

Martti Härkönen



PUUN POLTTOAINEKÄYTTÖ PIENISSÄ ALUELÄMPÖLAITOKSISSA

C: CENTRIA TUTKIMUS JA KEHITYS

**PUUN POLTTOAINEKÄYTTÖ PIENISSÄ
ALUELÄMPÖLAITOKSISSA**

Martti Härkönen

KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU, 2012

JULKAISIJA:

Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu

JAKELU:

Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu

Koulutuskirjasto

PL 277, 67101 Kokkola

puh. (06) 825 2060

email: koulutus.kirjasto@cou.fi

Kansi:

Janne Heikkilä

Kannen kuva:

Martti Härkönen

Taitto: Janne Heikkilä

C: CENTRIA TUTKIMUS JA KEHITYS

ISBN 978-952-6602-33-2 (nid.)

ISBN 978-952-6602-34-9 (PDF)

ISSN 1459-8949

ALKUSANAT

Tämä hakelämmitysraportti on laadittu yhteispohjoismaisen EU-Bothnia-Atlantica -rahoitteisen Forest Power-hankkeen yhtenä osatuotoksena ja se käsittelee puupolttoaineiden ja erityisesti hakkeen käyttöä polttoaineena lähinnä Keski-Pohjanmaan alueen energiaosuuskuntien pienehköissä aluelämpölaitoksissa. Forest Power-hankkeen pääkoordinoijana on toiminut Metsäntutkimuslaitoksen Kannuksen yksikkö ja muina partnereina Suomen osalta Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitysyksikkö CENTRIA, Keski-Pohjanmaan maaseutuopiston Kannuksen yksikkö, Keski-Pohjanmaan Metsänomistajien Liitto ja tietenkin alueen energiaosuuskunnat. Tähän tutkimukseen on aktiivisesti osallistunut myös Uumajan yliopiston ETPC-laitos Ruotsista.

Raportti perustuu projektin aikana tehtyihin kenttämittauksiin Kälviän energiaosuuskunnan hakelämpölaitoksella ja on hankkeen näkyvin lopputuotos CENTRIAn osalta. Kenttämittauksiin ovat osallistuneet tutkijoina projekti-insinööri Kari Manninen, projektityöntekijä Anu-Sisko Perttunen, yliopettaja Martti Härkönen sekä tutkimus- ja kehitysohjaaja Lasse Jansson CENTRIasta, Pentti Etelämäki Keski-Pohjanmaan Metsänomistajien Liitosta sekä Heikki Kykyri ja Perttu Suonperä Kälviän energiaosuuskunnasta. Hankkeessa ovat lisäksi olleet mukana Dan Boström, Christoffer Boman, Jonathan Fagerström, Markus Broström ja Rainer Backman Uumajan yliopiston ETPC-laitokselta. Mittaustulosten jatkoanalysoinneista ja raportin kirjoittamisesta on vastannut yliopettaja Martti Härkönen.

Kokkolassa 5.1.2012

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	6
1.1 Yleistä	6
1.2 Keski-Pohjanmaan energiaosuuskuntien hakelämpölaitokset	6
2. PUUN JA HAKKEEN OMINAISUUKSIA	9
2.1 Yleistä	9
2.2 Puun kosteus	9
2.3 Kosteuden sitoutuminen puuhun	10
2.4 Veden poistamiseen tarvittava lämpöenergia	12
2.5 Puun turpoaminen ja kutistuminen	13
2.6 Kostean puun todellinen tiheys eli märkätiheys	14
2.7 Puun lämpöarvo	15
2.8 Hakekasan tiiviys	18
2.9 Hakkeen irtotiheys	19
2.10 Hakkeen todellinen energiasisältö lavalla (qLAVA)	20
2.11 Hakkeesta saatava todellinen lämpöenergia kattilassa (qKAT)	22
3. HAKELÄMPÖLAITOKSELLA TEHTYJÄ MITTAUKSIA	27
3.1 Kälviän hakelämpölaitokset	27
3.2 Lämpöenergian tuotanto- ja säätöprosessin kuvaus	28
3.3 Höytysuhde- ja päästömittaukset	29
4. KÄLVIÄN HAKEKATTILAN SIMULOINTIMALLI	45
4.1 Savukaasujen teoreettinen alkulämpötila	45
4.2 Kattilan lämmönsiirtimen mallintaminen	46
4.3 Palamattomien kaasujen ja jäännöshiilen määrät	49
4.4 Simulointilaskelmia	51
5. YHTEENVETO	56
LÄHTEET	58

1. JOHDANTO

1.1 Yleistä

Tämä hakelämmitysraportti on laadittu yhteispohjoismaisen EU-Bothnia-Atlantica -rahoitteisen Forest Power-hankkeen (FP-hanke) yhtenä osatuotoksena ja se käsittelee puupolttoaineiden ja erityisesti puuhakkeen käyttöä polttoaineena Keski-Pohjanmaan alueen energiaosuuskuntien pienehköissä aluelämpölaitoksissa. FP-hankkeen pääkoordinoijana on toiminut Metsäntutkimuslaitoksen (METLA) Kannuksen yksikkö ja muina partnereina Suomen osalta Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitysyksikkö CENTRIA, Keski-Pohjanmaan maaseutuopiston Kannuksen yksikkö, Keski-Pohjanmaan Metsänomistajien Liitto ja tietenkin alueen energiaosuuskunnat. Tähän osatutkimukseen on aktiivisesti osallistunut myös Uumajan yliopiston ETPC-laitos, jonka vastuulla oli lämpölaitoksen savukaasujen hiukkaspäästöjen selvittäminen sekä tuhka- ja kuona-analyyysien tekeminen johtopäätökseen.

Raportin tarkoitus ei ole olla pelkästään opas puupolttoaineiden käyttöön, vaan tavoitteena on tuoda metsänomistajien ja metsäenergiaa käyttävien tai siitä kiinnostuneiden tahojen käyttöön metsäenergian hyödyntämistä edistävää tietoa mahdollisimman selkeästi ja monipuolisesti.

