

## Bedre utnyttelse av bioenergi fra sagbruk gjennom fjernvarmeleveranse

*Improved utilization of bioenergy from sawmills through distribution of district heating*

Saksbehandler: Henning Horn  
Finansiering: Norges forskningsråd  
Dato: Januar 2010

### Sammendrag

Formålet med prosjektet var å sikre en bedre kontroll og utnyttelse av biovarmeressursene ved Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS, i forbindelse med at bedriften inngikk et samarbeid med TINE Midt-Norge Selbu om bygging av fjernvarmeledning og leveranse av biobrenselbasert overskuddsvarme.

Prosjektet har vist at det er mulig å effektivisere den varmekrevende tørkeprosessen gjennom bedre tilpasning av tørkeskjema til de ulike trelastdimensjonene. På denne måten oppnås det et større overskudd av biobaserte sekundærprodukter, som sikrer en stabil varmeleveranse både internt på sagbruket og eksternt til TINE meierier.

Det er blitt utarbeidet et energioppfølgingssystem som sikrer kontroll av den innfyrte termiske energien, blant annet gjennom undersøkelser av brennverdi og fastmasse for biobrensel Sortimentene som benyttes. Det er samtidig vist at ved utendørs lagring av biobrensel oppnås det svært liten reduksjon i trefuktighet, selv etter en måneds lagringstid hvor mikrobiologiske prosesser (varmgang) har funnet sted.

En investeringsanalyse for et tørkeanlegg for biobrensel viste at det med dagens energipriser vil være større sannsynlighet for å skape lønnsomhet ved salg av varme, enn ved videreføring og salg av biobrenselprodukter av bark og flis.

Stikkord: Sagbruk, trelasttørring, fjernvarme, termisk energi  
Keywords: Sawmill, wood kiln drying, district heating, thermal energy

## Summary

The project objective was to ensure a better control and utilization of the biofuel resources at Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS, as the company entered a partnership with the dairy TINE Midt-Norge Selbu for the construction of a district heating pipeline for the supply of biofuel based waste heat between the two companies.

The project has shown that it is possible to increase the efficiency of the heat-intensive timber drying process. Thus, a significant surplus of secondary bio-based products is achieved to ensure a stable heat delivery, both internally at the sawmill, and externally to the dairy plant.

An Energy Management System (EMS) has been implemented to ensure a better control of the biofuels being utilised and the produced thermal energy. A survey of the calorific values and the solid masses of the biofuels has been carried out to make the EMS as rigid as possible. It is also shown that outdoor storage of biofuels yields a very small reduction in moisture content, even after one month storage where microbiological processes has taken place.

An investment analysis of a biofuel drying plant demonstrated that, with the current energy prices in Norway, it is more likely to generate profit from the sale of heat, than through fabrication and sale of biofuel products such as bark and wood chips.

## Forord

Rapporten dekker resultatene fra prosjektet *Bedre utnyttelse av biovarme fra sagbruk ved optimalisering av prosesser og salg av fjernvarme*, som ble gjennomført som et samarbeid mellom Treteknisk, Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS og TINE Midt-Norge Selbu i perioden 2007-2009.

Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS endret i løpet av 2009 navn til Kjeldstad Trelast AS, og ligger i dag under organisasjonsparaplyen Kjeldstad Trelastdivisjon sammen med Gilstad Trelast AS og Støren Trelast AS i Kjeldstad Holding konsernet.

Prosjektet ble gjennomført som et brukerstyrt innovasjonsprosjekt, finansiert gjennom egeninnsats fra bedriftene og støttemidler fra Norges forskningsråd.

Treteknisk ønsker å takke ansatte ved Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS og TINE Midt-Norge Selbu for et godt samarbeid i forbindelse med gjennomføringen av prosjektet.

## Innhold

Sammendrag.....	3
Summary .....	4
Forord .....	5
1 Innledning.....	8
2 Bedriftene og samarbeidet .....	8
2.1 Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS .....	8
2.2 TINE Midt-Norge Selbu .....	8
2.3 Bygging av fjernvarmeledning og modifisering av varmesentral ved TINE Midt-Norge Selbu .....	9
3 Optimalisering av prosesser.....	10
3.1 Trelasttørring og tørkeanlegget hos Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS .....	10
3.2 Optimalisering av tørkeprosessen og resultater.....	11
4 Kontroll av biobrenselfuktigheten.....	13
4.1 Fuktighet i biobrensel og kontroll gjennom tørring.....	13
4.2 Energioppfølging .....	15
4.3 Biobrenselfuktighet .....	16
4.3.1 Dårlige driftserfaringer .....	16
4.3.2 Økonomi.....	17
4.3.3 Miljø .....	17
4.4 Investeringsanalyse for et tørkeanlegg for biobrensel.....	19
4.4.1 Økt inntekt ved levering av tørt biobrensel.....	19
4.4.2 Investeringskostnader .....	20
4.4.3 Investerings- og driftskostnader.....	21
4.5 Undersøkelse av varmgang i barklager .....	22
4.5.1 Mikrobiell aktivitet i biobrensel.....	23
4.5.2 Måleutstyr og instrumentering av barkhaug.....	24
4.5.3 Resultater fra måling av varmgang i barkhaug.....	25
4.5.4 Konklusjon .....	26
4.6 Bygging av transportør for bedre kontroll av biobrenselfuktigheten....	27
5 Brennverdier for blandings-sortimenter.....	28
5.1 Hva er brennverdi.....	29
5.2 Brennverdi – definisjoner.....	29
5.2.1 Øvre brennverdi.....	29
5.2.2 Nedre brennverdi.....	29
5.2.3 Effektiv brennverdi.....	30
5.3 Brennverdier for biobrenselet ved Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS ....	30
5.4 Brennverdier for ulike blandinger av biobrenselfuktighets-sortimenter .....	31
5.5 Utvikling av programvare for teoretisk bestemmelse av innblandingsforhold av tørt og fuktig fyrstoff .....	33

6	Måling av fastmasseandel .....	36
6.1	Fastmasse .....	36
6.2	Faktorer som påvirker fastmasseprosenten .....	36
6.3	Målemetode fastmasse .....	37
6.4	Resultater fra måling av fastmasse .....	38
7	Energioppfølgingsystem .....	39
8	Måling av kjelens energieffektivitet .....	40
8.1	Virkningsgrad .....	41
8.1.1	Kjelvirkningsgrad .....	41
8.1.2	Fyrteknisk virkningsgrad og røykgasstap .....	41
8.2	Røykgassmålinger .....	43
8.2.1	Måleutstyr .....	43
8.2.2	Målinger og resultat .....	44
8.2.3	Konklusjon .....	45
9	Videre arbeid .....	46
10	Konklusjon .....	46
11	Referanser .....	47

## 1 Innledning

Trelastindustrien produserer store mengder biobrensel som tradisjonelt har blitt utnyttet til intern varmeproduksjon, blant annet for den energikrevende tørkeprosessen. De senere årene har sagbrukene i større grad begynt å se på alt brennbart materiale som følger fra produksjonen som en ressurs som kan utnyttes til videre salg utenfor bedriften. Med økende verdi på biobrenselsortimentene, vil det være viktig for industrien å utnytte disse best mulig gjennom et energieffektivt forbruk.

Et toårig prosjektsamarbeid mellom Treteknisk, Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS og TINE Midt-Norge Selbu ble innledet i forbindelse med at bedriftene i 2007 inngikk en avtale om levering av 2 GWh fjernvarme pr. år fra sagbruket til TINE. Byggingen av fjernvarmeledningen mellom bedriftene ble finansiert av TINE.

Prosjektets hovedmål var å danne grunnlag for en bedre utnyttelse av biovarmeressursene ved sagbruket gjennom optimalisering av varmeproduksjonen og prosessene i fyr- og tørkeanlegg på sagbruket. Arbeidsoppgavene skulle sikre en stabil leveranse av fjernvarme til meieriet.

## 2 Bedriftene og samarbeidet

### 2.1 Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS

Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS (heretter KSH) er et sagbruk som ligger ved Selbusjøen i Sør-Trøndelag. Bedriften har et vidt produktspekter av trelast med K-bjelke, K-stender, limtre og massivtreelementer, i tillegg til videreforedling av halvfabrikata for ferdighusbransjen, inkludert egen hytte- og elementproduksjon samt takstolproduksjon.

Bedriften har ca. 90 årsverk, og det forbrukes omkring 100 000 m<sup>3</sup> tømmer pr. år.

I 2008 var omsetningen på 190 millioner kroner. Eksportandelen er 15 %, der England er det største utenlandske markedet.

### 2.2 TINE Midt-Norge Selbu

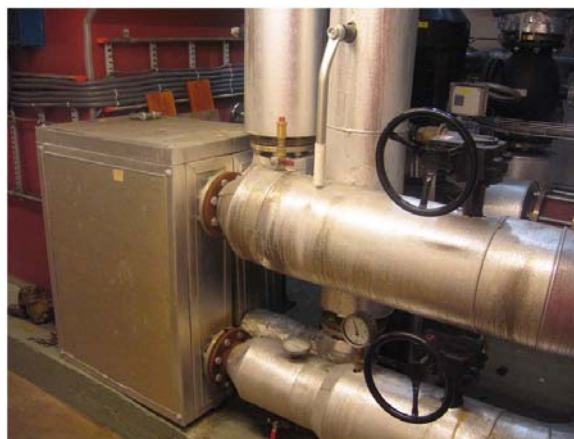
TINE BA er morselskapet i konsernet TINE Gruppa. Konsernet består av mange hel- og deleide datterselskaper, men kjernevirksomheten er meieridrift. TINE Gruppa har 5 353 ansatte og en årlig omsetning på 14,7 milliarder kroner. TINE BA eies av ca. 18 000 melkeprodusenter over hele landet.

TINE Midt-Norge Selbu i Sør-Trøndelag er et moderne spesialanlegg for produksjon av blåmuggost - det eneste blåmuggostysteriet i Norge. Anlegget produserer ca. 600 tonn i året, fordelt på Normanna, Norzola, Royal Blue og Selbu Blå.

### 2.3 Bygging av fjernvarmeledning og modifisering av varmesentral ved TINE Midt-Norge Selbu

Etter at avtalen var inngått mellom KSH og TINE, ble arbeidet med fjernvarmeledningen startet mot slutten av sommeren 2007. Da arbeidet var ferdigstilt i midten av oktober samme år, var det lagt dobbel rørgate på 450 meter fra fyranlegget på sagbruket og frem til meieriets varmesentral på den andre siden av riksvei 705 gjennom Selbu.

I varmesentralen/fyrhuset på TINE ble det satt inn en varmeveksler og en sirkulasjonspumpe, hvor forbruket av varmtvann blir registrert ved hjelp av en strømningsmåler, og temperaturmålere inn/ut på varmeveksleren. På denne måten beregnes forbrukt varmemengde i kWh som KSH kan lese av for fakturering. Det ble under ombyggingen også gjort en rekke utbedringer i varmesentralen, blant annet med utskifting av rør og gammel isolasjon, se *Figur 1*.



*Figur 1. Bilder fra varmesentralen på TINE med tur/retur rør fra KSH og varmeveksler.*

Pumper, varmeveksler og rørtrasé er dimensjonert for å kunne imøtekomme maksimaluttaket på TINE, som er på ca. 1 MW over kortere perioder på produksjonsdagene. Uttak over dette vil måtte dekkes med TINE sin egen kombikjel, som benytter elektrisitet og olje.

Etter en igangkjøringsfase kunne meieriet etter hvert motta en relativt stabil varmeleveranse fra sagbruket til sin egen varmesentral. Blåmuggostysteriet ble med dette det første TINE-anlegget i landet som, i prinsippet, utelukkende skal kunne bruke biovarme som kjelkraft i selve osteproduksjonen. Målet er at varmeleveransen skal kunne dekke ca. 60 % av meieriets samlede energibehov.

På årsbasis trenger TINE å kjøpe 2 GWh til produksjonen av blåmuggost. Det tilsvarer strømforbruket i 100 eneboliger. For både meieriet og sagbruket er dette en vinn-vinn situasjon. KSH får 3-4 ganger mer betalt pr. kWh ved å levere hettvann til TINE, enn ved å kjøre barken til Sverige for forbrenning i kraftvarmeverket Krokrom ved Østersund. Samtidig reduseres svensktrafikken fra fire til tre vogntog i uken.

TINE på sin side har beregnet sine besparelser til å være ca. én krone pr. kg produsert ost når anlegget er nedbetalt, i forhold til å bruke elektrisk kraft. Samtidig oppnås det en stor miljøgevinst ved å bruke fornybar og CO<sub>2</sub>-nøytral bioenergi.

### 3 Optimalisering av prosesser

For å kunne nyttiggjøre seg av den produserte varmen fra KSH på best mulig måte, ble tørkeprosessen ved bedriften gjennomgått for å se på mulighetene for å effektivisere tørkingen.

#### 3.1 Trelasttørking og tørkeanlegget hos Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS

Trelast krever en kontrollert tørkeprosess for å oppnå ønsket tørke kvalitet. Utviklingen i den senere tiden har gått i retning av høyere temperaturnivå. Tørkehastigheten er økt, samtidig som kvaliteten på det ferdige produktet stadig er forbedret. Med riktig utstyr kan sagbruk i dag levere trelast som møter alle krav som stilles i markedet når det gjelder tørkekvalitet.

Bedriften benytter en kanaltørke og fem kammertørker. Den årlige kapasiteten på kanaltørken er 32 000 m<sup>3</sup>, mens det tørkes 6 700 - 6 900 m<sup>3</sup> pr. år for hver av kammertørkene.

Kanaltørker bruker mindre energi pr. m<sup>3</sup> tørket trelast enn kammertørker, da tørkeprosessen foregår kontinuerlig, slik at man ikke har en energikrevende oppvarmingsperiode for hver tørkesats, noe som er tilfelle med kammertørkene. Det er vanlig å installere varmegjenvinnere i kanaltørker for ytterligere å redusere varmeforbruket, men kanaltørken ved KSH har ikke slikt utstyr.



Det er frekvensstyring på viftene i alle kammertørkene, noe som gjør at luft-hastigheten gjennom trelastpakkene kan tilpasses tørkeprosessen. Strøm- og varmemålere måler totalt forbruk på alle tørkene.

### 3.2 Optimalisering av tørkeprosessen og resultater

Tørkeskjema for kammertørker ble gjennomgått for å se på mulighetene for å gjøre tørkeprosessen mer effektiv. Målet var å optimalisere tørkeprosessen slik at tørketiden og energiforbruket gikk ned, uten at det gikk på bekostning av tørke kvaliteten.

Tørkeprosessen i kanaltørken ble av bedriften ansett å være tilfredsstillende, både med hensyn til kvaliteten på produktene samt tids- og energibruken. Potensialet for gevinst ved eventuelle prosessendringer ville være små, og det ble derfor ikke gjort endringer på tørkeprosessen i kanaltørken.

