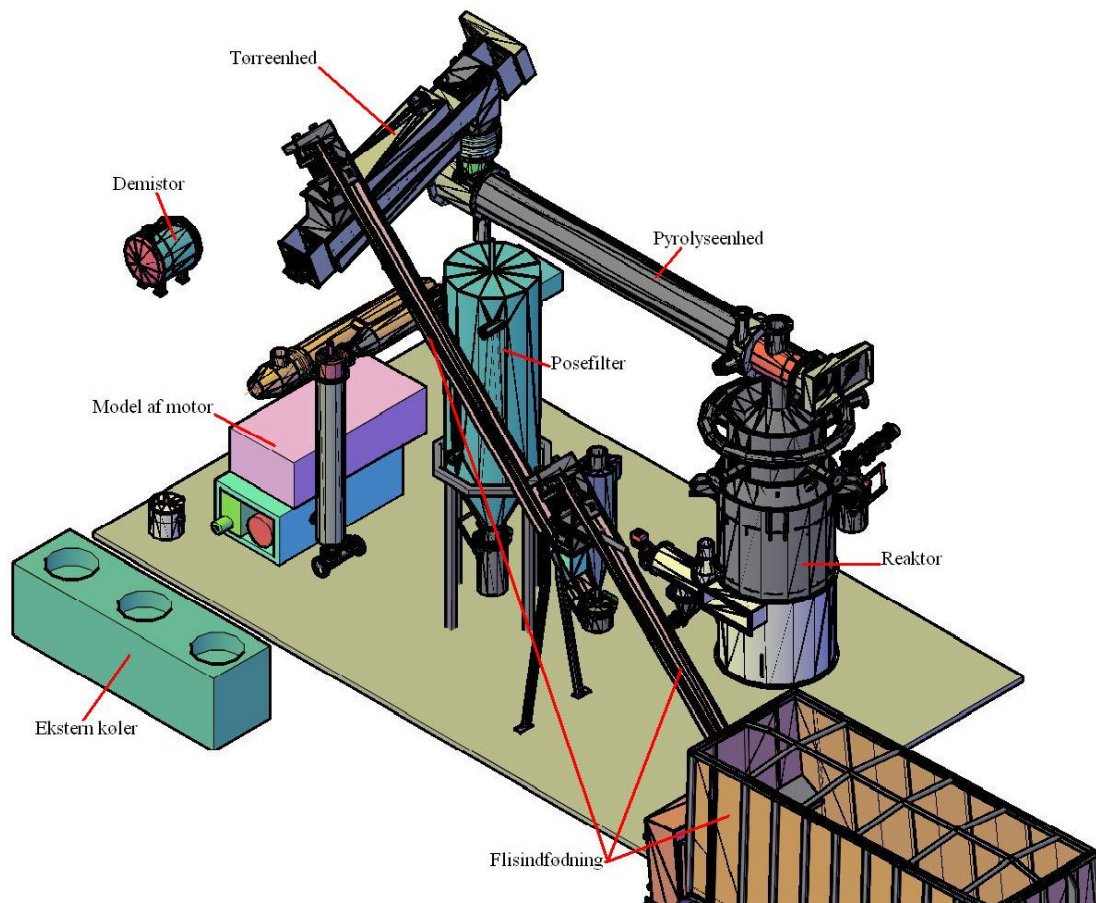


Energinet dk

# Opskalering og demonstration af tottrinsprocessen

Slutrapport

December 2007



# WEISS

WEISS  
Plastvænget 13  
9560 Hadsund

Telefon 9652 0444  
Telefax 9652 0445  
[www.weiss-as.dk](http://www.weiss-as.dk)

Energinet dk

## **Opskalering og demonstration af totrinsprocessen**

Slutrapport

December 2007

Udgivelsesdato 31. december 2007

Udarbejdet JDB,  
Kontrolleret TS, UBH  
Godkendt BJS

## Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Dimensionering af pilotanlæg</b>	<b>4</b>
2.1	Opskalerbart koncept for totrinsforgasning	4
<b>3</b>	<b>Tørrer</b>	<b>8</b>
3.2	Eksisterende damptørrere	9
<b>4</b>	<b>Pyrolyse</b>	<b>12</b>
4.1	Pyrolysehastighed	12
4.2	Vigtige parametre ved design af pyrolysereaktor	13
4.3	Udformning af pyrolysereaktor	15
<b>5</b>	<b>Forgasning</b>	<b>16</b>
5.1	Design af forgasningsreaktor	16
5.2	Alternative reaktor design	18
<b>6</b>	<b>Gaskøling og gasrensning</b>	<b>19</b>
6.1	Gaskøling og rensning på VIKING	19
<b>7</b>	<b>Det samlede anlæg</b>	<b>23</b>
7.1	Disponering af anlæg	23
7.2	Sikkerhedsanalyse (HAZOP)	24
<b>8</b>	<b>Etablering af pilotanlæg</b>	<b>25</b>
8.1	August 2007	26
8.2	September 2007	28
8.3	November 2007	29

## 1 Indledning

På DTU-MEK er der gennem en årrække arbejdet med udvikling af en proces til forgasning af biomasse. Processen kaldes totrinsprocessen, idet den er karakteriseret ved, at pyrolyse og forgasning foregår i 2 adskilte procestrin.

Totrinsprocessen er dokumenteret i lille skala og har vist meget positive resultater med hensyn til at kunne producere en brændbar gas, der på grund af et meget lavt indhold af tjærestoffer og partikler er velegnet til drift af gasmotorer til el- og varmeproduktion med lav miljøbelastning. Totrinsprocessen udmærker sig endvidere ved at have en meget høj virkningsgrad.

I totrinsprocessens oprindelige udformning foregår tørrings- og pyrolyseprocessen ved ekstern opvarmning i en snegl, som opvarmes af røggasser fra en tilknyttet gasmotor. Denne udformning har begrænsninger ved anlæg i stor skala.

Et nyt koncept for totrinsforgasning, hvor varmen til pyrolyseprocessen tilføres fra forgasningsreaktoren, og hvor flisen først tørres i overheded damp, er udviklet.

Konceptet sammenkæder de forgasningsmæssige fordele ved den traditionelle totrinsproces (vanddampforgasning og trinopdeling), med opskalerbart design.

WEISS A/S har udvist interesse for totrinsforgasning, idet firmaet ønsker at udvikle og markedsføre anlæg til kraftvarmeproduktion baseret på træflis.

I dette projekt er der designet og udviklet nye reaktorer og koblinger til totrinsprocessen. Endvidere er samlet anlæg blevet etableret hos WEISS A/S. Anlægget har en nominal kapacitet på 600kW indfyret effekt.

Projektet har været støttet af Energinet.dk under projekt nr. 6529. Dette projekt dækker også den indledende idriftsættelse af anlægget.

I et efterfølgende projekt nr. 6325 indkøres anlægget, og det demonstreres, at anlægget kan køre ubemandet og stabilt gennem langtidsdrift. Da aktiviteterne i projekterne nr. 6529 og 6325 er stærkt overlappende er valgt, at samtlige driftsaktiviteter beskrives i senere rapport dækkende projekt nr. 6325.

Nærværende rapport beskriver de overvejelser, der været gjort omkring design af nye reaktorer og koblinger til tottrinsprocessen. Herudover beskrives det samlede anlæg.

## 2 Dimensionering af pilotanlæg

Det eksisterende design af VIKING-forgasseren er blevet gennemgået. Komponent for komponent er opskalerbarheden af det eksisterende design blevet vurderet.

Fokus har været omkring:

- Tørre enhed
- Pyrolyseenhed
- Forgasningsreaktor
- Gaskøling og gasrensning.

Øvrige komponenter er standardkomponenter, som kan fås til rigeligt store kapaciteter.

