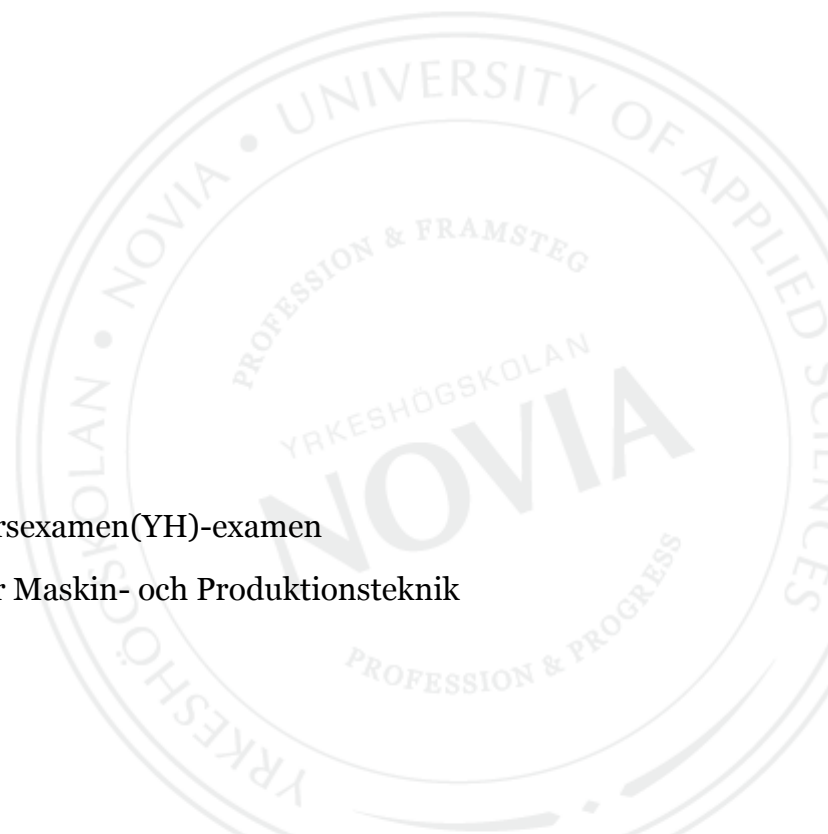


# **Torrvärme – bestämning av verkningsgrad för en torveldad värmecentral**

Mikael Kaustinen

Examensarbete för ingenjörsexamen(YH)-examen  
Utbildningsprogrammet för Maskin- och Produktionsteknik  
Vasa 2015



## **EXAMENSARBETE**

Författare: Mikael Kaustinen  
Utbildningsprogram och ort: Maskin- och Produktionsteknik, Vasa  
Inriktningalternativ/Fördjupning: Drift- och energiteknik  
Handledare: Kaj Rintanen

Titel: *Torvvärme - bestämning av verkningsgrad för torveldad värmecentral*

---

Datum 20.4.2015      Sidantal 66      Bilagor 7

---

### **Abstrakt**

Detta examensarbete utfördes som uppdrag för Oy Finnish BMC Ab som planerar, tillverkar och driver värmecentraler för biobränslen. Företaget som har verkat sedan år 2006 finns i Keskis i östra Vörå, där det via systerföretaget Oy Keskis Torv Ab också idkar torvproduktion.

Syftet med examensarbetet är att bestämma verkningsgraden för den värmecentral som företaget uppfört och sedan Mars 2014 driver på industriområdet i Vörå. Kunder är två närliggande industriföretag, Oy Simons Element Ab och Oy JTK Power Ab.

Metoden för bestämning av verkningsgraden är direkt, vilket innebär att den beräknas utifrån tillförd energi i bränslet och levererad energi avläst från mätare. För detta ändamål har torvprover samlats in från varje levererat torvparti och de har analyserats för fukthalt och värmevärde i Novias laboratorium. Undersökningen pågick under två tidsperioder, 6.10.-3.12.2014 och 10.1-2.2.2015, för vilka tillförd bränslemängd i vikt och producerad värmemängd bokfördes. Utgående från dessa data har sedan beräkningar gjorts.

Ytterligare har rökgasanalyser utförts med ett Testo 335 rökgasinstrument, och med hjälp av dessa analyser har slutsatser angående de sammanlagda förlusternas storlek och verkningsgradsberäkningarnas riktighet kunnat dras.

---

Språk: Svenska      Nyckelord: torv, verkningsgrad, värmevärde, fukthalt, biobränsle

---

## **OPINNÄYTETYÖ**

Tekijä: Mikael Kaustinen  
Koulutusohjelma ja paikkakunta: Kone- ja tuotantotekniikka  
Suunatumisvaihtoehto/Syventävät opinnot: Toiminta- ja energiatekniikka  
Ohjaajat: Kaj Rintanen

Nimike:

---

Päivämäärä 20.4.2015 Sivumäärä 66 Liitteet 7

---

### **Tiivistelmä**

Tämä opinnäytetyö on tehty toimeksiantona Oy Finnish BMC Oy:lle, joka suunnittelee ja rakentaa lämpökeskuksia biopolttoaineille, ja myös pyörittää useita sellaisia lähialueella lämpöyrittäjänä. Yritys joka on perustettu vuonna 2006 sijaitsee Keskisessä itäisellä Vöyrillä, jossa se sisaryhtiön Oy Keskis Torv Ab:n kautta myös harjoittaa turpeen tuotantoa.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on hyötysuhteen määrittäminen maaliskuussa 2014 Vöyrin teollisuusalueelle valmistuneelle lämpökeskukselle, josta Finnish BMC toimittaa lämpöä kahdelle teollisuuskiinteistölle. Asiakkaina ovat Oy Simons Element Ab ja Oy JTK Power Ab.

Menetelmä joka on käytetty hyötysuhteen määrittämiseen on suora, mikä tarkoittaa että laskenta tehdään polttoaineessa lisätyn energiamäärän ja toimitetun lämpöenergian pohjalta. Tähän tarkoitukseen kerättiin näytteitä jokaisesta turvekuormasta, ja näytteet analysoitiin kosteuspitoisuutta ja lämpöarvoa varten Novian laboratoriossa. Tutkimusta suoritettiin kahdessa jaksossa, 6.10-3.12.2014 ja 10.1-2.2.2015, jolloin toimitettua polttoainemäärää ja tuotettua lämpöenergiaa kirjattiin. Näitten tietojen pohjalta ovat sitten laskelmia tehty.

Lisäksi on suoritettu savukaasuanalyyseja Testo 335-savukaasutesterillä, ja näiden analyysien avulla on joitain johtopäätöksiä kattilan kokonaishäviöistä ja laskelmien oikeellisuudesta voitu tehdä.

---

Kieli: Ruotsi Avainsanat: turve, hyötysuhde, lämpöarvo, kosteuspitoisuus, biopolttoaine

---

## **BACHELOR'S THESIS**

Author: Mikael Kaustinen  
Degree Programme: Mechanical and production engineering, Vaasa  
Specialization: Operation and energy engineering  
Supervisors: Kaj Rintanen

Title: *Peat-fired district heating plant - determination of the thermal efficiency*

---

Date 20.4.2015    Number of pages 66    Appendices 7

---

### **Summary**

The client for this Bachelor's thesis is Oy Finnish BMC Ab, a 2006 established company situated in Keskis in Vörå municipality. The company's main fields of activity is planning, manufacturing and operation of biomass-fired heating plants. Through its sister company Oy Keskis Torv Ab it also practices peat production.

The main purpose for the thesis is to determinate the thermal efficiency for a peat-fired heating plant situated on the industrial area in Vörå. It was built in March 2014 by Finnish BMC itself, and the company also operates it and delivers heat to two industrial customers, Oy Simons Element Ab and Oy JTK Power Ab.

The method for the determination is direct, which means that it is calculated from the added fuel energy and the produced heat energy, read from energy meters. For this purpose was peat samples collected from each delivered cartload, and they have been analyzed for calorimetric values and heat contents in Novia's laboratory. This research took place in two separate periods, 6.10.2014 and 10.1-2.2.2015, for which added fuel amounts and produced heat energy were recorded. Based on these data was calculations done.

In addition to these calculations were also flue gas analyzes done with a Testo 335 flue gas instrument, and based on these analyzes were conclusions about the total losses and the rightness of the calculations made.

---

Language: swedish    Key words: peat, combustion, efficiency, moisture content, biofuel

---



# Innehållsförteckning

<b>1. INLEDNING</b> .....	1
1.1. Introduktion.....	1
1.2. Syfte.....	2
1.3. Avgränsning.....	2
1.4. Disposition.....	3
<b>2. BAKGRUND</b> .....	4
2.1. Företaget Finnish BMC.....	4
2.2. Anläggningen.....	4
2.2.1. Bakgrundsfakta.....	4
2.2.2. Rosten.....	5
2.2.3. Styrsystemet.....	5
2.2.4. Kulvertsystemet.....	6
2.3. Kunderna.....	7
2.3.1. JTK Power.....	7
2.3.2. Simons Element.....	7
2.3.3. Kundens energibehov.....	7
2.4. Bränslet.....	8
2.4.1. Torvens egenskaper.....	9
2.4.2. Torven som bränsle globalt och historiskt.....	9
<b>3. FÖRBRÄNNINGSTEORI</b> .....	12
3.1. Inledning.....	12
3.2. Kolväten.....	12
3.3. Fasta och flyktiga ämnen.....	13
3.4. Fukthalt.....	14
3.5. Aska.....	14
3.6. Förbränningsförloppet.....	15

3.6.1.	Förbränningens faser.....	15
3.6.2.	De tre T:na.....	16
3.6.3.	Pannreglering och verkningsgrad.....	17
3.6.4.	Torvens bränsleegenskaper.....	18
3.6.5	Verkningsgrad.....	19
3.6.5.1.	Pannverkningsgraden.....	20
3.6.5.2.	Förbränningsverkningsgrad.....	20
3.6.5.3.	Totalverkningsgrad .....	21
3.6.5.4.	Bränsleverkningsgrad.....	21
3.6.6.	Fukthalt.....	21
3.6.7.	Kalorimetriskt och effektivt värmevärdet.....	22
3.6.7.1.	Dulong's formel.....	24
3.6.8.	Luft- och rökgasmängder.....	25
3.6.8.1.	Beräkning av luftbehov och rökgasmängd.....	26
3.6.9.	Förluster.....	28
3.6.9.1.	Latent och sensibel värme.....	29
3.6.9.2.	Desorptionsförluster.....	30
3.6.9.3.	Rökgasförluster.....	32
3.6.9.4.	Uppvärmning av bränsle och tilluft.....	34
3.6.9.5.	Övriga förluster.....	34
3.7.	Rökgasanalys.....	34
3.7.1.	Syrehalt och luftfaktor.....	35
<b>4. METOD.....</b>		<b>37</b>
4.1.	Inledning.....	37
4.2.	Val av metod.....	38
4.3.	Datainsamling och analyser.....	39
4.3.1.	Mätaravläsningar.....	39

4.3.2. Provtagning.....	40
4.4. Analyser.....	41
4.4.1. Leveransfukthalt.....	41
4.4.2. Kalorimetriskt värmevärde.....	42
4.4.3. Analysfukthalt.....	43
4.4.4. Provberedning.....	44
4.4.5. Askhalten.....	44
4.4.6. Rökgasmätning.....	45
<b>5. RESULTAT.....</b>	<b>46</b>
5.1. Period I.....	46
5.2. Period II.....	48
5.3. Rökgasanalyser.....	49
5.4. Sankey-diagram.....	51
<b>6. TVÅ JÄMFÖRELSEOBJEKT.....</b>	<b>52</b>
6.1. Kelviå-rapporten.....	52
6.1.1. Luftöverskottet och rökgasförlusterna.....	54
6.2. Storkyro-rapporten.....	55
<b>7. DISKUSSION.....</b>	<b>56</b>
7.1. Luftöverskottets betydelse.....	56
7.2. Uppskattade förluster.....	58
7.3. Resultatens trovärdighet.....	60
7.4. Felanalys.....	61
7.4.1. Energimätarna.....	63
7.4.2. Laboratorieundersökningar.....	62
7.4.2.1. Leveransfukthalten.....	62
7.4.2.2. Analysfukthalten.....	63
7.4.2.3. Värmevärdet.....	63

7.4.3. Förbrukad bränslemängd.....	64
7.4.4. Felmarginal totalt.....	64
7.5. Förslag till vidare forskning.....	65

**8. SAMMANFATTNING.....66**

Centrala begrepp

Litteraturförteckning

Bilaga 1. Tabell över uppmätta fukthalter och värmevärden.

Bilaga 2. Tabell över leveransmängder och mätaravläsningar.

Bilaga 3. Förteckning över figurer och tabeller i texten.

Bilaga 4. Temperaturer under försöksperioderna

Bilaga 5, 6, 7, och 8: Bilder från värmecentralen

## Centrala begrepp

<i>Bombkalorimeter</i>	Apparat för laboratoriemässig bestämning av kalorimetriskt värmevärde
<i>Desorption</i>	Fuktens avdunstning från bränslepartiklarnas yta
<i>Elementaranalys</i>	Bestämning av ett ämnes halter av olika grundämnen
<i>Endoterm</i>	Förlopp som kräver (upptar) värme för att fortgå. Motsats till exoterm
<i>Entalpi</i>	Gasers och vätskors totala energiinnehåll, där både värme och tryck ingår
<i>Exikator</i>	Lufttätt glaskärl med fuktabsorberande medel. Håller prover 100% torra
<i>Exoterm</i>	Förlopp som avger (producerar) värme. Motsats till endoterm.
<i>Fukthalt</i>	Andelen fukt av hela fuktiga samplets vikt
- <i>Leveransfukthalt</i>	Den verkliga fukthalt som torven har vid leverans . Anses råda tills hela partiet förbrukats.
- <i>Analysfukthalt</i>	Den fukthalt som samplet uppvisar vid bombkalorimeteranalysen. Det en gång torkade provet upptar fukt ur luften till ca 4-6% jämvikt.
<i>Frästorv</i>	Har lös konsistens och låg densitet jämfört med torv pressad till briketter.
<i>Konvektion</i>	Värmeöverföring genom ett medium (luft) som sätts i rörelse av temperaturskillnaden
<i>Kraftvärmeverk</i>	Vanligtvis större anläggning som producerar både elektricitet och fjärrvärme
<i>Kulvert</i>	Isolerad rörledning för transport av fjärrvärmeverk
<i>Lambdavärde</i>	Luftfaktor, förhållande mellan verklig och teoretisk luftmängd
<i>Latent värme</i>	Värmeenergi som binds vid fasövergångarna is->vätska och vätska->ånga, då ingen temperaturstegring kan påvisas under själva förloppet.
<i>Målvärde</i>	Inom automatiken det inställda värde, t.ex. temperatur, som styrsystemet försöker upprätthålla
<i>Nominell effekt</i>	Av tillverkare utlovad maximal effekt vid normal drift
<i>Normalkubikmeter</i>	Den volym en viss gasmängd upptar vid NTP(0°C och atmosfärstryck)
<i>Organiskt ämne</i>	Ämne uppbyggt kring kol och väte

<i>Oxidation</i>	Kemiskt förlopp där ämnet upptar syre. Motsats till reduktion.
<i>Primärluft</i>	Tillförs rosten underifrån. Behövs för pyrolysen och kolets slutförbränning.
<i>Pyrolysis</i>	Förlopp där flyktigare ämnen avgår från bränslet. Kräver värmertilförsel.
<i>Rost</i>	Det underlag på vilket bränslet brinner. Har luftslitsar och rörliga trappsteg.
<i>Rökgaskondensator</i>	Värmeväxlare i större anläggningar. Tillvaratar latent värmeenergi ur rökgaserna.
<i>Sampl</i>	Från eng. <i>Sample</i> . Provmängd uttagen för analys.
<i>Sekundärluft</i>	Tillförs ovanför/efter eldbädden för slutförbränning av gaser
<i>Sensibel värme</i>	Den värmemängd som binds vid upphettning utan fasövergångar.
<i>Sintring</i>	Sammansmältning av metalliska ämnen vid höga temperaturer, t.ex i aska.
<i>Stökiometrisk</i>	Teoretiskt behövlig luftmängd för fullständig förbränning.
<i>Turbulens</i>	Virvelbildning. Ger omblandning och bättre förbränning.
<i>Verkningsgrad</i>	Nyttiggjord energi(vid energimätaren) / tillförd energi
- <i>pannv.</i>	Som ovan
- <i>förbränningsv.</i>	Tillförd energi – rökgasförluster / tillförd energi
- <i>bränslev.</i>	Tillförd energi – förluster i oförbränt / tillförd energi
- <i>systemv.</i>	Nyttiggjord energi(vid förbrukningsplatsen) / tillförd energi
<i>Värmekapacitet</i>	Den energi i kilojoule (kJ) som åtgår för att höja 1 kg av ämnet 1 °C
<i>Värmevärde</i>	Bränslets energiinnehåll i Megajoule (MJ) per kg.
- <i>kalorimetriskt v.</i>	Bruttovärde uppmätt i laboratorium
- <i>effektivt v.</i>	Nettovärde korrigerat för fukthalt
<i>Värmeövergångstal</i>	Värmeöverföringsförmåga i värmeväxlare. Mäts i W/(m <sup>2</sup> *K)

## Förkortningar och beteckningar

$C_p$  = Värmevärde vid konstant tryckf

$C_v$  = Värmevärde vid konstant volym

$F_s$  = torra rökgasförluster

$G_t$  = torr rökgasmängd

$L_t$  = torr tilluftsmängd

$M_{ad}$  = analysfukthalt

$M_{ar}$  = leveransfukthalt

$H_i$  = effektivt värmevärde, samma som  $Q_{p,net,m}$

$H_s$  = kalorimetriskt värmevärde, samma som  $Q_{v,gr}$

$Q_{v,gr}$  = kalorimetriskt värmevärde

$Q_{v,gr,d}$  = kalorimetriskt värmevärde, korrigerat för analysfukthalt

$Q_{p,net,m}$  = effektivt värmevärde

# 1.INLEDNING

## 1.1 Introduktion

Att påbörja sitt lärdomsprov är kanske det mest spännande skedet av ingenjörstudierna eftersom man då själv har möjlighet att välja vilka kunskaper och färdigheter som man vill lyfta fram. Uppdragets art kan variera stort inom en och samma utbildningslinje, och man föreställer sig att slutarbetet ofta anger riktningen för ens kommande yrkesliv. Maskiningenjörer anställs i huvudsak av privata arbetsgivare och då faller det sig naturligt att också slutarbetet baserar sig på ett konkret problem eller en uppgift som ett privat företag behöver hjälp med. Men att leta reda på ett lämpligt uppdrag är inte alltid så lätt och skulle man hitta man flera tänkbara alternativ kan det bli svårt att välja.

Redan före jag överhuvudtaget hade börjat söka efter uppdrag hade jag ställt upp några kriterier för mig själv:

1. Uppdraget skall kännas intressant och meningsfullt, eftersom det då är så mycket lättare att lägga sin själ och hjärta i det och åstadkomma ett bra arbete.
2. Svårighetsgraden och omfattningen skall vara lämplig. Arbetet får inte bli mig övermäktigt i slutändan, men måste ändå ge ett positivt intryck av de kunskaper och färdigheter jag tillägnat mig
3. Uppgiften får gärna vara sådan att den intresserar potentiella arbetsgivare, och på så sätt bidrar till att mina chanser att få anställning efter avlagd examen ökar.

Jag har länge varit intresserad av biobränslen och uppvärmningsteknik för egnahemshus, och därför tvekade jag inte länge när jag erbjöds uppdraget att utreda verkningsgraden för en fliseldad värmecentral. Trots skenbart enkla beräkningsformler visste jag ändå att det skulle krävas ett stort mått av systematik och noggrannhet i arbetet, och att uppdraget ingalunda skulle bli enkelt.



## 1.2 Syfte

Fastän jag från början hade diskussioner med flera företag där möjligheterna verkade lovande återstod till slut bara ett alternativ, men det var ett uppdrag jag gärna tog mig an. Uppdraget går ut på att beräkna verkningsgraden för en torveldad värmecentral på industriområdet i Vörå, som har byggts och drivs av min uppdragsgivare Finnish BMC/Keskis Torv. Det var visserligen inte fråga om något direkt nyskapande arbete, men där ingick intressanta beräkningar av effekt och värmevärde som jag vill betrakta som traditionellt ingenjörskunnande. Eftersom själva forskningsfrågan som den framfördes av uppdragsgivaren, det vill säga: ”Vad är verkningsgraden?” kan besvaras tämligen kortfattat, beslöt jag att utvidga den lite. Därmed blev syftet att, förutom att bestämma verkningsgraden rent numeriskt, också få en förståelse för hur faktorer som belastningsgrad, utetemperatur och bränslets beskaffenhet påverkar den.

Ett problem är att pannans belastning varierar stort med årstiden, och då detta försök skulle pågå under en begränsad tid var det givet att inte heller energibehovet skulle variera alltför mycket under den tiden. Ur uppdragsgivarens synvinkel hade det varit önskvärt att detta försök hade sträckt sig över alla årstider, eller åtminstone från en riktigt varm period till en riktigt kall period. Detta är emellertid inte möjligt inom ramen för detta lärdomsprov, så jag försökte ta till andra metoder för att uppskatta den årliga värmeproduktionen och variationerna i verkningsgrad över årstiderna. Min strävan har varit att med noteringarna särskilja perioder med olika väderlek och olika belastning d.v.s.. arbetsdagar och kvällar samt helger då verksamheten står stilla i kundföretagen. Detta jämför jag med tillgängliga data från andra anläggningar där man följt verkningsgraden under längre tid för att sedan försöka applicera dessa erfarenheter på den aktuella pannan .