EU-tasolla on yleisesti sovittu niin sanotusta 20-20-20 velvoitteista. Tämä tarkoittaa muun muassa sitä, että vuoteen 2020 mennessä energian kokonaiskulutuksesta pitäisi EU:n alueella olla uusiutuvaa energiaa 20 %. Asetetut velvoitteet ovat erilaisia eri EU-maille ja esimerkiksi Suomen osalta tavoitteena on nostaa uusiutuvien energioiden osuus energian loppukäytöstä 28,5 %:sta 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Eräs tärkeimmistä keinoista tämän tavoitteen saavuttamiseksi on metsähakkeen käytön lisääminen nykyisestä noin 12 TWh/a tasosta vähintään kaksin- tai mieluummin kolminkertaiseksi eli tasolle noin 25–40 TWh/a. Miljoona kiinto-m³ puuta vastaa energiana noin 2 TWh, joten tavoitteena on polttaa puuta erilaisissa lämpö- ja voimalaitoksissa vuonna 2020 yhteensä noin 13–20 miljoonaa kiinto-m³. <http://www.tem.fi/index.phtml?s=2070>.

1.2 Keski-Pohjanmaan energiaosuuskuntien hakelämpölaitokset

Tässä CENTRIA-vetoisessa osahankkeessa on tutkittu hakkeen käyttöä polttoaineena pienissä alle 2 MW lämpölaitoksissa Keski-Pohjanmaan maakunnan alueella. Tutkitut pienlämpölaitokset ovat pääasiassa alueen energiaosuuskuntien joko omistamia tai ylläpitämiä hakelaitoksia. Osuuskunnan vastuulla on tyypillisesti puupolttoaineen hankinta ja lämpölaitoksen käyttö ja kunnossapito sekä lämmönjakelu kuluttajille. Kuluttajat taas ovat tyypillisesti kuntien omistamia isoja kiinteistöjä, kuten virastotaloja, kouluja, vanhainkoteja ja muita julkisia rakennuksia.

Keski-Pohjanmaan maakunnan alueella toimii seitsemän energiaosuuskuntaa

ja yksi hakeosuuskunta. Osuuskunnilla on vastuullaan yhteensä kuusi hake-
lämpölaitosta. Lisäksi alueella on yksi puun kaasutukseen perustuva pienehkö
CHP-laitos. Jokaiseen lämpölaitokseen on tutustuttu paikan päällä ja laitoksen
käyttöhenkilökuntaa sekä osuuskunnan vetäjiä on haastateltu. Tässä hank-
keessa tutkittavat hakelämpölaitokset ovat nimelliskattilatehoiltaan 0,12–2,0
MW ja käyttävät haketta yhteensä noin 27000 i-m³/a tuottaen lämpöenergiaa
noin 17 GWh/a.

Lämpölaitosten yhteenveto on esitetty taulukossa 1.1. Taulukossa on esitet-
ty lisäksi tiedot myös kahdesta osakeyhtiömuotoisesta turvelämpölaitoksesta
(Kaustinen ja Veteli). Jokaisesta lämpölaitoksesta on laadittu lisäksi erilliset
"datakortit", joissa on esitetty yhteenveto kustakin energiaosuuskunnasta ja
sen vastuulla olevasta lämpölaitoksesta. Tarkemmin: <http://www.forestpower.net/Bulletin.aspx?bid=1660&main=1>.



Kuva 1.1. Energia- ja hakeosuuskuntien lämpölaitokset Keski-Pohjanmaalla.

Laitos	Vuosi	Nimellisteho	Hakkeen ja palaturpeen käyttö	Tuotettu lämpö
Perho	1994	1400 kW	hake 8000 i-m3/a turve 1000 i-m3/a	5500 MWh/a
Eskola	2001	120 kW	hake 600 i-m3/a	420 MWh/a
Lohtaja	2002	300 kW	hake 1200 i-3/a	750 MWh/a
Halsua	2003	700 kW	hake 3500 i-m3/a	2600 MWh/a
Kälviä 1	2003	2000 kW	hake 14000 i-m3/a	8000 MWh/a
Kälviä 2	2006	2000 kW	(yhteensä)	(yhteensä)
Veteli (osakeyhtiö)	2008	1500 kW	hake + puubriketti yhteensä 1900 i-m3/a turve 1000 t/a	3870 MWh/a
Kaustinen 1	1999	2000 kW	turve 15000 i-m3/a	16600 MWh/a
Kaustinen 2 (osakeyhtiö)	2004	2000 kW	hake 1000 i-m3/a	
YHTEENSÄ		6,52 MW (EOK)	hake 27000 i-m3/a	16-17 GWh/a

Taulukko 1.1. Keski-Pohjanmaan maakunnan alueella sijaitsevat energiaosuuskuntien vastuulla olevat hakelämpölaitokset (+ kaksi osakeyhtiömuotoista turvelaitosta, jotka käyttävät myös jonkin verran haketta).

Lämpölaitoksista tarkempaan analysointiin valittiin Kälviän energiaosuuskunnan ylläpitämä 2,0 MW lämpölaitos (Kälviä 1). Tarkoituksena oli selvittää lämpölaitoksen kaasumaiset ja kiinteät päästöt, syntyneen tuhkan ja kuonan ominaisuudet sekä lämpölaitoksen hakekattilan hyötysuhde. Mittaukset toteutettiin useassa vaiheessa syksyn 2009 ja kevään 2011 välisenä aikana sekä osittain täyskuormalla vaihdellen myös poltettavan hakkeen laatua ja koostumusta.

2. PUUN JA HAKKEEN OMINAISUUKSIA

2.1 Yleistä

Puun ja siitä tehdyn hakkeen energiasisältö tilavuusyksikköä kohti (kWh/m³) riippuu useista tekijöistä, joista tärkeimpiä ovat kosteus, puulaji ja hakekasan tiiviys. Puun kosteus on merkittävin yksittäinen tekijä ja se vaikuttaa siten, että mitä kosteampaa puuta poltetaan, niin sitä enemmän joudutaan kattilassa höyrystämään puuhun sitoutunutta vettä. Tämä puolestaan alentaa puusta poltettaessa saatavaa todellista lämpöenergiaa. Hakekasan tiiviys tarkoittaa irtokuutiometrissä olevan puuaineksen osuutta koko tilavuudesta ja riippuu muun muassa haketustekniikasta. Lähtöraaka-aineen vaikutus näkyy muun muassa kuiva-aineen lämpöarvon (MJ/kg ka.) ja kuivatuoretilheyden (kg ka./m³) kautta. Havupuiden kuiva-aineen lämpöarvo on hieman lehtipuiden vastaavaa suurempi ja toisaalta koivu on yleisimmistä puulajeista raskainta ja kuusi kevyintä.