COWI og DTU har været ansvarlige for overordnet dimensionering af komponenterne og instrumenterings-specifikationer, mens WEISS har været ansvarlig for maskintegninger.

### 2.1 Opskalerbart koncept for tottrinsforgasning

#### 2.1.1 Kompakt tørrer

I den velkendte udformning af tottrinsprocessen foregår såvel tørring som pyrolyse i samme reaktor (pyrolyse-reaktoren) ved ekstern opvarmning. Ved forgasning af flis, som har et fugtindhold på 40-55%, vil omkring 80% af energien i pyrolyseenheden blive benyttet til tørring. Tørretiden kan reduceres væsentligt, såfremt flisen kommer i direkte kontakt med tørremidiet, og herved kan størrelsen af tørrereaktoren reduceres væsentligt.

Til tørring af flis benyttes almindeligvis røggas til direkte tørring, men som alternativ kan overhedet damp benyttes. Ved tørring med overhedet damp overføres varme fra en varmekilde, f.eks. røggas eller forgassergas, til damp via en varmeveksler, og herefter ledes damp til tørrereaktoren.

Ved tørring med overhedet damp i forbindelse med trinopdelt forgasning opnås en række fordele, hvor de væsentligste nævnes herunder:

- Røggasserne bliver ikke forurenede med organiske stoffer og partikler.
- Der er ingen risiko for brand i tørreenheden på grund af lave temperaturer og lav iltkoncentration, idet tørremidiet er overhedet vanddamp.
- Optimale forgasningsbetingelser opnås ved tilsætning af vanddamp til forgasseren.
- Lavere sodproduktion og lavere maksimal temperatur ved tilsætning af vanddamp.

### 2.1.2 Høj el- og total virkningsgrad

Totrinsprocessen er også kendetegnet ved at have en høj el- og totalvirkningsgrad (bl.a. eftervist ved VIKING forgasseren).

En høj total-virkningsgrad kan opnås blandt andet ved at udnytte energien i røggassen fra motoren til fjernvarme. Eftersom pilotanlægget ikke er tilsluttet fjernvarmen, og da dette er helt kendt, er røggas til fjernvarme udeladt i dette projekt.

En høj elvirkningsgrad opnås ved kombinationen af en høj koldgasvirkningsgrad på forgasseren og en høj el-virkningsgrad på motoren.

Projektet har fokuseret på, at der demonstreres en høj koldgasvirkningsgrad på forgasseren. En motor med høj elvirkningsgrad kan købes med kommercielle garantier, så en sådan demonstration er ikke afgørende i nærværende projekt.

Der er indkøbt en motor, som i starten kører uden turbolader, idet dette er det sikre valg. Motoren er forberedt for at kunne eftermontere en turbolader.

Når anlægget er indkørt, er det muligt at eftermontere en turbolader på motoren, så anlægget kommer op i fuld kapacitet på ca. 200kWe. Uden turbolader vil motoren yde omkring 130 kWe.

Herunder ses et skematisk layout med tilhørende temperaturer og energibalance, som anlægget forventes at få i indkøringsforløbet.

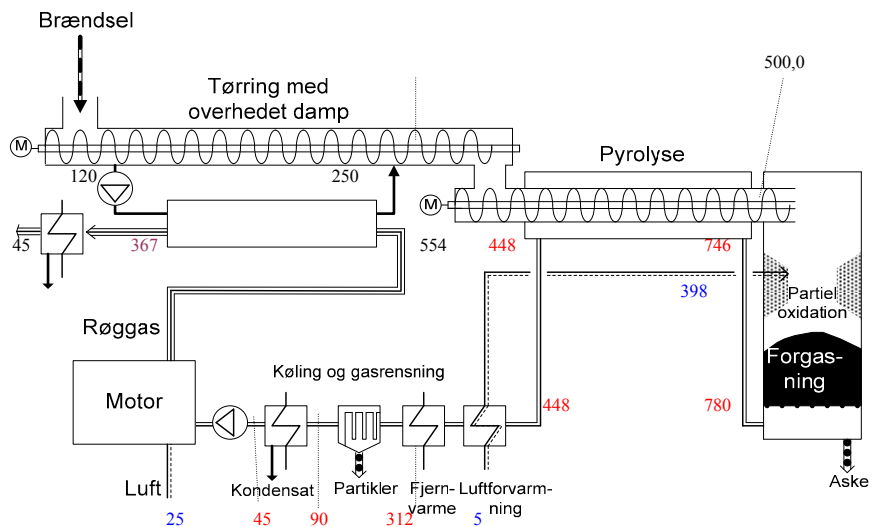
**Energiproduktion**

<b>Fjernvarme</b>		
køling og kondensering af rågas	59 kW	14,3%
motor køling	98 kW	23,9%
køling og kondensering af røggas		
<b>Total fjernvarmeproduktion</b>	<b>157 kW</b>	<b>38,2%</b>
<b>Elproduktion</b>	<b>129 kW</b>	<b>31,5%</b>
<b>Total energiproduktion</b>	<b>286</b>	<b>69,7%</b>

**Varmetab**

Forgasser	33 kW	8,0%
Motor	8 kW	1,9%
<b>Total tab</b>	<b>27 kW</b>	<b>4,5%</b>

Indfyret brændselsmængde	160 kg/t
Fugtindhold	45,0%
Effekt (Hn)	411 KW

**Gassamsetninger**

	Rågas	Efter kondensering	Røggas	Efter kondensering
CO <sub>2</sub>	13,0%	15,2%	11,9%	12,8%
CO	12,2%	14,3%		
H <sub>2</sub> O	22,2%	9,2%	15,1%	9,2%
H <sub>2</sub>	23,1%	27,0%		
CH <sub>4</sub>	1,3%	1,6%		
N <sub>2</sub>	28,0%	32,7%	67,5%	72,2%
O <sub>2</sub>	0,0%		5,5%	5,9%
Dugtemp	63	45	55	45

**Motordata**

Lambda i motor		1,6
----------------	--	-----

Koldgasvirkningsgrad	nedre brændværdi	Øvre brændværdi		
		95%	89%	

øvre brændværdi	MJ/Nm <sup>3</sup>	5,9	våd	tør
nedrebrændværdi	MJ/Nm <sup>3</sup>	5,3	5,8	

Figur 2.1 Forventede data for pilotanlæg med motor uden turbolader. Den viste røggaskøler er ikke implementeret i pilotanlægget som angivet i diagrammet.



## 200kWe Tottrins pilot forgasser

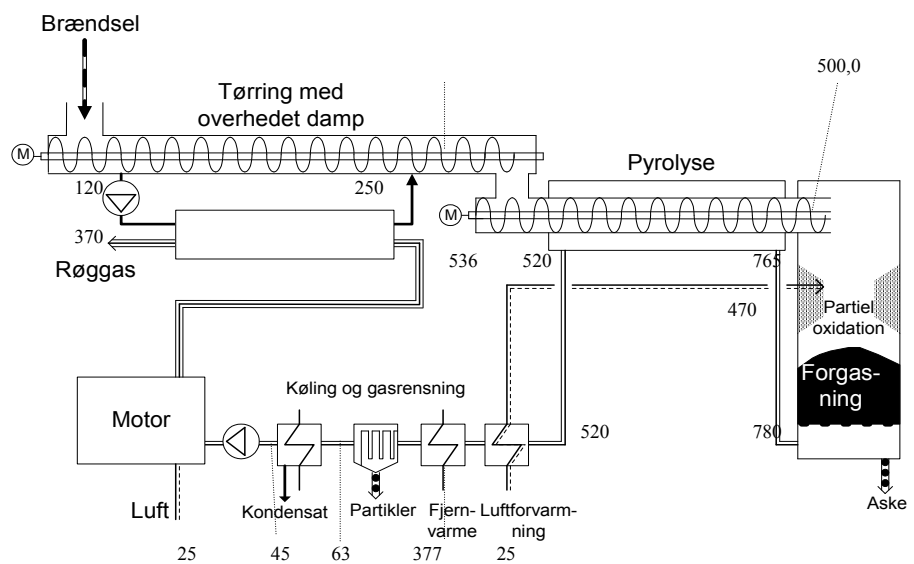
**Energiproduktion**

<b>Fjernvarme</b>		
køling af rågas	58 kW	9,8%
kondensering af rågas	31 kW	5,3%
motor køling	145 kW	24,6%
køling af røggas	131 kW	22,2%
kondensering af røggas	34 kW	5,7%
<b>Total fjernvarmeproduktion</b>	<b>399 kW</b>	<b>67,6%</b>
<b>Elproduktion</b>	<b>209 kW</b>	<b>35,4%</b>
<b>Total energiproduktion</b>	<b>608</b>	<b>103,0%</b>

