




**Reguleringsegenskaber for trinopdelte  
forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion  
(Castoranlægget i Græsted)**

**Slutrapport**

Udført for:  
Energinet.dk  
PSO projekt nr. 5288

Udarbejdet af  
BioSynergi Proces ApS  
Henrik Houmann Jakobsen  
September 2007  
2. udgave

---

 BioSynergi Proces ApS  
Slotsbakken 108, DK-2970 Hørsholm  
 +(45) 45 86 14 30  
 [www.BioSynergi.dk](http://www.BioSynergi.dk)  
CVR. nr. 25 90 41 84

## Indhold

1.	Forord.....	3
2.	Sammendrag.....	4
3.	Beskrivelse af Castor anlægget.....	7
3.1.	Gasgeneratoren.....	8
4.	Ombygning til dellastdrift.....	10
4.1.	Ændring af tilførslen af produktgas til gasmotoren .....	10
4.2.	Tilpasning af karbureringssystemet til dellastdrift.....	13
4.3.	Modificering af varmevekslerne til produktgas .....	14
5.	Afprøvning af det ombyggede anlæg ved dellastdrift.....	15
6.	Modellering af kraftvarmesystemet med trinopdelt forgasser .....	20
6.1.	Computermodellens funktion.....	26
6.2.	Referenceliste til kapitel 6.....	29
7.	Forsøg og metodeudvikling af anlæggets start/stop procedurer .....	30
7.1.	Mål for metodeudviklingen.....	30
7.2.	Identificerede indsatsområder .....	32
7.3.	Afprøvede metoder til kold opstart af gasgeneratoren.....	33
7.4.	Forsøg med topbrænder .....	33
7.5.	Forsøg med opstart på flis .....	35
7.6.	Forsøg med opvarmning ved brug af gasfyr .....	37
7.7.	Sammenfatning .....	39
7.8.	Anlæggets stopprocedure .....	40
7.9.	Overvejelse om brug af pausefyring .....	41
8.	Driftsmålinger på Castoranlægget.....	42
8.1.	Driftsomstændigheder under målingerne .....	42
8.2.	Indfyret flismængde .....	44
8.3.	Askeprøver og glødetab .....	44
8.4.	Gassammensætning.....	45
8.5.	Tjæremålinger .....	48
8.6.	Energimålinger d. 12 - 13. december 2006 og d. 7. marts 2007 ..	49
8.7.	Emissionsmålinger .....	56
9.	Referencer .....	57

Bilag: 1-7

## 1. Forord

Hensigten med det her udførte projekt har været at få øget indsigt og opnå praktiske erfaringerne med reguleringsgenskaberne for biomassefyrede trinopdelte forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion. Baggrunden for projektet er en formodning om at også biomassefyrede kraftvarmeverker skal kunne tilpasse sig det øjeblikkelige el- eller varmebehov indenfor kort tid. Det forventes at være afgørende for indpasningen af forgasningsanlæg i energiforsyningen, at de er i stand til at afpasse deres produktion i forhold til de øjeblikkelige vilkår på det energimarked de producerer til.

Det praktiske arbejde har fundet sted på BioSynergis trinopdelte Open Core forgasningsanlæg (betegnet Castor anlægget), der er designet til en indfyret effekt på 425 kW. Det blev oprindeligt etableret som demonstrationsanlæg under projektet *Optimering og automatiseret drift af Open Core anlæg til kraftvarmeproduktion på skovflis*, ref. /1/, som modtog støtte fra Energistyrelsen.

Det samlede kraftvarmesystem inkluderer et kontinuerligt arbejdende tørreanlæg med energigenvinding og anvender frisk brændselsflis fra skovbruget som brændsel.

Projektet er udført med finansiering fra Energinet.dk's PSO program under projektnr. 5288 med titlen: *Modellering, verifikation og langtidsafprøvning af et trinopdelt forgasningsanlægs driftsegenskaber*.

Kontrakten er tegnet med BioSynergi Proces ApS som projektansvarlig og er udført i et projektsamarbejde med DTU, Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion (MEK), Lyngby.

DTU's opgaver i projektet er udført af Ulrik Henriksen sammen med Jens Kai Holm og Jesper Ahrenfeldt. Ved gennemførelsen af projektets måleaktiviteter deltog endvidere Steen Nielsen og Freddy Christensen fra DTU.

Hos BioSynergi Proces har Lars Kyster, Ove Mosgaard, Bent Poulsen samt Henrik Houmann Jakobsen bemandet projektet med sidstnævnte som projektleder.

Kapitel 6 samt bilag 2-4 i rapporten er skrevet af Jens Kai Holm.

Bilag 7 er skrevet af Jesper Ahrenfeldt mens afsnit 8.4 er skrevet af Ulrik Henriksen.

Tekst, databehandling og konklusioner til BioSynergi Proces' del af rapporten er leveret af Ove Mosgaard og Henrik Houmann Jakobsen. Sammenskrivning og redigering er foretaget af Henrik Houmann Jakobsen.

Rapporten udgives af BioSynergi Proces ApS til hvem der kan rettes henvendelser om eksemplarer.

## 2. Sammendrag

Castoranlægget blev opført under et projekt for Energistyrelsen med henblik på at fungere som udviklings- og demonstrationsanlæg for anvendelse af trinopdelt forgasningsteknik til kraftvarmeproduktion. Anlægget er opstillet hos Græsted Fjernvarme, hvor det leverer varme til fjernvarmenettet samt el til elforsyningsnettet.

De overordnede aktiviteter i det her beskrevne projekt har været:

- Ombygning og afprøvning af kraftvarmeanlægget til dellastdrift
- Forsøg og metodeudvikling af anlæggets start/stop procedurer
- Driftsmåliger på det ombyggede kraftvarmeanlæg
- Udvikling af en statisk computermodel af det samlede kraftvarmesystem

### Ombygning til og afprøvning af dellastdrift:

Ved afslutningen af projektet for Energistyrelsen var demonstrationsanlægget udelukkende indrettet til drift med fuld ydelse. Der er imidlertid kun meget begrænsede behov for kraftvarmeanlæg, som ikke er i stand til at variere den afgivne ydelse. Især når der er tale om anlæg, der anvender fast brændsel som biomasse og i reglen er vanskelige at starte og stoppe automatisk, vil der være behov for at kunne afpasse anlæggets ydelse efter det aktuelle varmebehov eller alternativt det aktuelle elbehov.

En af aktiviteterne i det her rapporterede PSO-projekt har derfor været at modificere Castoranlæggets opbygning og styringssystem så det kan fungere tilfredsstillende ved både dellast ydelse og fuldlast ydelse.

De udførte ombygninger og forbedringer er afprøvet gennem længere tids drift og har vist sig at fungere efter hensigten. Status er, at anlægget kan variere belastningen mellem ca. 40 og 100 % elydelse.

En gavnlig sideeffekt af ombygningen er at der er indført fuldkommen separate rørstrækninger til henholdsvis urensset produktgas og rensset produktgas. På vejen hen til motoren passerede den rensede gas tidligere gennem nogle rørstrækninger, som også blev brugt til urensset gas. Det betød at den rensede gas nåede at blive forurennet af belægninger fra rørene inden den nåede frem til motoren. Ombygningen har elimineret den ulempe.

### Start/stop procedurer:

Som en særlig del af driften har specielt muligheden for forbedring af anlæggets start/stop procedurer været underkastet en nærmere undersøgelse.

Til metodeudviklingen af startproceduren for gasgeneratoren er gennemført forsøg med følgende metoder:

- Opvarmning med en mindre topbrænder i gasgeneratoren
- Direkte start af gasgeneratoren på flis
- Opvarmning af gasgeneratoren med en større gasbrænder (ca. 30-50 kW)

Afprøvningen har udpeget opvarmningen med en større gasbrænder som den mest velegnede startmetode for et helt koldt anlæg. Essensen på afprøvningerne af den større gasbrænder er:

- Det tager 4-5 timer at opvarme et helt koldt anlæg så det er klart til indfyring af tør flis.
- Det samlede opvarmningsforløb frem til det tidspunkt hvor elproduktion kan indledes strækker sig over ca. 7 timer. Heraf vil kun de sidste par timer kræve aktiv bemanning.
- Under opvarmningssekvensen er der behov for at anvende såvel en LPG/oliebrænder brænder til selve opvarmningen af den tomme reaktor, og efterfølgende under indfyring af flis tillige en topbrænder, der hjælper med at trække flammefronten på brændslet op gennem indsnævringen i reaktoren.
- Hvis anlægget genstartes efter et stop af mindre end ca. 6 timers varighed, kan elproduktionen genoptages med det samme.
- Hvis stoppet har varet fra 6-24 timer kræver det en opvarmningsperiode på ca. en time inden elproduktion kan genoptages.
- Enkelte forbedringer af opstartsforløbet er gennemført i det parallelt løbende PSO projekt 5729. Yderligere forbedringer implementeres i PSO projekt 7191. Med udgangspunkt i en moderniseret motorstyring vil der specielt blive sikret, at omskiftningen fra startbrændsel til drift på produktgas kan udføres automatisk.
- Der er i projektet kun udført mindre tilpasninger af anlæggets stopprocedurer. Der er nu to velfungerende automatiske stopprocedurer: En almindelig og en kritisk. Den kritiske anvendes hvis der opstår fejl som medfører, at anlægget skal tages ud af drift øjeblikkeligt.

#### Driftsmålninger på kraftvarmeanlægget:

Afprøvningerne blev afsluttet med et måleprogram, der dokumenterer anlæggets egenskaber under forskellige driftsvilkår. Måleprogrammet indeholdt blandt andet energimålinger, målinger på produktgassens sammensætning samt akkrediterede emissionsmålinger i anlæggets skorsten.

På grundlag af målingerne er opnået indsigt i anlæggets el- og varmenyttetvirkning samt identificeret de energitab som forekommer. Målingernes detaljeringsgrad har været tilstrækkelige til at kunne bestemme koldgasvirkningsgrad for den trinopdelte forgasser. Blandt resultaterne af driftsmålningerne, som er samlet i kapitel 8, skal fremhæves:

- På grund af en svejsefejl i gasgeneratoren blev luftforvarmeren ødelagt i løbet af projektet, og bliver først retableret i forbindelse med gennemførelsen af PSO projekt 7191. Driftsmålningerne i projekt 5288 er derfor udført uden luftforvarmer og forgasningsluftblæser, hvilket medførte, at forsøgsbetingelserne ikke var optimale.

- Gasanalysen viser, at forgasseren giver en udmærket gas med en rimelig stabil sammensætning.
- Tabet ved uforbrændt kulstof i asken modsvarer ca. 8 % af brændværdien af fugtig flis. Dette er relativt højt, og indikerer muligheder for yderligere optimering af anlæg og driftsforhold.
- Bortset fra NO<sub>x</sub> var alle de målte emissioner godt under de gældende grænseværdier. NO<sub>x</sub> var ca. 20 % over grænseværdien, men det forventes, at en forbedring af motorens tændingssystem kan mindske NO<sub>x</sub> emissionen.
- Tjæreindholdet i rågassen er målt ved at udtage prøver med den såkaldte Petersen kolonne og analysere dem ved GC/MS metoden. Herved kvantificeres karakteristiske tjærestoffer, men den totale tjæremængde måles ikke (udover de kvantificerede tjærestoffer kan mængden af tjære være op til 300 % højere). Resultaterne viste et forholdsvis højt indhold af naphtalen, phenanthren og phenol. Heraf var naphtalen klart den dominerende tjærekomponeent. Det gennemsnitlige målte samlede tjæreindhold i de fire prøver blev bestemt til lidt under 200 mg/normalkubikmeter. Et tjæreindhold af den størrelsesorden for en trinopdelt forgasningsproces indikerer en forkert funktion i gasgeneratoren under afprøvningen. En senere inspektion af anlægget viste at tilsætningen af partiel luft ikke havde fungeret, da luftkanalerne til den partielle oxidationsluft, som tilsættes efter pyrolysezonen, var tilstoppede. Tilstopningen kan skyldes at målingerne blev gennemført uden forgasningsluftblæser og dermed uden en tvungen luftstrøm gennem kanalerne.

#### Udvikling af en statisk computermodel:

Til understøtning af projektets praktiske aktiviteter har DTU udviklet en computermodel til simulering af BioSynergi Proces' samlede kraftvarmesystem. Ved hjælp af modellen fås indblik i anlæggets produktionsparametre ved en vilkårlig driftssituation. Modellen er opbygget som en stationær model baseret på moduler. Der er særskilte moduler for anlæggets hovedkomponenter som f.eks. tromletørrer, gasgenerator, luftforvarmer, varmevekslere og gasmotor. For hvert modul opstilles energibevarelse og massebevarelse. Den overordnede kobling af de enkelte moduler udgør det samlede forgasseranlæg.

BioSynergi har afprøvet den udviklede statiske computermodel og blandt andet brugt den til at simulere drift ved forskellige belastninger med og uden luftforvarmning.

Tillige er foretaget en sammenligning af modellens beregninger og dataregistreringerne fra de driftsmålninger på Castoranlægget, som blev udført d. 7 marts 2007 (se afsnit 8.6). Sammenligningen viste generelt at der var god overensstemmelse mellem modelberegningerne og de registrerede værdier fra målingen. En udskrift med sammenligning af modelresultater og målingerne findes i bilag 5.

### 3. Beskrivelse af Castor anlægget

Projektet er gennemført med udgangspunkt i BioSynergi Proces' komplette kraftvarmesystem, der er realiseret som et demonstrationsanlæg hos Græsted Fjernvarme i Nordsjælland. Græsted Fjernvarme har lagt areal til anlægget og aftager dets varme, men er ikke direkte økonomisk involveret i projektet.

Kraftvarmesystemet anvender forgasningsteknik og en gasmotor til at omsætte brændselsflis til el og varme. BioSynergi Proces ApS patenterede trinopdelte Open Core forgasningsproces er den centrale enhed i kraftvarmesystemet.

Demonstrationsanlægget - der har fået kælenavnet Castor anlægget – er dimensioneret til følgende nominelle størrelser:

- 100 kW el
- 220 kW varme ab anlæg
- 425 kW indfyret brændsel

Det anskaffede motorgeneratoranlægs nominelle eleffekt er imidlertid i sin motorstyring elektrisk begrænset til 75 kW eleffekt, så hidtil har anlægget kun været drift med op til denne eleffekt. I denne rapport benyttes 75 kW eleffekt som referencen for anlæggets fuldlastdrift.

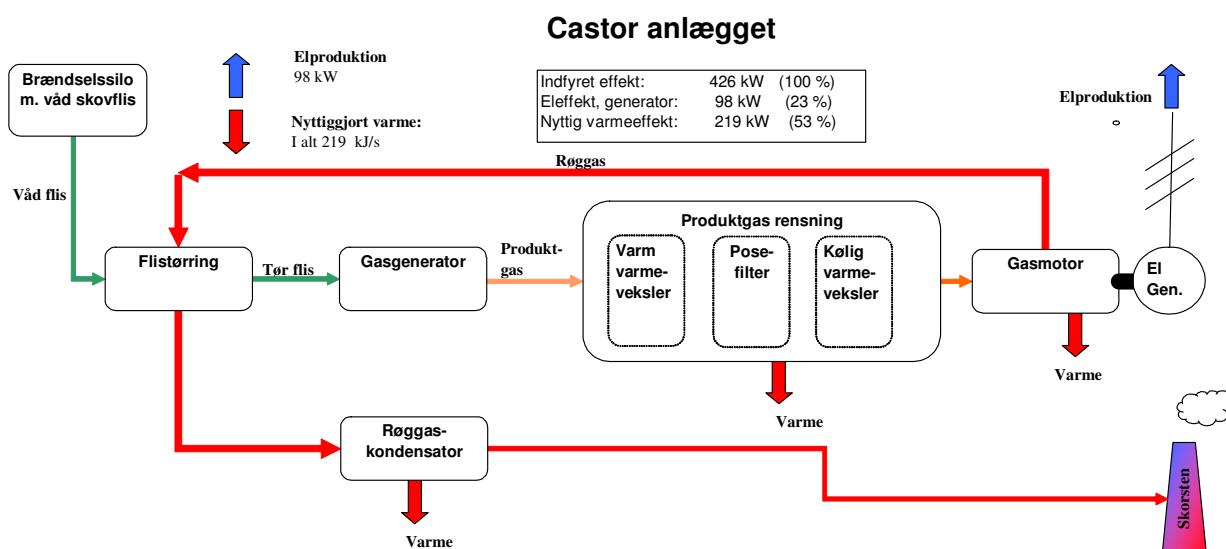
Hele anlægget blev for første gang sat i drift i februar 2004 på forgasningsgas mens det producerede strøm til elnettet og varme til fjernvarme.

Castoranlægget fyres med skovflis af almindelig handelskvalitet. Det vil sige brændslet er af samme type, størrelse, kvalitet og vandindhold, som den der købes af flisfyrede varmekærker.

Anlægget er monteret med et komplet PLC-baseret styresystem, der gør det muligt at gennemføre ubemandet drift. Styresystemet er indrettet til at registrere uregelmæssigheder i driften og på en sikker måde nedlukke anlægget ved driftsforstyrrelser. Ved driftsfejl afgiver PLC styringen en alarm over telefonen, mens komplet nedlukning finder sted uden bemanning er nødvendig.

Der anvendes et tørt gasrensingsprincip til at fjerne partikler og tjæreforbindelser fra produktgassen inden den ledes til gasmotoren. Det tørre rensprincip betyder at der ikke forekommer kondensatudledning fra gasrensningen.

Kraftvarmesystemets hovedprincipper er vist i figur 1 mens en detaljebeskrivelse af Castoranlægget er placeret i bilag 1.



**Figur 1:** Hovedprocesserne i Castor anlægget

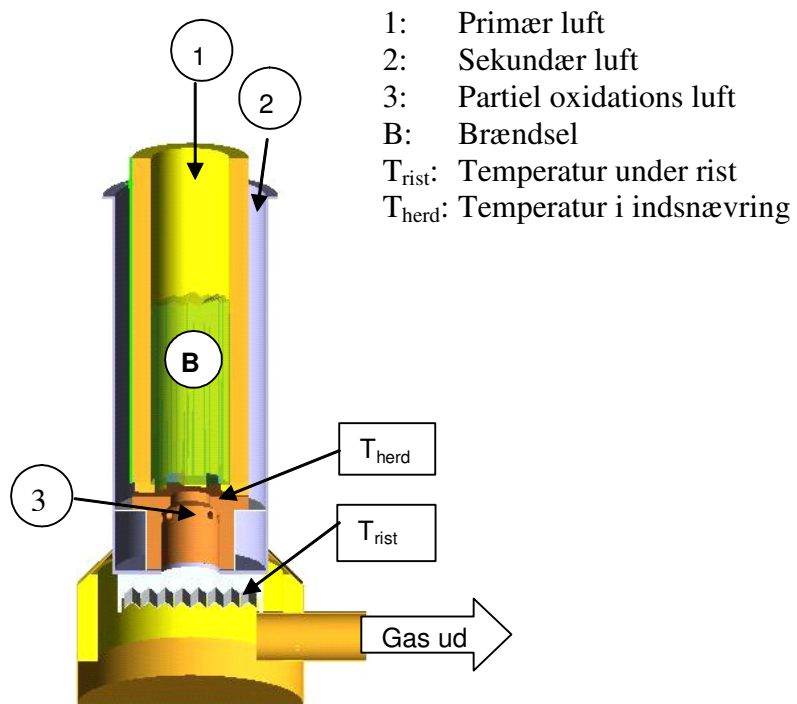
### 3.1. Gasgeneratoren

BioSynergis trinopdelte gasgenerator eller forgasser som den også kaldes, er principielt opbygget som vist i figur 2. Der anvendes et medstrøms forgasningsprincip med en rist i bunden og tilsætning af luft tre steder til processen.

Brændsel tilføres i toppen af reaktoren, der afsluttes forneden med en bevægelig rist, som blandt andet medvirker til at fjerne aske fra processen. Både brændsel og luftstrømmene bevæger sig nedad i gasgeneratoren. Midt i denne befinder sig en indsnævring, hvor der opnås en temperatur på 800-1.000 °C. I indsnævringen tilføres også den sidste luft (partiel oxidations luft eller blot benævnt partiel luft) hvorved der sker en delvis forbrænding af de udviklede pyrolyseprodukter fra de overliggende procestrin. Den delvise forbrænding medvirker til en markant reduktion af gassens indhold af tjæreforbindelser.

Hele processen foregår ved et svagt undertryk Den udviklede brændbare gas – produktgassen - suges ud af gasgeneratoren fra et kammer under risten. I kammeret skilles gassen fra asken, som derefter fjernes mekanisk fra gasgeneratoren. Overvågning af processen har i projektet været praktiseret med kun to temperaturfølere i selve reaktoren samt en i gasafgangen. Deres placering er markeret på figur 2. Den ene –  $T_{herd}$  - sidder i indsnævringen og måler temperaturen lige før tilsætningen af den partielle luft. Den næste -  $T_{rist}$  - befinder sig lige under risten og måler gassens temperatur i kammeret hvor gas og aske adskilles.





**Figur 2:** Principskitse for BioSynergis patenterede trinopdelte gasgenerator.

#### **4. Ombygning til dellastdrift**

Dengang det her rapporterede PSO projekt startede, var Castoranlægget qua sin opbygning kun egnet til at være i drift med fuld ydelse.

Det første trin til at gøre anlægget egnet til drift med varierende el og varmeydelse var derfor en nærmere gennemgang af procesforløbet og dets komponenter.

Gennemgangen konkluderede at følgende ændringer var nødvendige:

1. Ændring i tilførslen af produktgas til gasmotoren og dens styring:
  - Skift fra en fælles gassuger til to separate gassugere for hhv. rågasdrift og ren-gasdrift.
  - Tilpasning af gassugerstyring til modulerende drift (bl.a. ændring fra trykstyring til lambda styring)
  - Tilpasning af karbureringssystemet til dellastdrift
2. Varmevekslere til produktgas:
  - Temperaturstyret bypass spjæld på varmevekslerne for at undgå kondensation
  - Temperaturstyrede vandkredse i de to varmevekslere

##### **4.1. Ændring af tilførslen af produktgas til gasmotoren**

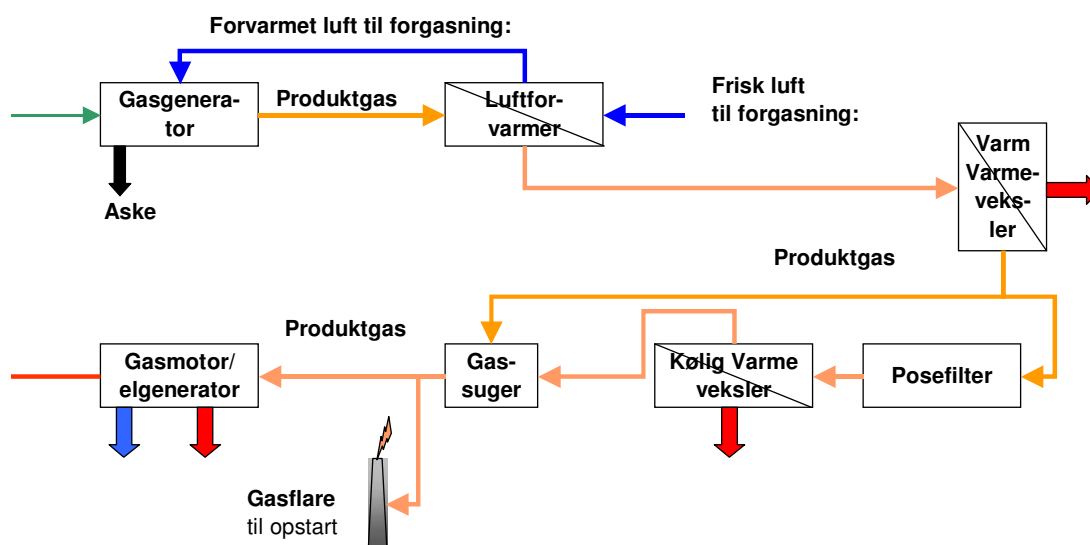
Ved den oprindelige udførelse af anlæggets system af gasrør var der lagt vægt på en så enkel udførelse som muligt.

