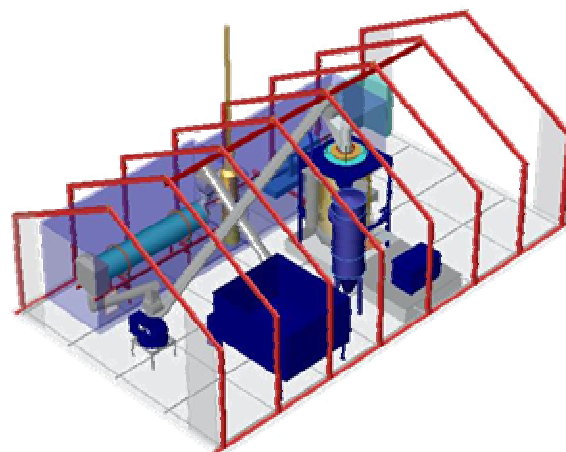


# Reguleringsegenskaber for trinopdelte forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion (Castoranlægget i Græsted)

## Projekt resumé

Udført for:  
Energinet.dk  
PSO projekt nr. 5288

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



## **Indhold- Resumé rapport**

1. Udgangspunktet .....	3
2. Modelling af kraftvarmesystemet med trinopdelt forgasser .....	4
3. Ombygning til dellastdrift .....	4
4. Start/stop procedurer .....	4
5. Driftsmåliger på anlægget .....	5
5.1. Produktgassens sammensætning .....	7
5.2. Energimålinger .....	8
5.3. Emission fra skorsten .....	9

## 1. Udgangspunktet

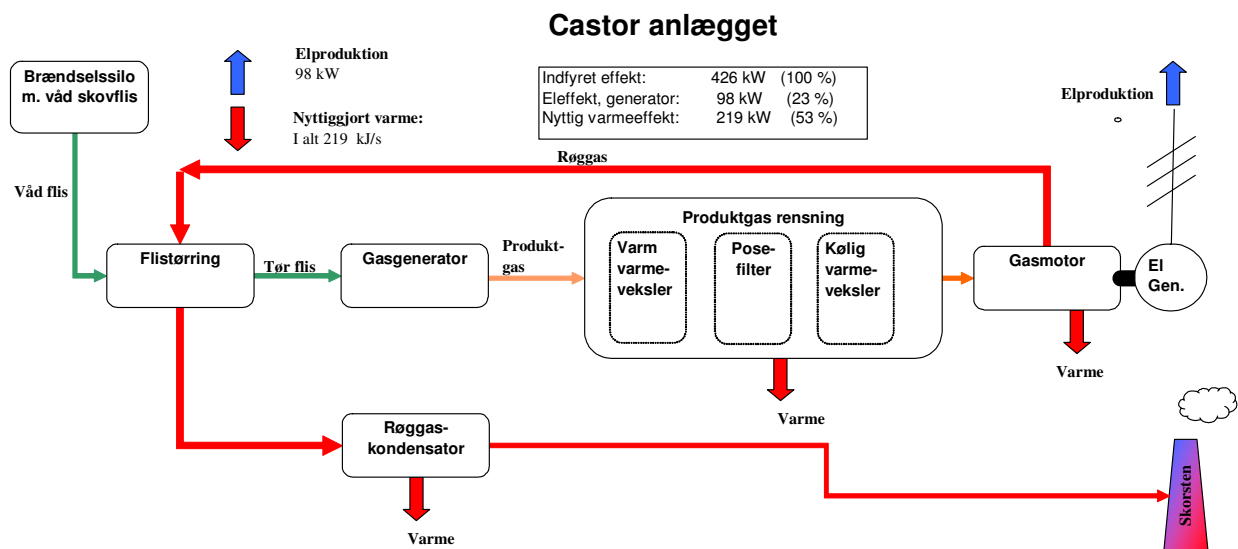
Hensigten med det her udførte projekt har været at få øget indsigt og opnå praktiske erfaringerne med reguleringsegenskaberne for biomassefyrede trinopdelte forgasningsanlæg til kraftvarmeproduktion.