Kuva 2.1. Paljonko lämpölaitokselle tuodussa hakekuormassa on energiaa hakkeen tuojan ja toisaalta hakkeen käyttäjän kannalta? Kuva: Martti Härkönen

2.2 Puun kosteus

Puu on hygroskooppista ainetta eli se pystyy imemään itseensä hyvin suuria määriä vettä, jopa selvästi enemmän kuin mitä on itse puun kuivamassa. Puun kosteus voidaan määritellä kahdella eri tavalla: joko vertaamalla puussa olevaa vesimäärää puun kuiva-ainemassaan -> kosteussuhde $U = m_{\text{vesi}}/m_{\text{ka}}$. tai vertaamalla vesimäärää puun kokonaisuun -> kosteus $X = m_{\text{vesi}}/m_{\text{kok}}$. Useimmiten kosteutta X käytetään ilmaisemaan puussa olevaa vesimäärää,

mutta esimerkiksi kuivauslaskelmissa täytyy ymmärtää myös kosteussuhteen U käsite. Kosteussuhteen U ja kosteuden X välinen keskinäinen riippuvuus on

$$X = \frac{U}{U+1} \quad \text{tai} \quad U = \frac{X}{1-X} \quad (1)$$

Kosteus X on aina pienempi kuin 1 (tai pienempi kuin 100 %), sen sijaan kosteus-suhde U voi olla myös suurempi kuin 1. Näitä eri tavalla ilmaistuja kosteuksia ei tule sekoittaa keskenään.

Esimerkki 1: Kiintopuun kokonaismassa eli niin sanottu märkämassa on 50 kg ja sen kosteudeksi on mitattu $X = 40\%$. Tällöin puussa on vettä $m_{\text{vesi}} = X m_{\text{kok}} = 0,40 \cdot 50 = 20$ kg ja kuivaa vedetöntä puuta loput eli $50 - 20 = 30$ kg. Näin ollen kosteussuhde $U = 20/30 = 0,667$ kg vettä per kg kuivaa puuta. Kosteussuhde U saadaan myös kaavasta (1) eli $U = 0,40/(1 - 0,40) = 0,667$ (eli 66,7 %).

Esimerkki 2: Tuoreen mäntytukin kosteus on $X = 55\%$. Tällöin sen kosteussuhde on kaavan (1) mukaan $U = 0,55/(1 - 0,55) = 1,22$ (122 %). Puussa on siis 1,22 kg vettä per kg kuivaa puuta eli tukissa on enemmän vettä kuin kuivaa puuainesta. Tämä tekee tukista hyvin raskaan ja se voi jopa upota vedessä (uppotukit).

Kuivauslaskelmissa kysytään usein puusta tai hakkeesta poistettavan veden määrää, kun tiedetään kostean puun alkumassa m_1 , alkukosteus X_1 ja tavoiteltava loppukosteus X_2 . Poistettavalle vesimäärälle voidaan johtaa laskenta-kaava:

$$\Delta m_{\text{vesi}} = m_1 \left[X_1 - X_2 \frac{(1 - X_1)}{(1 - X_2)} \right] \quad (2)$$

Esimerkki 3: Kuivataan 100 kg märkää puuta alkukosteudesta $X_1 = 40\%$ loppukosteuteen $X_2 = 15\%$. Paljonko vettä pitää poistaa? Sijoitetaan suoraan kaavaan (2) $\rightarrow \Delta m_{\text{vesi}} = 100[0,40 - 0,15(1-0,40)/(1-0,15)] = 29,4$ kg.

Tarkistus: Alussa puussa on vettä $0,40 \cdot 100 = 40$ kg ja kuivaa puuta loput 60 kg. Kuivan puun massa ei kuivauksessa muutu. Lopputilassa puussa on siis vettä $40 - 29,4 = 10,6$ kg ja kuivaa puuta siis edelleen 60 kg eli kokonaismassa on 70,6 kg. Kosteus $X_2 = 10,6/70,6 = 0,15$ eli 15 % kuten pitikin!

2.3 Kosteuden sitoutuminen puuhun

2.3.1 Veden sitoutumistavat

Vesi on "kiinni" puussa joko niin sanottuna sidottuna vetenä ja mahdollisesti tämän lisäksi myös niin sanottuna vapaana vetenä. Sidottu vesi on adsorboitunut hyvin tiukasti itse puuaineksen soluonteloiden välisiin seinämiin, kun taas vapaa vesi sijaitsee itse soluonteloissa. Suomalaisten puiden osalta käy-

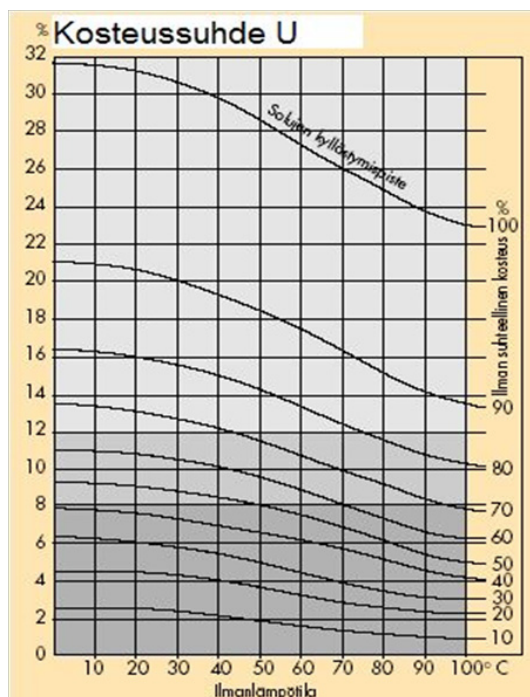
tetään usein kosteussuhteen arvoa $U_{PSK} \approx 0,30$ ("Puun Syiden Kyllästymispiste", PSK) kuvaamaan sitä rajakosteussuhdetta, jolloin puun soluonteloiden seinämät ovat täysin veden kyllästävät, mutta vapaata vettä ei soluonteloissa vielä ole. Kosteussuhteen arvo $U_{PSK} = 0,30$ vastaa kaavan (1) mukaisesti kosteutta $X_{PSK} = 23$ %. Rajakosteuden numeroarvo riippuu lämpötilasta ja on sitä pienempi, mitä suurempi on lämpötila. Edellä annettu raja-arvo $U_{PSK} = 0,30$ vastaa keskimääräistä arvoa lämpötilavälillä $0^{\circ}\text{C} \rightarrow 60^{\circ}\text{C}$, mutta esimerkiksi 100°C lämpötilassa PSK-raja on enää noin $U_{PSK} = 0,23$ vastaten kosteutta $X_{PSK} = 19$ % (ks. kuva 2.2). Jos lämpötilan vaikutus halutaan ottaa huomioon, voidaan käyttää yhtälöä $U_{PSK} = 0,33 - 0,001T$, jossa lämpötilan T yksikkö on Celsius. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1996/J815.pdf>