Ved gjennomgangen av tørkeskjemaene for kammertørkene, ble det gitt forslag til endringer for å spare inn tørketid og energibruk. I denne forbindelse ble to simuleringsprogrammer benyttet for å innjustere tørkeskjemaene; *Torksim* (Torksim, 2001) og *Torksim Global* (TorksimGlobal, 2004). Dette er simuleringsprogrammer som beregner spennings- og fuktighetsutviklingen i trelasten under tørking ut fra de inndata som gis. Inndata er tørkeskjemaet med tørr- og våttemperatur, starttemperatur og fuktighet på trelasten, lufthastighet gjennom trelastpakkene, dimensjon på trelasten, gjennomsnittlig densitet, antall trelastpakker, slutfuktighet, etc.

Etter denne gjennomgangen har bedriften selv optimalisert sine skjema, noe som har gitt betydelige reduksjoner i tørketider for enkelte av dimensjonene. Noen eksempler på endringer som ble foretatt er:

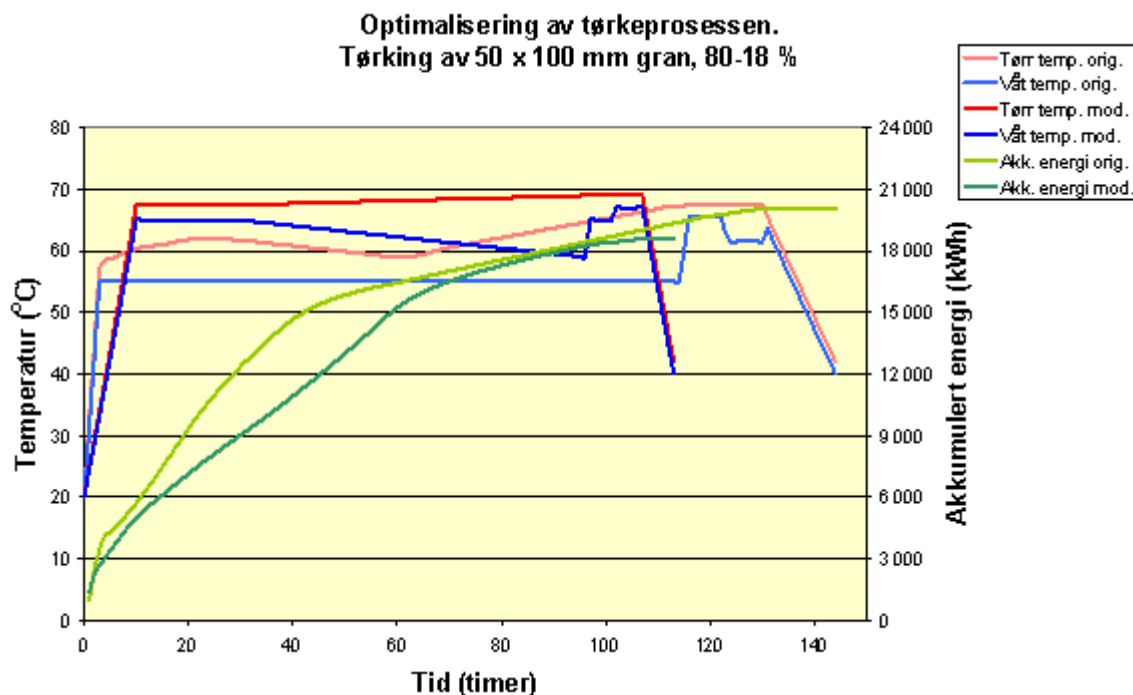
- Raskere oppvarmingstid
- Høyere temperaturnivå
- Større tørkekraft<sup>1</sup> i enkelte deler av tørkeprosessen

*Figur 2* viser et eksempel på hvordan tørketid og akkumulert energi for en tørkesats av gran med dimensjonen 50 mm x 100 mm har blitt redusert etter en optimalisering av tørkeskjemaet.

---

<sup>1</sup> Tørkekraften angir forholdet mellom trelastens fuktighet og likevektsfuktigheten i det omgivende klima (tørkeklimaet).

Energireduksjonen som ble oppnådd med de nye tørkeskjemaene varierte med hvilke trelastdimensjoner som ble tørket, hvilke temperaturnivåer som ble benyttet i de ulike tørkene, målfuktighet, kvalitet på tørkebyggene og hvor godt skjemaene var trimmet inn på forhånd.



Figur 2. Eksempel på reduksjon i tørketid og energibruk med et mer effektivt tørkeskjema.

Treteknisk har gått gjennom de optimaliserte tørkeskjemaene og gjort beregninger med *Torksims* for å finne hva reduksjonene utgjør i termisk og elektrisk energi. Beregningene er summert i Tabell 1.

Tabell 1. Reduksjon i energiforbruk ved optimalisering av tørkeskjema ved Kjeldstad Sagbruk & Høveri AS.

Dimensjon	Termisk energi pr. tørkesats		Energireduksjon pr. år		Prosentvis energireduksjon	
	Gamle skjema (kWh)	Nye skjema (kWh)	Termisk (kWh)	Elektrisk (kWh)	Termisk (%)	Elektrisk (%)
19 mm (11 %)	24 108	22 779	116 774	22 696	5,5 %	10,8 %
50 mm (11 %)	25 345	25 149	16 691	6 107	0,8 %	3,0 %
50 mm (18 %)	21 995	20 444	214 708	80 140	7,0 %	24,1 %
63 mm (18 %)	22 570	21 663	98 918	41 003	4,0 %	15,7 %
75 mm (18 %)	23 729	22 969	65 149	25 805	3,2 %	12,5 %
<b>Totalt</b>	<b>117 748</b>	<b>113 004</b>	<b>512 240</b>	<b>175 752</b>		
<b>Total energireduksjon pr. år (kWh)</b>			<b>687 992</b>			

Tabellen viser at med de nye tørkeskjemaene vil total energireduksjon for de ulike dimensjonene utgjøre omkring 688 MWh pr. år, med de forutsetninger som legges inn i simuleringsprogrammet. Den innsparte termiske energien på 512 MWh tilsvarer ca. 34 % av levert varme til TINE, noe som illustrerer hvor viktig en slik prosessoptimalisering er. Gjennomsnittlig innspart termisk og elektrisk energi for de ulike trelastdimensjonene er henholdsvis 4,1 % og 13,2 %.

## 4 Kontroll av biobrenselfuktigheten

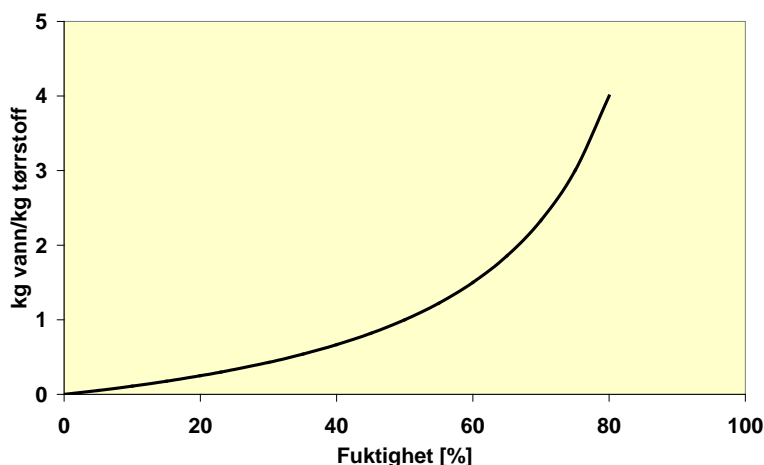
### 4.1 Fuktighet i biobrensel og kontroll gjennom tørking

En av de viktigste kontrollparametrene for å sikre en god forbrenning i biobrensel-fyrte anlegg er trefuktigheten i brenselet som benyttes. Det er derfor avgjørende med et system hvor operatørene til enhver tid vet fuktigheten i biobrenselet.

Fuktig biobrensel består av en viss mengde tørrstoff og en viss mengde vann. Ved forbrenning av biobrensel vil vannet fordampe og blandes med røykgassene. Noe av energien fra forbrenningsreaksjonen benyttes til å fordampe vannet. Vannet i brenselet er ikke nødvendig for at forbrenningen skal finne sted, og er i så måte et onde som krever mer energi til fordampningen, enn hva som ville vært tilfelle med et tørt brensel (Wimmerstedt, 1998). Da vannet er i væskeform, må det skje en tørking før forbrenningen finner sted. Spørsmålet er om denne tørkingen skal skje i eller utenfor forbrenningskammeret. Når det er snakk om anvendt *tørking av biobrensel*, betyr det tørking *utenfor* forbrenningskammeret.

Vanninnholdet i biobrensel kan defineres på ulike måter. Man kan definere det som vekten av vann i forhold til totalvekt (i Sverige kalt "fukthalt",  $F_r$ ), eller som vekten av vann i forhold til tørrvekt (i Sverige kalt "fuktkvot",  $F_0$ ). Det er førstnevnte definisjon ( $F_r$ ) som benyttes når man snakker om fuktigheten i biobrensel.

Det er en nær sammenheng mellom varmeeffekten i en fyrkjel og massestrømmen av tørrstoff til fyranlegget. *Figur 3* viser kg vann pr. kg tørrstoff som funksjon av fuktigheten i biobrenselet. Som det fremgår av figuren er denne sammenhengen ikke-lineær. Eksempelvis vil en senking av fuktigheten i biobrenselet fra 65 % til 50 % kreve at like mye vann fordampes som en senkning fra 45 % til 0 %.



Figur 3. Sammenhengen mellom biobrenselfuktighet og kg vann pr. kg tørrstoff.

Fuktigheten i de sortimentene som fremkommer under trelastproduksjonen varierer sterkt. Barkfuktigheten kan være svært høy, mens videre bearbeiding på høvleri etter at trelasten er tørket gir spon med svært lav fuktighet.

Hovedfyrstoffet ved KSH er en blanding av 90 volum-% bark og 10 volum-% rå sagflis, heretter kalt *90/10-blandingen*. Fuktigheten i denne brenselmiksen varierer fra 45 % og helt opp i 70 % gjennom året. Det er derfor i perioder nødvendig å blande inn mer tørt fyrstoff, som tørt hoggerflis e.l., for å kunne opprettholde en stabil forbrenning.

I visse sammenhenger er det både kostnadmessige og miljømessige hensyn som taler for at trebasert biobrensel både bør og skal tørkes:

- *Anvendelsesområdet kan kreve at biobrenselet er tørt.*  
Biobrensel anvendes i stor grad for å erstatte olje og kull i store kjelanlegg i varmeverk eller kraftvarmeverk. Det er i slike typer anlegg ofte nødvendig å tørke brenselet for å kunne gi en så stor varmeproduksjon som mulig. Rått/fuktig brensel krever større forbrenningskammer og varmeoverførende overflater i kjelen for å kunne gi samme effekt. Ved nye installasjoner og større fyranlegg, spesielt i områder med god tilgang til rått brensel i nærheten, noe som er tilfelle med KSH, velges likevel vanligvis fyranlegg som er dimensjonert for fuktig brensel på grunn av lavere brenselkostnader.
- *Tørking av biobrensel gir store fordeler ved lagring, lang transportavstand og distribusjon.*  
Fuktig brensel er vanskelig å lagre i store mengder eller over lengre tid. Soppsporer og nedbrytning gir substansstap og forringelse av brenselkvaliteten, i tillegg til helse- og miljørisiko ved håndtering. Tørt brensel, derimot, kan lagres over lang tid uten tap eller forringelse. Ved transport er det en stor fordel at biobrenselet er så tørt som mulig for å redusere vekten. I fuktig

brensel kan ofte halve lastvekten være vann, noe som gir høye transportkostnader og dermed økt utslipp av CO<sub>2</sub> fra lastebilene. Tørt brensel kan transporteres over betydelig lengre strekninger med god økonomi enn fuktig brensel.

- *Tørking gir bedre muligheter for å kvalitetsdeklare biobrensel-sortimentene.*  
Det finnes i dag noen teknikker som fortsatt er under utprøving for kontinuerlig måling av fuktighet (eksempelvis NIR – Nær-infrarød målemetode). Det beste alternativet er derfor knusing og tørking av bioråstoffet, noe som gjør at fuktigheten blir relativt jevn. Tørt biobrensel kan derfor leveres med betydelig jevnere kvalitet enn fuktig biobrensel. Dette er en viktig forutsetning; spesielt for mindre forbrukere som ikke har ressurser til å følge opp kvaliteten.

På bakgrunn av situasjonen ved KSH med innblanding av tørrere biobrensel-sortimenter i 90/10-blandingen, er det gjennom prosjektet utarbeidet et software-program for automatisk beregning av riktig volummengde tørt fyrstoff til 90/10-blandingen, se kapittel 5.5 for beskrivelse av programmet.

## 4.2 Energioppfølging

For å kunne sikre en stabil varmeleveranse både internt på KSH og eksternt til TINE, er det viktig å ha et system som sikrer god kontroll på fyrstoffet inn i forbrenningsanlegget på KSH. Spesielt i vinterhalvåret, med snø og is i biobrenselet, kan man oppleve driftsproblemer og lav kjelvirkningsgrad.

Gjennom prosjektet er det blitt utarbeidet et energioppfølgingssystem for registrering av biobrenselforbruket, fuktighetsinnhold og energiinnholdet i brenselet, beregnet gjennom brennverdien for de ulike sortimentene. Tørke-/veieprøver av bark og de andre sortimentene tas ut på en kontinuerlig basis for kontroll av tre-fuktigheten. Systemet gjør det mulig for bedriften å iverksette tiltak før fuktigheten blir for høy til at en tilfredsstillende virkningsgrad og varmeleveranse fra anlegget oppnås.

I forbindelse med opprettelsen av et energioppfølgingssystem har det blitt gjennomført en kartlegging av de ulike biobrensel-sortimentene ved KSH, med måling av brennverdi og fastmasse. Gjennomføringen og resultatene fra disse målingene er beskrevet i henholdsvis kapittel 5 og 6, mens kapittel 7 gir en beskrivelse av energioppfølgingssystemet.

### 4.3 Biobrenseltørking

Biobrenseltørker er i dag ikke vanlig å benytte for fortørking av fyrstoffet før forbrenning. Biobrenseltørker ble benyttet i utstrakt grad i masse- og papirindustrien på 1970- og 80-tallet (Holmberg, 2007), samt også på en del sagbruk. Hovedårsaken til at det ble investert i biobrenseltørker den gangen var sannsynligvis høy oljepris som følge av to oljekriser. I noen tilfeller reduserte høy biobrenselfuktighet kjelkapasiteten i anlegget så mye over tid, at det ble lønnsomt å investere i en tørke i kombinasjon med fyranlegget. De fleste biobrenseltørkene som ble benyttet den gangen var tørker hvor røykgassen ble benyttet direkte som tørkemedium (Pellikka & Saviharju, 1983). De mest vanlige typene tørker var drumtørker, kaskadetørker og pneumatiske tørker.