## 1.3 Avgränsning

Undersökningen var ursprungligen tänkt att utgå endast ifrån tillfört bränsle och levererad värme, men då möjligheten att låna en rökgasanalysator yppade sig kunde jag också bestämma de aktuella rökgasförlusterna. För helhetens skull gjordes sedan en uppskattning av övriga förluster med modell från ett par andra undersökningar, men inga försök att i verkligheten bestämma dessa förluster gjordes. Den andra avgränsningen var tidsmässig, då jag måste avbryta datainsamlingen i slutet av januari för att få arbetet klart inom utsatt

tid. Det hade annars varit värdefullt att göra beräkningar på flera årtider med olika väderlek och därmed olika effektbehov.

## 1.4 Disposition

Detta kapitel ägnas åt att introducera läsaren i detta arbete. Syftet har presenterats i kap 1.2 och avgränsningar i kap.1.3. Den fortsatta uppläggnings av examensarbetet har följande disposition:

Kapitel 2 utgör bakgrund där uppdragsgivaren, anläggningens uppbyggnad och funktion samt dess kunder presenteras. Kapitlet innehåller även en beskrivning av torven som bränsle. Förbränningsteori (kapitel 3) upptar en betydande del av examensarbetet eftersom teorin kan sägas vara det bärande elementet i detta bygge. Förbränning är ett kemiskt förlopp som lättast kan beskrivas matematiskt, liksom alla de omständigheter som påverkar detta. En del antaganden har också gjorts där uppgifter för beräkningar saknats, och även dessa antaganden behöver förankras i teorin för att vara trovärdiga.

Kapitel 4, Metod ägnas åt metodval, datainsamling och en beskrivning av de laboratorieanalyser som utförts. I kapitel 5 redogörs för resultaten och i kapitel 6 presenteras två andra undersökningar som använts som jämförelsematerial.. Kapitel 7 ägnas åt diskussion medan kapitel 8 är en sammanfattning av examensarbetet.

## 2. BAKGRUND

### 2.1. Företaget Finnish BMC

Den undersökning som detta examensarbete grundar sig på är utförd som ett uppdrag för företaget Finnish Bio Mass Combustion eller förkortat Finnish BMC. Företaget som verkar i Keskis, Vörå(tidigare Oravais) grundades 2006 som en utlöpare från Keskis Torv, som sedan 2001 har brutit och sålt torv från mossen i Aknus i östra Vörå. Finnish BMC:s två huvudsakliga verksamhetsideer är att som värmeföretagare sälja värme från egna värmecentraler, samt tillverka och sälja färdiga värmecentraler åt kunder enligt deras behov. I detta nu driver företaget fyra egna värmecentraler i Vörå och Ylihärmä i storleksklassen 250kW-1MW, och bränslet är i huvudsak torv som produceras i systerföretaget Keskis Torvs regi. Värmecentralerna byggs i allmänhet kring en panna från någon större tillverkare, men med egenkonstruerade rostar och installationer anpassade för specifika behov. Förutom kompletta värmecentraler och service på värmepannor utför företaget också andra metallarbeten, vvs,- och elinstallationer och hydraulik-slangservice. Tillsammans sysselsätter de båda företagen ca. 10 personer.

### 2.2. Anläggningen

#### 2.2.1. Bakgrundsfakta

Värmecentralen som denna undersökning gäller är belägen på Vörå kommuns industriområde invid Larvvägen, adress Industrivägen 5. Den ägs och drivs sedan 2006 av Finnish BMC, som har avtal med och levererar värme till två företag intill centralen, Simons Element och JTK Power. Av dessa står JTK Power för merparten av förbrukningen, över 70 %. Anläggningen förnyades fullständigt år 2013 då nuvarande maskiner installerades. Dess nominella effekt är 1000 kilowatt och den årliga produktionen förväntas bli ca. 1800 Mwh. Värmecentralen är uppbyggd kring en Arimax Bio 1000 SP-panna där själva förbränningen sker på en rörlig rost speciellt konstruerad för eldning med frästorv. Denna rost har utvecklats och tillverkats av Finnish BMC själva, liksom byggnaderna och installationen som helhet.

### 2.2.2.Rosten

Rosten är det underlag som den brinnande torvmassan vilar på, och den del som med sin utformning och funktion har den största inverkan på förbränningen och därmed på hela pannanläggningens verkningsgrad. Eldning med frästovr ställer speciella krav på eldstaden på grund av att i synnerhet dess konsistens och kolhalt avviker från andra bränslen, och därför har Finnish BMC utvecklat ett eget koncept som lämpar sig både för torv och andra bränslen. I den här pannan har rosten en yta på cirka 2,5 m<sup>2</sup>vilket är relativt stort, och detta har möjliggjorts genom att den till hälften befinner sig i en utbyggnad utanför pannan, och till hälften innanför. Den lutar inåt, och har trappstegsformade skrapor, där bränslet sakta vandrar neråt för varje roströrelse. Vid lågt effektuttag stängs halva rosten av för bättre luftflöde. Denna roströrelse sker med drygt 1 minuts intervaller, och om man har en rökgasmätare ansluten kan man se att koloxid,- och koldioxidhalterna då tillfälligt stiger, då omrörningen frigör mera partiklar. Rosten har också en annan viktig uppgift, att släppa fram lämpligt med primärluft underifrån. För att möjliggöra en jämn luftfördelning över rostens yta även när bränsletäcket är ojämnt, är luftslitsarna i rosten strypta så att trycket på den utströmmande luften stiger. Vid lågt effektuttag stängs halva rosten av för bättre luftflöde. Askhalten kan vara relativt hög för torv, 2-6%(200-600kg/10 ton), och denna mängd skall vandra över rosten fram till kanten , där den faller ner till botten av pannan. Utmatningen därifrån sker i jämna tidsintervaller automatiskt med ett system av skruvar till en kontainer utanför huset.

### 2.2.3. Styrsystemet

Styrsystemet är också till största delen konstruerat av Finnish BMC:s egna krafter, och det har en logik som avviker från det gängse för motsvarande anläggningar. Vanligen regleras effekten så, att bränsleinmatningen styrs från panntemperaturen, så att mera bränsle matas in om temperaturen börjar sjunka. Sedan regleras lufttillförseln utgående från det s.k. lambda-värdet, d.v.s. syrehalten i rökgaserna. Den syrehalt man då försöker upprätthålla kan vara antingen ett fast värde, eller en variabel beroende av t.ex. effektläge. Här har man gjort tvärtom, den primära effektregleringen är tilluftfläktarna, och om lambda-värdet blir för högt ökas i stället bränsleinmatningen. Målvärdet är här inte fast, utan varierar enligt en kurva utgående från driftläget(effektuttaget). Det här gör att syrehalten blir påfallande

hög(13-16%) vid låga effektuttag. Till det här ska vi återkomma i kapitlen om rökgasanalyserna och verkningsgraden. Från företagets sida hävdar man att deras styrsystem och -logik, tillsammans med den egna rosten, har gjort att deras anläggningar kan köras med ett betydligt lägre effektuttag än konkurrenternas, ner till 2-4% av nominell effekt. Pannan är också utrustad med en rökgasfläkt, som styrs separat utgående från trycket i rökkanalen. Automatiken sköter också om att kanalerna blåses rena med tryckluft med jämna tidsintervaller, så att askan faller ner till botten.

#### 2.2.4. Kulvertsystemet

Pannan är kopplad till två separata värmeväxlare inuti pannhuset., som vardera står för en kunds värmebehov. Dessa matas med likaledes separata pumpar som pumpar runt vattnet från värmeväxlarna och tillbaka. På dessa två rörslingor finns de flödes – och temperaturgivare till vilka energimätarna är kopplade, även de som gäller en per kund. Från värmeväxlarna pumpas sedan varmvattnet vidare ut i kulvertsystemet. Till JTK Power byggdes rörledningen samtidigt som panncentralen. Den består av ett KWH 400 mm dubbelt kulvertrör innehållande två stycken 88 mm stålrör, tur och retur i samma hölje. Denna typ av rör har mycket goda isoleringsegenskaper till skillnad mot den enkla typ som används i de äldre rörledningarna till Simons Element. Dessa rör härstammar från den äldre panncentral som funnits på platsen sedan år 2006 och då endast betjänade Simons element. De går från centralen till ett bredvidliggande liten skjul där de förenas i fyra separata rör med innerdimensionen 88 mm, tur- och returrör till två olika hallkomplex.

Det kan observeras att en markant skillnad i isoleringsförmåga mellan dessa två olika system då snön smälter bort där de nya rören är dragna, men däremot syns det ingenting ovanför de nyare rörledningarna. För kunden med de äldre rören, Simons Element, kan den här redan den här förlusten vara beaktansvärd. Detta i synnerhet som värmebehovet är lägre i de hallar som inte används men för värmeföretagaren spelar det ingen roll eftersom faktureringen sker före kulvertarna. Rörledningens längd är uppskattningsvis 100 meter till Simons Elements huvudbyggnad och cirka 300 meter till deras hallar på andra sidan vägen samt 400 meter till JTK Power.

## 2.3. Kunderna

### 2.3.1. JTK Power

Metallföretag grundat 1958 i Vasa, flyttade 2001 till Vörå in i f.d. Oy Glamox Ab:s hall. Huvudsakliga produkter är stora ljuddämpare som tillsammans med en del svarvade delar görs som underleverans åt Wärtsilä, brand,- och skyddsrumsdörrar i stål samt, också de till stor del åt Wärtsilä. Dessa konstruktioner svetsas i företagets svetshall, en del manuellt, men de största ljuddämparna svetsas med automatisk gasbågsvetsning. Rökutvecklingen är stor från dessa maskiner, och därför behövs också effektiv ventilation. Trots bästa möjliga värmeåtervinning(enligt VD Kari Rinta) är värmeförlusterna via ventilationen därför stora vid kall väderlek. Detta kan observeras på energimätaren, där effektbehovet kan vara upp till tre gånger högre under arbetstid än senare på kvällen. Målning och torkning av de stora stålkonstruktioner kräver också värme, och till denna del finns ett visst behov även sommartid.

- hallyta ca. 8000 M<sup>2</sup>
- personal ca. 70 pers.

### 2.3.2. Simons Element

Husföretag grundat 1978 i Vörå. Tillverkar trähus som väggelement och volymmoduler. Värmen behövs inte till några processer utan huvudsakligen för personalens trivsel, som uppvärmning av utrymmena och sanitära behov. Förbrukningen varierar därför kraftigt med årstiderna. Företaget förfogar över flera fabrikshallar, men på grund av minskad produktion har de två hallarna på andra sidan vägen varit outnyttjade de senaste åren, och endast grundvärme har hållits i dem. Också i de ursprungliga hallarna har tillverkningen legat nere i januari på grund av permittering.

- hallyta ca. 11000 M<sup>2</sup>, av vilka 4000 M<sup>2</sup> står obrukade för närvarande och därför hålls svalare
- personal ca. 75

### 2.3.3. Kundernas energibehov

Båda kunderna har sina gamla oljepannor kvar, och dessa står konstant i viloläge, beredda att gå igång om värmen från centralen av någon orsak sjunker. Av en händelse hade detta inträffat vid mitt besök på platsen fredagen den 2 januari, någon typ av störning hade gjort att panntemperaturen då hade sjunkit från normala 90 grader till strax över 60. Jag passade då på att avlägga ett besök hos JTK Power, som verkade ha full bemanning på plats, helgperioden till trots. Fabriken har tre oljepannor med en sammanlagd effekt om 1400 kW, och alla tre gick nu med full effekt. Hur ofta detta inträffar är omöjligt att säga, eftersom saken inte har undersökts, men det är sannolikt att oljepannorna behöver hjälpa till vid effekttoppar under riktigt kalla vinterdagar även fastän torvpannan fungerar som den skall. Simons Element har en oljepanna på 350kW i gamla hallen, plus en panna av okänd storlek i byggnaderna på andra sidan vägen. Den sammanlagda panneffekten som ska ersättas med torvpannan på 1000 kW blir då ungefär det dubbla, eller 2000 kW. Det är sällan ekonomiskt vettigt att dimensionera en enskild panna för toppeffekten, i stället har man ofta någon mindre panna i reserv vid sidan om, eller åtminstone ansluten till samma nätverk. Enligt min uppdragsgivare, delägaren Fredrik Renfält på Finnish BMC är det ändå inte något problem att tidvis överskrida pannans nominaleffekt då rosten som är den mest begränsande faktorn är rejält tilltagen med sina 2,5 m<sup>2</sup>. Det här är ändå tills vidare otestat, eftersom vintern har varit så mild.

### 2.4. Bränslet

Bränslet är frästorv som produceras av Finnish BMC:s systerföretag Keskis Torv i Aknus, östra Vörå. Transporten på ca. 20 km sker med lastbil med inbyggd vågfunktion, vilket underlättar mängdbestämningen avsevärt. Vid centralen finns en ramp byggd av jordmassa, så tippning kan ske direkt i den fyrkantiga silon, som rymmer ca. 70 m<sup>3</sup>. Detta räcker för 3 - 10 dagars förbrukning beroende på årstid. Som reservbränsle kan torvpellets användas, för vilket det finns en tornsilo. Detta bränsle måste dock köpas utifrån, så det används endast i nödsituationer.

### 2.4.1. Torvens egenskaper

Torv består av delvis förmultnade växtrester, mestadels från olika mossarter och gräsväxter. Förmultningsgraden kan variera, och den påverkar halterna av kol, väte och syre i torven. Vid förmultningen avgår väte och syre, vilket medför att kolhalten stiger med förmultningsgraden. Torv innehåller alltid mera kol och mindre andel flyktiga brännbara gaser än träbränslen, vilket bör beaktas vid torvförbränning. Eftersom kol brinner som glödbädd behövs en större rostyta för ett sådant bränsle. En mindre andel flyktiga ämnen som kräver energi för att frigöras, ger också ett något högre värmevärde för torven.

Frästorven är porös och lös i konsistensen, vid leverans väger 50 kubikmeter 11-12 ton, dvs. drygt 200kg/m<sup>3</sup>, men den kan lätt packas och bilda valv och proppar i skruvar och frammatningsanordningar. Därför måste dessa vara rymligt utformade, i synnerhet i svängar och övergångar. Torvens fukthalt är relativt hög, vanligen 25- 40 % vid leverans, men upp till 50 % kan förekomma. Här bör kanske påpekas, att det här ändå inte är någonting exceptionellt; också skogsflis kan uppvisa liknande fukthalter om det lagras och hanteras slarvigt, vilket tyvärr är vanligt. Ett fuktigt bränsle kräver längre rostyta och mera primärluft, så att det hinner torka, förgasas och brinna till slut innan det når ändan på rosten och faller ner i askutmatningen.

### 2.4.2. Torven som bränsle globalt och historiskt

Det finns knappast någon annan energikälla, förutom möjligen kärnkraft, som är lika omtvistad som torven ur miljösynpunkt. Frågan om den ska räknas som förnyelsebart biobränsle eller inte hänger till stor del samman med vilket tidsperspektiv man väljer att anlägga och vad man relaterar denna användning av torvmossarna till. I Finland har torven en större nationalekonomisk och regionalt sysselsättande betydelse än i något annat land, och av den orsaken klassificeras torven här som *långsamt förnyelsebart bränsle* (Leinonen 2010), medan de flesta andra länder anser den vara ett fossilt bränsle. Denna diskussion faller utanför ramarna för denna undersökning, och jag nöjer mig därför med att konstatera att det finns goda argument både för och emot de olika synsätten.

Lite bakgrundsfakta kan ändå vara av intresse. Fram till 1970-talet var torvens roll som



energikälla i vårt land obetydlig, men i och med oljekrisen 1973 började intresset för alternativa bränslen att stiga. Användningen av torvbränslen har sedan dess ökat, men olika slags stödåtgärder och ändrad beskattning av bränslen har ett flertal gånger ändrat de olika bränsleslagens inbördes konkurrenskraft, vilket också syns på konsumtions-kurvorna. Trots vissa fluktuationer har ökningen ändå varit tydlig fram till en bit in på 2000-talet, och topparna inföll åren 2003 och 2007 med över 10,5 miljoner ton vardera (Statistikcentralen 2013). År 2011 påfördes torvbränslet en miljöskatt som medförde att många tidigare torveldade kraftverk nu gick över till importerat kol. Torvproduktionen har följaktligen mer än halverats sedan toppåren, för att vara nere på drygt 5 milj ton år 2013. Världsproduktionen av torv har också rasat till en bråkdel av den tidigare toppnoteringen 380 milj ton som inföll åren 1983 och 1984. Sedan 1992 har den pendlat mellan 20- 32 milj ton, och år 2013 var den 25 milj ton (U.S. Geological Survey, 2014). Dessa siffror för världsproduktionen inkluderar också torv som används till annat än bränsle, så som strö och jordförbättring. Det är Sovjetunionen och dess efterföljare Ryssland, Vitryssland och Ukraina som står för denna gigantiska minskning och den beror inte på att miljömedvetenheten skulle ha vaknat i dessa länder. Orsaken är snarast den att energibehovet minskade radikalt efter Sovjetunionens kollaps. Landet hade haft en mängd tunga industrier som var både omoderna och energikrävande, och dessa kunde nu inte hävda sig på den öppna marknaden, utan måste stängas. Denna minskning har gjort att Finland sedan 1990-talet är det ledande landet i världen vad gäller torvproduktion med 19% av världsproduktionen senaste år, och upp till 40% under toppåret 2003. Samma år stod torven för 15% av vårt lands sammanlagda el- och värmeproduktion. År 2013 hade denna andel sjunkit till 9,2% (uträknat från uppgifter tagna från Statistikcentralen 2014 och U.S. Geological Survey 2014)

När jag jämfört och sammanställt statistikuppgifter från olika källor har jag stött på flera olika sätt att ange mängden torv som använts till energiproduktion. Åtminstone enheterna Gigawattimme (GWh), Terajoule (TJ) och 1000-ton har förekommit. Omvandlingen mellan de två förstnämnda bereder inga större svårigheter. Enheten Watt definieras som Joule/sekund så det går 3600 Joule på en Wattimme, och då prefixet Tera ger ett 1000 gånger större tal än Giga så kan vi omvandla TJ till GWh genom att dividera TJ med 3600/1000, eller 3,6. Omvandlingen mellan vikt och energi blir lite oklarare, för då måste man bestämma ett genomsnittligt värmevärde för partiet i fråga, och då får fukthalten en central betydelse. I de tabeller från USGS som jag använt anges torvproduktionen i 1000 ton, och det anges inte tydligt om det är vikten i torrsubstans eller med någon specifik

fukthalt som avses. Genom jämförelser mellan olika källor har jag emellertid kommit fram till att det inte kan vara torrsubstans som avses, då skulle den totala energimängden bli allt för hög. Jag vill i stället introducera begreppet ”*Effektivt värmevärde vid mottagning*” eller  $q_{p,net,ar}$  som det används i Kvalitetshandbok för energitorv vilken är utgiven av Nordic Innovation Centre år 2005. Men eftersom jag saknar uppgifter om både fukthalt och effektivt värmevärde för torrsubstansen så kan jag inte räkna ut detta. Jag använder i stället det medelvärde för  $q_{p,net,ar}$  som jag hittar i VTT:s publikation (2000) ”Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia”(Alakangas 2000), 9,6 MJ/kg mottagningsfuktig torv. Enheterna kan då omvandlas så här:  $1 * 1000 \text{ ton} * 9,6 \text{ MJ/kg} = 9,6 \text{ TeraJoule}$ .

## 3. FÖRBRÄNNINGSTEORI

### 3.1. Inledning

Med förbränning avses vanligtvis ett kemiskt förlopp där värme frigörs som ett resultat av att ett ämne förenar sig med syre. (NE) Sådana ämnen som vi uppfattar som brännbara (som bl.a. kol, väte och svavel), har en eller flera löst bundna elektroner i atomens yttersta skal, medan syre har plats för två elektroner. Det som händer är att elektroner övergår från en högre energinivå i bränslets atomer till en lägre, mer stabil nivå i slutprodukterna, och skillnaden blir till värme. Det kan ske snabbt under stark ljus- och värmeutveckling som i en brasa, men det kan också vara ett långsamt förlopp som i kroppens metabolism, järnets rostande och komposthögens förmultnande.

Elektronerna flyttar dock inte helt över, i stället skapas en bindning mellan syret och det brännbara ämnet där de så att säga kan ha några elektroner gemensamt. För att sätta igång den här reaktionen behövs oftast en viss antändningsvärme, men efter det frigör varje molekyl som bildas tillräckligt med energi för att aktivera omkringliggande atomer. Förloppet blir då exotermt, vilket betyder att det ger ifrån sig mer värme än det tillförs.

Vi säger att det brännbara ämnet oxideras när det förenar sig med syre, men i den moderna definitionen är det ändå inte syret som är den avgörande faktorn, utan att det oxiderade ämnet avger elektroner till ett annat ämne, vilket oftast, men inte alltid är syre. Som exempel på en annan slags oxidation kan nämnas natriums förening med klor till natriumklorid. (NE, Ellervik & Sterner 2004)

### 3.2. Kolväten

Så gott som alla bränslen, vare sig de är fasta, flytande eller gasformiga är uppbyggda av kolväteföreningar. Fram till mitten på 1800-talet tillskrevs vissa ämnen något slags mystisk livskraft som inte kunde skapas på konstgjord väg, och dessa kom därför att kallas organiska. I takt med att materiens uppbyggnad av grundämnen klarnade, insåg man också att också att det var kolväteföreningar som var den gemensamma beståndsdelen för alla

organiska ämnen. Begreppet organisk lever kvar, trots att man numera har frångått denna strikta indelning. (Nationalencyklopedin)

I alla fasta bränslen ingår oftast också svavel, syre och kväve som aktiva beståndsdelar i varierande omfattning. Med kol och väte som ryggrad bildar dessa ämnen olika molekyllängder, som kan variera i längd och uppbyggnad på ett närapå oändligt sätt. Det är molekyllängdernas struktur som ger kolvätena deras vitt skilda egenskaper: långa kedjor ger fasta ämnen, halvlånga trögflytande och de allra kortaste bildar gaser.