Sidotulla ja vapaalla vedellä on käytännössä se tärkeä ero, että sidottu vesi on puussa erittäin "tiukassa" ja sen poistaminen on sitä vaikeampaa, mitä kuivemmaksi puu tulee. Tämä tarkoittaa sitä, että puussa olevan veden poistamiseen tarvittava lämpöenergia vesikiloa kohti kasvaa kosteuden pienentyessä. Soluonteloissa olevan vapaan veden poistaminen sen sijaan vastaa normaalia veden höyrystämistä.

2.3.2 Puun tasapainokosteus

Puun tasapainokosteudella tarkoitetaan sitä kosteutta, mihin kosteus asettuu, kun se on tarpeeksi kauan tekemisissä tietyn lämpötilaisen kostean ilman kanssa. Tasapainokosteus riippuu myös ilman suhteellisesta kosteudesta. Edellä mainittu PSK-raja $U_{PSK} = 0,30$ (tai $X_{PSK} = 0,23$) vastaa tasapainokosteutta ilman suhteellisen kosteuden arvolla 100 %.

Kuvassa 2.2 on esitetty puun tasapainokosteus lämpötilan ja puuta ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden funktiona. Kuvasta nähdään, että varastoitamalla puuta esimerkiksi lämpötilassa 20°C ilman suhteellisen kosteuden ollessa 60 %, asettuu puun kosteussuhde lopulta arvoon $U = 11$ % (0,11), mikä vastaa normaalikosteutena arvoa $X = 9,9$ %. Kosteuden tasoittuminen on kuitenkin erittäin hidasta ja näin ollen puun todellinen kosteus vastaa vain hyvin harvoin ympäristön lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta riippuvaa tasapainokosteutta. Puu kuivuu luonnostaan aina ulkoreunasta sisäänpäin, toisin sanoen kosteus siirtyy puun sisäosista reunoille päin. Tämä kosteuden siirtyminen (diffuusio) tapahtuu hyvin hitaasti. Kokonaisuudessaan kuivuminen on tietenkin sitä nopeampaa, mitä pienempiin osiin puu on pilkottu. Hakkeen normaali palakoko on hyvin pieni, joten hake kuivuu suhteellisen nopeasti verrattuna esimerkiksi kokonaisen rungon kuivumiseen.



Kuva 2.2. Puun tasapainokosteussuhde U lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden funktiona. Vaaka-akselilla oleva ilman lämpötila on samalla myös puun lämpötila. Ylin käyrä kuvaa PSK-rajaa lämpötilan funktiona. Kuva: www.puuproffa.fi

2.4 Veden poistamiseen tarvittava lämpöenergia

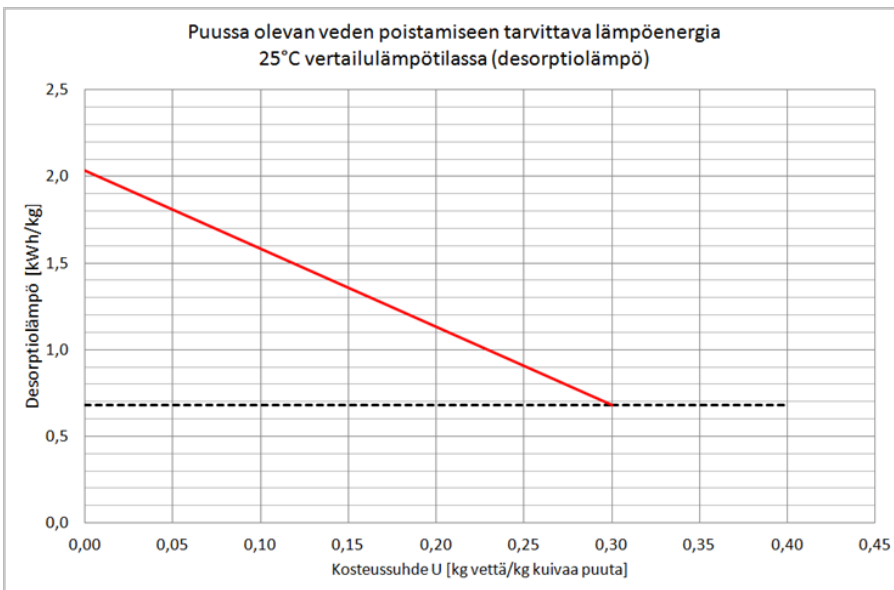
Kun kosteaa puuta poltetaan, niin puussa oleva vesi joudutaan aina ensin poistamaan puusta ja sen jälkeen höyrystämään. Tähän tarvittava lämpöenergia otetaan puun kuiva-aineen palaessa vapautuvasta lämmöstä. Usein vertailulämpötilana käytetään laskelmissa normaalin kiehumislämpötilan 100°C asemasta 25°C lämpötilaa. Puun syiden soluonteloissa olevan vapaan veden poistaminen ja höyryksi muuttaminen vastaa normaalia veden höyrystämistä. Niin kauan kun kosteus X pysyy suurempana kuin PSK-rajakosteus 23 %, yhden vesikilon poistaminen puusta vaatii lämpöenergiaa vakiomäärän 2,443 MJ/kg eli 0,68 kWh/kg vettä (25°C vertailulämpötilassa). Numeroarvo ei siis riipu kosteudesta X .