**Varmetab**

Forgasser	15,0 kW	2,5%
Motor	11,6 kW	2,0%
<b>Total tab</b>	<b>26,6 kW</b>	<b>4,5%</b>

Indfjret brændselsmængde	230 kg/t
Fugtindhold	45,0%
Effekt (Hn)	591 KW

**Gassamensætninger**

	Rågas	Efter kondensering	Røggas	Efter kondensering
CO <sub>2</sub>	12,9%	15,0%	11,8%	12,7%
CO	12,9%	15,0%		
H <sub>2</sub> O	22,0%	9,2%	15,2%	9,2%
H <sub>2</sub>	24,4%	28,4%		
CH <sub>4</sub>	1,4%	1,6%		
N <sub>2</sub>	26,5%	30,8%	67,4%	72,2%
O <sub>2</sub>			5,6%	6,0%
Dugtemp	63	45	55	45

Koldgasvirkningsgrad	nedre brændværdi	Øvre brændværdi
	98%	92%

**Motordata**

Lambda i motor		1,6
øvre brændværdi	MJ/Nm <sup>3</sup>	6,1
nedrebrændværdi	MJ/Nm <sup>3</sup>	5,5

Figur 2.2 Forventede data for pilot anlæg med motor med turbolader.

### 3 Tørrer

For at have en optimal tørreproces til tottrinsforgasseren skal en række faktorer opfyldes på en og samme gang.

De forudsætninger og grundlæggende tørreprincipper, der har ligget til grund for tørre-designet, er listet herunder:

#### 3.1.1 Forudsætninger

- Tørre flis fra 45% (op til 55%) til ca. 10% fugt.
- Røggas som tørremiddel ca. 450-550°C ved indløb.
- Tørring med damp, således at produceret damp ledes til pyrolyseenhed.
- Opskalerbart design.

#### 3.1.2 Grundlæggende tørreprincipper

- Temperatur  
Tørretid afhænger meget af temperaturen. Ofte er afgang af organiske syrer grunden til, at tørretemperatur holdes nede (under 150°C), men da dampen benyttes videre i processen, er grænsen for tørretemperaturen i stedet dannelse af klæbrige pyrolysegasser, hvilket først sker ved temperaturer over 250°C.
- Konvektion og stråling  
Såvel konvektion (turbulens) som stråling kan benyttes som tørreprincip. Tørring af flis sker mest effektivt, når fugt fra overfladen bringes væk, hvilket konvektion bidrager til, mens energioverførsel sker effektivt ved såvel stråling som konvektion.  
Stråling kan forekomme i to former: a. Stråling fra overflade af varmekilde og b. gas-stråling fra tørremidlet (damp<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup> Litteraturen for tørring i damp beskriver, at gasstråling bliver betydelig ved temperaturer over ca. 180°C.

## 3.2 Eksisterende damptørretere

Flere danske virksomheder har udviklet damptørreteknologier eller er i gang med dette.

I projektets første fase blev der lavet en undersøgelse af de eksisterende damptørreteknologier, der potentielt kunne være egnede. Undersøgelsen fandt frem til tre potentielle danske leverandører af damptørretere. Det blev herefter afholdt møder med disse virksomheder med henblik på at kunne købe en tørrer eller lave et samarbejde omkring flistørring til tottrinsprocessen.

Disse virksomheder var:

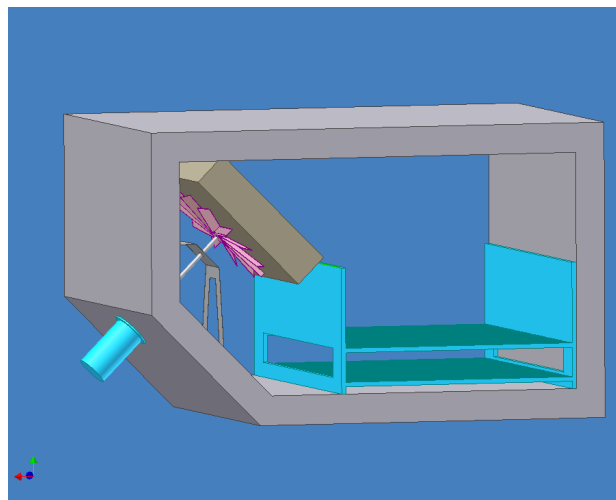
- Cimbria (båndtørreter)
- Atlas-Stord (tromletørreter og kontakttørreter)
- Enerdry (fluid bed).

I det følgende afsnit beskrives kort de tre danske leverandørers tørreteknologier, der potentielt kan være anvendelige til tottrinsprocessen.

### 3.2.1 Cimbria

Cimbria ([www.cimbria.com](http://www.cimbria.com)) har udviklet en damptørreter til flis. Princippet minder meget om Heat-Win tørreteren, der er udviklet til keramik. Flis doseres på et bånd/lameller i et lag på ca. 20-30 cm.

Tørredampen varmes op til 150°C, hvorefter den ledes gennem flislaget oppefra og ned, hvilket sikrer, at små stykker ikke blæses op i tørreteren. Varmekilden er damp (ca. 4 bar 150°C). Anlægget fylder ca. 2\*2 m og har en kapacitet på ca. 200kg damp/time (ved nuværende temperatursæt, som dog kan sættes op).



*Figur 3.1 Skematisk tegning af Cimbrias damptørreter. Den lille propel driver dampen rundt (med uret). Dampen genoverhedes i varmeveksleren (grå kasse) og strømmer ned gennem båndet (blåt vandret lag).*

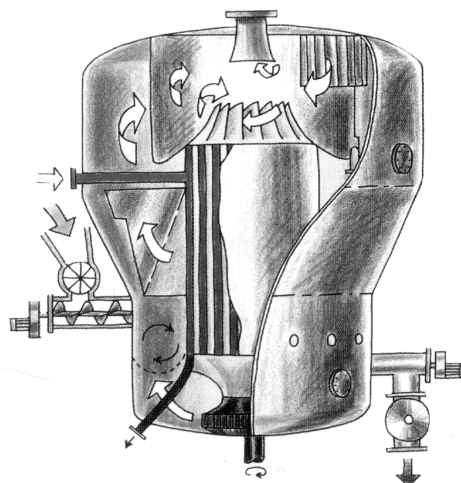
### 3.2.2 Enerdry

Enerdry er et firma med speciale i store tryksatte fluid-bed damptørre. Kapaciteten af tørreenheden afhænger af størrelsen og temperaturniveauerne i enheden og varierer fra 5 - 50 tons vand fordampet i timen (svarer til 20-200MW).