I bilag 1 findes to proces diagrammer, der viser tilførslen af gas til motoren og gasfaklen før og efter ændringen.

Den oprindelige udførelse er tillige fremhævet i figur 3.

Anlægget kunne i den udførelse drives i tre forskellige driftstilstande:

1. Fakkeldrift, hvor den urensede produktgas (rågas) ledes til afbrænding i gasfaklen. Denne tilstand anvendes typisk under opvarmning og nedlukning af hele anlægget.
2. Fakkeldrift, hvor den rensede gas (rengas) ledes til afbrænding i gasfaklen. Denne tilstand benyttes til opvarmning af komponenterne i rengassektionen (posefilter, kold varmeveksler mv.) og i forbindelse med manuel stop af gasmotoren eller nedlukning af anlægget.
3. Gasmotordrift hvor den rensede gas ledes til gasmotoren.



**Figur 3:** Den oprindelige udformning af rørforbindelserne til produktgas med kun en gassuger til forsyning af enten fakkell eller gasmotoren.

I den oprindelige udførelse blev kun benyttet en enkelt gassuger opbygget efter centrifugal princippet. Den havde både til opgave at levere urensset produktgas (rågas) til gasfaklen og rensset gas (rengas) til gasmotoren. Omkoblingen mellem de to driftstilstande skete med to pneumatisk styrede ventiler på rørstrækningerne til henholdsvis rågas og rengas.

Når rågasventilen stod åben hentede gassugeren rågas direkte fra den varme varmeveksler. I den driftstilstand blev rågassen ikke rensset for partikler og tjærestoffer, så den blev ledt via en kontraventil til afbrænding i gasfaklen. Motorens to pneumatisk styrede on/off gasventiler blev holdt lukkede imens. Det krævede et vist gastryk (ca. 400-500 Pa) at åbne kontraventilen til gasfaklen. For at sikre at gassugeren under fakkeldrift altid kunne overvinde modtrykket fra kontraventilen blev gassugerens styring indrettet til at fastholde en konstant gasmængde ud til gasfaklen. Dermed fandt styringen selv ud af at indstille gassugerens omdrejningstal så modtrykket blev overvundet og den ønskede gasmængde ud til faklen kunne leveres. Også i den driftstilstand hvor det var rensset gas, som blev ledt til gasfaklen, blev gasmængden holdt konstant.

Ved skiftet til forsyning af motoren med rensset produktgas blev der samtidigt ændret styringsprincip. I stedet for at fastholde en bestemt gasmængde fik styringen i stedet besked om at fastholde et bestemt gastryk som blev målt lige før gasventilerne til motoren. Det var kun muligt at indstille gastrykket til en bestemt værdi, hvilket betød at det samme gastryk var til stede uanset hvilken ydelse motoren var indstillet til. Samtidig var der en begrænsning på det maksimale tryk som kunne føres motoren. Hvis trykket blev sat for højt ville kontraventilen til gasfaklen åbne sig og en del

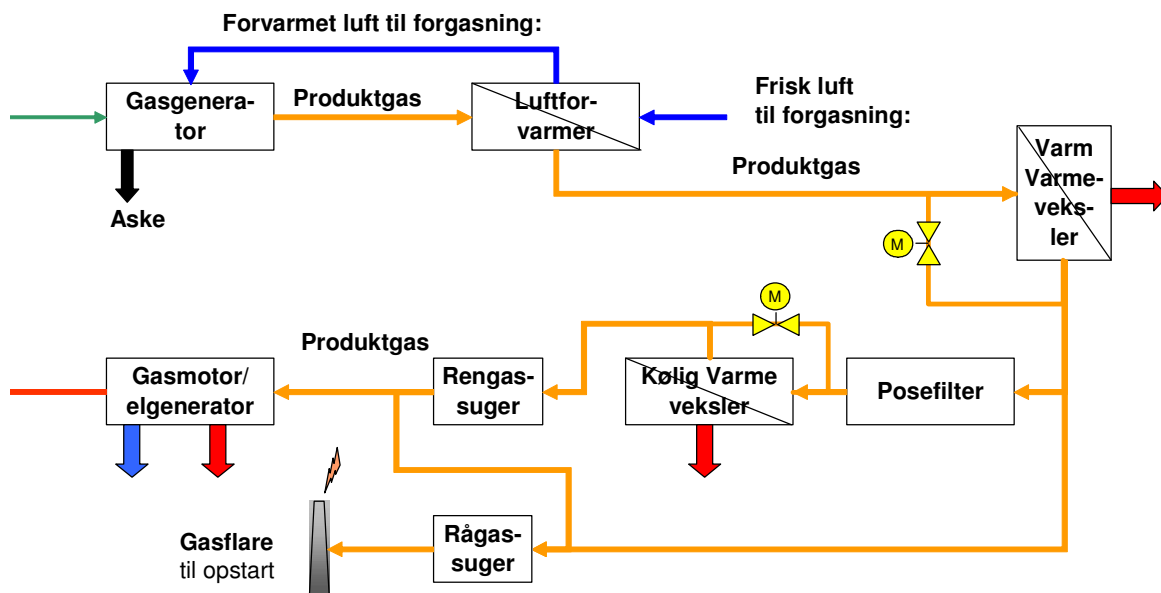
af den producerede gas undslippe gennem gasfaklen. Den daværende eneste reguleringsmulighed var en manuel skydeventil, som var indskudt på rengasrøret efter gasventilerne frem til motoren. Den kunne bruges til at drøvle gasmængden til motoren.

Alt i alt var det her beskrevne system enkelt og billigt i sin konstruktion, men det bød også på to væsentlige ulemper:

Den største ulempe bestod i at når anlægget var i drift med fakkeldrift på urensset gas blev gassugeren og en del af rørstrækningerne forurenede af den urensede gas. Afsætningerne fra driftstilstand sad der fortsat når der blev skiftet til rengasdrift, som så altså alligevel ikke var helt ren, da nogle af afsætningerne løsnede sig og fulgte med gassen til motoren. Der blev ret hurtigt eftermonteret et ekstra tørt filter inden gasmotoren, men det krævede hyppig rensning.

Kombinationen af trykstyring og kontraventilen betød endvidere at der ikke kunne ledes tilstrækkelig med gas til motoren uden at noget af gassen forsvandt gennem kontraventilen til afbrænding. En teknisk løsning på dette var mulig, men da en indstilling til højt gastryk tillige gav dårlige driftsbetingelser under dellastdrift blev det opgivet at udvikle videre på det oprindelige styringsprincip. Med det oprindelige system til gastilførsel var motoren alt i alt primært egnet til fuldlastdrift (75 kW el).

Til en samlet løsning på de ovennævnte problemstillinger blev valgt at ændre gastilførslen til det princip som ses på figur 4.



**Figur 4:** Den ny udformning med to gassugere og fuldkommen opdelte rørstrækninger til rågas og rengas.

Der er monteret en ekstra gassuger som udelukkende har til opgave at drive anlægget mens der produceres rengas. Den gas som produceres under start og nedlukning passerer kun gennem rågassugeren og kan kun ledes til gasfaklen.

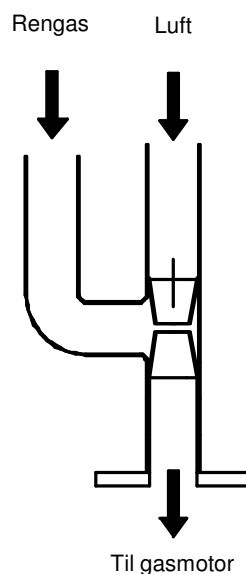
I perioderne med fakkeldrift på rengas sendes rengassen via et bypass gennem rågassugeren til faklen. Ved motordrift er dette bypass helt lukket så der er ikke længere nogen øvre grænse for gstrykket, der leveres til motoren.

Styringen af gasmængden til motoren er ændret fra trykstyring til styring efter signalet fra en lambdasonde i motorens udstødning. Lambdasonden styrer rengassugeren og fastholder derved motorens luftoverskud til en forudbestemt værdi uanset motorbelastningen.

#### 4.2. Tilpasning af karbureringssystemet til dellastdrift

Over gasspjældet på motorens indsugningsmanifold er monteret et rørstykke til blanding af den rensede produktgas og indsugningsluften til motoren.

Der er ikke gjort brug af noget særligt avanceret system til blanding af gas og luft, men der er blot indsat et venturilignende blandelegeme, der hvor gas- og luftstrømmene mødes. En skitse af det ses på figur 5.



**Figur 5:** Skitse af tilførslen af gas og luft til motoren. Et venturilignende blandelegeme er indsat der hvor luft og gas mødes.

Indledende målinger viste at tilstedeværelsen af blandelegemet medførte et tydeligt undertryk i det rør hvor rengassen tilføres. Undertrykket bidrager til at få transporteret gas frem til motoren, men har også negativ betydning for motorens fyldingsgrad. Den oprindelige geometri for blandelegemet var ikke ideel ved varierende belastninger. Det kom især til udtryk når der blev

forsøgt at anvende lavere ydelse end fuldlast, så en modificeret udgave af blandelegemet blev fremstillet, testet og besluttet anvendt i stedet for det oprindelige.

### **4.3. Modificering af varmevekslerne til produktgas**

Ved konstruktionen af anlæggets varmevekslere til køling af den fremstillede produktgas blev de naturligt dimensioneret til afkøle gassen ved anlæggets nominelle ydelse. Med den udlægning vil der ved drift med ydelser, der er mindre end den nominelle, ske en afkøling af gassen til en så lav temperatur at der opstår risiko for at udskilning af kondensat i varmevekslerne og/eller det efterfølgende rørsystem.

Afhængig af især flisens vandindhold og forgasningsprocessens forløb begynder opstår risiko for kondensation især at optræde ved temperaturer under ca. 55 - 60 °C.

For at kunne undgå dette er begge varmevekslere blevet monteret med:

1. Blandespjæld (by pass) til produktgas
2. Temperaturregulering af varmevekslerens kølevand

På figur 4 er angivet hvordan der med eftermonterede regulerede motorventiler nu kan føres produktgas i by-pass udenom den varme og kolde varmeveksler. Under opstart vil spjældene stå åbne og sikre at der sker mindst mulig afkøling af produktgassen. Efterhånden som gastemperaturen stiger ledes en gradvis større mængde af gassen til afkøling i varmeveksleren. Den afkølede gas blandes med den strøm som ledes gennem bypass. Reguleringen af motorventilen sørger derved for at gastemperaturen holdes konstant efter de to varmevekslere.

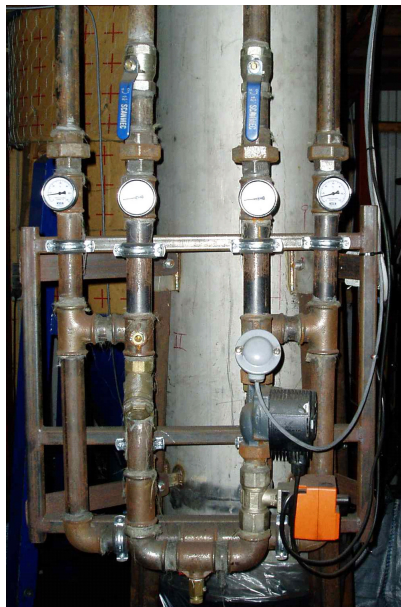
De første driftsforsøg med blandespjældene viste at denne forbedring ikke var tilstrækkelig.

Selv med fuldt åbnede by pass spjæld forekommer der et trykfald i by pass røret. Det leder en delstrøm af produktgassen gennem de kolde varmevekslere, hvor der er mindre trykfald.

Delstrømmens møde med de afkølede overflader i varmevekslerne forårsager kondensation så længe at vandtemperaturen i varmevekslerne er lavere end produktgassens dugpunkt.

For at hæve vandtemperaturen i varmevekslerne til en temperatur over produktgassens dugpunkt er hver varmeveksler blevet monteret med en automatisk reguleret blandekreds, som er vist i figur 6. Den fungerer således at vandet recirkuleres gennem varmeveksleren og ikke sendes til afkøling før en bestemt temperatur er nået. Med en reguleringskreds som er indlagt i anlæggets PLC styres vandtemperaturen i varmevekslerne til en værdi, der ligger over produktgassens vanddugpunkt.

Der har ikke været behov for at ændre de øvrige komponenter i anlæggets kølekreds som følge af de ændringer der sker ved variation af anlæggets belastning.



**Figur 6:** Kølevandsreguleringen på en af anlæggets varmevekslere til produktgas. Hver varmeveksler har egen cirkulationspumpe og blandeventil. Via en regulator i anlæggets PLC kan temperaturen på vandstrømmen ind i varmeveksleren fastholdes på den ønskede værdi.

## **5. Afprøvning af det ombyggede anlæg ved dellastdrift**

Efter ombygningerne er anlægget blevet afprøvet ved drift med forskellige belastninger. Hensigten med afprøvningerne har dels været at få indkørt og afprøvet de udførte ombygninger samt at få et billede af anlæggets egnethed til drift ved dellast.

Driftsafprøvningerne med dellastdrift er foretaget i flere omgange hvoraf den mest intensive afprøvningsperiode fandt sted i første halvår af 2006.

I perioden 1/2 til 17/6-2006 har gasmotoren kørt 210 timer og leveret 7012 kWh til nettet, hvilket giver ca. 33 kW i gennemsnit. Hertil skal lægges et gennemsnitligt egetforbrug på ca. 7 kW el (drift af anlæg, lys, varme) så den gennemsnitligt afgivne effekt regnes i perioden til ca. 40 kWel.

Der har været perioder i forløbet hvor effekten har været op til 75 kW og ned til ca. 25 kW. Afprøvningen viste også at tromletørrerens tørrekapacitet også er tilstrækkelig ved dellast, så længe at vandindholdet i det friske brændsel er under ca. 50 % af totalvægt.

Det nye system til gastilførsel med henholdsvis en rågassuger og en rengassuger fungerede godt lige fra starten. Omkoblingen mellem rågasdrift til fakkelt og rengasdrift til fakkelt foregår med trykknapper på anlæggets hovedtavle.

Gasmotoren startes på LPG<sup>1</sup> og mens den er i tomgang og ikke koblet på elnettet skiftes til drift på produktgas fra gasgeneratoren. Dette foregår manuelt ved betjening af motorstyringstavlen. Når motoren tilføres produktgas begynder rengassugerens gastilførsel til motoren at blive reguleret efter signalet fra  $\lambda$ -sonden i motorens udstødning. Herefter øges motorens omdrejningstal med en manuel betjent fjederbelastet omskifter, der flytter sætpunktet for motorens gasspjæld op eller ned, indtil den asynkrone generator kobler på elnettet. Motorstyringstavlen er mere end 25 år gammel så automatiseringsgraden er lille men akkurat tilstrækkelig til at gennemføre opgaverne i projektet.

Ved udskiftning af motorstyringssystemet til en tidssvarende udgave vil det være naturligt at styre motoreffekten i forhold til enten en ønsket bestemt fremløbstemperatur på vandkredsen eller den afgivne eleffekt.

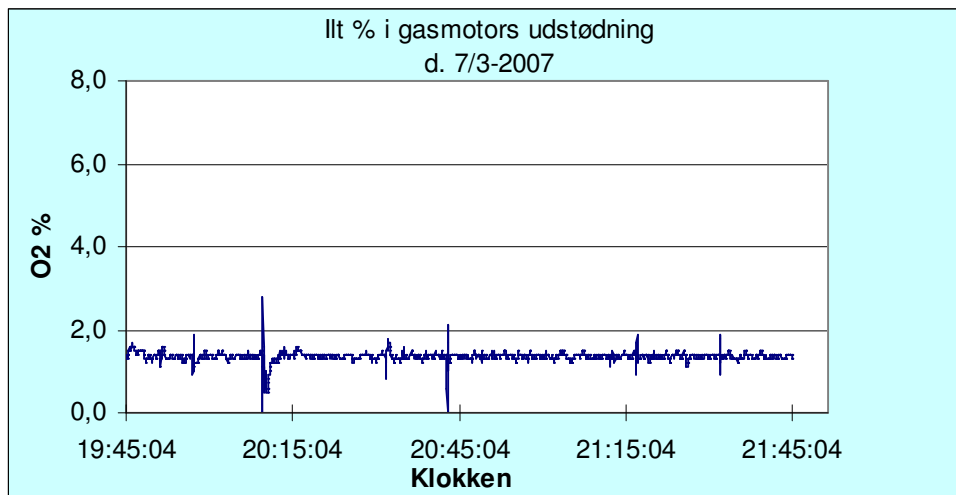
Afprøvningen viste efter en kort indkøringsperiode at styringen af rengassugeren var i stand til at fastholde et konstant iltindhold i udstødningsgassen. I figur 7 er vist en typisk kurve over den monterede  $\lambda$ -sondes signal om iltindholdet i udstødningsgassen.

Venturien i gasmotorens indsugningssystem har fungeret efter hensigten. Med det ændrede design kan motorens afgivne eleffekt holdes mere konstant end tidligere og det er let at ændre den afgivne effekt ved blot at aktivere gasspjældet via motorstyringstavlen. Ved ændring af motorens gasspjældindstilling følger resten af kraftvarmesystemet med og indstiller sig automatisk til den ny belastning.

---

<sup>1</sup> Liquefied Petroleum Gas – en propan/butanblanding også kaldet flaskegas/autogas





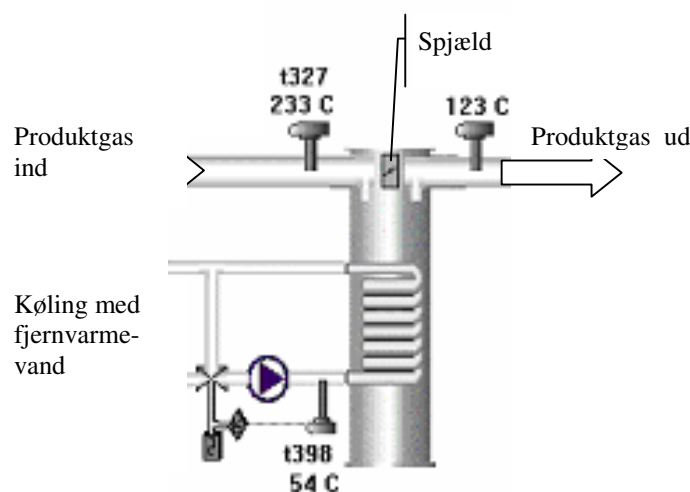
**Figur 7:** Den ny styring af rengassugerens tilførsel af gas til motoren kan fastholde et konstant luftoverskud, der kommer til udtryk som en konstant iltprocent i motorens udstødning. Styringen er her indstillet til et iltindhold på ca. 1,4 %. Det viste eksempel på dataopsamling er sket med 2 sekunders intervaller, så spidserne der bryder den vandret liggende kurve har kun været af få sekunders varighed.

Varmevekslernes styringer af vandkredsen og produktgassens temperaturstyrede bypass af varmeveksleren har virket efter hensigten.

Selv med de to styringer kan det ikke undgås at der under opvarmning af anlægget fra helt kold tilstand udskilles lidt kondensat så længe det recirkulerede vand i varmevekslerne er under gassens dugpunkttemperatur.

Ved normal drift er det dog kun relativt sjældent at anlægget skal opvarmes fra helt kold tilstand. Den lille mængde kondensat føres via et lufttæt afløb ud af vekslerne til en opsamlingsbeholder. Vandet herfra benyttes som spædevand til gasgeneratorens våde askeudtag.

I nogle få situationer kan vandet i anlæggets kølekreds være varmere end i de to varmevekslerkredse. Det forekommer for eksempel når gasmotoren har været anvendt til tørring af flis med LPG drift inden gasgeneratoren sættes i drift. I de situationer er det en fordel manuelt at tvangsstyre reguleringsventilerne på varmevekslerne således at der sker en forvarmning af veksleren med det varmere vand fra motorens kølekreds. Situationen forekommer ikke ret ofte, så hidtil har det ikke været ulejligheden værd at automatisere den funktion.



**Figur 8:** Skitse af den varme varmeveksler med indbygget spjæld. Spjældet styres af en motorventil og tillader at produktgassen kan gå udenom kølefladen via et bypass.

De to indbyggede spjæld i henholdsvis den varme og kolde varmeveksler har efter justering af regulatorerne i PLC'en fungeret efter hensigten. Via skærbilledet på PLC'ens grafiske brugerflade kan vælges en temperatur på gassen efter hver varmeveksler som regulatoren herefter styrer afgangstemperaturen efter.

Konklusionen på den praktiske afprøvning af anlægget er at de indførte ændringer har gjort det muligt at holde det i stabil drift med afgiven eleffekt fra elgeneratoren ned til ca. 30-35 kW. Den maksimalt målte eleffekt er 70-75 kW så anlægget er med de indførte ændringer i stand til at modulere indenfor et område på ca. 40-100 %.

I forhold til en typisk driftssituation som er grundlast/mellemlast anlæg på et fjernvarmeværk er det her opnåede moduleringsområde tilstrækkeligt. Ændringen af afgivet effekt fra kraftvarmesystemet kan ske i en takt, der normalt vil kunne opfylde hvad der kræves af et fastbrændselsfyret varmforsyningsanlæg.

Hen mod slutningen af afprøvningsperioden blev i juli 2006 konstateret en ødelagt pose i anlæggets posefilter. Reparationen og rensningen af rør og ventiler betød at driftsmålingerne på anlægget blev udsat til efteråret 2006.

Kort tid efter idriftsættelsen af det rensede anlæg blev endnu en defekt konstateret. En forkert udført svejsning i gasgeneratorens top havde åbnet sig efter flere end 1.000 timer drift med gasgeneratoren. Den indtrængende luft havde tillige hævet temperaturen så meget at anlæggets luftforvarmer også var revnet.