Sen sijaan sidottuna oleva vesi on puun syiden soluseinämiin hyvin tiukasti adsorboitunutta vettä ja sen poistamiseen tarvitaan paljon enemmän lämpöä kuin jo valmiiksi nesteenä olevan vapaan veden tapauksessa. Tarvittava lämpöenergia riippuu puun kosteussuhteesta U . Kun kosteussuhde U lähestyy nollaa, niin tarvittava lämpöenergia on hyvin suuri ollen moninkertainen vapaan veden poistamiseen verrattuna (<http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1996/J815.pdf>). Laskelmien helpottamiseksi oletetaan jatkossa, että desorptiolämmön riippuvuus kosteussuhteesta on lineaarinen ja että desorptiolämpö ar-

volla $U = 0$ on tasan kolminkertainen höyrystymislämpöön verrattuna (25°C). Tällöin sidotun veden poistamiseen ja sen edelleen höyrystämiseen tarvittava lämpöenergia vesikiloa kohti kosteussuhteen U :n funktiona saadaan kaavalla (yksikössä kWh/kg): $q_{\text{des}} = 2,036 - 4,524 \cdot U$.

Esimerkki 4: Kuivataan 100 kg puuta alkukosteudesta $X_1 = 40\%$ loppukosteuteen $X_2 = 23\%$. Paljonko tähän tarvitaan lämpöenergiaa? Annetut kosteudet vastaavat arvoja $U_1 = 0,67$ ja $U_2 = 0,30$ eli poistettava vesi on kokonaisuudessaan vapaata vettä. Alussa puussa on vettä 40 kg ja kuivaa puuta loput 60 kg. Lopputilassa kosteussuhde on 0,30 eli puussa on vettä jäljellä $0,30 \cdot 60 = 18$ kg, joten vettä poistetaan 22 kg. Tarvittava lämpöenergia on siten $22 \text{ kg} \cdot 0,68 \text{ kWh/kg} = 14,96 \text{ kWh}$ (vertailulämpötila 25°C).

Esimerkki 5: Kuivataan 100 kg puuta alkukosteudesta $X_1 = 23\%$ loppukosteuteen $X_2 = 6\%$ eli kosteus muuttuu samat 17 %-yksikköä kuin esimerkissä 4. Paljonko lämpöä nyt tarvitaan? Vastaavat kosteussuhteet ovat $U_1 = 0,30$ ja $U_2 = 0,064$. Nyt ollaan siis kokonaan sidotun veden alueella. Kosteussuhde on keskimäärin kuiva-uksen aikana $(0,30 + 0,064) / 2 = 0,182$. Joten tarvittava lämpöenergia on keskimäärin $2,036 - 4,524 \cdot 0,182 = 1,213 \text{ kWh/kg}$. Vettä poistetaan esimerkin 1 mukaisesti las-kettuna 18,1 kg, joten tarvittava lämpöenergia on $18,1 \cdot 1,213 = 21,95 \text{ kWh}$ eli 47 % enemmän kuin esimerkissä 4!



Kuva 2.3. Veden poistamiseen (desorptio) tarvittava lämpöenergia kosteussuhteen U funktiona. Oletettu lineaarinen riippuvuus (kun $U < 0,30$) ja $q_{\text{des}} = 3 \cdot q_{\text{höyr}}$, kun U lähestyy arvoa nolla. Muista, että kosteus $X = U / (1 + U)$.

2.5 Puun turpoaminen ja kutistuminen

Kosteuden ollessa sidotun veden alueella ($X < 23\%$), puun tilavuus muuttuu kosteuden muuttuessa. Kosteuden lisääntyessä tapahtuva turpoaminen ja puun kuivussa tapahtuva kutistuminen eivät ole hystereesisi-ilmiön takia

prosentuaalisesti aivan yhtä suuria, mutta ero on tässä yhteydessä merkityksetön. Puun turpoaminen tai kutistuminen riippuu kosteuden lisäksi myös puun kuivatuoretiheydestä siten, että raskaimmilla puilla tilavuuden suhteellinen muuttuminen on suurempaa. Yleensä suhteellinen turpoaminen on suoraan verrannollinen kosteussuhteeseen U . Laskelmissa käytetään suhteelliselle tilavuuden muutokselle kaavaa: $\Delta V/V = U \cdot \rho_{kT} / 1000$, jossa ρ_{kT} on puun kuivatuoretiheys ja veden tiheys on 1000 kg/m^3 . <http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/Viitaniemi.pdf>

2.6 Kostean puun todellinen tiheys eli märkätiheys

Puun kuivatuoretiheys ρ_{kT} määritellään käyttäen massana puun kuivamassaa, mutta tilavuutena puun tuoretilavuutta. Puun tilavuus täysin tuoreena on turpoamisen takia suurempi kuin täysin kuivana, joten puun kuivatiheys ρ_k on aina suurempi kuin sen kuivatuoretiheys ρ_{kT} . Yhteys kuivatiheyden ja kuivatuoretiheyden välillä on

$$\rho_k = \rho_{kT} (1 + 0,0003 \rho_{kT}) \quad (3)$$

Esimerkki 6: Koivun kuivatuoretiheys on 490 kg/m^3 ja männyn vastaavasti 405 kg/m^3 . Vastaavat kuivatiheydet ovat kaavan (3) mukaan vastaavasti koivulle noin $490 \cdot (1 + 0,0003 \cdot 490) = 562 \text{ kg/m}^3$ ja männylle noin 454 kg/m^3 .

Puulaji	Kuivatuoretiheys	Kuivatiheys
Koivu	490 kg/m^3	562 kg/m^3
Haapa	375 kg/m^3	417 kg/m^3
Leppä	400 kg/m^3	448 kg/m^3
Mänty	405 kg/m^3	454 kg/m^3
Kuusi	395 kg/m^3	442 kg/m^3

Taulukko 2.1. Eri puulajien kuivatuore- ja kuivatiheyksiä (vaihtelevat jonkin verran).