I torv, trä och andra biobränslen bildar kol och väte polymererna cellulosa, hemicellulosa, lignin, kvävehaltiga kolväten (proteiner), och så kallade extraktiva ämnen\* (Alakangas 2000) så som bitumen och hartser. Eftersom torv per definition består av delvis förmultnade växtdelar, innehåller den dessutom också humusämnen, en restprodukt med hög kolhalt. Alla dessa ämnen utgör långa molekyllängder, cellulosa till och med extremt långa, vilket ger växtfibrerna deras styrka och gör att växtmassa inte så lätt förflyktigas. Vid förbränning och stark upphettning bryts de här molekyllängderna sönder till lättare och börjar förångas. Samma sak händer också vid förmultning, bara oändligt mycket långsammare.

### 3.3. Fasta och flyktiga ämnen

En del av bränslets kolväten avgår alltså som gas i en process som kallas pyrolys, och är temperaturen tillräckligt hög antänds de här gaserna och brinner med en flammande låga, som kan sträcka sig långt in i pannans konvektionskanaler. Det som blir kvar i glödbädden är då mestadels rent kol, som brinner på ytan utan synliga flammor. Ett bränsle med hög andel flyktiga ämnen kräver alltså en pannutformning med tillräckligt långa rökkanaler, medan strålningsvärmens från glödbädden bäst tas tillvara genom eldstadens närmaste ytor.

En viktig egenskap hos fasta bränslen är sålunda dess andelar av fasta och flyktiga ämnen. I en normal förbränning finns det ändå ingen klar och entydig gräns för denna uppdelning, då andelarna till stor del är beroende av rådande temperatur, tryck och reaktionshastighet. Därför har man infört normer för hur en bestämning av halten av flyktiga ämnen ska gå till. Enligt SFS-EN 15148 ska ett 100% torrt prov om 1 gram sättas i en degel med tättslutande lock, som placeras i en till  $900 \pm 10^\circ\text{C}$  föruppvärmd ugn, där den ska vara i exakt 7 minuter.

Degeln vägs före och under uppvärmning, och från viktskillnaden kan då andelen flyktiga ämnen\* räknas fram.(Raiko 2002, s.122) Man måste alltså ha en våg som klarar temperaturen inne i ugnen, då provets vikt igen kan öka vid avsvälning.

Någon sådan utrustning har jag inte haft tillgång till, men fördelningen fast kol/flyktiga ämnen har ingen central betydelse för min undersökning, och i den mån uppgifter om detta har behövts, har jag använt uppgifter från andra källor.

\*ämne som med hjälp av vatten eller organiskt lösningsmedel kan extraheras ur organiskt material (NE)

### 3.4. Fukthalt

Fukthalten hos bränslet har en avgörande betydelse för förbränningsförloppet, och är samtidigt den faktor som kan variera mest hos biobränslen, om man slarvat med beredningen eller lagringen. En förhöjd fukthalt inverkar menligt på panneffekten och verkningsgraden på åtminstone tre sätt:

1. Andelen inmatad torrsubstans minskar, och det är endast den som kan brinna.
2. Det åtgår en hel del energi att värma upp vattnet i bränslet till 100 grader, förångas det och sedan ytterligare överhettas ångan, om röktemperaturen överstiger 100 grader. Om bränslet är fruset går det dessutom energi till att tina upp det.
3. Fukten kyler eldstaden så det blir svårare att nå upp till en tillräckligt hög temperatur för att uppnå fullständig förbränning.

### 3.5. Aska

Förutom vatten och de ovan uppräknade grundämnena kol, väte, syre, svavel och kväve innehåller alla fasta bränslen dessutom en varierande mängd askbildande mineraler. Askan består i huvudsak av oxider av olika mineraler som i stort sett går opåverkade genom förbränningen. Halterna uppgår till ca. ~1% för träbränslen och 4-6 % för torv (Alakangas 2000), och för t.ex. stenkol och avfall kan halterna vara ännu betydligt högre.. Dessa

askämnen deltar inte i förbränningen men kan förorsaka problem inne i eldstaden genom att hindra luftflödet och kväva elden. I kombination med hög temperatur i glödbädden kan askan dessutom sintra ihop till fasta kakor, vilket ytterligare ökar risken för problem.

### 3.6. Förbränningsförloppet

#### 3.6.1. Förbränningens faser

Förbränningen av fuktigt fast bränsle kan indelas i fyra faser:

- Torkning (Temperaturen  $> 100^{\circ}\text{C}$ )
- Pyrolys (förångning av bränslets flyktiga beståndsdelar) ( $T > 200^{\circ}\text{C}$ )
- Förbränning av pyrolysisprodukter (det är denna som ger synliga flammor) ( $T > 500^{\circ}\text{C}$ )
- Slutförbränning av resterande kol och tjärämnen ( $T > 850^{\circ}\text{C}$ )

(Energidalen 2000).

Varje fas borde här ges den tid och det utrymme som den med tanke på bränslets beskaffenhet, fukthalt och effektuttag behöver. För att uppnå detta har vi en rad parametrar som borde optimeras, en del fasta och en del variabla. Fasta parametrar är pannans uppbyggnad så som inre volym, rostens och konvektionskanalernas längd mm. Eftersom dessa ges vid tillverkningen blir de kompromisser, anpassade efter det vanligaste bränslets specifikationer och ett bestämt effektuttag. Variabla parametrar är i sin tur sådant som effektuttag (= pannvattnets avkyllning), bränsleinmatning och lufttillflöde. Bränsleinmatningen bestäms av det aktuella effektbehovet, och sedan skall lufttillförseln anpassas till detta för att uppnå optimal förbränning och verkningsgrad. Det räcker inte med att luftmängden totalt sett är den rätta, det är också ytterst viktigt att den uppdelas i primär- och sekundärluft i rätta proportioner.

Primärluften är den som tillförs glödbädden, vanligtvis underifrån genom den rost(perforerat underlag) där bränslet ligger, medan sekundärluften tillförs de brinnande

gaserna efter eller ovanför glödbädden. Som tumregel brukar anges att vid torra bränslen ska primärluften utgöra 40% av den totala lufttillförseln och vid fuktiga bränslen 60% (Energidalen 2000). För lite primärluft ger dåligt drag så att hela förloppet blir långsamt, medan för mycket primärluft sänker temperaturen i glödbädden så att de partiklar och gaser som kräver högre förbränningstemperatur inte kan brinna upp, utan försvinner ut med rökgaserna oförbrända. En ofullständig förbränning syns som sot och beckavlagringar inne i eldstad och rökkanaler samt en tjock gråsvart rök ur skorstenen. För lite sekundärluft ger också ofullständig förbränning och mörkare rök, medan för mycket sekundärluft orsakar förluster genom en onödig avkylning av pannan. Ett luftöverskott syns oftast inte någonstans med blotta ögonen, utan endast genom rökgasmätning, där temperaturen då blir låg och syrehalten hög. En rökgasanalys är därför ett viktigt hjälpmedel vid inställning av pannor för bästa verkningsgrad. Vi skall återkomma till detta i avsnittet om luft- och rökgasberäkningar.

Dessa faser borde ske kontinuerligt och samtidigt för att temperaturen ska hålla sig tillräckligt hög och jämn, vilket innebär att bränslet borde tillföras i möjligast jämna takt. I praktiken tillförs bränslet ändå oftast mer eller mindre stötvis, vilket innebär en momentan temperatursänkning då andelen fuktigt, kallt bränsle plötsligt ökar i eldstaden.

### 3.6.2. De tre T:na

I svensk litteratur brukar talas om de tre T:na, tre parametrar som måste vara optimerade för fullständig förbränning. Dessa är tid, temperatur och turbulens.(Energidalen 2000, Rönnberg 2014)

*Tid:* Varje fas måste ges tillräckligt med tid för att ifrågavarande förlopp ska hinna utvecklas. Om man vill ha ut hög effekt måste strömningshastigheten också hållas hög, så tillräckligt med tid betyder då oftast att lågorna måste ha tillräckligt med utrymme(sträcka) innan gaserna träffar kallare ytor.

*Temperatur:* Om temperaturen blir för låg förblir koloxid, tjärämnen och restkol oförbrända. Den allra mest kritiska faktorn är här fukthalten, då vattnets förångning bortför mycket värme från eldbädden. En annan viktig faktor är bränslets andel av flyktiga ämnen

och fast kol. Ett bränsle med högre andel fast kol brinner nämligen mera lokalt på glödbäddens yta, vars temperatur då höjs avsevärt jämfört med om andelen flyktiga gaser är hög. Slutligen är också fraktioneringen av bränslet viktigt, eftersom finfördelat bränsle så som flis och frästorv exponerar mer brännbar yta åt lågorna. Betydligt fler bränsleatomer kan då reagera samtidigt, och värmen blir då mer koncentrerad än vad som är fallet vid eldning med stora vedklabbar. Ett sätt att höja temperaturen vid vedeldning är genom tegelfodring av eldstaden så att vattenmanteln inte kyler det brinnande bränslet. Värmen stiger, bränslet förgasas och brinner sedan med heta gaser längre in i pannan där de sedan avger sin värme till konvektionsytorna.

Att tillflödet av primär-, och sekundärluft är rätt dimensionerat är också viktigt för att kontrollera temperaturen. Ett för stort luftflöde kyler förbränningen i onödan. Men alltför hög temperatur är heller inte önskvärd, på grund av flera orsaker. En orsak är askan, som med torv som bränsle börjar närma sig sin smältpunkt efter 1100 °C, och därmed riskerar täppa till luftflödet genom rosten (Alakangas, 2000). Detta kan dock avhjälpas med rörliga rostar, som en panna byggd för torv borde vara utrustad med. Ett annat problem är bildandet av giftiga kväveoxider, som tilltar vid högre temperatur. Slutligen kan också materialen i pannan nå sin termiska hållfasthetsgräns.

*Turbulens:* Lufttillflödet bör utformas så, att det bildas turbulens inuti pannan, och luften blandas ordentligt med de oförbrända gaserna. I annat fall kan det bildas fickor, där bränslemolekyler inte har träffat någon syremolekyl, och en del av bränslet kommer då så att säga att försvinna oförbränt genom skorstenen.

### 3.6.3. Pannreglering och verkningsgrad

Bränsleinmatning och luftflöden kan alltså regleras inom vissa gränser för att svara mot effektbehov och ge bästa möjliga förbränning. Men om man sänker luftflödet, och därmed värmeutvecklingen i en befintlig panna blir det svårare att upprätthålla en hög temperatur, eftersom strålningsförlusterna är de samma. Minskat luftflöde ger också mindre turbulens, vilket inverkar negativt på förbränningsverkningsgraden, dvs. andelen oförbrända gaser i rökgaserna kommer att öka. Som tidigare nämnts spelar här pannans inre utformning stor roll. Sammantaget betyder det här att pannan som helhet är konstruerad att fungera bäst



med ett bestämt bränsle med bestämd fukthalt och ett bestämt effektuttag. Alla avsteg från dessa kan leda till att verkningsgraden sjunker.

#### 3.6.4. Torvens bränsleegenskaper.

Det ligger nära till hands att jämföra torven med träbränslen som flis, då båda är lokalt producerade bränslen som konkurrerar på samma marknad, och de har likartad kemisk uppbyggnad och likartade bränsleegenskaper. Det finns dock några viktiga skillnader, som att torv har högre andel fast kol och lägre andel syre och flyktiga kolväten. (Alakangas 2000) Orsaken till detta är att torv har en högre förmultningsgrad, vilket betyder att en del av de flyktigare beståndsdelarna redan avgått. Pyrolysgaserna har i sig högt värmevärde, men då frigörelsen av dessa ur fast bränsle är en endoterm process (energikrävande), blir nettoenergiutbytet ändå mindre för dessa gaser än för fast kol. På grund av sitt högre kolinnehåll har därför torv något högre värmevärde än träbränslen.

Vidare har torven hög fukthalt, över 40% är inte ovanligt, vilket förstärker inverkan mycket på förbränningsförloppet och energiutbytet. Om man jämför med sedvanligt torkad ved (ca 15- 25% fukt) eller träpellets (under 10%) är skillnaden förvisso stor, men skogsflis kan uppvisa lika höga fukthalter som torv, om virket före flisning lagrats slarvigt på fuktig mark eller täckts bristfälligt, vilket ofta är fallet i yrkesmässig hantering. Hög fukthalt i kombination med kompakt lagring i stack ger också stora energiförluster redan i lagringsskedet i form av värmeutveckling och mögelbildning (Nilsson 2011). Detsamma kan sägas om torv, även dess fukthalt kunde sänkas betydligt med en förändrad hantering, men det upplevs som besvärligt då torv är skrymmande och volymerna stora. Man kan alltså konstatera, att bränslets fukthalt och kvalitet är starkare kopplat till hanterings skala, än till någon egenskap hos själva bränslet i sig.

Frästorv är en porös, heterogen massa som kan innehålla klimpar, delar av trädrötter och långa växtdelar, och dess densitet är vanligen 200 - 300 kg/m<sup>3</sup>, beroende på packningsgrad. Denna låga densitet gör att rostyten behöver vara relativt stor för en viss önskad effekt, i synnerhet om fukthalten är hög. Bränslets volymflöde in till pannan blir också stort, vilket tillsammans med konsistensen ställer speciella krav på inmatningsanordningarna, då torven inte gärna faller av sig själv, utan är benägen att klumpa ihop sig till proppar och valv.

Också på eldbädden riskerar torven lägga sig ojämnt, vilket kan göra att tillförseln av primärluft underifrån blir ojämn, så att vissa delar av eldbädden förblir ofullständigt förbrända.

### 3.6.5. Verkningsgrad ( $\eta$ )

Verkningsgrad är ett allmänt begrepp inom värmeteknik och mekanik, och avser kort sagt hur stor del av den tillförda energin som kommer till nytta på det sätt som önskas. Eftersom man alltid har förluster blir det här ett decimaltal mindre än ett, men uttrycks i allmänhet som procent. Det finns olika sätt att bestämma verkningsgraden, så man måste vara uppmärksam på vad som egentligen avses. Detta gäller i synnerhet när det handlar om fasta bränslen med en viss fukthalt som ger upphov till förångningsförluster, också kallade desorptionsförluster. Beroende på hur dessa förluster beaktas kan det effektiva värmevärdet variera, och därmed också den tillförda energimängden. I min undersökning har jag valt ett beräkningssätt där denna förångningsenergi helt lämnas utanför, och bara den för denna anläggning tillgängliga energimängden betraktas som tillförd. Det finns dock andra synsätt, vilket förklaras i kapitlet 4.6.9.1. Desorptionsförluster och 6. Två jämförelseobjekt. Saken blir än mer komplicerad om man jämför en liten värmecentral med ett större kraftvärmeverk med rökgaskondensator, som återvinner en del av den nämnda förångningsvärmens ur rökgaserna. I verkligheten blir då en större del av bränslets energiinnehåll tillgängligt, men om man ändå använder samma värmevärde som för den enklare anläggningen kan verkningsgraden bli över 100%!

Dessutom använder många panttillverkare och andra mindre aktörer begreppet verkningsgrad på ett slarvigt och ibland direkt vilseledande sätt. De strävar naturligtvis efter att kunna redogöra för så bra siffror som möjligt för sina produkter, och det är då frestande att hänvisa till något som kanske kan uppnås endast under ideala förhållanden. Det mest flagranta är en tillverkare som angav verkningsgraden till 98%, då andelen oförbränt bränsle i aska och rökgaser tillsammans utgjorde 2% av den tillförda mängden. Övriga förluster beaktades således inte alls.

Verkningsgraden kan alltså anges på flera olika sätt, och några rent vetenskapliga definitioner tycks inte finnas. Jag har ändå valt att här presentera några av de mest

allmänna begreppen och deras användningssätt.

### 3.6.5.1. Pannverkningsgrad ( $\eta_{\text{pann}}$ )

Det som i det här arbetet avses med begreppet pannverkningsgrad är andelen nyttiggjord energi dividerat med tillförd energi, och det är också den definition som de flesta pannstillverkare använder. I mitt arbete har denna verkningsgrad beräknats med den direkta metoden (se kap. 3. Metod), som kan användas om man vet tillförd bränslemängd, bränslets värmevärde och nyttiggjord energimängd.

$$\eta\% = Q_{\text{nyttig}} / Q_{\text{tillförd}} * 100 \quad (\text{ekvation 1})$$

För enkelhetens skull kommer jag ändå att i stället för pannverkningsgrad att använda det kortare "verkningsgrad", och precisera mig där så behövs.

Även begreppet pannverkningsgrad kan misstolkas, om man inte är alldeles på det klara med definitionen av detta. Eftersom i synnerhet större pannor ofta säljs utan brännare eller rooster, och därmed mest består av konvektionsdelen, kunde begreppet lika gärna uppfattas gälla endast konvektionsytornas värmeöverföringsförmåga, och inte ha något med själva förbränningen att göra. Men begreppet avser alltså hela processen, från tillförd bränsleenergi till i rörledningarna nyttiggjord värme.

### 3.6.5.2. Förbränningsverkningsgrad ( $\eta_{\text{förb}}$ )

Förutom pannverkningsgrad används också begreppet förbränningsverkningsgrad ofta. Om man jämför med begreppet förbränningsförlust ( $CLM_{\text{ep}}$  = combustion loss mean effective pressure) inom motorläran som anger andelen bränsle som kommer ut i avgaserna oförbränt, kunde man förledas att tro, att förbränningsverkningsgrad enbart skulle ange till vilken grad bränslet verkligen förbränns. I stället avses en verkningsgrad där inte strålningsförluster och värmeförluster genom askan beaktas, så förbränningsverkningsgraden kan då definieras:  $\eta_{\text{förb}} = (\text{tillförd energi} - \text{rökgasförluster}) / \text{tillförd energi}$ . Det är denna verkningsgrad som anges i

rökgasinstrumentet, där  $\eta(\text{verkningsgrad}) + q_A(\text{rökgasförluster}) = 100\%$ . För direktvärmade eldstäder blir detta den mest relevanta verkningsgraden, eftersom all värme som produceras förutom den som går ut i skorstenen tillförs rummet.

### 3.6.5.3. Totalverkningsgrad ( $\eta_{\text{total}}$ )

Kan också kallas systemverkningsgrad och avser hela systemet från bränsleinmatningen till förbrukningspunkterna, som kan vara t.ex. radiatorer. Jämfört med pannverkningsgraden tillkommer då alla transportförluster i kulvertar, pumpar och värmeväxlare. I min undersökning blir detta irrelevant, eftersom producerad värmemängd mäts inne i pannhuset, och kunderna faktureras också utifrån dessa mätare. Kunderna betalar alltså för förlusterna i kulvertsystemet. (Vedpärmen/Ljungbom 1996)

### 3.6.5.4. Bränsleverkningsgrad ( $\eta_{\text{bränsle}}$ )

Det har berett mig problem att hitta tillräckligt entydiga benämningar på i kapitel 4.6.5.2. nämnda förluster i oförbränt bränsle och för verkningsgraden i form av andelen förbränt bränsle av tillfört bränsle. Eftersom termen förbränningsverkningsgrad redan är upptagen enligt definitionen ovan, väljer jag att för dessa poster i detta arbete att introducera begreppen bränsleförluster och bränsleverkningsgrad, även om risk för förvirring råder också här, eftersom det sistnämnda ofta används inom motorläran avseende en totalverkningsgrad: axeleffekt/tillförd bränsleeffekt.

### 3.6.6. Fukthalt

Fukthalt är provets innehåll av vatten, uttryckt i procent av hela provets vikt.

$$M_{\text{ar}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\text{ekvation 2})$$

$M_{ar}$  = fukthalt vid leverans, uttryckt i vikt-%  
 $m_1$  = den fuktiga provmängdens vikt  
 $m_2$  = provmängdens vikt efter torkning  
(Alakangas 2000)

Ibland uttrycks mängden fukt som fuktkvot, vilket är mängden fukt dividerat med mängden torrsubstans. Fuktkvoten anges som ett enhetslöst decimaltal, som kan vara större eller mindre än 1. Används ofta i fråga om gaser, och det är då volymerna av vattenånga och torra gaser som jämförs, inte vikterna. Formeln för fuktkvot är då enligt följande:

$\Phi = \text{volym vattenånga/volym torr gas (t.ex. rökgas)}$  (Nationalencyklopedin)

### 3.6.7. Kalorimetriskt och effektivt värmevärde

Den inneboende kemiska energin i en mängd bränsle kallas värmevärde och mäts i enheten Megajoule per kilogram (MJ/kg). Det kan anges som lägre, effektiva värmevärdet, angett med  $H_i$  eller  $Q_{lhv}$  (lhv=low heat value) eller det högre, kalorimetriska värmevärdet, angett med  $H_s$  eller  $Q_{hhv}$  (hhv=high heat value). Skillnaden beror på om rökstemperaturen kyls ner till under vattnets kokpunkt eller inte. Fasta bränslen innehåller 20-50% vatten, och dessutom bildar det väte som finns i bränslet vatten vid förbränningen. Då detta vatten vanligen avgår som ånga i rökgaserna uppstår en energiförlust jämfört med om röken skulle ha kylts ner till under 100°C. Ett kalorimeterprov görs med nära på 100% torrt bränsle, så där är det endast vätehalten som påverkar slutresultatet. Eftersom bomben kyls ner, så kan vattnets ångbildningsvärme som uppgår till 2,26 MJ/kg tas tillvara, och resultatet blir det högre värmevärdet. Därför kallas också det värmevärdet kalorimetriskt, och det är ca. 1-1,5 MJ/kg högre än det mer realistiska effektiva värmevärdet. Det finns ingen pålitlig process för att mäta det effektiva värmevärdet, men det kan beräknas om man känner till det kalorimetriska värmevärdet och bränslets vätehalt.