De mest benyttede forbrenningsanleggene den gang var utstyrt med stokerinnmating og skrårist. I norsk sagbruksindustri er dette fortsatt de eneste anleggene som benyttes. Denne type forbrenningsanlegg kan behandle biobrensel med varierende trefuktighet, men ideelt sett bør fuktigheten ligge et sted mellom 50 % og 60 %. I vinterhalvåret kan imidlertid fuktigheten i barken bli over 70 %, noe som gjør at det blir vanskelig å opprettholde en stabil fyring uten tilsetning av tørrere (og dyrere) sortimenter som tørr hoggerflis og sagflis. I noen tilfeller kan det også bli nødvendig å benytte oljebrenner, ut over topplast, for å kompensere for den dårlige termiske virkningsgraden. Hovedårsakene til at tørkeanlegg for biobrensel ikke benyttes i trelastindustrien i dag er:

- Dårlige driftserfaringer
- Økonomiske aspekter

#### 4.3.1 Dårlige driftserfaringer

Biobrensel er et brennbart materiale med heterogen (uensartet) partikkelstørrelse. Samtidig er det vanlig at bark og flis gjennom produksjonsprosessen og gjennom transporten frem til stokerinnmatingen i fyranlegget vil ta opp stein, sand og andre forurensninger. Egenskapene til biobrenselet stiller derfor strenge krav til utstyr og drift av et tørkeanlegg.

Driftsmessige erfaringer ved bruk av anlegg for tørking av biobrensel ved bruk av røykgass har ikke alltid vært tilfredsstillende, noe som har ført til at slike anlegg har blitt fjernet. En nødvendig forutsetning for at en investeringsbeslutning kan tas er derfor at biobrenseltørken er robust nok til å kunne håndtere ulike biobrenselsortimenter med varierende grad av forurensninger og fuktighet, og at behovet for vedlikehold er et minimum. Samtidig vil det for enkelte anleggstyper være knyttet en viss brannfare, noe som gjør at risikoen blir for høy i forhold til lønnsomheten, som kommer med mer stabile driftsforhold i forbrenningsanlegget.

Fordeler og ulemper med ulike typer biobrenseltørker er gitt i *Tabell 2*.

### 4.3.2 Økonomi

Etter oljekrisen på 70-tallet falt energiprisene, og investeringer i biobrensel tørker var ikke lenger økonomisk forsvarlig for sagbruksbransjen. På grunn av fraværet av økonomiske drivere, ble det ikke lengre fokus på å drive fyranleggene på en mest mulig energieffektiv måte. Uttrykket "å fyre for kråkene" henger fortsatt igjen hos fyr- og tørkeoperatører omkring på norske sagbruk fra denne tiden. Biobrenselet ble ikke sett på som en ressurs, men som et avfallsproblem som man ønsket å bli kvitt mest mulig av gjennom forbrenning for å unngå deponiavgifter. Dette fokuset gjorde også at forbrenningsanleggene som ble utviklet var relativt robuste, og tålte store variasjoner i fuktighet gjennom "smart" forbrenningsteknologi.

I dag er imidlertid fokus endret, og økonomiske drivere som for eksempel kvotehandel med CO<sub>2</sub> og utvikling av et fungerende biobrenselmarked, gjør at tørking av biobrensel for videresalg på sikt kanskje kan forsvares økonomisk også i Norge.

### 4.3.3 Miljø

Det er også noen miljømessige vurderinger som vil komme inn dersom en investeringsbeslutning tas om å kjøpe et tørkeanlegg for biobrensel. Alle typer trevirke inneholder flyktige organiske forbindelser, såkalte VOC (Volatile Organic Compounds), som i større eller mindre grad vil slippes ut når vannet i treet fordamper (Wimmerstedt, 1999). Hvilke utslippsgrenser som gjelder for organisk materiale er fastsatt i Forurensingsloven (Miljøverndepartementet, 2004). Utslippene ved tørking av biomasse avhenger sterkt av tørketemperaturen når denne blir høyere enn 100 °C (Fagernäs & Sipilä, 1996). Ved temperaturer under 100 °C er utslippene rapportert å være lave (Fagernäs & Sipilä, 1996, Spets & Ahtila, 2004).

Tørketemperaturen i en røykgassfyrte biobrensel tørke vil være høyere enn 100 °C (se Tabell 2). Avgasser eller forurenset kondensat fra vanddampen må derfor behandles etter tørken dersom de inneholder for store konsentrasjoner av VOC. En slik behandling gjør at totalkostnadene ved tørking av biobrenselet øker.

Tabell 2. De mest benyttede direktefyrte biobrenselstørker.

Tørketype	Tørkemedium	Tørketemp.	Fordampningsrate	Varme og el. forbruk	Fordeler	Ulemper
Trommel	Røykgass	200-600 C	3,6-20 $t_{H_2O}/h$	Varme: 4,5-4,2 $MJ/kg_{H_2O}$ EI: 10-50 $kWh/t_{tm}$	- Egnert for biobrenslar m/heterogen partikkelstørrelse - Robust - Lav vedlikeholdskostnad	- Støy og lukt problemer - For grov bark kan gi blokkering - Brannrisiko etter tørke, og ved stans
Fixed bed	Luft	30-150 C	0,5-40 $t_{H_2O}/h$		- Egnert for biobrenslar m/heterogen partikkelstørrelse - Egnert for lavtemp. tørkigign med lang oppholdstid - Robust - God kontrollerbarhet	- Store dimensjoner på tørkene - Brannrisiko inni tørken
Kaskade	Røykgass	160-208 C	0,8-7 $t_{H_2O}/h$	Varme: 5,8 $MJ/kg_{H_2O}$ EI: 10-15 $kWh/t_{tm}$	- Egnert for biobrenslar m/heterogen partikkelstørrelse - Fornuftig dimensjon på tørken - For det meste robust	- Korrosjon og erosjon - Brannrisiko etter tørke, og ved stans - Lange barkstrimler fester seg i bevegelige deler
Flash	Røykgass	150-700 C	10-26 $t_{H_2O}/h$	Varme: 3,7 $MJ/kg_{H_2O}$ EI: 60-120 $kWh/t_{tm}$	- Små dimensjoner på tørken - RG typen er robust - Varmefor-bruket i damp typen er lavt, dersom varmen generert i tørken gjenvinnes	- Ikke så godt egnet for store partikkelstørrelser - Korrosjon og spesielt erosjonsproblemer => Høye vedlikeholdskostnader - Brannrisiko etter tørke, og ved stans
	Damp	Temp avhenger av trykk og grad av overheting. Vanligvis $T > 150$	6-30 $t_{H_2O}/h$	Varme: 400-1000 $kJ/kg_{H_2O}$ EI: 60-120 $kWh/t_{tm}$		- Det er rapportert problemer med lekkasje og inn/utkjøring av biobrensel
-	$t_{H_2O}$ : tonn vannmengde ( $H_2O$ ) fordampet					
-	$t_{tm}$ : tonn tørt materiale (biobrensel) produsert					



## 4.4 Investeringsanalyse for et tørkeanlegg for biobrensel

En mulighet som ble diskutert på KSH for å ha bedre kontroll på fuktigheten i biobrenselet, var en eventuell investering i en røykgasstørke for nedtørking av barken. Tørking av biomasse vil i stor grad påvirke de totale brenselkostnadene, og det bør derfor velges en så enkel løsning som mulig. Det er blitt hevdet at det pr. i dag ikke finnes noen økonomisk attraktive metoder for å tørke biomasse for storskala anlegg. På grunn av dette er forbrenningsanleggene utformet slik at de kan utnytte et vidt spekter av fuktighetsvariasjoner i biobrenselet (Van Loo & Koppejan, 2008).

Det er flere problemstillinger som vil måtte belyses før et eventuelt innkjøp av et biobrenselanlegg. En vurdering som må gjøres er den logistikkmessige håndteringen av fyrstoffet dette vil medføre.

En biobrensel tørke vil vanligvis gi en fuktighet på 10-15 %. Da fyranlegget ved KSH fungerer best i området omkring 55 % fuktighet, vil med andre ord funksjonen til den tørkede barken fra et slikt anlegg være å bli blandet inn i den fuktige 90/10-blandingen i de periodene på året da fuktigheten i denne blir for høy. Den tørre barken vil derfor måtte lagres et sted, og andeler av denne tas ut ettersom fuktigheten måles i 90/10-blandingen. Et eventuelt overskudd av den tørre barken vil kunne selges til Krokrom ved Østersund, sammen med vanlig rå bark og andre sortimenter.

### 4.4.1 Økt inntekt ved levering av tørt biobrensel

Det antas at bedriften ønsker å tørke all bark som i dag leveres til Krokrom, i tillegg til 25 % av 90/10-blandingen som går til intern fyring. Det er videre antatt at biobrenselet vil ha en gjennomsnittlig fuktighet over året på 55 %, med ønske om å tørke dette ned til 15 %.

Bedriftens egne tall viser at de får betalt for biobrenselet med en brennverdi tilsvarende 47 % fuktighet (1668 kWh/fm<sup>3</sup>). En nedtørking av 90/10-blandingen til 15 % vil øke den effektive brennverdien til 1 830 kWh/fm<sup>3</sup>. Bedriften leverer årlig 4 700 fm<sup>3</sup> revet bark til Krokrom. Med andre ord vil den økte energileveransen være  $4\,700 \times (1\,830 - 1\,668) = 761\,400$  kWh pr. år. KSH får 6,06 øre/kWh, noe som vil gi bedriften en økt inntekt på 46 141 kr/år for levering av tørt biobrensel.

I tillegg til tørkingen av biobrenselet for ekstern leveranse, ville det være ønskelig å tørke 25 % av biobrenselet som benyttes til intern bruk, for å sikre mer stabile driftsforhold, spesielt ved svært fuktig brensel om vinteren. Bedriften benytter omkring 5 300 fm<sup>3</sup> granbark og 530 fm<sup>3</sup> rå sagflis pr. år til egen fyring. For enkelhets skyld slås sortimentene sammen. Bedriften vil da måtte tørke 1 458 fm<sup>3</sup> biobrensel for internt bruk og 4 700 fm<sup>3</sup> for ekstern leveranse, totalt 6 158 fm<sup>3</sup>/år.

#### 4.4.2 Investeringskostnader

Det er vanskelig å gi et eksakt anslag på hva investeringskostnadene vil komme på for en biobrensel tørke tilpasset volumet sekundærprodukter ved KSH. Det vil blant annet avhenge av hvilken type biobrensel tørke som velges, og hvor store volum bedriften ønsker å tørke. En svensk undersøkelse (Johansson et al., 2004) har sett på investeringskostnader for ulike typer biobrensel tørker fra en rekke leverandører. Ved å sammenligne opplysningene som fremkommer fra de ulike leverandørene, gis følgende sammenheng mellom kostnadene for en komplett installasjon:

$$\text{Anleggskostnad} = 0,2 \cdot \left( \frac{\text{Volumstrøm varmluft}}{1000} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \right)^{0,8} \quad [\text{MSek}] \quad (4.1)$$

Anleggskostnadene inkluderer prosjekteringskostnader, grunnarbeid med bunnplate, etc., transportører til og fra tørkeanlegget, samt el. forsyning. Formelen er blant annet basert på beregninger for et relativt stort sagbruk i Malå, Sverige, hvor det produseres ca. 200 000 m<sup>3</sup> skurlast pr. år. Det bemerkes at ligningen som fremkommer er i millioner svenske 2004-kroner. I tillegg anslås det at kostnadene kan avvike fra ligning 4.1 i størrelsesorden - 15 % til + 30 %.

Samme undersøkelse viser til følgende formel for nødvendig installert elektrisk effekt i biobrensel tørken:

$$\text{Installert el. effekt} = 0,6 \cdot \left( \frac{\text{Volumstrøm varmluft}}{1000} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \right) \quad [\text{kW}] \quad (4.2)$$

Bakgrunnsdata for å kunne benytte ligningene er gitt i Tabell 3.

Tabell 3. Grunnlagsdata for investeringsanalyse av biobrensel tørkeanlegg.

<b>Produksjon pr. år</b>	47 000	m <sup>3</sup> skurlast pr år
<b>Driftstid</b>	11	måneder
<b>Produksjon pr. time</b>	5	m <sup>3</sup> tørket virke/time
<b>Utbytte skurlast</b>	51	%
<b>Bark</b>	12 %	kg ts <sup>2</sup> /kg ts tømmer
<b>Basisdensitet</b>	390	kg ts/m <sup>3</sup>
<b>Barkmengde</b>	91,8	kg ts/m <sup>3</sup> skurlast
<b>Strømningsrate, bark</b>	0,5	tonn ts/time
<b>Strømningsrate, rå sagflis</b>	0,4	tonn ts/time
<b>Total biobrenselmengde</b>	0,9	tonn ts/time

<sup>2</sup> ts = tørrstoff

Dataene i *Tabell 3* benyttes sammen med ligning 4.1 og 4.2 for beregning av anleggskostnader og installert elektrisk effekt i *Tabell 4*.

*Tabell 4. Spesifikasjoner for biobrensel tørkeanlegg.*

<b>Total biobrenselmengde</b>	0,9	tonn ts/time
<b>Fuktighet inn</b>	55	%
<b>Fuktighet ut</b>	15	%
<b>Tørkemedium</b>	Varmluft	
<b>Temperatur på tørkeluft før tørke</b>	65	°C
<b>Volumstrøm varm luft</b>	25 850	m <sup>3</sup> luft/time
<b>Beregnet anleggskostnad</b>	2 697 731	SEK (2004-kroner)
<b>Beregnet installert elektrisk effekt</b>	15,5	kW

Anleggskostnaden er beregnet til ca. 2,7 mill. 2004-SEK, eller 2,47 mill. 2004-NOK. Dette tilsvarer 2,68 mill. 2008-NOK (Norges Bank, 2009).

Det bemerkes at ligning 4.1 for beregning av anleggskostnad er empirisk, og har fremkommet gjennom analyse av anlegg med noe større tørkekapasitet enn det vil være behov for ved KSH. Det er derfor ikke sikkert at anleggskostnadene er helt lineære når volumene blir mindre, slik at den estimerte anleggskostnaden nok i realiteten vil være noe større.