Reparationen af svejsningen i gasgeneratoren var ubetinget nødvendig. Det arbejde blev afsluttet i november 2006. Reparation af luftforvarmeren var derimod ikke rentabel. På det tidspunkt var allerede givet bud på et nyt udviklingsprojekt til PSO programmet for 2007, som inkluderede en gennemgribende ændring af lufttilførslen til gasgeneratoren. Derfor blev besluttet at udskyde den del af reparationen og dermed gennemføre driftsmålingerne uden luftforvarmer. De negative konsekvenser ved at undvære denne er blandt andet en forringet elvirkningsgrad. Drift uden luftforvarmer forventes også at forøge tjæreindholdet i produktgassen fordi temperaturerne i gasgeneratoren bliver lavere.

## 6. Modellering af kraftvarmesystemet med trinopdelt forgasser

Dette kapitel er skrevet af Jens Kai Holm, MEK, DTU, Lyngby.

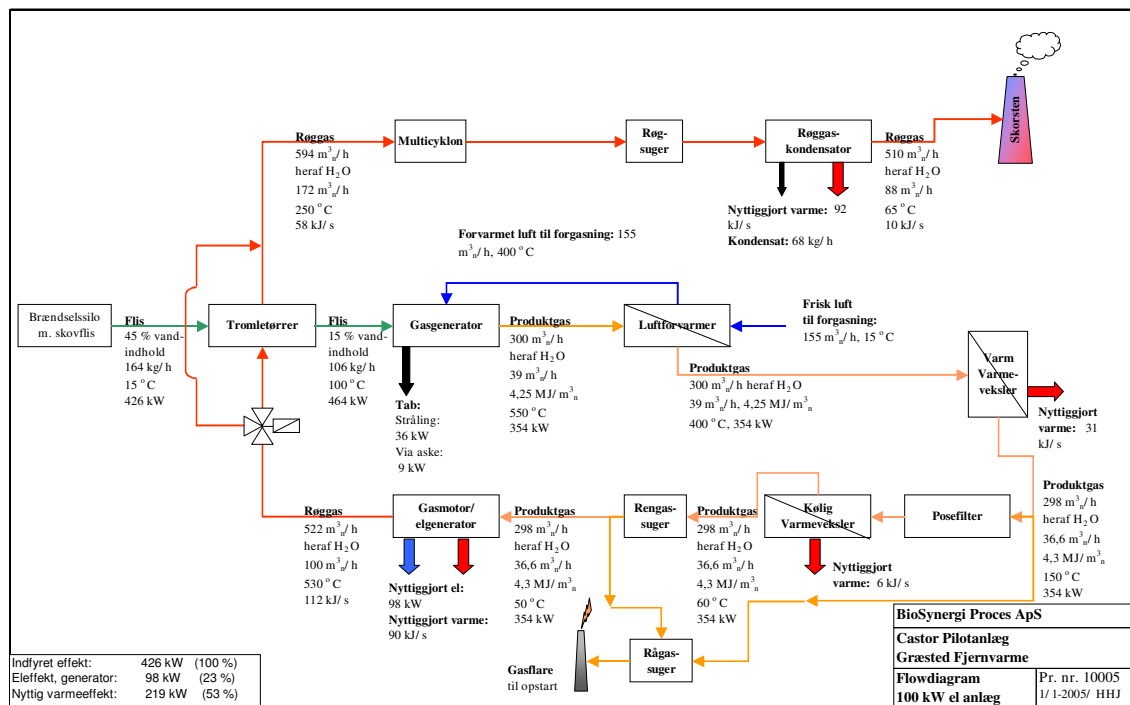
Der er under projektet arbejdet med udvikling af en computermodel til simulering af BioSynergi Proces' kraftvarmesystem hos Græsted Fjernvarme. Modellen er opbygget som en stationær model baseret på moduler. Der er særskilte moduler for f.eks. tromletørrer, gasgenerator, luftforvarmer, varmevekslere og gasmotor. For hvert modul opstilles energibevarelse og massebevarelse. Den overordnede kobling af de enkelte moduler udgør det samlede forgasseranlæg.

Der er i modellen stor valgfrihed med hensyn til hvilke størrelser der indgår som frie variable henholdsvis bundne parametre. Herved kan forskellige parameterstudier testes systematisk. For en given indfyret mængde træflis kan det simuleres hvordan processen påvirkes af ændringer i temperatur, varmetab, lufttilsætning til gasgenerator, virkningsgrad af luftforvarmer og varmevekslere samt udnyttet varme og el.

Herunder er de forskellige moduler beskrevet og de vigtigste formler er givet. For hvert modul er der yderligere givet en liste over input-parametre, overførte parametre og beregnede variable. Modelleringsberegningerne er gennemført i MatLab ver. 7. Der er opbygget en brugergrænseflade i Excel til indtastning og udlæsning af parametre.

På figur 9 ses et flowdiagram over anlægget. Enkelte dele af anlægget er udeladt af modellen. Det gælder gas- og røgsuger og det regulerbare bypass af røggassen udenom tromletørreren. Temperaturen af røggassen efter tromletørreren holdes konstant for at undgå overophedning og pyrolysning af træflisen i tromletørreren. Reguleringen sker ved bypass af en del af røggassen udenom tromletørreren.

I det praktiske anlæg reguleres flowet af træflis til forgasseren fra en mellembeholder, hvori niveauet kontrolleres med fotoceller. Denne regulering indgår ikke i modellen.



**Figur 9:** Procesdiagram over kraftvarmesystemet med forgasningsteknik. Det samme diagram kan ses i en større udgave i bilag 1.

### 1. modul: Tromletørrer.

Tromletørreren er modelleret på basis af energi- og massebevarelse. Input-parametre og beregnede størrelser er angivet i Tabel 1. I modulet indgår beregningen af biomassens entalpi, der er beskrevet i bilag 2.

Tabel 1. Parametre for tromletørrermodul.

<b>Input-parametre:</b>	<b>Overførte parametre:</b>	<b>Beregnete størrelser:</b>
Indført våd biomasse til tromletørrer.	Molstrømme af CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> og O <sub>2</sub> fra røggas ind i tromletørrer (fra gasmotor).	H <sub>2</sub> O i røggas efter tromletørrer.
Vandindhold i biomasse før tromletørrer.	Temperatur af røggas ind i tromletørrer.	Temperatur af røggas efter tromletørrer.
Vandindhold i biomasse efter tromletørrer.		Tør biomasse til tromletørrer.
Molarmasse af biomasse.		
Støkiometriske koefficienter for elementarsammensætning af biomasse.		
Nedre brændværdi for biomasse.		
Temperatur af biomasse før tromletørrer.		
Temperatur af biomasse efter tromletørrer.		
Varmetab fra tromletørrer.		

## 2. modul: Forgasser.

Tabel 2. Parametre for forgassermodul.

<b>Input-parametre:</b>	<b>Overførte parametre:</b>	<b>Beregnete størrelser:</b>
CH <sub>4</sub> i produktgas i procent af C i indført tørt flis.	Temperatur af biomasse til forgasser.	Molstrømme af H <sub>2</sub> O, CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> og N <sub>2</sub> fra forgasser.
Kulstofstab i procent af indført tør flis.	Molstrøm af vand til forgasser.	Lufttilsætning til forgasser.
Temperatur af luft fra luftforvarmer til forgasser.		Temperatur af produktgas fra forgasser.
Ligevægtstemperatur for forgasningsproces.		Dugpunktstemperatur for vanddamp i produktgas.
Varmetab fra forgasser.		Kondensationsenergi fra udkondenseret vanddamp i produktgas.
		Kulstofstab fra forgasser.
		Produktgasflow ud af forgasser.
		Øvre/nedre brændværdi af produktgas.
		Koldgasvirkningsgrad.

### Forgasningsprocessen

Det antages at den producerede gas kun består af CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>. Sammensætningen af produktgassen bestemmes ud fra molstrømsbalancer for de enkelte grundstoffer i gassen: C, H og O samt vand-gas shift ligningen. N<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> holdes udenfor udregningen af gassammensætningen. N<sub>2</sub> antages inaktivt og den kemiske ligevægt for reaktioner med CH<sub>4</sub> antages ikke at indstille sig indenfor den tid produkterne opholder sig i forgasseren. Indholdet af CH<sub>4</sub> i produktgassen

defineres derfor som en fast molstrøm. Grundstofbalancer for H, C og O og vand-gas shift ligningen giver 4 ligninger med 4 ubekendte:

$$n_{H,bio} + 2 \cdot n_{H_2O,bio} = 2 \cdot n_{H_2O} + 2 \cdot n_{H_2} + 4 \cdot n_{CH_4}$$

$$n_{C,bio} = n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4}$$

$$n_{O,bio} + n_{H_2O,bio} + 2 \cdot n_{O_2} (\text{luft}) = n_{H_2O} + n_{CO} + 2 \cdot n_{CO_2}$$

$$K(T) = \frac{n_{H_2O} \cdot n_{CO}}{n_{H_2} \cdot n_{CO_2}}$$

Ligevægtskonstanten er temperaturafhængig og kan tilnærmes med følgende 2. gradspolynomium:

$$K(T) = 0.000001303 \cdot T^2 + 0.000717 \cdot T - 1.3006$$

Hvor  $T$  er ligevægtstemperaturen i grader Kelvin. Udtrykket kan anvendes i området 750-1250°C [Fock & Thomsen, 1999].

I modellen er ligevægtstemperaturen og varmetabet fra forgasningsprocessen faste parametre, hvorimod lufttilsætningen indgår som en variabel. Modellen for forgasningsprocessen indeholder derfor 5 ubekendte molstrømme for: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O og O<sub>2</sub> (luft). Da grundstofbalancerne og vand-gas shift ligningen kun giver 4 ligninger, opstilles yderligere en energibevarelsesligning hvorefter de ubekendte kan bestemmes.

Varmetabet fra forgasningsprocessen indgår i modellen som en fast parameter og energien tages fra produktgassen efter forgasseren.

I modulet indgår bestemmelse af dugpunktet for produktgassen som beskrevet i bilag 3.

### 3. modul: Luftforvarmer.

Tabel 3. Parametre for luftforvarmermodul.

Input-parametre:	Overførte parametre:	Beregnete størrelser:
Temperatur af luft til luftforvarmer.	Temperatur af luft fra luftforvarmer til forgasser.	Virkningsgrad af luftforvarmer.
Varmetab fra luftforvarmer.	Temperatur af produktgas til luftforvarmer.	Temperatur af produktgas fra luftforvarmer.
		Dugpunktstemperatur for vanddamp i produktgas.
		Kondensationsenergi fra udkondenseret vanddamp i produktgas.

Virkningsgraden er defineret som beskrevet i bilag 4.

#### **4. modul: Varm varmeveksler.**

Tabel 4. Parametre for varm varmevekslermodul.

<b>Input-parametre:</b>	<b>Overførte parametre:</b>	<b>Beregnete størrelser:</b>
Temperatur af produktgas ud af varm varmeveksler.	Molstrømme af H <sub>2</sub> O, CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> og N <sub>2</sub> til varm varmeveksler.	Nyttiggjort varme fra varm varmeveksler.
Varmetab fra varm varmeveksler.	Temperatur af produktgas til varm varmeveksler.	Virkningsgrad af varm varmeveksler.
		Dugpunktstemperatur for vanddamp i produktgas.
		Kondensationsenergi fra udkondenseret vanddamp i produktgas.

#### **5. modul: Posefilter.**

Tabel 5. Parametre for posefiltermodul.

<b>Input-parametre:</b>	<b>Overførte parametre:</b>	<b>Beregnete størrelser:</b>
Varmetab fra varm varmeveksler.	Molstrømme af H <sub>2</sub> O, CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> og N <sub>2</sub> til posefilter.	Temperatur af produktgas efter posefilter.
	Temperatur af produktgas til posefilter.	Kondensationsenergi fra udkondenseret vanddamp i produktgas.
		Dugpunktstemperatur for vanddamp i produktgas.

#### **6. modul: Kold varmeveksler.**

Tabel 6. Parametre for kold varmevekslermodul.

<b>Input-parametre:</b>	<b>Overførte parametre:</b>	<b>Beregnete størrelser:</b>
Temperatur af produktgas ud af kold varmeveksler.	Molstrømme af H <sub>2</sub> O, CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> og N <sub>2</sub> til kold varmeveksler.	Nyttiggjort varme fra kold varmeveksler.
Varmetab fra kold varmeveksler.	Temperatur af produktgas til kold varmeveksler.	Virkningsgrad af kold varmeveksler.
		Dugpunktstemperatur for vanddamp i produktgas.
		Kondensationsenergi fra udkondenseret vanddamp i produktgas.



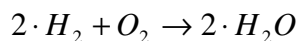
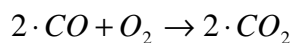
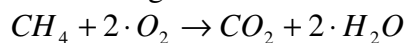
## 7. modul: Gasmotor.

Tabel 7. Parametre for gasmotor.

Input-parametre:	Overførte parametre:	Beregnete størrelser:
Luftoverskudstal $\lambda$ .	Molstrømme af $H_2O$ , $CO$ , $CO_2$ , $H_2$ og $N_2$ til gasmotor.	Molstrømme af $CO_2$ , $H_2O$ , $O_2$ og $N_2$ i røggas fra gasmotor.
$\eta_{el}$ : Elproduktion.	Temperatur af produktgas til gasmotor.	Temperatur af røggas fra motor.
$\eta_{varme}$ : Varmeproduktion:		Vanddamp i røggas efter motor.
$\eta_{tab}$ : Varmetab.		
Temperatur af luft til motor.		

### Motorprocessen.

Det antages, at produktgassen omsættes fuldstændigt til forbrændingsprodukterne  $CO_2$  og  $H_2O$  ved reaktion med forbrændingsluftens ilt:



Den støkiometriske iltmolstrøm beregnes som følger

$$n_{O_2, st\theta k} = 2 \cdot n_{CH_4} + 0.5 \cdot n_{CO} + 0.5 \cdot n_{H_2}$$

Molstrømmen af  $O_2$  og  $N_2$  i røggassen beregnes ud fra luftoverskudstallet  $\lambda$ , der indgår som en parameter i modellen. Da forbrændingen er fuldstændig, er understøkiometrisk lufttilsætning ikke medtaget i modellen.

Molstrømmene af  $O_2$  og  $N_2$  i forbrændingsluften beregnes på følgende måde:

$$n_{O_2, fbr. luft} = \lambda \cdot n_{O_2, st\theta k}$$

$$n_{N_2, fbr. luft} = \frac{0.79}{0.21} \cdot n_{O_2, st\theta k}$$

Molstrømmene af  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  og  $H_2O$  i røggassen beregnes på følgende måde:

$$n_{CO_2, r\theta ggas} = n_{CO} + n_{CH_4} + n_{CO_2}$$

$$n_{O_2, r\theta ggas} = n_{O_2, fbr. luft} - n_{O_2, st\theta k}$$

$$n_{N_2, r\theta ggas} = n_{N_2, fbr. luft} + n_{N_2}$$

$$n_{H_2O, r\theta ggas} = n_{H_2} + 2 \cdot n_{CH_4} + n_{H_2O}$$

Brændværdien af produktgassen ved 298,15 og 1 atm beregnes som forskellen i specifik entalpi mellem reaktanter og produkter.

$$Br_{\text{produktgas}} = h_{\text{reaktanter}}^{298} - h_{\text{produkter}}^{298}$$

Modellen beregner el-produktion, varmeproduktion og varmetab som faste brøkdeler af brændværdien og energibalancen benyttes til at bestemme røggastemperaturen:

$$\eta_{el} = \frac{W_{el}}{Br_{\text{produktgas}}}; \quad \eta = \frac{Q_{\text{varme}}}{Br_{\text{produktgas}}}; \quad \eta_{\text{tab}} = \frac{Q_{\text{tab}}}{Br_{\text{produktgas}}}$$

Energibalancen er givet herunder:

$$h_{\text{reaktanter}} - h_{\text{produkter}} = W_{el} + Q_{\text{varme}} + Q_{\text{tab}}$$

## 8. modul: Røggaskondensator.

Tabel 8. Parametre for røggaskondensator.

Input-parametre:	Overførte parametre:	Beregnete størrelser:
Temperatur af røggas ud af røggaskondensator.	Temperatur af røggas ind i røggaskondensator.	Nyttiggjort varme fra røggaskondensator.
Varmetab fra røggaskondensator.		Virkningsgrad af røggaskondensator.
		Dugpunkttemperatur for vanddamp i røggas.
		Kondensationsenergi fra udkondenseret vanddamp i røggas.
		Damp i røggas efter røggaskondensator.

## 9. modul: Energibalance.

Der opstilles en overordnet energibalance for det samlede system, hvor indfyret effekt, eleffekt og nyttiggjort varmeeffekt bestemmes.

### 6.1. Computermodellens funktion

BioSynergi har afprøvet den udviklede statiske computermodele og blandt andet brugt den til at simulere drift ved forskellige belastninger med og uden luftforvarmning.

Tillige er foretaget en sammenligning af modellens beregninger og dataregistreringerne fra de driftsmålinger på Castoranlægget, som blev udført d. 7 marts 2007 (se afsnit 8.6). Sammenligningen viste generelt at der var god overensstemmelse mellem modelberegningerne og de registrerede værdier fra målingen. En udskrift med sammenligning af modelresultater og målingerne findes i bilag 5.

Det ses i bilag 5, at den største afvigelse mellem modellens beregningsresultater og måleresultaterne var at finde for anlæggets samlede leverede varmeeffekt.

Den gennemsnitlige leverede varmeeffekt til anlæggets hovedmåler blev ved driftsmålingen bestemt til 111 kW. Dette var en del mindre end modelleringens resultat, som var en varmeeffekt på 156 kW. Røggastemperaturen efter tromletørreren blev ligeledes målt til en lavere værdi (193 °C) end modellens beregningsresultat (258 °C).

Selv om de fleste af anlæggets rør og komponenter i vandkredsen ikke er isoleret, vurderes det at dette forhold ikke alene kan forklare den fundne forskel på værdien for varmeeffekten.

En af de store bidragydere til varmeproduktionen er den kondenserende røggaskøler. Ses nærmere på modelleringsresultatet i bilag 5 leverer den kondenserende røggaskøler (8. modul) teoretisk 75 kW ud af den samlede varmeeffekt fra anlægget på 156 kW. Heraf hidrører 42 kW ud af de 75 kW af varmeeffekten fra røggaskondenseringen.

Beregningsforudsætningen for røggaskondensatorens varmeproduktion er i følge 7. modul-gasmotor, at luftoverskudstallet er 1,15. Det svarer til det målte iltindhold i røggassen efter gasmotoren på 1,6 %. Med det luftoverskudstal er dugpunktet for røggassens vanddampindhold beregnet til 68 °C.

Men der er grund til at formode at luftoverskuddet i røggassen efter tromletørreren i virkeligheden var væsentligt større ved driftsmålingen d. 7 marts. Det kan begrundes med at der ved emissionsmålingerne, som blev foretaget på anlægget december 2006, blev bestemt et iltindhold i røggassen efter tromletørreren på 10,5 %. Hovedresultaterne fra emissionsmålingerne er beskrevet i afsnit 8.7, hvor der konkluderes, at forskellen på måleresultaterne for iltindholdet i røggassen før og efter tromletørreren må tilskrives luftindbrud i tromletørreren. En fortynding af røggassen med luft forårsager lavere vanddugpunkt og temperaturen efter tromletørreren bliver ligeledes lavere. Begge faktorer reducerer den varmeeffekt, som kan udvindes fra røggaskondensationen. Der er ingen grund til at antage andet, end at der ved målingerne i marts 2007 har været de samme muligheder for luftindbrud til stede, som blev konstateret ved målingen i december 2006.

Det vurderes dette forhold er den væsentligste årsag til at den målte afgivne varmeeffekt er lavere end modellens beregningsresultat.

En anden markant afvigelse findes i 2. modul forgasser hvor effekttabet i form af kulstof-tab i henhold til modellen er 40,2 kW, mens der ved behandlingen af måledata i afsnit 8.6 er bestemt en værdi for dette tab på 23 kW. Uoverensstemmelsen skyldes at der i modellen er anvendt en nedre brændværdi for kulstof-tabet på ca. 33 MJ/kg mens der ved databehandlingen

af resultatet fra målingen er antaget en nedre brændværdi for den uomsatte træaske/kulstof på 20 MJ/kg. Det ville have krævet en brændværdi-bestemmelse på flere repræsentativt udtagede askeprøver for at afgøre hvilken af de to værdier som er mest korrekt. Uanset resultatets størrelse rokker det dog ikke ved bemærkningen i afsnit 8.6, hvor asketabet udpeges som en parameter, der bør reduceres.

## 6.2. Referenceliste til kapitel 6

- Gøbel & Bentzen, 1995 Benny Gøbel, Jens Dahl Bentzen: Dynamisk model af totrinsforgasningsprocessen, ET-PE 95-13, Laboratoriet for Energiteknik, DTU, november 1993.
- Fock & Thomsen, 1999 Felicia Fock, Kirstine Thomsen: Modellering af totrinsforgasser, ET-EP 99-10A, Institut for Energiteknik, DTU, november 1999.
- Padfield, 1996 Tim Padfield: Equations describing the physical properties of moist air,  
<http://www.natmus.dk/cons/tp/atmcalc/atmoclc1.htm>
- Carlsen, 1996 Henrik Carlsen: Varmevekslere, kursus 41415-7, Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion, Danmarks Tekniske Universitet, Forår 1996

## 7. Forsøg og metodeudvikling af anlæggets start/stop procedurer

Castor anlægget i Græsted blev etableret med henblik på at afprøve både enkeltkomponenter og det samlede kraftvarmesystem under realistiske driftsforhold. Et andet væsentligt mål var at opnå driftserfaringer med det samlede system. En egentlig systematisk udvikling af anlæggets startprocedurer havde ikke prioritet i det arbejde. Ved starten af det her beskrevne projekt var udgangspunktet derfor et sæt startprocedurer som ikke var færdigudviklede.

Det betød at arbejdet med optænding og idriftsættelse af anlægget på motordrift var ressourcekrævende. Det gjaldt både med hensyn til kravet til mandskabets kvalifikationer og tidsforbruget til opstart af anlægget. Ved opstart af anlægget forstås de opgaver der skal udføres for at bringe et hvilende anlæg til en driftstilstand med stabil gasmotordrift med el- og varmeproduktion.