Vattnets specifika värmekapacitet, dvs den värmemängd som måste tillföras för att höja ett kg vatten är något större om uppvärmningen sker vid konstant tryck(betecknas  $C_p$ ) än om den sker vid konstant volym( $C_v$ ), och detta inverkar också i viss mån på det effektiva värmevärdet, som även det kan anges vid konstant tryck(betecknat  $Q_p$ ) eller konstant

volymq ( $Q_v$ ). I en kalorimeterbomb är volymen konstant, och ett kalorimetriskt värmevärde är följaktligen alltid ett  $C_v$ -värde. I en verklig förbränningsanläggning är det i stället trycket som hålls någorlunda konstant, eftersom rökgaserna tillåts utvidga sig och  $Q_p$  blir då det mest relevanta effektiva värmevärdet. Standarden SFS-EN14918:2009 anger följande formel för bestämning av det effektiva värmevärdet:

$$q_{p,net,m} = \{q_{v,gr,d} - 212,2 \cdot H_2 - 0,8 \cdot (O_2 + N_2)\} \cdot (1 - M/100) - 24,43 \cdot M \quad (\text{ekvation 3})$$

Där

$Q_{p,net,m}$  = effektivt värmevärde i pannanläggningen med leveransfukthalt  $M$  (J/kg)

$Q_{v,gr,d}$  = kalorimetriskt värmevärde (J/kg)

$H_2$  = vätehalt i vikt % av torrsubstans

$O_2$  = bränslets syrehalt i vikt % av torrsubstans

$N_2$  = bränslets kvävehalt i vikt % av torrsubstans

$M$  = leveransfukthalt i vikt %

Laboratorietrustningen som krävs för att göra elementaranalys av bränslet är komplicerad och dyr, och yrkeshögskolan Novia förfogar inte över någon sådan. Men nyttan av att veta de faktiska halterna av väte, syre och kväve är liten i detta sammanhang. Vi ser att i synnerhet kvävet och syrets inverkan totalt sett är obetydlig, och vätehalten i torven varierar å sin sida så pass lite att man gott kan använda ett normvärde även här. Enligt Alakangas(2000) ligger vätehalten mellan 5-6% , och jag har i mina uträkningar använt mig av värdet 5,58% ur tabell 1, därifrån också värdena 32,6% för syret och 2,01% för kvävet hämtats.

Det är alltså skäl att hålla isär begreppen när man talar om värmevärden för fasta bränslen. Den mest uppenbara skillnaden är att det effektiva värmevärdet kan anges antingen för torrsubstans eller vid leveransfukthalt, där det senare vanligen är 20-50% lägre, beroende på fukthalt. Skillnaden mellan kalorimetriskt( $H_s$ ) och effektivt värmevärde per torrsubstans( $H_i$ ) är inte lika markant, för torv vanligen ca. 1,5 MJ/kg, och den utgörs av välets förångningsenergi som normalt anses gå förlorad. Principen för omvandling mellan kalorimetriskt och effektivt värmevärde presenteras i många vetenskapliga skrifter (Raiko 2002, Alakangas 2006, SFS-EN 14918:2009), och dessutom i otaliga mer populära

publikationer. Problemet är bara att det finns ett flertal olika formler för denna omvandling där vätehaltens och fuktinnehållets inverkan beaktas på lite olika sätt, och ofta förklaras utgångspunkterna för detta inte tillräckligt. Som beskrivits ovan kan effektiva värmevärdet anges vid konstant tryck eller konstant volym, och det mest korrekta sättet att ange och beräkna detta torde vara vid konstant tryck,  $(q_{p,net,m})$  enligt ekvation 5 ovan. Ett förenklat räknesätt utgående från konstant tryck är ändå vanligast, även om bakgrund och härledning till detta sällan förklaras. En sådan förenklad formel kan se ut på nedanstående sätt:

$$H_i = H_s - 0,206 \cdot H_2 \cdot (1 - M/100) - 0,23 \cdot M \quad (\text{Raiko, 2000}) \quad (\text{ekvation 4})$$

Avdragen för väte- och fukthalt är här aningen mindre, och kväve och syre utelämnas helt från beräkningen. Av denna orsak ger detta ett något högre värde, men skillnaden är ändå obetydlig, ca 0,1-0,2 MJ/kg.

Sätten att beteckna värmevärdet är ändå betydligt fler än sätten att beräkna dem. För det övre eller kalorimetriska värmevärdet har jag stött på beteckningarna  $Q_s$ ,  $Q_{v,gr}$ ,  $Q_{hhv}$ ,  $W_k$ ,  $H_{hv}$  och  $H_s$ , och för det lägre eller effektiva värmevärdet  $Q_i$ ,  $Q_{v,nt}$ ,  $Q_{p,nt}$ ,  $Q_{lhv}$ ,  $W_{eff}$ ,  $L_{hv}$  och  $H_i$ . Ytterligare variationer i indexering kan förekomma, där  $d$ ,  $t_s$  och  $k_a$  vanligen betecknar torrs substans,  $M_{ad}$  analysfukthalt och  $M_{ar}$  leveransfukthalt.

För jämförelser mellan torv och träbränslen är en skillnad i beräkningssätt befogad; på grund av cellernas struktur är en del av fukten (upp till 23% fukthalt) hårdare bundet i träet än vad det är i torv. I allmänhet används ändå för värmevärdesberäkning av träflis en standardformel som liknar den ovan presenterade ekvation 6, och den ger alltså oftast ett något överskattat resultat.

### 3.6.7.1. Dulong's formel

Det kalorimetriska värmevärdet kan beräknas teoretiskt om man vet bränslets elementärsammansättning. Som konstaterats finns ingen sådan tillgänglig i det här fallet, men det kan ändå ha ett visst intresse att se lite på dessa formler. Den första kallas Dulong's formel och kan användas på alla fasta bränslen.

$$Q_{hhv} = 338,2 * C + 1442,8 * (H - O/8) + 94,2 * S \text{ (kJ/kg)} \quad (\text{ekvation 5})$$

Där C, H, O och S är grundämnenas vikt-% av den askfria torrsubstansen. Den följande kan användas explicit för värmevärdesbestämning av torv: (Båda formlerna från Raiko, R et al, 2002)

$$Q_{hhv} = 336 * C + 1420 * H + 0,72 * O^2 - 153 * O + 94 * S \text{ (kJ/kg)} \quad (\text{ekvation 6})$$

För att se hur dessa utfaller kan vi använda sammansättningen för frästörv ur följande tabell:

Tabell 1. Exempelbränslets beståndsdelar i torrsubstans

Bränsle	Kol (C)	Väte (H)	Kväve (N)	Syre (O)	Svavel (S)
Frästörv	54,5	5,58	2,01	32,6	0,19
Torvbriketter	55,7	5,69	1,97	32,7	0,17

(Mikael Kaustinen, översatt och ombearbetad från Alakangas, 2000):

$$1) Q_{hhv} = 338,2 * 54,5 + 1442,8 * (5,58 - 32,6/8) + 94,2 * 0,19 = 20621 \text{ kJ/kg} \quad (\text{ekvation 5})$$

$$2) Q_{hhv} = 336 * 54,5 + 1420 * 5,58 + 0,72 * 32,6^2 - 153 * 32,6 + 94 * 0,19 = 22092 \text{ kJ/kg} \quad (\text{ekvation 6})$$

Eftersom formlerna förutsätter askfria halter ska resultaten ökas med askhalten, t.ex. Ad = 5% .  $Q_{hhv, \text{ askfri}} = Q_{hhv} * (1 + Ad/100)$ . Den övre formeln ger då resultatet 21652 kJ/kg, och den nedre 23196 kJ/kg, vilket ska jämföras med det av VTT för samma parti bestämda värdet 22,1 MJ/kg. (Alakangas 2000)

### 3.6.8. Luft och rökgasmängder

Den teoretiskt behövliga luftmängden kan beräknas om man vet bränslets och luftens sammansättning, och om man dividerar den verkliga tillförda luftmängden med denna teoretiska luftmängd fås något som kallas luftfaktor, betecknat med  $\lambda$  (lambda). Om denna faktor är lika med 1 sägs blandningen vara stökiometrisk. Men då inblandningen aldrig kan bli perfekt, bör det ändå finnas ett visst luftöverskott för att möjligast fullständiga förbränning ska uppnås. Ett finfördelat bränsle som gas klarar sig med ett luftöverskott på



ca. 1,05, medan den andra ytterligheten handeldad stenkol behöver luftfaktorn 2,0. För träbränslen och torv borde luftfaktorn ligga mellan 1,25 - 1,4. (Energidalen 2000)

Enligt den allmänna gaslagen upptar en viss molekylmängd av en gas alltid samma volym om trycket och temperaturen är de samma, oberoende av gasens sammansättning. Sambandet uttrycks i formeln:

$$pV=nRT \text{ (hämtat ur MAOL:s tabellsamling)} \qquad \text{(ekvation 7)}$$

Där  $p$  är trycket i Pascal,  $V$  är volymen i kubikmeter,  $n$  är antalet molekyler i mol ( $6,022 \cdot 10^{23}$  st),  $R$  är allmänna gaskonstanten  $8,31451 \text{ J/molK}$  och  $T$  är temperaturen i Kelvin. För att lättare kunna jämföra olika gasmängder har man infört begreppet normalkubikmeter ( $\text{m}_n^3$ ), som är den volym en gas skulle uppta vid normalt tryck och temperatur ( $101325 \text{ Pa}$  och  $0^\circ\text{C}$ ). En normalkubikmeter innehåller alltid  $44,6$  mol molekyler, men vikten varierar beroende på gas.

Detta betyder att förbränning av rent kol resulterar i samma mängd koldioxid som den tillförda mängden syre, och då luftens kväve passerar oförändrat genom processen blir också tillförd luftmängd samma som rökgasmängd, allt räknat i mol. Men bränslet innehåller också andra ämnen, främst väte, syre och vatten(fukt). Vätet bildar vattenånga, där en syremolekyl ger upphov till två vattenmolekyler. Bränslets syre minskar behovet av tillfört syre, men mängden restprodukter förblir densamma. Både vätet och syret som finns i bränslet ökar alltså rökgasmängden något i relation till tilluftsmängden, men skillnaden blir inte stor, då såväl luft som rökgas till övervägande delen består av kväve, som inte påverkas. Därför approximerar man ofta i praktiska sammanhang den torra rökgasmängden att vara lika stor som tilluftmängden. (Energidalen 2000)

### 3.6.8.1. Beräkning av luftbehov och rökgasmängd

För att göra dessa beräkningar bör vi känna till bränslets sammansättning, ifrågavarande atomvikter och reaktionsförlopp.

'Som tidigare nämnts är torvens viktigaste reaktionsvilliga beståndsdelar kol(C), väte(H), syre(O) och Svavel(S). Dessutom ingår kväve, askämnen och vatten(fukt), men dessa

saknar betydelse vid beräkning av luftbehov. För rökgasvolymen spelar fukthalten däremot stor roll.

Med utgångspunkt i tabell 2 här ovan, där torvens genomsnittliga beståndsdelar anges per torrsubstans, och räknar om dessa till en fukthalt om 30%, vilket är realistiskt och nära medelvärdet i min egen undersökning. Tabellen får då följande utseende:

Tabell 2. Exempelbränslets beståndsdelar vid fukthalt 30%

Grundämne	vikt-%	atomvikt
Kol(C)	38,15 %	12,01
Väte(H)	3,91 %	1,008
Kväve (N)	1,41 %	14,01
Syre (O)	22,82 %	16,0
Svavel (S)	0,13 %	32,07
fukt	30%	

(Mikael Kaustinen, baserad på uppgifter från Alakangas 2000)

Resterande 3,6 % är då askämnen som inte deltar i processen.

Det teoretiska luftbehovet  $L_t$  i normalkubikmeter per kilogram bränsle ( $m_n^3/kg$ ) kan då beräknas med följande formel :

$$L_T := \frac{1}{100} \cdot \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) \cdot 4.76 \cdot 22.41 \quad (\text{ekvation 8})$$

(Alvarez 2006)

Där c,h,s och o är respektive grundämnes halter i bränslet. Kan anges antingen ur torrsubstans eller leveransfuktigt bränsle, då halterna givetvis blir motsvarande lägre.

4,76 ger totalt luftbehov utgående från syrebehovet(100/21 %syre).

22,41 är molvolymen i liter för en gas vid NTP (normal temperatur och tryck).

Observera att luftens fuktighet inte alls beaktas, men enligt Alvarez kan man bortse från den, då den uppgår till endast ca. 1% av luftens volym.

På motsvarande sätt kan rökgaserna beräknas. Här måste vi dock ta med termen f för

bränslets fukthalt, som bildar vattenånga i rökgaserna. Vi måste också skilt beräkna de restprodukter där syret ingår, och skilt den mängd kväve som den tillförda syremängden för med sig. Följande formel är också hämtad från Alvarez, och kompletterad med faktorn 22,41 för omvandling till normalkubikmeter (fuktig) rökgas per kilogram bränsle:

$$G_t := \frac{1}{100} \cdot \left[ \frac{c}{12} + \frac{h}{2} + \frac{f}{18} + \frac{s}{32} + \frac{n}{28} + 3.76 \cdot \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) \right] \cdot 22.41 \quad (\text{ekvation 9})$$

Ofta anges mängden rökgas som torr, och för att få den måste vi ur ekvationen ovan stryka termerna  $h/2$  och  $f/18$  som anger vatten bildat ur bränslets väteinnehåll, plus andelen fukt i bränslet. Ekvationen får då följande utseende:

$$G_t := \frac{1}{100} \cdot \left[ \frac{c}{12} + \frac{s}{32} + \frac{n}{28} + 3.76 \cdot \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) \right] \cdot 22.41 \quad (\text{ekvation 10})$$

För att få en uppfattning om storleksordningen på gasflödet kan vi sätta in de approximativa värdena från tabell 2, och vi gör samtidigt ett antagande om 30% fukthalt. Vi får då följande resultat:

$$\begin{aligned} L_t &= 3,69 \text{ /kg bränsle} \\ G_t &= 4,45 \text{ /kg bränsle} \\ G_{t,\text{torr}} &= 3,64 \text{ /kg bränsle} \end{aligned}$$

Vi kan konstatera att detta stämmer väl överens med det diagram som finns på sidan 491 i Alvarez' bok, där vi kan avläsa  $L_t \sim 3,7$  /kg och  $G_t \sim 4,5$  /kg för torv med fukthalten 30%. Dessutom kan vi se att det effektiva värmevärdet blir ca. 13,7 MJ/kg vid samma fukthalt.

### 3.6.9. Förluster

Vart tar då den energi som inte blir till nyttiggjord värme vägen? Det finns ett antal förlustposter som återfinns i alla pannanläggningar, men deras betydelse kan självfallet variera beroende på pannans uppbyggnad och driftsätt.

De viktigaste förlusterna är följande:

- \* desorptionsförluster (till den del de inte beaktats redan i värmevärdet, se nedan)
- \* värmeförluster, som:
  - rökgasvärme
  - strålnings,- och konvektionsvärme från pannans hölje och rörledningar inuti pannrummet
  - värme som bortförs med askan
- \* uppvärmning av luft och bränsle med fuktinnehåll från rådande (ytter)temperatur till rumsvärme (antas i allmänhet till +25°C)
- \* oförbränt bränsle, i form av spill från rosten ner i askan
- \* oförbrända gaser och partiklar i röken, mestadels koloxid(CO) och sot(C)
- \* transport(kulvert-)förluster och andra systemförluster utanför pannrummet.

Eftersom energimätarna som ligger till grund för faktureringen av de två kunderna i det här fallet befinner sig inne i panncentralen, saknar kulvertförlusterna betydelse för mitt arbete.

### 3.6.9.1. Latent och sensibel värme

Den värme som binds i vattenångan brukar ofta delas in i en latent och en sensibel del. (Rönnberg 2014) Den latent energi är den som binds vid fasövergången från flytande till gasform, som sker vid konstant temperatur 100°C. Vid kondensering sker det omvända och samma energimängd frigörs. I en pannanläggning krävs en rökgaskondensator för att åtminstone delvis kunna ta tillvara denna latent värme, som då kan användas till förvärmning av vatten och luft. Om bränslet innehåller fruset vatten binder detta också latent värme när det tinas upp, men den här energin är svårare att återvinna. Förångningsvärmens är 2260kJ/kg och smältvärmens är 333kJ/kg.

Den sensibla värmeenergin är den som binds före, efter och mellan fasövergångarna, och temperaturökningen är då hela tiden proportionell mot tillförd värmemängd. Den här energin kan då enkelt utnyttjas i värmeväxlare, bara temperaturskillnaden är tillräckligt stor. Värmekapaciteten för vatten är 4,19 kJ/kgK, för is 2,09 kJ/kgK och för vattenånga under atmosfärstryck 2,03 kJ/kgK. (förklaring ur Nationalencyklopedin; värmevärden ur MAOL:s tabellsamling.)

Av ovan framgår att ångbildningsvärmens är den absolut största posten vid upphettning av vatten, och borde därför vara den angelägnaste att ta tillvara, men till det krävs som sagt en rökgaskondensator, något som oftast bara återfinns på större anläggningar som ångkraftverk.

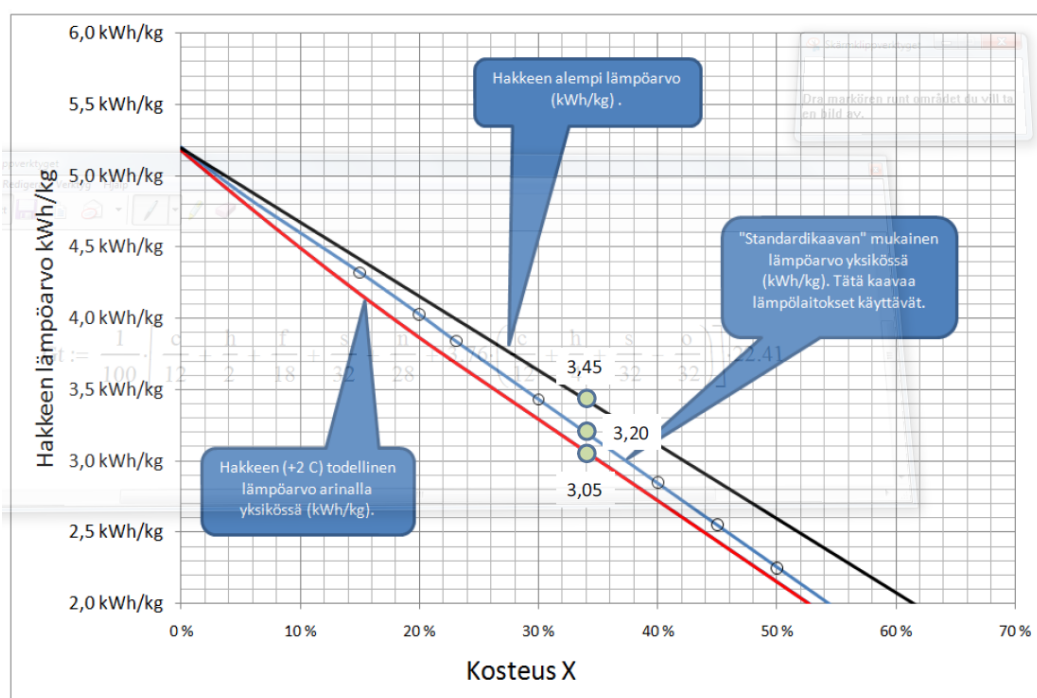
När man anger effektivt värmevärde för ett fuktigt bränsle utgår man därför oftast från den värmemängd som är tillgänglig för värmepannor utan kondensering, och därför kan verkningsgraden bli över 100% om ett sådant beräkningssätt används för en panna med rökenskondensator. Det är alltså inte helt lätt att hålla isär olika begrepp och beräkningssätt!

### 3.6.9.2. Desorptionsförluster

Desorption betyder att molekyler avlägsnas från ytan av ett fast ämne t.ex. med hjälp av temperaturhöjning (Nationalencyklopedin 2015). När det gäller bränslafukt betyder det här en fasövergång från flytande till gasform, en process som binder latent värme. Detta kan ses som en förlustpost, men största delen av de här förlusterna avdras redan i beräkningen av det effektiva värmevärdet och de lämnar på så sätt helt utanför balansräkningen. Men i de förenklade beräkningsmodeller för värmevärdet som ofta används kan en del av den latent energi förbli obeaktad, och måste då upptas som en förlust i systemet. Detta gäller i synnerhet när bränslet är trä ss. skogsflis, där en exakt beräkning är något komplicerad, varför en förenklad modell ofta används (se Figur 1 nedan, samt kap. 3.6.7, Effektivt värmevärde och kap. 6.1, Kelviårapporten).

Fuktens bindningsenergi skiljer sig en del mellan torv och trä, och dessutom varierar den för träets del med fukthalten. Upp till 23 % fukthalt är nämligen vattnet hårdare bundet i cellväggarna, medan den överstigande delen finns lösare bundet inne i cellernas håligheter. Av den här anledningen används för trä ofta en något förenklad formel för beräkning av det effektiva värmevärdet, och resultatet kan bli något missvisande i jämförelser med andra undersökningar. I Kelviå-undersökningen som jag har använt som jämförelse redovisar man tre olika beräkningssätt som ger tre olika nivåer på värmevärdet, och man använder sig av det mittersta som man kallar ”standardmetoden”. (standardförfarandet, förf. översättning)

Figur 1. Flisens energiinnehåll som funktion av fukthalten beräknat med tre olika metoder.



- flisens bruttoenergiinnehåll utan avdrag för förångning av fukten
- flisens energiinnehåll enligt standardmodellen
- flisens verkliga nettoenergiinnehåll vid förbränning

(Omarbetad från Härkönen, 2012)

Den metod som ger det lägsta värmevärdet är uppenbarligen den mest exakta, och samtidigt den som är mest jämförbar med mina beräkningar för torv, där beräkningsmetoden är betydligt enklare. I Kelviårapporten redovisas förlusterna i ett cirkeldiagram, där skillnaden mellan dessa beräkningssätt kallas ”todelliset lisädesorptionshäviöt” (verkliga tilläggsdesorptionsförluster), och utgör 4,3% av tillförd bränsleeffekt. Några desorptionsförluster har jag inte räknat med i min egen undersökning, då jag anser att det effektiva värmevärde som jag använt är ett netto där alla sådana förluster redan beaktats. Detta innebär att verkningsgraderna för de två undersökningarna inte heller kan jämföras direkt. För jämförelsen har jag därför i Kelviås fall lämnat bort den här förlustposten på 4,3%, och minskat den tillförda energimängden med motsvarande energimängd. Resultatet blir då att verkningsgraden borde ökas från redovisade 83,8% till ca. 87%.