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.

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*, som modtog støtte fra Energistyrelsens UVE program. Det samlede kraftvarmesystem inkluderer et kontinuerligt arbejdende tørreanlæg med energigenvinding og anvender frisk brændselsflis fra skovbruget som brændsel.



**Figur 1:** Hovedprocesserne i Castor anlægget

## 2. Modellering af kraftvarmesystemet med trinopdelt forgasser

Til understøtning af projektets praktiske aktiviteter har DTU udviklet en computermodel til simulering af BioSynergi Proces' 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 er opstillet energibevarelse og massebevarelse. Den overordnede kobling af de enkelte moduler udgør det samlede forgasseranlæg.

Beregningsresultaterne fra den udviklede model er blevet sammenlignet med dataregistreringerne fra de driftsmålinger på Castoranlægget, som blev udført d. 7. marts 2007 (se afsnit 5). Sammenligningen viste generelt at der var god overensstemmelse mellem modelberegningerne og de registrerede værdier fra målingen.

## 3. Ombygning til dellastdrift

En af aktiviteterne har været at modificere Castoranlæggets opbygning og styringssystem så det kan fungere tilfredsstillende ved både dellast ydelse og fuldlast ydelse.

Ombygningerne omfattede primært:

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
  - Tilpasning af karbureringssystemet til dellastdrift
2. Varmevekslere til produktgas:
  - Temperaturstyret bypass spjæld på varmevekslerne
  - Temperaturstyrede vandkredse i to varmevekslere

*De udførte ombygninger af anlægget er efterfølgende blevet afprøvet gennem længere tids drift og fungerer tilfredsstillende. 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.

## 4. Start/stop procedurer

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

Analysen af start/stop proceduren for det samlede anlæg indkredsede at der var størst behov for at arbejde med forbedring af metoden til start af selve gasgeneratoren. Det område stod tilbage som både det mest tidskrævende og fysisk krævende del af opstarten.

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 afprøvningserne 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.

## **5. Driftsmålinger på anlægget**

Afprøvningserne blev afsluttet med et måleprogram, der dokumenterer anlæggets egenskaber under forskellige driftsvilkår. Det blev udført over tre måledage, d. 12-13. december 2006 og d. 7.marts 2007.

Måleprogrammet bestod af samtidige målinger af :

- produktgassens sammensætning,
- anlæggets energiproduktion samt
- emission til omgivelserne via skorstenen. (kun d. 12-13. december)

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)

På grundlag af målingerne er opnået indsigt i anlæggets el- og varmenytttevirkning samt identificeret de energitab som forekommer.

Hovedresultaterne er gengivet i de følgende afsnit.

