CFB forgasserens primære sigte imod anvendelse på kraftværker var opgaven derimod bl.a. at afsøge mulighederne for etablering af et demoanlæg udenfor DONG Energys regi. Heldigvis er DONG Energys sigte med teknologien ikke begrænset til egne anlæg, hvorfor der er gode muligheder for, at ét eller flere af de tre i denne rapport betragtede demoanlæg også vil kunne realiseres. Ingen andre end denne rapport forfattere kan dog tages til indtægt for sådanne vurderinger i nærværende slutrapport.

Fra rapportens forfattere skal lyde en stor tak dels til en række kollegaer og studerende, som endnu engang har bidraget med bl.a. døgnbemanding af forsøg og andre former for ekstraordinær indsats og dels til en række eksterne samarbejdspartnere, som projektet har været i godt samspil med. Disse er ikke mindst Innovation Management Aps, DJF (Aarhus Universitet), Aalborg Universitet, Kommunekemi, DONG Energy, Dall Energy og ECN (Holland). Også mange tak til Siemens A/G for donering af et state of the art touch screen kontrolpanel til 100 kW LT-CFB forsøgsanlægget. Sidst men ikke mindst mange tak til Energinet.dk for opbakningen til projektet.

På projektpartneres vegne,



Peder Stoholm, DFBT Aps

## Indholdsfortegnelse:

1.	Indledning .....	1
1.1	Baggrund .....	1
1.2	Formål .....	3
1.3	Læsevejledning .....	4
2.	Konklusion .....	4
3.	Kort om LT-CFB forgasseren .....	5
3.1	LT-CFB konceptet .....	5
3.2	Primære fordele .....	7
3.3	Tidligere LT-CFB forsøgsanlæg .....	8
3.4	Afprøvede brændsler .....	9
4.	Procesteknisk videreudvikling og dokumentation .....	11
4.1	Indledning .....	11
4.2	Nyt 100 kW LT-CFB forsøgsanlæg .....	11
4.3	Gaskøling, -filtrering og -reforming .....	14
4.4	Proceskontrol og dataopsamling .....	16
4.5	Anlægs- og procesforbedringer .....	16
4.6	Gennemførte 100 kW forsøg .....	17
4.6.1	Oversigt .....	17
4.6.2	Bed-materiale .....	18
4.6.3	Brændsler, tilberedning og indfødning .....	19
4.6.4	Varighed og driftsstabilitet .....	20
4.6.5	Masse og energibalancer .....	25
4.6.6	Kokstab og termisk effektivitet .....	28
4.6.7	Gassammensætning .....	29
4.6.8	Gasrensning .....	33
4.6.9	Partiel oxidation (POX) .....	36
4.6.10	Udvidet automatisering og proceskontrol .....	37
4.6.11	Agglomerering og K-ophobning .....	38
4.6.12	Makronæringsstoffer i aske .....	39
4.6.13	Dioxin .....	39
4.7	Udvikling af beregningsværktøjer .....	39
4.8	Delkonklusion .....	39
5.	Afklaring af mulige anvendelser og demo-anlægsprojekter .....	40
5.1	Indledning .....	40
5.2	Mulige anvendelser .....	41
5.3	Brændsler og anlægsstørrelser .....	43
5.4	Identifikation og vurdering af mulige demoanlæg .....	45
5.5	100 kW forsøg på demo-brændsel .....	49
5.6	Markedsanalyse .....	50
5.7	Delkonklusion .....	50
6.	Initiering af forretningsmæssig udvikling .....	51
6.1	Indledning .....	51
6.2	Forretningsplan .....	52
6.3	Overdragelse til DONG Energy .....	52
6.4	Delkonklusion .....	54

7. Formidling.....	55
8. Referenceliste.....	56

De følgende 3 bilag foreligger særskilt:

Bilag 1: LT-CFB - Anvendelsesmuligheder og opfølgning, - CP Kelco

Bilag 2: LT-CFB - Anvendelsesmuligheder og opfølgning, - Østkraft

Bilag 3: LT-CFB - Anvendelsesmuligheder og opfølgning, - DAKA

# 1. Indledning

## 1.1 Baggrund

Både klima- og energiforsyningshensyn har medført en voksende interesse for teknologier, der kan gøre det muligt at reducere anvendelsen af fossile brændsler. Dertil kommer, at modstanden imod kernekraft på det seneste er vokset efter de opståede store problemer på et japansk kernekraftværk. For øvrigt bidrager såvel udviklingen i lande som Indien og Kina som øget anvendelse af energieffektive men elforbrugende løsninger som varmepumper og elbaseret transport til at øge behovet for ny el-produktionskapacitet.

Især i kombination kan de ikke-brændselsforbrugende el-produktionsteknologier vand-, vind- og bølgekraft, solceller o.l. levere et stort og nødvendigt forsyningsbidrag. Hvis sådanne regionalt ulige fordelte og produktionsmæssigt svingende energikilder skulle stå alene, ville det imidlertid stille meget store og dyre krav om stor overkapacitet, transport af el over store afstande og/eller energilagring.

Både alt det nævnte og fordelene af høj totaleffektivitet taler for, at det også prioriteres at opnå en betydelig, stabil og regulerbar el-produktion på basis af biomasse og affald. Specielt er det på kort og mellemlang sigt interessant at begrænse investeringsbehovet ved så vidt muligt at nyttiggøre eksisterende kraftvarmeværker og fjernvarmenet.

I store dele af verden er de bæredygtigt udnyttelige biomasseresurser imidlertid beskedne i forhold til energiforbruget, ligesom biomasse også vil blive efterspurgt til erstatning af især mineralisk olie anvendt til fremstilling af flydende brændstoffer, plast mv..

En stor del af den bæredygtigt anvendelige danske træressource er allerede disponeret, om end den kunne anvendes mere effektivt end hovedsageligt blot til fjernvarme og brændeovne. Heldigvis er det muligt at importere store mængder træ over store afstande, men der er også såvel økonomiske som miljømæssige grunde til at begrænse importen mest muligt.

Det er således interessant også at kunne benytte de lokale forekomster af fyringsteknisk vanskeligere og/eller mere lavværdige biobrændsler og affaldsprodukter til effektiv og kontrollerbar produktion af primært el og sekundært varme. Yderligere hovedmotiver til anvendelse af sådanne biomasser og affaldsprodukter kan være lavere brændselsudgifter samt billigere og mere miljøvenlig affaldsbortskaffelse.

I Danmark er det oplagt at øge energiudnyttelsen af såvel overskudshalm som en række andre organiske restprodukter, der mange steder medfører en næringsstofmæssig overbelastning af vandmiljøet eller transporteres til destruktion over store afstande, herunder i udlandet. Der kan være tale om næringsstofmæssigt regionalt overskydende gylle- og biogasrestfibre, spildevandsslam, fareklassificeret kødbenmel samt andre restprodukter fra landbruget og fødevarerindustrien.

I nogle tilfælde er det også interessant, at en termisk processering vil medføre en nedbrydning af både lugtstoffer, sygdomskim og andre miljømæssigt problematiske organiske indholdsstoffer, ligesom en foraskning kan danne basis for en evt. påkrævet udsortering af tungmetaller.

For bedre at få biomasseresursen til at række og som led i bestræbelserne på at mindske udvaskningen af næringsstoffer til vandmiljøet, er det også interessant at dyrke særligt produktive energiafgrøder som pil. Sådanne unge energiafgrøder vil dog ligesom halm kunne medføre problemer i kraftværkskedler. Dette grundet et - i forhold til mere sædvanlige træbrændsler - typisk forhøjet indhold af KCl.

LT-CFB (LavTemperatur Cirkulerende Fluid Bed) forgasseren har med en langsom start for små midler været under udvikling siden en tilsvarende patentansøgning blev indleveret af DFBT [Stoholm. 1998]. Sigtet var primært at skabe bedre mulighed for effektiv anvendelse af fyringsteknisk problematiske brændsler som halm på de eksisterende højeffektive kulfyrede kraftværker. Her kan LT-CFB forgasseren anvendes som en meget brændselsfleksibel og askeseparerende såkaldt forkoblet forgasser, der i høj grad friholder kedlerne og dermed også kulasken for bl.a. kalium.

Både LT-CFB forgasserens lave og velkontrollerede procestemperaturer og det forhold, at bioasken i høj grad opnås som en separat strøm, giver gode forudsætninger for nyttiggørelse af de i bioasken indeholdte næringsstoffer. Det er også en mulighed at producere kulstofrig aske eller såkaldt biokoks, der kan benyttes til forbedring af især visse typer landbrugsjord. Dette samtidig med at kulstof deponeres i dyrkningslaget på en form, der er mere stabil end kulstof indeholdt i f.eks. nedmuldet halm, gødnings- og biogasrestfibre.

For også at kunne benytte LT-CFB forgasseren til ikke-asketolerante olie og gasfyrede kedler, har det længe været ønskeligt at få afprøvet muligheden for at fremstille en stort set støvfri men stadig tjæreholdig gas. Dette baseret på en forholdsvis simpel delvis afkøling af LT-CFB gassen og derefter posefiltrering umiddelbart over gassens relativt lave tjæredugpunkt.

Denne moderate form for gasbehandling er også et godt udgangspunkt for termisk og/eller katalytisk reformering med sigte på anvendelse af den reformerede gas til bl.a. forbrændingsmotorer, brændselsceller, distribution (og lagring) via naturgasnettet samt produktion af såvel flydende brændstoffer som dyrere kemikalier.

Det har også været overvejet at benytte den pyrolysebaserede LT-CFB forgasser til produktion af såkaldt bioolie, men et sådant nyt udviklingsspor har foreløbigt ikke kunnet etableres.

Den praktiske afprøvning af LT-CFB forgasseren i den mere basale form startede på DTU i 1999, hvor et første lille 50 kW forsøgsanlæg blev bygget og begyndende afprøvet. Frem imod 2004 blev der, - ligeledes på DTU - bygget et 10 gange større, keramisk foret, delvist automatiseret og på flere andre måder forbedret og mere realistisk konstrueret forsøgsanlæg. Efter den første idriftsætning i december 2004 (på halm fra Kolindsund med ca. 11 % aske!) blev dette 500 kW anlæg afprøvet og samtidigt yderligere forbedret i perioden frem til september 2006 [Glar Nielsen, 2007 og Stoholm et al, 2007]. Derefter

skønnede både projektpartnerne og Energinet.dk, at demonstration i en passende markant større skala samt kommercialisering burde være de væsentligste næste skridt.

Et demonstrationsanlæg svarende til den primært tilsigtede anvendelse var imidlertid ikke realistisk i DONG Energys regi. Dette primært grundet de dengang gældende danske rammebetingelser for samfyring med fyringsteknisk vanskelig biomasse og især affaldsklassificerede brændsler. Den bedste mulighed for at fortsætte indsatsen var således at arbejde videre med procesudviklingen på DTU og samtidigt afsøge mulighederne for realisering af et opskaleret demonstrationsanlæg i en anvendelse med bedre rammebetingelser.

Til både den videre procesudvikling og afprøvning af nye brændsler og herunder mulige demo-brændsler, ville det være en fordel at få etableret et nyt lettere håndterligt og gerne flytbart forsøgsanlæg. Fremskaffelse og håndtering af mange ton brændsel og aske i forbindelse med 500 kW anlæggets drift var således et problem, ligesom potentielle og perspektivrige LT-CFB-brændsler som udsorteret husholdningsaffald, spildevandsslam og fareklassificeret kødbenmel ikke var velsete i forsøgsområdet på DTU.

Projektpartneren Anhydro var efterhånden indstillet på at spille en mere fremtrædende rolle, herunder at levere en passende forsigtigt opskaleret forgasser med kommercielle garantier for selve forgasseren. Som udgangspunkt var termisk forgasning dog ikke et fokusområde for Anhydros og selskabet ønskede ikke at indgå i en rolle som ansvarlig leverandør af mere komplette kraftværksbetonede LT-CFB anlæg. Det stod således klart, at der hurtigst muligt skulle findes et mere slagkraftigt og kommercielt sigtende forretningsmæssigt set-up med deltagelse af yderligere én eller flere risikovillige aktører.

## 1.2 Formål

På den ovenfor beskrevne baggrund blev projektets formål defineret som følger:

”Overordnet skal projektet sikre den fortsatte udvikling af LT-CFB forgasseren, befordre en snarlig demonstration i lille fuldskala samt skabe et forbedret udgangspunkt for realisering af teknologiens kommercielle muligheder. Projektet skal således videreføre arbejdet med LT-CFB forgasseren på især følgende 4 måder (med planlagt nærmere indhold indikeret i parenteserne):

1. Procesteknisk videreudvikling og dokumentation (inkl. videreudvikling af beregningsværktøjer og bygning af et let flytbart 100 kW pilotanlæg til korttidsforsøg samt gennemførelse af mindst ét forsøg med sigte på at afklare dels en udvalgt væsentlig mulighed for optimering af selve forgasseren og dels afkøling og højeffektiv filtrering af produktgassen).
2. Afklaring af mulige anvendelser og demo-anlægsprojekter (inkl. opdatering mht. mulige systemkoncepter og brændsler, opfølgning på henvendelser, identifikation, screening og selektering af demo-anlæg, gennemførelse af en markedsanalyse for fortrinsvis mindre og simple anlæg, samt gennemførelse af yderligere mindst ét 100 kW forsøg med ét hidtil uafprøvet og perspektivrigt brændsel, som f.eks. industriel organisk fiberrest, tørret spildevandsslam eller kødbenmel).



3. Initiering af forretningsmæssig udvikling (bl.a. bidrag til forretningsplan samt etablering af forbedrede rammer for et kommercielt sigtende samarbejde mellem aktuelle og nye partnere, og herunder gerne investorer og så vidt muligt mindst én "tung" partner med kapacitet til international levering af kraftværksbetonede anlæg). Specielt skal der hurtigt etableres et grundlag for realisering af et demonstrationsanlæg for hvilket et beslutningsgrundlag søges etableret under ovenstående pkt. 2.
4. Formidling af projektets resultater samt LT-CFB forgasserens status, fordele og anvendelsesmuligheder. "

### **1.3 Læsevejledning**

Efter en kort introduktion vedrørende LT-CFB forgasseren i kapitel 3 er rapporteringen disponeret svarende til de ovennævnte 4 hovedformål i kapitlerne 4-7.

På dette sted skal det også bemærkes, at den oprindelige meget teknisk afledte konceptbetegnelse "LavTemperatur Cirkulerende Fluid Bed" og den tilsvarende forkortelse "LT-CFB" for nyligt er blevet afløst af betegnelsen "Pyroneer", der for de fleste er lettere at udtale og huske. Årsagen til at den nu afløste betegnelsen "LT-CFB" fortsat benyttes i denne rapportering er blot, at navnet "LT-CFB" blev benyttet på ansøgningstidspunktet, og at projektarbejdet stort set var afsluttet og rapporteret forud for navneskiftet.

## **2. Konklusion**

Projektets formål er blevet opfyldt idet:

- Et nyt let flytbart 100 kW LT-CFB forsøgsanlæg som planlagt er blevet designet og etableret i Biomasseforgasningsgruppens (tidligere) forsøgshal på DTU. Senere er anlægget flyttet til Forskningscenter Risø
- Der er især slutteligt med succes gennemført 100 kW forgasningsforsøg i et omfang, der væsentligt overskrider det oprindeligt planlagte
- Flere procestekniske forbedringer af selve forgasseren er afprøvet, ligesom muligheden for videregående gasrensning baseret på rågaskøling og posefiltrering indledende er påvist
- En lang række mulige placeringer for et første demoanlæg i lille kommerciel skala er blevet overvejet og heraf er tre blevet nærmere evalueret. Dette gennem designstudier og økonomivurderinger og i samspil med de potentielle anlægsværter
- Blandt de tre udvalgte muligheder er et anlæg hos CP Kelco skønnet mest interessant og hensigtsmæssigt som et første demo-anlæg, hvilket er blevet bestyrket ved gennemførelse af 100 KW forgasningsforsøg med et repræsentativt restprodukt leveret af CP Kelco. En uheldsramt forlængelse af forsøget bør dog gentages og/eller forsøg i større skala supplerende gennemføres
- Med bistand fra konsulentfirmaet Innovation Management er der foretaget markedsanalyser og udarbejdet en forretningsplan for et tænkt nyt selskab med

deltagelse af en eller flere nye kapitalstærke aktører. Dette med sigte på demonstration og kommercialisering LT-CFB teknologien.

- En række formidlingsaktiviteter er gennemført.

Undervejs er projektets overordnede formål i høj grad blevet opfyldt på en uventet måde, idet LT-CFB -teknologien er blevet overdraget til DONG Energy, hvorefter et 6 MW LT-CFB demoanlæg i tilknytning til Asnæsværkets blok 2 nu allerede er opført og indledende afprøvet. Dette med en betydelig fortsat støtte fra Energinet.dk. Denne meget positive udvikling, kunne ikke forudses fra projektets start, men må ses som særdeles befordrende for LT-CFB teknologiens videre muligheder. DONG Energy har således den bedst tænkelige kombination af forhåndsviden om LT-CFB forgasseren, mange vigtige tilstødende faglige kompetencer, anlægsmæssige udgangspunkter og de nødvendige økonomiske ”muskler”. Dertil kommer, at LT-CFB forgasseren passer meget fint ind i DONG Energys aktuelle intentioner i retning af en hurtig omlægning til næsten udelukkende vedvarende energiproduktion.

DONG Energy må forventes først at ville prioritere behovene for LT-CFB anlæg på egne værker. Dertil er der bl.a. behov for en hurtig videre opskalering. DONG Energys sigte med LT-CFB teknologien er imidlertid ikke begrænset til selskabets egne værker, hvorfor de tre demo-anlægsmæssige muligheder, der er arbejdet med i det nærværende projekt, fortsat kan tænkes vurderet og evt. realiseret.

Bestræbelserne i retning af afprøvning på yderligere brændsler, procesoptimering, demonstration, videre opskalering, og kommercialisering er langt fra overstået, men indsatsen i nærværende projekt har suppleret grundlaget for de meget hensigtsmæssige videregående aktiviteter, der nu pågår i DONG Energys regi. Her er konceptets betegnelse for nylig blevet ændret fra "LT-CFB" til "Pyroneer", der for de fleste er lettere at udtale og huske.

### **3. Kort om LT-CFB forgasseren**

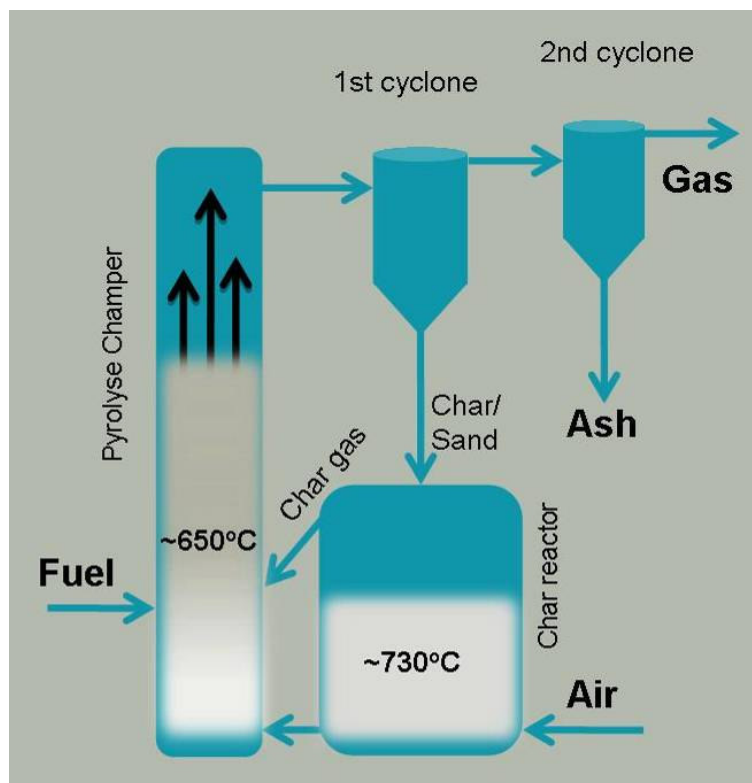
#### ***3.1 LT-CFB konceptet***

En simpel version af LT-CFB forgasseren fremgår af figur 1.

Brændslet introduceres i et hurtigt fluidiseret pyrolysekammer, hvori cirka 80 % af brændselspartiklernes organiske del næsten momentant går på gasform. Den resterende koks og inertpartikler medrevet af pyrolysekammerets afgående gasstrøm separeres af en primær partikelseparator og føres ned i en koksfor-gasser. På denne måde kan koksomsætningen tilgodeses med en stor opholdstid i den forholdsvis store og langsomt fluidiserede koksfor-gasser. Derved kan den maksimale proces-temperatur typisk holdes under 750 °C og følgelig kan problematisk askesmeltning undgås.

Også den endnu lavere temperatur i pyrolysekammeret bidrager til at holde delvist fordampelige stoffer som KCl på fast form, hvilket er en forudsætning for, at disse stoffer

simpelt kan separeres sammen med asken. Dette f.eks. blot ved hjælp af den sekundære varme cyklon vist i figur 1.



**Figur 1: LT-CFB forgasningskoncept med simpel varm gasrensning i en sekundær cyklon.**

Den lave og velkontrollerede temperatur samt kort opholdstid for pyrolysegassen betyder endvidere, at man stort set undgår dannelse af tunge tjærestoffer med højt dugpunkt og således også miljømæssigt problematisk PAH i den producerede aske.

Når der f.eks. til samfyring på naturgasfyrede kedelanlæg kræves en meget støvfattig gas, er et højeffektivt partikelfilter nødvendigt. For ikke at være henvist til brug af meget dyre og ømfindige såkaldte candle-filtre, behøves en køling forud for filtreringen. Her er det en fordel, at LT-CFB gassen stort set ikke rummer hverken delvist fordampede askestoffer eller tunge tjærestoffer med højt dugpunkt. Det er derfor muligt at afkøle gassen til nær tjæredugpunktet (f.eks. 300 °C) for derefter at benytte almindeligt tilgængelige partikelfiltre med passende temperaturbestandige poser.