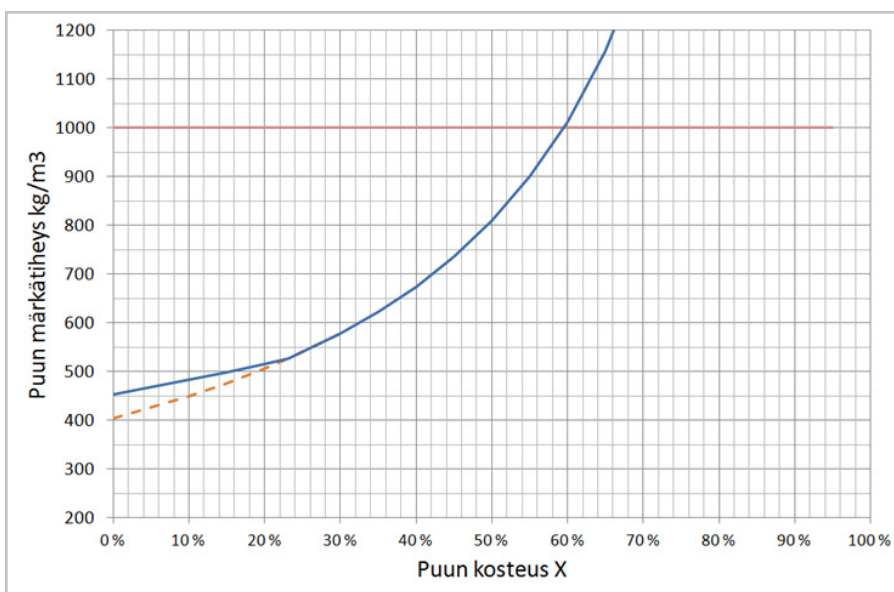
Puun märkätiheys ρ_m tarkoittaa kostean puun todellista tiheyttä eli puun todellinen massa per todellinen tilavuus. Märkätiheys riippuu puun kuivatuoretiheydestä ρ_{kT} , puun kosteudesta X ja sen laskemisessa on pienillä kosteuksilla otettava huomioon myös puun turpoaminen/kutistuminen. Koska puu turpoaa vain PSK-rajaa asti ja tilavuus on sen jälkeen vakio, on puun märkätiheys laskettava kahdella eri tavalla kosteudesta riippuen. Usein käytetty termi tuoretiheys on puun märkätiheys kaatohetkellä eli puulajista hieman riippuen noin kosteuden arvolla $X = 0,50\text{--}0,60$. Jos kosteus on alle PSK-rajan eli $X \leq 23\%$, puun märkätiheys saadaan kaavalla:

$$\rho_m = \frac{\rho_{kT} (1 + 0,0003 \rho_{kT})}{[1 - X (1 - 0,001 \rho_{kT})]} \quad (4)$$

Jos puun kosteus on rajakosteutta suurempi eli $X > 23\%$, niin märkätiheys lasketaan yksinkertaisemmalla kaavalla:

$$\rho_m = \frac{\rho_{kT}}{(1 - X)} \quad (5)$$

Esimerkki 7: Tuoreen mäntytukin kosteus on 55 %. Mikä on tukin märkätiheys? Männyn kuivatuoretiheys on taulukon 2.1 mukaan 405 kg/m³. Kaavasta (5) saadaan sijoittamalla mäntytukin todelliseksi tiheydeksi $\rho_m = 900$ kg/m³ eli pysyy juuri ja juuri veden pinnalla. Tukista tulee uppotukki, kun kosteus ylittää 59 % (kuva 2.4).



Kuva 2.4. Mäntypuun todellinen tiheys eli märkätiheys kosteuden X funktiona. Punainen vaakaviiva kuvaa veden tiheyttä ja katkoviiva tiheyttä, jos puun kutistumista/turpoamista ei otettaisi huomioon.

2.7 Puun lämpöarvo

2.7.1 Kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo

Puun kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo on noin 19,0–20,5 MJ/kg ka. (ka. = kuiva-ainetta). Hyvin usein käytetään puulajista riippumatta vakioarvoa 20 MJ/kg ka. tai 20,5 MJ/kg ka. Usein laboratoriomittaus pommikalorimetrillä on ainut luotettava keino puun kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvon selvittämiseksi.

2.7.2 Tehollinen eli alempi lämpöarvo

Suomalaisten puiden keskimääräinen alkuainekoostumus (laskettu vedettö-

mälle puuainekselle) on: hiiltä (C) 50–52 %, vetyä (H) 5,9–6,3 %, typpeä (N) 0,2–0,3 %, rikkiä (S) alle 0,01 % ja loput happea (O) eli noin 41–43 %. Käytännössä puu sisältää alkuaineista siis oikeastaan vain hiiltä, vetyä ja happea. Runkopuun tuhkapitoisuus on noin 0,5–1,0 % kuiva-aineesta, ollen siis varsin pieni. Oksien tai neulasten sekä puun kuoren ja kantojen tuhkapitoisuus on kuitenkin selvästi suurempi. Puun sisältämä vety on palava aine ja vedyn palamistuote on vettä, mikä joudutaan palamisprosessissa höyrystämään. Poltettaessa 1 kg täysin kuivaa (vetyä 6,0 %) vedetöntä puuta, syntyy palamistuotteena noin 0,54 kg vettä. Höyrystämiseen tarvittava lämpöenergia otetaan puun kuiva-aineesta, joten kuivan puun tehollinen eli alempi lämpöarvo on jonkin verran pienempi kuin kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo. Laskenta-kaavaksi saadaan (H on puun vetypitoisuus prosentteina):

$$q_{alempi} = q_{ylempi} - 0,2 H \quad (6)$$

Jos $q_{ylempi} = 20,0$ MJ/kg ka. ja vetypitoisuus 6,0 %, niin saadaan $q_{alempi} = 20,0 - 0,22 \cdot 6 = 18,68$ MJ/kg ka. ja vastaavasti, jos käytetään arvoa 20,5 MJ/kg ka., saadaan $q_{alempi} = 19,18$ MJ/kg ka. Kuivan puun alempi lämpöarvo vaihtelee puulajeittain jonkin verran ja puun eri osilla voi olla erilainen lämpöarvo. Esimerkiksi koivun tuohen lämpöarvo on jopa 50 % suurempi kuin koivun runkopuulla.