### 3.6.9.3. Rökgasförluster

Rökgasförlusterna består i huvuddrag av tre komponenter: värmeenergin i rökgasernas torra del, den sensibla värmeenergin i vattenångan och förlusterna i oförbrända ämnen. Varken Siegerts formel eller den rökgasanalysator som jag använt inkluderar vattenångans entalpi i rökgasförlusterna, i båda fallen är det enbart förlusterna i rökgasernas torra del som anges. Det här är inget stort fel eftersom vattenångans latent värme, som utgör huvuddelen av ångans värmeenergi redan beaktats i värmeverdet (se kap. 3.6.7.). Däremot borde ångans sensibla del medräknas i förlusterna, dvs den energi som åtgår att värma fukten från +25°C till 100°C, och vidare som överhettad ånga från 100°C till utloppstemperatur. Förluster i oförbränt kan bestå av gaser, i första hand koloxid, men även metan och andra kolväten kan förekomma, eller av fasta kolpartiklar, d.v.s. sot. Värmeförlusterna kan teoretiskt beräknas noggrant med hjälp av flöden och entalpiskillnader\* om man har tillgång till en elementaranalys av bränslet, men det kan också göras på ett förenklat sätt med hjälp av Siegerts formel:

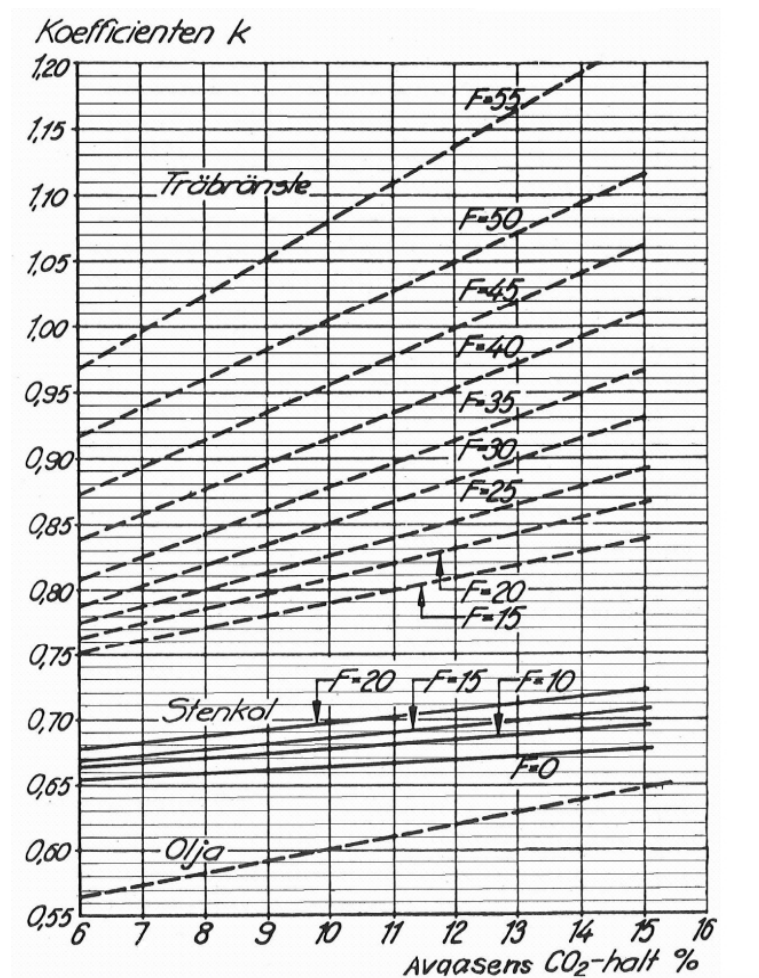
$$F_s = \frac{T_2 - T_1}{CO_2} * k \quad (\text{ekvation 11})$$

(\*entalpi=gasers sammanlagda energiinnehåll, där både tryck och temperatur ingår)

Där

F <sub>s</sub>	=	den torra rökgasförlusten
T <sub>2</sub>	=	uppmätt rök Gastemperaturen
T <sub>1</sub>	=	inloppsluftens temperatur, antas vanligen till +25°C
CO <sub>2</sub>	=	rök gasernas koldioxidinnehåll
k	=	koefficient ur nedanstående diagram

Figur 2. Siegerts diagram



(Källa: Formelsamling, Kalmar Maritime University 2012)

Som synes finns inte torv med som ett alternativ i diagrammet, men användning av skalan för träbränslen torde inte ge alltför stor felvisning. En överslagsberäkning med de mätvärden jag fick vid mätningen 14.2. ger en förbluffande samstämmighet med mätarens framräknade rökgasförlust. CO<sub>2</sub> - halten var då 8,6% och temperaturen 95°C, och för bränslets fukthalt 30% kan man avläsa ett k-värde på 0,82 ur diagrammet. Vi får då följande uppställning med Siegerts formel:

$$F_s = \frac{95 - 25}{8,6} * 0,86 = 6,75 \% \quad (\text{ekvation 11})$$

Vilket kan jämföras med 6,55% som mätinstrumentet angav.



#### 3.6.9.4. Uppvärmning av bränsle och tilluft

Beräkningar av rökgasförlusterna utgår oftast från pannrummets temperatur, som antas vara +25°C. Så är också fallet i Siegerts formel som presenteras . I synnerhet vintertid åtgår dock energi till att värma upp bränslet och luften från rådande utetemperatur till sagda 25 grader, en energimängd som då borde bokföras som en tilläggsförlust. Man bör här inte glömma bort, att också luftens och bränslets fukttinnehåll kräver energi för denna uppvärmning(ca.4,19kJ/kgK), och om bränslet är fruset åtgår dessutom 333kJ/kg fasomvandlingsenergi.

#### 3.6.9.5. Övriga Förluster

Hit hör poster som pannkroppens ytförluster, andelen brännbart kol i askan och den värme som askan innehåller vid utmatningen. För att bestämma dessa skulle utredning över pannytans storlek och temperatur, askflödet, askans temperatur och värmekapacitet behöva göras, men eftersom dessa förluster i allmänhet är små har inga sådana utredningar gjorts. Vid behov har istället antagna värden från andra källor använts.

### 3.7. Rökgasanalys

Genom att analysera rökgaserna kan vi få mycket värdefull information om vad som sker inne i eldstaden. Syre- och koloxidhalt och temperatur är de parametrar som berättar mest, men de måste vägas mot varandra och bedömas enligt vilken panntyp och vilket bränsle det är fråga om.

Erfarenheten har visat att syrehalten bör ligga mellan 5- 8% för bästa verkningsgrad i en modern, välfungerande panna. Är syrehalten lägre kommer sannolikt inte alla gaser att brinna upp, och vi får högre halter av oförbränt koloxid i röken. Om syrehalten är hög är också luftfaktorn hög, vilket betyder att man vädrar ut värme genom skorstenen. Dessutom ökar utsläppen av skadliga kväveoxider med hög luftfaktor.

Halten oförbränd koloxid ska vara så låg som möjligt, då utsläpp av denna är både oekonomiskt och skadligt för miljön. Hög koloxidhalt kan bero på för liten lufttillförsel,

men det kan också finnas andra orsaker. För fuktigt bränsle eller för stor bränsleinmatning kan vara orsaken, eller en konstruktionsmässigt dålig panna.

En hög rökgastemperatur betyder ofelbart värmeförluster, men en för låg temperatur är inte heller bra. I det låga tryck som råder i skorstenen kondenserar vattenånga vid ca 80°C, och eftersom röken också innehåller svavelsyra kommer korrosionen att öka kraftigt i alla skorstenar som inte är syrafasta. En låg temperatur är i och för sig bra om orsaken är effektiv värmeväxling i pannan, för då är värmeförlusterna låga. Men det kan lika gärna bero på dålig förbränning och låg temperatur i eldstaden, vilket då visar sig i en förhöjd CO-halt. Vad som är optimal temperatur beror dock mycket på hur bra och effektiv panna man har. En modern pannanläggning med tillufts- eller rökgasfläkt och syrafast skorsten kan tillåtas en röktemperatur till och med under 100°C, och är då mycket effektiv. Den andra ytterligheten, en mindre olja/ved-dubbelpanna med självdrag och korta konvektionskanaler kan vid vedeldning kräva en rökgastemperatur uppåt 300 grader för bästa förbränning, men värmeförlusterna genom skorstenen blir då självklart stora.

### 3.7.1. Syrehalt och luftfaktor

Om förbränningen skulle vara stökiometrisk, vilket innebär ett tänkt förlopp där allt bränsle förbränns och allt tillfört syre förbrukas, skulle syrgashalten i rökgaserna vara noll. Största delen av syret skulle då ha ersatts av koldioxid i rökgaserna, som volymmässigt i stort sett skulle motsvara tilluftsmängden. I verkligheten måste vi ändå ha ett visst överskott luft för att garantera fullständig förbränning, och detta luftöverskott passerar då bara genom pannan och blir en del av rökgaserna. Eftersom mängden kväve ökar i samma proportion som syret, kommer halten syre och koldioxid tillsammans att vara ungefär densamma som luftens syrehalt, eller ca. 21%. Det finns alltså ett klart samband mellan luftfaktor och syre-, och koldioxidhalt i rökgaserna, och man kan således beräkna två av dessa om man känner den tredje. Vill man få ett noggrannare resultat kan man också ta den lilla mängd oförbränd koloxid som alltid finns i rökgasen med i beräkningarna, och vi får då följande formler, hämtade ur Alvarez Energiteknik(2006), s.493 :

luftfaktor utgående från CO<sub>2</sub> och CO:

$$n := 1 + \frac{gt, \text{ torr}}{lt, \text{ torr}} \cdot \left[ \frac{CO_2, t}{CO_2 + CO} \cdot \left( 1 - 0.5 \cdot \frac{CO}{100} \right) - 1 \right] \quad (\text{ekvation 12})$$

luftfaktor utgående från O<sub>2</sub> och CO:

$$n := 1 + \frac{gt, \text{ torr}}{lt, \text{ torr}} \cdot \frac{O_2 - 0.5 \cdot CO}{21 - O_2 + 0.395 \cdot CO} \quad (\text{ekvation 13})$$

Där gt, torr är teoretiska volymen torra rökgaser, lt, torr är teoretiska volymen torr tilluft, CO<sub>2,t</sub> är teoretisk koldioxidhalt och CO<sub>2</sub>, CO och O<sub>2</sub> är verkliga uppmätta halter i rökgaserna, angivet i v-%.

För överslagsberäkning av luftfaktor i praktiska sammanhang används ofta följande förenklade formel, utgående från rökgasens syrehalt:

$$n := \frac{21}{21 - O_2} \quad (\text{ekvation 14})$$

Observera att ovanstående formler alla baseras på torra luft-, och rökgasmängder. Fukthalten i rökgaserna brukar röra sig om 10- 15 %, beroende på bränslets väte- och fukthalt, och med dessa formler får man då motsvarande felvisning. För jämförelser och uträkning av luftfaktor spelar detta emellertid ingen större roll, eftersom också rökgasmätaren ger halterna i torr volym. När den suger ut ett gasprov ur rökkanalen kommer detta att kylas ner, och fukten kondenseras och upptar inte längre någon volym att tala om

## 4. METOD

### 4.1. Inledning

Ett examensarbete inför ingenjörsexamen förväntas nå en viss vetenskaplig nivå och höja sig över det som sedan blir ingenjörens vardagliga uppgifter. Många av de uppdrag som står till buds syns ändå ganska triviala, och man frågar sig vad som egentligen är vetenskap. Enligt Göran Wallen(1996) karakteriseras vetenskaplig forskning genom att dess förutsättningar, metoder och tillförlitlighet utsätts för systematisk granskning. Ett vetenskapligt arbete skall ha en klar disposition, tydliga källhänvisningar och ett korrekt språk. Dessa formella kriterier är ändå inget självändamål, då det som forskaren bör sträva efter är *transparens* (Sohlberg 2009). Det ska helt enkelt stå klart för läsaren hur forskaren resonerat, vilken tidigare forskning han bygger vidare på och vilka metoder han använt för att komma fram till de slutsatser som dragits.

Inom samhällsvetenskaplig och humanistisk forskning är en av de första frågorna forskaren ställer sig om han ska använda sig av en kvalitativ eller kvantitativ forskningsmetod, men frågan är inte helt irrelevant inom naturvetenskapen heller. En kvalitativ ansats kännetecknas av en eller ett fåtal forskningsobjekt(oftast människor) som man söker en lite djupare förståelse för. Den kvantitativa studien handlar å sin sida mera om statistik och enkla, mätbara förhållanden hos ett större antal objekt. Av tradition har naturvetenskaplig forskning ansetts vara av kvantitativ art, men åtminstone i inledningsskedet av varje forskningsprojekt är man tvungen att göra en *kvalitativ kategorisering* (Wallen 1996) för att identifiera och karakterisera de faktorer som man sedan skall mäta.

I min forskning har jag haft endast ett objekt som jag undersökt, Simons-värmecentralen, och varefter undersökningen framskred insåg jag att det fanns mycket mera jag ville veta, än vad som formulerats i den ursprungliga forskningsfrågan. Min strävan blev då till slut att så bra som möjligt förstå hur pannan fungerar och reagerar på yttre förändringar, och därigenom kunna avgöra vad som vore optimala betingelser. Med de begränsade mätdata som jag hade till mitt förfogande kan jag väl inte säga att jag lyckades till hundra procent, men åtminstone vet jag nu betydligt mer än när jag började.

Enligt Harald Svens, delägare och pannskötare hos Vörå Energiandelslag, har varje panna

sina egenheter, sitt ”eget själsliv”, också fastän man jämför två pannor med helt identiska specifikationer. Därför kan aldrig heller teoretiska beräkningar och mätningar, hur värdefulla diagnostiseringsverktyg de än är, helt ersätta den fingertoppskänsla som en pannskötare med mångårig erfarenhet besitter. Att bygga eldstäder och att elda i dem är uråldriga färdigheter, som man behärskade redan före man hade matematik och skriftspråk. En del av den kunskap som modern forskning bygger på är just av det här slaget, och Wallen(1996) kallar det här *praktisk kunskap* och *tyst kunskap*.

## 4.2. Val av metod

Svaret på min forskningsfråga, ”*Vad är verkningsgraden?*”, är i sin mest förenklade form ett numeriskt tal, och metoden för att söka svaret på frågan blir därför matematisk.

Pannverkningsgraden kan enligt Fransson och Larsson (1989) beräknas på följande sätt:

- *Direkt metod* genom att bestämma den tillförda effekten (Pt) till pannan och den av pannan avgivna nyttiga effekten
- *Indirekt metod* genom att bestämma tillförd effekt (Pt) till pannan och pannans förluster
- *Indirekt metod* genom att bestämma pannans avgivna nyttiga effekt (Pn) och pannans förluster.

Valet av metod beror främst på vilka data som finns tillgängliga och deras tillförlitlighet eller relevans. De indirekta metoderna kräver fullständiga utredningar över alla förluster, där i synnerhet strålningsförlusterna kan vara svåra att uppskatta. Därför är den direkta metoden att föredra där den är möjlig. I vissa fall som när det t.ex. gäller avfallsförbränning kan det dock vara svårt att bestämma bränslets värmevärde eftersom det varierar mycket och då kan metod 3 utgöra det enda alternativet. Om energimätare saknas blir bestämningen av den nyttiggjorda effekten vanskelig, och i sådana fall används metod 2.

För denna undersökning kan den tillförda energimängden beräknas från tillförd bränslemängd och gjorda bränsleanalyser, och den nyttiggjorda energimängden kan direkt avläsas från energimätarna i panncentralen, varför den direkta beräkningsmetoden(1) föll sig mest adekvat. Formeln för denna beräkning ser då ut så här:

$$\eta\% = Q_{\text{nyttig}} / Q_{\text{tillfört}} * 100$$

(ekvation 1)

### 4.3. Datainsamling och analyser

För att kunna beräkna verkningsgraden för en värmecentral enligt den direkta metoden behöver man följande data:

- producerad (fakturerad) värmemängd (MWh) per tidsenhet
- tillförd bränslemängd (kg) per samma tidsenhet
- bränslets kalorimetriska värmevärde (MJ/kg)
- bränslets leveransfukthalt (vikt-%)
- värmecentralens elförbrukning i fläktar och pumpar.

Datainsamlingen inleddes 6.10.2014 vid den första torvleveransen efter det att överenskommelsen med uppdragsgivaren var klar. Uppföljningsperioden längd blev då inte fastslagen, utan det blev bestämt att låta väderleken avgöra, så att det inom perioden också skulle finnas en period med kallt vinterväder, tillika med det milda höstvädret som då rådde. Vintern blev dock ovanligt mild, och när det sedan också uppstod tekniska problem med en energimätare kom undersökningen att pågå ända till 2.2.2015. Den egentliga mätperioderna blev då två, tiden 6.10- 3.12.2014 och 10.1.-2.2.2015.

#### 4.3.1.Mätaravläsning

Som redan påtalats så är producerad värmemängd i detta fall enkel att bestämma, då den direkt kan avläsas från mätarna inne i värmecentralen. Dessa mätare, en för vardera kunden, avläser kontinuerligt flödet och temperaturerna på avgående och inkommande rörledningar, och beräknar automatiskt levererad energimängd utgående från detta. Från mätarna kan även avläsas momentana temperaturer, flöden och effekt.

Jag har frekvent besökt värmecentralen och hämtat de provpåsar med torv som chaufförerna lämnat vid torvleveranserna, och då samtidigt antecknat dessa mätares aktuella ställningar. Torven har levererats med 2-6 dagars intervaller, eller i medeltal

ungefär var tredje dag. Dessutom har jag vid behov gjort tätare avläsningar för att ringa in energiförbrukningen under en arbetsdag, över ett veckoslut och under speciellt kalla eller varma dagar. För att vid behov kunna räkna även på kortare perioder hade det naturligtvis varit önskvärt att avläsningarna skulle ha sammanfallit med leveranserna, men så har inte alltid varit fallet. I undersökningens del 2 har chaufförerna i regel antecknat mätarställningarna vid leverans, men nyttan av detta kom att bli liten under denna period. I pannrummet finns också pannstyrningens display, där man bland annat kan avläsa de momentana värdena för driftprocent, rökgas,- och panntemperatur samt syrehalt i rökgaserna, och för att få en bild av pannans funktion har också dessa antecknats vid varje besök som jag gjort. Totalt gjordes 45 avläsningar av energimätarna och styrenhetens parametrar. 9 av dessa gjordes dock under perioden 4.12.2014-9.1.2015 som kom att lämnas utanför beräkningarna, men de bidrog ändå till förståelsen av pannans funktion vid kallare väderlek.

#### 4.3.2. Provtagning

Anteckning av leveransmängderna torv har skötts av chaufförerna, och de har också tagit ett torvprov från varje lass. Enligt den europeiska standarden SFS-EN 14778 ska provtagningen utföras med minutiös noggrannhet så att prov tas från flera ställen i partiet, provet blandas, sållas och delas enligt ett givet mönster, så att samplet blir möjligast representativt för hela partiet. Då jag själv inte kunnat närvara vid leveranserna som skötts av ett flertal olika chaufförer, har vi för enkelhetens skull valt att frånga denna procedur, och helt enkelt tagit ett prov från den torv som råkat hamna överst efter tömningen. Som förpackning har använts tättslutande plastpåsar av minigrip-typ, och mängden har varit cirka 0,5 kg. Dessa påsar har sedan förvarats i laboratoriets kylskåp, så att leveransfukten på bästa sätt kunnat bevaras fram till analystillfället.

### 4.4. Analyser

#### 4.4.1. Leveransfukthalt

Som nämnts har fukthalten stor betydelse vid bestämning av det effektiva värmevärdet, och

den har därmed stor inverkan på den slutgiltiga verkningsgraden. Därför är en fukthaltsbestämning det första som görs vid laboratorieanalyser av fasta bränslen, och det resultat som fås anses då gälla för hela partiet, ända tills det är förbrukat. 30 prov insamlades från lika många leveranser, och de analyserades alla för leveransfukthalt, eftersom jag befara att den kunde variera mer än någon annan parameter.

Denna procedur har utförts enligt standarden SFS-EN14774-2, vilken är en förenklad metod som är lämpad för fukthaltsbestämning av fast bränsle i den konsistens det har vid leveransen d.v.s. före den malning som blir nästa steg. Metoden går ut på att ugnstorka torven vid  $105\pm 2^\circ\text{C}$ , och väga den före och efter torkning. Hela påsens innehåll på cirka 1/2kg torv breddes ut i ett tunt skikt på cirka 35 x 50 cm stora plåtar som först vägdes först tomma och sedan med den fuktiga torven. Någon torktid finns inte angiven, utan provet torkas tills viktminskningen så gott som avstannat. Man tar ut och väger plåtarna flera gånger med 1 timmes mellanrum, och om viktminskningen sedan föregående vägning är mindre än 0,2% av den totala viktminskningen bedöms provet vara torrt. Fukthalten i procent fås då ur följande formel.

$$M_{ar} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\text{ekvation 2})$$

$M_{ar}$  = fukthalt vid leverans, uttryckt i vikt-%

$m_1$  = den fuktiga provmängdens vikt

$m_2$  = provmängdens vikt efter torkning

(Alakangas 2000)

#### 4.4.2. Kalorimetriskt värmevärde

Man kan nog påstå att bestämning av värmevärde är själva kärnan i en bränsleanalys. Den utförs enligt standarden SFS-EN 14918:en med hjälp av en bombkalorimeter, vars funktionsprincip är att mäta temperaturstegringen i en bestämd mängd vatten, och med ledning av vattnets värmekapacitet (4,19 kJ/kgK) kan man därifrån beräkna den tillförda värmemängden. När också bränsleprovets vikt är känd (uppmätt med en noggrannhet om 0,0001 gram), kan bränslets kalorimetriska värmevärde (MJ/kg) bestämmas. Med den



kalorimeter jag hade till mitt förfogande, en Parr 1266, behöver inga manuella räkneoperationer utföras, apparaten gör allt sådant automatiskt och ger svaret direkt i MJ/kg, bara man anger provets exakta vikt.