Når der således kan opnås en stort set partikelfri gas, er der også bedre mulighed for efterfølgende at reformere gassen med sigte på anvendelser, der yderligere kræver, at gassen er meget tjærefattig.

Blandt LT-CFB forgasserens yderligere anvendelsesmuligheder er diverse typer combined cycle anlæg samt produktion af syntesegas og/eller såkaldt bioolie og/eller biokoks.

Tidligere omtaler af LT-CFB forgasningskonceptet kan bl.a. findes i [Glar Nielsen , 2007], [Stoholm et al, 2007] og i den af DFBT indleverede patentansøgning [Stoholm, 1998], medens løbende opdaterede informationer fremgår af den af DONG Energy oprettede hjemmeside [www.pyroneer.com](http://www.pyroneer.com).

### **3.2 Primære fordele**

LT-CFB forgasseren har flere egenskaber af overordnet betydning. Disse omfatter brændselsfleksibilitet, adgang til simpel gasrensning og bevaring af næringsstoffer på umiddelbart plantetilgængelig eller syreoplukkelig form. Yderligere kan nævnes mulighederne for hurtig start og stop, lavt kulstoftab samt lavt indhold af PAH i asken. De fleste af disse egenskaber er ikke en selvfølge for fluid bed -baserede forgassere.

Brændselsfleksibiliteten er vigtig, fordi en stor del af de bio- og affaldsbrændsler, der er nødvendige for at etablere en både tilstrækkelig, stabil, bæredygtig og mere CO<sub>2</sub>-neutral energiforsyning, ofte medfører problemer i energiproducerende anlæg. Problemerne er ikke mindst udtalte, når der fyres med unge landbrugsafledte brændsler i højeffektive el-producerende anlæg i rationel og økonomisk skala, dvs. i kraftværksregi.

Simpel gasrensning er også vigtig, fordi gasbehandlingen efter de fleste kendte biomasse-forgassere, og herunder endda også forgassere til relativt uproblematisk træbrændsler, har vist sig at være meget problemfyldt. Dette gælder ikke mindst, når man - som de fleste biomasseforgasningsaktører - fra starten sigter på noget af det sværeste, så som at producere gas til motor-generatoranlæg. Her er den store udfordring varigt at opnå et meget lavt tjæreindhold i gassen. Der findes en række lovende forgasningsbaserede løsninger, men ikke hvis kravene også er stor størrelse og brændselsfleksibilitet, så f.eks. også halm med højt indhold af KCl kan benyttes.

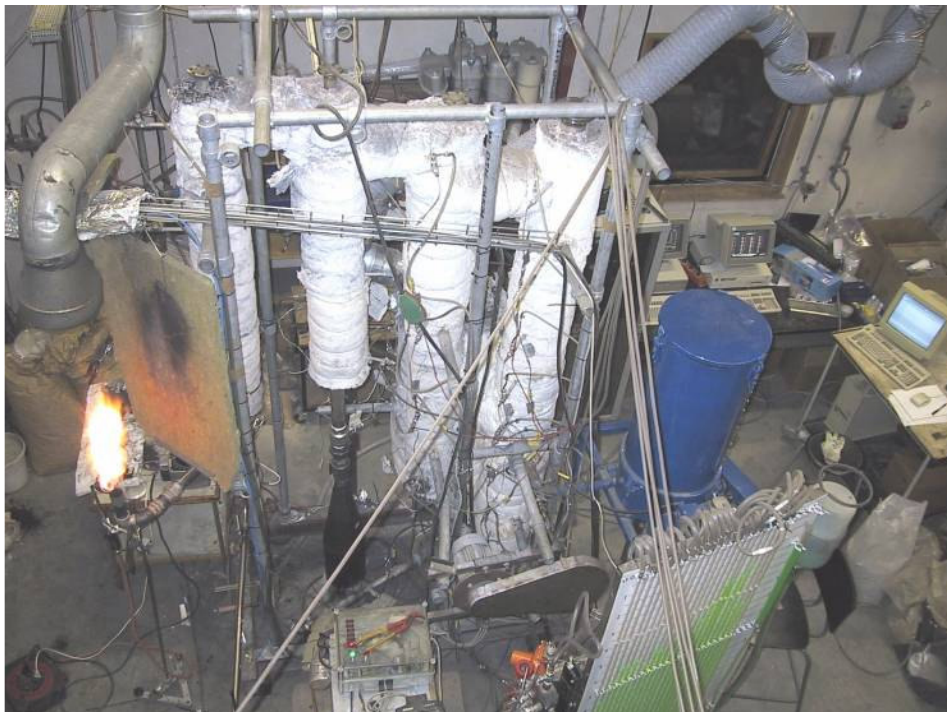
Når LT-CFB forgasseren anvendes til det oprindeligt primært påtænkte formål, nemlig samfyring med biomasse og affald på eksisterende kulfyrede kraftværker, er det en stor fordel, at kulkedlen og således også kulasken i høj grad kan friholdes for stoffer som K og P. Selv ved blot varm cyklonrensning er der derfor mulighed for at vælge en markant højere andel af indfyret biobrændsel og/eller højere dampdata og deraf følgende højere el-virkningsgrad. For større kedler forudsætter en høj bio-andel dog naturligvis en tilstrækkelig opskalering af LT-CFB forgasseren og/eller anvendelse af flere parallelle forgassere.

Gasrensning blot vha. af en eller flere ”varme” cykloner er en simpel og umiddelbart tilgængelig mulighed, men ved en mere effektiv filtrering af LT-CFB gassen øges de fordele, der kan opnås som følge af separationen af bioaske, ligesom det bliver muligt at benytte LT-CFB gassen til mindre asketolerante formål. F.eks. forventes også naturgaskedler at kunne benyttes til biomasse og affald.

Hvis der ved effektiv filtrering kan opnås en stort set støvfri produktgas, kan der endvidere lettere foretages en reformering af produktgassen, hvorved der åbnes en række yderligere og til dels allerede nævnte anvendelsesmuligheder.

### 3.3 Tidligere LT-CFB forsøgsanlæg

Der er tidligere gennemført en lang række forsøg med to LT-CFB forsøgsanlæg på DTU i Lyngby. Det første anlæg var udlagt for en indfyret brændselseffekt på 50 kW, medens det næste var på 500 kW. De to forsøgsanlæg, der ses i figur 2 og 3, er blevet beskrevet i tidligere publikationer. Se f.eks. [Stoholm et al, 2007].



**Figur 2: Det oprindelige lille og simple 50 kW LT-CFB forsøgsanlæg på DTU (Brændsel doseres fra den blå silo th. og gassen affakles tv.)**

En første afprøvning og optimering af forgasningskonceptet blev opnået med 50 kW anlægget, hvorefter resultaterne fra 500 kW anlægget påviste muligheden for denne første markante opskalering. Med 500 kW anlægget blev det også vist, hvordan processen kan etableres i en fuld keramisk foret og således langtidsholdbar konstruktion. Endelig blev det PLC-regulerede 500 kW anlæg efterhånden delvist automatiseret, ligesom der blev fundet praktiske løsninger på håndtering af store mængder brændsel og aske samt effektiv affakling af gassen.



**Figur 3: 500 kW LT-CFB anlægget på DTU (I skibscontainerne til venstre og højre er henholdsvis brændselslager og kontrolrum)**

### **3.4 Afprøvede brændsler**

De to tidligere 50 og 500 kW LT-CFB forsøgsanlæg var forud for det nærværende projekt afprøvet på følgende brændsler:

- Træ (som dog er udenfor fokusområdet og uproblematisk, hvorfor forsøget var meget kortvarigt).
- Flere typer dansk halm med op til meget højt indhold af aske, K og Cl.
- To typer tørrede svinegyllefibre fremstillet ved henholdsvis centrifugering og skruepresning.
- Delvist tørret hønsegødning med højt indhold af både aske, P, K og Cl.
- To typer centrifugerede og tørrede biogasrestfibre fra henholdsvis et gårdbiogasanlæg på en svinefarm og et stort fællesbiogasanlæg. I førstnævnte tilfælde var askeindholdet på tørstofbasis hele 44 %

Som det fremgår af den mere opdaterede oversigt over gennemførte LT-CFB forsøg i tabel 1 og som uddybet i det følgende, er listen over afprøvede brændsler blevet udvidet ved gennemførelse af 100 kW forsøg på såvel yderligere halm som restfibre fra CP Kelcos produktion af fortykkelsesmidlerne pektin og carrageenan, dvs. tørrede restfibre fra henholdsvis citrusskaller og tang.

Frem imod sommeren 2011 er der endvidere gennemført halmforsøg med 6 MW demoanlægget på Asnæsværket. Disse forsøg vil dog i stedet blive rapporteret i regi af det dertil relaterede PSO-2010 projekt.

**Table 1: Oversigt over hidtidige LT-CFB forsøg med alle de tre første LT-CFB forsøgsanlæg**

Anlæg Periode	Forsøgsbrændsel	Timer >700 °C og (antal forsøg)	Gasrensning	Bemærkninger
50 kW 1999- 2004	Træ Halm (DW95, 1.8 % K 1,2 % Cl) Halm (DW02, 12 % aske) Svinegødning Høsegødning (kun tørret til 22 % fugt)	2 (1) 82 (mange) 10 (1) 12 (1) 16 (2)	SC (=Sek.Cyklon) SC SC SC SC	Stabile temperaturer Forbedring af C-omsætning mv. Ref. for opskalering
500 kW 2004- 2006	Halm (DW02 12 % aske) Svinegødning Svine-biogasrestfibre (44 % aske) Restfibre fra fællesbiogasanlæg	35 (2) 42 (1) 59 (1) 39 (1)	SC SC SC SC&TC(=Tertiær Cyklon)	650 kW, HHV input ~98 % asketilbageholdelse
100 kW 2009- 2010	Halm (2009), kun snittet Halm (2009, piller) Citrus- & tangrestfibre Halm (2010)	5 (2) 67 (3) 37 (2) 52 (1)	SC SC, køler og filter SC, køler og filter SC, køler og filter og POX	Indfødningsproblemer Filtrering ved ~300 °C (over tjæredugpunkt) Nu også med partiel oxidation (=POX)

Den samlede driftstid ved koksreaktorer temperaturer over 700 °C, (eksklusive opvarmning og afkøling) er godt 450 timer, hvorunder der i alt er blevet forgasset cirka 35 ton brændsel, hvoraf hovedparten i 500 kW anlægget. Dertil kommer, at ca. 240 ton halm allerede nu er blevet forgasset i 6 MW demoanlægget.

For opnåelse af stabil indfødnings er de fleste forsøg med de tre mindre forsøgsanlæg på DTU gennemført på groft knuste brændselspiller. Til enkelte forsøg er dog benyttet groft formalet (ikke pelleteret) halm, medens et enkelt 50 kW forsøg blev gennemført på kun delvist termisk tørret gødning fra æglæggende høns.

Der er i alle tilfælde kun benyttet almindelig kvartssand som bed-materiale (ingen additiver) og ofte er efterfølgende forsøg på samme type brændsel gennemført med genpåfyldt bed-materiale fra tidligere forsøg. Genpåfyldningen af bed-materiale er foretaget for at fremme ophobningen af bl.a. K i bed-materialet for således at fremme opnåelsen af steady state -betingelser og for bedre at påvise LT-CFB forgasserens store brændselsfleksibilitet.

## 4. Procesteknisk videreudvikling og dokumentation

### 4.1 Indledning

For at fortsætte den procestekniske udvikling i forlængelse af den resursekrævende indsats baseret på 500 kW anlægget og for fortsat at kunne gennemføre korttidsforsøg med yderligere LT-CFB –brændsler, er der i projektet blevet designet og realiseret et nyt 100 kW forsøgsanlæg.

For også at kunne gennemføre forsøg på brændsler som udsorterede fraktioner af husholdningsaffald, spildevandsslam og fareklassificeret kødbenmel, der af miljømæssige årsager ikke har været velsete i forsøgsområdet på DTU, har det været en målsætning at udføre 100 kW anlægget på en måde, så det er let flytbart. Dette med henblik på at gennemføre forsøg med brændsler som de nævnte på lokaliteter, hvor brændslerne i forvejen håndteres og/eller hvor udrustning for miljømæssig forsvarlig afkast af den producerede gas allerede forefindes eller lettere kan etableres.

Udover procesteknisk videreudvikling af selve forgasningsprocessen og afprøvning af yderligere brændsler har målsætningen også været at afklare mulighederne for afkøling og højeffektiv filtrering af produktgassen. Hensigten med dette var både at befordre LT-CFB forgasserens muligheder i retning af såvel anvendelser, der kræver en stort set partikelfri gas (f.eks. naturgasfyrede kedler) som forsøg med reformering af den filtrerede men stadig stærkt tjæreholdige gas.

Endelig har formålet med denne første del af projektet været at opnå en fortsat udvikling af beregningsværktøjer til opstilling af masse- og energibalancer, udlægning af procestværsnit, evaluering af forsøgsdata, mv.

### 4.2 Nyt 100 kW LT-CFB forsøgsanlæg

Det i løbet af 2008 og foråret 2009 realiserede 100 kW forsøgsanlæg ses i Figur 3 og 4. Anlægget er her stadig placeret i Biomasseforgasningsgruppens tidligere forsøgshal på DTU, men efter gennemførelsen af de senere omtalte første otte forsøg er anlægget nu flyttet til Biomasseforgasningsgruppens nye forsøgshal på Forskningscenter Risø.

100 KW anlægget kan ses som en let opskaleret, procesteknisk opdateret og automatiseret afløser for det oprindelige 50 kW anlæg. Blandt forbedringerne af selve forgasseren kan nævnes, at der – ligesom i 500 kW forgasseren – er indskudt en såkaldt mellemreaktor i partikelreturkanalen mellem koksreaktoren og pyrolysekammeret. Derved opnås blandt andet en supplerende koksomsætning under omtrent samme procesbetingelser som i koksreaktoren.



Både den mindre størrelse og den meget lettere konstruktion i forhold til 500 kW anlægget gør det mindre ressourcerkrævende at gennemføre korttidsforsøg med såvel nye proces tekniske forbedringer som nye brændsler.



**Figur 4: 100 kW LT-CFB forgasser på DTU, med påbygget PLC-skab og fritstående kontrolpanel til højre, -set fra sydøst.**

Under drift doseres brændselsstrømmen af en omdrejningsreguleret dobbeltsnegl placeret i bunden af den blå brændselssilo, der bedst ses til højre i figur 5. Siloen er ophængt i vejeceller, hvorved genopfyldning automatisk kan startes og stoppes og hvorved brændselsstrømmen kan vurderes ud fra gradienten på det aftagende vejecellesignal.

Genopfyldning af brændselssiloen med (sædvanligvis) knuste brændselspiller til maksimalt fire til fem timers drift kan typisk foretages på en til to minutter. Ved hyppigere påfyldninger opnås dog fordele af kortere fyldetid og mere konstant brændselsdosering. Genopfyldningen foretages ved hjælp af en snegl, der - som vist i figur 6 - henter brændslet fra et simpelt og manuelt genopfyldt påslag. Der øses ihærdigt til påslaget medens genopfyldningen pågår og påslaget fyldes helt forud for næste genopfyldning af brændselssiloen.

En forskel i forhold til det helt kontinuerligt fungerende 500 kW anlæg er, at 100 kW anlæggets brændselsindfødningsystem foreløbigt ikke omfatter en slusesilo, hvorfor driften kortvarigt afbrydes under genopfyldning af brændselssiloen. Årsagen er, at der under drift er overtryk i brændselssiloen. Forstyrrelsen som følge af afbrydelsen er dog minimal, idet driften kan genoptages med de forud for brændselpåfyldningen indstillede driftsparametre (f.eks. 100 % last) på blot nogle få sekunder.



**Figur 5: 100 kW LT-CFB forgasser på DTU, med brændselsindfødningsilo (blå øvre) og asketønde (blå nedre) - set fra 1. sal i forsøgshallens nordlige ende.**



**Figur 6: Påslag til genopfyldning af brændselssilo**

100 kW anlægget er foreløbigt ikke forsynet med en dampgenerator. Når påkrævet for opnåelse af tilfredsstillende koksomsætning doseres i stedet blot (ikke forud fordampet) vand. Doseringen af vand sker fra en slangepumpe, der forsyner dels tre af syv luftlanser i bunden af koksreaktoren og dels en enlig luftlanse i bunden af mellemreaktoren. Som det senere vil fremgå, skete også vandtilførslen til koksreaktoren dog kun gennem en enkelt centralt placeret luftlanse under de først gennemførte forsøg.

Slangepumpens omløbstal og dermed vandtilførslen reguleres manuelt, men grundet sikkerhedshensyn startes og stoppes pumpen af PLC-en. Vandstrømmen kan beregnes, idet der pumpes fra en afvejet vandbeholder.

Ligesom i de to tidligere LT-CFB forsøgsanlæg sker der ingen udnyttelse af den producerede gas, idet denne – efter mindst cyklonrensning - blot affakles over forsøgshallens tag. Det krævede nogen indsats at få 500 kW faklen til at forbrænde effektivt så både stort forbrug af flaskegas til pilotbrændere og lugtgener af ufuldstændigt forbrændt tjære til sidst kunne undgås. Også disse erfaringer er naturligvis nyttiggjort ved design af 100 kW anlæggets fakkell.

100 kW anlæggets tilstræbte lettere flytbarhed i forhold til 50 kW forgasseren er bl.a. opnået ved:

- Kompakt design af selve forgasseren
- Ophængning af forgasseren med bl.a. tilhørende tavler for luft- og N<sub>2</sub> fordeling i et stift stålstativ, der let kan transporteres liggende på ladet af en almindelig lastbil
- Samling af næsten alle målesignaler ført ind i PLC-tavlen, som ligeledes er påbygget stativet

Det nævntes "foot print" er kun ca. 1,5 x 1,5 m, hvortil kommer det let demonterbare perifere udstyr til primært brændselsindfødning, gasbehandling, -analyse og -affakling samt proceskontrol og dataopsamling.

Forgasserens flytbarhed har i foreløbigt været en fordel under den nu gennemførte flytning fra DTU til Biomasseforgasningsgruppens nye forsøgshal på Forskningscenter Risø.

### **4.3 Gaskøling, -filtrering og -reforming**

Som noget nyt i forhold til de to tidligere forsøgsanlæg er 100 kW forgasseren blevet kombineret med gaskølings- og -rensningsudstyr placeret nedstrøms sekundærcyklonen. Der er tale om en fuldstrøms spraykøler, der kan by-passes, og derefter en konvektionskøler, et posefilter og til sidst et kammer, hvori gassen kan reformeres ved partiel oxidation (POX).

Spraykøleren er designet og afprøvet som led i et parallelt forløbende Eranet projekt, der fra dansk side var ledet af firmaet Dall Energy. En beskrivelse af spraykøleren og de dermed opnåede resultater fremgår af Eranet-projektets slutrapport [Zwart et al, 2010].

Konvektionskøleren, posefilteret og POX-kammeret gennemstrømmes kun af en mindre del af produktgassen, som efter en centrifugalblæser genforenes med hovedgasstrømmen. Delstrømmen gennem konvektionskøleren, posefilteret og POX-kammeret måles ved hjælp af en justerbar blænde (en på forhånd kalibreret spadeventil) og delstrømmen reguleres (fastholdes) ved omdrejningsregulering af centrifugalblæseren.

I konvektionskøleren gennemstrømmer gassen et rør, der i modstrøm køles udvendigt af elektrisk forvarmet luft. Den justerbare elektriske forvarmning af køleluften modvirker kondensering af tjære til sidst i konvektionskøleren.

Posefilteret, der ses i Figur 7, er udvendigt på stål casingen forsynet med el-varmebåndler og isolering. Filtret rummer en enkelt glasfiberbaseret pose fra firmaet 3M. Som maksimal anvendelsestemperatur anføres godt 370 °C.

Under drift kan posen renses ved manuelt aktiveret stødvis tilbageskylning med nitrogen.



**Figur 7: Delstrøms posefilter tilsluttet 100 kW LT-CFB anlægget på DTU.**

I et efterfølgende ligeledes udvendigt el-tracet og isoleret "POX-kammer" kan gassen reformeres ved tilførsel af en lille strøm af elektrisk forvarmet luft.

Gasrensningssystemet er yderligere beskrevet i slutrapporten fra PSO-Eranet-2008 projektet [Zwart et al, 2010].

#### 4.4 Proceskontrol og dataopsamling

Også PLC reguleringen (Siemens) og mulighed for næsten fuldautomatisk drift er et andet fælles træk med 500 kW anlægget. PLC-programvalg (opvarmning, drift, nedlukning, mv.) og manuel regulering af brændselsindfødningsraten samt delvist automask regulering af luft- og nitrogenstrømme mv. foretages fra anlæggets flytbare og berøringsfølsomme kontrolpanel. Panelet, der sås til højre i figur 4, er venligt doneret af Siemens.

Dataopsamling fra dels PLC-skabet (alle flow-, tryk-, temperatur- og vejecellesignaler) og dels de tilsluttede on-line gasanalyseinstrumenter (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>) sker ved hjælp af PC-programmet Labview. I Figur 8 herunder repræsenterer to Labview skærbilleder henholdsvis forgasseren og gasrensningssystemet. Til skærbilledet til højre, skal det bemærkes, at det store centralt (efter spraykøleren) viste fuldstrøms posefilter foreløbigt ikke er realiseret, men efter flytningen til Risø er det hensigten at udbygge forsøgsanlægget på bl.a. dette punkt.