Mänty	
Puhdas puu	18,71 - 19,29
Kaarna	18,38 - 20,72
Oksat	19,39 - 20,50
Neulasat	21,05 - 21,07
Latvat	18,84
Kokonainen puu	19,60 - 20,40
Kannot	19,20 - 19,60
Kuusi	
Puhdas puu	17,96 - 19,02
Kaarna	17,83 - 19,83
Oksat	19,80 - 20,00
Latvat	18,63 - 19,80
Kokonainen puu	19,20 - 19,60
Kannot	18,95 - 19,05
Koivu	
Puhdas puu	17,41 - 19,13
Nila	17,12 - 18,42
Tuohi	28,38 - 29,30
Oksat	18,84 - 19,80
Kokonainen puu	19,10 - 19,60
Kannot	

Taulukko 2.2. Eri puulajien kuiva-aineen alempia lämpöarvoja. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

2.7.3 Kosteuden vaikutus lämpöarvoon

Poltettaessa kostea puuta, joudutaan kaikki puussa sitoutuneena oleva vesi ensin poistamaan ja sitten lämmittämään kiehumislämpötilaan ja sen jälkeen vielä höyrystämään. Vapaan veden höyrystämisessä ei ole ongelmia, mutta kun puun kosteus alenee rajakosteuden $X = 23$ % alapuolelle, niin lämpöä jou-

dutaan käyttämään lisäksi myös veden "irrottamiseen" puun syiden soluonteloiden seinämistä. Kaikki tämä alentaa kostean puun todellista lämpöarvoa kuivaan puuhun verrattuna sitä enemmän, mitä kosteampaa poltettava puu on.

Puun todellinen lämpöarvo kosteus X huomioon ottaen lasketaan hyvin usein muun muassa lämpölaitosten yleisesti käyttämällä standardikaavalla:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

$$q_{STD} = q_{alempi} (1 - X) - 0,68X \quad (7)$$

jossa q_{alempi} on annettava yksikössä kWh/kg (usein 5,19 kWh/kg ka.) ja luku 0,68 kWh/kg on veden höyrystymislämpö vertailulämpötilassa 25°C.

Kaavalla (7) voidaan laskea myös lämpölaitokselle tuodun hakkeen lämpösisältö saapumistilassa (jonka mukaan maksetaan korvaus hakkeen tuojalle). Kaava (7) ei kuitenkaan vastaa todellista palamistilannetta, koska se ei esimerkiksi ota huomioon sidotun ja vapaan veden erilaisia luonteita, eikä myöskään kattilaan syötetyn puun todellista alkulämpötilaa. Kovalla pakkasella esimerkiksi puun sisältämä vapaa vesi on jäässä (sidottu vesi sen sijaan ei jäädy) ja sen sulattamiseenkin kuluu lämpöä. Todellisiin kattilan simulointilaskelmiin ja hyötysuhdemittaustulosten analysointiin tarvitaan siis tarkempia yhtälöitä.

Kostean puun vaatima lämpöenergia (yksikkönä kWh/kg), kun se lämmitetään alkulämpötilasta T_0 vertailulämpötilaan $T_{vert} = 25^\circ\text{C}$ on

$$q_{l\ddot{a}m} = \frac{Q_{l\ddot{a}m}}{m_{kok}} = \frac{[c_{kok}(T_{vert} - T_0) + \alpha(X - X_{PSK})l_{sul}]}{3600} \quad (8)$$

jossa m_{kok} = puun kokonaismassa (kg), c_{kok} = puun ja sen sisältämän veden tehollinen ominaislämpö (kJ/kgK), T_0 = puun alkulämpötila, $T_{vert} = 25^\circ\text{C}$, X = puun alkukosteus, X_{PSK} = rajakosteus (0,23) ja l_{sul} = jään sulamislämpö 333 kJ/kg ja kerroin $\alpha = 1$, jos alkulämpötila on alle 0°C ja samanaikaisesti X on suurempi kuin X_{PSK} , aina muutoin $\alpha = 0$. Ominaislämpö c_{kok} lasketaan kosteudella X painotettuna keskiarvona kuivan puun ja nestemäisen veden ominaislämmöistä.

Lämpöenergia q_{des} , mikä tarvitaan kaiken veden poistamiseen puusta ja sen höyrystämiseen, täytyy laskea alkukosteudesta X riippuen kahdella eri tavalla. Mikäli alkukosteus on yli PSK-rajan 23 %, niin välillä $X \rightarrow X_{PSK}$ on tarvittava lämpöenergia sama kuin veden höyrystymislämpö eli 0,68 kWh/kg vettä (25°C). Lopun veden poistamiseen tarvitaan vesikiloa kohti tätä selvästi enemmän lämpöä eli keskimäärin 1,36 kWh/kg vettä (25°C). Lopuksi lasketaan vielä kosteussuhteella U painotettu keskiarvo

$$q_{des} = \frac{Q_{des}}{m_{kok}} = X \left[\frac{U - 0,30}{U} 0,68 + \frac{0,30}{U} 1,36 \right] \quad (9)$$

jossa U on alkukosteutta X vastaava kosteussuhde eli $U = X/(1 - X)$.

Mikäli puun kosteussuhde $U < 0,30$, niin tarvittava lämpöenergia on

$$q_{des} = Q_{des}/m_{kok} = X(2,036 - 4,524U/2) \quad (10)$$

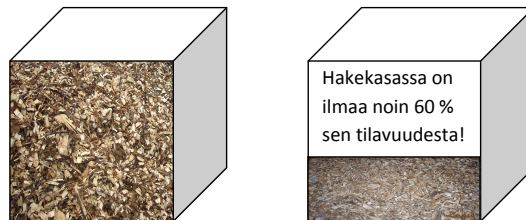
Puusta poltettaessa vapautuva todellinen lämpöenergia saadaan lopuksi kaavalla:

$$q_{tod} = \frac{Q_{tod}}{m_{kok}} = q_{alempi}(1 - X) - q_{läm} - q_{des} \quad (11)$$

Esimerkki 8: Puun alkukosteus on $X = 40\%$ ja alkulämpötila -10°C . Puun alempi lämpöarvo olkoon $18,68\text{ MJ/kg}$ ka. eli $5,19\text{ kWh/kg}$ ka. Mikä on puusta saatava todellinen lämpöenergia kattilassa? Alkulämpötila on pakkasen puolella, joten kaikki vapaa vesi on lähtökohtaisesti jäässä. Kaavan (8) mukaan puun lämmittäminen vertailulämpötilaan 25°C vaatii energiaa $q_{läm} = [(1-0,40)*1,5 + 0,40*4,2]*(25 - (-10)) + 1*(0,40-0,23)*333 = 146,91\text{ kJ/kg}$ eli $0,041\text{ kWh/kg}$. Veden poistamiseen puusta ja sen höyryttämiseen eli desorptioon tarvittava lämpö on kaavan (9) mukaan $q_{des} = 0,40*[(0,667-0,30)/0,667*0,68 + 0,30/0,667*1,36] = 0,394\text{ kWh/kg}$. Lopuksi kaavasta (11) saadaan $q_{tod} = 5,19*(1-0,40) - 0,041 - 0,394 = 2,68\text{ kWh/kg}$. Standardikaavan (7) antama tulos on $q_{STD} = 5,19*(1 - 0,40) - 0,68*0,40 = 2,84\text{ kWh/kg}$. Eroksi tulee $1 - 2,68/2,84 = -0,056$ eli $-5,6\%$ standardikaavan antaessa liian suuren tuloksen.