Opstarten af anlægget kan opdeles i følgende faser:

- Optænding i gasgenerator med startbrændsel
- Opvarmning af gasgenerator, de efterstående anlægsdele samt kølevandskredsen
- Overgang fra opvarmning med startbrændsel til fyring med træflis
- Gasproduktion gennem rågassuger til afbrænding i flare (rågasdrift)
- Gasproduktion gennem filter til afbrænding i flare (rengasdrift)
- Opvarmning af gasmotor på LPG uden nettilkobling
- Omskiftning fra motordrift på LPG til drift på produktgas
- Motordrift på net

### 7.1. Mål for metodeudviklingen

Det overordnede mål er at nedbringe den tid der skal anvendes til at bringe anlægget i samlet drift. Det drejer sig både om den tid hvor en manuel arbejdsindsats er nødvendig og den samlede tid der går indtil anlægget kan forlades i automatisk drift. En reduktion af behovet for driftspersonalets særlige kompetence indgår også som et væsentligt element i metodeudviklingen. De ny metoder skal desuden være egnede til en videreudvikling i retning af en bemandingsfri startprocedure.

For at få et overblik på den samlede opstartsprocedure er opgavetyperne blevet kategoriseret i delaktiviteter. Indholdet af hver aktivitet er analyseret med henblik på at udpege de kritiske og tidskrævende områder.

Flere af de identificerede forhold er alene relateret til det eksisterende demonstrationsanlæg og de konkrete løsninger som anvendes på det. De er således ikke relevante for kommende anlæg og er derfor udeladt fra metodeudviklingen.

## Gasgeneratorens gamle startmetode

Den tidligere startmetode, der blev brugt til optænding af gasgeneratoren i helt kold tilstand, var både besværlig og krævede stor portion proces teknisk indsigt. Den var baseret på en gradvis opvarmning med trækul der manuelt blev indfyret i anlægget.

Til opstarten medgår trækul, LPG og tørret flis.

For at opnå en jævn varmefordeling i gasgeneratoren bliver ofte indledt med en forvarmning som sker ved optænding med en mindre mængde trækul ca. 12 timer før den egentlige start.

Den gamle startmetode blev anvendt lige indtil der i det her rapporterede projekt blev udviklet og indført nogle mærkbare forbedringer af startproceduren.

Flis der anvendes til forgasning i Castor anlægget forudsættes at være tørt således at vandindholdet er max. 25 %. Hvis der ikke findes tørret flis i tilstrækkelig mængde skal dette produceres forud. Det sker så ved mindst tre timers tørring med gasmotoren på LPG drift.

Castor anlæggets mellemlager af tør flis er ikke særligt stort. Det betyder at der manuelt må udtages tør flis under tørringen som derefter skal genpåfyldes når driften af gasgeneratoren indledes.

Det samlede arbejdstidsforbrug til en opstart af et helt koldt anlæg udgør således ofte 10 -12 timer og kan strække sig over 18-24 timer.

Valget af trækul til opvarmningen skyldes at disse i modsætning til træflis kun udvikler ringe tjæremængder ved forgasning i et koldt anlæg. Selv om der under opvarmningen kun trækkes gas ud til fakkeldrift gennem anlæggets rør til rågas vil mindst mulige tjæreafsætninger altid være at foretrække. Med den gamle metode foregik optændingen i den kolde og tomme gasgenerator på følgende måde:

Gennem en åbning til brændseltilførslen i gasgeneratorens top blev manuelt påfyldt ca. 30 kg trækul. Mængden af trækul blev valgt således at toppen af laget lå lige under det område i gasgeneratoren hvor den partielle luft tilsættes og der sker en dimensionsændring i reaktorkernen (se figur 2).

Derefter blev tændt op i en almindelig grillstarter fyldt med trækul. Det foregik udendørs.

Når grillstarteren var klar blev anlæggets gassuger og støttebrænderen i gasfaklen startet. Grillstarterens indhold kunne derefter hældes ned over trækullene i gasgeneratoren. Efter ca. 15 minutter begyndte den udviklede gas at kunne brænde i gasfaklen uden støttebrænder.

Herefter kunne mere trækul påfyldes i mindre portioner. Opvarmning på denne måde fortsatte indtil temperaturen i gasafgangen fra gasgeneratoren var over ca. 400 °C og alle temperaturer frem til gasfaklen lå et godt stykke over vanddugpunktet. Med varme i systemet begyndte tilførsel af tørt træflis i mindre portioner ovenpå trækullene ved manuel styring af transportsystemet.

Det kritiske punkt opstod når brændselslaget skulle hæves op gennem det smalle område i gasgeneratoren hvor den partielle luft tilsættes. På det sted i forløbet opstod risiko for at det frisk tilførte brændsel, der landede ovenover indsnævringen, ikke blev antændt og processen kun forløb i den del af brændslet som befandt sig under indsnævringen. For at accelerere processen med at trække flammefronten med op gennem det område og få opvarmet de keramiske dele, var det ofte nødvendigt at supplere flisen med portioner af trækul fra grillstarteren.

Først når de keramiske dele omkring indsnævringen i gasgeneratoren havde passeret ca. 400 °C og flammerne på toppen af flislaget begyndte at brede sig spontant blev der stoppet med tilskuddet af trækul. Herefter kunne flistilførslen sættes til automatisk indfyring.

Start af anlægget efter den ovenfor beskrevne metode kunne udføres af en enkelt person, men den var ret arbejdsintensiv og krævede konstant tilstedeværelse ved anlægget.

## 7.2. Identificerede indsatsområder

Ved gennemgangen af det typiske forløb ved opstart af anlægget er fundet følgende områder som særligt tids- eller arbejdskrævende:

1. Opvarmning af gasgenerator.  
Opvarmning af det kolde anlæg med trækul (grillkul) som startbrændsel i reglen tager 5 - 8 bemandede arbejdstimer. Der er tillige mistanke om at trækullenes store partikelstørrelse bevirker at der skabes kanaler som trækkes luft langt ned i gasgeneratoren og forårsager for stor afbrænding af den udviklede gas. Det betyder at produktgassen efter en kold start af anlægget i de første timer er relativ tynd. Fænomenet forsvinder gradvist i løbet af nogle timer når laget af store trækulstykker bliver erstattet af trækul dannet af flisen.
2. Manglende lagerkapacitet samt manuel håndtering af tørret flis  
Dette er et praktisk problem som alene løses ved at udvide mellemlageret for tørret flis. Dette vil blive gjort ved kommende anlæg og der er ingen udviklingsmæssig potentiale i dette.
3. Manuel motorstyring ved overgang fra LPG til produktgas.  
Omkoblingen af gasmotoren fra drift på LPG som startbrændsel til drift på produktgas foregår i øjeblikket manuelt. Omkoblingen mellem de to gasarter sker manuelt med en omskifterkontakt på styretavlen. I det korte tidsrum indtil motorens lambdastyring af gasmængden får kontrol over den tilledte gas suppleres med manuel gasregulering med en skydeventil på gasrøret.

I et nyt PSO projekt - PSO nr. 7191 - der starter i 2007 vil der med udgangspunkt i en tidssvarende motorstyring blive implementeret en automatisering af startproceduren i gasmotorens styring. Omskiftningen fra startbrændsel til drift på produktgas vil dermed ske ved hjælp af automatik uden behov for en indsats fra særligt motorkyndigt personale.

4. Afhjælpning af varierende gaskvalitet under opstart.  
Som beskrevet under pkt. 1 er oplevet at gasproduktionen pga. startbrændslets tilstedeværelse kan være noget tynd (lav brændværdi) i de første timer med motordrift. I et andet PSO projekt - PSO 5729- er igangsat en aktivitet hvor der skal indbygges en gasblandetank med henblik på at gøre gaskvaliteten mere ensartet, hvilket der specielt under opstart var konstateret behov.
5. Betjeningsflade for anlæg.  
Ved projektets start var der ikke en samlet overskuelig overvågning af anlægget hvilket gjorde det vanskeligt at følge og styre det samlede opvarmningsforløb. Med indførelsen af en grafisk brugerflade til anlægget overordnede PLC styring, som er en del af



PSO projekt 5729, er denne komplicitet afhjulpet. Den grafiske brugerflade indeholder endvidere en datalogningsfunktion.

Ud af de ovennævnte punkter blev valgt specielt at arbejde med at forbedre metoden til start af gasgeneratoren. Det område stod tilbage som både det mest tidskrævende og krævende del af opstarten.

### **7.3. Afprøvede metoder til kold opstart af gasgeneratoren**

Der er blevet gennemført forsøg med følgende udstyr og metoder:

- Opvarmning med en mindre topbrænder i gasgeneratoren
- Direkte start af gasgeneratoren på flis
- Opvarmning af gasgeneratoren med en større gasbrænder (30-50 KW)

I valget og den efterfølgende vurdering af de enkelte metoder har blandt andet følgende kriterier indgået:

- Opvarmning skal foregå i moderat tempo uden koncentreret varmepåvirkning af gasgeneratorens dele
- Keramik må ikke berøres mekanisk under opvarmningen
- Slut temperaturen i indsnævringen skal gerne være over 600 °C efter opvarmningen
- Slut temperaturen ved risten i bunden af gasgeneratoren skal være over ca. 4-500 °C før flis tilføres.

### **7.4. Forsøg med topbrænder**

Den første forsøg med at udvikle startproceduren var også en søgning efter en metode der både kunne opvarme reaktoren og samtidig afhjælpe problematikken med at trække flammefronten op gennem indsnævringen.

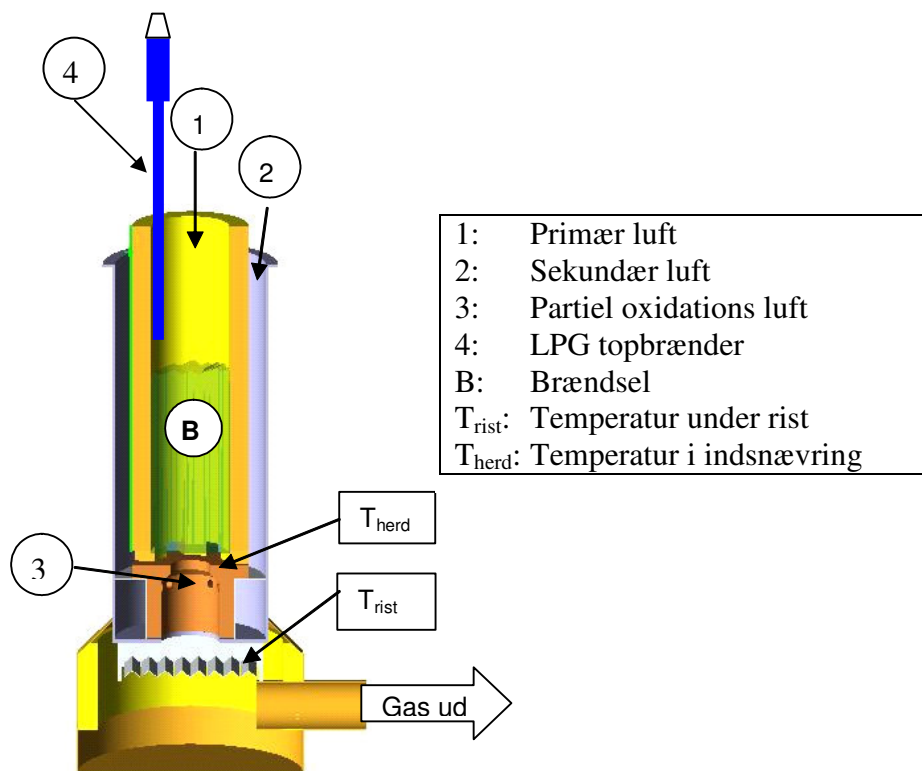
Til det formål blev monteret en 1,7 meter lang LPG fyret procesbrænder. Den afgivne effekt var ca. 7 kW. Anskaffelsesprisen og dens fysiske pladsbehov til montagen var med til at bestemme dens størrelse. Brænderen er udstyret med egen luftforsyning og kan dermed brænde uafhængigt af iltindholdet i den omgivende luft. Brænderens placering lodret ned i gasgeneratoren er skitseret i figur 10.

Ved afprøvningen var anlægget uden brændsel. Anlæggets gassuger blev startet og indstillet til at yde den lavest mulige luftmængde gennem anlægget. Et forudgående kort forsøg uden gassugeren var i drift havde vist at det blot resulterede i at varmen søgte opad og dermed ikke opvarmede bunden af gasgeneratoren.

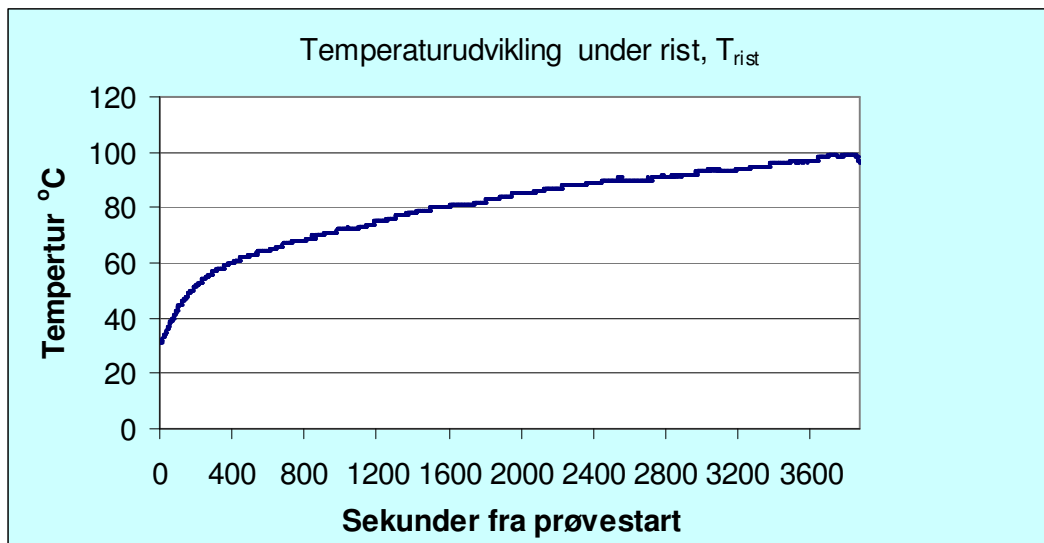
Med gassugeren i drift kunne konstateres en opvarmning af anlægget som desværre kun var ret beskeden på grund af procesbrænderens relativt lave effekt. En kurve over temperaturudviklingen målt under risten er vist i figur 11. Den illustrerer at det tog over en time at hæve temperaturen til ca. 100

°C under risten. Temperaturen i indsnævringen,  $T_{\text{herd}}$ , var endnu mere beskednen og kom knap nok over ca. 50 °C.

De fordele som topbrænderen ikke var i stand til at levere i form af hurtig opvarmning kom imidlertid i stedet til udbetaling som støttebrænder i perioden mens brændselslaget opbygges i gasgeneratoren. Med sin placering lige over indsnævringen viste topbrænderen sig at være løsningen på de hidtidige vanskeligheder med at få trukket flammefronten op gennem reaktorens indsnævring. Dermed har den været en væsentlig lettelse af en af delopgaverne ved anlæggets opstart og den er nu indbygget i anlæggets styresystem og aktiveres af en automatisk tænding via kontroltavlen.



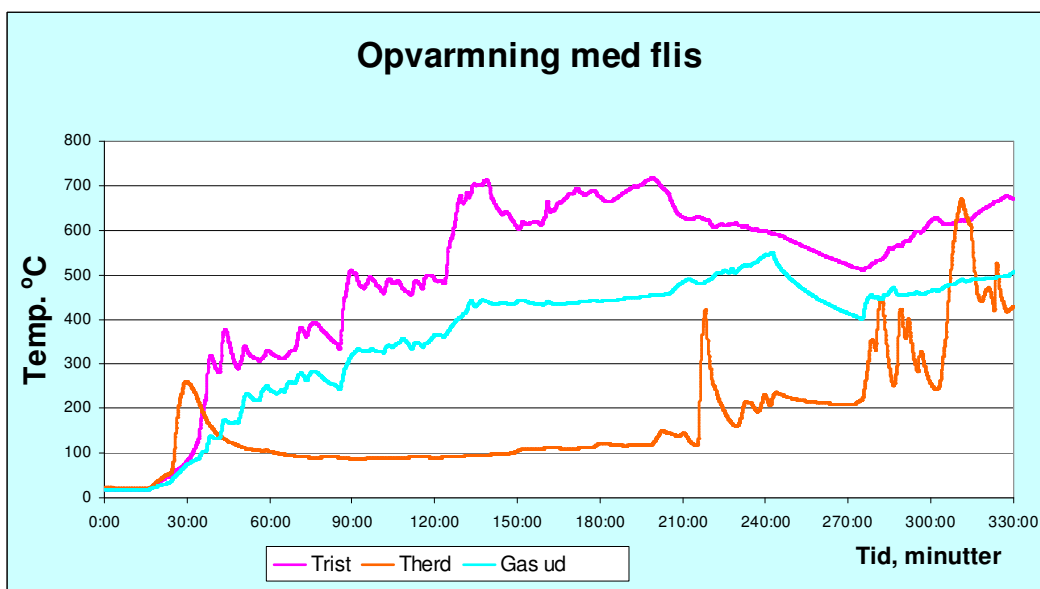
**Figur 10:** Topbrænderen er stukket ned øverst i gasgeneratoren



**Figur 11:** Temperaturforløb ved opvarmning af gasgeneratoren med topbrænderen alene.

### 7.5. Forsøg med opstart på flis

Der var forventning om flere fordele ved udelukkende at benytte flis i stedet for trækul til opstarten af det kolde anlæg. Brændslet på risten ville fra starten have en mere ensartet størrelse og være mere findelt end når der anvendes de større stykker trækul, som tager mange timer at omsætte i anlægget. Det talte også positivt at der kun skal håndteres et brændsel som kan indfyres med det sædvanlige transportsystem.



**Figur 12:** Temperaturforløb ved opstart på træflis og med topbrænderen som støttebrænder. Forsøget blev udført d. 1/3 2006.

Men brugen af træflis til optænding af et koldt anlæg indebærer en stor risiko for at der dannes og afsættes betydelige tjæremængder i gasrør, varmeveksler og gassuger på gassen vej fra gasgenerator til faklen.

For at reducere risikoen for tjæredannelse blev under forsøget valgt kun at tilføre små portioner flis ad gangen og siden hen øge mængden efterhånden som temperaturen steg opad.

Ved forsøget blev flisen tilbageholdt i den øverste del af gasgeneratoren ved hjælp af sammenkrøllede papirsække, der var placeret så de dækkede indsnævringen i gasgeneratoren. En mindre portion flis på ca. 50 liter blev placeret ovenpå afdækningen.

Rågassugeren og topbrænderen blev startet hvorved flisen antændte kort efter. Mens flisen brændte over indsnævringen steg temperaturen hurtigt ved  $T_{herd}$ , som i figur 12 går stejlt opad i starten. Lidt senere brænder sækkene væk og flisen falder ned på risten. Derved falder temperaturen ved  $T_{herd}$  da brændslet er borte. Langsomt bygges brændselslaget op i gasgeneratoren gennem manuelt styrede indfyringer af flis. Indfyringerne afpasses således at næste påfyring først sker efter at flammerne har bredt sig på toppen af den forrige indfyrede portion flis. Efter ca. 2 timer er temperaturen ved risten ca. 500 °C. Højere oppe i gasgeneratoren ved  $T_{herd}$  skete der ikke særligt meget. Temperaturen holdede meget efter udviklingen ved risten og lå i 3 timer kun på beskedne ca. 100 °C. Først da toppen af brændselslaget kommer opad begynder temperaturen at stige i den øverste del af gasgeneratoren.

Det var nødvendigt manuelt at udjævne den antændte flis under herdringen da den i modsætning trækul ikke kunne fordele sig selv i et jævnt lag på risten. Fra opstarten begyndte indtil anlæggets indfyring kunne sættes i automatisk drift gik der ca. 5 timer. Omkring en time senere var rengassystemet også opvarmet og motordrift kunne indledes. Undervejs havde anlægget været stoppet i ca. ½ time (frokostpause- ca. 240 min. efter start). I den periode faldt temperaturen ved  $T_{rist}$  ca. 100 °C, men fordi gasserne søgte opad og ud gennem gasgeneratorens øverste udluftning faldt temperaturen ved  $T_{herd}$  betydeligt mindre. Det var en ønskværdig reaktion og  $T_{herd}$  steg hastigt igen da indfyringen blev genoptaget.

Metoden krævede konstant bemanning under forsøget og ret stor manuel arbejdsindsats på grund af den hyppige overvågning af brændslets omsætning i gasgeneratoren. På basis af anlæggets PLC styring bør den opgave dog kunne automatiseres i en sådan grad at der kan skæres ned i bemandingsbehovet.

Der blev brugt meget brændsel (ca. 3 m<sup>3</sup> flis) til hele opvarmningen. Varigheden af opvarmningsforløbet vurderes som acceptabelt.

Den største ulempe ved metoden er dog, at der må anses at være en oplagt risiko for at uønskede mængder af tjærebelægninger bliver afsat i de dele af

anlæggets rørsystem, som berøres af rågassen. Kombinationen af de relativt kolde anlægsdele i opvarmningsperioden, som forekommer samtidigt med at brændselslaget i gasgeneratoren gradvist bliver opbygget, er uheldig. Når brændselslaget er under opbygning til normal højde i gasgeneratoren betyder det at forgasningsprocessen er i gang uden at der er et særligt stort trækullag til stede. Den trinopdelte lufttilsætning er heller ikke i funktion til at reducere tjæreindholdet i gassen.

Metoden har potentialet til at kunne blive videreudviklet til en langt højere automatiseringsgrad, men det bør i så fald indledes med målinger til kvantificering af tjæreindholdet og en vurdering af de driftsmæssige konsekvenser ved den formodede tjæredannelse i ”den kolde opvarmningsperiode”.

#### **7.6. Forsøg med opvarmning ved brug af gasfyr**

Den sidste afprøvede metode minder en del om prøven med topbrænderen, men denne gang blev anvendt et brugt standard gasfyr, som stammede fra en naturgasfyrer villakedel. Gasfyret var af fabrikat Mectron, som blev omjusteret til fyring med LPG i stedet for naturgas. Dets afgivne effekt var væsentligt større end topbrænderens.

Gasfyret blev provisorisk monteret i anlæggets indfyringstragt. Inden gasfyret kunne placeres var det først nødvendigt at afmontere diverse dele på indfyringstragten som enten sad i vejen eller kunne tage skade af varmen.



**Figur 13:** Mectron gasfyr til LPG gas midlertidigt placeret ovenpå indfyringstragten. Røret i forgrunden er den permanente topbrænder.

Den første prøve viste at det var nødvendigt at forlænge gasfyrets brænderrør med et større yderrør for at få varmeafgivelsen ned i de mere varmfaste områder af gasgeneratoren, da varmepåvirkningen af indfyringstragten blev for stor.

Opvarmning med gasfyret blev startet ved at tænde anlæggets rågassuger og gasfyret. Forinden er den normale lufttilførsel blevet afspærret da gasfyret og luftgennemstrømningen i det større yderrør leverer den fornødne luft.

Gasfyrets afgivne effekt var ca. 50 kW så en almindelig 11 kg. gasflaske kunne række til lidt over 2 timers drift. I tilfælde af brændersvigt ville fyrets sikkerhedsautomatik selv afbryde gastilførslen så behovet for tilsyn var minimalt.