<p><b>På grund af problematisk høj detaljeringsgrad er Labview skærbilledet udeladt i denne publicerede version af slutrapporten!</b></p>	<p><b>På grund af problematisk høj detaljeringsgrad er Labview skærbilledet udeladt i denne publicerede version af slutrapporten!</b></p>
---	---

**Figur 8: Labview – skærbilleder for forgasser (tv.) og gasrensningssystem (th.).**

#### 4.5 Anlægs- og procesforbedringer

Som delvist allerede nævnt, omfatter det nye 100 kW anlæg en række anlægs- og procesforbedringer i forhold til det bl.a. størrelsesmæssigt mest sammenlignelige oprindelige 50 kW anlæg:

1. Tilføjelse af gasbehandlingssystemet efter sekundærcyklonen
2. Etablering af et moderne PLC-baseret system for proceskontrol og sikkerhedsafslåsning
3. Etablering af et moderne Labview-baseret dataopsamlingsystem
4. Design med tanke for let flytbarhed
5. Tilføjelse af en mellemreaktor for supplerende koksomsætning og forbedret proceskontrol
6. Mere robuste lanser for inddysning af luft
7. Automatiseret kontrol af koksreaktortemperaturen
8. Automatiseret kontrol af forgasserens L-ben
9. Forbedret fakkell

Punkterne 1, 3, 4 og 8 er også nye og fordelagtige set i sammenligning med det forudgående 500 kW anlæg.

I forhold til 500 kW anlægget er den manglende keramiske foring begrænsende for hvor mange og lange forsøg, der kan gennemføres uden behov for reparation af især forgasserens hårdest belastede dele. Baseret på de tidligere erfaringer med 50 kW - anlægget er reparationsbehovet dog skønnet acceptabelt. Med i billedet hører, at forsøg af mere end få døgn's varighed nu i stedet vil kunne gennemføres med 6 MW demo-anlægget på Asnæsværket, som naturligvis også er keramisk foret med henblik på langtidsdrift.

100 kW anlægget bidrager naturligvis ikke så meget til at påvise muligheden for den nødvendige videre opskalering, men også dette behov tilgodeses nu af 6 MW anlægget.

## **4.6 Gennemførte 100 kW forsøg**

### **4.6.1 Oversigt**

Alle de i løbet af PSO-2007 -projektperioden gennemførte otte forsøg med 100 kW anlægget ses listet i tabel 2. Det første forsøg blev gennemført i maj- 2009 og det sidste i januar 2010.

Forsøgene 1 - 5 var på halm, forsøgene 6 og 7 på CP Kelcos restfibre, medens forsøg 8 igen var på halm.

Der har været tale om i alt cirka 160 driftstimer med  $>700$  °C i koksreaktoren. Under samtlige forsøg blev gasrensning som minimum foretaget vha. af forgasserens varme sekundære cyklon (benævnt "SC" i Tabel 2).

Fra og med forsøg nr. 4 blev en mindre delstrøm af den cyklonrensede gas kølet og posefiltreret. Dette gennem i alt ca. 36 timer. Under forsøg nr. 6 og 8 blev den posefiltrerede gas endvidere kortvarigt reformeret ved partiel oxidation (benævnt "POX" i Tabel 2).

Efter den følgende omtale af benyttede brændsler og bed-materiale følger en gennemgang af hovedresultaterne fra de otte forsøg. For at begrænse denne gennemgang til det mest interessante, er hovedvægten lagt på resultater fra projektets meget succesbetonede forsøg nr. 5 og 6, dvs. med henholdsvis halm og restprodukt fra CP Kelco. Retrospektivt kan halmforsøgene nr. 1 til 4 således i høj grad ses som blot en optakt til det lange og vellykkede halmforsøg nr. 5, hvorunder der drages nytte af de forud opnåede erfaringer, problemløsninger og procesoptimeringer og hvorunder der benyttes bed-materiale, der er blevet "modnet" under de forudgående fire forsøg. Dertil kommer, at driftspersonalets efterhånden voksende "overskud" til øget prøveudtagning mv. naturligt medfører, at de seneste gennemførte forsøg typisk er de mest interessante.

Desværre kan det sidste ikke siges om forsøg nr. 7, hvorunder der - grundet to uheldige omstændigheder - opstod nogle alvorlige driftsforstyrrelser som LT-CFB-processen ikke kan lastes for. Heldigvis blev LT-CFB forgasserens egnethed til forgasning af restproduktet fra CP Kelco i høj grad allerede påvist under forsøg nr. 6.

**Tabel 2: Oversigt over hidtidige forsøg med 100 kW LT-CFB anlægget**

Test nr. og dato	Brændsel	Timer v. >700 °C /timer m. posefilter	Gasrensning	Bemærkninger
1) 28. maj 2009	Halm, groft formalet	0 / 0	SC (=Sekundær Cyklon)	Tilstoppet gasafgang og indfødningproblemer
2) 24.-25. juni 2009	Halm, groft formalet	4,5 / 0	SC	Last begrænset til ca. 80 % af indfødningproblemer
3) 8.-9. juli 2009	Halm, knuste piller	22 / 0	SC, forsøg med spraykøler	Første lange og stabile forsøg med 100 kW anlægget. Slutteligt tilkalkede en luftlanse med vandtilsætning
4) 8.-9. sept. 2009	Halm, knuste piller	17 / 1	SC, køler og posefilter efter forsøg med spraykøler	Første korte forsøg med delstrøms-gaskøler og posefilter. Nye indfødningproblemer løst. Nu bedre fordelt men ustabil vandtilførsel.
5) 23.-24. sept. 2009	Halm, knuste piller	27 / 6	SC, køler og posefilter	Stabil og effektiv forgasning af halm, med første længerevarende forsøg med gaskøling og posefiltrering.
6) 17.-18. nov. 2009	Restfibre fra citruskaller og tang. Knuste piller	25 / 7	SC, køler, posefilter og POX	Stabil forgasning ved høj last. Delstrøms gaskøling og -posefiltrering igen succesfuldt.
7) 15.-16. dec. 2009	Restfibre fra citrus-skaller og tang. Knuste piller	12 / 6	SC, køler og posefilter	Gaslæk fra hul i primær cyklon dag 1. Dag 2 medførte en indlæst fejl i PLC-programmet både opstartsproblemer og en tilstopning nær gasfaklen.
8) 13.-15. Jan. 2010	Halm, knuste piller	52 / 16	SC, køler, posefilter og POX	Langvarig, stabil og effektiv forgasning af halm med høj asketilbageholdelse. Filterafgangskanal (men ikke køler og filter) tilstoppede efterhånden på grund af defekt elvarmebåndel.

Forsøg nr. 8, blev det hidtil længste og mest succesbetonede halmforsøg med 100 kW anlægget. Forsøget er dog overvejende - og fuldt ud for så vidt angår DTUs indsats - gennemført i regi af et senere iværksat DONG Energy -ledet PSO-2009 projekt. Dette for således at forbedre design- og evalueringsgrundlaget for 6 MW demoanlægget.

Årsagen til at forsøg nr. 8 alligevel i nogen grad også er omfattet af den aktuelle forsøgsrapportering er, at enkelte af PSO-2007-projektets eksperimentelle aktiviteter måtte udskydes til dette forsøg og derudover tjener resultater fra forsøget til sammenligning.

For den mere komplette rapportering af forsøg 8 henvises til PSO-2009 projektets slutrapport [Glar Nielsen et al, 2010].

#### 4.6.2 Bed-materiale

Som bed-materiale er der – ligesom under alle tidligere LT-CFB forsøg - kun benyttet almindelig kvartsand uden additiver.

Bed-materialet blev i størst muligt omfang genbrugt fra forsøg til forsøg på samme type brændsel, dvs. henholdsvis halm og restfibre fra CP Kelco. Der blev altså påfyldt en fuld ladning frisk sand (= ca. 130 kg) forud for forsøg nr. 1 og 6, medens bed-materialet, der blev genbrugt gennem halmforsøgene nr. 1-5, blev genpåfyldt forud for halmforsøg nr. 8.

For at lette opstarterne suppleres det brugte bed-materiale fra et forudgående forsøg dog typisk med 10 – 20 kg frisk sand. Under en problematisk opstart under forsøg nr. 4 blev der yderligere tilført 20 kg frisk sand som følge af tab af bed-materiale gennem primæracyklonen.

Påfyldning af supplerende frisk sand forud for opstarter skyldes også, at det i praksis er lettere at aftappe evt. overskydende bed-materiale end at fylde evt. manglende sand på den varme forgasser. (Et sandpåfyldningssystem er forenklet sparet væk.)

Også grundet den stadig længerevarende genbrug af genpåfyldt bed-materiale, er de sidst gennemførte forsøg generelt de mest interessante, idet langvarig drift med minimal udskiftning af bed materialet afspejles.

#### 4.6.3 Brændsler, tilberedning og indfødning

Efter problemfyldte og derfor kortvarige forsøg nr. 1 og 2 på groft formalet halm (udtaget før pelletering), blev der i stedet fremskaffet en portion pelleteret halm, som blev benyttet til forsøgene nr. 3, 4 og 5. Da denne portion halm var opbrugt efter forsøg nr. 5, blev der til forsøg 8 fremskaffet en ny portion halmpiller (hvoraf der henstår en rest til et evt. senere forsøg).

Til forsøg nr. 6 og 7 leverede CP Kelco et brændsel hidrørende fra fabrikkens produktion af pektin og carragenan, hvortil benyttes henholdsvis citrusskaller og tang. Brændslet var således en blanding af 75 % restfibre fra citrusskaller og 25 % fra tang (blanding på tørstofbasis), som blev tørret og pelleteret af Vemmetofte Grønt.

Forud for indfødningen blev brændselspillerne knust i en fodervalse til en maksimal flagegykkelse på cirka 3 mm, hvorved der opnås et stadig forholdsvist tungt produkt, der let lader sig dosere og indføde trods de beskedne lysninger i 100 kW anlæggets indfødningssystem. Det antages, at denne grad af neddeling medfører en opvarmningshastighed i pyrolysekammeret nær opvarmningshastigheden for løst oprevet halm, idet de største partikler modsvarer halms indhold af knæ og kærner. Det var således også tilstræbt, at den valgte brændselstilberedning - herunder graden af neddeling - var identisk med brændselstilberedningen forud for de fleste tidligere LT-CFB halmforsøg.

På basis af analysedata for de tre brændsler i tabel 3 kan ingen af brændslerne på forhånd siges at være særligt problematiske i relation til LT-CFB forgasningsprocessen. Vurderet på grundlag af indholdene af P, K og Cl må restproduktet fra CP Kelco på forhånd antages at medføre en lavere risiko for askesmelteproblemer, set i forhold til den benyttede halm.

Indholdet af aske er almindeligt for dansk halm og mere end det dobbelte i restfibre fra CP Kelco. Både brændslernes lave fugtindhold og de mere afvigende askeindhold er forventeligt afspejlet i brændværdierne.



Bemærk også, at det ud fra analyserne er forventeligt, at især restproduktet fra CP Kelco vil resultere i en aske med forholdsvis lavt indhold af næringsstofferne P og K pr kg aske.

**Tabel 3: Hoveddata for brændslerne anvendt til 100 kW LT-CFB forsøgene nr. 3 - 8**

Brændsel	Knuste piller, top size mm	Fugt, som modtaget %	Aske, på tør basis %	P / K / Cl på tør basis %	Brændværdi, nedre, som modtaget MJ/kg
Halm til forsøg nr. 3-5	3	7,7	5,2	0,051 / 1,0 / 0,4	16,01
Restfibre til forsøg nr. 6 og 7	3	8,3	13,1	0,082 / 0,5 / 0,061	14,92
Halm til forsøg nr. 8	3	8,3	5,9	0,1 / 1,1 / 0,24	15,82

#### 4.6.4 Varighed og driftsstabilitet

Forsøg nr. 1 og 2 var som allerede nævnt desværre problematiske og især forsøg nr. 1 blev derfor kun kortvarigt.

Allerede under opstarten i forsøg nr. 1 viste det sig, at flammeholderen (et simpelt kors fremstillet af fladstål) i bunden af faklen var monteret for tæt på gasrørets udmunding, ligesom også en utilstrækkelig isolering af gasrørets sidste del medvirkede til en tilstopning af gasafgangsrøret umiddelbart før udmundingen i faklen. En blokerende koksprop sammenkittet af kondenserende tjære blev således fastholdt af flammeholderkorset.

Disse problemer var løst forud forsøg nr. 2, men indfødningsproblemer forhindrede opnåelse af mere end 75-80 % last og forsøget på den kun formalede (ikke pelleterede) halm måtte utidigt afbrydes grundet en tilstopning i indfødningssystemet. Det blev vurderet at brændslets lave densitet var hovedårsdagen og derfor besluttet at gennemføre alle efterfølgende forsøg på knuste brændselspiller.

Konsekvensen blev et langt og stabilt forsøg nr. 3, hvor koksreaktortemperaturen var over 700 °C i næsten et døgn, hvoraf ca. 18 timer ved ca. 100 % last. For øvrigt blev der indledende opnået erfaringer med Dall Energys fuldstrøms spraykøler.

Slutteligt kalkede den i koksreaktorbunden placerede centrale luftlanse med vandtilførsel til, hvorfor forsøget måtte afbrydes. Yderligere seks lanser for perifer inddysning af kun luft i bunden af koksreaktoren var ikke tilstoppede.

Det fjerde 100 kW LT-CFB forsøg blev indledt med en lang og problematisk opstart grundet for lidt påfyldt bed-materiale (genbrug uden aftapning fra forsøg nr. 3 + 20 kg frisk sand). Stop for efterfyldning af 20 kg sand blev derfor foretaget den første

forsøgsdags aften, hvilket løste opstartsproblemerne og førte til stabil og hensigtsmæssig drift det meste af natten og ud på den følgende morgen.

For at undgå en gentaget tilkalkning, blev der under forsøg nr. 4 i stedet for alm. postevand tilført demineraliseret vand. For yderligere at opnå en bedre fordeling af vandet blev en større andel tilført det markant større tværsnit i koksreaktoren. På symmetrisk måde blev der således tilført vand til yderligere to af koksreaktorens 7 luftlanser.

Fordelingen af vand på tre lanser i koksreaktoren burde også medføre en bedre fordeling af vand over bed-tværsnittet, men desværre opstod der sidst i forsøget i stedet en ustabil fordeling af både vand og fluidiseringsluft. Dette må antages at være årsagen til, at der sidst i forsøg nr. 4 opstod agglomereringsproblemer og deraf følgende driftsforstyrrelser.

Forud for det deraf følgende tvungne stop blev blandt andet følgende resultater dog opnået:

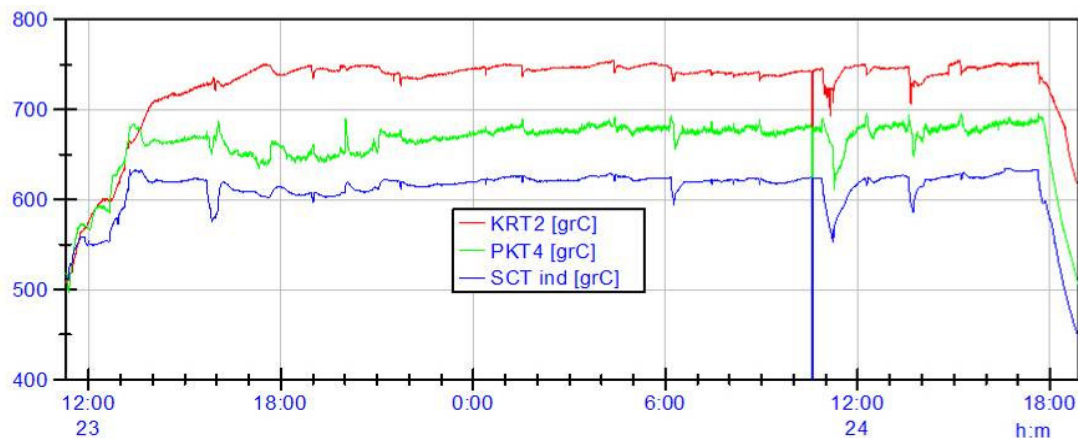
- Stabil drift i ca. 12 timer ved ca. 100 % last, dog med tegn på cirkulationsforstyrrelser de sidste ca. 2 timer
- Velfungerende indfødning, når stabil N<sub>2</sub>-tilførsel til tæt brændselssilo,
- Siloopfyldninger blev utidigt automatisk afbrudt grundet afsætning af støv på brændselssiloens fotoceller. Anvendelse af vejecellesignal til styring af silofyldninger blev derfor besluttet
- Forbedret fakkelstabilitet
- Succesfuld afprøvning af fuldstrøms spraykøler
- Derefter konvektionskøling og filtrering af en delstrøm af produktgassen

På grund af de både indledende og afsluttende problemer blev dette første forsøg med delstrømskøling og -filtrering desværre meget kortvarig (ca. en time), men forsøget gav grundlag for både praktiske forbedringer og optimisme.

Under forsøg nr. 5 blev dysestabilitetsproblemet løst ved mere hensigtsmæssig tilførsel af luft og vand.

Der blev således opnået ca. 27 timers stabil og næsten uafbrudt drift ved over 700 °C i koksreaktoren, hvoraf godt 24 timer ved den under dette forsøg indfyrede effekt på ca. 92 kW HHV (85 kW LHV). Den indfyrede effekt var således lidt lavere end tilsigtet.

Den opnåede lange og stabile drift under forsøg nr. 5 fremgår af de tre vigtige procestemperaturer vist i figur 9. Hverken den elektriske forvarmning af bed-materialet til omkring 500 °C fra aftenen i forvejen eller den afsluttende del af afkølingen efter forsøget er vist, men ellers er der tale om hele tidsrummet for forsøg nr. 5.



**Figur 9: Vigtige processtemperaturer fra 100 kW LT-CFB forsøg nr. 5 på halm.**

Følgende skal yderligere bemærkes til de i figur 9 viste tre temperaturkurver:

- Den højeste temperatur "KRT2" er målt i koksreaktor-beden. Her skal temperaturen være så høj som muligt for opnåelse af god koksomsætning ved mindst mulig tilførsel af luft og vand/damp, men ikke så høj, at der opstår askesmelteproblemer, ligesom unødigt fordampning af askestoffer ønskes undgået.
- Den midterste temperatur "PKT4" er målt lige under brændselsindfødingen i pyrolysekammeret. Her fremmes pyrolysen (koksresten minimeres) ved øget temperatur, medens reduceret temperatur medfører fordele i retning af undgåelse af fordampning af askestoffer samt minimering af dannelsen af PAH som følge af dekomponering af tjærestoffer.
- Den laveste temperatur "SCT ind" er målt lige før sekundærcyklonen, hvor det er "sidste chance" for genindbinding af evt. fordampede askestoffer i fast fase, hvilket naturligvis er en forudsætning for, at K mv. effektivt kan udskilles af sekundærcyklonen sammen med asken.

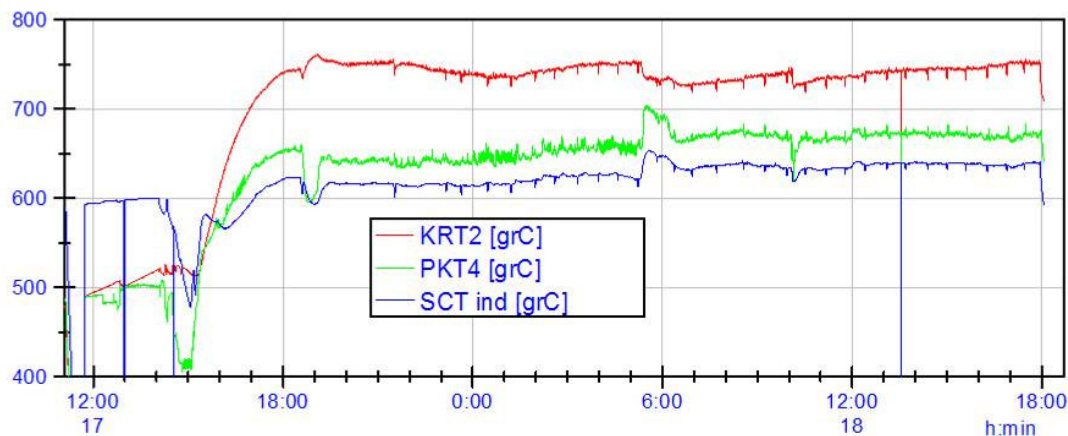
Temperaturkurverne i Figur 9 afspejler kun i nogen grad den opnåede høje processtabilitet, hvilket dog primært skyldes:

- visningen af godt 30 timer og den på y-aksen valgte skala
- at den automatiske temperaturregulering først blev aktiveret under det senere forsøg nr. 8
- afbrudt dataopsamling ca. kl. 10:30, hvor temperaturfaldet altså ikke er reelt
- to driftsforstyrrelser lidt før kl. 11:00. og ca. kl. 13:30 d. 24/9
- at der fra ca. kl. 14:30-15:00 arbejdes med de kombinerede temperatur- og trykmåleprober, hvorfor heller ikke disse mindre udsving er reelt forekommende temperaturændringer.

De to nævnte driftsforstyrrelser kl. 11:00. og ca. kl. 13:30 skyldtes, at fødesneglen blokerede, hvilket gentog sig ved forsøgets afslutning. På tidspunktet for den sidste blokering var der opnået tilfredsstillende mange driftstimer, og forsøgsbemandingen var ved at "slippe op". Det blev derfor besluttet ikke igen at frigøre sneglen (ved gentagne reverseringer), men i stedet at stoppe forsøget for efterfølgende at kunne vurdere årsagen til blokeringerne ved adskillelse af sneglen.

Blokeringerne skyldtes efter alt at dømme, at der på de givne tidspunkter var strømmet kondenserende pyrolysegas ud i sneglen grundet utilstrækkelig tilførsel af spærregas til indfødningssystemet.

Som det i nogen grad fremgår af de vigtigste procestemperaturer vist i figur 10, blev der under det følgende forsøg nr. 6 - nu for første gang på restfibre fra CP Kelco - opnået godt 25 timers næsten stabil og meget uproblematisk drift. Heraf endda ca. 22 timer med indfødning af ca. 27 kg brændsel pr time, hvilket svarer til en indfyret effekt på ca. 112 kW (LHV).