Bomben som gett apparaten dess namn är en bastant, ca 10 x 15 cm stor stålcylander med tättslutande lock, dit bränsleprovet, pressad till en rund tablett, sätts i en ställning. En tunn tändtråd anbringas i kontakt med bränsletabletten, och bomben fylls med syrgas. Bomben sänks ned i en hink med exakt 2 kg vatten, som befinner sig inuti kalorimetern, omgärdad av en vattenmantel som med termostat hålls tempererad på +35°C. Tändkablarna ansluts till bomben, och locket stängs så att en omrörare och en temperaturgivare sänks ned i hinken. Efter inmatning av vikten startas kalorimetern och en nedräkning från 8 minuter påbörjas. När cirka 2 minuter har gått hörs ett pip som signalerar tändning, och om allt gått väl printas resultatet ut på en pappersremsa efter ytterligare 3 minuter. Störningar är dock vanliga, både så att tändningen misslyckas helt, men också så att en del av provet förblir oförbränt, och resultatet blir missvisande. Därför bör minst 3 parallella prov utföras, och variationen dem emellan bör vara högst 0,12 MJ/kg. Variationerna mellan skilda sampel inom en provperiod var också små, och då proceduren med samtidig bestämning av analysfukthalt och bombkalorimätning var både tidsödande och besvärlig, bestämdes att begränsa värmevärdesbestämningen till 4 sampel från respektive period. För var och ett av dessa 4 sampel utfördes 3 parallellförsök, vars medelvärde sedan korrigerades med analysfukthalten.

#### 4.4.3. Analysfukthalt

Eftersom frästörv är ett hygroskopiskt material som mycket lätt suger åt sig fukt ur luften rekommenderas det att bombkalorimetertestet utförs med törv som har stått en tid, så att jämvikt har uppnåtts mellan provet och rumsluften. I samband med testet tas sedan ett prov för ny fukthaltsbestämning enligt den noggrannare standarden SFS-EN 14774-3, och resultatet från bombkalorimetern korrigeras då för denna fukthalt.

$$q_{V,gr,d} = q_{V,gr} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (\text{ekvation 15})$$

Där  $Q_{v,gr,d}$  är det korrigerade kalorimetriska(högre) värmevärdet vid 0% fukthalt,  
 $Q_{v,gr}$  är det uppmätta värdet vid  $M_{ad}$   
och  $M_{ad}$  är analysfukthalten, bestämd samtidigt som  $Q_{v,gr}$ .

När man ska bestämma analysfukthalten ska först en liten degel med lock torkas i 105°C tills dess vikt stabiliserats. Till det här används en våg med 0,1 milligrams noggrannhet. Efter torkning och avsvälning i exikator\* fyller man den med en minst ett gram stor mängd av mald torv, varefter degeln med innehåll och lock vägs igen. Därefter torkas den i ugnen igen i 105°C, tills stabil vikt åter uppnåtts. Stabil vikt anses ha uppnåtts, när viktskillnaden mellan två vägningar med 60 minuters mellanrum understiger 1mg. Eftersom torven så gärna upptar fukt ur luften måste vägningen ske snabbt innan degeln och innehållet nämnvärt svalnat, och locket bör då hållas på under förflyttningen från ugnen till vågen. Efter utförda vägningar beräknas sedan analysfukthalten med följande formel:

$$M_{ad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100 \quad (\text{ekvation 16})$$

Där  $M_{ad}$  = analysfukthalt,  
 $m_1$  = vikten av den tomta torra degeln inklusive lock,  
 $m_2$  = r vikten av degel, lock och torvprov före torkning  
 $m_3$  = vikten av degel, lock och torvprov efter torkning.

(\*exikator = lufttätt kärl med fuktabsorberande medel)

Allt detta bör alltså helst ske samtidigt som själva bombkaloritestet för att säkerställa att man vet den aktuella fukthalten vid testtillfället. Analysfukthalten analyserades alltid i två parallella prov, vars medelvärde sedan användes till att korrigera värmevärdet för det sampel de var tagna från. Variationen i analysfukthalt mellan de undersökta samplerna var stor, från 2 till 6%, vilket gjorde att resultatet endast kunde användas för korrigering av det sampel det var taget ifrån, och givetvis kunde här heller inga medelvärden användas.

#### 4.4.4.Provberedning

Efter torkning och svalning mals hela provmängden i en specialkvarn så att inga partiklar större än 1 mm blir kvar, och provet blandas väl. Därefter vägs cirka 1 gram torvpulver

upp i en plastskål, och denna mängd pressas sedan till en 12 mm bred tablett med hjälp av en manuell press. Slutligen placeras den färdiga tabletten i en liten metalldegel och vägs på en våg med noggrannheten 0,0001 gram.

#### 4.4.5. Askhalt

Även om askhalten egentligen saknar betydelse för mina beräkningar, utfördes ändå ett antal prov av rent intresse. Som grund för dessa användes standarden SFS-EN 14775, tuhkapitoisuuden määrittys. Kärlet som används bör vara värmetåligt och ha en bottenyta på minst 10 cm<sup>2</sup>, så att torvprovet på minst 1 gram bildar ett tunt skikt på dess botten. Före provet torkas kärlet i 550°C under minst en timmes tid, varefter det låtes svalna i exikator och därefter vägs. Askhaltsbestämningen kan med fördel utföras genast efter bestämning av analysfukthalt då torvprovet är garanterat torrt, i annat fall ska torven torkas före. Det minst ett gram stora torvprovet breddas ut i ett jämnt lager på kärlets botten, varefter kärlet med torvprov vägs och sätts in i kall ugn. Sedan höjs ugnens temperatur i små steg under 30-50 minuter upp till 250°C, varefter man väntar 60 minuter vid denna temperatur. Därefter kan man fortsätta att stegvis höja temperaturen under 30 minuter, fram till sluttemperaturen 550°C, vilken sedan ska upprätthållas i 120 minuter. Efter detta återstår avsvälning i exikator och slutligen vägning med 0,1 mg noggrann våg.

#### 4.4.6. Rökgasmätning

Även om det inte ingick i mitt uppdrag att göra någon kartläggning av förlusterna, tog jag gärna emot möjligheten att utföra en rökgasanalys med den analysator som Novia äger. Rökgasförlusterna anses vara den enskilt största förlustposten i värmepannor, och ett värde på dessa skulle ge mig en fingervisning om mina övriga beräkningar är trovärdiga. När sedan misstanken om fallerande energimätare framkom, blev rökgasanalysen än angelägnare.

Instrumentet i fråga är en Testo 335 med möjlighet att köras direkt uppkopplad till (bärbar) dator. I instrumentets egen display visas kontinuerliga värdena för syre(O<sub>2</sub>)-, och koldioxidhalt(CO<sub>2</sub>) i procent, koloxidhalt(CO) i ppm, temperatur i grader Celcius samt verkningsgrad“(η) och rökgasförluster(q<sub>a</sub>), också de i procent. Med datorn inkopplad kan

värdena för O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO och Temp avläsas och sparas grafiskt som kurvor, och det är därmed lätt att följa med hur de varierar över en tidsperiod.

För att få rätt resultat måste emellertid mätaren kalibreras för rätt bränsle, och där stötte jag på problem, eftersom torv inte fanns med bland de förprogrammerade bränslena i mätaren. Det är inte svårt att komponera ett eget bränsle och föra in egna parametrar, bara man vet vilka dessa bör vara för respektive bränsle, men att hitta sådana för torv visade sig oväntat svårt. Tillverkarens representanter kunde inte hjälpa, varken den finländska eller den rikssvenska, och ingen av de forskare och branskmänniskor jag försökt kontakta heller.

Efter dessa fruktlösa försök på närmare håll kontaktade jag tillverkaren Testo AG i Tyskland direkt, och fick snabbt svar från en mycket tillmötesgående Tobias Langenbacher, ingenjör på Testos kundserviceavdelning. Men även han var osäker vilka parametrar som kunde användas, då de tydligen skiljer sig åt en del mellan olika länder, och Finland inte hörde till de länder som fanns angivna. Han bifogade dock en lista med parametrar för en rad andra länder, däribland Sverige, och i brist på annat har jag använt dessa. Listan omfattar 10 olika parametrar, av vilka en del är lätt identifierbara från instrumentet, medan några andra har helt olika beteckningar. Jag har inte kunnat utröna alla dessa parametrars betydelse, och blir därför tvungen att lita på riktigheten hos de värden jag fick från Langenbacher. En sak verkar dock felaktig, maximala halten CO<sub>2</sub>, som i listan anges till 20,1% för torv, när det i annan (finsk och svensk)litteratur brukar talas om 19,3-19,4%. Jag har utfört mätningar med båda dessa parametervärden omväxlande, och inte kunnat notera någon signifikant skillnad mellan mätvärdena, som normalt ändå fluktuerar. Inte ens med inställningarna för träbränsle kan någon betydande skillnad påvisas, vid normal drift om 40-80% av pannans effekt har förlusterna i allmänhet legat mellan 6-7%, oberoende av valda parametrar.

## **.5. RESULTAT**

Eftersom den ena av de två energimätarna havererade och var ur bruk under ca. 3 veckor, kom jag att utföra beräkningarna i två separata mätperioder, den första 6.10-3.12.2014 och

den senare 10.1-2.2..2015. Tanken var från början att få så långa sammanhängande perioder som möjligt, för att minimera felmarginalen med kvarvarande bränsle i silon vid periodens början och slut. Min andra strävan var att kunna särskilja någon period med övervägande kallt väder, för att se hur energibehovet (belastningsgraden) påverkar verkningsgraden. Vädret har dock varit mildt och ostadigt denna vinter utan längre sammanhängande köldperioder, så min intention har inte lyckats särskilt väl. Medeltemperaturen för den förstnämnda perioden blev +2,1°C, och för den andra -4,1°C, (Freemeteo)ingen stor skillnad alltså. Det har visserligen förekommit kallare dygn med medeltemperaturer ner mot -15 grader, men dessa perioder har varit så kortvariga, att det inte varit någon mening med att försöka räkna ut någon verkningsgrad för dem, då osäkerhet skulle ha blivit stor.

### 5.1. Period I

Under period I 6.10-3.12 förbrukades sammanlagt 127.600 kg torv fördelat på 12 lastbillass, från vilka alla togs en provpåse för analys. Under perioden levererades 359 megawattimmar energi på 58 dagar, vilket ger en medeleffekt om 258 kilowatt. Dessa prov analyserades alla separat för fukthalten, vilken då konstaterades ligga mellan 23,0 och 32,5%, eller 30,7% i genomsnitt. Bestämning av värmevärde med kalorimeterbomb utfördes på fyra av dessa tolv, med tre parallella prov från vardera. Eftersom proven utfördes på rumsfuktig torv måste denna fukthalt bestämmas och korrigering för den utföras enligt följande formel(SFS-EN14918:en)

$$q_{V,gr,d} = q_{V,gr} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (\text{ekvation 15})$$

Där  $q_{V,gr,d}$  är det korrigerade kalorimetriska(högre) värmevärdet vid 0% fukthalt,  
 $q_{V,gr}$  är det uppmätta värdet vid  $M_{ad}$   
 och  $M_{ad}$  är analysfukthalten, bestämd samtidigt som  $q_{V,gr}$ .

Analysfukthalten befanns ligga mellan 1,8 och 7,3%, och då varje prov korrigerades med sin egen fukthalt blev slutresultatet att de effektiva värmevärdena för dessa prov låg inom intervallen 21,18 – 21,34 MJ/kg, med medelvärdet 21,29 MJ/kg.

För att sedan beräkna det effektiva värmevärdet behöver man ta i beaktande både bränslets

leveransfukthalt och den fukt som förbränning av vätet i bränslet ger upphov till. Vätehalten har inte analyserats, så därför antar jag ett medelvärde på 5,6%. (Alakangas 2000). För beräkningarna har jag använt följande formel ur samma standard (SFS-EN14918:en)

$$q_{p,net,m} = \{q_{v,gr,d} - 212,2 * H_2 - 0,8 * (O_2 + N_2)\} * (1 - M/100) - 24,43 * M \quad (\text{ekvation 3})$$

Där  $q_{p,net,m}$  är effektivt värmevärde vid leverans,

$q_{v,gr,d}$  är kalorimetriskt värmevärde, korrigerat för analysfukthalten

$w(H)d$  är bränslets vätehalt och

$M$  är fukthalten vid leverans

När jag summerar detta kommer jag fram till ett effektivt värmevärde på 13,13 MJ/kg, och det är detta som jag använt i beräkningarna för period I.

Om jag multiplicerar leveransmängden med värmevärdet får jag en tillförd energimängd i megajoule, men eftersom mätarna anger energin i megawatttimmar måste jag omvandla enheterna genom att dividera MJ med 3600. Då blir tillförd energimängd i bränslet:

$$127600 \text{ kg} \times 13,13 \text{ MJ/kg} / 3600 \text{ MJ/MWh} = 465,39 \text{ MWh}$$

Dessutom förbrukar panncentralen en del elektricitet som borde tas med i beräkningarna som insatt energimängd. Fram till 14.2 hade panncentralen enligt energimätarna varit i bruk 9168 timmar, och under denna tid hade 64344 kWh elström förbrukats. De största förbrukarna är pumpar, fläktar och frammatningsskruvar vars förbrukning sannolikt är delvis beroende av pannans belastning, men för enkelhetens skull antar vi ändå att den varit jämn. Om man då helt enkelt dividerar förbrukad elenergi med antalet drifttimmar får man en medelförbrukning på 7,88 kW. Period I är 1392 timmar lång, så vi kan då anta att elförbrukningen varit 10969 kWh eller 11 MWh.

Den sammanlagda fakturerade energimängden under period I är 359,39 MWh.

Verkningsgraden blir då utan elenergi

$$\eta_1 = 359,39 \text{ MWh} / 465,39 \text{ MWh} = 0,7722 = 77,2\%$$

Om vi också tar med elförbrukningen blir verkningsgraden

$$\eta_1 = 359,39 \text{ MWh} / (465,39 + 11) \text{ MWh} = 0,7544 = 75,4\%$$

## 5.2. Period II

Den andra mätperioden påbörjades genast när Simons elements energimätare åter fungerade den 10 januari, och den kom att pågå till 2. februari. Den blev alltså lite drygt tre veckor, vilket jag hoppades skulle vara tillräckligt länge för att ge acceptabel noggrannhet i beräkningarna. Min andra förhoppning var att den här andra perioden skulle innehålla betydligt kallare väder än den första, men medeltemperaturen blev inte lägre än -4 grader. Under dessa 22 dygn levererades 209 megawattimmar värme till de båda kunderna sammanlagt, vilket ger en medeleffekt om 396 kilowatt. Ingendera perioden har således pannan belastats särdeles tungt, även om det naturligtvis har funnits kalla dagar när effekten för en stund legat närmare den maximala. Topparna har sannolikt infunnit sig om morgnarna, när ventilationen startas i industrihallarna och den inkommande kalluften snabbt ska uppvärmas.

Under period II förbrukades 71300 kg torv med den genomsnittliga fukthalten 30,7%. Det effektiva värmevärdet har konstaterats ligga mellan 21,72 och 22,15MJ/kg med 21,9 MJ/kg i genomsnitt, vilket är aningen högre än genomsnittet för period I. Med samma korrigering för analysfukthalten som ovan får man det korrigerade värmevärdet,  $q_{v,net,m} = 13,6$  MJ/kg. Enligt formlerna ovan blir då tillförd bränsleeffekt under period II:

$$71300\text{kg} \times 13,6 \text{ MJ/kg} / 3600 \text{ MJ/MWh} = 269,26 \text{ MWh}$$

Den sammanlagda fakturerade energimängden under period II är 209,21 MWh.

Verkningsgraden för period II blir då

$$\eta_2 = 209,21 \text{ MWh} / 269,26 \text{ MWh} = 0,7770 = 77,7\%$$

Om vi enligt modell från period I också tar med elförbrukningen  $528\text{h} \times 7,88\text{kW} = 4160$  kWh blir verkningsgraden

$$\eta_2 = 209,21 \text{ MWh} / 269,26 + 4,16 \text{ MWh} = 0,765 = 76,5\%$$

## 5.3. Rökgasanalyser

För att verifiera ovanstående resultat gjordes också ett antal rökgasanalyser. Tabellen 3 nedan baseras på medeltalet från fyra stycken ca tio minuter långa mätningar.

Tabell 3 Rökgasmätningar

Datum	% O <sub>2</sub>	ppm CO	% CO <sub>2</sub>	°C Ft	°C AT	% qA	% η	λ	Drift %
14.01.05	11,28	471,31	9,37	98,74	21,03	6,81	93,19	2,19	76
12.02.15	15,33	1356,70	4,18	125,64	21,00	14,79	84,32	3,59	45
13.02.15	11,60	208,97	8,63	88,27	22,49	5,55	94,45	2,29	38
14.02.15	11,78	228,21	8,46	95,32	18,76	6,55	93,45	2,32	70

(Mikael Kaustinen)

% O <sub>2</sub>	= Syrehalt i torra rökgaser
ppm CO	= Koloxidhalt 1/1000000
% CO <sub>2</sub>	= Koldioxidhalt i torra rökgaser
°C Ft	= Rökgastemperatur
°C At	= Tillufttemperatur(=pannummets temp.)
% qA	= Värmeförluster i torra rökgaser
% η	= Förbränningsverkningsgrad
λ	= Luftfaktor
Drift %	= Av pannans maxeffekt

Som synes skiljer sig mätvärdena från 12.2 betydligt från de andra, och orsaken lär vara att pannan just då utförde sin renblåsningscykel med tryckluft, vilket den gör ca 2 gånger i dygnet. I övrigt uppvisar mätningarna jämna värden som inte tycks påverkas mycket av yttertemperatur eller belastningsgrad. Förutom dessa noggrant tillvaratagna mätningar gjordes också manuella avläsningar vid flera andra tidpunkter, där rökgasförlusten qA överlag höll sig mellan 6 och 7%. Man kan därför utgå ifrån att dessa resultat är tämligen representativa för hela mätperioden.

Den springande frågan blir då om dessa mätningar och beräkningar stöder varandra?

Svaret måste bli nej, eftersom andelen ospecificerade förluster annars blir alltför stor (100% - 77% - 7% = 16%). Rökgasförlusterna brukar anses som den största enskilda förlustposten, så övriga förluster borde bli mindre.

I ett relativt sent skede av undersökningen, i början av period II framkom en omständighet som betydligt minskar dessa beräkningars tillförlitlighet. Vid tre skilda tillfällen har upptäckts att energimätarna står stilla, vid två tillfället båda mätarna, och vid det tredje bara den ena, JTK Power. Orsaken tycks vara turbulens och tryckfall runt flödesmätarna, och den tillfälliga lösningen har varit att släppa in mera vatten i pannan och därigenom öka

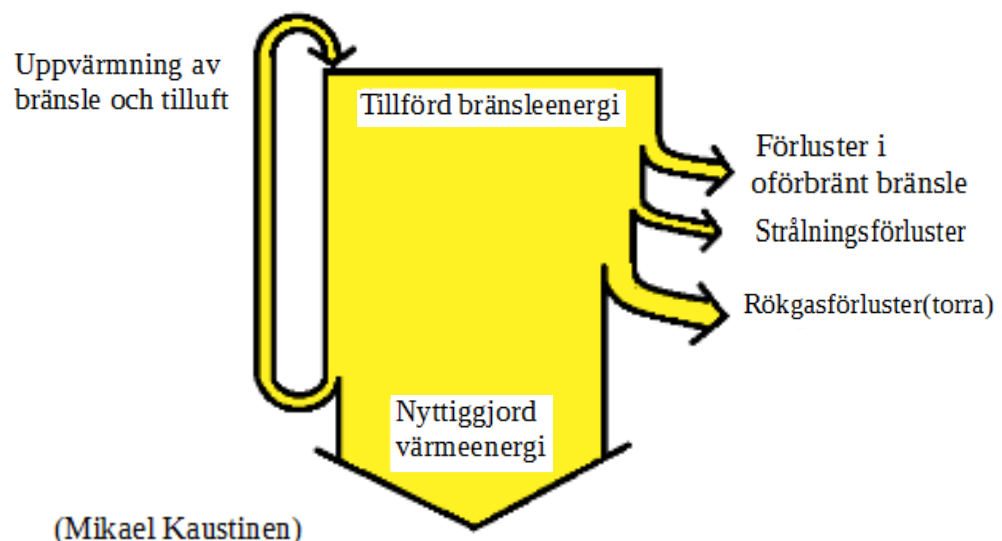


trycket, och sedan lufta ledningen vid mätarna. Ingen kan dock säkert säga om det här felet har uppträtt oftare än vad som observerats, och då avhjälp sig själv, men jag har skäl att tro att så varit fallet. Det skulle i så fall betyda att mera värme producerats än vad som finns på mätarna, och därmed skulle också verkningsgraden i verkligheten vara bättre än vad mina beräkningar visar. I kapitel 7, Diskussion kommer jag att spekulera i hur stora förlusterna i verkligheten kan vara, och vad den verkliga verkningsgraden då skulle kunna bli.

## 5.4 Sankey-diagram

Ett Sankeydiagram visualiserar flöden med hjälp av pilar, där pilarnas bredd står i proportion till respektive flödes storlek. Systemförluster kan då på ett lättfattligt sätt åskådliggöras med mindre pilar som svänger av från huvudflödet, liksom jag har gjort i nedanstående diagram. Eftersom alla förluster vid Simons-anläggningen inte kunnat utredas fullständigt blir diagrammets proportioner bara ungefärliga, men det kan ändå underlätta för läsaren att förstå vad den här undersökningen handlar om.