Det store gasforbrug betød dog at gasregulatoren og gasflasken isede til, så der måtte bruges tid på at holde den varm. Det problem var dog først og fremmest relateret til forsøgsomstændighederne. Der eksisterer adskillige tekniske løsninger på det problem, som kan anvendes ved en permanent installation.

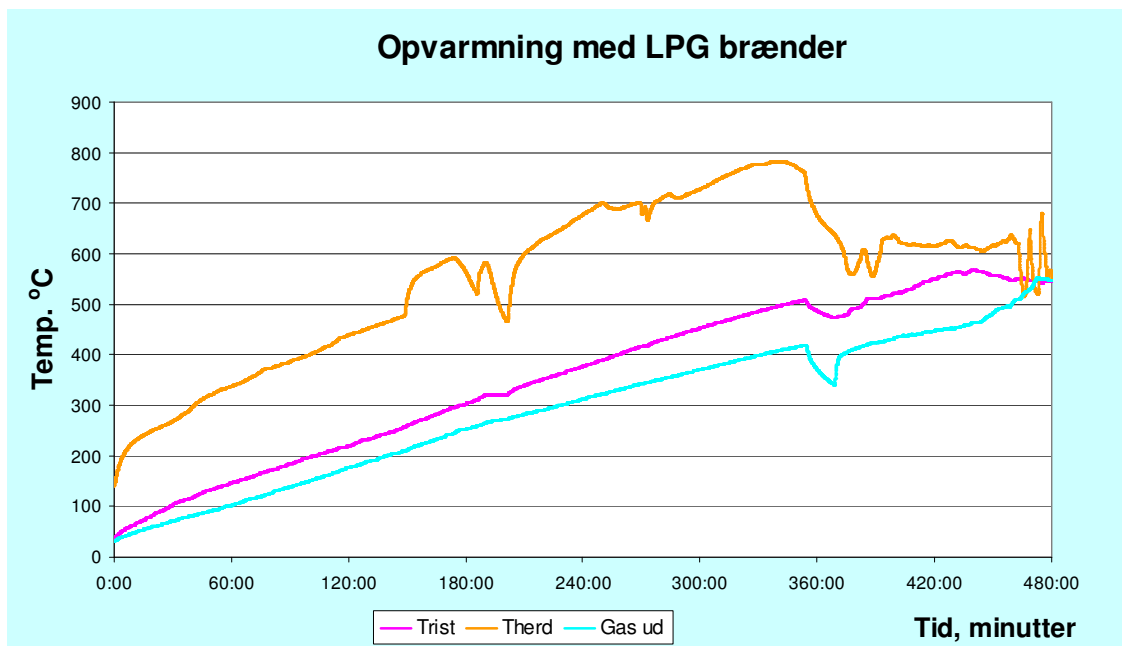
Metoden med opvarmning ved brug af gasfyr blev afprøvet seks gange med succes.

Til de sidste afprøvninger blev brugt en almindelig LPG tagpap/ukrudtsbrænder i stedet for Mectron gasfyret. Den u hensigtsmæssige lodrette placering af gasfyret betød at det tog skade af den varmeafgivelse som trods isolering søgte opad.

Tagpapbrænderen havde en noget mindre afgiven effekt end Mectron gasfyret. Ud fra gasforbruget blev tagpapbrænderens effekt bestemt til ca. 30 - 35 kW.

Selve indbygningen måtte ændres lidt. Til kompensering af den mindre varmeeffekt blev rågassugeren stillet ned i kapacitet således at luftstrømmen gennem anlægget blev formindsket. Hermed kunne temperaturen på røggas/luftstrømmen opretholdes trods den lavere varmeeffekt.

Et typisk opvarmningsforløb med LPG brænderen er vist i figur 14. Ved opvarmning med LPG fås en enkel og uproblematisk opvarmning som ikke kræver særlig bemanning eller tilsyn. Temperaturforløbet er tilfredsstillende hurtigt. Det tager 4 -5 timer at opvarme et koldt anlæg så det er klart til indfyring af flis.



**Figur 14:** Temperaturforløb ved opvarmning af med en LPG gasbrænder placeret i toppen af indfyringstragten. Til det viste opvarmningsforløb blev anvendt ca. 15 kg LPG.

Når opvarmning med et temperaturforløb som vist på figur 14 har resulteret i en temperatur ved risten på ca. 500 °C viste forsøgene at indfyring af flis medfører øjeblikkelig antændelse. Flistilførsel kan da med det samme sættes til automatisk indfyring i de normale intervaller. Opbygning af brændselslaget i gasgeneratoren sker dermed hurtigt og motordrift kan indledes få timer efter at opvarmningen er afsluttet. Det samlede opvarmningsforløb strækker sig da over ca. 7 timer hvoraf kun de sidste par timer kræver bemanding

### 7.7. Sammenfatning

De afprøvede opvarmningsmetoder med:

- Topbrænder og trækul
- Topbrænder og flis
- LPG brænder

kan sammenfattes således:

#### Topbrænder og trækul

Fordele: Trækul antændes hurtigt og ikke giver uønskede gaskomponenter (tjære).

Ulemper: Håndteringen af trækul er arbejdskrævende og de relativt store stykker giver risiko for kanaldannelse under den videre opstart af anlægget. Det resulterer i en ringe gaskvalitet indtil trækullene er omsat.

### **Topbrænder og flis**

Fordele: Brændslet findes i sin rigtige form i anlægget allerede og er således arbejdsmæssig nem. Omkostninger til optændingsmaterialet er lavt.

Ulemper: Der kan under den langsomme opvarmingsperiode dannes uønskede gaskomponenter som kan sætte sig i det efterstående anlæg der således vil have behov for hyppigere rensning og servicering.

Det er nødvendigt at tilse og justere bændselslaget manuelt under opvarmning da antændelsen af flisen ikke er fuld effektiv og ikke vil flyde ud over hele reaktor diameteren.

### **LPG brænder**

Fordele: Opvarmningen kan ske automatisk og med minimal arbejdsindsats. Dens styring kan let lægges i anlæggets PLC anlæg og dermed indgå i en automatiseret opstart. Der dannes ingen uønskede afsætninger i anlægget eller aske under selve opvarmningen. Når flis tilføres er gasgeneratoren oppe i temperatur og kan hurtigt få gang i omsætningen af træflis.

Ulemper: Energiudgiften til LPG er relativ høj og vil på større anlæg kræve et tankanlæg, hvis naturgas ikke er til rådighed. Alternativt kan anvendes et oliefyr, som vil være billigere i installation og drift.

Samlet kan konkluderes at opvarmning med LPG brænder må anses for at være den bedste af de afprøvede startprocedurer for gasgeneratoren. Der er dog også behov for topbrænderens funktion, når flammefronten skal trækkes op gennem indsnævringen. Afhængig af hvordan en fast installation af en LPG brænder eller et oliefyr præcist udformes, kan det vise sig at der vil være behov for begge typer brændere.

## **7.8. Anlæggets stopprocedure**

I projektet er der kun foretaget mindre tilpasninger af anlæggets stopprocedurer. Ved projektstart var anlæggets PLC system udviklet således at anlægget var i stand til at registrere driftsfejl og reagere efter typen af fejl.

Der var defineret to typer automatiske stopprocedurer for anlægget: En almindelig og en kritisk procedure. I begge situationer afgiver PLC'en en alarm, som sendes videre til en mobiltelefon.

Begge metoder indledes med stop af gastilførslen til gasmotoren og frakobling af elgeneratoren fra elnettet. Indfyring af brændsel i gasgeneratoren stoppes samtidig.

Ved det almindelige stop er indlagt en periode, hvor rågassugeren starter og lader gassen gå til afbrænding i gasfaklen i ca. 10 minutter. I samme tidsrum fortsætter tørreanlægget og røggassugeren med at køre mens temperaturen falder. Når de 10 minutter er gået stoppes anlægget helt og den resterende



gasudvikling i gasgeneratoren ledes fra toppen af anlægget via tvangsåbning af et udendørs afkast.

Den kritiske nedlukning er mere brutal. Den anvendes hvis der registreres typer af fejl som gør det kritisk at lade gasgeneratoren fortsætte produktionen. I så fald stoppes anlægget øjeblikkeligt og den resterende gasudvikling føres til det udendørs afkast. I de tilfælde kan der opstå en mindre røgudvikling i stil med en ujusteret brændekedel, hvis der lige inden den kritiske nedlukning er blevet fyldt brændsel i gasgeneratoren.

Begge metoder fungerer tilfredsstillende i deres nuværende form. Cyklussen med almindeligt stop benyttes normalt også når der ønskes manuelt stop af anlægget.

### **7.9. Overvejelse om brug af pausefyring**

Erfaringerne fra afprøvningen af anlægget har vist at hvis anlægget er blevet stoppet enten manuelt eller via en af stopprocedurene kan det selv efter relativ lang tid ret hurtigt bringes tilbage på rette driftstemperatur og genindsættes i kraftvarmeproduktionen.

Hvis anlægget genstartes mindre end ca. 6 timer efter det er blevet standset er temperaturerne fortsat så høje i gasgeneratoren at elproduktionen kan genoptages med det samme. Hvis stoppet har varet fra 6-24 timer kræver det en opvarmingsperiode på omkring en time, hvor det især er temperaturerne i gasrør og gasrensningssystemet der skal bringes tilbage på normal driftstemperatur. Den egenskab betyder blandt andet at hvis der indtræder et driftsstop på anlægget efter midnat får anlægget normalt lov til at lukke ned i følge den stopprocedure, som den pågældende fejl aktiverer. Afhjælpning af fejlen og genstart får da lov til at vente til næste arbejdsdag.

De gange hvor anlægget er blevet standset med henblik på inspektion af gasgeneratoren konstateres som regel at det tilbageværende trækul selv efter ca. 3 døgn begynder at gløde igen når der tilføres luft.

Genstart af kraftvarmesystemet efter at det har været i drift er dermed betydeligt mindre krævende end hvis der skal foretages opstart af et koldt anlæg. Set i det lys er der ikke valgt at arbejde med rutiner og forsøg med pausefyring af gasgeneratoren i dette projekt.

## **8. Driftsmålinger på Castoranlægget**

Driftsoprøvnningen af det ombyggede anlæg var planlagt til at blive afsluttet med et måleprogram over to dage d. 12-13. december 2006.

Måleprogrammet bestod af samtidige målinger af produktgassens sammensætning, anlæggets energiproduktion, samt dets emission til omgivelserne via skorstenen.

Måleprogrammet blev gennemført i et samarbejde mellem:

- DTU (produktgas, brændsel, og askemålinger)
- Teknologisk Institut (rekvireret til akkrediteret luftemissionsmåling) og
- BioSynergi Proces (anlægsdrift og almen driftsregistrering)

### **8.1. Driftsomstændigheder under målingerne**

Ved målingerne d. 12 - 13. december 2006 blev anlægget sat i drift dagen før prøverne skulle starte. Som omtalt i kapitel 5 måtte målingerne desværre gennemføres uden den normale luftforvarmer og forgasningsblæser til forgasningsluften. Ved hjælp af modelleringsprogrammet, som er beskrevet i kapitel 6, blev beregnet at manglen af luftforvarmeren teoretisk vil reducere anlægget elvirkningsgrad med ca. 1. procent point.

Målingerne blev gennemført på det tidspunkt hvor demonstrationsanlægget i forvejen havde tilbagelagt i alt ca. 540 timers drift med elsalg til det offentlige elnet. Gasgeneratorens akkumulerede driftstimer var ca. 1270 timer.

Natten før den første måling opstod en defekt i en elmotor til asketransporten ud af gasgeneratoren. På det tidspunkt var måleudstyret allerede blevet rigget til på anlægget, så det blev besluttet at gennemføre prøverne som planlagt og finde en erstatning for elmotoren næste dag.

En ny elmotor blev monteret d. 12. Det viste sig da, at problemet var større end først antaget idet den første motor var brudt ned pga. en fastsiddende skraber. Skraberen var umulig at få løs så længe gasgeneratoren var varm. Derfor blev valgt at fortsætte driften uden et fungerende mekanisk askeudtag i gasgeneratoren. Uden den defekte askeskraber kunne den efterfølgende skraber i systemet kun trække en mindre askemængde ud af gasgeneratoren. Valget stod mellem at aflyse resten af målingerne eller forsøge at klare sig med den del af systemet som fortsat fungerede. Det sidste blev besluttet.

Målingerne d. 12. blev gennemført efter planen. Anlægget blev den dag indstillet til dellastdrift. Motorens effekt var reduceret ved delvist at lukke dens gasspjæld indtil den ønskede reducerede ydelse var nået. Motorens luftoverskudstal blev holdt konstant ved hjælp af lambdastyringen.

Målingerne d. 13. december skulle gennemføres ved maksimal ydelse så om morgenen blev motorens gasspjæld stillet op på fuld åbning.

Resultatet af mere end 1 døgns drift med kun et dårligt fungerende askeudtag begyndte da at vise sig. I starten steg eleffekten en smule men det var tydeligt at rengassugeren havde vanskeligheder med at levere tilstrækkeligt med gas til at dække motorens behov.

Rengassugeren kørte hele den dag med maksimale omdrejninger og kunne alligevel ikke levere så meget gas at sætværdien for motorens luftoverskud kunne opretholdes. I stedet for den tilstræbte iltprocent i motorens udstødning på 1,5 % målt lige efter motoren endte iltprocenten ifølge lambdasondens visning på 3-3,5 %. Det var således ikke muligt at få tilstrækkeligt med gas frem til motoren til at øge effekten. En måling på den første varmeveksler efter gasgeneratoren viste et helt usædvanligt stort trykfald på 6000 Pa og indikerede tilstopning. Det svarer til ca. 75 % af rengassugerens maksimale sugeevne så der var ikke meget i overskud til modstanden i resten af anlægget. Prøven d. 13 blev således ikke til en fuldlastprøve men i stedet en dellastprøve ved drift med et andet luftoverskudstal end dagen før.

Efter afslutningen af måleprogrammet blev rørsektionerne efter gasgeneratoren og frem til posefilteret adskilt. Der blev konstateret meget store mængder aske i vendekammer og rør i den afblændede luftforvarmer og varmeveksleren samt i bunden af posefilteret. Det var klart årsagen til det store trykfald.



**Figur 15:** En del af den aske som havde fyldt og blokeret et af produktgassens vendekamre på rørsektionen lige efter gasgeneratoren.

Herefter blev besluttet at gennemføre endnu en måling indenfor projektets rammer med henblik på at få registret driftsforhold ved en større el og varmeydelse end det var lykkedes d. 12-13. december.

Den opfølgende måling fandt sted d. 7. marts 2007.

Måleprogrammet for den 7. marts bestod af målinger udført af DTU (produktgas målinger, vandindhold i brændsel og askemålinger). BioSynergi Proces foretog målinger af den indfyrede brændselsmængde samt udførte den almene driftsregistrering.

Af omkostningshensyn blev luftemissionsmålingen udeladt denne gang. En anden årsag til ikke at gentage målingen af luftemission var at der igen vil blive målt luftemission på anlægget i slutningen af 2007 som en del af BioSynergis igangværende PSO 5729 projekt.

De følgende afsnit præsenterer resultaterne af de udførte målinger

## 8.2. Indfyret flismængde

Den indfyrede flismængde blev ved alle prøver bestemt ved manuel vejning af den mængde tørret flis som blev indfyret i gasgeneratoren i løbet af måleperioden.

Til bestemmelse af flisens vandindhold blev løbende udtaget prøver af både den tørrede flis og den våde flis. Det sidstnævnte er det brændsel der modtages og betales for til driften af anlægget. Tørring og vandindholdsbestemmelse af flisprøverne blev udført af DTU. Alle vandindhold opgives i % af prøvernes totalvægt, altså våd basis.

	Enhed	12/12 2006	d. 13/12 2006	7/3 2007
<b>Våd flis (lagersilo)</b>				
Gennemsnit	%	44,8	44,9	49,2
Max	%	45,7	46,7	60,7
Min	%	43,5	42,9	45,9
<b>Tørret flis (mellemlager)</b>				
Gennemsnit	%	14,4	11,5	24,9
Max	%	18,5	12,7	31,0
Min	%	11,0	10,4	16,1

**Figur 16:** Vandindhold i den anvendte flis til målingerne.

## 8.3. Askeprøver og glødetab

Det blev udtaget askeprøver på alle tre måledage. På grund af det defekte askeudtag i december kan prøverne fra de dage ikke anses for at være repræsentative og indgik derfor ikke i den videre databehandling.

Der er bestemt glødetab på 5 askeprøver. Prøverne er tørret i ovn ved 104 °C i 24 timer. Derefter blev prøverne anbragt i hver sin digel. Digelene blev anbragt i en fælles ovn 550 °C med 2 luft pr minut i en reaktor. Prøvernes størrelse var ca. 5 gram i hver digel.

Ved prøven d.7. marts 2007 blev den samlede våde askemængde vejet til 187 kg. Vandindholdet i asken blev bestemt til 79,5 % mens den bortglødelige del i prøven udgjorde ca. 88 % af den tørre askemængde.

Den samlede bortglødelige mængde blev derved fundet til 34 kg.

Det skal dog gøres opmærksom på at der kan forekomme karbonatdannelse ved udglødningen hvilket vil give et forhøjede tal for askeindholdet.

#### **8.4. Gassammensætning**

DTU, MEK har i forbindelse med driftsmålingerne d. 12. og 13. december 2006 og d. 7. marts 2007 gennemført gasanalyser af den rensede produktgas fra BioSynergis trinopdelte Open Core forgasningsanlæg (betegnet Castoranlægget) hos Græsted Fjernvarme.

##### Analyseudstyr

Analysen er udført ved hjælp af DTU, MEK's nyindkøbte analyseudstyr.

De anvendte måleprincipper var:

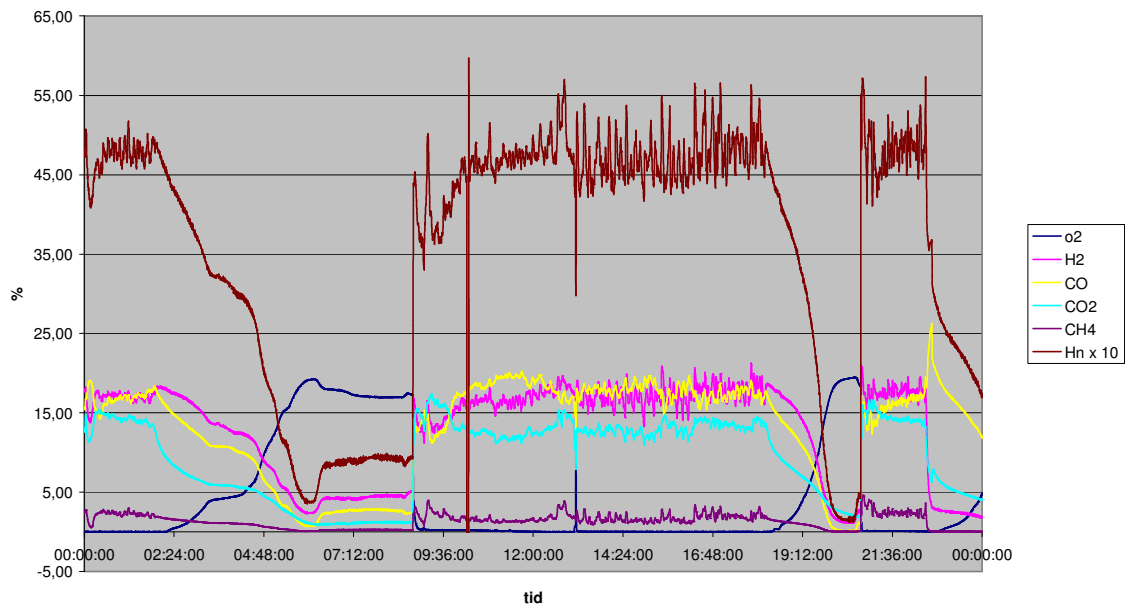
- H<sub>2</sub> varmeledningsevne,
- CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> infrarød,
- O<sub>2</sub> ved paramagnetisk og
- N<sub>2</sub> som differens.

Analyseinstrumenterne er kalibreret op mod en blandingsgas med en sammensætning tæt på den analyserede gas. Blandingsgassen indeholdt: H<sub>2</sub>: 25 %, CO: 15 %, CO<sub>2</sub>: 15 %, CH<sub>4</sub>: 2 %, O<sub>2</sub>: 0 %).

Dette er ikke i overensstemmelse med forskriften hvor der skal kalibreres op mod rene gasser, men da disse ikke var tilgængelige anvendtes i stedet blandingsgassen. Dette afstedkommer en måleusikkerhed der er ud over den specificerede på 1 % af fuldt udslag (H<sub>2</sub>: 50 %, CO: 30 %, CO<sub>2</sub>: 30 %, CH<sub>4</sub>: 10 %, O<sub>2</sub>: 25 %). Størrelsen på den yderligere usikkerhed kan ikke fastslås med anslås til at være yderligere 1 %.

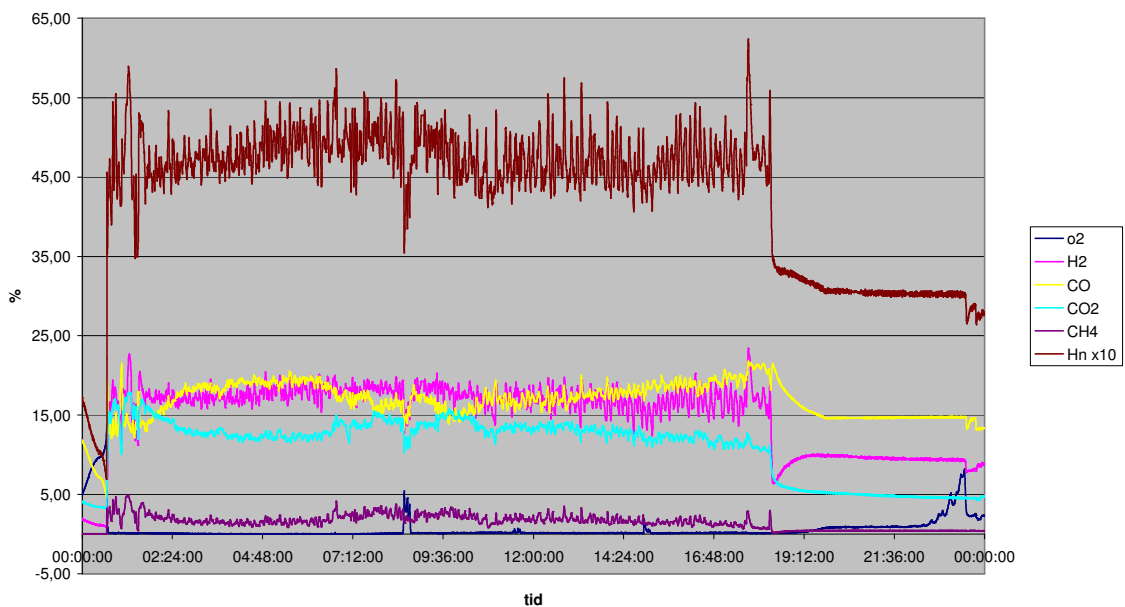
Der blev målt i tre dage og resultaterne af gasanalyse og beregnede nedre brændværdi ses på figurerne 17, 18 og 19. Det fremgår at forgasseren giver en udmærket gas med en rimelig stabil sammensætning. Gassens sammensætning er ifølge modelberegninger tæt på kemisk ligevægt. For forsøget i marts 2007 ses en lidt lavere brændværdi.