**Figur 10: Vigtigste procestemperaturer fra 100 kW LT-CFB forsøg nr. 6 på restfibre fra CP Kelco.**

Følgende skal yderligere bemærkes i relation til temperaturkurverne i figur 10:

- Når kurverne kan synes lidt urolige skyldes det i høj grad blot, at mange timer er vist og at temperaturerne stadig var håndregulerede, hvilket forventeligt medfører variationer over så mange timer
- De mange små temperaturfald for hver ca. tre kvarter forårsages af meget kortvarige stop for genopfyldning af brændselssiloen
- Temperaturvariationerne er især til sidst absolut set beskedne, bortset fra en valgt langsom temperaturstigning i koksreaktoren til slutteligt godt 750 °C
- På førstedagen fra kort før kl. 19 startes brændselsindfødning ikke hurtigt nok efter siloopfyldning, hvorfor koksreaktortemperaturen når at stige til over 750 °C
- Kort efter kl. 5 skyldes den pludselige indsnævring af forskellen mellem procestemperaturerne øget cirkulation af bed-materiale, som forårsages af tilførsel af trykluft for rensning af trykmålestudse i mellemreaktoren. Det forhold at den øgede cirkulation synes blivende i de følgende timer skyldes formentlig, at rensningen har medført en varigt forøget tilførsel af spærreluft gennem måleproberne i MR.
- Ca. kl. 10 søges den automatisk regulering af koksreaktortemperaturen aktiveret, men må skyndsomst opgives da regulatoren utilsigtet næsten afbryder tilførslen af luft til koksreaktoren. (Ved regulatorens aktivering burde startværdien for den af regulatoren regulerede luftstrøm have været sat til aktuel værdi i stedet for 0)
- Ca. kl. 13:30 var dataopsamlingen blot kortvarigt afbrudt.

Som ventet medførte temperaturstigningen til godt 750 °C i koksreaktoren ingen driftsforstyrrelser som følge af askesmeltning og en forlængelse af forsøget på dette eller endnu højere temperaturniveau ville formentlig have medført fordele i form af bl.a. en forbedret koksomsætning.

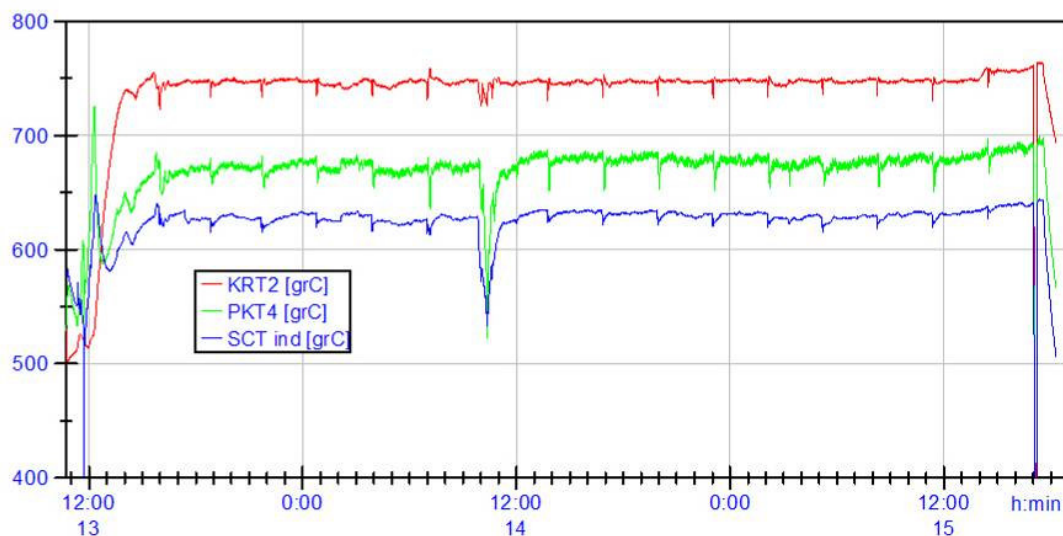
For øvrigt kan alle de nævnte temperaturvariationer let undgås i kommercielle anlæg, idet selv den kun håndregulerede proces hurtigt finder ind i en stabil balance, når der ikke foretages parameterændringer. Der blev f.eks. ikke foretaget reguleringer af nogen art efter den sidste siloopfyldning, ligesom anlægget til sidst kørte uovervåget i en kort periode fra kl. 17:35, medens faklens læskærm blev hentet tilbage fra bevoksningen ved siden af forsøgshallen. En under forsøget verserende storm havde således blæst læskærmen ned fra taget, ligesom stormen et par timer tidligere havde afrevet forsøgshallens taglem.

Trods stormen og den til sidst manglende læskærm fungerede faklen stabilt uden støttebrænder, hvilket indikerer en god gaskvalitet.

Forsøget blev afsluttet blot grundet "opbrugt" forsøgspersonale og altså uden problemer i øvrigt.

Under det efterfølgende forsøg nr. 7 var det tanken at optimere og forlænge den opnåede meget tilfredsstillende drift under forsøg nr. 6 på CP Kelcos restfibre. Forsøget blev imidlertid hjemstøgt af to store problemer, først i form af en utæt primæracyklon og dernæst et på andendagen indlæst alvorligt fejlbehæftet (men på anden vis opdateret) PLC-program. Pga. af både den tilstundende jul og de efterhånden manglende yderligere ressourcer i projektet måtte en gentagelse af dette sidste forsøg desværre opgives.

For endnu bedre at vise den opnåelige meget høje processtabilitet er de 3 tidligere viste hovedprocesstemperaturer målt under forsøg nr. 8 vist i figur 11. Her blev driftsforstyrrelser stort set undgået, ligesom den længe forberedte automatiske temperaturregulering endelig blev aktiveret. Dette gjorde det muligt at opnå den viste meget høje temperaturstabilitet gennem næsten alle forsøgets ca. 52 driftstimer.



Figur 11: Vigtige procestemperaturer fra 100 kW LT-CFB forsøg nr. 8 på halm.

De mange små temperaturfald skyldtes igen blot stoppene for genopfyldning af brændselssiloen (nu kun ca. hver tredje time), medens den større forstyrrelse fra ca. kl. 10 i forsøgets andet døgn skyldtes, at fødesneglen blokerede. Årsagen til blokeringen var manglende tilførsel af spærregas gennem fødesneglen, da en nitrogenflaske upåagtet løb tom. For at undgå gentagelser blev sneglen derefter N<sub>2</sub>-forsynet fra anlæggets større og bedre trykovervågede N<sub>2</sub>-flaskebatteri.

Den i forsøgets sidste timer indstillede temperaturstigning medførte ingen problemer og kommenteres yderligere i de senere afsnit 4.6.10 og 4.6.11.

#### 4.6.5 Masse og energibalancer

Med udgangspunkt i bl.a. de viste temperaturkurver for forsøg nr. 5 og 6 på henholdsvis halm og restprodukt fra CP Kelco er der i mod forsøgenes slutning udvalgt stabile driftsperioder med henblik på opstilling af masse- og energibalancer for disse perioder. Hovedresultaterne fremgår af de to første talkolonner i tabel 4. Den 3. talkolonne viser til sammenligning de tilsvarende data fra det senere halmforsøg nr. 8.

Øverst i tabel 4 fremgår de valgte balanceperioder, samt en række overvejende analyse-mæssigt bestemte beregningsforudsætninger.

Til beregningen af massebalancen skal yderligere bemærkes at:

- de indgående strømme er brændsel, luft og vand, idet der ses bort fra N<sub>2</sub> (fra højtryksflasker), der under drift kun tilføres indfødningsystemet i beskedent omfang
- brændsel og luft er anført som kontinuerligt målt under drift (uanset forekommende driftspauser)
- for at korrigere for de under forsøg nr. 5. forekommende i alt ca. 15 minutters driftspauser i den 6 timer lange balanceperiode, er såvel, forbruget af vand, bed-ophobning og udtagne askestrømme forudsat at hidrøre fra en driftstid på kun 5 timer og 45 minutter
- ophobning af partikler i bed-en er anført som en første udgående massestrøm, idet denne massestrøm yderligere ville skulle aftappes for at holde bed-indholdet konstant (og øger afgivelsen af masse ud af forgasseren, når bed-indholdet aftager, som det er tilfældet under både forsøg nr. 5 og 6, hvorfor bidraget optræder negativt)
- Tilbageholdelsen i bed-materialet er beregnet som summen af faktisk aftappet og i forgasseren ophobet bed-materiale i den valgte stabile balanceperiode. Grundlaget er henholdsvis den afvejede mængde af udtaget bed-materiale (inkl. analyseprøver) og målte vertikale trykdifferencer fra bunden af beden til fribordet i koksreaktoren.
- Tilbageholdelsen i form af cyklonaske er bestemt ved afvejning af cyklonasken
- Basis for inert-procent-tallene er indfødet brændselsstrøm ganget med de analyse-mæssigt bestemte askeindhold i de respektive brændsler.

Til beregningen af energibalancerne skal yderligere bemærkes:

- at der regnes i øvre brændværdi, hvorved beregningen bliver simpel

- at der ses bort fra varmetab fra forgasseren, idet tabet antages fuldt kompenseret af den til forgasserens elektriske varmebændler tilførte el-effekt
- at det grundet både betydelige balanceusikkerheder i relation til det efter sekundærcyklonen tilføjede gasrensningssystem og fokus på forgasserens anvendelse blot med varm cyklonrensning er valgt at slutte energibalancen efter sekundærcyklonen
- at den ved differens beregnede entalpistrøm efter sekundærcyklonen inkluderer brændværdien af indeholdt koksstøv og gassens termiske entalpi, herunder fordampningsvarmen for indeholdt vanddamp.

Som det fremgår af massebalancen var den indfyrede brændselsstrøm lavest under halmforsøg nr. 5 og størst under forsøg nr. 6 på restfibre fra CP Kelco.

Trods den markant større brændselsstrøm under forsøg 6 i sammenligning med også halmforsøget nr. 8 var luftforbruget kun ca. det samme som under forsøg nr. 8. Dertil kommer, at der ikke blev tilført vand under forsøg nr. 6, hvorfor det samlede forbrug af forgasningsmiddel (luft og vand) pr kg brændsel var langt lavere end under begge de to halmforsøg.

Energibalancen viser, at den indfyrede effekt under de tre forsøg var hhv. 91,8, 121,9 og 100,3 kW (HHV), svarende til hhv. ca. 85, 112 og 92 kW baseret på nedre brændværdi (LHV). Dvs. at den indfyrede effekt var markant højere under forsøget på CP Kelcos restfibre end under begge de to halmforsøg.

Masse- og energibalancerne bør dog tages med betydeligt forbehold og specielt tyder de for især forsøg nr. 5 og 6 beregnede lave cyklon- og filter-inert-effektiviteter, at der er væsentlige fejl i massebalancerne. Der kan bl.a. være tale om:

- usikkerhed i relation til bestemmelse af forgasserens indhold af bed-materiale på basis af trykdifferens-målinger
- at noget udtaget bed-materiale eller cyklonaske er blevet spildt eller ikke afvejet og noteret korrekt
- usikker afvejning af cyklonasken (hvor trykændringer i sekundærcyklonfaldrøret influerer på afvejningen af asketønden)
- andelen af gas gennem køler og posefilter afviger væsentligt fra de tilstræbte og antagede 10 %
- at den andel af støvpartiklerne, der følger slipstrømmen gennem køler og posefilter, ikke svarer til slipstrømmens andel af hovedgasstrømmen
- ophobning af støvpartikler i gaskanalen forud for partikelfilteret
- ufuldstændig tømning af posefilteret
- manglende fuldt sammenfald mellem forgasser-balanceperioder og filter-måleperioder.

De problematiske massebalancer viser behovet for lange balance-perioder og stor systematik og omhu under bl.a. prøveudtagning og registrering.

**Tabel 4. Masse og energibalancer samt div. performance-data for forsøg nr. 5, 6 og 8.**

Forsøg nr.		5	6	8	
Dato		23-24/9 09	17-18/11 09	13-15/1 10	
Forudsætninger					Bemærkninger:
Balanceperiode		11:40-17:40	12:00-18:00	00:00-16:00	Valgt stabil periode sidst i forsøget
Varighed	H	6	6	16	
LHV, brændsel	MJ/kg	16,0	14,92	15,8	Analyseresultat fra FORCE
HHV, brændværdi	MJ/kg	17,4	16,25	17,2	Analyseresultat fra FORCE
Brændværdi, oxiderbart C	MJ/kg	32,8	32,8	32,8	Analyseresultat fra FORCE
Oxiderbart C i bed-matr.	%	0,20	3,8	0,60	Analyseresultat fra FORCE
Oxiderbart C i SC aske	%	30,5	23,7	30,0	Analyseresultat fra FORCE
Oxiderbart C i filteraske	%	57,5	28,2	30,0	Analyseresultat fra FORCE
CPm, inert	kJ/kg/K	1	1	1	Ca. (minimal indflydelse)
Massebalance					
Brændsel	kg/h	19	27	21	Vejecellesignalgradient
Tilført bed-materiale	kg/h	0,00	0,00	0,00	Intet tilført
Luft i alt	kg/h	24,4	28,2	28,7	Inkl. ca. 35 nl/min nitrogen
Vand til KR og MR	kg/h	3,13	0	3,50	
Ind i alt	kg/h	46,6	55,2	53,2	
Bed-ophobning	kg/h	-0,71	-0,85	0,00	Baseret på trykdifferens over KR-bed
Udtaget bed-materiale	kg/h	0,95	0,67	0,59	Inkl. prøver
SC-aske	kg/h	0,49	3,00	0,65	
Filteraske	kg/h	0,56	0,12	0,12	Antaget 10% delstrøm og forsøg 8 = 6
Støv i gas efter filter	kg/h	0,23	1,45	0,012	Baseret på inertdiffrens & C i filteraske
Gas efter filter	kg/h	45,1	50,8	51,8	Beregnet som differens
Ud og ophobet i alt	kg/h	46,6	55,2	53,2	Inkl. evt. balancefejl
Energibalancer					Baseret på øvre brændværdi (HHV)
Brændsel	kW	91,8	121,9	100,3	
Luft	kW	0	0	0	Tilført v. ca. 20 grd.C
Vand	kW	0	0	0	Tilført v. ca. 20 grd.C
Ind i alt	kW	91,8	121,9	100,3	
Overfladetab	kW	0	0	0	Antages = el-effekt til varmebændler
Bed-ophobning og -udtag	kW	0,054	-0,10	0,16	Inkl. reaktions entalpi af oxiderbart C
Sek.cyklonaske	kW	2,64	8,25	1,89	Inkl. reaktions entalpi af oxiderbart C
Entalpi efter sek.cyklon	kW	89,1	113,7	98,3	Beregnet som differens (inkl. støv)
Ud og ophobet i alt	kW	91,8	121,9	100,3	Inkl. evt. balancefejl
Andre hovedresultater					
Termisk effektivitet efter SC	%	97,1	93,3	98,0	Ud af sek.cyklon/tilført*100 (HHV)
HHV efter SC	MJ/kg	7,00	7,82	6,81	Inkl. støv og kondensvarme (HHV)
SC effektivitet, inert	%	50,3	67,0	83,1	
Filtereffektivitet, inert	%	71,3	7,6	91,0	Afvigelse fra 100 er primært balancefejl
Tryktab over PC	mmVS	60	75	80	
Tryktab over SC	mmVS	100	125	125	
d50, SC aske	my	10	8	9	
d50, filteraske	my	7	7	-	Ingen brugbar filteraske fra forsøg 8

De store usikkerheder, der er forbundet med kun at køle og filtrere en delstrøm af gassen kan elimineres ved køling og filtrering af hele gasstrømmen, hvilket vil ske under kommende forsøg med 100 kW anlægget på Risø.



De problematiske massebalanceresultater for forsøg 5 kan nu heldigvis opfattes som afløst af de væsentlig mere plausible resultater fra det lange og stabile halmforsøg nr. 8, medens der snarest bør gennemføres et yderligere forsøg til erstatning af det uheldsramte forsøg nr. 7 på CP Kelcos restfibre.

Det må dog også erkendes, at også massebalancen for forsøg 8 rummer en væsentlig usikkerhed, som skyldes at en defekt varmebændel til sidst medførte en tilstopning af posefilterets gasafgangsrør. Derfor er det i mangel af bedre antaget at posefilteret separerede samme askestrøm som under det forudgående forsøg nr. 6.

Yderligere kommentarer til data i tabel 4 fremgår af de følgende afsnit.

#### **4.6.6 Kokstab og termisk effektivitet**

Især for opskalerede anlæg med relativt beskedent overfladevarmetab og anvendelse af kun cyklonrenset gas i en kedel vil restkoks i cyklonasken typisk udgøre det dominerende energitab. Såvel termisk (inkl. fordampnings entalpi) som kemisk entalpi (inkl. oxiderbart C i ikke separeret støv) vil således tilgå kedlen.

Under "Andre hovedresultater" nederst i tabel 4, fremgik først en meget høj beregnet termisk effektivitet for begge halmforsøg (97-98 %), og at den termiske effektivitet var noget lavere (93,3 %) under forsøget på restfibre fra CP Kelco. Forskellen skyldes primært kokstabet i den separerede cyklonaske under forsøget på CP Kelcos væsentlig mere askeholdige restfibre. Ser man blot på glødetabene pr kg separeret sekundærcyklonaske, der fremgik øverst i tabel 4, var dette lavest for CP Kelcos restfibre, men grundet den markant større separerede askestrøm var energitabet altså alligevel markant større.

Den noget ringere termiske effektivitet opnået på CP Kelcos restfibre skyldes dog i høj grad blot, at resultaterne af de kun vejledende "lynudglødninger" af cyklonaske, der fortages under selve forgasningsforsøgene, forledte driftspersonalet dels til at fastholde den meget store indfødede brændselsstrøm og dels til helt at undlade vandtilsætning. Lynudglødningerne viste således et glødetab på kun ca. 15 %, hvilket er markant lavere end det i balanceberegningen forudsatte glødetab på 23,7 %, som efterfølgende er bestemt af FORCE Technologys brændselsanalyselaboratorium.

Da både indfyret effekt og tilført forgasningsmiddel pr kg brændsel erfaringsmæssigt har stor indflydelse på kokstabet, vil kokstabet formentlig let kunne reduceres til et fuldt ud tilfredsstillende niveau ved mindst 100 % last baseret på LHV.

En væsentlig øgning af temperaturerne i koks- og mellemreaktor er formentlig også mulig og selv blot ved længere tids fastholdelse af de slutteligt indstillede godt 750 °C kan der forventes et yderligere reduceret kokstab. Disse forventninger bør dog naturligvis efterprøves eksperimentelt.

Hvis der som supplement til varm cyklonrensning også foretages rågaskøling og filtrering kan også koks separeret i filteret repræsentere et væsentligt tab, som endda kan blive dominerende i tilfælde af dårlig sekundærcykloneffektivitet. Dette ikke mindst hvis filteraske har væsentlig højere koksindhold end cyklonasken. Som det fremgik øverst i tabel 4, var begge dele tilfældet under halmforsøg nr. 5. Hverken tilsvarende lav sekundærcykloneffektivitet eller væsentligt forhøjet indhold af oxiderbart C i filterasken sås dog under hverken forsøg nr. 6 eller 8, hvorfor der formentlig har været tale om væsentlige målefejl under forsøg nr. 5.

En stor del af forklaringen på det ovennævnte kan dog også være, at de større gasstrømme under forsøg nr. 6 og 8 medførte at begge anlæggets cykloner fungerede mere effektivt, hvilket bestyrkes af de højere cyklontryktab under forsøg nr. 6 og 8, som fremgår nederst i tabel 4. Det må dog alligevel formodes, at især de laveste af de beregnede cycloneffektiviteter primært skyldes fejl i massebalancerne.

Under halmforsøgene fra og med nr. 4 blev vand tilført tre luftlanser i koksreaktoren i stedet for til kun én under de foregående halmforsøg, hvor vand således absolut set blev ligeligt fordelt mellem koksreaktoren og den enlige luftlanse i mellemreaktoren. Tilførslen af vand til tre i stedet for tidligere blot én KR luftlanse har både medført en fordeling af vand mellem koksreaktoren og mellemreaktoren, der harmonerer bedre med, at bed-tværsnittet er langt større i koksreaktoren, og en bedre fordeling af vanddamp over koksreaktorens tværsnit.

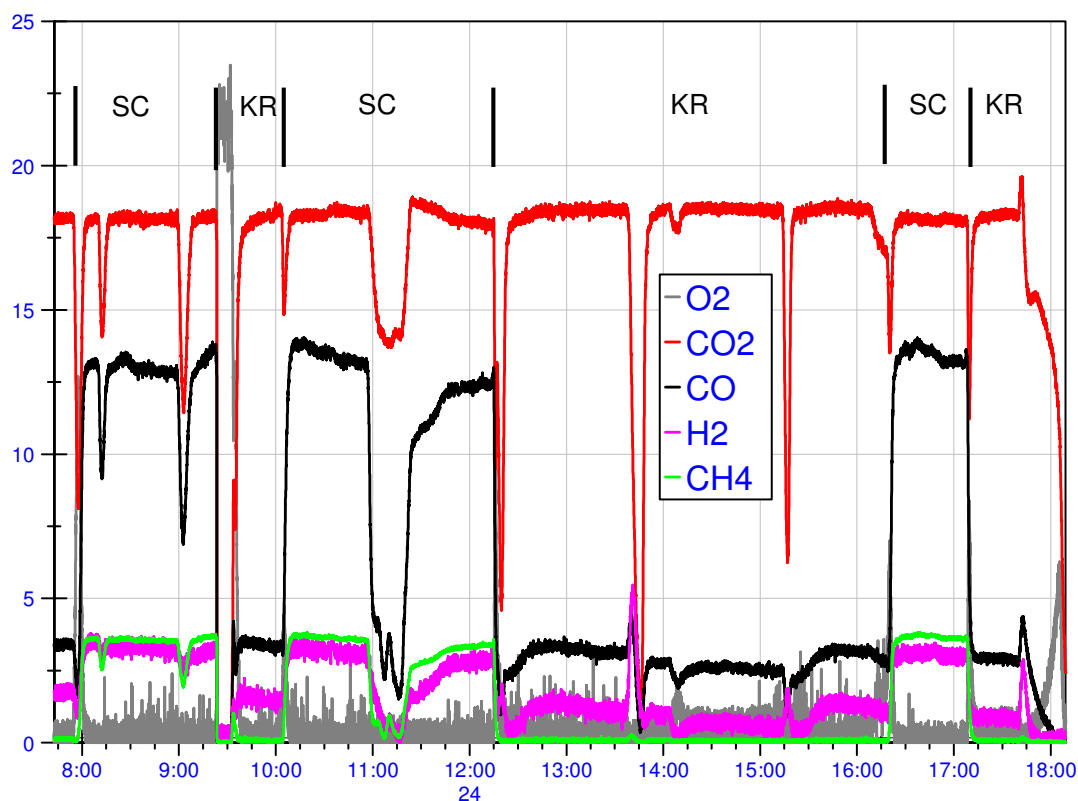
Den optimerede inddysning og fordeling af vand er formentlig en væsentlig årsag til, at det slutteligt i især halmforsøgene nr. 5 og 8 er lykkedes at minimere kokstabet.