#### 4.4.3 Investerings- og driftskostnader

Den beregnede anleggskostnaden er satt opp i en investeringskalkyle sammen med el. forbruket og antakelsen om videresalg av 4 700 fm<sup>3</sup> bark (som før) under følgende forutsetninger:

- Driftstid: 7 920 timer
- Brennverdi: Fuktig brensel: 1 668 kWh/fm<sup>3</sup>, tørket brensel: 1 830 kWh/fm<sup>3</sup>
- Varme til tørkeanlegget antas å være gjenvunnet (kostnadsfri) spillvarme
- Vedlikeholdskostnader: 2 % pr. år av totalinvesteringen for anlegget
- Drift: Ett årsverk, 300 000 kr/år
- El. pris: 50 øre/kWh

Tabell 5. Økonomien for en varmluftsdrevet biobrensel tørke under dagens betingelser.

Slutfuktighet	15	%
Brennverdi fuktig brensel	7 839 600	kWh/år
Brennverdi tørket brensel	8 601 000	kWh/år
Økt brennverdi	761 400	kWh/år
El. forbruk (80 % av inst. effekt)	98 271	kWh/år
<b>Brenselskostnader</b>		
Fuktig brensel, salgsv verdi	6,06	øre/kWh
Fuktig brensel, inntjening	475 080	Kr/år
Tørket brensel, salgsv verdi	6,06	øre/kWh
Tørket brensel, inntjening	521 221	Kr/år
<b>Inntekter</b>		
<b>Inntjening pga. økt brennverdi</b>	46 141	Kr/år
<b>Kostnader</b>		
El. forbruk (50 øre/kWh)	49 136	Kr/år
Vedlikeholdskostnader	53 651	Kr/år
Drift	300 000	Kr/år
<b>Sum kostnader</b>	402 787	Kr/år
<b>Resultat</b>		
Årlig nettoinntekt	-356 646	Kr/år
Total anleggskostnad	2 682 542	Kr

Det går klart fram fra Tabell 5 at et innkjøp av en biobrensel tørke ved KSH ikke kan anbefales med dagens forutsetninger. Det er flere faktorer som fører til at resultatet blir negativt, men i første rekke er prisen for biobrenselet for lav og volumet som selges (4 700 fm<sup>3</sup>) for lite. En analyse viser at prisen på biobrenselet ville ha måttet være 53 øre/kWh for å kunne gå break-even med driftskostnadene.

Prisdifferansen mellom videresalg av biobrensel (6,06 øre/kWh) og prisen bedriften får for fjernvarmeleveransen til TINE (22 øre/kWh) er også for stor til at det pr. i dag er aktuelt å tenke på å investere i et biobrensel tørkeanlegg.

Det er i denne sammenheng ikke tatt hensyn til de driftsmessige fordelene som bedriften vil få med en mer homogen fuktighet i biobrenselet til intern bruk, i form av mindre nedetid og lavere vedlikeholdskostnader. Det er likevel ikke sannsynlig at disse fordelene vil være store nok til at et innkjøp av en biobrensel tørke vil kunne forsvares.

#### 4.5 Undersøkelse av varmgang i barklager

På bakgrunn av investeringsanalysen vedrørende innkjøp av biobrensel tørke og diskusjoner omkring muligheten for å få bedre kontroll og bedre logistikk løsninger for fyrstoffet på KSH, ble det besluttet å kjøre et forsøk hvor den såkalte varmgangen i barklageret ble undersøkt.

Den høye fuktigheten i barken, spesielt i vintermånedene, gir dårlig forbrenning og lavt effektuttak i kjelen, noe som igjen kan gi utfordringer med drift av trelasttørkene og fjernvarmeleveransen til TINE. I tillegg til høy fuktighet, oppstår ofte problemer med is og klumping, som i tillegg til fyringsproblemene også gir problemer med innmatingen.

#### 4.5.1 Mikrobiell aktivitet i biobrensel

Alt biologisk materiale er infisert av omgivende mikrober, mikrosopper og bakterier. I et voksende tre er forsvarssystemet så effektivt at mikrobenes ikke kan trenge inn. Rent mekanisk beskytter barken treet mot angrep. Når treet hogges, endres trematerialet fysisk og kjemisk. Både omgivelser og materialeegenskaper styrer de biologiske prosessene gjennom å sette forutsetninger for mikrobenes tilvekst og overlevelsessevne (Lehtikangas, 1999).

Det er to grunner som gjør det viktig å se på den mikrobiologiske aktiviteten ved lagring:

- Håndtering av lagret biobrensel innebærer alltid en risiko for at man puster inn sopp sporer. Den mikrobakterielle tilveksten trenger ikke være synlig for at konsentrasjonen av sporer i luften kan øke til et nivå som kan gi allergiske reaksjoner (et vanlig begrep på denne tilstanden er *justerverksyke* - den medisinske betegnelsen er *allergisk alveolitt*). En person som puster inn store mengder muggsopp sporer kan utvikle influensalignende anfall med tørrhoste, hodepine, feber, frysninger, smerter i muskler og ledd og eventuelt tung pust. Reaksjonen kommer vanligvis 4-8 timer etter eksponering (Arbeidstilsynet, 2002).
- Den mikrobiologiske aktiviteten kan også gi nedbryting av materialet og tørrstofftap. Optimal temperatur som gir gode vekstvilkår for de fleste mikroorganismene er mellom 20 °C og 40 °C. Et biobrensel lager gir også den næring mikroorganismene trenger. Samtidig trenger de ikke mye oksygen for å overleve. Selv i en kompakt barkhaug er det sjelden så lite oksygen at dette er en begrensende faktor for tilvekst. Under gode vekstvilkår produserer mikroorganismene vann og CO<sub>2</sub>, samtidig som varme avgis. Varmen som avgis på grunn av den mikrobakterielle aktiviteten gir varmeutvikling i biobrenselhaugen.

Ideen bak undersøkelsen var å kunne benytte varmen fra de biologiske nedbrytningsprosessene som skjer etter en tid i biobrensel lager med høy fuktighet, til å tørke brenselet før innmating i fyranlegget. Det ble besluttet å foreta en måling av temperatur- og fuktighetsutviklingen i barken som lagres utendørs.

#### 4.5.2 Måleutstyr og instrumentering av barkhaug

Det ble benyttet hjullaster for å legge opp en ca. 3,5 meter høy barkhaug, og måleutstyr ble lagt i tre nivåer på henholdsvis 1 meter, 2 meter og 3 meter inne i haugen, se *Figur 4*.



*Figur 4. Instrumentering av barkhaug ved KSH.*

Følgende måleutstyr ble plassert inne i barkhaugen:

- Seks *TinyTag* temperaturloggere ble lagt inn i de tre nivåene i haugen, to i hvert nivå.
- Fire termoelementer ble koblet til et *InTab Multimeter* med logger. Et termoelement ble lagt i nederste nivå i barkhaugen, to i nivået i midten og ett i det øverste nivået.

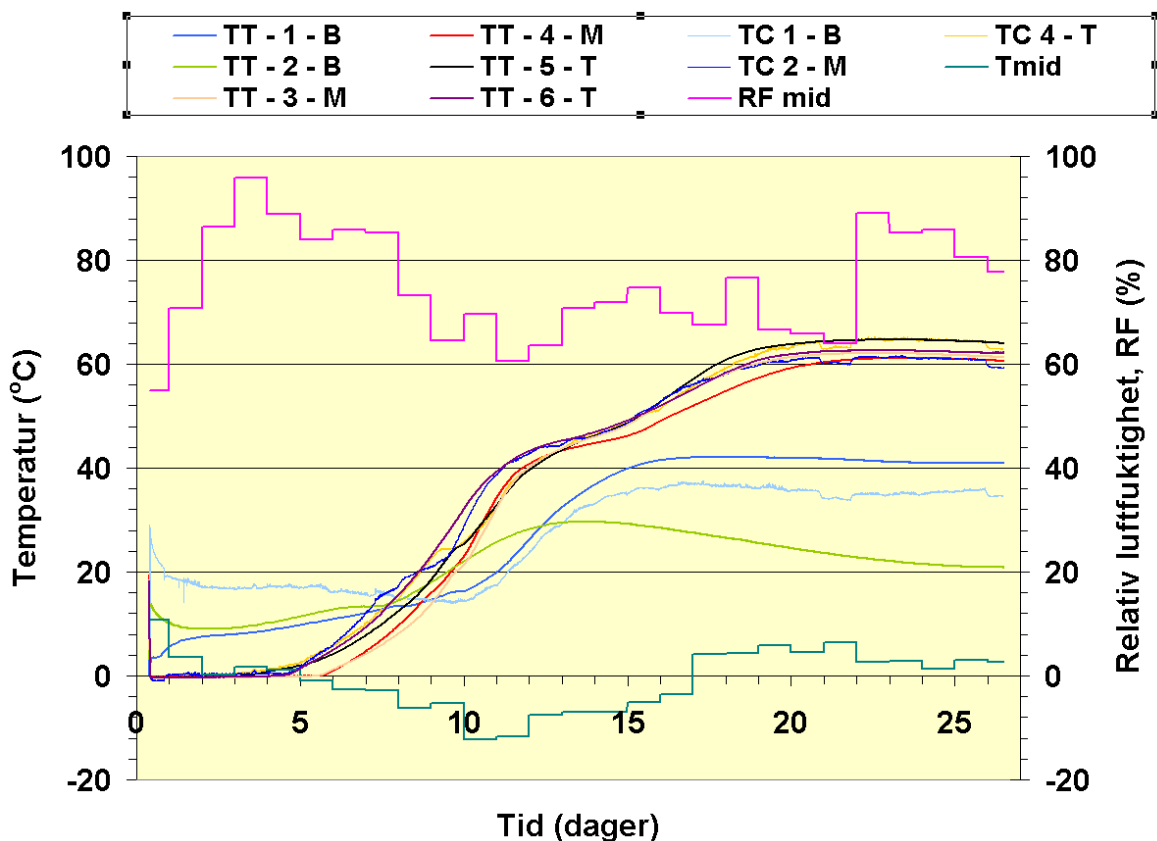
En *TinyTag* RF-logger ble lagt noen meter fra barkhaugen for kontroll av utetemperatur og relativ luftfuktighet.

### 4.5.3 Resultater fra måling av varmgang i barkhaug

#### Temperaturmålinger

Temperaturen i barkhaugen ble sjekket underveis av ansatte ved KSH på daglig basis ved å lese av målingene for de fire termoelementene på InTab-multimeteret.

Målingene foregikk over en periode på 27 døgn, og forsøket ble avsluttet etter at det hadde blitt observert at temperaturen hadde ligget stabil på omkring 60-65 °C i ca. en uke for de termoelementene som viste den høyeste temperaturen, se *Figur 5*.



Figur 5. Temperaturmålinger i barklager ved KSH.

På figuren er TinyTag temperaturloggerne nummerert med *TT* fra 1-6, og med angivelse av hvor de var plassert i barkhaugen (*B* = *bunn*, *M* = *midt* og *T* = *topp*). På samme måte er termoelementene nummerert med *TC*. Tilkoblingen til multimeteret for ett av termoelementene (*TC 3*) var dårlig, og avlesningene fra dette er derfor ikke tatt med i figuren. Midlere luftfuktighet for hver dag er angitt med *RF mid*, og midlere utetemperatur med *Tmid*.

### **Fuktighetsmålinger før varmgang**

For å kunne kontrollere reduksjonen i fuktighet som det var håp om at varmgangen i barkhaugen skulle gi, ble det tatt ut totalt 22 fuktighetsprøver fra de tre nivåene med temperaturmålere i barkhaugen. Det ble tatt ut ti prøver i det nederste nivået, åtte prøver fra nivået i midten og fire prøver fra det øverste nivået. Prøvene ble lagt i plastposer og veid på stedet.

Prøvene ble deretter fraktet til Treteknisk for tørking og ny veiing. Tørkingen foregikk ved 103 °C over flere døgn. Prøvene ble tatt ut og veid flere ganger i denne perioden inntil stabil vekt var oppnådd.

Målingene viser en gjennomsnittlig fuktighet i barken på 66,8 %, med et standardavvik på 2,0 %. Barken var med andre ord lite brennbar da temperaturmålingene ble startet.

### **Fuktighetsmålinger etter varmgang**

Ved avslutningen av forsøket ble det tatt ut fuktighetsprøver fra hvert av nivåene i haugen, samtidig med at termoelementene og TinyTag-loggerne ble tatt ut. Det ble tatt ut samme antall prøver fra de tre nivåene som ved starten av forsøket, henholdsvis ti, åtte og fire prøver fra bunn til topp.

Prøvene ble lagt i plastposer og veid på stedet, og deretter fraktet til Treteknisk for tørking og ny veiing. Tørkingen foregikk ved 103 °C inntil stabil vekt var oppnådd.

Målingene viser at selv om temperaturen har økt i barkhaugen i løpet av en måned, så er likevel den gjennomsnittlige fuktigheten i barken hele 66,3 %. Standardavviket har gått noe ned, til 1,5 %.

Resultatet viser at det vil ta lang tid fra det oppnås varmgang i barken, til det får noen positiv innvirkning på fuktigheten. Prøvene ble tatt ut vel en uke etter at temperaturene i de øverste lagene hadde nådd stabil temperatur på omkring 60 °C.

#### **4.5.4 Konklusjon**

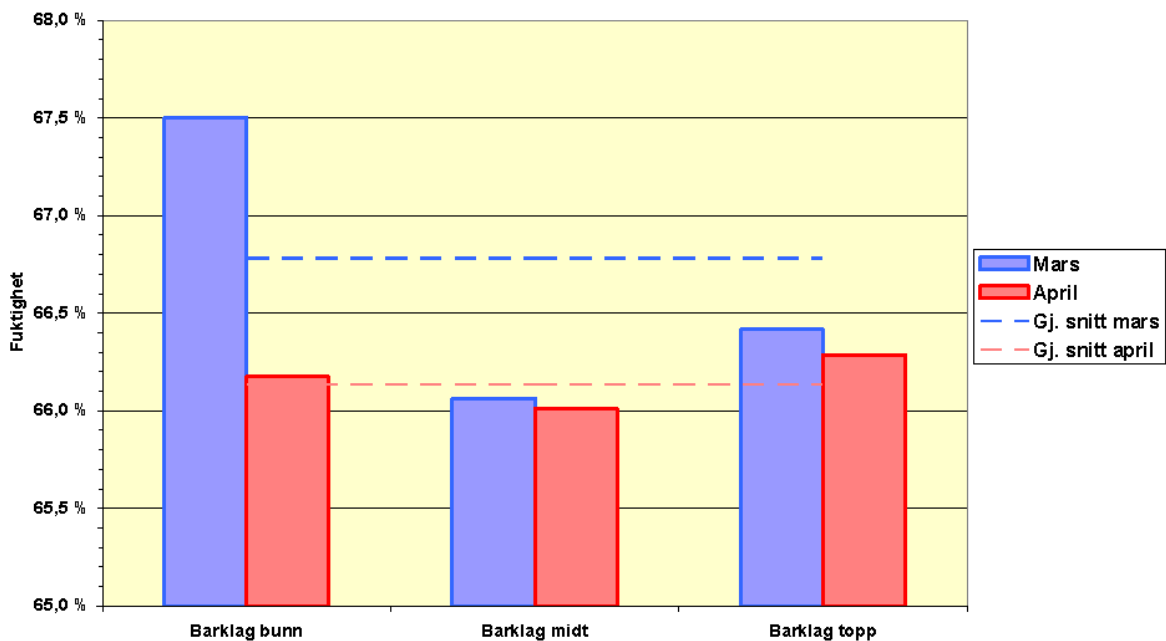
Fuktprøvene som ble tatt før og etter temperaturmålingene ble igangsatt, viste en gjennomsnittlig reduksjon på bare 0,5 %, se *Figur 6*.