I Enerdry's tørre føres tørregodset ind forneden, og det bevæges rundt i tørre for så at blive udmadet tørt efter en tur rundt. De store partikler bevæges langsomt rundt i bunden. Mellemstore stykker strømmer op og ledes rundt af preplader. Mindre stykker og støv fanges i en cyklon i toppen og strømmer ud med det øvrige tørrede gods.

I centeret af tørre er en varmeveksler, hvor udtagsdamp fra en dampkreds kondenserer, mens den overheder tørredampen.

Tørretiden for flis er ca. 5 minutter. Temperatur i tørre er ca. 200°C.



Figur 3.2 Skitse af Enerdry's damptørre.

### 3.2.3 Atlas-Stord

Atlas-Stord er en stor kendt international leverandør af tørresystemer. Atlas kan levere tørre på kommerciel basis. 2 varianter kan være potentielle til totrinsprocessen:

- Skivetørre
- Dyne-Jet tørre.

#### Skivetørre

Skivetørre fungerer som kontakttørre: Hed olie eller damp strømmer i tørrens aksel. Fra akslen overføres varme til skiver, som har kontakt til tørregodset.

Skivetørre er den mest kompakte tørre og giver en ren afdamp.

Ved brug i totrinsprocessen skal hed olie (eventuelt damp) genereres via røggas fra motoren.

#### **Dyne-Jet tørrer**

Dyne-Jet tørreren fungerer som en tromletørrer. Til forskel fra en tromletørrer roteres godset ved en roterende stator. Dette gør Dyne-Jetten meget mere tæt og derfor velegnet til damptørring.

I Dyne-Jet konceptet indgår to tørrere: En hurtigt roterende "flash" tørrer efterfulgt af en langsomt roterende "eftertørrer". Denne langsomtgående tørrer kan købes separat og benyttes som en ettrins tørrer.

#### **3.2.4 Konklusion på eksisterende tørreknologier**

Det kunne konkluderes, at der ikke findes en egnet tørrer, som opfylder de krav, der er til en tørrer til totrinsprocessen.

Det blev på den baggrund besluttet at udvikle eget design af tørrer. Dette design er vist på fig 2.1 og er baseret på en sneglekonstruktion hvor flisen under passagen tørres med overhedet damp.

## 4 Pyrolyse

Når biomasse opvarmes til temperaturer over 200°C, begynder flygtige bestanddele (tjærestoffer, vanddamp, kuldioxid og brændbare gasser) at evaporere. Denne pyrolyse fortsætter, indtil biomassen er opvarmet til omkring 800°C. Den væsentligste mængde pyrolysegas er frigivet omkring 500-600°C.

Jo højere en temperatur man kan pyrolysere biomassen til, før den tilføres forgasseren, jo højere koldgasvirkningsgrad opnås.

Koldgasvirkningsgraden stiger med ca. 1%, når pyrolyseprodukterne opvarmes yderligere ca. 75°C.

### 4.1 Pyrolysehastighed

Hastigheden for pyrolyseprocessen er afgørende for dimensioneringen af pyrolysereaktoren. DTU-MEK har gennem en række projekter undersøgt pyrolysehastigheden af såvel tørrede som fugtige flis og af flis i varierende størrelse

Til dimensionering af pyrolyseenheder, der anvender træflis, er de væsentligste konklusioner, at:

- Varme transporteres meget dårligt gennem et lag (en bunke) flis ved ledning. Det er således meget afgørende, at flis i en pyrolyseenhed enten opvarmes ved konvektion (f.eks. varm damp), stråling eller ved kontakt til en varm overflade.
- Temperaturen har stor effekt på pyrolysetiden. For tørret flis er pyrolysetiderne ca. 400°C ≈ 5 min., 600°C ≈ 2 min., 800°C ≈ 1 min. For fugtig flis (32%) er pyrolysetiderne ca. 400°C ≈ 10 min., 600°C ≈ 3 min., 800°C ≈ 2 min.
- Opvarmningsraten har ringe indflydelse på koksresten ved lave temperaturer. Ved højere temperaturer betyder større opvarmningsrate lidt mindre koksrest.
- Gasmængden bliver større, og tjæremængden bliver mindre ved højere temperaturer.

- Reaktiviteten af den dannede koks afhænger ikke af opvarmningsraten.
- Bedvirkning under pyrolysen medfører større koksrest.

Varmetransmission gennem et lag (en bunke) flis er også blevet undersøgt. Disse undersøgelser viser, at varme transporteres meget dårligt gennem flis.

## 4.2 Vigtige parametre ved design af pyrolysereaktor

Frembringning af materiale

Totrinsprocessen blev oprindeligt udviklet til halm. Snegle er velegnede til at transportere halm, og halm fordeler sig jævnt i en snegl, hvilket betød, at snegle blev brugt som udformning af pyrolyseenheder til halm.

Da erfaringerne med at pyrolysere halm i snegle var positive, blev snegle også valgt, da man i midten af 1990'erne begyndte at benytte træflis i totrinsprocessen.

Man kan forestille sig andre metoder til at frembringe flis i en varm reaktor, f.eks. hydraulisk indskubber, men de positive erfaringer med snegle har hidtil bibeholdt denne metode.

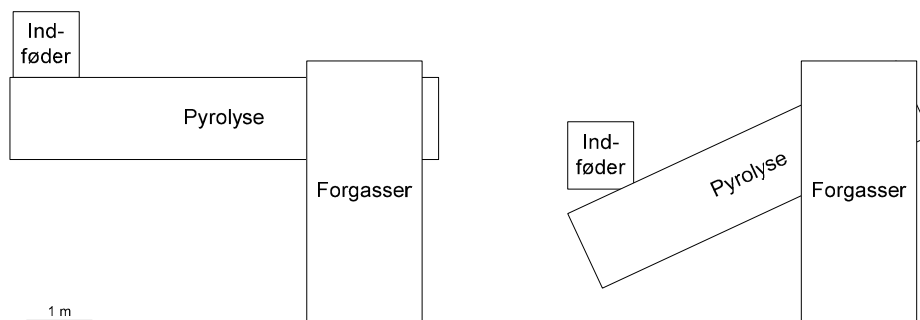
På den baggrund er der kun undersøgt løsninger baseret på brug af snegle.

Horisontal vs. skrå

Snegleakslen er lejret i begge ender, og akslen går således hen over forgasningsreaktoren. Sneglene har hidtil været horisontale. Dette er der positive erfaringer med, men der kan være fordele ved at skråtstille pyrolyserøret:

- Reduktion af højde af indfødnings til pyrolyse, som ellers udgør højeste punkt i forgasningsanlægget og dermed stiller krav til byggehøjde.
- En skråtstillet pyrolysereaktor vil give højere fyldning i sneglen og opblanding af flisen/koksen. God opblanding af flisen er afgørende for at få en god varmetilførsel og dermed god pyrolyseringsgrad.

Et potentielt problem ved skråtstillet pyrolyseenhed er mulighed for knusning af koksen under frembringelse.



Figur 4.1 Skitse af pyrolyseenhed placeret hhv. horisontalt og med en hældning på 25°.