På CP Kelcos restfibre kan en mindst ligeså tilfredsstillende koksomsætning formentlig let opnås på de allerede omtalte måder, og altså også uden at reducere lasten til under 100 kW (indfyret, LHV). Dette bør naturligvis efterprøves.

#### 4.6.7 Gassammensætning

Under samtlige forsøg blev der foretaget on-line -målinger af produktgassens sammensætning. Dette dog kun for så vidt angår de lette ikke kondenserbare gasser O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>. De tilsvarende gasmåleinstrumenter blev tilført gas, der først blev boblet igennem to serielle delvist vandfyldte kolber og dernæst renses i et twistfilter. For øvrigt foretages yderligere dugpunktssænkning og filtrering umiddelbart før selve de termostaterede gasmåleinstrumenter.

Som markeret øverst i figur 12, blev der i den afsluttende del af forsøg nr. 5 på skift målt på gas udtaget efter sekundærcyklonen ("SC") og fra toppen af koksreaktoren ("KR"). Det fremgår bl.a., at produktgassens (efter "SC") indhold af de målte lette brændbare gasser typisk var som følger: CO = 16-17%, H<sub>2</sub> = 3-4 % og CH<sub>4</sub> = 3-4 %. En del af CH<sub>4</sub> skyldes dog, at instrumentet er krydsfølsom overfor C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> og højere kulbrinter.



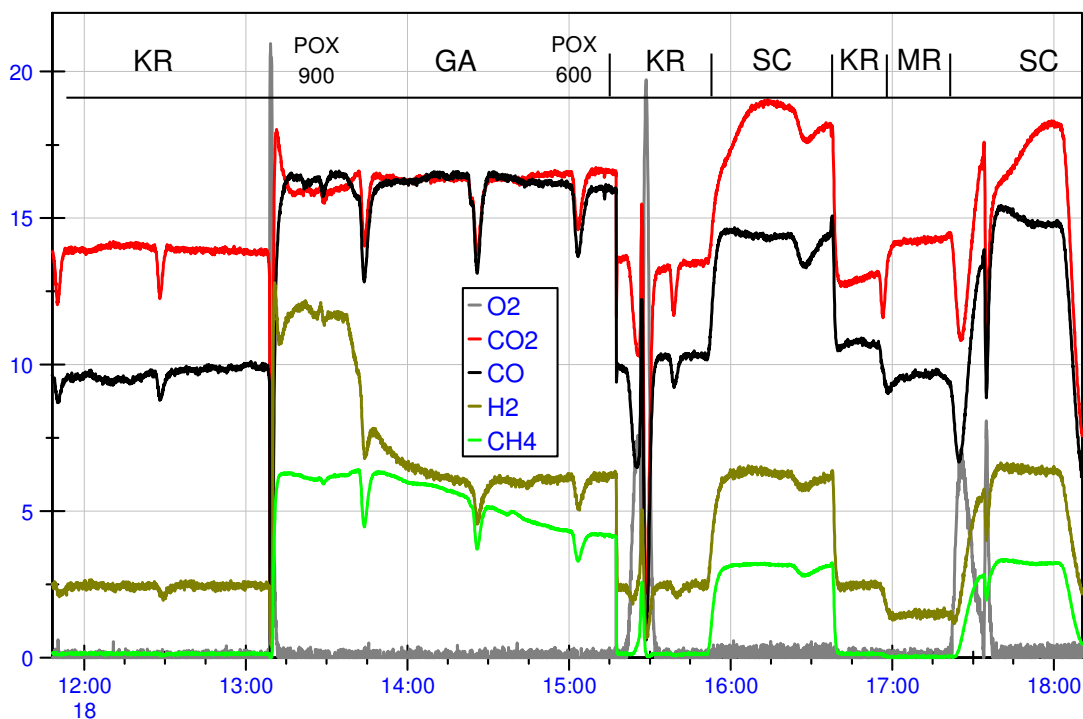
**Figur 12: Gasmålinger fra slutningen af 100 kW LT-CFB forsøg nr. 5 på halm. (SC = sekundæracyklon, KR = koksreaktor)**

De sidst i forsøg nr. 6 opnåede gasmålinger er vist i figur 13. Det fremgår, at de efter "SC" målte koncentrationer af de brændbare lette gasser CO, H<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> var henholdsvis ca. 15, 6,5 og 3 %. Vurderet på de lavere koncentrationer i KR og MR er det også her tydeligt, at en betydelig del af disse brændbare gaskomponenter stammer fra pyrolysen.

Temperaturstigningen i koksreaktoren på ca. 15 °C i forsøgets sidste 6 timer (jf. figur 10) er formentlig hovedårsagen til tendensen i retning af stigende CO/CO<sub>2</sub> forhold i både gasafgangen og koksreaktoren.

I tabel 5 ses de i mod slutningen af forsøg nr. 5 og 6 målte koncentrationer af lette ikke-kondenserbare gasser i afgangens sammenholdt med de tilsvarende målinger under forsøg nr. 8. Bemærk at også O<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub> er anført, og at de optrædende små koncentrationer af O<sub>2</sub> ikke er reelle, men blot skyldes vanskeligt helt undgåelig luftindtrængning i målesystemet og/eller små måleusikkerhed i øvrigt.

Der ses at være god overensstemmelse mellem de under de tre forsøg målte produktgassammensætninger. Det kan dog bemærkes at H<sub>2</sub>-koncentrationen er størst under forsøg 6 (på restfibre fra CP Kelco) selvom der her ikke tilføres vand til forgasseren. Den højere H<sub>2</sub> koncentration er dog ikke ledsaget af højere CH<sub>4</sub> koncentration, men snarere en lidt lavere H<sub>2</sub> koncentration.



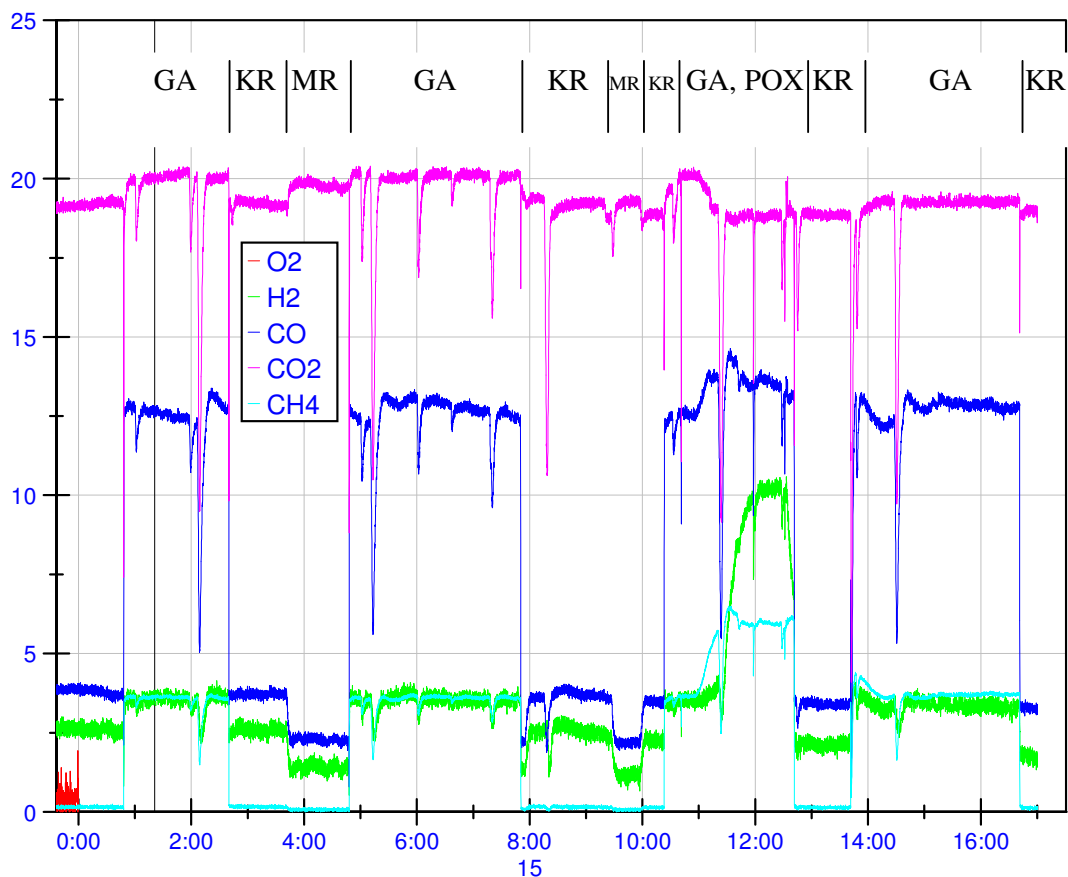
**Figur 13:** Gasmålinger fra slutningen af 100 kW LT-CFB forsøg nr. 6 på restfibre fra CP Kelco. Målesteder: KR = koksreaktor, SC = sekundær-cyklon, MR = mellemreaktor. I tidsrummet fra kl. 13:10 til 15:20 foretages partiel oxidation (POX) ved først 900 °C og derefter 600 °C, medens der måles på den resulterende gas fra gasafgangen = GA.

De afvigende måleresultater i perioden fra kl. 13:10 til kl. 15:20 skyldes et i dette tidsrum gennemført forsøg med partiel oxidation (POX), der omtales i det følgende afsnit 4.6.9.

Til sammenligning fremgår koncentrationerne af de under forsøg nr. 8 målte lette gasser af figur 14. Bemærk at afgangsgassen nu konsekvent måles i delstrømsgassens afgang (GA), dvs. lige efter POX-kammeret. Målingerne i tidsrummet omkring kl. 12, hvor POX-kammeret er aktiveret, omtales i afsnit 4.6.9.

I tabel 5 ses de i mod slutningen af forsøg nr. 5 og 6 målte koncentrationer af lette ikke-kondenserbare gasser i afgangens sammenholdt med de tilsvarende målinger under forsøg nr. 8. Bemærk at også O<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub> er anført, og at de optrædende små koncentrationer af O<sub>2</sub> ikke er reelle, men blot skyldes vanskeligt helt undgåelig luftindtrængning i målesystemet og/eller små måleusikkerheder i øvrigt.

Der ses at være god overensstemmelse mellem de under de tre forsøg målte produktgassammensætninger. Det kan dog bemærkes at H<sub>2</sub>-koncentrationen er størst under forsøg 6 (på restfibre fra CP Kelco), selvom der her ikke tilføres vand til forgasseren. Den højere H<sub>2</sub> koncentration er dog ikke ledsaget af højere CH<sub>4</sub> koncentration, men snarere en lidt lavere H<sub>2</sub> koncentration.



Figur 14: Indhold af lette gaskomponenter målt den sidste dag under 100 kW LT-CFB forsøg nr. 8. Øverst anføres hvor den målte gas er udtaget: "KR" = Koksreaktor, "MR" = Mellemreaktor, GA = Gasafgang og "POX" = GA, men nu med aktivering af "POX" - kammeret.

Tabel 5: Produktgassens indhold af målte lette og ikke kondenserbare gasser nær slutningen af 100 kW LT-CFB forsøg nr. 5, 6 og 8. (\*: O<sub>2</sub> værdier > 0 skyldes vanskeligt undgåelig indtrængning af luft i gasmålesystemet)

	O <sub>2</sub> (* vol. %)	CO <sub>2</sub> vol. %	CO vol. %	H <sub>2</sub> vol. %	CH <sub>4</sub> vol. %
Forsøg nr. 5 Halm	0 - 1	18	16 - 17	3 - 4	3 - 4
Forsøg nr. 6 CP-K restfibe	0 - 1	18 - 19	14 - 15	6,5	3
Forsøg nr. 8 Halm	0 - 1	19	13	3 - 3,5	3,5 - 4

Udover det målte indhold af lette brændbare gasser har den varme produktgas også et betydeligt indhold af tungere brændbare gasser hidrørende fra pyrolysen. Disse bidrag er principielt inkluderet, når produktgassens brændværdi beregnes som differens baseret på de i tabel 4 opstillede masse- og energibalancer.

Det fremgik af tabel 4, at de således beregnede øvre brændværdier for gassen efter sekundærcyklonen er meget tilfredsstillende, hhv. 7,00, 7,82 og 6,81 MJ/kg (HHV). Det skal dog igen bemærkes, at disse øvre brændværdier inkluderer brændværdien af indeholdt koksstøv samt termisk entalpi og herunder fordampningsvarmen for indeholdt vanddamp.

En yderligere karakterisering af produktgassen, hvad angår tjæreindholdet fremgår af rapporteringen af det parallelt forløbende Eranet-projekt [Zwart et al, 2010].

#### 4.6.8 Gasrensning

LT-CFB processens recirkulerende primærcyklon bør primært opfattes som en del af selve forgasseren, men primærcyklonen har dog indflydelse på, hvor meget af det med brændslet tilførte aske, der ender i evt. aftappet bed-materiale. Dvs. bed-materiale, der ved steady state, skal aftappes for at fastholde en ønsket bed-højde i (bl.a.) koksreaktoren.

I opskalerede anlæg vil evt. aftapning af bed-materiale normalt ske fra bunden af mellemreaktoren, men i tilfælde, hvor brændslet indeholder større uomsættelige partikler, vil det i det mindste lejlighedsvist også være nødvendigt at aftappe noget bed-materiale fra bunden af pyrolysekammeret. Dette for at undgå en med tiden problematisk ophobning af grove ikke-cirkulerbare partikler.

Under såvel de her rapporterede forsøg med 100 kW anlægget som forsøgene med de to tidligere LT-CFB forsøgsanlæg var aftapning fra bunden af pyrolysekammeret unødvendig og bed-højden i koksreaktoren blev, når nødvendigt, udelukkende fastholdt ved udtagning af partikler fra et sideudtag i koksreaktoren. Dette som led i udtagningen af prøver af bed-materialet til senere analyse samt løbende iagttagelse af koksindhold.

Typisk udtages hovedparten af de til forgasseren tilførte askedannende stoffer dog fra sekundærcyklonen. Her er der tale om væsentligt finere askepartikler, som primærcyklonen ikke har kunnet tilbageholde, ligesom indholdet af uomsat kulstof typisk er højere både procentuelt og absolut set.

Supplerende eller alternativt til gasrensning ved hjælp af sekundærcyklonen kan det være interessant at foretage en mere effektiv partikelseparation vha. af f.eks. et posefilter. Som nævnt i de følgende kapitel 5, opnås derved en række yderligere anvendelsesmuligheder for LT-CFB forgasseren.

Ved både modelberegninger og undersøgelse af produktgassens dugpunkt under tidligere 500 kW forsøg var der på forhånd opnået et betydeligt belæg for at forvente, at det ville vise sig muligt at køle den meget tjæreholdige LT-CFB -produktgas til ca. 300 °C for derefter at posefiltrere gassen ved denne temperatur. Risikoen for en hurtig tilstopning af køleren og/eller filtret som følge af kondenserende tjære og/eller alkali mv. betød dog alligevel, at denne del af forsøgene var imødeset med stor spænding.

Under alle de otte gennemførte 100 kW forsøg blev produktgassen som udgangspunkt rensset vha. af anlæggets primære og sekundære cyklon. Forsøgene nr. 4 - 8 omfattede endvidere for første gang forsøg med gaskøling og posefiltrering.

Da både først (fuldstrøms-) spraykøling og senere i stedet (delstrøms-) konvektionskøling viste sig anvendelig under forsøg nr. 4 og 5, blev det valgt kun at benytte den potentielt mindre tabsbehæftede, samt ikke vandforbrugende og gasfortyndende konvektionskøling under de efterfølgende forsøg nr. 6 - 8.

Spraykøling synes således mest interessant til gasser, der i højere grad end LT-CFB gassen indeholder fordampede og således kondenserbare askestoffer, der kan medføre afsætning af problematiske belægninger i en konvektionskøler og såfremt gaskøling simpelt ønskes realiseret i f.eks. en eksisterende gaskanal. For yderligere information vedr. spraykøleren henvises til Eranet-projektets slutrapport [Zwart et al, 2010] og leverandøren Dall Energy (se [www.dallenergy.com](http://www.dallenergy.com)).

Efter en meget kort indledende afprøvning af delstrømskonvektionskøling og -posefiltrering i forsøg nr. 4, blev der opnået seks vellykkede timer med systemet frem imod afslutningen af forsøg nr. 5. Ved starten af posefilterforsøget under forsøg nr. 5 viste der sig dog et behov for rensning af tilgangen til delstrømskanalen, ligesom de tidligere omtalte indfødningsproblemer under forsøget medførte to afbrydelser. De nævnte seks timer er ekskl. afbrydelserne.

De under de mest stabile afsluttende dele af forsøgene nr. 5 og 6 opnåede procentuelle tilbageholdelser af inertpartikler (ekskl. oxiderbart C) i hhv. udtaget + ophobet bed materiale, sekundærcyklonaske og filteraske fremgår af tabel 6. I den øverste del af tabellen er der tale om en balance (aske i brændsel = 100 %), hvor inert "i gas efter posefilteret" til sidst beregnes som 100 % minus balancens øvrige tre led. Nederst i tabellen er i stedet anført, hvor meget inert, der i de enkelte led er tilbageholdt i forhold til de (lokalt) indgående inertstrømme. Her er der altså tale om effektiviteter. Tallene for forsøg nr. 8 i kolonnen til højre er igen medtaget til sammenligning.

På basis af bl.a. erfaringer fra forsøg med de tidligere LT-CFB anlæg er der grund til at tro, at især den meget lave sekundærcykloneffektivitet for forsøg nr. 5 er misvisende i negativ retning og en række mulige årsager blev allerede diskuteret i afsnit 4.6.5.

Også hvis man tager udgangspunkt i en antagelse om, at posefilteret burde have en effektivitet nær 100 %, er der grund til at tro, at der er tale om væsentlige målefejl og da især for forsøg nr. 6.

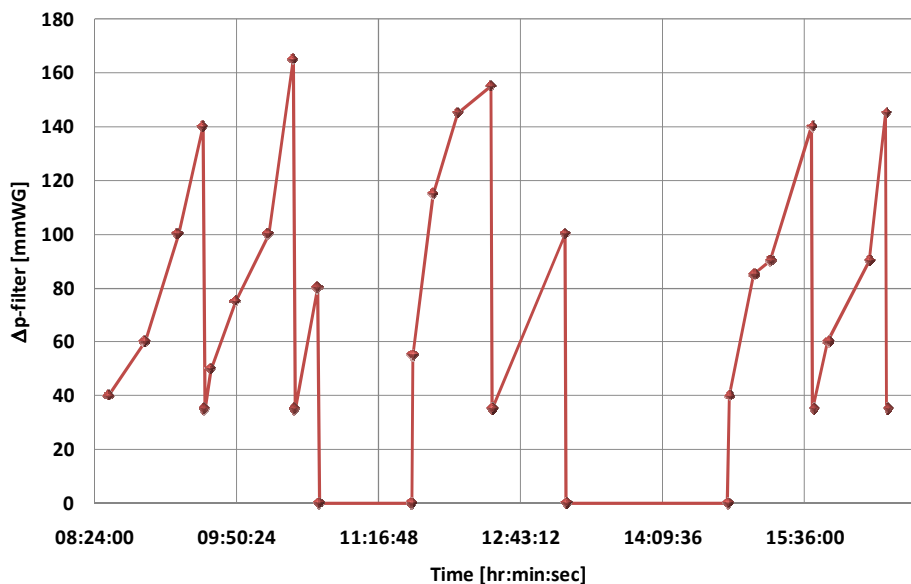
Set under begge ovennævnte vinkler synes resultaterne for forsøg nr. 8 væsentligt mere troværdige, hvilket formentlig i høj grad skyldes fordelene af en meget længere stabil balanceperiode. Det skal dog nævnes, at det i de bagvedliggende beregninger er antaget, at filteret i forsøg nr. 8 separerede samme askemængde pr time som filteret under forsøg nr. 6, hvilket naturligvis er en tvivlsom antagelse. (Som tidligere nævnt, findes der desværre ingen brugbar askeprøve fra filteret efter forsøg 8).