Den var størst nedtørking i bunnen av barkhaugen. I løpet av en måned skjer det en omfordeling og utjevning av fuktigheten. Varmgangen, på grunn av den mikrobiologiske aktiviteten, fører til at det foregår en fuktighetstransport fra bunnen og oppover i barkhaugen.



En reduksjon i biobrenselfuktigheten på bare 0,5 % i løpet av en måned gir et ubetydelig bidrag med hensyn til å gi en mer effektiv forbrenning. Det vil være uhensiktsmessig å øke lagringstiden utendørs ytterligere for at fuktinnholdet skal gå ned.

Det bør undersøkes alternative metoder å tørke biobrenselet på. Lagring under tak er å anbefale dersom innendørs lagring ikke er mulig. Tildekking med presenning kan være en idé i perioder med mye nedbør, men dette krever god ventilering, for eksempel ved små hull i presenningen. En svensk undersøkelse (Lehtikangas & Jirjis, 1998) viser at i perioder med lite nedbør kan den beste løsningen være åpen lagring utendørs, da tildekking med presenning og dårlig ventilering gjør at kondens oppstår under dekket, noe som fører til dårlig tørking.



Figur 6. Fuktighetsprøver fra utendørs barklager ved Kjeldstad Sagbruk & Høleri AS.

I utendørs lagringsforsøk ved Trysil Tre (Sandberg, 1990) ble det støpt hellende betongdekke for utendørs lagring av bark. Dette er en løsning som KSH kan vurdere, både for å sikre avrenning av vann, og for å unngå forurensninger (sand og stein) i biobrenselet.

#### 4.6 Bygging av transportør for bedre kontroll av biobrenselfuktigheten

Den store variasjonen i fuktighet skapte i starten utfordringer med driften internt på KSH og med varmeleveransen eksternt til TINE. For å ha bedre kontroll på fyrstoffet ble det besluttet å bygge en transportør som førte barken ut på tomte

istedenfor direkte inn i siloen. På denne måten er det enklere å blande inn tørt fyrstoff med hjullaster ute på tomte i de periodene hvor barken blir for fuktig, se *Figur 7*.

Før transportøren ble bygget ble siloen fylt opp av bark og rå sagflis som, når den var for fuktig, måtte transporteres ut på tomte med hjullaster for innblanding av tørrere fyrstoff. Deretter måtte den nye brenselblandingen transporteres på nytt inn i siloen igjen.



*Figur 7. Bygging av transportør for bedre kontroll av fyrstoffet.*

## 5 Brennverdier for blandings assortimenter

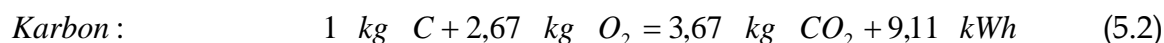
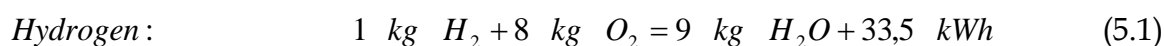
For bedre å kunne kontrollere energimengdene i fyrstoffet som benyttes ved KSH, er det viktig med en kartlegging av fuktigheten i biobrenselet, biobrenselvolumer og brennverdien for de ulike biobrensel assortimentene som benyttes.

Dette kapitlet forklarer hvordan brennverdien i bark, og brennverdien i en blanding av bark og rå sagflis, vil påvirkes ved innblanding av ulike mengder tørr hoggerflis. På bakgrunn av de undersøkelser som ble gjort i prosjektet er det utviklet en programvare for bestemmelse av innblandingsforhold av tørt og fuktig biobrensel. Programmets virkemåte er beskrevet i kapittel 5.5.

## 5.1 Hva er brennverdi

Trevirke består i all hovedsak av grunnstoffene karbon, hydrogen og oksygen, pluss mineralstoffer (aske) og små mengder med nitrogen, svovel og klor. Mengden av de ulike grunnstoffer varierer fra treslag til treslag, og mellom ulike deler av treet. De forskjellige grunnstoffene har ulike brennverdier. Brennverdi er energiinnholdet per enhet brensel, og angir den kjemisk bundne energimengde som frigjøres når et grunnstoff forbrenner fullstendig.

Reaksjonsligningene ved fullstendig forbrenning av karbon og hydrogen ser slik ut (Belbo & Gjølshø, 2008):



## 5.2 Brennverdi – definisjoner

Det er tre forskjellige måter å angi brenselets energiinnhold på. Ved forbrenning av hydrogenholdig brensel (som biobrensel, olje og naturgass) dannes det vanndamp fra reaksjonen med hydrogen og oksygen. Ved brenning av fuktig brensel vil det gå med energi til å fordampe vannet i brenselet. Hvis vanndamp fra forbrenning og tørking av brenselet går ukondensert ut i skorsteinen, er fordampningsvarmen til dampen tapt. Tapt fordampningsvarme er opprinnelsen til de tre forskjellige brennverdibegrepene.

### 5.2.1 Øvre brennverdi

Øvre brennverdi,  $H_o$ , angir den energimengde som utvikles ved fullstendig forbrenning av brenselet og der all vanndamp, både den som er dannet under forbrenning og den som kommer fra vann i brenselet, kondenseres. Øvre brennverdi kan bestemmes enten ut fra brenselets kjemiske sammensetning eller måles ved hjelp av et bombekalorimeter. Øvre brennverdi angir dermed den reelle energimengden som omdannes til varme ved fullstendig forbrenning av biomassen. Større moderne varmeverk og varmekraftverk har gjerne røykgasskondensering, og dermed blir øvre brennverdi den teoretisk maksimale energimengden de kan hente ut av brenselet.

### 5.2.2 Nedre brennverdi

Nedre brennverdi,  $H_n$ , er øvre brennverdi minus fordampningsvarme til damp dannet under forbrenningen, det vil si vann som er dannet i reaksjonen mellom

hydrogen og oksygen. Nedre brennverdi angis på tørr askefri basis. Forskjellen mellom øvre og nedre brennverdi avhenger av hydrogeninnholdet i brenselet.

### 5.2.3 Effektiv brennverdi

Effektiv brennverdi,  $H_e$ , er definert som nedre brennverdi fratrukket fordampningsvarmen,  $r$ , som er nødvendig for å tørke brenselet til 0 % trefuktighet,  $F_r$ , og justert for askeinnholdet i brenselet. Formel for beregning av effektiv brennverdi pr. kg råvekt er:

$$H_e = H_n - (H_n + r) \times F_r \quad [kWh/kg] \quad (5.3)$$

For hvert kg med vann som skal fordampes fra en temperatur på 25 °C kreves 0,679 kWh energi til fordampingen. Rent trevirke inneholder 0,2–0,5 prosent aske, mens bark inneholder mer aske, typisk 4–5 prosent (Belbo & Gjølshj, 2008).

## 5.3 Brennverdier for biobrenselet ved Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS

Prøver som ble tatt ut ved temperatur- og fuktighetsmålingene på KSH våren 2008 ble sendt til Skog og landskap på Ås for analyse. I alt 22 prøver ble analysert. Resultatet viser at blandingen av 90 % bark og 10 % rå sagflis av gran (*Picea abies*), har en nedre brennverdi på 5,38 kWh/kg, med standardavvik på 0,24 kWh/kg. Dette er i god overensstemmelse med tidligere rapporterte verdier på biobrensel-sortimentene (se Tabell 6).

Tabell 6. Nedre brennverdi for gran.

Sortiment	Nedre brennverdi (kWh/kg)	Referanse
Biobrenselblanding, gran (90 % bark/10 % rå sagflis)	5,38	(Gjølshj & Horn, 2008)
Granbark	4,95-5,51	(Treteknisk, 2002)
Rå sagflis	4,99-5,28	
Granbark	5,47	(Belbo & Gjølshj, 2008)
Rå sagflis	-	
Granbark	5,11	(Sandberg, 1990)
Rå sagflis	5,32 <sup>3</sup>	

<sup>3</sup> Referansen angir gjennomsnittsverdien for alle sortimenter utenom bark ("alt annet trebrensel").

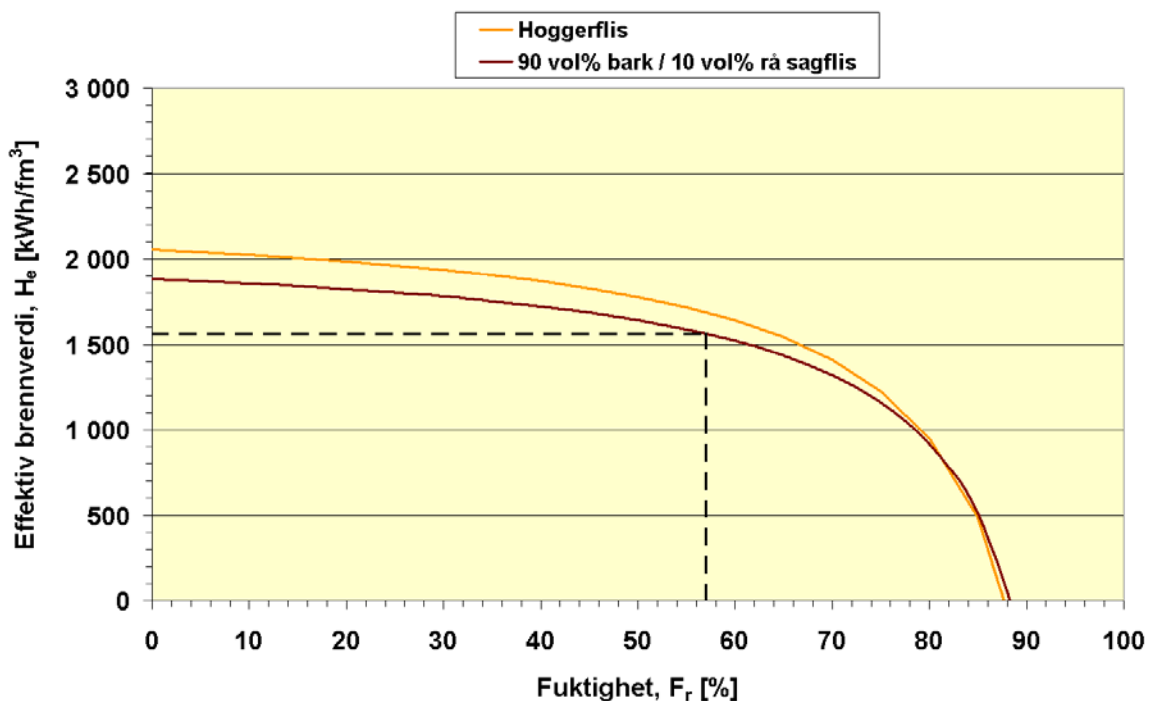
Av tabellen går det fram at det ikke er noen vesentlig forskjell i brennverdien på blandingen som benyttes ved KSH og brennverdien for ren bark.

## 5.4 Brennverdier for ulike blandinger av biobrenselstortimenter

Som vist i ligning (5.3), er den effektive brennverdien avhengig av fuktigheten i biobrenselet. Ved omregning fra brennverdi pr. vektenhet til brennverdi pr. volumenet, er det nødvendig å vite basisdensiteten,  $M$ , for biobrenselet. Ligning (5.3) blir da:

$$H_e = \left( H_n - r \times \frac{F_r}{1 - F_r} \right) \times M \quad [\text{kWh}/\text{fm}^3] \quad (5.4)$$

Ved å benytte dokumenterte normverdier for fastmasse og basisdensitet for bark- og sagflisblanding ved KSH, sammen med målt nedre brennverdi, fremkommer en kurve for effektiv brennverdi som funksjon av fuktigheten som vist i Figur 8. Figuren viser også effektiv brennverdi for hoggerflis.



Figur 8. Effektiv brennverdi som funksjon av fuktighet for hoggerflis og biobrenselblandingen ved KSH.

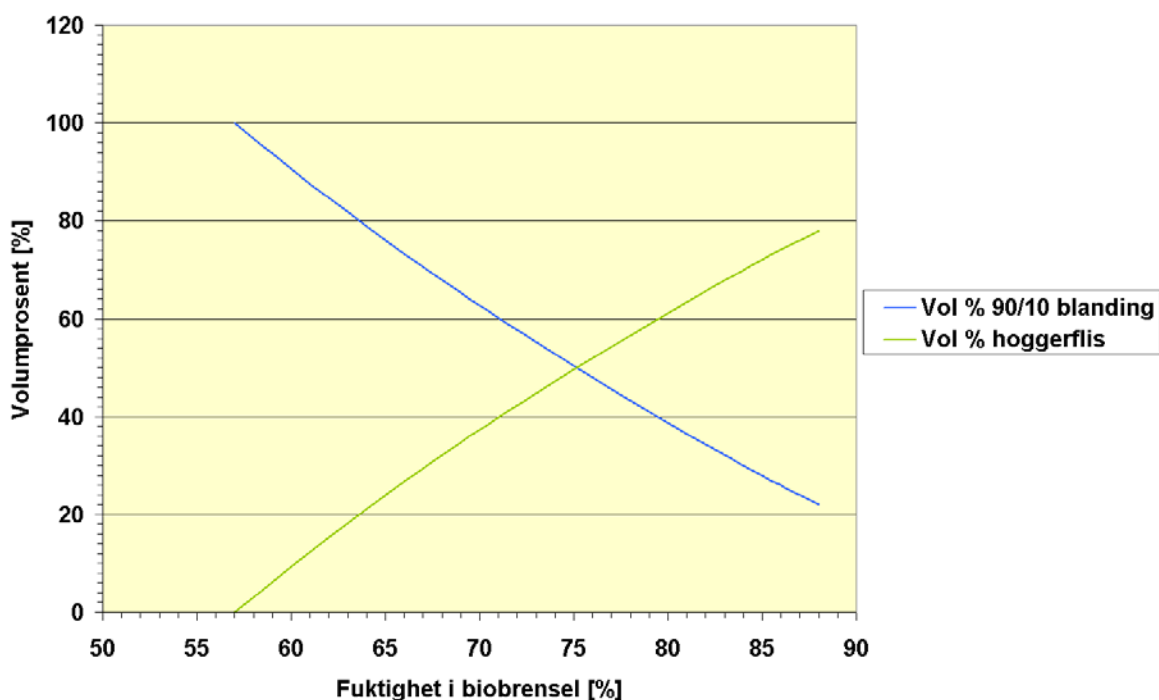
Dersom det antas at 57 % fuktighet er et optimalt område for forbrenning av biomasse i fyranlegget ved KSH, viser figuren at dette tilsvarer en effektiv brennverdi på ca. 1 560 kWh/fm<sup>3</sup>.