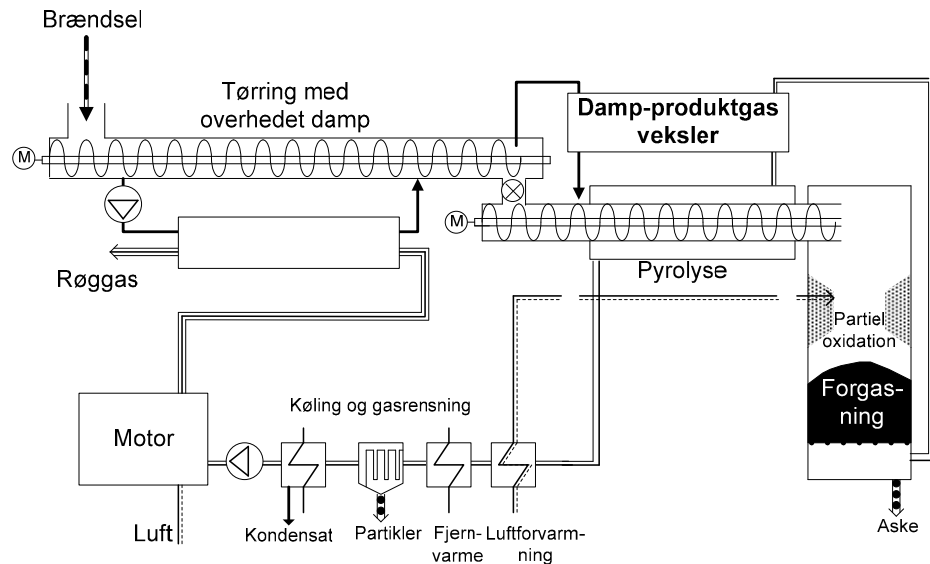
Materialer	Pyrolyseenheden bygges af varmfest stål. Til den varme del af pyrolyse-reaktoren, nærmest ved forgasseren, benyttes det varmfaste stål: Avesta MA 253.
Styrke	Styrken af stålet afhænger meget af temperaturen. Ved temperaturer på omkring 600-700°C er der ikke meget styrke, og man skal derfor nøje beregne styrke af aksel, understøtninger mv.
Udvidelse	Stål udvider sig med temperaturen, hvilket der skal tages højde for ved dimensionering. Kompensation ved brug af bælg, mv. skal beregnes.
Belægninger	<p>Erfaringerne med at benytte produktgassen til at opvarme røggas i varmeveksler viser, at de belægninger, der kan opstå, skyldes, at salte der er på gasform i forgasseren kondenserer. Dette fænomen er især set på VIKING forgasseren, hvor brændslet har haft et ekstremt højt indhold af KCl. Belægningerne fjernes nemt i kold tilstand med vand.</p> <p>Produktgaskanalen i pyrolysen bør derfor udformes, så den kan inspiceres og renses ved trykspuling.</p>
Varmekilde	<p>Varmekilde har hidtil været udstødsgas/røggas. Denne har været fri for partikler. Udstødsgassens temperatur efter motoren afhænger af flere forhold, herunder lastforhold og luftoverskudstal, så for at sikre en temperatur, der er høj nok til pyrolyseprocessen, er (en del af) røggassen blevet varmevekslet med produktgassen.</p> <p>Der kan være flere fordele ved at benytte produktgas som varmekilde i stedet for røggas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kort afstand mellem motor og forgasser er ikke nødvendig. Således kan forgasser nemmere placeres på eksisterende naturgasmotorværker.</li> <li>• Høj temperatur af røggas fra motor ikke afgørende. Således kan motor optimeres og reguleres uden indvirkning på forgasser.</li> <li>• Produktgas er varmere, så det er muligt at opnå høj koldgasvirkningsgrad og/eller simpel og kompakt udformning af pyrolyseenhed.</li> </ul> <p>Ved at benytte produktgas som varmekilde skal man tage hensyn til de problemer, der kan opstå hermed. De væsentligste problemstillinger er:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Belægninger, og muligheder for at inspicere og eventuelt rense</li> <li>• Korrosion</li> <li>• Eventuelle risici ved utætheder</li> <li>• Stabilitet/styrke ved øget temperaturniveau.</li> </ul>



Vanddamp som varmekilde

Vanddamp fra tørreprocessen ledes til pyrolyseenheden sammen med den tørre flis. Herved opnås en strømning i pyrolyseenheden, der vil give en god varmeoverførsel til flisen

Ønskes en meget kompakt pyrolyseenhed, eller ønsker man af materialehensyn ikke at tildele produktgas på 750-800°C til pyrolyseenheden, kan man vælge at overhede vanddampen til ca. 500°C ved at varmeveksle med produktgassen. Herved vil den varme vanddamp, der tilledes pyrolyseenheden, bidrage til pyrolyseprocessen.



Figur 4.2 Skitse af totrinsforgasser med dampoverhedning til pyrolyse.

Luft som varmekilde

Endelig kan luft benyttes som varmekilde. Ved tilsætning af luft til pyrolyseenheden brænder en del af pyrolysegasserne. Det er således ikke "spildvarme", der benyttes, men man afbrænder en del af den producerede gas.

Det er netop ved brug af spildvarme, at totrinsforgasseren opnår den høje koldgas virkningsgrad.

Brug af luft til pyrolyse vil reducere koldgasvirkningsgraden og dermed en af de væsentlige fordele, der er ved totrinsprocessen.

### 4.3 Udformning af pyrolysereaktor

På basis af ovenstående parametre og overvejelser blev der designet en pyrolyseenhed efter følgende principper:

- Eksternt opvarmet snegl hvor produktgas er varmekilde.
- Store partikler fjernes i cyklon før pyrolyseenhed.
- Vandret liggende snegl, idet der er gode erfaringer hermed.

## 5 Forgasning

I toppen af forgasningsreaktoren tilsættes forvarmet luft, hvorved en del af de flygtige bestanddele (tjærestoffer) fra pyrolyseenheden dekomponerer ved "partiell oxidation". Den faste del af flisen (koks) falder ned i forgasningsreaktoren og danner en koksbed (koksbed).

Den varme, vanddampholdige gasblanding strømmer ned gennem koksbedden i forgasningsreaktoren. Vanddamp og CO<sub>2</sub> reagerer med koks, og der dannes brændbare gasser (H<sub>2</sub>, CO). Disse reaktioner kræver energi (endoterme reaktioner), så temperaturen falder ned gennem koksbedden.

### 5.1 Design af forgasningsreaktor

Der er opnået gode erfaringer med forgasningsreaktoren på VIKING forgasseren, som har kørt over 3000 timer. Derfor benyttes et design af forgasningsreaktoren der ligger tæt op af Viking forgasserens reaktor:

I den øverste del af forgasseren, hvor luften tilsættes, bliver temperaturen omkring 1100°C, mens temperaturen på risten er omkring 800°C. På grund af temperaturniveauet skal forgasseren være udmuret.

Luften tilsættes via luftdyser, der blæser tangentielt ind fra siden for at opnå en god opblanding.

Forgasseren er smaltest ved lufttilførslen, hvorved god opblanding mellem luft og pyrolysegas opnås.