**Tabel 6: Inertbalancer (øverst) og separationseffektiviteter (nederst) i % for forsøg nr. 5, 6 og 8.**

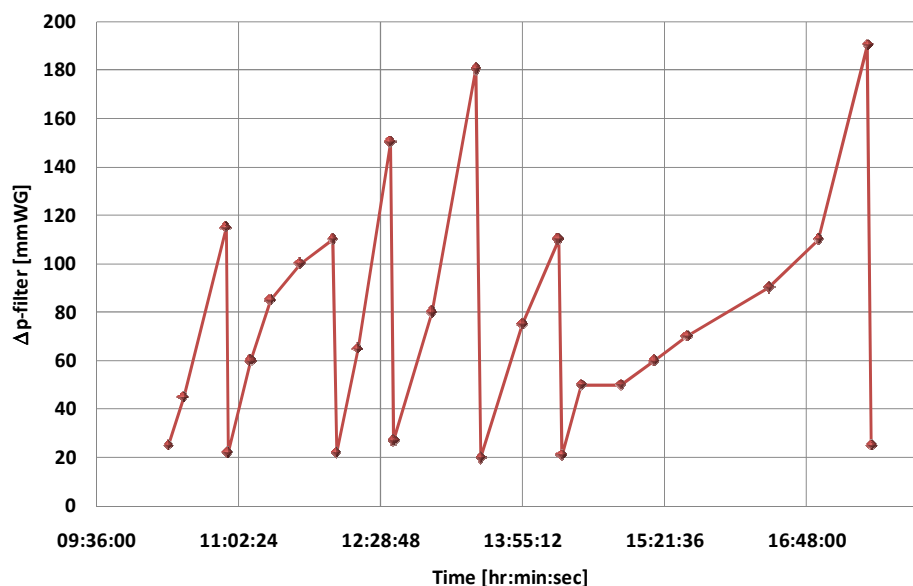
Forsøg nr.	5	6	8
<b>Balancer</b>			
Indfyret aske	100	100	100
Udtaget+ophobet bed-materiale	26,3	-5,3	51,8
Udskilt af SC	37,1	70,6	40,0
Udskilt af posefilter	26,1	2,7	7,4
Tilbageholdt i alt	89,5	67,9	99,3
I gas efter filter (100% - "Tilbageholdt i alt")	10,5	32,1	0,7
<b>Effektiviteter (separeret/tilgæet*100)</b>			
Udtaget+ophobet bed-materiale	26,3	-5,3	51,8
Sekundærcyklon	50,3	67,0	83,1
Posefilter	71,3	7,6	91,0

Tryktabsmålingerne over køler og filter viste ingen tegn på irreversible aflejring af aske eller kondenserende tjære. Specielt kunne tryktabet over posefilteret bringes tilbage til et konstant niveau ved N<sub>2</sub>-pulsning ca. 1 gang pr. time, hvilket fremgår af trykdifferensmålingerne vist for forsøg nr. 5 og 6 i henholdsvis figur 15 og 16.

Selvom de beregnede procentuelle asketilbageholdelser i posefilteret tydeligvis er fejlbehæftede, er der næppe tvivl om, at det ved sådan posefiltrering ved temperaturer over LT-CFB -gassens relativt lave tjæredugpunkt er muligt at opnå en stort set partikel fri gas. Det mest afgørende er således, at de gennemførte forsøg med gas-køling og posefiltrering kraftigt bestyrker forventningen om, at metoden er farbar, idet irreversible aflejring af tjære og andre kondenserbare gaskomponenter synes at kunne undgås.

**Figur 15: Tryktab over posefilter målt under forsøg nr. 5 på halm. (De to perioder uden tryktab skyldes forekommende driftspauser uden gassetrømning).**





**Figur 16: Tryktab over posefilter målt under forsøg nr. 6 på restfibre fra CP Kelco.**

Gasrensingsforsøgene er gennemført i samspil med det parallelt forløbende PSO-Eranet-2008 projekt ledet af den danske partner Dall Energy og den Hollandske partner, ECN. Yderligere resultater fra gasrensingsforsøgene fremgår således af Eranet-projektets slutrapport [Zwart et al, 2010].

#### 4.6.9 Partiel oxidation (POX)

Under de her rapporterede 100 kW forsøg blev der - ligeledes for første gang - foretaget en reformering af den kølede og filtrerede gas-delstrøm. Dette ved partiel oxidation i et dertil indrettet "POX"- kammer.

I dette el-tracede og isolerede (nært adiabatisk) kammer tilføres en i forhold til en fuldstændig oxidation af gasstrømmen lille mængde luft. Derved øges temperaturen i POX-kammeret fra ca. 300 til op til ca. 900 °C, hvorved hovedparten af gassen indhold af tjære nedbrydes til primært lette brændbare gasser. Erfaringsmæssigt dannes der dog også en rest af tungere tjærestoffer (inkl. PAH) som efterfølgende evt. skal separeres og/eller nedbrydes på anden måde.

Under forsøg nr. 6 på restfibre fra CP Kelco blev der i tidsrummet fra kl. 13:10 til kl. 15:20 foretaget partiel oxidation ved først 900 °C og derefter 600 °C, medens der blev målt på den resulterende gas fra POX-kammerets afgang (GA). De resulterende koncentrationer af de målte lette gasser fremgår af den tidligere figur 13.

Ved sammenligning med de gaskoncentrationer, der efterfølgende blev målt efter sekundærcyklonen (SC), ses, at indflydelsen af POX som forventeligt er størst ved de først indstillede 900 °C, hvor: CO<sub>2</sub> reduceres (trods lufttilsætningen), medens CO øges, ligesom både H<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> øges markant til hhv. ca. 12 % og 6 %.

Til sammenligning fremgår af figur 14 resultatet af et tilsvarende POX-forsøg gennemført omkring kl. 12:00 på den sidste dag af halmforsøg nr. 8. Tendensen er her næsten den samme for så vidt angår H<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> der øges til hhv. godt 10 % og ca. 6 %. Derimod er påvirkningen af CO<sub>2</sub> og CO beskeden i forhold til under forsøg 6, men igen ses det, at CO<sub>2</sub> ikke øges som følge af lufttilsætningen til POX-kammeret.

Resultaterne af POX forsøgene indikerer produktgassens betydelige indhold af højere kulbrinter og herunder kondenserbare tjærestoffer.

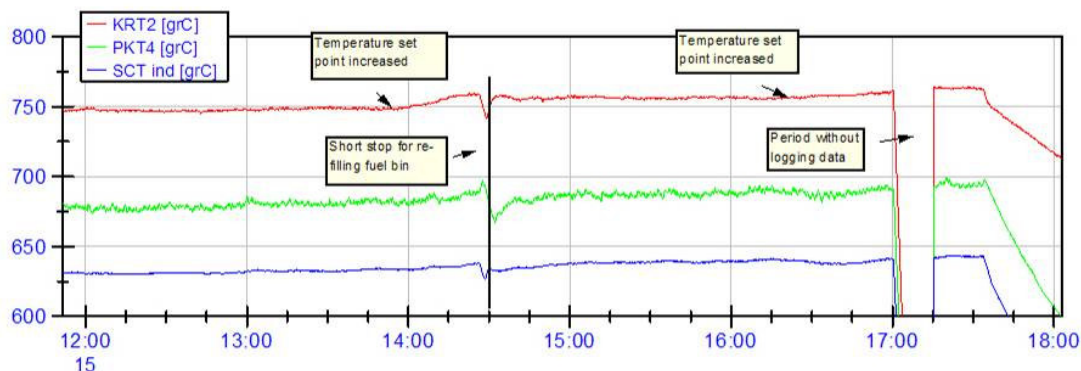
Yderligere forsøg med både partiel oxidation og den antageligt typisk yderligere (dvs. efterfølgende) nødvendige f.eks. katalytiske reformering af gassen forventes at kunne gennemføres i regi af et eller flere senere projekter.

Også POX-forsøgene var et indslag i PSO-Eranet-2008 projektet, hvorfra nærmere rapportering foreligger [Zwart et al, 2010].

#### 4.6.10 Udvidet automatisering og proceskontrol

En længe forberedt men hidtil ikke aktiveret regulator til automatisk kontrol af koksreaktortemperaturen blev med held aktiveret og trimmet ind under forsøg nr. 8. Figur 11 viste, hvordan den givne regulator er i stand til at fastholde en indtastet børværdi ved modificering af luftstrømmen til koksreaktoren.

Temperaturstigningen til sidst i forsøg nr. 8 er i større tids- og temperaturmæssig opløsning vist i figur 17. Det ses, hvordan processen responderer meget fint på, at temperatur-setpunktet øges to gange.



Figur 17. Vigtige procestemperaturer fra de sidste 6 timer af 100 kW LT-CFB test nr. 8

Bemærk at dataopsamlingen svigtede i ca. 15 minutter fra kl. 17, hvorfor de faldende (manglende) temperaturer ikke er reelle. PLC-en styrede også anlægget meget fint gennem dette tidsrum med hektisk aktivitet for at genstarte dataopsamlingen.

Som en yderligere udvidelse af omfanget af den automatiske proceskontrol blev også en regulator til automatisk kontrol af L-benet aktiveret under forsøg nr. 8. Ved regulering af luftstrømmen til L-benet viste denne regulator sig som tilsigtet at være i stand til at

fastholde en ønsket sandstand i L-benet. Dette er primært interessant for at sikre en stabil transport af partikler gennem L-benet, idet tilførsel af både for lidt og unødigt meget luft til L-benet kan hæmme primærcyklonens funktion.

Efter lang tids stabil drift kræver det normalt næsten ingen opmærksomhed at regulere vigtige parametre som koksreaktortemperaturen og sandstanden i L-benet manuelt. Målet er imidlertid, at også 100 kW anlægget snart skal kunne fungere overvågningsfrit gennem især nattetimer, hvorunder der automatisk skal reageres hensigtsmæssigt i forhold til alle potentielt forekommende forstyrrende faktorer.

#### 4.6.11 Agglomerering og K-ophobning

Den ovenfor omtalte øgning af koksreaktorens temperatursetpunkt sidst i forsøg 8 blev også foretaget for til sidst i forsøget at undersøge, hvorvidt en øgning af koksreaktortemperaturen (til slutteligt godt 760 °C) ville føre til driftsforstyrrelse som følge af agglomerering af bed-materialet. Denne bekymring var bestemt tilstede, idet bed-materialet var blevet genbrugt gennem samtlige de seks gennemførte 100 kW forsøg på halm, og idet den til sidst indstillede maksimale procestemperatur kun var ca. 10 °C under KCl's smeltepunkt. For øvrigt var det interessant således at få yderligere bekræftet, at de alvorlige driftsforstyrrelser under forsøg 4 kun skyldtes den forstyrrede fordeling af luft og damp i bunden af koksreaktoren.

Selvom ingen askesmelteproblemer opstod under nogen af de afsluttende forsøg, kan det naturligvis ikke udelukkes, at driftsforstyrrelser ville have vist sig, hvis forsøgene var blevet fortsat i længere tid. I hvert fald viser gennemførte analyser af bed-materiale udtaget under halmforsøg nr. 8, at der ikke blev opnået en steady state for så vidt angår kalium i bed-materialet. Det hidtil højeste set indhold af K i bed-materialet (8 %) blev således målt i den sidst aftappede bed-prøve. Under dette godt 50 timer lange forsøg svarede de kun indledningsvist supplerende påfyldte 20 kg frisk sand til en udskiftning af 7-8 % af bed-materialet pr døgn.

Både de mange akkumulerede forsøgstimer på genpåfyldt bed-materiale og muligheden for kortvarigt at øge temperaturen til sidst i forsøg 8 er værdifulde indikationer af, at hyppig udskiftning af bed-materialet og/eller tilførsel af potentielt dyrere bed-additiver ikke vil være nødvendigt i kommercielle halmfyrede anlæg. Behovet må antages endnu mere beskedent ved anvendelse af de fleste andre tænkelige LT-CFB brændsler, så som restproduktet leveret af CP Kelco, på hvilket forsøg 6 formentlig blev gennemført med en sluttelig endnu større margen til askesmeltemæssigt problematiske procestemperaturer.

Et yderligere motiv til udskiftning af bed-materiale kan være, at der med tiden opstår en u hensigtsmæssig kornstørrelsesfordeling. Ingen af de gennemførte forsøg tyder på dette men yderligere og mere langvarige forsøg og/eller blot senere mere almindelige driftserfaringer må forventes nødvendige for en nærmere afklaring.

I nogle tilfælde vil der sandsynligvis skulle iværksættes såkaldt "particle management". F.eks. kan det være en god idé at fraktionere udtaget bed-materiale for derefter at genindføde en ønsket fraktion, eller et hovedbrændsel, der ikke efterlader solide askepartikler i bedden, kan suppleres med tilgængelige restprodukter med indhold af f.eks. sandpartikler af passende størrelse.

#### **4.6.12 Makronæringsstoffer i aske**

De gennemførte askeanalyser er også interessante for så vidt angår især deres indhold af makronæringsstofferne P og K, hvorfor såvel de opstillede massebalancer, som de opnåede brændsels- og askeanalyseresultater bl.a. er tilgået og behandles nærmere i et Ph.d. projekt, der er blevet etableret som led i det igangværende PSO-2010 demo projekt vedr. LT-CFB forgasseren.

I regi af dette Ph.d. projekt, vil der også blive set på tilsvarende data fra 6 MW demoanlægget på Asnæsværket, hvortil sammenligninger er interessante.

#### **4.6.13 Dioxin**

Som det fremgår af slutrapporten for det efterfølgende PSO-2009 projekt [Glar Nielsen et al, 2010], er der foretaget dioxinmålinger på såvel brændsel som cyklon- og posefilterasken fra forsøg 5. Kun analysen på filterasken viste dioxinindhold over detektionsgrænsen, hvilket dog blot kan skyldes, at detektionsgrænserne på posefilterasken var væsentligt lavere end for brændslet og cyklonasken. Resultatet (I-TEQ (NATO/CCMS)) for posefilterprøven var eksklusive og inklusive detektionsgrænser henholdsvis 0,72 og 1,1 ng/kg. Til sammenligning kan nævnes, at detektionsgrænseværdien (I-TEQ (NATO/CCMS)) for brændslet og cyklonasken var 2,3 ng/kg.

Selvom det målte niveau i posefilterasken er meget lavt og således uproblematisk, må man være opmærksom på muligheden for dannelse af dioxin ved afvigende brændselssammensætning og procesbetingelser, herunder nok især ved brug af brændsler med meget højt indhold af Cl og/eller evt. valg af væsentligt højere posefiltertemperatur.

### **4.7 Udvikling af beregningsværktøjer**

I projektet er der sket en videreudvikling af de beregningsrutiner, der er benyttet til udlægning af de 2 tidligere forsøgsforgassere (50 og 500 kW indfyret). Det drejer sig primært om MS Excel -baserede beregninger til opstilling a masse og energibalancer, udlægning af procesværsnit, beregning af cykloner, evaluering af forsøgsdata samt beregning af såvel anlægspris som driftsøkonomi.

I DONG Energys fortsættende regi, er beregningsværktøjerne senere anvendt og videreudviklet i relation til bl.a. 6 MW demoanlægget på Asnæsværket.

### **4.8 Delkonklusion**

Et værdifuldt nyt 100 kW anlæg er blevet designet, realiseret og indledende afprøvet gennem otte forsøg, hvoraf det sidste dog overvejende blev gennemført i regi af det senere igangsatte PSO-2009 projekt.

Under de fleste af de gennemførte forsøg var brændslet halm, men LT-CFB processens store brændselsfleksibilitet er nu yderligere underbygget ved forgasning af et restprodukt fra CP Kelcos produktion af pektin og carragenan, dvs. restfibre fra hhv. citruskaller og tang.

Under arbejdet med det nye 100 kW anlæg er der som planlagt gennemført en række anlægs- og procesforbedringer, som alle er blevet afprøvet. Specielt er der, med gode resultater - gennemført forsøg med:

- tilførsel af vand til koksreaktor og mellemreaktor (frem for som tidligere at tilføre damp)
- gaskøling baseret på (fuldstrøms-)spraykøling
- delstrøms konvektionskøling og posefiltrering over tjæredugpunktet
- partiel oxidation af den posefilterede gas
- automatisk (PLC-)regulering af koksreaktortemperatur
- automatisk (PLC-)regulering af primærcyklonens L-ben

Gasrensningforsøgene er gennemført i samspil med et parallelt forløbende PSO-Eranet-2008 projekt ledet af den danske partner Dall Energy, og den Hollandske partner, ECN, Holland. Dette projekt er overordnet rapporteret af ECN [Zwart et al, 2010].

Også koordineringen med det ligeledes senere igangsatte PSO-2009 projekt har gjort det muligt at gennemføre et væsentligt større omfang af 100 kW forsøgsaktiviteter set i forhold til det planlagte i PSO-2007 projektet. Dette slutteligt med langt overvejende tilfredsstillende resultater.

Også i senere forsøg bør der fortsat gøres en indsats for så vidt muligt at undgå fejlbehæftede inertbalancer, hvilket er en forudsætning for evaluering og optimering af bl.a. cyklon- og filtereffektivitet. De vigtigste metoder dertil er rapporteret.

## **5. Afklaring af mulige anvendelser og demo-anlægsprojekter**

### **5.1 Indledning**

I dette kapitel betragtes først LT-CFB forgasserens såvel primært som sekundært, dvs. senere påtænkte anvendelser. Dette for så vidt angår både systemkoncepter, anlægsstørrelser og brændsler. Derefter rapporteres den del af projektarbejdet, der har sigtet på at finde frem til mindst én interesseret vært for et hensigtsmæssigt første demo-anlæg.

## 5.2 Mulige anvendelser

Den både som udgangspunkt og i en årrække fremover mest interessante anvendelse af LT-CFB forgasseren er formentlig til såkaldt ”indirekte samfyring” med vanskelige og/eller lavværdige bio- og affaldsbrændsler på de nyeste af de nu eksisterende kulfyrede kraftværker. Antallet af sådanne danske anlæg er begrænset, men i udlandet, herunder f.eks. Kina, hvor der stadig opføres nye kulfyrede kraftværker, vil der være tale om meget store afsætningsmuligheder.

I Danmark er det et udgangspunkt, at det, - forudsat brug af alkalifattige og/eller svovlrige kul – har vist sig muligt at foretage en andelsmæssig begrænset ”direkte” samfyring med biobrændsler som f.eks. KCl-holdig halm. Problemer vedr. bl.a. overhederkorrosion, øget deaktivering af en evt. high dust de-NO<sub>x</sub> katalysator og/eller afsætning af kulasken opstår dog typisk ved en halmandel på mere end 5-10 %. Betydelige, mængder halm har kunnet nyttiggøres på denne måde, men i forhold til dagens stærkt ændrede målsætninger, er det et problem, at der jo forsat ville skulle være tale om langt overvejende kulfyrede anlæg.

Når LT-CFB forgasseren benyttes til ”indirekte samfyring” forventes 90-95 % af bio- og affaldsbrændslernes askestoffer og herunder og bl.a. plantenæringsstofferne K og P at kunne tilbageholdes blot vha. af simpel ”varm” cyklonrensning. Man udgår derved en komplicerende, tabsbehæftet og potentielt problematisk afkøling af rågassen. Separationen af bioaske betyder, at den samfyrede andel biomasse og affald kan øges drastisk. Selv på blot mellemstore kraftværker forudsætter dette dog meget store og/eller flere parallelle forgassere, hvorfor en kraftig opskalering af LT-CFB forgasseren vil være nødvendig.

Muligheden for 90-95 % tilbageholdelse blot ved varm cyklonrensning er også interessant for anvendelse til samfyring på asketolerante industrielle anlæg, så som cementfabrikker hvor brugen af fossile brændsler ligeledes kan reduceres og hvor det er vigtigt at begrænse tilførslen af bl.a. P og K til den producerede cement.

I forhold til mange især meget P- og K-holdige biobrændsler er det vigtigt, at bioasken opnås separat, hvorved bioaskens indhold af næringsstoffer kan nyttiggøres til jordforbedring. Her er det også vigtigt, dels at bioasken ikke har været udsat for så høje temperaturer, at det i problematisk grad bringer næringsstofferne på svært plantetilgængelige og ultimativt endda svært syreoplukkelige former, og dels at LT-CFB - asken har lavt indhold af bl.a. PAH.

Sigtet med LT-CFB forgasseren er - i et næste udviklingstrin – også at producere brændbar gas til brug i gas- og oliefyrede kedler. Dette kræver en stort set støvfri gas, som dog - ligesom til kulkedler - udmærket kan være meget tjæreholdig. Den mest nærliggende løsning er at introducere en rågaskøler, for derefter at separere det resterende støv ud af LT-CFB gassen vha. af et passende temperaturbestandigt posefilter. Gaskølingen og filtreringen kan både tænkes realiseret direkte efter LT-CFB forgasserens recirkulerende primære partikelseparator og efter yderligere varm gasrensning i en derefter placeret sekundær cyklon.

Dette stadig forholdsvis simple anlægskoncept forudsætter, at LT-CFB -gassen køles, filtreres og overføres til fyrrummet stort set uden, at gassen kommer i kontakt med overflader med så lav temperatur, at dette medføre problematisk udfældning af tjære. Det er således fordelagtigt, at LT-CFB forgasseren producerer en gas med et relativt lavt tjæredugpunkt, idet stort set kun lette tjærestoffer produceres ved hurtig lavtemperaturpyrolyse. Under den indledende del af afkølingen er det endvidere en stor fordel, at LT-CFB -gassen har et lavt indhold af kondenserbare askestoffer. Specielt forekommer gasformig KCl stort set ikke ved de kun typisk kun godt 650 °C i LT-CFB forgasserens gasafgang.

Tilføjelsen af gaskøling og -filtrering vil, som allerede nævnt, være en komplikation i forhold til det simple kul-samfyringskoncept kun med varm gasrensning i en eller flere sekundære cykloner. Til gengæld kan også simple olie- og gas kedler anvendes, ligesom et langt større røggaspartikelfilter efter kedlen kan undgås. Endelig giver den mere effektive separation af bio-aske naturligvis en tilsvarende større mulighed for genbrug af de i biobrændslet indeholdt næringsstoffer.

Det ovennævnte gasrensningskoncept kan også tænkes anvendt til 100% fyring med biomasse og affald i både eksisterende og nye kedelbaserede kraftvarmeanlæg. Den væsentligste anvendelsesmæssige forskel er, at der trods kraftig opskalering og f.eks. to parallelle forgassere pr kedel nok ikke vil kunne blive tale om anlægsydelse på mere end højst 100 – 200 MWel, dvs. anlæg i op til stor ”decentral” størrelse. Dette harmonerer dog udmærket med ønsket om moderate transportafstande for især de mest transportmæssigt problematiske typer af biomasse og affald, ligesom mulighederne for afsætning af restvarme generelt er bedre for mindre anlægsstørrelse.