Gasanalyse 12-12-2006 Græsted

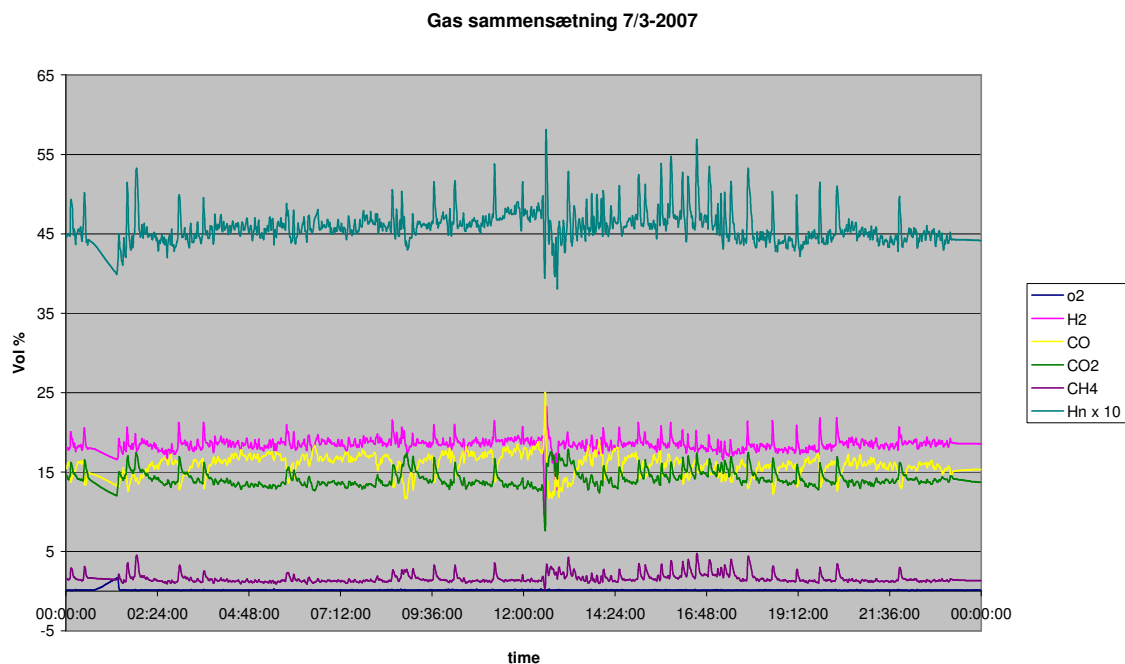


*Figur 17: Gassammensætning og beregnet nedre brændværdi, MJ/m<sup>3</sup> (n,t) (normalkubikmeter), af produktgassen for forsøget den 12/12 2006.*

Gasanalyse 13-12-2006 Græsted



*Figur 18: Gassammensætning og beregnet nedre brændværdi MJ/m<sup>3</sup> (n,t) af gassen for forsøget den 13/12 2006.*



**Figur 19:** Gassammensætning og beregnet nedre brændværdi,  $\text{MJ/m}^3$  (n,t) af gassen for forsøget den 7/3 2007.

Parameter Dato	O <sub>2</sub> vol%	H <sub>2</sub> vol %	CO vol %	CO <sub>2</sub> vol %	CH <sub>4</sub> , vol%	H <sub>n</sub> ( $\text{MJ/m}^3$ (n,t))	Periode start kl.	Periode slut kl.
	12/12 2006	0,07	17,00	17,90	12,73	1,66	4,69	10:00
13/12 2006	0,15	17,29	17,44	13,22	1,92	4,76	01:00	17:00
07/03 2007	0,17	18,47	15,85	14,16	1,62	4,57	00:00	24:00

**Figur 20:** Gennemsnit af produktgassens sammensætning og brændværdi (nedre) over udvalgte stabile perioder for hvert af de tre forsøg.

## 8.5. Tjæremålinger

Der blev udført målinger af indholdet af tjære på forgasseren d. 12. og 13. december 2006. Prøvetagningen blev udført med en såkaldt Petersen-kolonne og den efterfølgende GC/MS analyse. I bilag 7 findes en detaljeret beskrivelse af målingerne og den anvendte metode

Dato	12/12-06	12/12-06	13/12-06	13/12-06
Tid	11:52- 13:52	15:18- 17:18	9:52- 11:52	13:05- 15:08
Sampel volumen [L]	335	240	381	406
Sampel #	2	3	4	5
Phenol [mg/Nm <sup>3</sup> ]	57.1	14.4	20.6	19.5
Naphtalen [mg/Nm <sup>3</sup> ]	212.3	187.4	33.5	127.2
Phenantren [mg/Nm <sup>3</sup> ]	19.9	20.3	14.7	12.0
Antracen [mg/Nm <sup>3</sup> ]	3.9	3.8	2.4	2.2
Fluorenten [mg/Nm <sup>3</sup> ]	2.1	0.3	0.3	0.2
Pyren [mg/Nm <sup>3</sup> ]	0.8	0.4	0.1	0.1
Tjære dugpunkt [°C] <sup>1</sup>	66.7	63.5	58.8	57.7

**Figur 21:** Resultat af tjæremåling med Petersen-kolonne og efterfølgende GC/MS analyse. (Nm<sup>3</sup> angiver normalkubikmeter).

Som kommenteret i bilag 7 er både indholdet af phenol og naphtalen forholdsmæssigt højt. Det gennemsnitlige målte samlede tjæreindhold i de fire prøver er lidt under 200 mg/normalkubikmeter. Et tjæreindhold af den størrelsesorden indikerer en forkert funktion i gasgeneratoren under afprøvningen.

Ved en efterfølgende adskillelse af gasgeneratoren i juni-juli 2007, der fandt sted i forbindelse med optimeringsopgaver i PSO projekt 7191, kunne da også konstateres, at luftkanalerne til den partielle oxidationsluft, som tilsættes efter pyrolysezonen, var fuldstændig tilstoppede. Den yderste del af kanalerne var lukket med fastbrændt slagge, der var så hård at den måtte fjernes med vinkelsliber. Kanalerne fyldt op med løs aske bagved slaggen.

I henhold til redegørelsen i bilag 7 vil manglende luft til den partielle oxidation med sikkerhed forårsage et relativt højt tjæreindhold i gassen.

<sup>1</sup> Ifølge beregning med ECN tar dewpoint site <http://www.thersites.nl/completemodel.aspx>



At forgasningsluften samtidig var kold, fordi forsøgene er gennemført uden luftforvarmer til forgasningsluften, trækker også tjæreindholdet i den forkerte retning.

Den manglende tvungne luftstrøm gennem kanalerne til den partielle oxidationszone er formentlig årsagen til aske er aflejret og smeltet fast.

Manglende luft i oxidationszonen betyder også at temperaturen i den underliggende koksbed bliver lavere. Som bemærket i bilag 7 tyder tilstedeværelsen af naphthalen (som kvantitativt er den største målte tjærekomponeant) på at omsætningen af tjære i koksbeden er for lav. I PSO projekt 7191 arbejdes på at øge højden af koksbeden i gasgeneratoren. Den forbedring, retableringen af gasgeneratorens luftforvarmer samt tvungen lufttilførsel med forgasningsluftblæsere, der udføres som led i det samme projekt, må forventes at reducere gassens tjæreindhold betydeligt.

**8.6. Energimålinger d. 12 - 13. december 2006 og d. 7. marts 2007**  
Resultatet af energimålingerne fra de tre måledage findes i de efterfølgende tabeller.

Anlægget er fuldautomatisk og overordnet styret af en PLC med et grafisk PC bruger interface af mærket IGSS. Motorstyringen er en ældre separat relæbaseret enhed. Som en standard facilitet i IGSS lagres driftsdata til brug for efterfølgende databehandling og rekonstruktion af hændelsesforløb. Derudover indeholder anlæggets styring en del funktioner som kontrolleres af programmerbare relæer. Data herfra opsamles via en industriel PC baseret datalogger parallelt med IGSS bruger interfacet. Brugen af de adskilte styringer og dataopsamlingsmuligheder er historisk betinget for netop dette demonstrationsanlæg og giver nogle begrænsninger ved tværgående sammenligninger af driftsdata. Overvågningen og betjeningen af anlægget har ikke givet problemer under målingerne og de opsamlede data er tilstrækkelige til at danne sig et komplet billede af driftsforløbene.

To af de udførte delmålinger skal specielt kommenteres her.

#### Egetforbrug af el

Ved målingerne i december var anlægget kun udstyret med en elmåler som registrerer køb og salg af el til nettet. For at få et skøn over anlægget egetforbrug af el blev ved afslutningen af målingen d.13. december gennemført en tilnærmet måling. Gasmotoren blev kørt i tomgang på LPG mens resten af anlægget blev holdt i drift med afbrænding af gassen i faklen. Dermed var det samme udstyr i drift som under målingerne. Over 30 minutter blev elforbruget registreret. Resultatet var et gennemsnitligt forbrug på ca. 10 kW.

Egetforbruget af el gik blandt andet til:

- drift af anlæg herunder luftkompressor
- drift af gasanalyseudstyr
- øvrigt forbrug i hal og opholdslokale
- forsyning til Teknologisk Instituts målevogn

Egetforbruget d. 12-13. december var betydeligt i forhold til den elproduktion leverede ved dellast og introducerer dermed en stor usikkerhed.

Ved målingen d. 7/3 2007 blev derfor installeret en ekstra elmåler som direkte registrerede elgeneratorens afgivne effekt. Derved blev det muligt at beregne egetforbruget ud fra værdierne for elproduktion af generator og elsalg til forsyningsnettet. Med den metode blev egetforbruget bestemt til ca. 3 kW.

Det virker sandsynligt at egetforbruget var væsentligt mindre i marts end i december. Ved målingen i december aftog især målevognen en mærkbar eleffekt til blandt andet opvarmning slanger til målegasser og det koldere vejr betød generelt et højere elforbrug.

#### Måling af varmeproduktion

Ved vurdering af resultaterne af anlæggets varmeproduktion skal der tages højde for at rør og varmevekslere i anlæggets varmekreds stort set ikke er isolerede. Det skyldes først og fremmest at anlægget er placeret i en uisolereet stålbygning, så om vinteren er ethvert varmetilskud særdeles velkomment. Da Græsted Fjernvarme er i stand til at producere varme selv til en fordelagtig lav forbrugerpris er offeromkostningen ved at anvende egen varmeproduktion er relativ lav. De anførte varmevirkningsgrader er derfor ikke et udtryk for anlæggets optimale ydelse.

#### Observationer ved tørreanlægget

Ud fra temperaturmålingerne er observeret at flistørreanlægget kun på fuld kapacitet i ca. 50 % af tiden. Dette gælder med det givne vandindhold i flisen som under målingerne lå omkring 40 - 50%. Ved højere vandindhold vil tørreanlægget blive belastet mere. Anlæggets tørrekapacitet stiger ved stigende ydelse idet der bliver en større røggasmængde til rådighed til tørring.

Efter tørreanlægget sidder cyklonen, der optager træstøvet, som afgives under tørringen. Støvet samles under cyklonen og afsækkes. Ved en måling er støvproduktionen bestemt til 0,4 kg/time ved en tørrekapacitet på 60 kg tørret flis pr. time. Det svarer til 7 0/00.

#### Kommentarer til resultaterne

Ved dellastmålingerne i december blev som forventet fundet relativt lave værdier for elvirkningsgraden. Både elgeneratoren og motorens virkningsgrad påvirkes negativt ved dellastdrift og er medvirkende til de lave værdier. For motorens vedkommende er konstateret at det isatte

blandelegeme i motorens ind sugning, som har medvirket til forbedring af dellastegenskaberne, samtidig resulteret er et tryktab og dermed forringer fyldningen af motorens cylindre. Driften af gasgeneratoren uden luftforvarmning har som tidligere nævnt også negativ indflydelse på elvirkningsgraden.

Forinden målingen d. 7. marts var anlægget blevet udbygget med en gasblandetank, der skal benyttes under PSO 5729 projektet.

Måleudstyret var suppleret en Danfoss vortex gasmængde måler, som blev lånt hos DTU. Den blev midlertidigt monteret på rørstrækningen fra blandetanken til gasmotoren således at den samlede gasmængde til motoren passerede gennem den. Signalet fra den blev opsamlet i DTUs' gasmåleudstyr således at der blev registreret samtidige værdier for gassammensætning og gasmængden.

En midlertidig installation af en eleffektmåler direkte på elgeneratoren udelukkede behovet for betragtninger om egetforbrug af el.

Blandelegemet i motorens ind sugning blev fjernet idet målet var at gennemføre en måling ved maksimal ydelse hvor der ikke var behov for dets funktion.

Med det supplerende måleudstyr blev det muligt at bestemme både koldgasvirkningsgrad for gasgeneratoren samt elvirkningsgrad for gasmotor-elgeneratoranlægget for sig.

Samlet blev fundet en samlet elvirkningsgrad for anlægget på 19,5 % målt over 8 timer. I betragtning af den manglende luftforvarmer og det ældre motorgenerator anlæg vurderes resultatet som tilfredsstillende.

Ved delmålingerne af elvirkningsgraden for gasmotor/elgenerator blev resultatet 24 % mens koldgasvirkningsgraden for gasgeneratoren blev bestemt til 81,5 %.

En væsentligt enkelttab fra gasgeneratoren er energitabet med bortglødeligt i asken. Ved målingen d. 7/3 blev dette tab bestemt til 8 % af energien i det indfyrede våde brændsel. Et tab af den størrelse gør det til et oplagt indsatsområde for optimering af gasgeneratoren. En sådan optimeringsindsats indgår i det igangværende PSO projekt 7191.

Den gennemsnitlige eleffekt blev målt til 56 kW. Det er en værdi som skønnes relativt let at kunne forøges. Gassen tilføres motoren med en temperatur på ca. 45 °C. I forbindelse med ind- og udkobling af blandetanken var gassen betydeligt køligere og de perioder blev registreret op mod 70-75 kW eleffekt af generator. Rengassugerens kapacitet var ikke helt udnyttet under denne måling. Begrænsningen i anlæggets afgivne eleffekt ligger således i motorinstallationens gastilførsel.

Energimåling d. 12/12 2006 Resultater		Prøve med delvist lukket gasspjæld	
Tidsrum:	Kl. 11.00-17.00		
Varighed:	6 timer		
Energi tilført som brændsel			
Vandindhold, <i>våd</i> flis	% våd basis	45	mod- taget flis
Vandindhold, <i>tør</i> flis	% våd basis	14	efter tørring
Målt indfyret mængde <i>tør</i> flis	kg	348	
Indfyret energi, <i>tør</i> flis	kWh	1.559	
Indfyret energi, <i>våd</i> flis	kWh	1.428	100 %
Gennemsnitlig indfyret effekt, <i>våd</i> flis	kW	<b>238</b>	
Elproduktion			
Målt salg af elproduktion	kWh	175	
Beregnet egetforbrug af el under prøven	kWh	60	
Beregnet brutto elproduktion ab generator	kWh	235	16,5 %
Gennemsnitlig eleffekt ab generator	kW	<b>39</b>	
Varmeproduktion			
Målt varmeproduktion til hovedvarmeveksler	kWh	560	39 %
Gennemsnitlig afgiven varmeeffekt	kW	<b>93</b>	

Måling d. 13/12 2006 Resultater		Dellastprøve med fuldt åbent gasspjæld og øget luftoverskud	
Tidsrum:	Kl. 11.00-17.00		
Varighed:	6 timer		
Energi tilført som brændsel			
Vandindhold, <i>våd</i> flis	% våd basis	45	modtag et flis
Vandindhold, <i>tør</i> flis	% våd basis	11,5	efter tørring
Målt indfyret mængde <i>tør</i> flis	kg	367	
Indfyret energi, <i>tør</i> flis	kWh	1706	
Indfyret energi, <i>våd</i> flis	kWh	1555	100 %
Gennemsnitlig indfyret effekt, <i>våd</i> flis	kW	<b>259</b>	
Elproduktion			
Målt salg af elproduktion	kWh	152	
Beregnet egetforbrug af el under prøven	kWh	60	
Beregnet brutto elproduktion ab generator	kWh	212	
Gennemsnitlig eleffekt ab generator	kW	<b>35</b>	13,5 %
Varmeproduktion			
Målt varmeproduktion til hovedvarmeveksler	kWh	540	35 %
Gennemsnitlig afgiven varmeeffekt	kW	<b>90</b>	

Måling d. 7/3 2007		Prøve med fuldt åbent gasspjæld og normalt luftoverskud	
Tidsrum:	Kl. 9.00-17.00		
Varighed:	8 timer		
Energi tilført som brændsel			
Vandindhold, <i>våd</i> flis	% våd basis	49	modtaget flis
Vandindhold, <i>tør</i> flis	% våd basis	25	efter tørring
Målt indfyret mængde <i>tør</i> flis	kg	654	
Indfyret energi, <i>tør</i> flis	kWh	2.511	
Indfyret energi, <i>våd</i> flis	kWh	2.299	100 %
Gennemsnitlig indfyret effekt, <i>våd</i> flis	kW	<b>287</b>	
Elproduktion			
Målt salg af elproduktion	kWh	425	
Beregnet egetforbrug af el under prøven	kWh	25	
Målt brutto elproduktion ab generator	kWh	450	19,5 %
Gennemsnitlig eleffekt ab generator	kW	<b>56</b>	
Varmeproduktion			
Målt varmeproduktion til hovedvarmeveksler	kWh	890	38,5 %
Gennemsnitlig afgiven varmeeffekt	kW	<b>111</b>	

Måling d. 7/3 2007		Prøve med fuldt åbent gasspjæld og normalt luftoverskud	
Energimålinger på produktgas			Bemærkning
Produktgasflow, gennemsnit	m <sup>3</sup> n/h	181	
Produktgassens afgivne effekt i form af kemisk bunden energi.	kW	<b>236</b>	I måleperioden kl. 9.00-17.00
Beregnet elvirkningsgrad for motor/elgeneratoranlæg	%	24	Brændstof ind /el ab generator

Måling d. 7/3 2007		Prøve med fuldt åbent gasspjæld og normalt luftoverskud	
Energibetragtninger -gasgenerator			Bemærkning
Indfyret energi, <i>tørret</i> flis	kWh	2.511	
Indfyret energi, <i>våd</i> flis	kWh	2.299	100 %
Målt askemængde	kg	197	
Vandindhold i aske	% våd basis	79,5	5 prøver
Bortglødeligt i aske	%	88	
Beregnet energitab med bortglødeligt	kWh	189	Antaget $H_n$ for bortglødeligt; 20 MJ/kg
Energitab med bortglødeligt i asken	%	8	Vådt brændsel som basis
Målt produktgasflow, gennemsnit	m <sup>3</sup> n/h *	181	
Kemisk bundet energiindhold i produktgas	kWh	1888	
Produktgassens kemisk bunden effekt	kW	<b>236</b>	
Afgiven energi			
Beregnet koldgasvirkningsgrad, tørret brændsel	%	75	
Beregnet koldgasvirkningsgrad, vådt brændsel	%	82	(1888/2299 x 100 %)
* m <sup>3</sup> n/h: normalkubikmeter pr. time			

### 8.7. Emissionsmålinger

Et resume af Teknologisk Instituts emissionsmålinger findes i bilag 6. Målingerne er foretaget i gasmotorens skorsten i et punkt efter røggaskondensatoren og før røgsugeren. Den nedenstående tabel fremhæver hovedresultaterne.

Parameter	Enhed	Teknologisk Instituts målinger d. 12-13 december 2006	Emissionsgrænseværdi i Bek.. nr. 621 af 23. juni 2005
Temperatur	°C	49	-
Partikler	mg/m <sup>3</sup> (n,t)	3,8	-
O <sub>2</sub>	vol % tør	10,5	-
CO <sub>2</sub>	vol % tør	9,6	-
CO	mg/m <sup>3</sup> (n,t) v. 5 % O <sub>2</sub>	1543	3000
NO <sub>x</sub> (som NO <sub>2</sub> )	mg/m <sup>3</sup> (n,t) v. 5 % O <sub>2</sub>	653	550
UHC	mg C/m <sup>3</sup> (n,t) v. 5 % O <sub>2</sub>	67	1500

På nær værdien for NO<sub>x</sub>, som er 20 % over grænseværdien, ligger de målte værdier med en god margen under de gældende grænseværdier. NO<sub>x</sub> resultatet er ikke helt uventet, da der hidtil ikke er gjort nogen foranstaltninger med hensyn til motoroptimering. Her forventes specielt at en modernisering og trimning af motorens tændingssystem vil kunne bringe NO<sub>x</sub> indholdet i udstødningsgassen under grænseværdien.

Indholdet af partikler på 4 mg/m<sup>3</sup>(n,t) (normalkubikmeter) ligger passende lavt især når det tages i betragtning at udstødningsgassen anvendes til trætørring hvorfra der sker en vis partikelmedrivning.

Den målte iltprocent er væsentlig højere end den iltprocent som registreres af anlæggets lambdasonde i udstødningen lige efter gasmotoren. En kontrol måling i samme målepunkt med den samme iltmåler som Teknologisk Institut brugte i skorstenen bekræftede at lambdasondens visning er korrekt. Det høje iltindhold i skorsten skyldes derfor luftindbrud i rørsystemet efter lambdasonden. Her er specielt tætningerne omkring anlæggets tromletørrer under mistanke.



## 9. Referencer

/1/. *Optimering og automatiseret drift af Open Core anlæg til kraftvarmeproduktion på skovflis*. BioSynergi Proces ApS. December 2005. Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi (UVE). Projekt nr. 023005/23014-022

-----



# **Bilag 1**

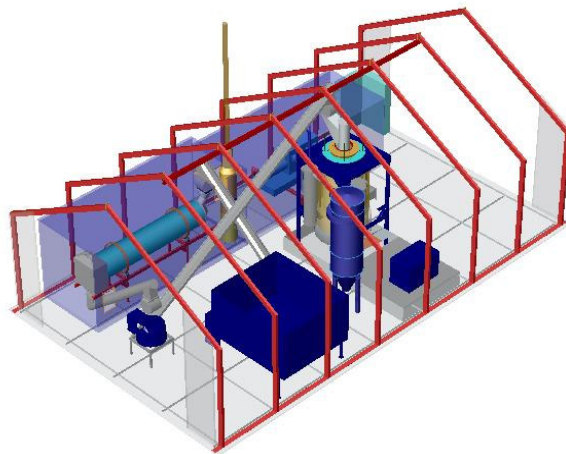
## **Anlægsbeskrivelse og procesdiagram**

Demonstrationsanlægget - der har fået kælenavnet Castor anlægget – er dimensioneret til følgende nominelle størrelser:

- 100 kW el
- 220 kW varme ab anlæg
- 425 kW indfyret brændsel

Det anskaffede motorgeneratoranlægs nominelle eleffekt er imidlertid elektrisk begrænset til 75 kW eleffekt, så hidtil har anlægget kun været drift med op til denne eleffekt.