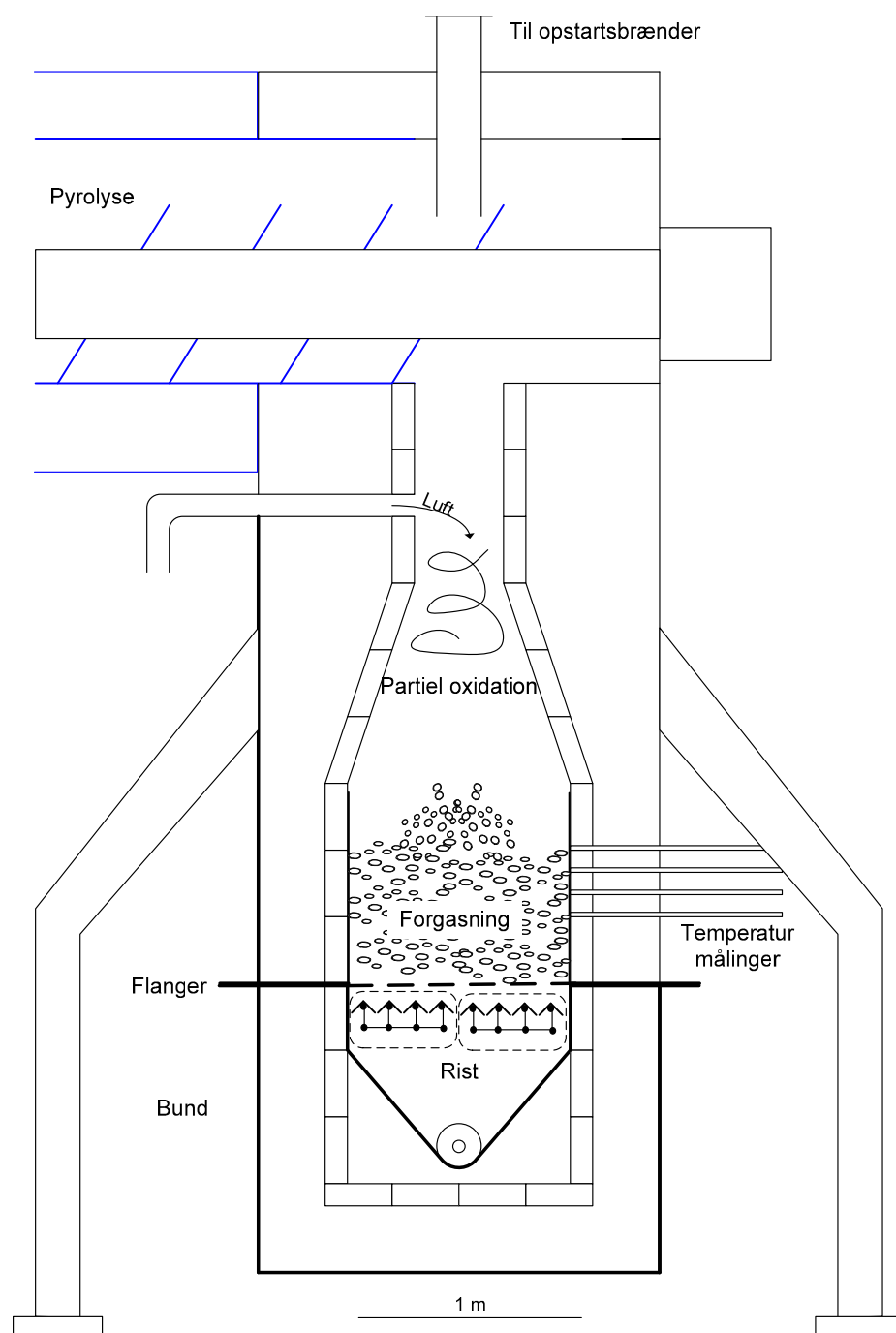
Diameteren udvides, således at gashastigheden gennem koksbedden er ca. 0,5 m/s. Dette giver en koksbed diameter på ca. 1 m for pilotanlæg og ca. 2,5 m for et 1 MWe anlæg.

Temperaturen i forgasser og i koksbed måles ved brug af termofølere. Ved at kende temperaturen i forgasseren kendes højden af koksbedden. Der er flere årsager til, at det er vigtigt at have en vis højde af koksbed:

- Koksbed sikrer lavt tjæreindhold i gassen.
- Koksbedden sikrer "lav" temperatur på rist og i efterfølgende gasstreng.

For at sikre, at gassen strømmer gennem koksbedden og gennem risten, er der etableret en foring af højtemperaturstål et vist stykke op i koksbedden.

Som rist benyttes højtemperatur stål (vinkeljern), der via et trækssystem kan vippe fra side til side. Denne type rist har vist sig anvendelig til flis. Risten kan laves, så den kan trækkes ud, eventuelt i flere sektioner.



Figur 5.1 Principskitse af tværsnit af forgasser til pilotanlæg.

## 5.2 Alternative reaktor design

Under projektet har alternative designs af reaktoren blevet undersøgt. Disse design kan potentielt være bedre, men da projektet allerede indeholder mange nye ting herunder

- Opskalering
- Damptørring
- Forgasningsgas til opvarmning af pyrolyseenhed

er det valgt at benytte et kendt og afprøvet design af forgasseren. På et senere tidspunkt kan en eller flere af de undersøgte principper blive afprøvet.

## 6 Gaskøling og gasrensning

Totrinsforgasningsprocessen udmærker sig blandt andet ved, at gassen har et meget lavt tjæreindhold.

Således kan gassen renses simpelt for partikler i et posefilter, og gassen kan køles i standard varmevekslere, uden at disse "tjæres til".

Tilmed kan produktgassen køles til under vanddugpunktet. På grund af det lave tjæreindhold har det producerede kondensat et meget lavt indhold af organisk stof. Ved normal drift vil der ikke være behov for rensning af organisk stof, hvilket ellers kan være et væsentligt projekt for øvrige forgassere.

Ovenstående er verificeret først i 100kW forgasseren ved korte forsøg og dernæst i VIKING forgasseren med langtidsdrift.

På basis af ovenstående erfaringer er der gjort følgende overvejelser og valg omkring gaskøling og gasrensning.

### 6.1 Gaskøling og rensning på VIKING

Køling før posefilter

Af hensyn til filtermaterialet skal produktgassen køles, før den ledes til posefiltret.

#### VIKING løsning

På VIKING-anlægget benyttes en traditionel rørvarmeveksler, med vand på "shell" side og produktgas i rørene.

Gennem langtidsdrift har det vist sig, at (sod) partiklerne sætter sig i veksleren. Partiklerne sidder ikke hårdt fast, men et rensesystem er nødvendigt.

På VIKING er opbygget et rensesystem med kæder. Systemet fungerer fint.

#### Overvejelser - pilot

Det er blevet undersøgt, om WEISS standard sodblæsningsudstyr med fordel kan benyttes.

#### Valg -pilot

Det blev besluttet at benytte et system svarende til VIKING forgasseren, som fungerer fint.

Opstartsblæser og fakkell

### **VIKING løsning**

På VIKING forgasseren ledes varm gas under opstart via sugetræksblæser til opstartsfakkell. Der er således to gasblæsere på VIKING: Varm (beskidt) og kold (ren) blæser.

### **Overvejelser - pilot**

Eftersom gassen under opstart af totrinsprocessen har et meget lavet tjæreindhold, er det blevet diskuteret (flittigt), om det er nødvendigt med en separat opstartsblæser.

Det vil forsimple anlægget, såfremt gassen under opstart ledes gennem posefilter og gaskølesystem.

### **Valg - pilot**

Det blev besluttet at lede opstartsgas gennem gaskølere og posefilter.

Posefilter

### **VIKING løsning**

Posefilteret skal operere over vanddugpunktet. For at undgå korrosion, herunder stilstandskorrosion, er posefilteret i VIKING epoxy-belagt.

Posefiltret regenereres ved kvælstof (N<sub>2</sub>).

Driftserfaringerne med posefiltret har været særdeles gode. Driftstemperaturen har været ca. 90°C. Dog har der været problemer omkring regenerering, som formentlig skyldes, at (sod) partiklerne er meget lette og derfor hurtigt søger tilbage til filterdugen frem for at falde til bunds.

### **Overvejelser - pilot**

Især problematikken omkring regenerering af poserne er blevet diskuteret og undersøgt. Problemet, som kun kommer ind i mellem, skyldes formentlig, at partiklerne består af meget fint, let sod, som ikke hurtigt falder til bunds i filteret, men til gengæld holdes svævende i længere tid.

### **Valg - pilot**

Det er valgt at zone inddele posefilteret, således at en halvdel af filteret kan afspærres, mens dette regenereres, og den anden halvdel af filteret fungerer som filter. Herved bør problematikken omkring regenerering være løst.

Sikkerhedsfilter og køling efter posefilter

### **VIKING løsning**

På VIKING sidder et "sikkerhedsfilter" umiddelbart efter posefilteret. Dette filter kommer i funktion, hvis der går hul på en pose i posefiltret.