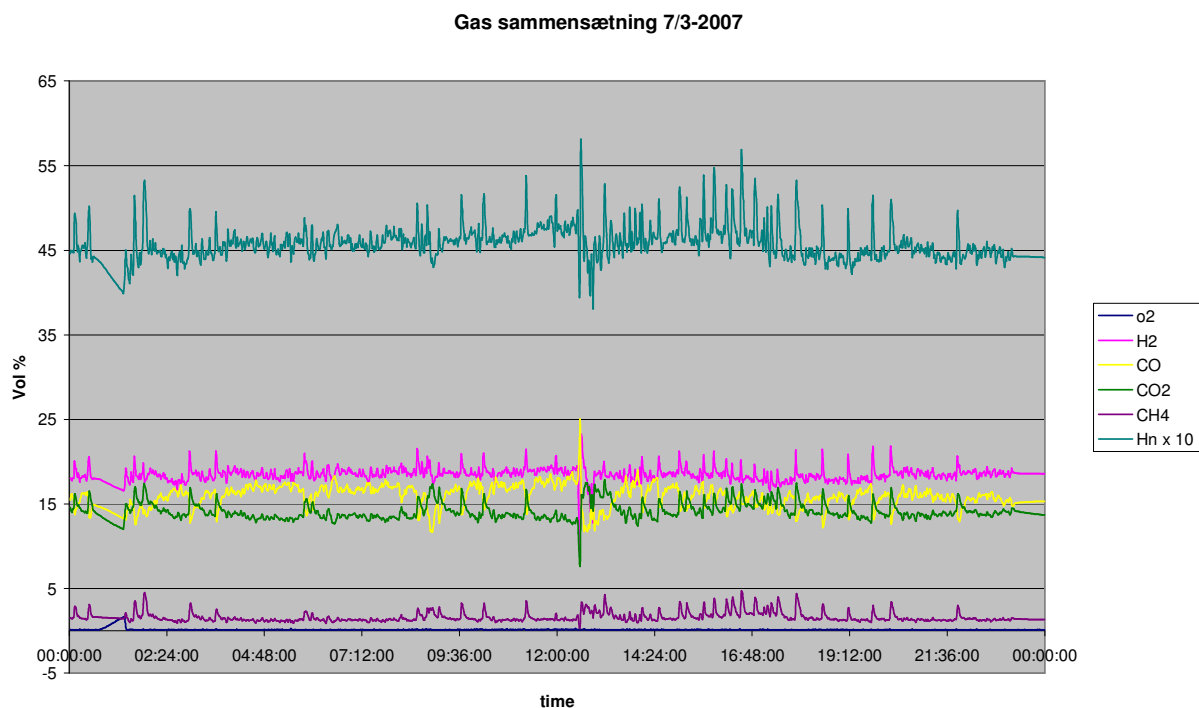
Blandt resultaterne af driftsmålingerne skal fremhæves:

- 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. Driftsmålingerne 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  $\text{NO}_x$  var alle de målte emissioner godt under de gældende grænseværdier.  $\text{NO}_x$  var ca. 20 % over grænseværdien, men det forventes, at en forbedring af motorens tændingssystem kan mindske  $\text{NO}_x$  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 naphthalen, phenanthren og phenol. Heraf var naphthalen 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 pyrolysezone, var tilstoppede. Tilstopningen kan skyldes at målingerne blev gennemført uden forgasningsluftblæser og dermed uden en tvungen luftstrøm gennem kanalerne.

## 5.1. Produktgassens sammensætning

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> (MJ/m <sup>3</sup> (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	17:00
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 2:** Gennemsnit af produktgassens sammensætning og brændværdi (nedre) over udvalgte stabile perioder for hvert af de tre forsøg.



**Figur 3:** Gassammensætning og beregnet nedre brændværdi, MJ/m<sup>3</sup> (n,t) af gassen for forsøget den 7/3 2007.

## 5.2. Energimålinger

Den nedenstående tabel er gengivet resultaterne fra en af måledagene, d. 7. marts 2007.

Måling d. 7/3 2007		Prøve med 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 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>	
Aske			
Målt askemængde	kg	197	
Vandindhold i aske	% våd basis	79,5	
Bortglødeligt i aske	%	88	
Beregnet energitab med bortglødeligt	kWh	189	
Energitalab med bortglødeligt i asken	%	8	
Produktgas			
Produktgasflow, middel	m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /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> <sub>n</sub> /h: normal kubikmeter pr. time			



### Vedrørende 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.

### **5.3. Emission fra skorsten**

Den nedenstående tabel fremhæver hovedresultaterne. Emissionsmålingerne er foretaget på motorens udstødningsgas. Målepunktet er placeret i røgrøret efter anlæggets røggaskondensator.

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 margin under de gældende grænseværdier for forgasningsanlæg. 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. Den lave værdi er opnået selv om udstødningsgassen anvendes til trætørring, hvorfra der sker en vis medrivning af tørre træpartikler.

o-----o