Figur 3. Sankey-diagram



## 6. Två jämförelseobjekt

Att ha jämförelsematerial är alltid värdefullt i allt forskningsarbete, och som detta arbete utvecklade sig blev resultatet i hög grad beroende av trovärdiga uppskattningar av en rad förlustposter. Jag påbörjade sökningar efter lämpligt jämförelsematerial genast det blev klart att jag skulle åta mig detta uppdrag, men jag blev ganska fort varse att det var lättare sagt än gjort att hitta material om torveldning. Torven är globalt ett marginellt bränsle, och inte ens i Finland och Sverige som ändå hör till de största torvproducerande länderna har det gjorts många undersökningar inom området. Det finns material om kraftvärmeverk (CHP) som drivs med torv, men då dessa har en helt annorlunda funktionsprincip och dessutom är i en betydligt större storleksklass än Simons-anläggningen, är en jämförelse med ett sådant inte riktigt relevant för min undersökning. Närmast jämförbara anläggningar är lokala fliseldade fjärrvärmeverk i storleksklassen 2-3 MW, som åtminstone i teorin också kan använda torv som bränsle. Sådana finns numera i snart sagt varje österbottniskt kommuncentra, och även om ett fåtal tidvis har kört med torv, är det dominerande bränslet hos dessa skogsflis.

### 6.1. Kelviå-rapporten

Den ena av rapporterna som här använts som jämförelse gäller just en sådan värmecentral i Kelviå och är en undersökning inom ramen för Forest Power, ett samprojekt mellan läroanstalter och värmeföretagare i mellersta Österbotten, administrerat av Centria amk i Karleby. Rapporten är författad av teknologie doktor Martti Härkönen 2012, och i fortsättningen hänvisas till denna rapport som "Kelviårapporten" eller "Kelviåundersökningen". Rapporten baseras på två olika försök, ett i mars 2010 när pannbelastningen var 81% av den maximala, och ett annat i maj 2011 när belastningen var blott 15%. Mätningarna utfördes under en 2 timmar lång period vardera, då tillförd bränslemängd uppmättes, rökgasen analyserades och alla temperaturer och flöden bokfördes, allting mycket noggrant. Røkgastemperaturen låg i båda undersökningarna på ca. 120°C. Resultatet blir en fullständig kartläggning av energiflöden och förluster i en pannanläggning av den här typen. Rapporten är som helhet mycket välgjord och detaljerad och man får en bra bild hur förlusterna uppstår och fördelas. Då deras angivna røkgasförluster ligger mycket nära de av mig uppmätta, och pannorna dessutom är av

samma fabrikat och typ(Arimax Bio), vågar jag anta att också övriga förluster är i samma storleksklass, trots att bränslena är olika.

Under försöken var bränslet flis av gallringsvirke. Vid det första försöket hade det fukthalten 26,8% och man uppnådde då verkningsgraden 83,8% vid en belastning på 81% av nominell effekt, och under det senare försöket som utfördes med flis med fukthalten 21,2% uppnåddes verkningsgraden 83,1% vid 15% belastning. Detta är en anmärkningsvärd liten skillnad, som fullständigt kullkastar uppfattningen jag hade att verkningsgraden alltid skulle vara lägre vid låg belastning. Möjligen kan den låga fukthalten vara en del av förklaringen, i synnerhet med det beräkningssätt som använts. Värt att notera är också att luftfaktorn vid hög effekt var 1,58, och vid lågeffekt var den hela 3,3, men trots det blev verkningsgraden alltså relativt bra. Orsaken till denna höga luftfaktor var att tilluftfläktarnas minimivarvtal inte var anpassat till så låg effekt, och kunde alltså inte sänkas mer.

En viktig skillnad i sätten att ange effektiva värmevärden och desorptionsförluster (fuktens förångning) föreligger här mellan min egen undersökning och den från Kelviå. Fukten är till en del hårdare bunden i trä än i torv och därför är också beräkningarna mera invecklade om man vill vara noggrann. Ofta används därför en förenklad formel för träbränslen, som dock inte är direkt jämförbar med det räknesätt som jag använt för torv. Där jag har räknat ett effektivt värmevärde där alla förångningsförluster redan har beaktats, har man i Kelviårapporten använt ett något generösare beräkningssätt för värmevärdet, och sedan i rökgasförlusterna inkluderat något som man kallar ”verkliga desorptionsförluster”. Dessa förluster utgör ca. 4,3% av totala producerade värmeenergin, och enligt mitt sätt att räkna är detta en energimängd som aldrig tillförs pannan. Verkningsgraden blir på detta sätt något högre än vad som angetts i rapporten.

I tabell 4 här nedanför har jag sammanställt en energibalans med alla förluster för Kelviåundersökningen vid det högre driftläget, 81%. För att underlätta jämförelser med min egen undersökning har jag här minskat den tillförda bränsleeffekten med ovan nämnda desorptionionsförluster, som har beräknats till 70kw.

I rapporten anges en verkningsgrad på 83,8% för denna undersökning, men om man för jämförelsens skull räknar om detta på det sätt som beskrivs ovan får man verkningsgraden  $1340/(1620-70)=0,865=86,5\%$ . Detta är alltså närapå 10 procentenheter högre än vad jag

kommit fram till i min egen undersökning av Simons-anläggningen.

Tabell 4. Förlustposter för Kelviåanläggningen

	kilowatt	%
Tillförd bränsleeffekt (1620-70kw)	1550	100,0
Nyttigjord uteffekt	1340	86,5
Rökgasförluster, våta	108	7,0
Oförbränt bränsle i askan	42	2,7
Pannkroppens värmeförluster	20	1,3
Koloxid	16	1,0
Uppvärmning av tilluft	14	0,9
Uppvärmning av bränsle	7	0,4
Värme bortfört med askan	3	0,2
Metan	2	0,1
Verkliga desorptionsförluster (från1620kW)	70	4,3

(Mikael Kaustinen, baserat på uppgifter ur Härkönen, 2012))

En konstruktionsmässig skillnad är att Kelviå-pannan har sk. våt askutmatning, vilket Simons-pannan saknar. Det betyder att hela pannans botten är täckt av vatten, dit askan och oförbränt bränsle ramlar för att sedan matas ut med skruv som en våt massa. Detta är ett system som allmänt används i större anläggningar, och fördelarna är flera. Brandrisken minskar när inget glödande material kan matas ut ur pannan, och samtidigt förhindras oönskad tilluft, sk. tjuvluft att okontrollerat komma in i pannan via askutmatningen. Nackdelen är att en del av detta vatten förångas och tar med sig värme ut i rökgaserna, men värmeförlusten är ändå obetydlig, enligt Kelviårapporten härrör endast 1% av ångan i rökgaserna härifrån.

#### 6.1.1. Luftöverskottet och rökgasförlusterna

Om man jämför de data jag har tillgång till från min egen undersökning med data från

Kelviå ser man att förutom bränsletypen är luftfaktorn det som tydligast skiljer sig. Från Kelviå rapporteras en luftfaktor på 1,58 vid hög effekt, medan den av mig uppmätta har legat på 2,1-2,2. Att rökgasförlusterna ändå är i stort sett lika kan kanske förklaras med att Simons-anläggningen har något lägre rökgastemperatur, vilket uppenbarligen har betydligt större inverkan än syrehalten. Detta bekräftas också av försök 2 i Kelviå, där rökgasförlusterna blev små trots låg pannbelastning och hög luftfaktor(3,3). I kapitel 7.Diskussion ska jag resonera mera kring dessa omständigheter och försöka uppskatta de övriga förlusterna på Simonspannan.

## 6.2 Storkyro-rapporten

Jag har sett närmare på en annan undersökning också, utförd på Isokyrön energiaosuuskunta:s värmecentral vid Storkyro hälsovårdscentral 26.2.2004. Pannan är en Laka PS 460 (460kW) med TP 500 mekanisk snedrost och den är tillverkad 1999. Undersökningen har utförts av projektingenjör Jarmo Lundgren vid Satakunda yrkeshögskolas forsknings- och utvecklings-avdelning O`Sata. Undersökningen är intressant därför att dess mätdata skiljer sig markant från Kelviå-undersökningen och även från min egen och därför ger en chans att bättre förstå sambanden i förbränningsprocessen. Den gjordes i två försök med sotning och injustering av pannan däremellan, och bränslet var i båda försöken skogsflis med fukthalten 46%. Vid det första försöket var rökgastemperaturen påfallande hög, 350°C, och det här återspeglades också i rökgasförlusterna som var hela 23,6%, och förbränningsverkningsgraden som var 75,5%. Efter sotning, återmontering av turbulensplåtar i rökkanalen och justering av tilluftflödet gjordes ett nytt försök, nu med betydligt bättre värden. Rökgastemperaturen hade nu sjunkit till 270°C, förlusterna till 18,45 och verkningsgraden hade stigit till 80,4%. Syrehalten är i Storkyro vid båda försöken låga 7%, och övriga förluster anges till drygt 1%. Enligt Lundgren är det här ett rätt så bra resultat, men jämfört med de båda andra undersökningarna är såväl rökgasförlusterna som -temperaturen betydligt högre. I Storkyrorapporten anges inte vilka formler som använts för beräkningar av effektivt värmevärde och ångbildningsförluster, så smärre skillnader gentemot de andra undersökningarna kan förekomma och alla värden är därmed kanske inte helt jämförbara. Allt tyder ändå på att en hög rökgastemperatur är den tydligaste indikatorn på höga förluster.

## 7. Diskussion

### 7.1. Luftöverskottets betydelse

I ett ganska tidigt skede av min undersökning kunde jag räkna fram mina första preliminära resultat baserade på schablonmässiga värmevärden, men faktiska bränslemängder och fukthalter. Beräkningarna visade då att verkningsgraden skulle ligga någonstans mellan 70-80%, vilket också visade sig stämma med senare gjorda, noggrannare beräkningar. Om detta var ett bra eller dåligt resultat hade jag då ingen klar uppfattning om, på grund av bristen på jämförelsematerial. Jag visste att verkningsgraden för småhuspannor under ogynnsamma förhållanden kan vara ännu betydligt lägre och höll det inte orimligt att en även panna i den här storleken kan uppvisa relativt stora förluster under den lägre belastning som då, i början på oktober var aktuell.

Pannan är utrustad med kontinuerlig syrehaltsmätning i avgaserna, och vid mina avläsningar kunde jag konstatera att syrehalten vid den här tiden (när effektuttaget var ganska lågt) var rätt hög, ofta mellan 14-16%, vilket också innebär ett stort luftöverskott. En allmän uppfattning är att en hög luftfaktor medför högre rökgasförluster, och jag antog därför att så var fallet också här, men detta antagande visade sig vara en stark förenkling av verkligheten.

Det är inte svårt att hitta seriösa källor som till synes backar upp denna min förutfattade mening, åtminstone i text.

*”Används en för hög luft/syrekvot åtgår alltför mycket energi till att värma den extra luften/syret.”*

(Jernkontorets Energihandbok, [www.energihandbok.se/forbranning](http://www.energihandbok.se/forbranning))

*”Man vill hålla nere luftöverskottet eftersom ett luftöverskott också innebär att värme- och avgasförlusterna ökar.” (Energidalen, 2000, s.4:10)*

Också Alvarez(2006,492) är inne på samma linje: *...den luft som tillföres extra...innebär en värmeförlust och avgasförlusten ökar.*

En närmare studie av de formler och beräkningar som presenteras i dessa publikationer

visar ändå att ingen direkt koppling mellan luftöverskott och rökgasförluster finns. En utblandning av avgaserna med mera färskluft medför nämligen att rökgastemperaturen samtidigt sänks i ungefär samma grad som flödet ökar, varvid den borttransporterade värmemängden ändå hålls i stort sett på samma nivå. Största delen av pannans värmeupptagning sker genom rökkanalens väggar, driven av temperaturskillnaden mellan rökgaserna och pannvattnet. Med ett större luftöverskott blir denna temperaturskillnad mindre, men ändå ska samma värmemängd överföras. Man frågar sig om det här verkligen kan stämma. Svaret är ja, eftersom värmekonduktiviteten ökar i ungefär samma grad som flödes hastigheten på gaserna. Enligt Härkönen(2012) är sambandet mellan dessa två närapå linjärt, eftersom värmekonduktiviteten är proportionell mot flödes hastigheten upphöjt till 1,03.

Simons-pannan håller vanligtvis låg rökgastemperatur (100-130°C enligt egen mätare, 90-110°C enligt rökgasinstrumentet), vilket borgar för att rökgasförlusterna hålls på en moderat nivå, trots hög luftfaktor.

En hög luftfaktor kan ändå orsaka indirekta förluster på flera olika sätt, så helt felaktiga är citaten ovan ändå inte. Den allvarligaste följden av överskottsluften får man om den kommer in tidigt i förbränningsprocessen, som primärluft, och kyler ned eldbädden så att tillräckligt hög förbränningstemperatur aldrig uppnås. Då kommer andelen oförbrända rökgaser så som koloxid, metan och andra kolväten att kraftigt öka, och därmed försämra verkningsgraden. Det ökade luftflödet måste kompenseras med utomhusluft, och om yttertemperaturen är låg betyder detta en sänkning av lufttemperaturen inne i pannrummet, vilket i sin tur orsakar ökade strålnings- och konvektionsförluster från pannkroppens ytor. Om bränslet är frästort, kan ett ökat luftflöde orsaka ytterligare en förlustpost: Torven innehåller en stor andel fina partiklar som helt enkelt kan blåsa iväg oförbrända, antingen så att de faller ner i askan eller följer med ända ut i skorstenen.

Om man känner till syrehalten kan den användas för beräkning av luftöverskottet med hjälp av följande enkla formel (Energidalen,2000):

$$n := \frac{21}{21 - O_2} \quad (\text{ekvation 14})$$

Där  $m$  är luftfaktorn och  $O_2$  är rökgasernas syrehalt.

Enligt Energidalen är optimal luftfaktor för träbränslen 1,25 – 1,4, vilket enligt ovanstående formel ger en syrehalt på 4- 6% i rökgaserna.

Simons-pannans lufttillförsel är något svårkontrollerad vid lägre belastningar, och man har därför varit tvungen att då tillåta ett större luftöverskott för att säkerställa en god förbränning över hela rosten. Under period I när medeltemperaturen var över 2 plusgrader, var belastningsgraden oftast låg, 30-60%, och luftöverskottet därför stort. Med en syrehalt på 15% som då inte var ovanlig blir luftfaktorn 3,5, vilket kan anses högt. Vid senare försök med rökanalysator vid kallare väderlek har syrehalten varit lägre, ca. 10%, vilket då ger en luftfaktor strax under 2.

Det är ändå skäl att hålla i minnet det som Patrik Majabacka, biobränsleexpert på Finlands Skogscentral, påpekade; om en panna har producerat värme under en period med lika många varma som kalla dagar, så är ändå merparten av värmen producerad under de kalla dagarna, och det är följaktligen dessa som har störst betydelse för totalverkningsgraden under perioden.

## 7.2 Uppskattade förluster.

Rökgasmätningarna ger en fingervisning om att någonting inte stämmer. Rökgasförlusterna har vid mätningar konstaterats ligga på ca. 6-7%, och pannverkningsgraden har beräknats till 77%. Övriga förluster har inte utretts för Simons-pannan så för att få en uppfattning om storleken på dessa har jag gjort jämförelser med andra undersökningar där dessa förluster finns utredda.

Jag har här tagit de två tidigare nämnda undersökningarna till hjälp, Forrest Power-undersökningen från Kelviå och Samk/O`Sata – undersökningen från Storkyro. Ingendera preciserar vilka formler man använt för att komma fram till sina respektive resultat, men det är tydligt att det finns skillnader. I Kelviå-rapporten nämns en förlust som man kallar ”verklig tilläggs-desorptionsförlust”(förf. översättning) på 4,3%, vilket är en del av



bränsléfuktens förångnings-värme. Denna post nämns inte i den andra rapporten, och jag har också valt att lämna bort den ur mina egna beräkningar, eftersom jag anser att detta redan beaktats i det effektiva värmevärdet (se kap. 3.6.9.,Förluster). Andra förluster som bara nämns i Kelviårapporten är luft-, och bränsle-uppvärmning, metan i rökgasen och värme bortförd med askan. De tre poster som nämns i båda rapporterna är pannans ytförluster, koloxid och oförbränt bränsle, men de är märkbart mindre i Storkyrorapporten, endast 1,14% tillsammans, mot ca. 6% för Kelviåundersökningens del..

Jag väljer att utgå från Kelviårapporten eftersom den på den här punkten är generösare och mer detaljerad, och förlusterna förutom de torra rökgasförlusterna och ovan nämnda disorptionsförluster kan då listas så här

Tabell 5. Uppskattade förluster

Pannkroppens ytförluster	1,3%
Koloxid	1,0%
Uppvärmning av tilluft	0,9%
Uppvärmning av bränsle	0,5%
Metan	0,1%
Oförbränt bränsle i askan	2,7%
Värmeförlust i bortförd aska	0,2%
Summa	6,7%

(Mikael Kaustinen, baserad på data från Kelviå)

Det finns naturligtvis inga garantier att förlusterna i Simonspannan skulle se ut exakt så här, men då pannorna är av samma typ och fukthalten och rökgasförlusterna är likartade kan man i brist på annat använda dessa värden för överslagsberäkningar. Om vi då räknar ihop verkningsgraden 77%, rökgasförluster 6,5% och dessa uppskattade förluster 6,7% får vi resultatet 90%, vilket betyder att vi fortfarande har en oförklarlig förlust på cirka 10%.

Om någon av förlustposterna i tabell 4 i verkligheten skulle vara större, ligger det närmast till hands att i så fall misstänka förluster i form av oförbrända fasta partiklar. Observera att sot i rökgaserna inte alls noterats i den fliseldade Kelviåanläggningen, men vid eldning med frästörv kan det ibland förekomma under ogynnsamma omständigheter. Frästörv

innehåller en betydande andel fina fraktioner, vilket ökar risken att partiklar följer med luftdraget genom pannan utan att förbrännas ordentligt. Dessa partiklar kan då hamna både i bottenaskan och följa med rökgaserna ut i skorstenen. Någon askanalys har inte gjorts, men att någon betydande mängd oförbränt bränsle skulle hamna i askkontainern förefaller osannolikt eftersom den ännu inte behövt tömmas efter 11 månaders drift. Däremot har det vid upprepade tillfällen observerats sotnedfall över Simons Elements gårdsplan, vilket skulle kunna indikera att en del oförbränt bränsle kommer ut med rökgaserna. Mot detta talar de låga CO-halter jag uppmätt vid mina rökgasmätningar, de borde vara väsentligt högre om förbränningen av någon orsak är ofullständig. Det är förstås tänkbart att det kan uppstå tillfälliga störningar i förbränningen som tillfälligt kan öka sotutsläppet, men mest troligt är ändå att det svarta nedfallet till största delen består av flygaska. Torv innehåller som bekant relativt stor andel aska, 4,9 % i medeltal för den här undersökningen.

En sista möjlig förluskälla är den mängd torv som helt enkelt blåser bort vid tömning. Den har knappast någon märkbar betydelse för resultaten i den här undersökningen, men vid tömning en blåsig dag är den nog så påtaglig.

### 7.3. Resultatens trovärdighet

I mitt ursprungliga uppdrag ingick inget annat än att bestämma verkningsgraden för anläggningen utifrån förbrukad bränslemängd. Jag kom till resultatet 77% och jag kunde ha nöjt mig med det, men när jag fick tillfälle att mäta rökgaserna väcktes intresset att göra en rimlig uppskattning över övriga förluster och kunna presentera en någorlunda komplett energibalans för pannanläggningen.

Jag har alltså två resultat som verkar sinsemellan oförenliga, 77% verkningsgrad och förluster på sammanlagt 13,5%, av vilka 7% är uppmätta och resterande 6,5% uppskattade. Eftersom summan borde bli 100% måste man därmed dra slutsatsen att åtminstone en, kanske flera av dessa siffror är felaktiga. Mest tillförlitligt torde mätningen av rökgasförlusterna vara. Visserligen har det rått en viss osäkerhet kring kalibreringen av mätaren, men upprepade mätningar med olika parametrar har visat att skillnaden ändå blir liten, uppskattningsvis maximalt 0,5%.

Verkningsgraden har räknats ut från energimätare vars funktion visade sig opålitlig. De har vid ett flertal tillfällen befunnits stå stilla så att energi producerats, men inte registrerats. Den momentana energimätningen baserad på flödes- och temperatur-mätning finns inne i en meny på energimätarna, och då jag inte kände till denna funktion förrän i den senare delen av undersökningen är det givetvis omöjligt att säga hur pass frekvent det här felet varit.

Alla vidare slutsatser om vad som stämmer och inte stämmer blir därför rena spekulationer. Om vi antar att uppskattningen av förlusterna är korrekta, betyder det i så fall att mätarställningarna skulle vara ca. 10 procent för låga, och det finns inget som pekar på att så inte skulle kunna vara fallet. Den verkliga verkningsgraden skulle då vara cirka 87%.

Vad gäller förlusterna så är det mycket möjligt att åtminstone mängden brännbara partiklar i askan och rökgaserna kan vara större än vad den var i jämförelseundersökningarna, då det är erkänt att frästörv är ett besvärligare bränsle än flisen som användes i dessa. Att denna förlust skulle vara så stor att den ensam täckte hela glappet på 10 % förefaller däremot osannolikt. Dessutom kan de övriga förlusterna i verkligheten mycket väl vara mindre än i jämförelseobjekten.

Om vi i stället antar att mätarfelet är försumbart och att glappet helt orsakas av odefinierade förluster på cirka 10% blir i så fall totalförlusterna 23% och verkningsgraden den framräknade 77%.