Sikkerhedsfiltret i VIKING har virket upåklageligt (ingen belægninger og ingen tryktabsstigning).

Før gassen ledes til motoren, køles den yderligere. Ved at køle til under gassens dugpunkt udkondenseres vand fra produktgassen. I VIKING benyttes en kompakt vand/gas veksler. Denne køler har virket upåklageligt.

I den kondenserende køler dannes aerosoler. Disse bør fjernes bedst muligt af hensyn til efterfølgende motordrift. På VIKING benyttes papirfilter svarende til "sikkerhedsfilteret" med dræn fra bunden.

Dråbefanget har virket upåklageligt.

Efter dråbefang pumpes gassen op til et let overtryk via en rootsblæser, og gassen ledes i VIKING anlægget til en gastank.

Gastanken på VIKING anlægget er opsat for at gassen til motoren kan få en meget stabil gaskvalitet, idet motoren er blevet benyttet til undersøgelser i et PhD studie.

Rootsblæseren og gastank har virket upåklageligt.

Overskudsgas ledes til ren fakkellampe som tændes manuelt. Støttebrænder med LPG.

#### **Overvejelser og valg - pilot**

Sikkerhedsfilter og køling efter posefilter opføres som på VIKING med følgende undtagelser:

VIKING har reelt to sikkerhedsfiltre før motoren, idet demistoren også fungerer som sikkerhedsfilter. Det er derfor besluttet, at pilotanlægget benytter en kombineret demistor/sikkerhedsfilter.

Gastanken har i VIKING anlægget ingen praktisk betydning for selve driften, og der opføres derfor ingen gastank på pilot anlægget.

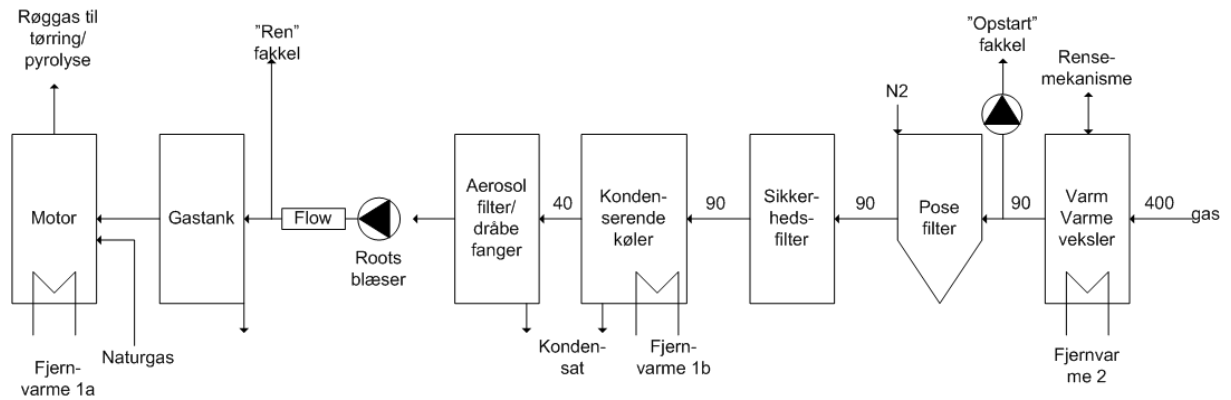
Motor

#### **VIKING løsning**

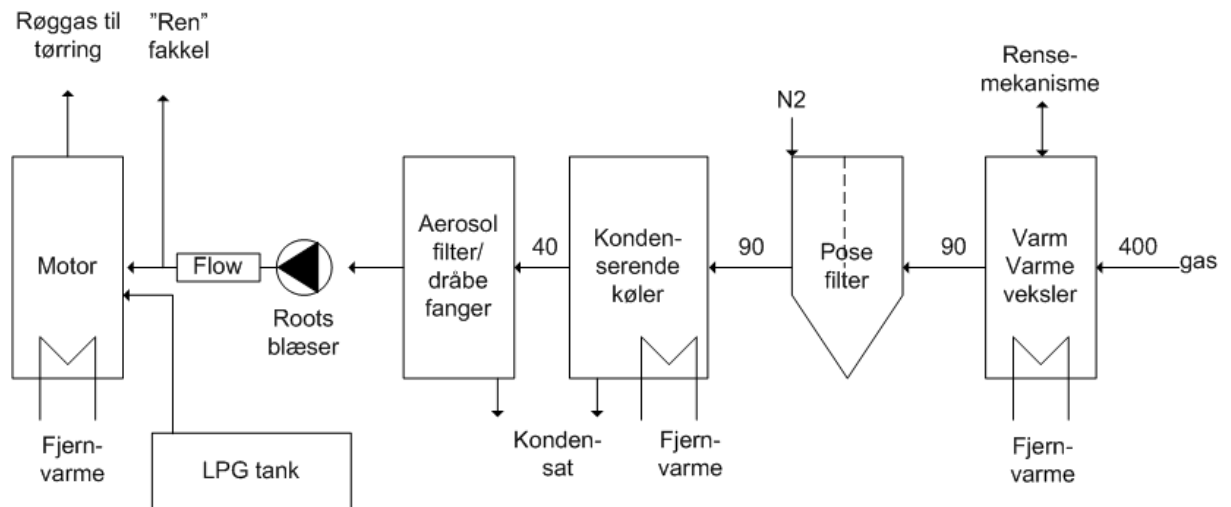
I VIKING startes motoren på naturgas, hvorved pyrolyseenhed (og tørrer) opvarmes. Når forgasseren er i drift, skiftes over til forgassergas.

#### **Overvejelser og valg - pilot**

WEISS A/S har ikke indlagt naturgas. Naturgas kan lægges ind til WEISS, eller man kan lave opstart på LPG. Det blev vurderet, at anlægget har størst demonstrationseffekt, hvis motoren startes op på LPG, idet det store marked er steder, hvor der ikke er naturgas.



Figur 6.1 Principskitse af komponenter i gaskøling, gasrensning og motor på VIKING.



Figur 6.2 Principskitse af komponenter i gaskøling, gasrensning og motor på pilot-anlægget.



## 7 Det samlede anlæg

På basis af proces- og instrumenteringsdiagram og styringsbeskrivelse blev der lavet undersøgelser af det samlede anlæg. Disse undersøgelser omfattede:

- Disponering af samlede anlæg
- Sikkerhedsanalyse (HAZOP).

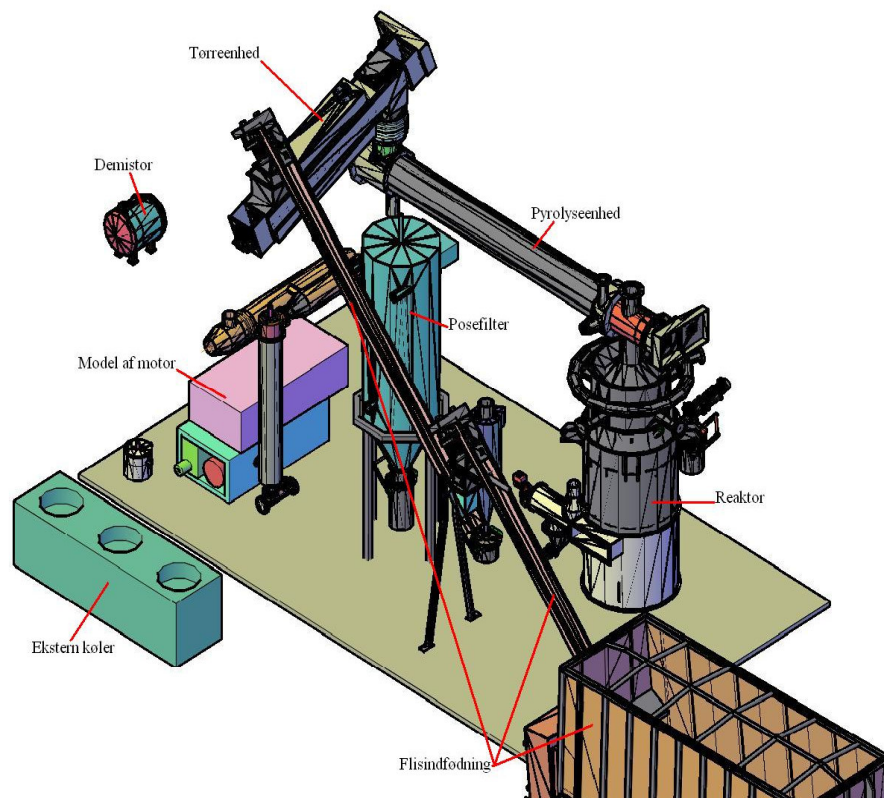
Disse punkter beskrives i det følgende.