Tilførsel af en stor andel og herunder også 100 % biomasse/affald via LT-CFB forgassere med gaskøling og filtrering er også en mulighed på størrelsesmæssigt typisk mindre industrielle kraftvarmeværker. Der kan her være tale om anlæg der helt eller delvist bliver i stand til at fyre med virksomhedens egne bortskaffelseskrævende restprodukter.

Det vanskeligere sigte, - som de fleste bio-forgasser-udviklere typisk starter med - nemlig produktion af en bredere anvendelig tjærefattig gas til f.eks. motorer, brændselsceller, syntese og rørført distribution af fuldt afkølet gas er også en mulighed med LT-CFB forgasseren. Der er meget indledende arbejdet med den nødvendige tjærekrakning i det parallelt gennemførte PSO-Eranet projekt [Zwart et al, 2010], ligesom en videre indsats i DONG Energys regi er planlagt og genstand for en aktuel PSO-projektansøgning.

Både med og uden gaskøling og tjærekrakning kan tryksatte versioner af LT-CFB forgasseren endvidere tænkes anvendt på fremtidige højeffektive combined cycle anlæg og herunder i sådanne endnu mere avancerede anlægskoncepter, der også omfatter tryksatte brændselsceller. I combined cycle anlæg er undgåelse af gaskøling både det simpleste og mest effektive, men dertil behøves gasrensning i avancerede keramiske højtemperaturfiltre så som et såkaldt candle -filter. I alle tilfælde er der her tale om særdeles udviklingstunge anlægstyper.

Endelig skal det nævnes, at det lavtemperaturpyrolyse-baserede LT-CFB koncept også byder på gode muligheder for produktion af såkaldt bioolie (pyrolyseolie) og/eller af biokoks.

Sigtet med produktion af bioolie kan være anvendelser af bioolien som:

- opstarts- og støttebrændsel på div. typer kedelanlæg
- let håndterlig og lagringseget, aske- og alkalifattig flydende brændsel til mindre decentrale kedelbaserede kraftvarmeværker, hvor komplicerende modtagelse af fast biobrændsel og håndtering af store mængder aske undgås
- brændstof til tilpassede (særligt brændselstolerante) store forbrændingsmotorer og gasturbiner - f.eks. ligeledes som led i kraftvarme-produktion eller til tungere transportformål (skibe o.l.)
- fremstilling af syntesgas på store centrale forgasningsanlæg, hvortil bio-olien indsamles. Dette med sigte på fremstilling af bl.a. metan, og flydende motorbrændstoffer

Også div. former for raffinering er tænkelige, men som udgangspunkt begrænses biooliens anvendelighed af bl.a. indholdet af ikke-separerbar vand og oxygenerede forbindelser samt meget lav ph-værdi og begrænset lagerstabilitet.

Medens produktion af bioolie med LT-CFB forgasseren pt. stadig er uafprøvet, er produktion af biokoks i form af en kulstofrig aske med lavt indhold af miljømæssigt problematisk PAH en mere umiddelbar farbar mulighed. Produktion af en koksrig aske kræver således blot et reduceret luft-brændselsforhold (evt. blot øget brændselstilførsel), og at aftagere af sådan aske er villige til at betale LT-CFB -anlægsejeren for bl.a. værdien af koksens brændværdi.

Det sidste kan dog ikke tages for givet, selvom meget tyder på, at tilførsel af biokoks i markernes dyrkningslag giver mulighed for samtidig øgning af især visse jordtypers frugtbarhed og en deponering af kulstof, der er langt mere varig end ved f.eks. nedmuldning af halm, husdyrgødning, biogasfibre og spildevandsslam.

Koksens forventede store opholdstid i dyrkningslaget indebærer også, at koksdeponeringen med tiden må forventes at kunne minimeres, hvorved biomassens brændværdi "igen" i højere grad bliver til rådighed for energiproduktion. Også hvis biokoks af andre årsager ikke varigt efterspørges, vil det være en stor fordel for en ejer af et pyrolyse- eller forgasningsanlæg, hvis han i det mindste indenfor et anlægs afskrivningsperiode så i stedet blot kan vælge at prioritere en høj kulstofomsætning for således at spare på udgifterne til brændsels- og askehåndtering samt opretholde rentabiliteten ved øget energiproduktion. Omvendt bør afhængigheden af en varig afsætning af koks til rentabilitetsgivende pris ses som en økonomisk risiko ved investering i rene pyrolyseanlæg, der ikke eller kun i beskeden grad kan omsætte koksen.

### **5.3 Brændsler og anlægsstørrelser**

Energianlæg baseret på bio- og affaldsbrændsler er - grundet bl.a. brændsels- og askehåndtering - mere komplicerede og således generelt dyrere end især olie- og gasfyrede anlæg. Især hvis der er tale om forholdsvis dyre biobrændsler som halm og især træ og energiafgrøder, forventes det derfor, at opnåelse af rentabilitet kræver en betydelig opskalering af LT-CFB forgasseren.



Til kraftværksmæssige anvendelser er forgassere på mindst 50-100 MW\_indfyret de mest interessante og for opnåelse af en høj grad af substituering af fossile brændsler anvendt på blot middelstore moderne danske kulkraftværksblokke (500-1000 MW indfyret) kræves endda yderligere opskalering af LT-CFB forgasseren. Også dette antages pt. muligt, men vil kræve yderligere udviklingsomkostninger. Til gengæld er store enheder generelt de mest rentable.

For øvrigt kan større kapacitet naturligvis også opnås ved anvendelse af to eller flere parallelle forgassere, hvilket både vil reducere behovet for opskalering og kunne medføre fordele for så vidt angår, driftssikkerhed, reguleringsevne og mulighed for helt separat disponering af bio-, og -affaldsaker.

Meget store anlæg kræver naturligvis adgang til tilsvarende meget store brændselsmængder, ligesom de lokale muligheder for afsætning af restvarme kan være begrænsende.

Ikke mindst for ejere af store LT-CFB anlæg (f.eks. 100 MW indfyret) er det meget vigtigt, at der ikke vil være for stor afhængighed af et bestemt lokalt brændsel, som let kan stige markant i pris, når dette i stort omfang efterspørges. LT-CFB forgasserens store brændselsfleksibilitet forventes også derfor at kunne blive en vigtig faktor og dette ikke mindst i en anlægsbeslutningsfase.

I alle tilfælde er LT-CFB anlægget naturligvis mest økonomisk, når der er adgang til at fyre med meget billige, gratis eller negativt prissatte restprodukter. Især adgang til sådanne brændsler synes at kunne gøre selv små anlæg på ned til omkring 10 MW indfyret rentable og dette især hvis et egnet kedelanlæg i forvejen forefindes på lokaliteten. Som det senere fremgår af nærværende rapportering, kan der bl.a. være tale om at tilføje et LT-CFB samfyringsanlæg til industrielle kraftvarmeværker, som således bliver i stand til at nyttiggøre bortskaffelseskrævende organiske restprodukter til reduktion af virksomhedens forbrug af dyrt, CO<sub>2</sub>-afgiftsbelagt fossilt brændsel.

Den hidtidige prioritering af LT-CFB -forsøg med ikke blot halm men også forskellige typer husdyrgødning og biogasrestfibre skyldes bl.a., at der i bl.a. Danmark er tale om et stort energiproduktionspotentiale på sådanne brændsler. Dertil kommer de landbrugsøkonomiske og vandmiljømæssige perspektiver i en askebaseret geografisk omfordeling af overskydende næringsstoffer fra især de mest husdyrtætte og/eller vandmiljøfølsomme områder. Dette kan ses som et eksempel på, at sigtet med LT-CFB forgasseren ikke kun er højeffektiv og kontrollerbar energiproduktion samt effektiv fortrængning af fossile brændsler og tilsvarende reduceret CO<sub>2</sub> emission, men også miljøvenlig og askenyttiggørende disponering af organiske restprodukter.

Baseret på de hidtidige eksperimentelle erfaringer er der grund til at forvente, at LT-CFB forgasseren enten umiddelbart eller i passende videreudviklede versioner vil kunne benytte de fleste foreliggende biobrændsler og organiske restprodukter, når blot disse kan opnås med eller neddeles til (gerne) maks. ca. 3 mm og tørres til (gerne) maksimalt 20-25 % fugt. F.eks. forventes det også umiddelbart muligt at benytte afvandet og tørret spildevandsslam, passende udsorteret husholdningsaffald og fareklassificeret kødbenmel. Dette vel at mærke også til højeffektiv elproduktion og med nyttiggørelse af sådanne

brændsler typisk høje indhold af plantenæringsstoffer. LT-CFB forsøg med brændsler som de sidstnævnte har imidlertid ikke hidtil været mulige grundet miljøhensyn i forsøgsområdet på DTU.

For øvrigt kan LT-CFB teknologien vise sig spændende i forhold til unge energiafgrøder, som -grundet et typisk højere indhold af alkali - formentlig vil vise sig mere fyringsteknisk problematiske end de fleste almindeligt benyttede træbrændsler.

Andre potentielle men pt. uafprøvede LT-CFB brændsler kan være restprodukter fra evt. fremtidig bioraffinaderier og herunder f.eks. ligninrest fra produktion af bioetanol.

Efter succesfuld opskalering og demonstration af LT-CFB forgasseren på ét eller flere danske anlæg, forventes et meget stort eksportpotentiale at kunne realiseres. Derved er også perspektiverne for så vidt angår substituering af fossile brændsler på bl.a. de i udlandet eksisterende kedelbaserede kraftværker meget betydeligt. Udover de også i udlandet forekommende ”danske” bio- og affaldsbrændsler som f.eks. de ovennævnte forventes LT-CFB forgasseren således at kunne benyttes til vanskelige og/eller lavværdige restprodukter fra f.eks. produktion af ris, bomuld, oliven, nødder, sukker, the, planteolier og cellulosefibre.

Endelig kan det tænkes interessant at benytte vanskelige pyrolyserbare typer af mere eller mindre fossile brændsler, så som tjæresand o.l..

#### **5.4 Identifikation og vurdering af mulige demoanlæg**

Indsatsen i projektet har som planlagt omfattet en første screening af et større antal tænkelige demo-anlæg og derefter et væsentligt samspil med tre udvalgte og interesserede potentielle anlægsværter. I samarbejde med disse er behovstilpassede demo-anlæg blevet skitseret og evalueret mht. bl.a. investeringsbehov og driftsøkonomi. For det mest lovende af de tre nærmere vurderede demo-anlæg er der som rapporteret i afsnit 4.6 endvidere gennemført 100 kW forsøg på demoværtens foretrukne brændsel.

I den indledende screeningsproces er der taget udgangspunkt i de potentielle anlægsværter anvendelige brændselstyper, brændselsmængder, eksisterende anlæg, behov for el og varme, samt nuværende omkostninger til energiforsyning og bortskaffelse af restprodukter. Da det skaleringsmæssige udgangspunkt kun var 500 kW anlægget på DTU, var det nødvendigt at fokusere på mindre anlæg for således at begrænse den risiko, der ville følge af en for stor opskalering.

For udvælgelsen af de tre potentielle demoværter har det også været en væsentlig forudsætning, at disse ikke blot var interesserede, men også villige til at indgå i et samspil med projektet og herunder at stille de nødvendige oplysninger til rådighed.

Beskrivelserne og evalueringerne af de skitserede anlæg, hos de tre - i alle tilfælde danske - potentielle demoværter: CP Kelco, Østkraft og DAKA fremgår af henholdsvis bilag 1, 2 og 3, som er udarbejdet af FORCE Technology. Fra disse bilag er nogle af de væsentligste forudsætninger og resultater sammenstillet i tabel 7.

**Tabel 7: Vurderede demo-anlæg (jf. bilag 1,2 og 3). - Se forbehold i den følgende tekst!**

Vært, Lokalitet	CP Kelco, Lille Skensved	Østkraft, Rønne	DAKA, Randers
Brændsel	Restfibre fra citruskaller og tang	Halm	Kødbenmel, kl 1
MW indfyret (HHV)	6,0 / 10,3	10,3	27
Anlæg (primært)	Skivedamptørrer og LT-CFB forgasser for samfyring af eksisterende N-gasfyret (oprindeligt kulfyret) kedel	Halmmodtagelse og oprivning til LT-CFB for samfyring af eksisterende kulfyret ristekedel	LT-CFB forgasser for gasproduktion til nyetableret 100% LT-CFB gasfyret kedel og dampkreds
Investering, Mio. DKK	79 / 102	66	200
Årligt overskud, mio. DKK	19 / 30	-2,4	36
Tilbagebetalingstid, år	4,2 / 3,4	Negativ	5,6

Hos CP Kelco er der taget højde for behovet for tørring af de som udgangspunkt kun mekanisk afvandede restfibre og på alle tre lokationer er det forudsat, at der efter LT-CFB forgasseren indgår en rågaskøler og et posefilter, hvorefter den således opnåede meget støvfattige gas afbrændes i en højtryksdampkedel med en til formålet egnet gasbrænder.

Forgasningsanlægget tænkes i alle tre tilfælde placeret umiddelbart foran kedlen, medens nogle væsentlige øvrige forudsætninger og kommentarer fremgår af det følgende.

Resultaterne af økonomiberegningerne bør dog i alle de behandlede tilfælde tages med forbehold, idet det forud for den forsinkede publicering af nærværende rapport er blevet vurderet, at flere af anlæggenes hovedkomponenter vil være noget dyrere end forudsat i de rapporterede beregninger. Til gengæld er modsat rettede, - dvs. økonomiforbedrende forhold, også tænkelige, herunder f.eks. opskalering baseret på forøgede brændselsstrømme samt voksende udgifter til fyring med fossilt brændsel.

Bemærk også at de gennemførte beregninger er baseret på delvist usikre forudsætninger, vedr. gældende afgiftsregler. For at gøre antagelserne så rigtige som muligt, har FORCE Technology dog tilstræbt en afklaring på dette punkt, hvilket fremgår sidst i bilag 1.

#### Vedr. demoanlæg hos CP Kelco, Lille Skensved:

På fabrikken i producerer CP Kelco gellerings-, fortyknings- og stabiliseringsmidlerne carrageenan og pektin ud fra tang og citruskaller. Restprodukterne fra produktionen udgøres af et fiberholdigt biologisk materiale, som har en brændværdi af tørstoffet på ca. 15-20 MJ/kg. Herudover fremkommer der også to restprodukter fra virksomhedens spildevandsrensning i form af slam og bed-affald, som ligeledes foreslås genanvendt i

projektet. Dette til erstatning af en del af det aktuelle naturgasforbrug til CP Kelcos eksisterende (oprindeligt kulfyrede) interne kraftvarmecentral.

Restprodukterne udgør en samlet årlig mængde på ca. 92.000 tons biomasse. Heraf udgør tørstofdelen ca. 18.000 tons og vandindholdet ca. 74.000 tons. I dag bortskaffes restprodukterne på forskellig vis til dyrefoder og deponi, hvilket udgør en årlig udgift på ca. 13 mio. kr.

Som det fremgår nederst i tabel 7, synes CP Kelco at have de største økonomiske motiver til realisering af et LT-CFB baseret samfyrringsanlæg. Derfor er denne anlægsmæssige mulighed givet størst opmærksomhed ved bl.a. at gennemføre beregninger for to mulige LT-CFB anlægsstørrelser, ligesom 100 kW forsøg er blevet gennemført på et brændsel leveret af CP Kelco.

Som forventeligt opnås den bedste rentabilitet for det største af de to vurderede samfyrringsanlæg, på 6,0 og 10,3 MW (indfyret HHV), for hvilke de beregnede tilbagebetalingstiderne er henholdsvis 4,2 og 3,4 år.

#### Vedr. demoanlæg hos Østkraft, Rønne:

Udgangspunktet i den indledende dialog med Østkraft, var fra PSO-projektets side muligheden for at benytte restfibre fra det nyligt opførte biogasanlæg i Aakirkeby. I givet fald ville de der producerede mekanisk afvandede fibre skulle tørres og det ville ikke mindst skulle afklares, hvor og nærmere hvordan tørringen skulle foretages. Grundet såvel store tekniske problemer under idriftsætningen af det nye biogasanlæg, som Østkraft's voksende behov for at fokusere på dette i evalueringsperioden, blev det fra projektets side imidlertid opgivet at nå til en afklaring vedr. anvendelse af biogasrestfibre. I stedet blev det valgt at betragte muligheden for en (af biogasanlægget uafhængig) tilføjelse af en halmfyret LT-CFB demo-forgasser til Østkraft's kulfyrede blok 6.

Som det fremgår af tabel 7 og de nærmere informationer i bilag 2, vil det vurderede 10,3 MW (indfyret, HHV) samfyrringsanlæg desværre ikke være rentabelt under de benyttede forudsætninger. Dette viser først og fremmest betydningen af prisen på det forudsatte brændsel, og at LT-CFB forgassere til sådanne brændsler vil skulle være væsentligt større og/eller rammebetingelserne væsentligt bedre end de i beregningen forudsatte. Det i projektet vurderede anlægsprojekt ville med andre ord forudsætte en betydelig offentlig støtte til etableringen og/eller driften, hvilket dog harmonerer med, at tanken med det vurderede anlæg har været forsigtig opskalering og demonstration af det forgasningsbaserede samfyrringsanlæg.

Hvis projektet ønskes vurderet i en ændret form, så som opskaleret og/eller ved anvendelse af alternative brændsler, bør der vurderes på mulighederne for opnåelse af større årlig driftstid med varmeafsætning til (bl.a.?) Rønnes fjernvarmenet. Dette med sigte på minimering af det i beregningen forudsatte store omfang af kondensdrift.

En opskalering til antageligt væsentligt mere rentabel størrelse vil kunne foretages på et mere solidt grundlag efterhånden som der opnås erfaringer med det i mellemtiden besluttede og realiserede 6 MW demo-anlæg på Asnæsværket.

Fra projektets side synes muligheden hos Østkraft bl.a. interessant, fordi der fortrænges kul ved kobling af LT-CFB forgasseren til Østkrafts eksisterende blok 6 og fordi der således vil kunne opnås et både effektivt og regulerbart bidrag til at realisere en mere VE-baseret energiforsyning af Bornholm.

Vedr. demoanlæg hos DAKA, Randers:

På fabrikken ved Randers produceres årligt 37.000 tons termisk tørret kødbenmel af typen klasse 1, som af myndighederne kræves bortskaffet ved forbrænding. Ligesom for CP Kelco ville det være interessant for DAKA at kunne basere sin energiforsyning på eget bortskaffelseskrævende restprodukt. En LT-CFB baseret løsning vil dog være forholdsvis investeringstung, da der hos DAKA ikke i forvejen forefindes en el- og varmeproducerne højtrykskedel med tilhørende dampkreds.

For bl.a. at undgå en dyrere kedeltype med efterfølgende støvfilter, er det også i dette tilfælde skønnet bedst at inkludere gaskøling og filtrering efter LT-CFB forgasseren, hvorved kedlen kan være en forholdsvis billig gaskedel, som fyres med den rensede LT-CFB gas.

Restproduktet, der er rigt på bl.a. fosfor, har en øvre brændværdi på 15,6 MJ/kg. I dag anvendes produktet primært som brændsel i cementovne, en bortskaffelse som udgør en årlig udgift på 3,7 mio. kr.

Fordelt på 6000 årlige driftstimer (døgndrift i 5 af ugens døgn) repræsenterer restproduktet en effekt på 27 MW (indfyret HHV). Produktgassen fra LT-CFB forgasseren antages anvendt som brændsel på en nyetableret kraft-varmecentral, hvorfra den producerede damp leveres til det eksisterende procesanlæg, og hvor den producerede el (2,7 MW) leveres til nettet. En eksisterende kedelcentral, der anvender naturgas som brændsel, tænkes fremover at indgå som reserve- og spidslastcentral.

Baseret på bl.a. disse forudsætninger vurderes det i bilag 3, at den nødvendige investering vil være 200 mio. DKK og det årlige overskud 36 mio. DKK, svarende til en tilbagebetalingstid på 5,6 år.

På grund af et pt. utilstrækkeligt grundlag for at vurdere mulighederne for genbrug af asken fra LT-CFB forgasning af kødbenmel, er der forudsat udgifter til deponering, inkl. betaling af affaldsafgift. Hvis det viser sig, at deponering og affaldsafgiftsbetaling kan undgås, vil driftsøkonomien kunne påvirkes markant i positiv retning. Dette gælder naturligvis især såfremt afsætningen af den meget fosforholdige aske måtte kunne foretages på indtægtsgivende måde.

Den valgte anlægsstørrelse blev først i dette projekt anset for at være problematisk set i lyset af den store opskalering i forhold til 500 kW anlægget på DTU. I markant mindre størrelse ville den nødvendige etablering af en komplet ny kraftvarmecentral imidlertid ikke være økonomisk farbar. Nu hvor skaleringsgrundlaget "er vokset" fra 500 kW til 6 MW (på Asnæsværket), synes de forudsatte 27 MW indfyret (HHV) mindre skaleringsmæssig problematisk, og hvis yderligere brændsel kan allokeres kan det endda overvejes at søge driftsøkonomien forbedret ved yderligere opskalering.

Selvom kødbenmelet, har karakter af et tørt granulat, der formentlig er let at indføde og pyrolysere i LT-CFB forgasseren, bør det huskes, at brændslet afviger markant fra de biomassetyper, der hidtil har været genstand for LT-CFB forgasningsforsøg. Derfor bør en testkørsel med 100 kW forsøgsanlægget overvejes som et evt. næste skridt, og hvorefter det er oplagt at søge askens anvendelsesmuligheder afklaret.