Dersom brennverdien skal opprettholdes på dette nivået ved høyere fuktighet i biobrenselblandingen, kan det tilsettes hoggerflis til blandingen. Fra figuren ser man at hoggerflis med 23 % fuktighet vil ha en brennverdi i underkant av 2 000 kWh/fm<sup>3</sup>. Blir fuktigheten i biobrenselet høyere enn 88 % vil brennverdien bli negativ.

Ved beregning av volumfraksjoner av 90/10-blanding og hoggerflis, er det mulig å gjøre et teoretisk anslag på hvor mye hoggerflis som må blandes inn ved fuktigheter i 90/10-blanding over 57 %.

Fyringsanlegget ved KSH får problemer med å opprettholde varmeleveransen når fuktigheten i brenselet blir så høy som 70 %. Det er derfor interessant å kunne vite hvor store mengder med relativt tørt fyrstoff som skal til for å opprettholde brennverdien også ved denne fuktigheten.

Figur 9 viser volumprosent av 90/10-blanding og hoggerflis med 23 % fuktighet for opprettholdelse av brennverdi på 1560 kWh/fm<sup>3</sup>. Det er i denne sammenheng antatt at fyringsanlegget fungerer optimalt ved 57 % fuktighet i 90/10-blanding



Figur 9. Volumprosent av 90/10-blanding og hoggerflis med 23 % fuktighet for å opprettholde samme brennverdi som ved 57 % fuktighet i blandingen.

## 5.5 Utvikling av programvare for teoretisk bestemmelse av innblandingsforhold av tørt og fuktig fyrstoff

Det er ønskelig til enhver tid å kunne vite hva som er optimalt innblandingsforhold med tørrere fyrstoff når 90/10-blandingen har for høy fuktighet.

På bakgrunn av dette er det utviklet en regnearkmodell som tar utgangspunkt i hvilken brennverdi som ønskes i fyrstoffet. Det antas med andre ord at brennverdi er den eneste faktoren som er bestemmende for hvor god virkningsgrad som oppnås i fyranlegget. Alle andre reguleringsmessige forhold med matehastighet, primær og sekundær luft, røykgasspjeld, etc. er i modellen antatt å være optimale for forbrenningsprosessen.

Den Microsoft Excel-baserte regnearkmodellen er kalt "Blandingsdata\_v0.xls", og baserer seg på innhenting av data fra beregnede tabellverdier av effektiv brennverdi,  $H_e$ . Tabellverdiene i programmet som er benyttet for fastmasse er basert på målingene som ble foretatt ved KSH, sammen med tabellverdier for densitet og nedre brennverdi,  $H_n$  (Treteknisk, 2002).

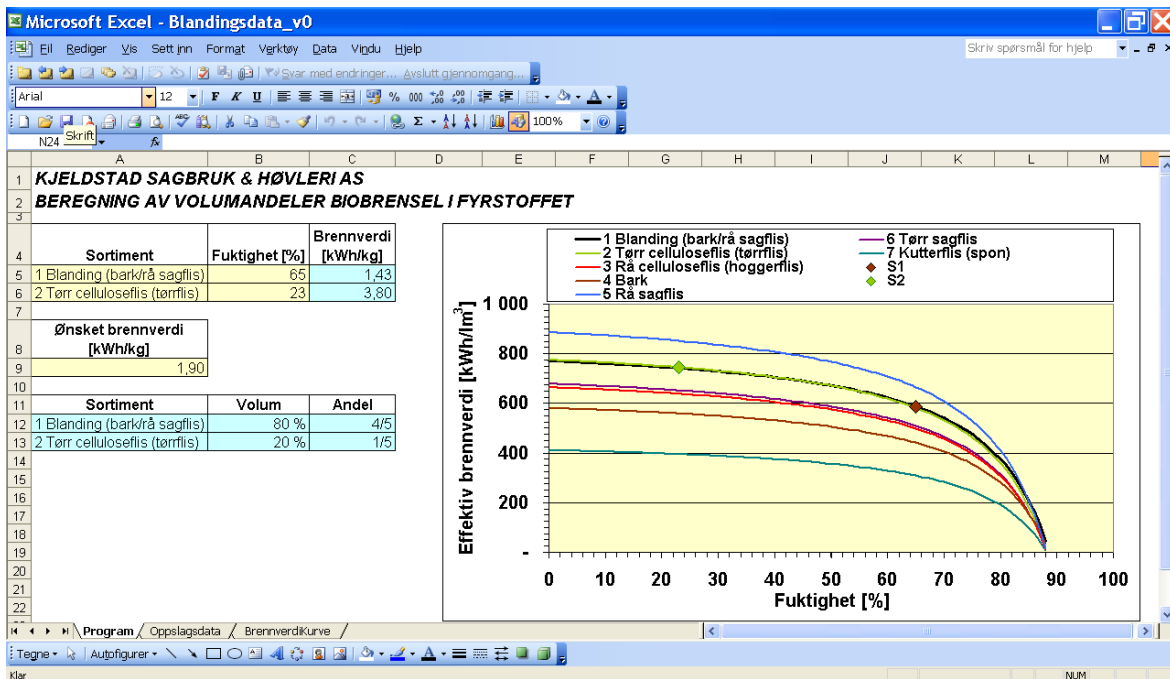
Arbeidsboken er hovedsakelig inndelt i to regneark; "Program" og "Oppslagsdata".

I arket "Program" legges det inndata. Brukeren må her angi fuktigheten i de to biobrensel-sortimentene man ønsker å benytte, samt angi en ønsket brennverdi i kWh/kg. Utgangspunktet for programmet er at brennverdien skal opprettholdes etter at fuktigheten i hovedfyrstoffet har økt. Derfor må det antas en referanseverdi hvor man erfaringsmessig vet at det oppnås en god forbrenning. Som et utgangspunkt for modellen er det antatt en effektiv brennverdi på 1,92 kWh/kg, som tilsvarer 57 % fuktighet i 90/10-blandingen, se Figur 10.

Hvilke biobrensel-sortimenter som skal benyttes og trefuktighet i de ulike sortimentene, velges fra rullegardinmenyer i cellene. Ønsket brennverdi velges ut fra hvilket fuktighetsnivå som man vanligvis har i biobrenselblandingen.

I de turkise cellene beregnes effektive brennverdier basert på oppslagsdata og trefuktighet for biobrensel-sortimentene som velges i cellene A5 og A6. Basert på disse dataene beregnes volumandeler av biobrensel-sortimentene, angitt både i volum-% og som brøkdeler. Da driftspersonell til enhver tid ønsker å vite *hvor mange skuffer tørrere biobrensel* som skal blandes inn i hovedfyrstoffet, er det bedre å angi mengdene som brøkdeler.

Effektiv brennverdi for sortimentene beregnes automatisk ut fra hvilke sortimenter og trefuktigheter som velges for blandingen som inndata.



Figur 10. Skjermbilde nr. 1 fra Windows Excel-programmet "Blandingsdata\_v0.xls".

Basert på den ønskede brennverdien som er valgt og brennverdiene for de enkelte sortimentene, beregnes ideelt blandingsforhold mellom sortimentene.

Modellen benytter data fra arket "Oppslagsdata", se Figur 11. I dette arket er det lagret data for de ulike brensel-sortimentenes fastmasse, FM, basisdensitet,  $\rho_m$ , og nedre brennverdi,  $H_n$ .

Den øverste tabellen viser beregnede verdier for effektiv brennverdi angitt i [kWh/kg], [kWh/fm<sup>3</sup>] og [kWh/lm<sup>3</sup>] for noen "standard" inn-verdier for fuktighet. Verdiene beregnes henholdsvis ved hjelp av ligningene 5.3, 5.4 og 6.1. For ligning 6.1, se kapittel 6.2.

Den effektive brennverdien i [kWh/kg] for de ulike sortimentene beregnes som funksjon av fuktigheten i første kolonne (fra rad nr. 16 i "Oppslagsdata"), og hentes inn i arket "Program", ut fra hvilken fuktighet og hvilket sortiment som er angitt.



Microsoft Excel - Blandingsdata\_v0

Ell Rediger Vis Sett inn Formål Verktøy Data Virudu Hjelp

Avslutt gjennomgang...

75%

K103

**OPPSLAGSDATA FOR BIOBRENSSELSORTIMENTENE VED KJELDSTAD SAGERUK & HØVLERI AS**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2											
3											
4											
5											
6	1	Blanding (barbå sagflis)	F0	Fr	fm	fm	Hs	Fest	Las	Kvadrat	
7	2	Terr celluloseflis (terris)	%	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	(kNm <sup>2</sup> )	
8	3	Få celluloseflis (hoggerflis)	40 %	123,2 %	95 %	5,38	2,03	1609	650	60,00	
9	4	Bark	38 %	29,9 %	23 %	5,14	3,80	1974	744	200,00	
10	5	Få sagflis	32 %	117,4 %	54 %	5,14	1,99	1732	589	270,00	
11	6	Terr sagflis	31 %	122,2 %	55 %	5,35	2,03	1577	489	60,00	
12	7	Kulterflis (spon)	43 %	132,6 %	57 %	5,14	1,82	1690	728	100,00	
13			33 %	13,6 %	12 %	5,14	4,44	2,08	686	100,00	
14			20 %	17,6 %	15 %	5,14	4,27	2,007	401		
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											
31											
32											
33											
34											
35											
36											
37											
38											
39											
40											
41											
42											
43											
44											
45											
46											
47											
48											
49											
50											
51											

**EFFEKTIVE BRENNVERDIER (kWh/kg)**

	1 Blanding (barbå sagflis)	2 Terr celluloseflis (terris)	3 Få celluloseflis (hoggerflis)	4 Bark	5 Få sagflis	6 Terr sagflis	7 Kulterflis (spon)
15	Fuktighet [%]	5,38	5,14	5,35	5,14	5,14	5,14
16		5,32	5,08	5,29	5,08	5,08	5,08
17		5,26	5,02	5,23	5,02	5,02	5,02
18		5,20	4,97	5,17	4,97	4,97	4,97
19		5,14	4,91	5,11	4,91	4,91	4,91
20		5,08	4,85	5,05	4,85	4,85	4,85
21		5,02	4,79	4,99	4,79	4,79	4,79
22		4,96	4,73	4,93	4,73	4,73	4,73
23		4,89	4,67	4,87	4,67	4,67	4,67
24		4,83	4,62	4,81	4,62	4,62	4,62
25		4,77	4,56	4,75	4,56	4,56	4,56
26		4,71	4,50	4,69	4,50	4,50	4,50
27		4,65	4,44	4,63	4,44	4,44	4,44
28		4,59	4,38	4,56	4,38	4,38	4,38
29		4,53	4,32	4,50	4,32	4,32	4,32
30		4,47	4,27	4,44	4,27	4,27	4,27
31		4,41	4,21	4,38	4,21	4,21	4,21
32		4,35	4,15	4,32	4,15	4,15	4,15
33		4,29	4,09	4,26	4,09	4,09	4,09
34		4,23	4,03	4,20	4,03	4,03	4,03
35		4,17	3,97	4,14	3,97	3,97	3,97
36		4,11	3,92	4,08	3,92	3,92	3,92
37		4,04	3,86	4,02	3,86	3,86	3,86
38		3,98	3,80	3,96	3,80	3,80	3,80
39		3,92	3,74	3,90	3,74	3,74	3,74
40		3,86	3,68	3,84	3,68	3,68	3,68
41		3,80	3,62	3,78	3,62	3,62	3,62
42		3,74	3,57	3,72	3,57	3,57	3,57
43		3,68	3,51	3,66	3,51	3,51	3,51
44		3,62	3,45	3,60	3,45	3,45	3,45
45		3,56	3,39	3,54	3,39	3,39	3,39
46		3,50	3,33	3,48	3,33	3,33	3,33
47		3,44	3,27	3,42	3,27	3,27	3,27
48		3,38	3,22	3,36	3,22	3,22	3,22
49		3,32	3,16	3,30	3,16	3,16	3,16
50		3,26	3,10	3,24	3,10	3,10	3,10
51							

Program Oppslagsdata Brenneverdierkurver /

Tegne Autofigur

Figur 11. Skjermutskrift nr. 2 fra Windows Excel-programmet "Blandingsdata\_v0.xls".

## 6 Måling av fastmasseandel

I forbindelse med at det skulle utvikles et system for energioppfølging, var det nødvendig å måle fastmassen for de ulike biobrensel-sortimentene som benyttes i fyrstoffet.

### 6.1 Fastmasse

Med fastmasse i et lass av bark eller flis, mener man hvor stort volumet av det faste trevirket i sortimentene er. Fastmasseprosenten (FM) forteller oss hvor stor prosentvis andel volumet av det faste trevirket er i forhold til lassets løsvolum.

Det er viktig å kjenne fastmassen for de ulike sortimentene for å kunne beregne brennverdien av fyringsmassen på en best mulig måte.

### 6.2 Faktorer som påvirker fastmasseprosenten

- *Fuktighetsinnholdet i sortimentene.* Høy fuktighet gjør biobrenselet tyngre og mykere, noe som fører til større sammenpressing av lasset og dermed høyere fastmasseprosent.
- *Densiteten.* Bark og flis med høy densitet vil presses mer sammen av egenvekten enn sortimenter med lavere densitet.
- *Temperaturen.* Lave temperaturer om vinteren vil gi en noe lavere fastmasseprosent enn om sommeren. Vintertemperaturen vil imidlertid i første rekke føre til at flisen blir mer småfallen og ujevn, noe som også vil gi en lavere fastmasse.
- *Dimensjon og variasjon i blandingsforhold mellom grove og fine sortimenter.* Bark og flis med varierende størrelse på de enkelte flisbitene har en høyere fastmasseprosent enn flis der alle biter er av jevn størrelse. Usåldet<sup>4</sup> flis vil følgelig ha en høyere fastmasseprosent enn såldet. Flisloggere som produserer en jevn størrelse på flisa vil derfor gi en lavere fastmasse pr. volumenet enn flis fra hoggere som gir flispartikler i alle størrelser. Såldingen ved sagbrukene er derfor avgjørende.
- *Snø og is.* I vintermånedene vil mulig innhold av snø og is i et lass føre til at løsvolumet tilsynelatende er større enn det vil være når snøen og isen smelter, og dermed medføre feil innmåling av flisvolumet.