Mest troligt är ändå att mätarfelet står för merparten av det här glappet, och bränsleförlusterna bara för en mindre del. I så fall skulle den verkliga verkningsgraden ligga någonstans kring 85%, eller åtminstone med stor sannolikhet mellan 82 och 87 %.

#### 7.4. Felanalys

Man kan grovt dela in de möjliga felkällorna i tre grupper:

- Energimätare på utgående värmeledningar
- Laboratorieundersökningar

- Förbrukad bränslemängd

### 7.4.1. Energimätarna

Beräkning av transporterad värmeenergi baserar sig på mätvärden från tre sensorer, temperatur på utgående ledning, temperatur på inkommande ledning och mediets massflöde. När man känner mediets, i det här fallet vattnets värmekapacitet kan energimängden beräknas. Energimätarna är elektroniska mikroprocessorer som automatiskt gör dessa beräkningar, men deras noggrannhet är beroende av sensorernas noggrannhet. Flödesmätningen är den mest kritiska, och noggrannheten på denna kan sägas ge hela mätarens noggrannhet. Tillverkaren Kamstrup anger maximalfelet för dessa mätare till  $\pm 1,5\%$ .

Omfattningen av de mätarstillestånd som observerats är svårbedömd, så det vore meningslöst att försöka ange något procenttal för den felvisning. I kapitel 7.3; Resultatets trovärdighet försöker jag i stället uppskatta de övriga förlustposterna för att med hjälp av balansräkning komma fram till en trovärdig verkningsgrad.

### 7.4.2. Laboratorieundersökningar

#### 7.4.2.1. Leveransfukthalten

Som tidigare nämnts är fukthaltsbestämningen en stor potentiell felkälla för verkningsgraden. Då fukthalten kan variera naturligt inom ett brett område blir eventuella fel ytterst svåra att upptäcka i efterhand. Förutom vågens eventuella felvisning finns risken för mänskliga misstag vid hantering av proverna, och där kan felen bli betydligt större. Ett problem har varit att proverna ibland av olika orsaker inte kunnat analyseras genast, och därför kunnat ligga i förvar i upp till två veckor, med risk för att fukthalten ändras. Enligt Novias laboratoriepersonal är det här ändå inget stort problem, då proverna har förvarats svalt i tättslutande plastpåsar. Ett annat problem är att laboratoriet endast har varit tillgängligt under tjänstetid kl. 8-16. Då det har varit svårt att på förhand bedöma behövlig

torktid, har jag ibland tvingats avbryta torkningen utan att utföra en sista kontroll av torrheten. (detta sker ju med upprepade vägningar med 1 timmes mellanrum). Jag bedömer felmarginalen för leveransfukthalten att vara  $\pm 3\%$ .

#### 7.4.2.2. Analysfukthalten

Enligt standarden SFS-EN14774-3 ska bombkalorimätningen utföras med ett bränsleprov vars fukthalt är i jämvikt med rumsluftens fuktighet. Denna jämviktsfukthalt, eller analysfukthalt ligger vanligen kring 5-6%, och den ska bestämmas i samband med bombkalorimätningen, och korrigering för den ska utföras på mätresultatet. Fukthaltsbestämningen ska ske med ett prov på 1 gram, vilket kräver stor noggrannhet vid vägningen. Om felmarginalen vid bestämning av analysfukthalten bedöms vara  $\pm 5\%$  av en fukthalt på i genomsnitt 4%, blir totaleffekten av detta en felmarginal på  $\pm 0,002\%$  för värmevärdet, dvs ett försumbart fel.

#### 7.4.2.3. Värmevärdet

Förutom kalorimeterns inneboende noggrannhet finns här också flera manuella felkällor. Noggrannheten vid vägning av bränsletabletten, upphällning av hinkens vattenmängd eller den lilla mängd destillerat vatten som skall sättas på bombens botten, samt tändtrådens längd är saker som alla inverkar i någon mån på slutresultatet. (Se kap.4.4.2., Kalorimetriskt värmevärde för beskrivning av procedur) Slutligen inverkar också bestämningen av analysfukthalten och den korrektionsfaktor som den ger upphov till. Då det i allmänhet har blivit utfört minst tre parallella prov minskar felmarginalen, och standarden säger att skillnaden mellan dessa får vara högst 0,12 MJ/kg, kan jag använda detta som felmarginal. De icke korrigerade resultaten från bombproven har legat kring 20 MJ/kg, och  $0,12/20$  blir 0,006, dvs. felmarginalen blir  $\pm 0,3\%$ .

### 7.4.3. Förbrukad bränslemängd

Det hade naturligtvis varit idealiskt om man kunnat mäta inmatad bränslemängd per tidsenhet, och anläggningens styrsystem innehåller faktiskt ett räkneverk för inmatningsskruvens frammatnings-sträcka, angiven i meter. Tyvärr visade sig denna sträcka variera alltför mycket i relation till uttagen värmemängd för att denna funktion skulle kunna utnyttjas. Enda återstående möjligheten att mäta bränslemängden var då genom att bokföra lastbilstransporterna, vilket ändå underlättades genom att lastbilen som används är utrustad med våg. Denna vågs noggrannhet har inte utretts, men då chaufförerna har avrundat vikterna till närmaste 100 kg, kan mätnoggrannheten till den delen anses vara  $\pm 50\text{kg}$  per 10 tons lass, dvs.  $\pm 0,5\%$ . En annan betydande osäkerhetsfaktor är kvarvarande mängd torv i silon vid leverans. Silons teoretiska volym är  $70\text{m}^3$  medan lastbilen rymmer  $50\text{m}^3$ , så man kan säga att kvarvarande mängd vid leverans är  $10\pm 10\text{m}^3$ . Torvens densitet på lastbilsflaket är  $200\text{ kg/m}^3$ , vilket då för den kvarvarande mängden ger vikten  $2000\pm 2000\text{kg}$ . Torvleveranserna har skett med oregelbundna intervaller, vilket sannolikt innebär att silon ibland varit så gott som tom, och ibland har den innehållit nära det maximala  $4000\text{ kg}$ . Eftersom all levererad kvantitet räknas samman för en viss mätperiod, saknar den här omständigheten betydelse, utom för första och sista lasset i mätperioden. Mätperiodens längd får då stor betydelse för denna osäkerhets inverkan. För en period som omfattar  $100.000\text{kg}$ , vilket motsvarar ungefär 2 månaders förbrukning, blir då felmarginalen  $2000/100000$ , dvs.  $\pm 2\%$ . För kortare perioder, vilka kunde vara behövliga till exempel för att ringa in perioder med kallare väderlek, blir felet självklart större. Den sammanlagda osäkerheten för tillförd bränslemängd blir då  $1,005 * 1,02 = 1,0251$ , dvs  $\pm 2,5\%$ , räknat på  $100.000\text{ kg}$ .

### 7.4.4. Felmarginal totalt

Om man räknar samman alla dessa uppskattade felmarginaler blir den totala felmarginalen följande:  $1,015 * 1,03 * 1,002 * 1,003 * 1,025 = 1,0769$ , dvs.  $\pm 7,7\%$  av den beräknade verkningsgraden  $77\%$ , vilket blir  $77 * 0,077 = \pm 5,9\%$  -enheter. När denna förklaring innehåller procent på procent blir den lätt förvirrande, så för tydlighetens skull kan man uttrycka det som ett sannolikt intervall istället: Verkningsgraden ligger mellan  $71,1\%$  och  $82,9\%$ , om man bortser från det svåruppskattade mätarfelet som beskrivs i kap. 7.3; Resultatens trovärdighet

## .7.5. Förslag till vidare forskning

Eftersom energimätarnas funktion var otillförlitlig under den här undersökningen är det uppenbart att en ny undersökning skulle behövas när mätarnas funktion väl är säkerställd. Om en sådan undersökning genomförs skulle man kunna utveckla ett säkrare system för datainsamlingen, där ett flertal chaufförer nu medverkade, vilket medförde att samordningen inte alltid var den bästa. Min ursprungliga tanke var att största noggrannhet uppnås med en möjligast lång mätperiod, och därför fästes alla gånger inte så stor uppmärksamhet vid mätaravläsningar mitt under perioden. Erfarenheten visade dock att man av oförutsedda orsaker ibland behöver kunna avgränsa även kortare perioder på ett exakt sätt.

Värdefullt skulle också vara att utreda alla de förluster som nu bara uppskattades på ett mer tillförlitligt sätt. Dessa sammanlagda förluster skulle då kunna användas till att stöda eller kullkasta den verkningsgrad som beräknats med den direkta metoden, dvs. utgående från tillförd bränsleenergi och levererad värmeenergi. För detta ändamål skulle följande förluster behöva utredas noggrannare:

- Oförbrända gaser i röken (koldioxid, metan)
- Ytförluster i form av strålning ock konvektion från pannkropp, pumpar och rörledningar
- Värmeförluster i askan
- Oförbränt kol i askan
- Oförbränt kol i röken (sot)
- Uppvärmning av bränsle och tilluft

## 8. Sammanfattning

Uppdraget bestod i att bestämma verkningsgraden för en 1 Megawatts värmecentral belägen på industriområdet i Vörå. Det huvudsakliga bränslet för denna är frästörv, som bryts på torvmosse i östra Vörå, ca. 20 km från värmecentralen. Kunderna som köper värmen är två industriföretag, Simons element som tillverkar trähus och JTK Power, ett metallföretag som tillverkar bland annat stora ljuddämpare. Deras sammanlagda energibehov är ca 1800 MWh per år.

Verkningsgraden beräknades med den direkta metoden, vilket betyder att nyttiggjord energi divideras med tillförd bränsleenergi. Lastbilen som levererar torven är utrustad med våg, och därifrån antecknades levererad torvmängd, och efter gjorda laboratorieanalyser kunde sedan torvens energiinnehåll bestämmas, och utgående från dessa sedan den totala tillförda energimängden för perioden. Nyttiggjord energimängd kunde direkt avläsas från energimätarna därifrån kunderna också faktureras.

Beräkningarna gjordes för två skilda perioder, 6.10- 3.12.2014 och 10.1.-2.2.2015. Under period I var medeltemperaturen +2,1 grader, och pannans medeleffekt var 258 kW. Under denna period var verkningsgraden 77,21% om inte panncentralens elförbrukning beaktas. Om också denna tas med som tillförd energi blir resultatet 75,05%. Bränslets genomsnittliga fukthalt var samma 30,7% under båda perioderna.

Under period II var medeltemperaturen -4,1 grader och medeleffekten 396 kW. Verkningsgraden för denna period blev 77,70 % exklusive elförbrukningen och 76 % inklusive denna.

Skillnaden i verkningsgrad mellan dessa två perioder blev alltså marginell, men å andra sidan skilde inte heller utetemperaturer och effektbehov särdeles mycket. Intressant att notera var också att vid de rökgasmätningar som jag företog fanns det inte heller någon signifikant skillnad i rökgasförluster mellan driftlägena 35 % och 80 %, förlusterna låg ändå i allmänhet mellan 6-7 %.

Den totala mätosäkerheten för undersökningen beräknades vara  $\pm 8 \%$ , men då beaktas inte det mätarfel som uppdagades under undersökningens gång. Vid ett flertal tillfällen upptäcktes att energimätarna stod stilla, troligtvis på grund av turbulens i flödesmätarna. Det förblev oklart hur ofta detta fel uppträtt utan att det observerats, och det är därför



omöjligt att ange någon felprocent för detta. Jämförelser med bl.a. en undersökning från en värmecentral i Kelviå ger dock vid handen att någonting inte stämmer, antingen borde verkningsgraden vara väsentligt högre, eller så finns det andra stora oupptäckta förluster.

Kelviåundersökningen visar en verkningsgrad som är ca. 10 % högre än min egen beräknade från Simons-pannan medan de egentliga rökgasförlusterna är av samma storleksklass i båda undersökningarna. I Kelviåundersökningen är också övriga förluster noggrant utredda, och de utgör tillsammans ca. 7 %. Någon motsvarande undersökning av dessa förluster hos Simons-anläggningen har jag själv inte företagit, men eftersom pannorna är av samma typ och tillverkare antar jag att några stora skillnader här inte kan föreligga. Den väsentligaste skillnaden är bränslet, där frästorven som används i Vörå kan anses som mer problematisk än flisen i Kelviå. Torven har genom sin lätta, finfördelade koncistens en större risk att följa med luftströmmen, så att halten av oförbränt sot i askan och rökgasen ökar. Den totala askmängden som genererats under det år som anläggningen varit i drift är dock liten, vilket talar emot att förlusterna den vägen skulle vara särdeles stora. Däremot har det bevisligen åtminstone tidvis förekommit sotpartiklar i rökgaserna, men då rökgasmätningarna indikerar en i övrigt god förbränning är det osannolikt att dessa sotmängder ensamt skulle stå för någon betydande del av de okända förlusterna på ca. 10 %.

Vad som är den verkliga verkningsgraden kan man förljaktligen bara spekulera i, men jag skulle tro att större delen av dessa okända förluster kan förklaras med mätarfelet, och en mindre del med förluster i sotpartiklar. Med 77 % uppmätt verkningsgrad plus ett mätarfel som utgör största delen av de 10 % som nämns ovan skulle man få en verklig verkningsgrad någonstans i närheten av 85 %, eller i vart fall mellan 82 och 87 %. På grund av det beskrivna mätarfelet kan man inte säga något mer exakt än så.

## Källförteckning

Alakangas, E (2000).. *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. Espoo: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.

Alakangas, E., Nyrönen, T. & Lehtovaara, J. (2000). *Kvalitetshandbok för energitorv* [http://www.vapo.fi/filebank/245-Kvalitetshandbok\\_for\\_energitorv.pdf](http://www.vapo.fi/filebank/245-Kvalitetshandbok_for_energitorv.pdf) (Hämtat 30.11.2014).

Alvarez, H. (2006). *Energiteknik*. DEL 1. Lund: Studentlitteratur.

Alvarez,H(2006). *Energiteknik* . DEL 2. Lund: Studentlitteratur.

*Biobränsle och förbränningslära*.(2000). Sollefteå: Energidalen AB.

*Formelsamling* (2000). Kalmar Maritime University.

Fransson, K. & Larsson, E. (1989). *Anvisningar för presntandaprov vid pannannläggningar*. Stockholm: Stiftelsen för värmeteknisk forskning.

Freemeteo. [Online]<http://freemeteo.se/vader/vaasa/historik/manadshistorik> (Hämtat 25.04.2015).

Härkönen, M. (2012). [Online].*Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa*. (2012). <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41034/Puun%2520polttoainekaytto.pdf%3Fsequence>

Jansson, N. (2000). *MAOLs TABELLER*. Matematik fysik kemi. Esbo: Schildts.

Jernkontorets Energihandbok. [Online].[www.energihandbok.se/forbranning](http://www.energihandbok.se/forbranning) (Hämtat 29.11.2014).

*Kvalitetshandbok för energitorv* (2005). Helsingfors: Nordic Innovation Centre. (2005:11).

Leinonen, A. (Toim). (2010).*Turpeen tuotanto ja käyttö*. Yhteenvedo selvityksistä. Helsinki: VTT. Valtioteeellinen Tutkimuslaitos.

Ljungbom, L. (1996). *Vedpärmen* . Stockholm: Novator.

Nationalencyklopedin [Online]<http://www.ne.se/> [hämtat: 17.2.2015]

Nilsson, D. (2011). *Lagring av flisade skogsbränslen – med avseende på att minska energi och kvalitetsförändringar*. Växjö: Linnéuniversitetet: Institutionen för teknik.

*Operation Instruction Manual Parr. 1266 Isoperibol Bomb Calorimeter*.(03/1999). USA:Illinois.

Raiko, R.,Saastamoinen.,J. Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. (2002). *Poltto ja palaminen*.Jyväskylä: International Research Foundation – Suomen kansallinen osasto.

Rönnerberg, M. (2014). *Kontroll av pannverkningsgrad*. Dåva Kraftvärmeverk. Umeå: Umeå Universitet. Civilingenjörprogrammet för tillämpad fysik och elektronik.

*SFS.Käsirja* (2012).sales.sfs.fi (Hämtat 11.11.2014)

Sohlberg, P. & B-M. (2009). *Kunskapens former*. Vetenskapsteori och forskningsmetod. Malmö: Liber.

Statistikcentralen. (2013). *Sähkö ja lämmin tuotanto tuotonmuodottain ja polttoainettain*.[http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2012/salatuo\\_2012\\_2013-11-05\\_tie\\_001\\_fi.html](http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2012/salatuo_2012_2013-11-05_tie_001_fi.html)

Wallén, G. (2010). *Vetenskapsteori och forskningsmetodik* Lund:Studentlitteratur.

Valtanen, E (2012).*Tekniikan taulukkokirja*.Mikkeli:Genesis-Kirjat.

*US Geological Survey* (2014). UGS.Peat Commodity Specialist.

### **Personlig kommunikation**

*Langenbacher, T.* State certified engineer. *Customer Services. Testo AG.* (2014).

*Majabacka, P.* Miljöingenjör. *Skogsbrukscentralen.* (2014-2015).2014-2015).

*Renfelt, F.* (2014-2015). *Finnish BMC.* (2014-2015).

*Svens, H.* Delägare och pannskötare . *Vörå Energiandelslag* (2014-2015).

*Rinta, K.* (VD). *JTK Power.* (2014).

## **Bilaga 1. Förteckning över figurer och tabeller**

### **Figurer**

Figur 1. Flisens energiinnehåll som funktion av fukthalten, beräknat med 3 olika metoder	s.31
Figur 2. Siegerts diagram	s.33
Figur 3. Sankey - diagram	s.51

### **Tabeller**

Tabell 1. Exempelbränslets beståndsdelar i torrs substans	s.25
Tabell 2. Exempelbränslets beståndsdelar med 30% fukthalt	s.27
Tabell 3. Rökasmätningar	s.49
Tabell 4. Förlustposter vid Kelviåanläggningen	s.54
Tabell 5. Uppskattade förluster.	s.59



## Bilaga 3.

### Leveransmängder och mätaravläsningar

Datum	Lev.mängd kg	Σ Mätare MWh	Mätare 1 Simons(MWh)	Mätare 2 JTK (MWh)	Drift %	O2 %	Rök T (°C)	Pann T (°C)
06.10-14	12600	576,9	155	421,9				
15.10-14		619,9	171,4	455,8	62		121	85
16.10-14	10600	627,2	171,4	455,8	100	21,2	74	60,9
17.10-14 m.		631	173	458	64	13	124	84,4
17.10-14 k.		636,16	174,36	461,8	27	16,6	98	84,8
19.10-14		645,25	178,75	466,5	21	16,4	98	85,2
21.10-14	9900							
22.10-14 m		660,68	184,18	476,5	74	10	114	85,3
22.10-14 k		666,53	185,63	480,9		18,2	80	67,7
23.10-14	8200							
25.10-14		687,24	193,12	494,1	26	13,1	92	85
27.10-14 m		694,26	196,06	498,2	43	16,6	96	85,4
27.10-14 k	12600	697,75	197,05	500,7	46	15,5	93	84
30.10-14		713,06	201,26	511,8	37	15,3	95	85,3
03.11-14	11200							
4.11-14		732,98	208,28	524,7		14,7	96	85,9
6.11-14 m		750,72	214,12	536,6	76	10	114	78,3
6.11-14 k		756,31	215,91	540,4	100	18	94	71,5
07.11-14	11100							
10.11-14	8200							
11.11-14		786,01	227,71	558,3	76	13,1	87	89,2
14.11-14	11300	813,02	234,7	578,5	0	16,1	81	90
18.11-14		836,55	242,75	593,8	64	13,3	106	90,7
19.11-14	11000	847,62	245,42	602,2	6	12,3	111	89,4
24.11-14 m		877,61	256,11	621,5	67	14,5	104	89
24.11-14 k	10000	881,58	257,38	624,2	57	13	106	90
28.11-14	10900							
30.11-14		924,82	271,82	653	29	14,9	86	89,7
03.12-14	11200	936,29	275,69	660,6	stopp			
08.12-14	11400	0						
10.12-14		971,84	288,84	683	stopp			
13.12-14		993,95	296,45	697,5	34	7,4	94	89
15.12-14	9800	0						
18.12-14	11800	1024,6	306,3	718,3	73	13,1	134	90,4
21.12-14	10800							
23.12-14	8000		308	726,9	66	6,7	120	91
26.12-14	10600		308	766,3	Start	20,1	60	58,5
28.12-14	11400							
30.12-14	11600		308	795	59	13,9	113	90,4
02.01-15	8200							
05.01-15	9500			829,6				
08.01-15	10300			851,2				
09.01-15				856,3	82	12,4	124	89,8
10.01-15	10000	868,02	3,82	864,2	40	14,5	104	89,5
13.01-15	10200	898,04	17,74	880,3				
14.01-15		910,96	23,66	887,3	7	11	114	90
18.01-15	9800	943,8	39	904,8	63	13,2	104	
19.01-15		947,47	42,07	905,4	79	9,6	130	89,7
20.01-15	10500	964,25	47,95	916,3				
22.01-15	11200	983,55	50,75	932,8				
24.1-15		1010,88	69,08	941,8		13,5	84	90
26.01-15	9100	1021,6	73,7	947,9				
28.01-15		1041,4	82,1	959,3	58	14,7	114	89,9
29.01-15	10500	1048,7	85,3	963,4				



## Bilaga 5. Exteriörbild





## Bilaga 6. Interiörbild 1.



Pannkroppen med inspektionsluckan centralt i bilden, rökkanaler med svarta luckor lite längre bort och styrenheten längst bak på väggen.

Bilaga 7, Interiörbild 2.

Den vitmålade väggen täcker rosten som befinner sig till hälften utanför pannan, till hälften inuti. De två grå lådorna i överkanten på bilden är energimätarna, en för vardera kunden. Nedanför kopparrören i bild skymtar inmatningskruven.





Bilaga 8. Rostens interiör. Finnish BMC:s egen design med luftslitsar och -håll. Vartannat trappsteg är rörligt för att bränslet ska röra sig nedåt vartefter det förbränns.