Vedr. 6 MW DONG Energy demoanlæg på Asnæsværket:

Dette anlæg er vurderet og i betydelig grad forberedt i regi af PSO-2009 projektet "LT-CFB demonstration plant", Phase 1", som er gennemført af bl.a. DONG Energy, Risø-DTU og DFBT.

Efter opnåelse af et tilsagn om fortsat støtte fra Energinet.dk er demo-anlægsprojektet blevet besluttet og nu også realiseret, ligesom en succesbetonet første afprøvning på halm er gennemført frem imod sommerferien 2011. I en næste (indeværende) anden fase af projektet vil den producerede gas ikke som hidtil blot blive affaklet over forgasseren, men i stedet kanalført til og afbrændt i kedlen i Asnæsværkets blok 2.

Senere vil der være tale om mere langvarig demo-drift på udvalgte brændsler, ligesom forsøg med videregående gasrensning er planlagt.

Udover DONG Energy (igen som projektansvarlig) deltager Risø-DTU, DTU, Kemiteknik, Calderys og DJF, Aarhus Universitet og DFBT i PSO-2010 projektet.

Yderligere info fremgår af PSO-2009 projektets slutrapport [Glar Nielsen, 2010], og af den løbende opdaterede Pyroneer hjemmeside [www.Pyroneer.dk](http://www.Pyroneer.dk)

## **5.5 100 kW forsøg på demo-brændsel**

I tråd med resultatet af evalueringerne refereret i det foregående afsnit blev det valgt at gennemføre 100 kW forsøgene nr. 6 og 7 på restfibre fra CP Kelco.

I forhold til den "almindelige" halm anvendt til de øvrige 100 KW forsøg, havde restproduktet fra CP Kelco et væsentligt højere indhold af aske, hvilket er hovedårsagen til brændslets lidt lavere brændværdi ved ca. samme lave fugtindhold (se tabel 3). Man bemærker også, at indholdet af fosfor er på ca. samme lave niveau som halm, medens indholdet af kalium og Cl er væsentligt lavere.

Som også til alle tidligere LT-CFB forsøg blev der kun benyttet almindelig kvartssand som bed-materiale. Det vil sige, at der forud for forsøg nr. 6 blev påfyldt frisk sand uden additiver, medens forsøg 7 blev startet på brugt bed-materiale fra forsøg 6.

Som ligeledes allerede rapporteret i afsnit 4.6 forløb det første af de to forsøg på CP Kelcos restfibre (forsøg nr. 6) særdeles tilfredsstillende. Under det andet forsøg på samme restfibre (forsøg nr. 7) blev der derimod ikke opnået en tilsvarende langvarig og stabil drift. Dette blev forhindret af to driftsforstyrrelser, som dog ikke vedrører selve forgasningsprocessen. Først krævede en utæt primæracyklon afkøling for lapning den følgende dag, hvor en alvorligt fejlbehæftet opdatering af PLC- programmet måtte konstateres under den følgende genstart. Programmeringsfejlen betød bl.a. at

indfødningsraten kun kunne stilles til 100 % last, hvilket medførte en tilstopning af gasafgangen tidligt under genstarten.

Heldigvis havde resultaterne af forsøg nr. 6 allerede i høj grad bekræftet forventningen om, at LT-CFB forgasseren vil være velegnet til at indgå i det hos CP Kelco påtænkte system til fortrængning af en væsentlig del af det aktuelle naturgasforbrug ved samfyring med fabrikkens egne bortskaffelseskrævende restprodukter.

Konklusionen bør dog bestyrkes ved gentagelse af det desværre uheldsramte forsøg nr. 7 og da med visse i kapitel 4 påpegede modifikationer i forhold til det overvejende succesfulde forsøg nr. 6. Såvel det efter forsøg 7 aftappede bed-materiale og resten af det af CP Kelco leverede forsøgsbrændsel er blevet flyttet til og oplagret på Risø med henblik på et sådant evt. yderligere 100 kW forsøg.

Alternativt eller supplerende vil der med store chancer for succes kunne gennemføres et forsøg med CP-Kelcos restfibre på 6 MW demoanlægget på Asnæsværket. Dertil vil det næppe være nødvendigt at pelletere det tørrede brændsel, men hvis tørringen efterlader et produkt med en maksimal partikelstørrelse på væsentligt mere end ca. 3 mm, bør der foretages en neddeling. Dette f.eks. ved hjælp af en fodervalse med en indstillet afstand mellem valserne på ca. 3 mm.

## **5.6 Markedsanalyse**

Især DFBTs underleverandør i nærværende projekt Innovation Management ved Tom Weidner, har med udgangspunkt i tilgængelige informationer om både brændselsressurser og egnede danske kedelanlæg gennemført en markedsanalyse for LT-CFB forgassere i fortrinsvis Danmark og til dels også Europa.

I henhold til det konkluderede er der tale om et potentiale, som er rigeligt til at retfærdiggøre meget betydelige udviklingsomkostninger. Det globale afsætningspotentiale er ikke vurderet men det er naturligvis langt større.

## **5.7 Delkonklusion**

Den oprindeligt iværksatte indsats rettet imod identifikation og vurdering af mulige demoanlæg har ført til indledende udvælgelse af tre placeringer og senere prioritering af et gerne ca. 10 MW anlæg hos CP Kelco, Lille Skensved. Dette til samfyring med pt. bortskaffelseskrævende restfibre fra CP Kelcos produktion af fortykkelsesmidler, samme sted.

Et velegnet lokalt tilpasset samfyringsanlæg med tilhørende hjælpeudrustning er blevet skitseret og vurderet teknisk og økonomisk. Med visse forbehold for så vidt angår anlægget og dets økonomiske grænsebetingelser syntes anlægget -til trods for den begrænsede størrelse - umiddelbart at kunne opnå en meget interessant driftsøkonomi.

Det første af de på CP Kelcos restfibre gennemførte 100 kW forsøg (100 kW forsøg nr. 6) har i høj grad bekræftet forventningen om, at LT-CFB forgasseren vil være velegnet til at indgå i det hos CP Kelco påtænkte system til fortrængning af en væsentlig del af det aktuelle naturgasforbrug ved samfyring med fabrikkens bortskaffelseskrævende restprodukter.

Da selve forgasningen af CP Kelcos restprodukt synes uproblematisk, bør hovedvægten i eventuelle videre eksperimentelle undersøgelser lægges på dels gasrensning og dels vurdering af steady state sammensætning af bed- og cyklon/filteraske. Sidstnævnte med henblik på en nærmere vurdering af askernes anvendelsesmuligheder.

Det skal dog tilføjes, at anlægsprojektet senere er blevet bearbejdet og vurderet yderligere af CP Kelco bistået af FORCE Technology. Dette nu også ved sammenligning med alternative anlægsmæssige muligheder. Både i denne forbindelse og af Dong Energy er det blevet vurderet, at investeringen vil blive væsentligt større og driftsøkonomien derfor knapt så attraktiv, som vurderet i nærværende projekt. Der er dog stadig tale om økonomisk interessant mulighed.

Også de to øvrige betragtede demo-anlæg skønnes fortsat interessante og bør således evalueres yderligere, herunder med antagelse af tænkelige mere gunstige forudsætninger bl.a. for så vidt anlægsstørrelse og rammevilkår.

Som det fremgår af andre dele af den nærværende rapport er de i projektet evaluerede tre udvalgte demo-anlæg blevet "overhalet" af det nu allerede etablerede og indledende afprøvede 6 MW demoanlæg på Asnæsværket. Denne gunstige udvikling udelukker dog ikke en senere realisering af anlæg i lighed med de tre evaluerede, idet der snarere vil være tale om et stærkt forbedret grundlag for sådanne leverancer.

## **6. Initiering af forretningsmæssig udvikling**

### **6.1 Indledning**

Udgangspunktet for projektet var, som allerede nævnt, en erkendelse af, at de aktuelle LT-CFB projektpartnere ikke alene kunne stå for bl.a. den nødvendige videre opskalering og demonstration. Der skulle således etableres forbedrede forudsætninger for en mere kommercielt sigtende indsats. Specielt var der behov for hurtigst muligt at få realiseret et væsentligt opskaleret og således dyrt demonstrationsanlæg, så som det i kap. 5 prioriterede anlæg hos CP Kelco.

Løsningen kunne være at inddrage en økonomisk tung partner, og - samtidigt eller yderligere senere - gerne en partner med interesse for og kapacitet til international levering af kraftværksbetonede anlæg.



## 6.2 Forretningsplan

For således at befordre den tilsigtede og nødvendige forretningsmæssige udvikling har DFBT rekvireret konsulentbistand fra Innovation Management ved Tom Weidner (TW). Dette primært til udarbejdelsen af en forretningsplan, samt gennemførelse kontakter til mulige tunge interessenter. TW kunne tage udgangspunkt i en tidligere evaluerende indsats vedr. LT-CFB-forgaseren gennemført for Forskerparken CAT.

Som et væsentligt led i forretningsplanen er der gennemført en markedsundersøgelse for primært Danmark og sekundært Europa. Udgangspunkterne har bl.a. været en til anvendelsen opdateret oversigt over eksisterende større danske kedelanlæg i relevante kategorier fra FORCE Technology og sammenstykkede informationer om anvendelige brændselsressourcer.

Det konkluderes at markedspotentialet er meget stort og rigeligt til at kunne retfærdiggøre den fortsat nødvendige store udviklingsindsats og perspektiverne er naturligvis endnu større på globalt plan. F.eks. opføres der stadig kulfyrede kedelanlæg i Kina, hvor samfyring med biomasse og affald via LT-CFB forgasning synes interessant.

Grundet de som udgangspunkt manglende tilstrækkeligt investerings- og risikovillige deltagere i LT-CFB udviklingsaktiviteterne, måtte der i forretningsplanen fleksibelt planlægges med flere alternative kommercialiseringsstrategier. Den valgbare (og valgte) hovedmodel var, at et nydannet "LT-CFB-selskab" med mulighed for deltagelse af bl.a. de hidtidige udviklingspartnere samt - hurtigst muligt - mindst en stor ny investor skulle fortsætte udviklingsindsatsen i det bedst opnåelige tempo.

Selvom elementer af den i projektet udarbejdede forretningsplan stadig er interessante er helheden ikke længere relevant for nærværende rapportering. Dette ikke mindst grundet overdragelsen nævnt i afsnit 6.3.

## 6.3 Overdragelse til DONG Energy

Undervejs i projektet viste DONG Energy sig interesseret i igen at indgå i videreudviklingen og nu også kommercialiseringen af LT-CFB teknologien. Dette forudsat en overtagelse af DFBTs relevante rettigheder og know how, hvilket følgelig blev aftalt sidst i 2009. Det er således nu op til DONG Energy at fastlægge den fremadrettede strategi for den videre udvikling og kommercialisering.

Indsatsen kan bl.a. følges på den af DONG Energy oprettede hjemmeside [www.Pyroneer.com](http://www.Pyroneer.com)

Der er en lang række holdepunkter for at tro på, at LT-CFB teknologiens potentiale nu hurtigere og bedre vil kunne realiseres:

- DONG Energys både langt større økonomiske "muskler" samt vigtige "tilstødende" kompetencer, vedr. bl.a. biomassehåndtering og kraftværkedelteknologi

- DONG Energys forhåndsindsigt i LT-CFB teknologien baseret på deltagelse tidligere udviklingsaktiviteter
- DONG Energys gode muligheder for fortsat at trække på aktørerne i det allerede etablerede netværk omkring LT-CFB forgasseren
- Stort "match" til DONG Energys besluttede strategi, herunder muligheden for at supplere termisk baseret elproduktion baseret på overvejende importeret træ med elproduktion på mere lokalt og billigere foreliggende brændsler. Dette i første omgang ved omstilling af fossil kapacitet på DONG Energys eksisterende værker
- Medens de hidtidige aktører har været tvunget til at fokusere på de simpleste LT-CFB anlægskoncepter, vil DONG Energy bedre kunne afsætte ressourcer til også at arbejde med yderligere og mere udviklingstunge muligheder så som reformering af LT-CFB gassen med sigte på produktion af syntetiserede brændstoffer og herunder f.eks. metan til substituering af naturgas
- DONG Eneegys intentioner om ikke kun at implementere LT-CFB forgassere på egne men også andre anlæg i både Danmark og internationalt.

Nogle af de med LT-CFB forgasseren primært tilsigtede brændselstyper og herunder nok primært halm vil alternativt kunne anvendes til fremstilling af bl.a. 2G bioethanol, ligesom organisk husholdningsaffald i fremtiden kan tænkes anvendt til biologisk processering a la "Renescence". LT-CFB forgasseren vil dog formentlig også kunne fyres med restprodukter fra sådanne anlæg og i givet fald er der mulighed for værdifulde synergier i forhold til nogle af DONG Energys pt. væsentligste øvrige udviklingsspor.

I en situation, hvor fossile brændsler og herunder især kul og tilsvarende emissioner stadig er forholdsvis billige og hvor det som vanligt må forventes, at de første kommercielle anlæg af en nyudviklet type vil være forholdsvis dyre, er det følgende også vigtigt:

- voksende dansk såvel som international politisk prioritering af en stor og hurtig overgang fra fossil til vedvarende energi, - dette under hensyn til såvel den fremtidige forsyningssikkerhed som klimaproblematikken
- voksende politisk forståelse for nødvendigheden af også at prioritere en stor og regulerbar el-produktion baseret på biomasse og affald, dvs. som supplement til dels vind ol. og dels lastudjævnende men uproduktive indslag
- forbedrede rammebetingelser for etablering af prioriterede LT-CFB anlægstyper i Danmark, herunder ophævelsen af hvile-i-sig-reglen for kraftværksanlæg fyret med affaldsklassificerede biobrændsler (f.eks. gylle- og biogasrestfibre) samt elproduktionstilskuddet på (foreløbigt?) 40,5 øre pr kWh til forgasningsbaseret el-produktion på basis af biomasse

Yderlige må Energinet.dk's allerede udviste store vilje til at støtte de fortsatte udvikling i DONG Energys regi fremhæves. Det senest støttede store PSO-2010 projekt "B4C" har således allerede ført til realisering og indledende afprøvning af det markant opskalerede (6 MW indfyret) demonstrationsanlæg i tilknytning til Asnæsværkets blok 2. Her er projektet også blevet befordret af en stor opbakning fra værkets ledelse og personale, ligesom projektet er blevet mødt med en ligeledes værdifuld opbakning fra de berørte kommunale og regionale myndigheder.

Også i forbindelse med overdragelsen af LT-CFB teknologien til DONG Energy, har Tom Weidner fra Innovation Management ydet værdifuld indsats. Dette først som konsulent for DFBT i PSO-2007 projektet og senere for DONG Energy i forhandlingsfasen frem imod overdragelsen i december 2009.

## **6.4 Delkonklusion**

Projektets bestræbelser i retning af at initiere en mere forretningsorienteret udvikling i relation til LT-CFB forgasseren er ikke lykkedes i den først tilstræbte form, men har alligevel ført til et særdeles godt resultat i form af DONG Energys overtagelse af teknologien. Ikke mindst set under en national synsvinkel synes dette særdeles hensigtsmæssigt:

- LT-CFB forgasserens anvendelses- og forretningsmæssige potentiale kan realiseres af en kompetent og ressourcestærk dansk ejet aktør, med klare motiver til at prioritere den nødvendige fortsatte indsats
- Gode muligheder for fortsat nyttiggørelse af de øvrige hidtil involverede danske aktørers relevante kompetencer
- Gode muligheder for en hurtig etablering af danske anlæg, der i høj grad vil kunne bidrage til og også indirekte befordre den tilstræbte overgang til en vedvarende energiforsyning, herunder ved økonomisk hensigtsmæssig genbrug af eksisterende anlæg og forsyningsnet samt f.eks. at aftage restfibre fra biogasanlæg
- Begrænsning af behovene for både import af biomasse og eksport af affald ved i øget omfang at benytte vanskelige lokale brændsler og herunder også bortskaffelseskrævende affaldsstrømme til effektiv energiproduktion
- Etablering af forbedrede afsætningsmuligheder for restprodukter fra danske landbrug og andre typer fødevarerproducerende virksomheder
- Øget genbrug af plantenæringsstoffer og deraf følgende reduceret behov for import
- Beskyttelse af vandmiljøet ved etablering af bedre adgang til geografisk omfordeling af lokalt overskydende næringsstoffer
- Sikring af danske arbejdspladser i bl.a. yderområder og i relation til den fortsatte teknologiudvikling samt fremstilling af komponenter og anlæg
- De gode muligheder for opnåelse af valutaindtægter ved realisering af et særdeles stort eksportpotentiale
- På sigt vil der kunne opnås et væsentligt bidrag til den ønskelige danske og internationale begrænsning af CO<sub>2</sub> emissionen.

Da DONG Energys ambitioner med LT-CFB-teknologien ikke er begrænset anvendelser på egne anlæg kan de i projektet evaluerede tre demo-anlæg og herunder ikke mindst det højest prioriterede anlæg hos CP Kelco fortsat tænkes realiseret.

## 7. Formidling

Forud for nærværende slutrapportering er projektets resultater, samt LT-CFB forgasserens status, fordele og anvendelsesmuligheder blevet formidlet på bl.a. følgende måder:

- Bidrag til artiklen: "Den tjærefri forgasser og den ultimative forgasser" i Forskning i Bioenergi nr. 20, juni 2007 [Skøtt, 2007]
- Artikel i Forskning i Bioenergi, nr. 20, juni 2007: "Forgasning af besværlige biobrændsler" [Stoholm, 2007]
- Deltagelse med paperet: "The low temperature CFB gasifier - 500 kW test on biogas fiber residue". (Paper OA10\_1) og tilsvarende oral præsentation ved den 16. internationale biomassekonference i Valencia, Spanien, June 2008. [Stoholm et al, 2008]
- Præsentation ved I-Tech-partner FORUM arrangementet "Energy Academy" afholdt hos SEAS-NVE Svinninge, August 2008: "High Efficient Energy Production from Low-grade Biomass and Waste" [Stoholm, 2008]
- Præsentation ved I-Tech-partner FORUM arrangement på Roskilde Universitet d. 21-22 oktober 2008: "High efficient energy production from low grade biomass and waste" [Stoholm, 2008a]
- Deltagelse i "Workshop on Sustainable Energy" d. 14 - 15 January 2009 på Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby (uden præsentation)
- Deltagelse i "Regional Gasification Guide Workshop for the Nordic countries" d. 22. oktober 2009 i Stockholm (uden præsentation)
- Artikel i Forskning i Bioenergi nr. 31, marts 2010: "DONG satser på forgasning." [Stoholm et al, 2010]
- Artikel i Forskning i Bioenergi nr. 31, marts 2010: "Forgasning af restprodukter kan blive et hit" [Cramer, 2010]
- Bidrag til slutrapport for PSO-Eranet projekt nr. 2008-1-10036 "Tar removal from low-temperature gasifiers" [Zwart et al, 2010]
- Video fra PSO-Eranet-projekt nr. 2008-1-10036: [http://www.youtube.com/watch?v=M4RSCJdHAKw&feature=player\\_embedded](http://www.youtube.com/watch?v=M4RSCJdHAKw&feature=player_embedded)
- Deltagelse med paperet "The Low Temperature CFB gasifier – 100 kWth tests on straw and new 6 MWth demonstration plant" samt tilsvarende oral præsentation ved den Internationale biomassekonference i Lyon, juni 2010 [Stoholm et al, 2010a]
- Bidrag til slutrapport for ForskEL project no. 2009-10267 "LTCFB demonstration plant", Phase 1, Design project, September 2010 [Glar Nielsen et al, 2010]

Endelig kan der henvises til aktuelle informationer fra DONG Energy vedr. LT-CFB forgasseren på internetadressen: [www.pyroneer.com](http://www.pyroneer.com)

Alle de anførte formidlingsaktiviteter rummer resultater fra PSO-2007 projektet, men flere af de seneste formidlingsaktiviteter er dog helt eller delvist finansieret på anden måde.

## 8. Referenceliste

Cramer, 2010. Forgasning af restprodukter kan blive et hit. Artikel i Forskning i Bioenergi nr. 31, marts 2010.

Glar Nielsen et al, 2010. "LTCFB demonstration plant", Phase 1, Design project. Slutrapport for PSO-ForskEl projektnr. 2009-10267, September 2010.

Glar Nielsen, 2007. Optimering af Lav Temperatur Cirkulerende Fluid Bed forgasningsprocessen til biomasse med højt askeindhold. Ph.d. afhandling.

Skøtt, 2007. Den tjærefri forgasser og den ultimative forgasser. Artikel i Forskning i Bioenergi nr. 20, juni 2007.

Stoholm, 2008a. "High efficient energy production from low grade biomass and waste" Præsentation ved I-Tech-partner FORUM arrangement på Roskilde Universitet d. 21.-22. oktober 2008.

Stoholm, 2008. "High Efficient Energy Production from Low-grade Biomass and Waste" Præsentation ved I-Tech-partner FORUM arrangementet "Energy Academy" afholdt hos SEAS-NVE Svinninge, august 2008.

Stoholm, 2007. Forgasning af besværlige biobrændsler, artikel i Forskning i Bioenergi nr. 20, 2007

Stoholm, 1998. EPO patentansøgning nr. 98 958 839.7-2104.

Stoholm et al, 2010a. The Low Temperature CFB gasifier – 100 kWth tests on straw and new 6 MWth demonstration plant. Paper submitted for and orally presented at the International Biomass Conference, Lyon, France June 2010.

Stoholm et al, 2010. DONG satser på forgasning. Artikel i Forskning i Bioenergi nr. 31, marts 2010.

Stoholm et al, 2008. The low temperature CFB gasifier - 500 kW test on biogas fiber residue. Paper OA10\_1 in proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition, Valencia, Spain, June 2008.

Stoholm et al, 2007. LT-CFB forgasser, - 500 kW forsøg m.v. Slutrapport for PSO-ForskEl projektnr. 2003-4833.

Zwart et al, 2010. Tar removal from low-temperature gasifiers. Slutrapport for PSO-Eranet projektnr. 2008-1-10036.