### 7.1 Disponering af anlæg

Da de fleste anlægskomponenter udsættes for store temperaturvariationer er det væsentligt, at alle forhold i forbindelse med de forskellige driftssituationer forudses og at der tages højde herfor i disponeringen.

Samtidigt er det essentielt, at hele arrangementet optimeres med hensyn til betjeningsvenlighed og lavest mulig samlet investering.

Disse forhold har været indgående studeret og det færdige resultat fremgår af figur 7.1. I denne forbindelse har der været et meget frugtbart samarbejde mellem de udførende parter Weiss, DTU og COWI, der alle har kunnet bidrage med deres ekspertise i form af såvel know-how som know-why.



Figur 7.1 3-D tegning af nøglekomponenter i pilotanlægget.

## 7.2 Sikkerhedsanalyse (HAZOP)

Formålet med HAZOP analysen er at udføre en systematisk identifikation af uønskede hændelser, deres årsager og konsekvenser, samt af sikkerhedsforanstaltninger, der hindrer, at hændelserne opstår, eller at konsekvenserne bliver alvorlige.

Ved den udførte analyse er anlægget opdelt i mindre sektioner og de der er vurderet som de mest kritiske, har været genstand for en HAZOP analyse. Som følge af denne analyse er der gennemført nogle ekstra præventive tiltag og der er opstillet nye designkrav til enkelte komponenter.

Ligesom i forbindelse med anlægsdisponeringen er HAZOP analysen gennemført i samarbejde mellem de udførende projektdeltagere. Herved er sikret, at den professionelle viden omkring gennemførelse af en sådan analyse såvel som den faglige ekspertise om det aktuelle forgasningsanlæg er blevet inddraget i analysen

## 8 Etablering af pilotanlæg

Pilotanlægget er blevet etableret i et samarbejde mellem DTU/COWI og Weiss, på den måde at DTU/COWI har udarbejdet designgrundlag, og Weiss har udført dels maskintegninger og produktionsgrundlag og dels produktion og montage.

Anlægget er placeret i nær tilknytning til Weiss fabrik i Hadsund, med henblik på evt. at kunne udnytte varmeproduktionen. Der er dog etableret varmeplade for afblæsning af hele varmeproduktionen, idet opstart og prøvekørsel af anlægget ikke ønskes at være afhængig af årstiden og muligheden for udnyttelse af varmen på fabrikken.

Der er etableret en ny bygning for anlægget, hvortil der er indhentet byggetilladelse for midlertidig opstilling.

Brændselshåndtering er udført på basis af Weiss normale standarder, og er produceret på fabrikken i Hadsund.

Pyrolyseenhed og forgasningsreaktor er opsvejst hos underleverandører, og færdigbygget hos Weiss.

Motoren er indkøbt hos Nissen Energiteknik, og der er indgået aftale om assistance med motordrift. Der er anvendt en motor af fabrikat MAN, og motoren er ombygget til forgasningsgas, på baggrund af erfaringerne fra Viking forgaseren. Motoren er etableret for opstart på LPG gas, med omskiftning til forgasergas, når produktionen heraf er etableret.

Herunder vises fotos fra produktion og montering af anlægget.

## 8.1 August 2007



Figur 8.1 *Forgasser i WEISS A/S værksted. XXX og Thomas Skipper, WEISS A/S og Ulrik Henriksen og Steen Nielsen, DTU-MEK.*



Figur 8.2 *Forgasser inspiceres af Ulrik Henriksen, DTU-MEK.*



Figur 8.3 Bygning til pilotanlæg. Posefilter og motor er sat ind.



Figur 8.4 Motor inspiceres. Steen Nielsen, DTU-MEK; Thorvald Pedersen, Nissen Energiteknik; Thomas Skipper, WEISS A/S, Ulrik Henriksen DTU-MEK.

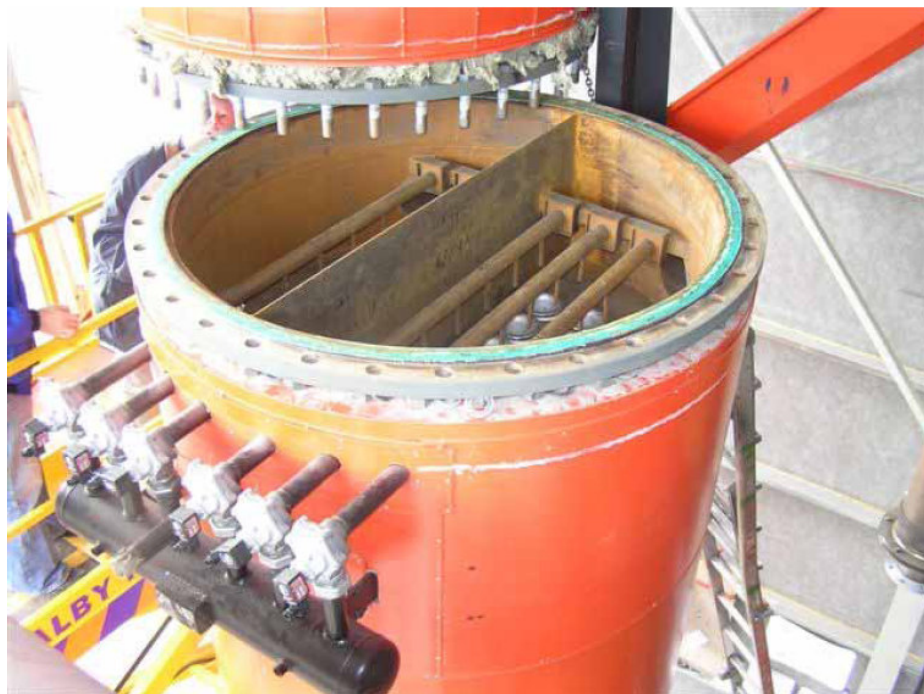
## 8.2 September 2007



Figur 8.5 *Forgasser transporteres til forsøgshal.*



Figur 8.6 *Forgasser sættes på plads.*



Figur 8.7 Posefilter.

### 8.3 November 2007



Figur 8.8 Bygning til pilotanlæg.



Figur 8.9 Inspektion af forgasser. Thomas Skipper, WEISS A/S, Steen Vestervang, Energinet.dk; Knut Berge, Knut consult.



Figur 8.10 Drøftelse omkring styring. Ulrik Henriksen, DTU-MEK; Carsten XXXX, WEISS A/S.





Figur 8.11 Bjarne Skyum, Projektleder for WEISS A/S ved forgasser.



Figur 8.12 Thomas Skipper og Henning Jensen WEISS A/S samt Freddy Christensen DTU-MEK i det muntre hjørne.