---

<sup>4</sup> Flis som ikke er silet eller sortert etter flisstørrelse.

- **Innstilling av produksjonsutstyr.** Hvordan barkriver/filshogger er stilt inn, samt skarphet på knivene, vil ha betydning for geometrien på sortimentene, og dermed også på fastmassen.
- **Opplastingsmåte.** På KSH blandes bark og flis sammen ved at sortimentene går inn på transportør på over- og undersiden og faller fritt fra denne i et felles lass. Samtidig blir også noe av barken og flisa lastet opp med hjullaster i egne hauger. Sannsynligvis fører lasting med hjullaster til noe mer sammenpressing av sortimentene enn når de faller fritt fra transportør.

Det kan være mer hensiktsmessig å oppgi brennverdien pr. løskubikk istedenfor pr. kg. Da er det imidlertid nødvendig også å vite fastmasseandelen (FM) for biobrensel-sortimentene:

$$H_e = \left( H_n - r \times \frac{F_r}{1 - F_r} \right) \times FM \times M \quad [kWh/lm^3] \quad (6.1)$$

### 6.3 Målemetode fastmasse

Fastmasseandelen for sortimentene som benyttes kan måles ved å legge et kjent løsvolum av sortimentet i en vedsekk og dyppe denne i vann. Den fortrenkte væskemengden representerer da fastvolumet. I og med at trevirket tar til seg fuktighet, er feilkildene ved denne målemetoden større jo tørrere prøven er.

Fastmassemålingene ble foretatt ved å dyppe en 40 l sekk med de ulike biobrensel-sortimentene i et vannbad med kjent volum, og deretter måle mengden av det fortrenkte vannet, se *Figur 12*.



*Figur 12. Måling av fastmasse for biobrensel.*

## 6.4 Resultater fra måling av fastmasse

Målingene viser at fastmasseprosenten for bark var omkring 30 %. Dette er noe lavere enn vanlige normtall som ligger i området fra 35-70 %, avhengig av om barken er fersk, lagret i en barkhaug over tid, eller om den er sterkt komprimert (Treteknisk, 2002).

Når det gjelder blandingen av bark og rå sagflis, ble fastmassen målt til ca. 40 %. Fastmassen for rå sagflis ble målt til 43 %. Målingene er oppsummert i *Tabell 7*.

Det ble foretatt målinger på bark fra ulike høyder i barkhaugen, for å undersøke om fastmassen varierte mye fra bunn til topp. Prøver ble tatt ut fra henholdsvis 0,2 meter, 1,5 meter og 3,5 meter over bakken. Fastmassen varierte fra 24-32 %. Målingene er oppsummert i *Tabell 8*.

For hvert sortiment ble det tatt ut fem tørke-/veieprøver for fuktighetsmåling. Gjennomsnittsfuktigheten fra disse målingene er oppsummert i *Tabell 9*. Tabellen viser at fuktigheten for den tørre hoggerflisen var svært lav (7,3 %), og det er derfor mulig at disse prøvene ikke var tørket helt ned i tørkeskapet. Ellers er målingene omtrent som man kan forvente på denne årstiden.

*Tabell 7. Fastmassemålinger av biobrensel-sortimentene.*

Sortiment	Løsvolum [lm <sup>3</sup> ]	Fastvolum [liter]	Fastmasse, FM [%]
Bark	40	11,85	29,6
Rå sagflis	40	17,24	43,1
Tørr hoggerflis	40	15,08	37,7
Rå hoggerflis	40	12,93	32,3
Blanding (bark/rå sagflis)	40	16,16	40,4

*Tabell 8. Fastmassemålinger av bark ved ulike høyder i barklager.*

Høyde i barklager [m]	Løsvolum [lm <sup>3</sup> ]	Fastvolum [liter]	Fastmasse, FM [%]
0,2	40	12,93	32,3
1,5	40	12,39	31,0
3,5	40	9,70	24,2

Tabell 9. Fuktighetsmålinger av biobrensel-sortimentene.

Sortiment	Gjennomsnittsfuktighet	Standardavvik
Bark	48,3 %	4,3 %
Rå sagflis	35,6 %	7,4 %
Tørr hoggerflis	7,3 %	0,6 %
Rå hoggerflis	45,1 %	2,1 %
Blanding (bark/rå sagflis)	42,3 %	1,9 %

## 7 Energioppfølgingssystem

Energioppfølging er en systematisk og periodevis kontroll av energitilgang og energibruk, der energibruken sammenlignes med produksjonsvolum og eventuelle ytre faktorer, som for eksempel utetemperatur. Det er en fordel om systemet er tilpasset bedriftens allerede etablerte rapporteringsrutiner for produksjonsvolumer og økonomi.

Energioppfølgingssystemet skal vise hvor mye energi som brukes, hva energien blir brukt til, slik at det kan gi indikasjoner på sparepotensialer, og det skal dokumentere besparelser etter utførte tiltak.

Videre skal et tilfredsstillende energioppfølgingssystem ikke bare ta hensyn til energibruken i kWh, men også vise energikostnadene i kroner.

Basert på de målte verdiene for fastmasse og brennverdi, er det gjennom prosjektet utviklet et system for registrering av innmålt mengde fyrstoff, type sortiment, biobrenselfuktighet og termisk varmeproduksjon.

1	A	B	Målt fuktighet			F	G	H	I	J	K
			C	D	E						
2	Dato	Sortiment	Vekt rå (g)	Vekt tørr (g)	Fuktighet	Antall skuffer i perioden	Brennverdi (kWh)	Avlest energi (kWh)	Kjølverkningsgrad	Løskubikk (lm <sup>3</sup> )	Kostnad (kr)
3	01.04.2009	1 Bark	1,137	0,61	46,4 %	7,5	23 211			45	837
4		4 Tørr celluloseflis (tørrflis)	0,801	0,747	6,7 %	2,5	11 514			15	1 131
5										0	
6										0	
7										0	
8									0		
9						SUM	34 725				1 968
10	02.04.2009	1 Bark	1,583	0,942	40,5 %	7,5	23 829			45	837
11		4 Tørr celluloseflis (tørrflis)	0,804	0,74	8,0 %	2,5	11 492			15	1 131
12										0	
13										0	
14										0	
15									0		
16						SUM	35 321				1 968
17	03.04.2009	6 Kutterflis (spon)					0			0	0
18		7 Blanding (bark/rå sagflis)	0,793	0,73	7,9 %		0			0	0
19		5 Rå celluloseflis (hoggerflis)	1,243	0,683	45,1 %					0	0
20										0	
21										0	
22									0		
23						SUM	0				0

Figur 13. Registreringssystem for biobrensel med beregning av brennverdi og kostnader.

Driftspersonell tar fuktighetsprøver av biobrensel-sortimentene daglig, og verdiene legges inn i et regneark for beregning av effektiv brennverdi. Hvilke sortimenter som er benyttet velges fra en rullegardinmeny, som vist på Figur 13.

Registreringssystemet beregner samtidig verdien av biobrenselet i kroner og øre. En synliggjøring av kostnadene for fyrstoffet er et incitament for personell til å drifte anlegget mest mulig energiøkonomisk og effektivt.

En mulighet for forbedring av systemet, er at innmålingen av biobrenselet registreres automatisk med lastceller på hjullasterne, som registrerer vekten på fyrstoffet. Det finnes også systemer for automatisk måling av biobrenselfuktighet, men investeringskostnaden for et slikt system er i dag for høy til at det lønner seg for KSH.

## 8 Måling av kjelens energieffektivitet

Det ble i løpet av prosjektet påbegynt et arbeid for å se på hvordan fuktighetsmålingene for de ulike biobrensel-sortimentene som benyttes kan korreleres mot røykgassmålinger. Bestemmelse av en slik korrelasjon vil kreve svært mange målinger, med god kontroll på hvilke sortimenter og hvilken fuktighet som ble benyttet i de ulike måleperiodene. Det er derfor i dette kapitlet kun de foreløpige resultatene og metodikken som er beskrevet.

## 8.1 Virkningsgrad

Virkningsgraden angir hvor stor andel av energiinnholdet i brenselet som utnyttes i kjelanlegget. Virkningsgrad kan defineres og beregnes på mange ulike måter. Det er derfor viktig å beregne virkningsgraden på en måte som gir et reelt uttrykk for i hvilken grad kjelanlegget utnytter brenselet i hele fyringssesongen (Soma, 2003).

### 8.1.1 Kjelvirkningsgrad

En beregning av kjelanleggets virkningsgrad (driftsvirkningsgrad), krever at følgende data er kjent:

- Biobrenselmengde av hvert sortiment i en gitt periode med gjennomsnittlig fuktighet for beregning av brennverdi.
- Produsert varmeenergi i den gitte perioden.

Uttrykket for kjelvirkningsgraden blir da:

$$\eta_{kjel} = \frac{Q_{kjel}}{H_e} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{ut} - T_{inn}) \cdot h}{H_e} \quad (8.1)$$

$Q_{kjel}$  = kjelens utnyttede energi (kWh)

$\dot{m}$  = massestrøm vann (kg/s)

$c_p$  = spesifikk varmekapasitet vann (kJ/kg·K)

$H_e$  = effektiv brennverdi for biobrenselblandingen (kWh)

$h$  = driftstid

### 8.1.2 Fyrteknisk virkningsgrad og røykgasstap

Fyrteknisk virkningsgrad er tilført energi minus røykgasstapet, og ved en røykgassmåling vil det i realiteten være røykgasstapet som måles ved hjelp av formler definert ut fra fyrstoff. Uttrykket for fyrteknisk virkningsgrad,  $\eta_f$ , blir:

$$\eta_f = 1 - \eta_r \quad (8.2)$$

$\eta_r$  = røykgasstap (%)

Når en kjenner røykgasstemperaturen og O<sub>2</sub>-innholdet i tørr røykgass, kan en beregne røykgasstapet ved hjelp av følgende ligning:

$$\eta_r = k_1 \cdot \frac{t_r - t_1}{21 - O_2} \quad (8.3)$$

- k<sub>1</sub> = konstant (avhengig av fyrstoff)
- t<sub>r</sub> = røykgasstemperatur (°C)
- t<sub>1</sub> = temperatur i forbrenningsluften (°C)
- O<sub>2</sub> = andel O<sub>2</sub> i tørr røykgass (volum- %)

For måleapparatet benyttes en variant av ligning 8.3 for beregning av røykgasstapet (Testo, 2009a):

$$\eta_r = \left( \frac{A}{20,94 - O_2} + B \right) \cdot (t_r - t_1) + C \quad (8.4)$$

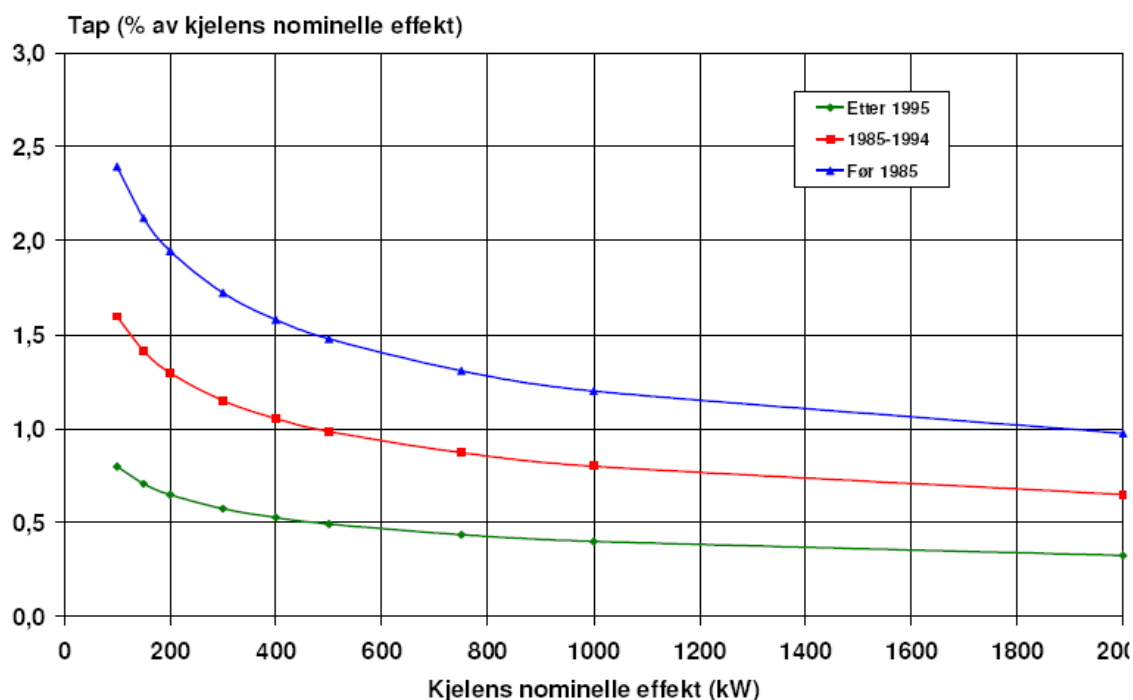
Konstantene A, B og C er konstanter avhengig av fyrstoff. Følgende tabellverdier benyttes for biobrenselet: A = 0,6655, B = 0,0027, C = 11,55.

Ved beregning av kjelvirkningsgraden ut fra den fyrtekniske virkningsgraden, må det også tas hensyn til gjennomstrømnings-, strålings- og konveksjonstap i den perioden målingen foretas.

Gjennomstrømningstap,  $\eta_g$ , er et tap som oppstår når effektbehovet i varmesystemet er lavere enn kjelanleggets minimumseffekt (pausefyring eller tomgangs-fyring). Tapet oppstår pga. utette eller manglende spjeld i forbrenningskammeret eller røykgasskanaler. På grunn av oppdriften i skorsteinen vil luft trekkes inn i kjelen, bli varmet opp, og ført ut til omgivelsene via røykgasskanaler og skorstein. Moderne kjeler er gjerne utstyrt med gode spjeld som stenges automatisk, slik at tapet blir lavt eller tilnærmet lik 0.

Strålings- og konveksjonstap,  $\eta_s$ , forårsakes av at varme ledes til overflaten av kjelen, som får en høyere temperatur enn omgivelsene. Dette fører til avgivelse av energi til omgivelsene som strålings- og konveksjonstap, eller forkortet strålings-tap. *Figur 14* viser hvilket strålingstap man kan forvente som funksjon av nominell kjeleffekt og ut fra kjelens produksjonsår (Soma, 2003).





Figur 14. Strålingstap for ulike kjeler som funksjon av nominell kjeleffekt (Soma, 2003).