Det samlede anlæg er opstillet i en 135 m<sup>2</sup> maskinhal, der er illustreret i figur A.



**Figur A:** Skitse af demonstrationsanlægget på Græsted Fjernvarme. Tørringsanlæg og motorcelle befinder sig i de to blå containerne, der står på langs i hallen.

Anlægget er designet til at anvende ganske almindelig brændselsflis fra skovbruget, der ved modtagelsen typisk har et vandindhold på 40-55 % af totalvægt.

Den centrale proces i konceptet, hvor brændselsflis omsættes til en brændbar gas, foregår i en patenteret trinopdelt Open Core medstrøms gasgenerator. Gassen benyttes som brændstof til en forbrændingsmotor, der producerer el og varme. Anlægget er udviklet til ubemandet, automatisk drift.

Demonstrationsanlægget har potentiale til at danne grundlag for en fremtidig udvikling af kommercielle anlæg i intervallet 250 – 1.000 kW el (600-2.300 kW varme).

To detaljerede procesdiagrammer er vist i slutningen af dette bilag. De viser procesforløbet før og efter den ændring af gasrør systemet, der er udført med henblik på at kunne køre modulerende drift.

Efter modtagelsen i flistransportsystemet føres den våde brændselsflis til tørring i en 5 meter lang vandret liggende tromletørrer. Tromlen opvarmes med udstødningsgassen fra gasmotoren.

Den tørrede flis har herefter et vandindhold på 15-20 % af totalvægt og føres af transportsystemet videre til toppen af gasgeneratoren, hvor den indfyres gennem en cellesluse.

I toppen af gasgeneratoren tilføres også forvarmet luft til forgasningen. Brændsel, luft og produktgas bevæger sig i samme retning gennem gasgeneratoren i en medstrøms proces.

Luft til forgasningsprocessen kan reguleres til fordeling mellem tre adskilte områder i gasgeneratoren. En del af luften tilføres gasstrømmen lige efter pyrolyseringen og medvirker bl.a. til en intern omsætning af hovedparten af tjærestofferne fra pyrolysen. Alle reaktioner i gasgeneratoren foregår ved et svagt undertryk i forhold til omgivelserne.

De indre dele af gasgeneratoren er fremstillet af ildfaste keramiske materialer og afsluttes i bunden med en bevægelig rist.

Aske fra forgasningen udtages gennem en vandlås i bunden af gasgeneratoren. Helt fra starten af designfasen er der blevet tænkt på, at sliddele skal være lette at udskifte og at konstruktionens hovedsektioner skal være lette at adskille og samle på stedet.

Når produktgassens forlader gasgeneratoren er dens temperatur ca. 550 - 600 °C.

Produktgassen ledes med det samme til køling i en varmeveksler, der forvarmer luften til forgasningsprocessen. Herefter fortsætter den til en vandkølet varmeveksler, som afkøler den til ca. 120 °C. Rensningen af produktgassen for partikler og tjærestoffer sker herefter i et posefilter.

Efter posefiltret køles produktgassen en gang mere og når dermed en passende lav temperatur på ca. 60 °C før den tilføres gasmotoren. Undervejs til gasmotoren har produktgassen passeret en gassuger, der sørger for at holde undertryk i gasgeneratoren og hele rørsystemet frem til gassugeren.

Under start og opvarmning af anlægget føres produktgassen gennem et bypass rør udenom posefiltret og sendes af en gassuger til afbrænding i en udendørs gasfakkel. I starten fandtes kun en gassuger men det er nu ændret til en gassuger til rensset produktgas og en til urensset produktgas.

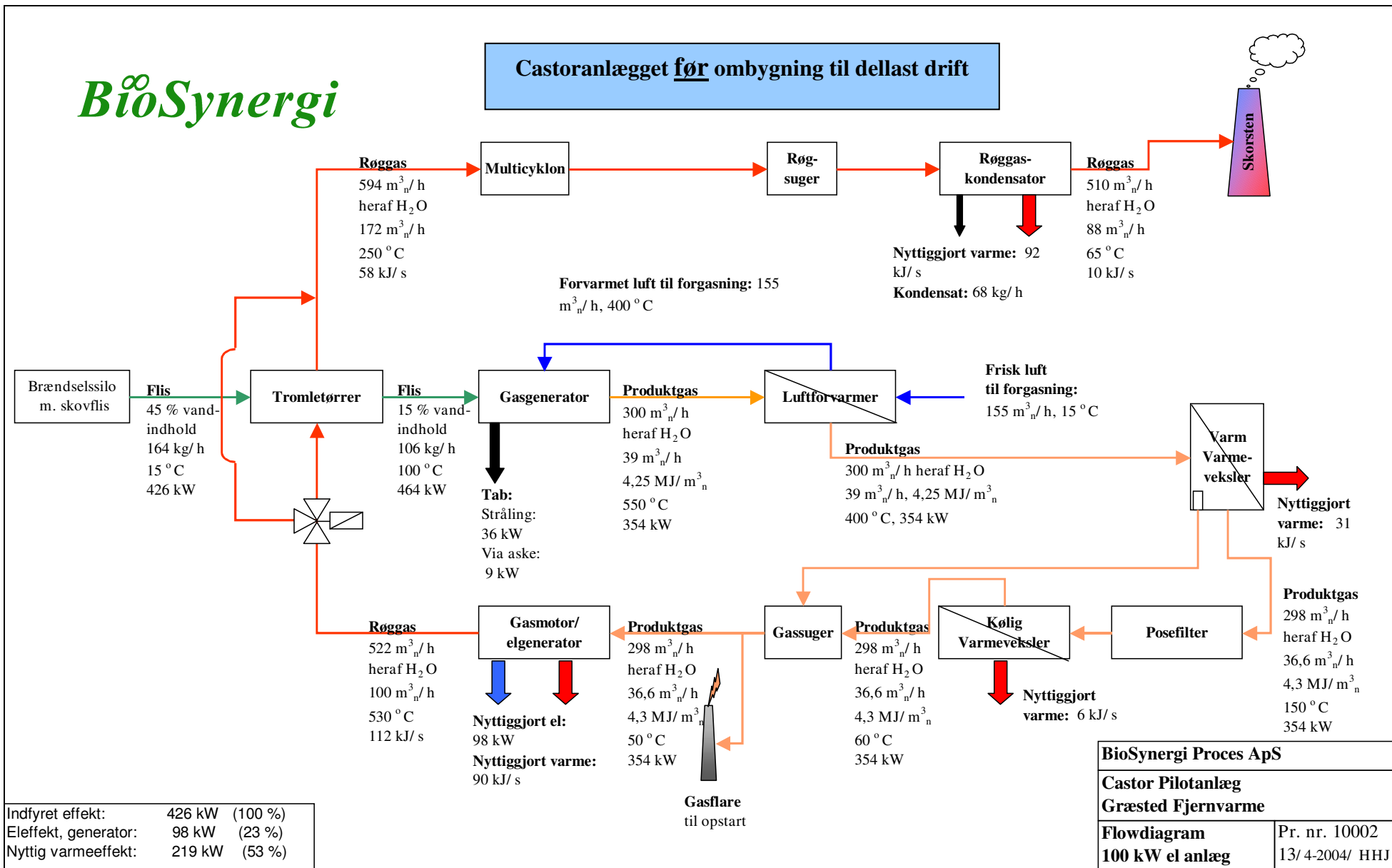
Gasmotoren er en 8-cylindret Deutz MWM, der er tilkoblet en asynkron 1500 o/min elgenerator med en nominel eleffekt på 98 kW<sub>el</sub>, der er elektrisk neddroset til 75 kW el.

Varmen fra kølevand og motorolie udnyttes til varmeproduktion, mens udstødningsvarmen, (som tidligere nævnt) i første omgang anvendes til tørring af brændselsflisen.

Efter tørringen genvindes energien i den fugtige udstødningsgas i en kondenserende røggaskøler, der også fjerner partikler fra gassen. Varmen udnyttes til fjernvarme. Udstødningsgassen har til slut en temperatur på ca. 60-65 °C og er mættet med vanddamp, når den bortledes gennem skorstenen.

# BioSynergi

## Castoranlægget før ombygning til dellast drift



Indfyret effekt:	426 kW	(100 %)
Eleffekt, generator:	98 kW	(23 %)
Nyttig varmeeffekt:	219 kW	(53 %)

<b>BioSynergi Proces ApS</b>	
<b>Castor Pilotanlæg</b>	
<b>Græsted Fjernvarme</b>	
<b>Flowdiagram</b>	Pr. nr. 10002
<b>100 kW el anlæg</b>	13/4-2004/ HHJ





## **Bilag 2**

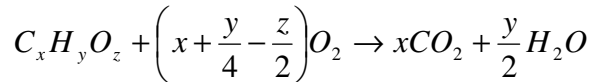
### **Entalpi af biomasse.**

## Bilag 2: Entalpi af biomasse.

Bruttoformlen for grundstofsammensætningen af tørt løvtræ er givet som

[Gøbel & Bentzen, 1995]:  $CH_{1.46}O_{0.64}$ .

Reaktionsligningen for støkiometrisk forbrænding af biomasse med sammensætningen  $C_xH_yO_z$  er givet ved [Fock & Thomsen, 1999]:



Brændværdien af biomassen bestemmes som forskellen mellem den specifikke entalpi af reaktanter og den specifikke entalpi af produkter ved 298.15 K og 1 atm.

$$Br_{n,biomasse} = h_{reaktanter}^{298} - h_{produkter}^{298}$$

Hvor den nedre brændværdi findes når forbrændingsprodukterne indeholder  $H_2O$  på dampform. Sættes den specifikke entalpi af biomassen lig reaktanternes entalpi:

$$h_{biomasse}^{298} = h_{reaktanter}^{298}$$

Kan den specifikke entalpi af biomassen skrives som:

$$h_{biomasse}^{298} = Br_{n,biomasse} + xh_{CO_2}^{298} + \frac{y}{2}h_{H_2O}^{298}$$

Den specifikke entalpi af biomassen ved en vilkårlig temperatur  $T$  kan skrives som:

$$h_{biomasse}^T = h_{biomasse}^{298} + c_{p,biomasse}(T)(T - 298K)$$

Hvor den specifikke varmekapacitet for tørt træ er givet ved [Fock & Thomsen, 1999]:

$$c_{p,tørt træ} = 0.003867 \cdot T + 0.1031$$

Hvor  $T$  er temperaturen i grader Kelvin.

## **Bilag 3**

### **Dugpunktsbestemmelse.**

### Bilag 3: Dugpunktsbestemmelse.

Dugpunktstemperatur og udkondenseret vandmængde bestemmes på følgende måde. Først udregnes partialtrykket [Pa] af dampen i gassen. Gassen antages at have et totaltryk på 1 atm.

$$P_{damp} = \left( \frac{n_{damp}}{n_{total}} \right) \cdot 101325 Pa$$

$n_{damp}$  og  $n_{total}$  angiver henholdsvis molstrømmen [mol/s] af dampen og molstrømmen [mol/s] af den samlede gas. Mætningsdamptrykket [Pa] for dampen i gassen ved den aktuelle temperatur bestemmes ved følgende empiriske udtryk [Padfield, 1996]:

$$P_{damp, mætning} = 610.78 \cdot \exp\left(\frac{T}{T + 238.3} \cdot 17.2694\right)$$

Hvor  $T$  er temperaturen i grader Celsius. Dugpunktet udregnes nu som den temperatur hvor dampens partialtryk er lig mætningsdamptrykket:

$$w = \frac{\ln\left(\frac{P_{damp}}{610.78}\right)}{17.2694}$$

$$T_{dugpunkt} = \frac{238.4 \cdot w}{17.2694 - w}$$

Hvor  $T_{dugpunkt}$  er dugpunktstemperaturen i grader Celcius og  $w$  er en hjælpeparameter.

Herefter beregnes den maksimale molstrøm [mol/s] af damp i produktgassen svarende til mætningsdamptrykket ved den aktuelle temperatur:

$$n_{damp, max} = \frac{P_{damp, mætning}}{101325 Pa} \cdot n_{total}$$

Den udkondenserede vandmængde [mol/s] findes nu som:

$$n_{kondens} = n_{damp} - n_{damp, max}$$

Kondensationsenergien [J/s] beregnes herfra som:

$$Q_{kondens} = n_{kondens} (-45.5 \cdot T + 45102)$$

Hvor  $T$  er temperaturen i grader Celsius.

## **Bilag 4**

### **Virkningsgrad af varmeveksler.**

#### **Bilag 4: Virkningsgrad af varmeveksler.**

Virkningsgraden for varmeveksleren defineres på følgende måde [Carlsen, 1996]:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} = \frac{|T_i - T_u|_s}{T_{1i} - T_{2i}}$$

Hvor temperaturdifferensen i tælleren refererer til den største differens mellem indløbs- og udløbstemperatur. Index  $i$  og  $u$  angiver henholdsvis indløb og udløb. Index  $s$  angiver største differens mellem sammenhængende ind- og udløb. Virkningsgraden er defineret alene ud fra temperaturerne på ind- og udløbene og udtaler sig derfor ikke om de nærmere omstændigheder for varmeoverførslen.

**Bilag 5**  
**Sammenligning af resultater fra**  
**modellering og driftsmålinger**  
**d. 7.marts 2007**

I tabellen på de følgende sider er opstillet en sammenligning af de værdier, som er beregnet ved hjælp af modelleringsværktøjet og data fra den driftsmåling, som blev udført på anlægget d. 7/3-2007.

Data fra driftsmålingen er dels benyttet som input parametre til modellen og dels til sammenligning med modellens beregnede værdier. De viste farvekoder i tabellen markerer sammenhængen mellem modellens data og driftsdata.

For nogle beregnede størrelser er driftsdata blevet anvendt som mål for den værdi, som modellens beregnede parameter skulle resultere i.

Fastlæggelsen af den beregnede parameter er de steder sket ved at variere den tilhørende input parameter i modellen indtil den beregnede parameter stemte overens med de målte driftsdata. De steder hvor denne fremgangsmåde er anvendt er driftsdata markeret med den røde farve, som betegner inputparametrene.

Et eksempel på denne fremgangsmåde ses eksempelvis i *5. modul posefilter*. Her er modellens beregnede temperatur efter posefilteret blevet fastlagt til samme værdi som driftsmålingens resultat ved iterativt at ændre på værdien for posefilterets varmetab, der er input parameter i modulet.



## Forgassermode

Data i forgassermode

Data registreret ved  
måling d. 7/3-2007

### Farvekoder:

Beregnete værdier

Værdier overført fra andre celler i tabellen

Input- parametre

Temperaturer i grader Celsius (omsat fra grader Kelvin)

Data fra driftsmåling d. 7 marts 2007 til brug for sammenligning  
med modellens beregnede størrelser

### 1. modul: Tromletørrer

#### Input-parametre:

Våd biomasse til tromletørrer

Værdi:    Enhed:

120    kg/time

120

Vandindhold i biomasse før tromletørrer

49    %

49 %

Vandindhold i biomasse efter tromletørrer

25    %

25 %

Molarmasse af biomasse

23,72    g/mol

Nedre brændværdi af flis

19000    J/g

Støkiometriske koefficienter:

C

1

H

1,46

O

0,64

Molstrømme af røggas ind i tromletørrer:

H<sub>2</sub>O

0,84    mol/s

CO<sub>2</sub>

0,68    mol/s

O<sub>2</sub>

0,07    mol/s

N<sub>2</sub>

2,97    mol/s

Varmetab fra tromletørrer

10000    J/s

Temperatur af biomasse før tromletørrer

283    K    10

Temperatur af biomasse efter tromletørrer

303    K    30

Temperatur af røggas ind i tromletørrer

813    K    540

547 °C

#### Beregnete størrelser:

Vand i røggas efter tromletørrer

1,422    mol/s

Temperatur af røggas efter tromletørrer

530,61    K    258

193 °C

Tør biomasse til tromletørrer

61,2    kg/time

vanddamp i røggas efter tromletørrer

92,25    kg/time

vanddamp i røggas efter tromletørrer

114,62    Nm<sup>3</sup>/time

## 2. modul: Forgasser

### Input-parametre:

	Værdi:	Enhed:	
n_CH4 i produktgas som fast procentdel af n_C i indfyret tør flis	5,6	%	
Kulstofab i procent af indfyret tør flis	7,2	%	
Temperatur af luft fra luftforvarmer til forgasser	288	K	15
Ligevægtstemperatur for forgasser	1028	K	755

Varmetab fra forgasser (udregnet efter beregning af gassammensætning)

15000	J/s
-------	-----

### Beregnete størrelser:

Molstrøm af vanddamp fra forgasser	0,30	mol/s	
Molstrøm af CO fra forgasser	0,34	mol/s	
Molstrøm af CO2 fra forgasser	0,31	mol/s	
Molstrøm af H2 fra forgasser	0,46	mol/s	
Molstrøm af O2 til forgasser	0,24	mol/s	
Molstrøm af N2 fra forgasser	0,89	mol/s	
% vanddamp	12,87		
% CO - (tør basis)	14,47	16,61	15,85 % (våd)
% CO2 - (tør basis)	13,09	15,02	14,16 % (våd)
% H2 - (tør basis)	19,68	22,59	18,47 % (våd)
% N2 - (tør basis)	38,18	43,81	-
% CH4 - (tør basis)	1,72	1,97	1,62 % (våd)
Lufttilsætning	117,28	kg/time	
Temperatur af produktgas efter forgasser (efter varmetab)	851,76	K	579 580 °C
Kondensationsenergi af produktgas efter forgasser	0,00	J/s	
Partialtryk af vanddamp i produktgas	13039	Pa	
Mætningsvanddamptryk af vanddamp ved temperaturen T_gas_tab_etter	1,25E+8	Pa	
Dugpunkttemperatur for vandvanddamp i produktgas	324,34	K	51
Vanddamp i produktgas	24,23	Nm <sup>3</sup> /time	
Kulstofab fra forgasser	4406,40	g/time	4,44 kg/h
Kulstofab fra forgasser	40,2	kW	23 kW
lufttilsætning	91,01	Nm <sup>3</sup> /time	
Produktgasflow ud af forgasser i Nm <sup>3</sup> /time	188,32	Nm <sup>3</sup> /time	181 Nm <sup>3</sup> /time
Nedre brændværdi af produktgas	239,08	kW	236 kW
Øvre Brændværdi af produktgas	276,04	kW	
Koldgasvirkningsgrad (basis af nedre brændværdi)	0,740		0,75
Nedre brændværdi af gas / indfyret effekt (- fordampningsvarme)			
Energiindhold i produktgas	4,57	MJ/Nm <sup>3</sup>	4,57 Nm <sup>3</sup> /time
Nedre brændværdi af produktgas	4406	J/g	
Øvre brændværdi af produktgas	5088	J/g	

### 3. modul: Luftforvarmer

<b>Input-parametre:</b>	<b>Værdi:</b>	<b>Enhed:</b>	
Temperatur af luft til luftforvarmer	288	K	15
Varmetab fra luftforvarmer	15000	J/s	
<b>Beregnete størrelser:</b>			
Virkningsgrad af luftforvarmer	0,00		
Temperatur af produktgas fra luftforvarmer	667,51	K	395
Kondensationsenergi af produktgas efter forgasser	0,00	J/s	
Partialtryk af vanddamp i produktgas	13039,32	Pa	
Mætningsvanddamtryk af vanddamp ved temperaturen T_gas_lf_ud	2,89E+7	Pa	
Dugpunktstemperatur for vanddamp i produktgas	324,34	K	51

### 4. modul: Varm Varmeveksler

<b>Input-parametre:</b>	<b>Værdi:</b>	<b>Enhed:</b>	
Temperatur af produktgas ud af varm varmeveksler	409	K	136
Varmetab fra varm varmeveksler	1500	J/s	
<b>Beregnete størrelser:</b>			
Virkningsgrad af varm varmeveksler	0,66		
Nyttiggjort varme fra varm varmeveksler	18371,16	J/s	
Kondensationsenergi af produktgas efter forgasser	0,00	J/s	
Partialtryk af vanddamp i produktgas	13039	Pa	
Mætningsvanddamtryk af vanddamp ved temperaturen T_gas_vv_ud	3,24E+5	Pa	
Dugpunktstemperatur for vanddamp i produktgas	324,34	K	51

### 5. modul: Posefilter

Varmetab fra posefilter	1500	J/s	
<b>Beregnete størrelser:</b>			
Temperatur af produktgas efter posefilter	388,75	K	116
Kondensationsenergi af produktgas efter forgasser	0,00	J/s	
Partialtryk af vanddamp i produktgas	13039,32	Pa	
Mætningsvanddamtryk af vanddamp ved temperaturen T_gas_pose_ud	1,73E+5	Pa	
Dugpunktstemperatur for vanddamp i produktgas	324,34	K	51

## 6. modul: Kølig Varmeveksler

### Input-parametre:

Temperatur af produktgas ud af kold varmeveksler

Værdi:    Enhed:

338	K	65	65 °C
-----	---	----	-------

Varmetab fra kold varmeveksler

1000	J/s		
------	-----	--	--

### Beregnete størrelser:

Nyttiggjort varme fra kold varmeveksler

2721,12	J/s		
---------	-----	--	--

Kondensationsenergi

0,00	J/s		
------	-----	--	--

Partialtryk af vanddamp i produktgas

13039	Pa		
-------	----	--	--

Mætningsvanddamptryk af vanddamp ved temperaturen T<sub>gas\_kv\_ud</sub>

24729	Pa		
-------	----	--	--

Dugpunkttemperatur for vandvanddamp i produktgas

324,34	K	51	
--------	---	----	--

Virkningsgrad for kold varmeveksler

0,44			
------	--	--	--

## 7. modul: Gasmotor

### Input-parametre:

Lambda

Værdi:    Enhed:

1,15			
------	--	--	--

Temperatur af luft til motor

288	K	15	15 °C
-----	---	----	-------

El-virkningsgrad

0,24			24 %
------	--	--	------

Køling-virkningsgrad

0,25			
------	--	--	--

tab-virkningsgrad

0,19			
------	--	--	--

### Beregnete størrelser:

Temperatur af røggas fra motor

812,99	K	540	547 °C
--------	---	-----	--------

Molstrøm af CO<sub>2</sub> fra motor

0,68	mol/s		
------	-------	--	--

Molstrøm af H<sub>2</sub>O fra motor

0,84	mol/s		
------	-------	--	--

Molstrøm af O<sub>2</sub> fra motor

0,07	mol/s		
------	-------	--	--

Molstrøm af N<sub>2</sub> fra motor

2,97	mol/s		
------	-------	--	--

% CO<sub>2</sub>

14,99			
-------	--	--	--

% H<sub>2</sub>O

18,43			
-------	--	--	--

% O<sub>2</sub>

1,58			1,60 %
------	--	--	--------

% N<sub>2</sub>

65,00			
-------	--	--	--

Vanddamp i røggas efter motor

54,54	kg/time		
-------	---------	--	--

Vanddamp i røggas efter motor

67,77	Nm <sup>3</sup> /time		
-------	-----------------------	--	--

Våd røggas efter motor

367,68	Nm <sup>3</sup> /time		
--------	-----------------------	--	--

## 8. modul: Røggaskondensator

### Input-parametre:

	Værdi:	Enhed:	
Temperatur af røggas ud af røggaskondensator	316	K	43 °C
Varmetab fra røggaskondensator	3000	J/s	
Temperatur af røggas efter tromletørrer	530,61	K	193 °C

### Beregnete størrelser:

Nyttiggjort varme fra røggaskondensator	75524,40	J/s	
Heraf kondensationsenergi	42613,05	J/s	
Partialtryk af vanddamp i røggas	28016,54	Pa	
Mætningsvanddamptryk af vanddamp ved temperaturen T <sub>rg_rgk_ud</sub>	8557,53	Pa	
Dugpunkttemperatur for vandvanddamp i røggas	340,82	K	68
Kondensat fra røggaskondensator (H <sub>2</sub> O)	64,00	kg/h	
Vanddamp i røggas ved 1 atm. 0C efter røggaskondensator	35,01	Nm <sup>3</sup> /h	
Virkningsgrad af røggaskondensator	0,83		
Tør røggas til røggaskondensator [Nm <sup>3</sup> /time]	299,92	Nm <sup>3</sup> /h	

### Energibalace

	Energi		% af termisk input	
<b>Termisk input</b> , ud fra nedre brændværdi	283,80	kW	100,0	%
<b>Varmetab fra tromletørrer</b>	10,00	kW	3,5	%
<b>Varmetab fra forgasser</b>	15,00	kW	5,3	%
<b>Varmetab fra luftforvarmer</b>	15,00	kW	5,3	%
<b>Varmetab fra varm varmeveksler</b>	1,50	kW	0,5	%
<b>Varmetab fra kold varmeveksler</b>	1,00	kW	0,4	%
<b>Varmetab fra røggaskondensator</b>	3,00	kW	1,2	%
<b>Kulstofstab fra forgasser</b>	40,2	kW	14,2	%
<b>EI-effekt</b>	57,38	kW	20,2	%
<b>Varme-effekt</b>	59,77	kW	21,0	%
<b>Motortab</b>	45,42	kW	16,0	%
<b>Varmetab fra posefilter</b>	1,5	kW	0,5	%
<b>Nyttig varme fra varm varmeveksler</b>	18,37	kW	6,5	%
<b>Nyttig varme fra kold varmeveksler</b>	2,72	kW	1,0	%
<b>Nyttig varme fra røggaskondensator</b>	75,52	kW	26,6	%
<b>Tab med røggas</b>	346,41	kW		
<b>Indfyret effekt</b>	283,80	kW	100	%
<b>Eleffekt</b>	57,38	kW	20,2	%
<b>Nyttig varmeeffekt</b>	156,39	kW	55,1	%
				56 kW 19,5%
				111 38,5%
				kW



# **Bilag 6**

## **Emissionsmåling - hovedresultater**

## Prøvningsrapport

Teknologiparken  
Kongsvang Allé 29  
DK-8000 Århus C  
Telefon 72 20 10 00  
Telefax 72 20 10 19

Rekvirent: BioSynergi Proces ApS  
Slotsbakken 108  
2970 Hørsholm

info@teknologisk.dk  
www.teknologisk.dk

### Resumé:

Teknologisk Institut har foretaget måling af partikel- og gasformige emissioner fra en LHV-gasfyret motor (Deutz MWM G232 V8, 93,4 kW) på BioSynergi Proces' Castoranlæg ved Græsted Fjernvarme. Målingerne er foretaget den 12.-13. december 2006 af cand.scient. Kent Uhre Knudsen. Undersøgelsen omfatter begge dage 5-6 timers emissionsmåling af O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> og UHC samt 2 stk. 1-times målinger af partikler ved ca. 40 % motorlast.


Af skemaet nedenfor fremgår de primære måleresultater som middelværdi af hele måleperioden. Måleresultaterne er sammenlignet med emissionsgrænseværdier ved normal drift for gasmotorer på forgasningsgas i Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 621 af 23. juni 2005.


Parameter	Enhed	Teknologisk Instituts måling	Emissionsgrænseværdi i Bek. nr. 621 af 23. juni 2005
Røggastemperatur	°C	49	-
Partikler	mg/m <sup>3</sup> (n,t)	3,8	-
O <sub>2</sub>	vol%, tør	10,5	-
CO <sub>2</sub>	vol%, tør	9,6	-
CO	ppm, tør	792	-
	mg/m <sup>3</sup> (n,t), 5% O <sub>2</sub>	1543	3000
NO <sub>x</sub> (som NO <sub>2</sub> )	ppm (tør)	208	-
	mg/m <sup>3</sup> (n,t), 5% O <sub>2</sub>	653	550
UHC	ppm C (våd)	73	-
	mg C/m <sup>3</sup> (n,t), 5% O <sub>2</sub>	67	1500*

\* Grænseværdien gælder ved en el-virkningsgrad på 30%.

Division: Industri og Energi, Emissionslaboratoriet

Underskrift:

  
Kent Uhre Knudsen  
Cand.scient.  
2007.02.01

  
Uwe Zielke  
Ingeniør/Kvalitetssikring  
2007.02.01

*Vilkår: Prøvningsrapporten må ikke gengives, undtagen i sin helhed, uden prøvningslaboratoriets skriftlige godkendelse. Resultaterne af prøvningen vedrører kun de prøvede emner og i anførte tidsrum.*

2007.02.01  
300 ELAB 1183  
kuh/uzi/mart

Side 1 af 12  
7 bilag



# **Bilag 7**

## **Resultater af tjæremåling på produktgas**

## Bilag 7: Resultater af tjæremåling

Dette bilag er udarbejdet af Jesper Ahrenfeldt, MEK (Institut for mekanik, Energi og Konstruktion), DTU, Lyngby.

Der blev udført målinger af indholdet af tjære på forgasseren d. 12. og 13. december 2006. Prøvetagningen blev udført med en såkaldt Petersen-kolonne og den efterfølgende GC/MS analyse (se appendiks for beskrivelse af metode).

Ved brug af den anvendte analysemetode kvantificeres en række karakteristiske tjærestoffer disse er specielt udvalgt fordi de repræsenterer de dominerende primære, sekundære og tertiære tjæreforbindelser<sup>1</sup>. Primære tjæreforbindelser er benævnelsen for de første stoffer, der dannes ved pyrolysens start. Ved opholdstider over 1 sekund, dannes sekundære tjæreforbindelser. Sekundære tjæreforbindelser karakteriseres ved indholdet af phenol og umættede kulbrinter. Tertiære tjæreforbindelser består hovedsagligt af flerringede aromatiske forbindelser, disse dannes ved høj temperatur dvs. >800 °C. Resultatet af analysemetoden giver ikke den totale mængde af tjære (udover de kvantificerede tjærestoffer kan mængden af tjære være op til 300% højere) men en karakterisering af tjæren der dels indikere niveauet for den totale mængde af tjære og dels ud fra mængdefordelingen giver et billede af hvordan forgasseren kører og hvor der kan optimeres. Metoden er særdeles robust, repeterbar og pålidelig.

Tabel 1 Tjærestoffer der anvendes i analysemetoden til karakterisering tjæresammensætningen.

Tjærekomponenter	Formel	Kogepunkt [°C]	
Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -OH	182	primær/sekundær
Naphtalen	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	218	sekundær/tertiær
Phenantren	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	340	tertiær
Anthracen	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	340	tertiær
Flouranthen	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	375	tertiær
Pyren	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	393	tertiær

Nedenstående Tabel 2 viser resultaterne af målingerne og Figur 1 illustrer sammen fordelingen af tjærestofferne. Resultaterne viser et forholdsvis højt indhold af naphthalene og phenanthrene hvilket indikerer at omsætningen af tjære i koksbeden er lav, dette kan skyldes følgende:

- At koksbed-højden er for lille og derned er gassens opholdstid i beden lav.
- At gas kan bypassse beden.

<sup>1</sup> Fjellrup, J., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U., Gøbel, B. "Formation, Decomposition and Cracking of Biomass Tars in Gasification" MEK-ET-2005-05, ISBN nr: 87-7475-326-6.

- At bed-temperaturen er for lav og omsætningen tertiær tjære derved nedsættes.

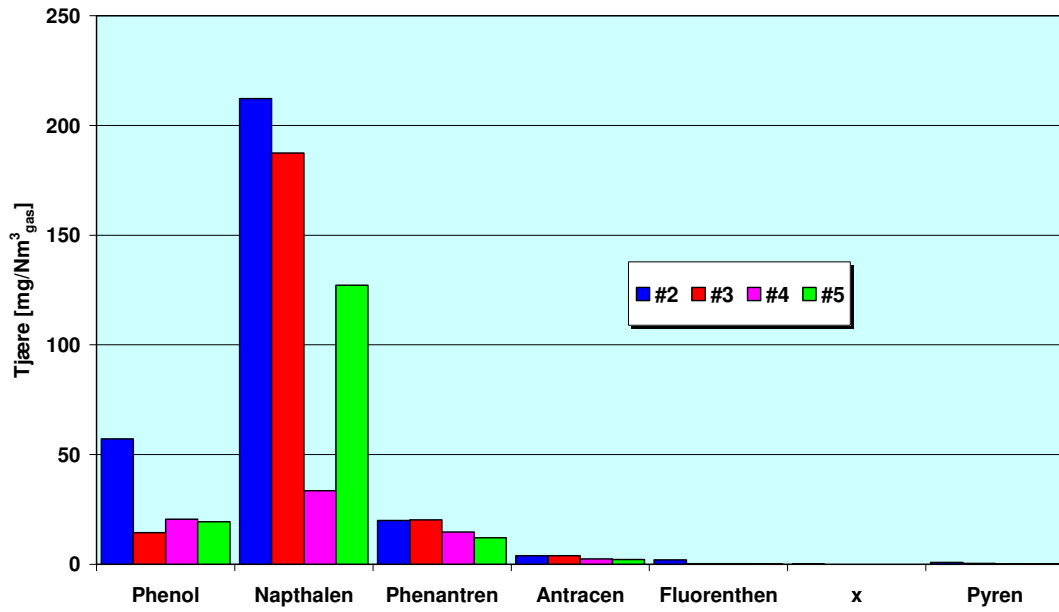
Indholdet af phenol er ligeledes forholdsmæssigt højt. Dette kan skyldes følgende:

- Ufuldstændig pyrolyse af flisen før den partielle oxidation, dette bevirker at flisen færdigpyrolyser på beden derved kommer de frigivende primære tjærestoffer ikke igennem oxidationszonen hvor den primære tjæredstruktion finder sted.
- Pyrolysegas bypasserer oxidationszonen igennem revner og utætheder i murværket og derved kommer primære tjærestoffer ikke igennem oxidationszonen.
- For lav oxidationstemperatur nedsætter omsætningen af primære tjærestoffer i oxidationszonen.

**Tabel 2 Resultat af tjæremåling med Petersen-kolonne og efterfølgende GC/MS analyse.**

Dato	12/12-06	12/12-06	13/12-06	13/12-06
Tid	11:52- 13:52	15:18- 17:18	9:52- 11:52	13:05- 15:08
Sampel volumen [L]	335	240	381	406
Sampel #	2	3	4	5
Phenol [mg/Nm <sup>3</sup> ]	57.1	14.4	20.6	19.5
Napthalen [mg/Nm <sup>3</sup> ]	212.3	187.4	33.5	127.2
Phenantren [mg/Nm <sup>3</sup> ]	19.9	20.3	14.7	12.0
Antracen [mg/Nm <sup>3</sup> ]	3.9	3.8	2.4	2.2
Fluorenten [mg/Nm <sup>3</sup> ]	2.1	0.3	0.3	0.2
Pyren [mg/Nm <sup>3</sup> ]	0.8	0.4	0.1	0.1
Tjære dugpunkt [°C] <sup>1</sup>	66.7	63.5	58.8	57.7

<sup>1</sup> Ifølge beregning med ECN tar dewpoint site <http://www.thersites.nl/completemodel.aspx>



Figur 1 Tjæresammensætningen for de fire prøver.

Appendiks, tjæremålingsmetode:

### Stable isotope dilution analysis of tar compounds

The tar compounds were determined using Petersen column sampling (see below) followed by stable isotope dilution analysis. Compounds appropriately labelled with stable isotopes are the ideal internal standard. This is due to virtually identical chemical properties and the fact that the mass spectrometric fragmentation runs in complete parallel. Thus, the analytical strategy based on isotope dilution is not sensitive to recovery on the assumption that isotopic equilibrium has been obtained. The strategy is outlined in Figure 1 and Figure 2.

Many tar compounds are available labelled with deuterium or alternatively  $^{13}\text{C}$ . As the first step an appropriate amount of the labelled compound is added to the sample. The amount of internal standard is chosen with respect to the desired carrier effect, which improve chromatography, and the ratio between the analyte and spike required for satisfactory analyses.

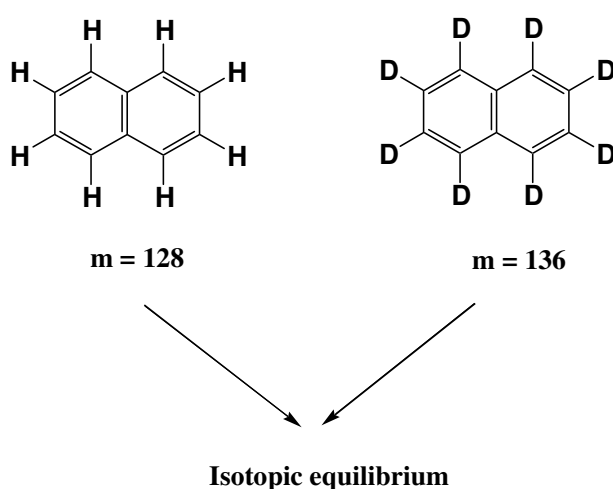


Figure 1 Stable isotope dilution illustrated by the analysis of naphthalene.

Determination of naphthalene illustrates this nicely. D<sub>8</sub>-naphthalene is readily available and  $\mu\text{g}$ -sized spike is added to the sample, cf. Figure 1. The determination of naphthalene is facilitated by intense molecular ions, i.e.  $m/z$  128 (analyte) and  $m/z$  136 (D<sub>8</sub>-naphthalene, spike), cf. Figure 2

### Isotopic equilibrium

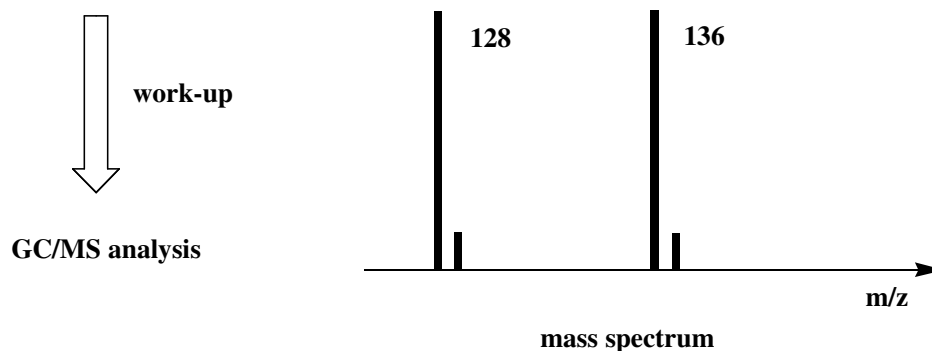


Figure 2 Work-up and stable isotope dilution illustrated by the analysis of naphthalene.

### GC/MS analysis

GC/MS analysis was performed on a Varian 3400 gas chromatograph interfaced to a Saturn II ion trap mass spectrometer. The temperature of the transfer line (GC to MS) and the manifold of the mass spectrometer was 250 °C and 200 °C, respectively.

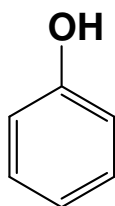
The tar compounds were separated using a 0.32 mm x 25m WCOT fused silica column coated with CP-SIL 8CB at a thickness of 0.25 µm. 1 µL samples were introduced in split mode (approximately 1:50) at a temperature of 250 °C. Separation of a wide range of compounds was achieved using a temperature program from 50 °C to 270 °C.

### Quantitative analysis

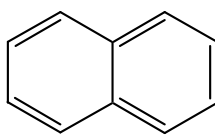
A series of tar compounds were quantified using stable isotope dilution. The ions monitored are given in Table 1 and molecular structures in Scheme 9.

**Table 1** Ions (m/z) used for quantisation of tar compounds

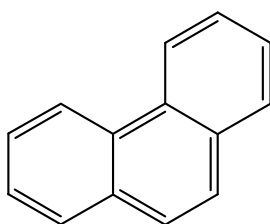
Compound	Phenol	Naphthalene	Phenanthrene, anthracene	Fluoranthene, pyrene
Analyte	94	128	178	202
Spike	99	136	188	212



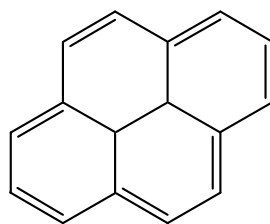
**phenol, M = 94**



**naphthalene, M = 128**



**phenanthrene, M = 178**



**pyrene, M = 202**

**Scheme 9** Representative tar compounds

### Petersen column<sup>1</sup>

DTI has developed a sampling equipment called the "Petersen column" after the inventor Finn Petersen. The "Petersen column" consists of two washing

<sup>1</sup> *Sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases*

Technical Report Prepared under CEN BT/TF 143 "Organic contaminants ("tar") in biomass producer gases"

<http://www.gasnet.uk.net/index.php?name=VGFyIG11YXN1cmVtZW50IFN0YW5kYXJk&open=VGFyIG11YXN1cmVtZW50IFN0YW5kYXJk>

stages filled with isopropanol. Stage 1 is a traditional washing stage with an impinger. The bottom of stage 2 consists of a G3 glass frit with two functions: a) it retains tar droplets (aerosol) and b) it generates a large number of very small gas bubbles in washing stage 2 which results in an improved washing efficiency. The two washing stages are filled with the washing medium (solvent, isopropanol) through two nozzles. During normal pressure (atmospheric pressure), the solvent is kept back in stage 2 by the glass frit, as the liquid runs very slowly through the frit. If there is a little vacuum in washing stage 2, no liquid runs through the frit. Figure 2-5 shows the "Petersen column". A more detailed description plus the requirements for the essential dimensions are given in the Technical Specification. The "Petersen column" is jacket cooled. The cooling fluid and cooling temperature can be selected as required e.g. in relation to the gas temperature. The column is constructed in such a way so it is easy to replace the glass frit if it is polluted by particles that cannot immediately be rinsed out with solvent. When sampling has ended, the tube which is connected to the vacuum pump is moved to the connecting stub at the drain cock at the bottom of the "Petersen column". By creating a little vacuum in washing stage 1, the solvent is sucked from washing stage 2 through the frit. That results in washing stage 2 being emptied at the same time as the frit is cleaned by the solvent. Solvent from both washing stages is collected in a storage bottle which is kept sealed against the cone of the drain cock.

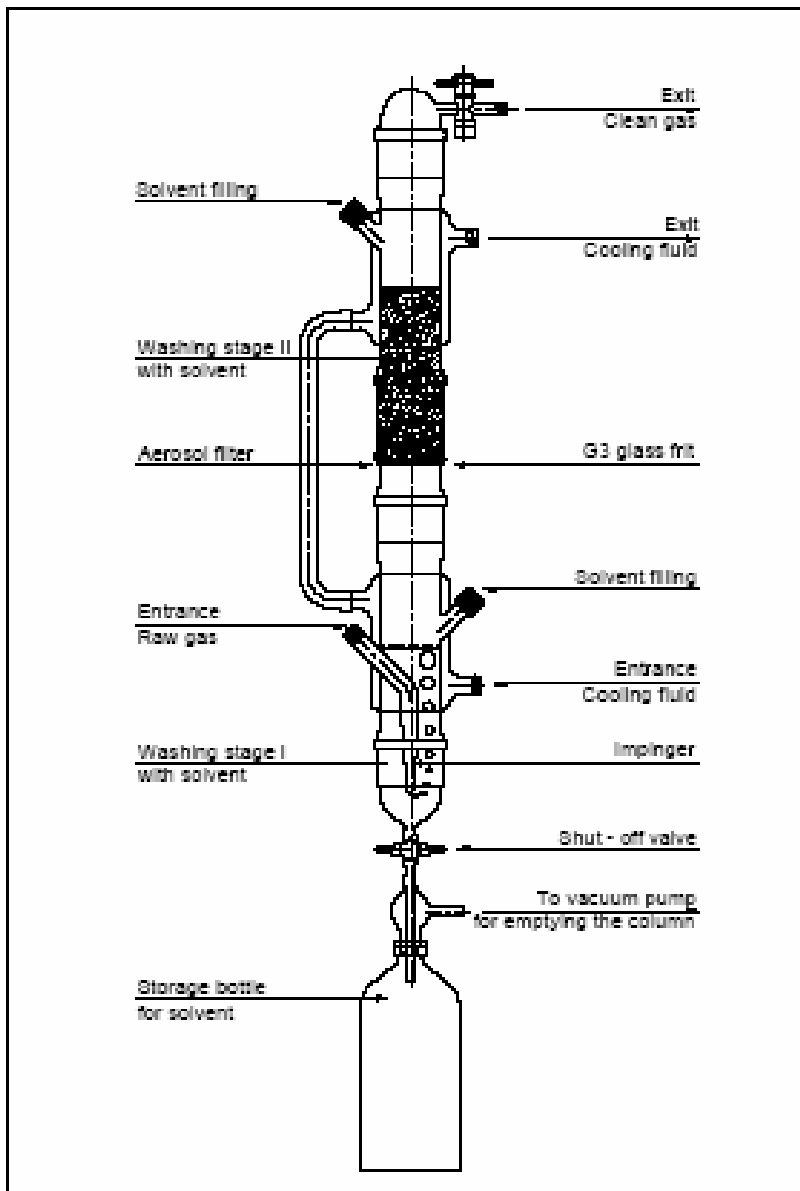


Figure 3 The Petersen Column