Sammenhengen mellom kjelevirkningsgraden og fyrteknisk virkningsgrad blir:

$$\eta_{kjel} = \eta_f - \eta_s - \eta_g \quad (8.5)$$

Siden kjeleplanten ved KSH er produsert etter 1995 med automatiske spjeld og en oppgitt nominell kjeleffekt på 4,7 MW, kan man med god tilnærming si at kjelevirkningsgraden er lik den fyrtekniske virkningsgraden som kan beregnes gjennom røykgassmålinger. Det antas da at gjennomstrømningstapet er lik 0, og at strålingstapet (ut fra Figur 14) vil være omkring 0,35 %. (Hohle et al., 2001) anslår strålingstapet i biobrenselfyrte anlegg over 1 MW til å være 1-2 %.

## 8.2 Røykgassmålinger

### 8.2.1 Måleutstyr

En røykgassmåler av typen TESTO 350 XL ble brukt (Testo, 2009b), se Figur 15. Røykgassmåleren kan måle innholdet av O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S og HC. Måleapparatet består av følgende enheter:

- En kontrollenhet
- En analyseboks
- En probe

I kontrollenheten leses målingene av og logges. Inntil 250 000 loggepunkter kan lagres. Analyseboksen består av sensorer, pumper, batterier, filter, og nødvendig elektronisk hardware for å gjennomføre røykgassmålingene. Det er denne boksen som utfører røykgassanalysen. Proben som benyttes er koblet til analyseboksen som suger ut prøveuttak av den varme røykgassen (ved hjelp av pumpen i analyseboksen). Den har et integrert termoelement som måler temperaturen på røykgassen.

### 8.2.2 Målinger og resultat

Røykgassmålingen ble foretatt ved at sonden ble plassert inn i røykgasskanalen inne i fyrhuset ved KSH, se *Figur 16*. Måling av røykgassammensetningen ble logget med 10 sekunders intervall i ca. 2,5 timer.



*Figur 15. Testo 350 XL røykgassmåler.*



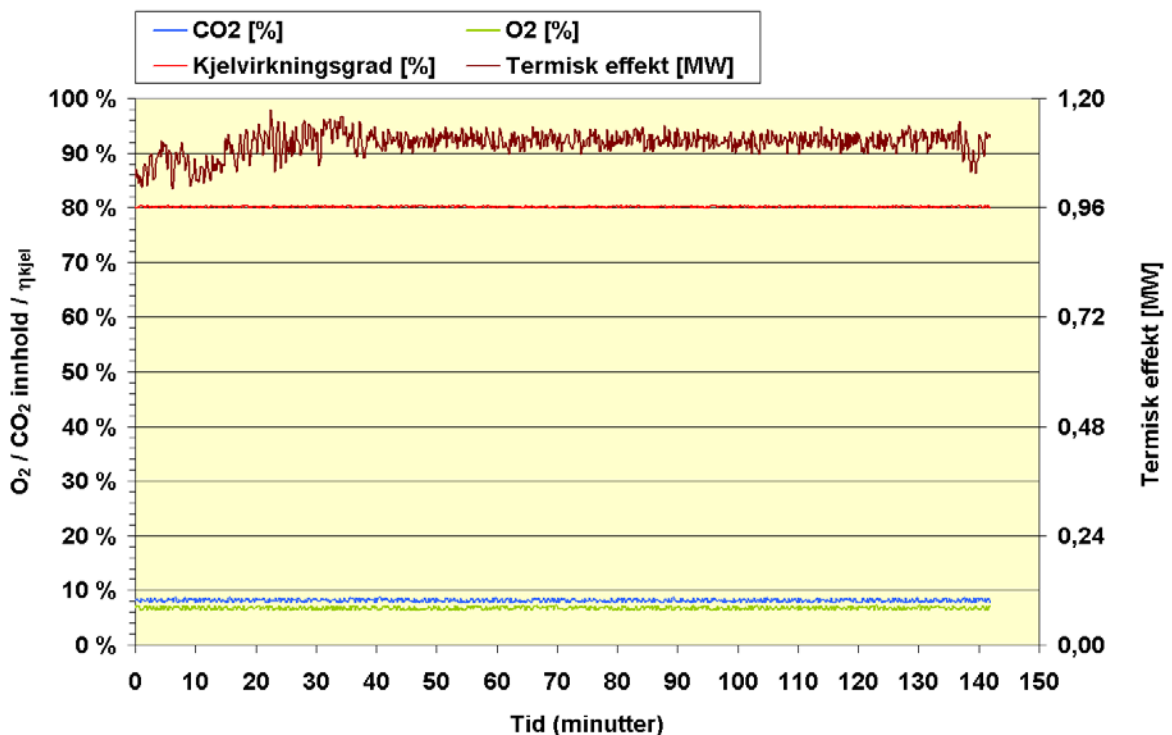
*Figur 16. Røykgassmåling på  
forbrenningsanlegget.*

Måleresultatene fra loggingen er vist i *Figur 17*. Den gjennomsnittlige kjeleeffekten under målingen var på omkring 30 % av nominell kjeleeffekt (4,5 MW).

Røykgassmålingene ga en gjennomsnittlig verdi for CO<sub>2</sub>- og O<sub>2</sub>-innholdet på henholdsvis 8,2 % og 6,8 %. Målt røykgasstemperatur var også noe høy i løpet av målingen, med et gjennomsnitt på 190 °C. Dette gir en kjelvirkningsgrad for måleperioden på 80,2 %.

Målt fuktighet på biobrenselblandingen som ble benyttet under målingen var 48,8 %, og den bestod av 75 % 90/10-blanding og 25 % hoggerflis. Det er sannsynlig at det er den relativt lave biobrenselfuktigheten som gir en noe høy røykgasstemperatur, noe som øker varmetapet gjennom skorsteinen.

Det har tidligere blitt foretatt en røykgassmåling ved KSH da fyranlegget ble installert i 2004 (Gross, 2004). Ved denne målingen var gjennomsnittlig kjeleffekt 1,2 MW, og virkningsgraden ble beregnet å være 86,5 %. Gjennomsnittlig biobrenselfuktighet var på 55 %, og røykgasstemperaturen var 146 °C.



Figur 17. Målte verdier av røykgassen og termisk effekt, samt beregnet kjelvirkningsgrad fra forbrenningsanlegget ved KSH.

### 8.2.3 Konklusjon

Målingene viser at KSH på det tidspunktet disse ble gjennomført, hadde en gjennomsnittlig fyrteknisk virkningsgrad på 80,2 % ved en fuktighetsprosent i biobrenselblandingen på 48,8 %. For forbrenningsanlegget på KSH kan man anta at den fyrtekniske virkningsgraden er tilnærmet lik kjelvirkningsgraden, hvis man antar et gjennomstrømningstap lik 0 og et strålingstap på 0,35 %.

Da biobrenselblandingen varierer fra dag til dag ut fra værforhold og fuktighet i fyrstoffet, var arbeidet med kartlegging av røykgassammensetning i forhold til innfyrt brensel for omfattende for dette prosjektet. For gjennomføringen av et slikt

arbeid vil bedriften måtte kjøpe inn en egen røykgassmåler for logging av sammensetningen over tid, noe bedriften i løpet av prosjektperioden ikke hadde midler til.

## 9 Videre arbeid

Programvaren som er blitt utviklet for en god energioppfølging, og korrekt innblandingsforhold for tørt og fuktig fyrstoff, vil bli benyttet av KSH og fulgt opp av Treteknisk også etter prosjektets slutt.

Det vil også bli sett på de muligheter som er skissert i prosjektet med hensyn til bedre lagring av fyrstoffet ved KSH. I tillegg er praktisk utførelse av målinger på biobrensel og røykgass gjennomført i prosjektet, og kunnskapen fra dette arbeidet er overført til driftspersonell som kan følge opp dette dersom det skulle bli behov for slike målinger i fremtiden. Treteknisk vil også stå til rådighet med kompetanse og gjennomføring av slike målinger.

Prosjektet har gitt ny kunnskap, beregningsmodeller og verktøy for bedre prosesstyring gjennom kontroll av biobrensel-sortimentene. Dette er kunnskap og kompetanse som vil kunne videreformidles etter avslutning av prosjektet.

## 10 Konklusjon

Norske sagbruk som har beliggenhet i nærhet til annen varmekrevende industri, er i en posisjon med muligheter for god inntjening ved videresalg av overskuddsvarme.

Prosjektet har vist at det kan skapes en vinn-vinn situasjon for produsent og mot-taker ved legging av fjernvarmeledning, da Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS får en bedre pris på sin varmeleveranse enn tilfelle ville vært ved videresalg av overskuddsbrensel. Samtidig betaler TINE Midt-Norge Selbu mindre for fjernvarmeleveransen i forhold til utgiftene de hadde for det tidligere el.- og oljebaserte produksjonsanlegget.

Ved varmesalg til eksterne kunder er det avgjørende å ha god kontroll på viktige biobrenselparametre på fyrstoffet, og de varmekrevende prosessene internt på sagbruket. Det er sett spesielt på tørkeprosessen, hvor hovedforbruket av varmeenergi finner sted. Gjennom effektivisering av tørkeprosessen, blant annet ved bedre tilpasning av tørkeskjema til de ulike trelastdimensjonene, er den interne energibruken på bedriften blitt redusert.

Biobrenselparametre av betydning for forbrenningsprosessen som er blitt undersøkt nærmere, er brennverdi for hovedfyrstoffet og fastmasse på de ulike biobrensel Sortimentene. En røykgassmåling viste en gjennomsnittlig kjelvirkningsgrad i overkant av 80 % på det tidspunktet målingen ble foretatt.

Det ble også undersøkt i hvilken grad det oppnås noen vesentlig tørking av biobrenselet ved lagring uten tak på sagbrukstomten. Resultatet fra denne undersøkelsen viste at fuktigheten endres svært lite over en lagringsperiode på en måned, selv om mikrobiologiske prosesser (varmgang) i løpet av denne tiden finner sted.

Gjennom prosjektet er det utviklet et forbedret energioppfølgingsystem for kontroll av det termiske energiforbruket, samt et program for kalkulasjon av riktig innblanding av tørt fyrstoff i biobrenselblandingen av bark og rå sagflis som benyttes ved bedriften.

Prosjektet har vist at med dagens energipriser på biobrensel, er det større sannsynlighet for å skape lønnsomhet ved salg av varme enn ved videreforedling og salg av biobrenselprodukter som bark og sagflis.

## 11 Referanser

ARBEIDSTILSYNET 2002. Helse- og sikkerhetsrisiko ved muggvekst på trelast.

*Fra:* ARBEIDSTILSYNET (ed.) 2 ed.

BELBO, H. & GJØLSJØ, S. 2008. Trevirke - brennverdier og energitetthet.

*Viten fra Skog og landskap.* Ås, Norway: Norsk institutt for skog og landskap.

FAGERNÄS, L. & SIPILÄ, K. Year. Emissions from Biomass Drying.

*Fra:* Developments in Thermochemical Biomass Conversion, 20-24 May, 1996 Banff, Canada.

GJØLSJØ, S. & HORN, H. 2008. Målte verdier av biobrenselprøver fra Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS. Ås, Norway: Norsk institutt for skog og landskap.

GROSS, L.-O. 2004. Rapport från mätningar av garanterade emmissioner till luft, verkningsgrad och avgiven effekt på en 4-MW biopanna vid Kjeldstad Sagbruk & Høvleri AS. Internal report. 1 ed. Selbu, Norway: Kontroll Miljö Process AB (KMP AB).

HOHLE, E. E., SOMA, M., SANDBERG, E., WILLHELMSEN, G., NORENG, K., MARTINSEN, A. K., SØRENSEN, H., FINDEN, P. & LUNNAN, A. 2001. *Bioenergi - Miljø, teknikk og marked*, Brandbu, Norway, Energigården.

HOLMBERG, H. 2007. Biofuel Drying as a Concept to Improve the Energy Efficiency of an Industrial CHP Plant. Helsinki: Helsinki University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Laboratory of Energy Economics and Power Plant Engineering.

JOHANSSON, I., LARSSON, S. & O, W. 2004. Drying of bio fuel utilizing waste heat. *Värmeforsk Service AB*, 74.

- LEHTIKANGAS, P. 1999. *Lagringshandbok för trädränslen*, Uppsala, Sweden, SLU, Sveriges lantbruksuniversitet.
- LEHTIKANGAS, P. & JIRJIS, R. 1998. Storage of Wood Chips and Bark in Northern Sweden. Uppsala, Sweden: Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Institutionen för virkeslära. (Dept. of Forestry Products).
- MILJØVERNDEPARTEMENTET, M. 2004. Forskrift om begrenning av forurensning (forurensningsforskriften).  
*Fra: KLIMA- OG FORURENSNINGSAVD., S. F. (ed.).*
- NORGES-BANK. 2009. *Norges Bank - Valutakurser* [Online]. URL: <http://www.norges-bank.no/> [Desember 2009].
- PELLIKKA, J. & SAVIHARJU, K. 1983. Kuoren ja puujätteen poltto (Combustion of bark and waste wood). *Puumassan valmistus osa 2 (Pulp making part 2)*, 1519-1582.
- SANDBERG, E. (ed.) 1990. *Energibruk og energibalanser i trelastindustrien : Erfaring fra forsøk ved Trysil Tre 82/83. Hovedrapport, oppdatert versjon., Hamar, Norway.*
- SOMA, M. H. 2003. EUs Bygningsdirektiv. Delprosjekt (DP) 3 - Ettersyn kjelanlegg. *Fra: ENERGI, K. N. (ed.).*
- SPETS, J. & AHTILA, P. 2004. Reduction of organic emissions by using a multistage drying system for woodbased biomass. *Drying Technology*, 541-561.
- TESTO 2009a. TESTO 350 M/XL Short Instruction Manual. Rev. 5/05 Instrument software version ed. Flanders, New Jersey, USA: Testo Inc.
- TESTO, A. 2009b. TESTO 350 XL [Online]. URL: <http://testo350.com> [Juli 2009].
- TORKSIM 2001. Manual och användarbeskrivning till programmet TORKSIM ver. 3.0.1. *Fra: SALIN, J.-G. (ed.). Borås, Sweden: SP Träteck.*
- TORKSIMGLOBAL 2004. Manual och användarbeskrivning till programmet TorksimGlobal ver. 1.1. *Fra: SALIN, J.-G. (ed.). Borås, Sweden: SP Träteck.*
- TRETEKNISK 2002. *Bioenergi fra treindustrien. Treteknisk småskrift*, Oslo, Norsk Treteknisk Institutt.
- VAN LOO, S. & KOPPEJAN, J. 2008. *The handbook of biomass combustion and co-firing*, London ; Sterling, VA, Earthscan.
- WIMMERSTEDT, R. 1998. Assessment of Technique and Economy of Biofuel Drying. *Värmeforsk Service AB.*
- WIMMERSTEDT, R. 1999. Recent advances in biofuel drying. *Chemical Engineering and Processing*, 441-447.