2.8 Hakekasan tiiviys

Hakkeen tiiviys (v) kuvaa sitä, kuinka monta kiintokuutiota puuta on yhdessä irtokuutiossa haketta.



Kuva 2.5. Hakekasan tiiviys vaihtelee noin välillä $v = 0,36-0,46$ eli yhdessä irtokuutiossa haketta on noin $0,36-0,46$ kiintokuutiota (kosteaa) puuta ja loput on ilmaa. Usein käytetty arvo on $v = 0,40\text{ m}^3/\text{i-m}^3$.

Tiiviyyteen vaikuttavia tekijöitä on lukuisia, kuten hakkeen palakoko ja -muoto, kosteus, puulaji, haketyyppi (hakkuutähdehake, rankahake, kokopuuha-

ke) ja esimerkiksi kuljetusmatka. Mitä pienempi on hakkeen palakoko, sitä tiiviimpää hake yleensä on. Palakokoon ja -muotoon vaikuttaa muun muassa käytetty haketustekniikka. Kuljetuksen aikana hakekasa voi tiivistyä tärinän vaikutuksesta. Usein käytetyn ”nyrkkisäännon” mukaan yhdestä kiintokuutiosta puuta saadaan 2,5 irtokuutiota haketta eli toisin sanoen hakkeen tiiviys on $v = 1/2,5 = 0,40 \text{ m}^3/\text{i-m}^3$. Tätä arvoa voidaankin käyttää, mikäli tarkempaa tietoa tiiviystä ei ole.

2.9 Hakkeen irtotiheys

Hakkeen irtotiheys ρ_{irto} ($\text{kg}/\text{i-m}^3$) saadaan kertomalla kostean puuaineksen märkätiheys ρ_m hakekasan tiiviydellä v :

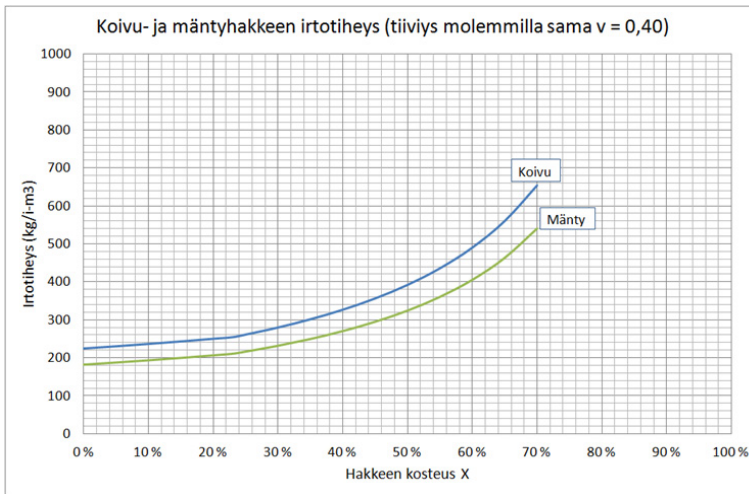
$$\rho_{\text{irto}} = \rho_m v \quad (12)$$

Esimerkki 9: Traktorin peräkärryn tilavuus on 10 m^3 ja siinä olevan hakkeen kosteudeksi on mitattu 35 %. Kuormassa on siis 10 i-m^3 kosteudeltaan 35 % haketta. Paljonko kuorma painaa eli toisin sanoen mikä on sen kokonaismassa? Kuorman tiiviyden olkoon $v = 0,40 \text{ m}^3/\text{i-m}^3$ ja puun kuivatuoretiheys $\rho_{\text{KT}} = 405 \text{ kg}/\text{m}^3$ (kosteaa mäntyhaketta). Kaavasta (5) saadaan määrän puuaineksen tiheydeksi $\rho_m = 623 \text{ kg}/\text{m}^3$ ja kaavasta (12) edelleen hakkeen irtotiheydeksi $\rho = 0,40 \times 623 = 249 \text{ kg}/\text{i-m}^3$. Näin ollen kuormassa on $249 \times 10 = 2490 \text{ kg}$ kosteaa haketta, jossa on $0,35 \times 2490 = 872 \text{ kg}$ vettä ja 1618 kg kuivaa puuta.



Kuva 2.6. Kosteaa hakekuorma on tulossa lämpölaitokselle. Kuorman tilavuus on 10 i-m^3 . Paljonko on kuormassa olevan hakkeen massa? Kuva: Martti Härkönen

Kuvassa 2.7 on vertailu koivu- ja mäntyhakkeen irtotiheyttä keskenään. Tiiviyden v ja käytetyn raaka-aineen kuivatuoretiheys ρ_{KT} vaikuttavat merkittävästi hakkeen irtotiheyteen. Kosteusalueella $30 \% \leq X \leq 50 \%$, mäntyhakkeen irtotiheys on noin $230\text{--}320 \text{ kg}/\text{i-m}^3$ ja koivuhakkeen vastaavasti $280\text{--}390 \text{ kg}/\text{i-m}^3$.



Kuva 2.7. Hakeraaka-aineen kuivatuoretiheyden vaikutus hakkeen irtotiheyteen. Koivun kuiva-tuoretiheys on 490 kg/i-m³ ja männyn 405 kg/i-m³.

2.10 Hakkeen todellinen energiasisältö lavalla (q_{LAVA})

Kun kostean hakkeen irtotiheys kerrotaan termillä (1 - X), saadaan hakkeessa olevan kuivan puuaineksen määrä irtokuutiosta ja kun tämä kerrotaan edelleen kuivan puun alemmalla lämpöarvolla q_{alempi}, saadaan kostean hakkeen sisältämä lämpöenergia q_{LAVA} ennen polttamista yksikössä MJ/i-m³ tai kWh/i-m³. Lämpömäärä q_{LAVA} kuvaa siis sitä lämpömäärää, mikä periaatteessa on lämpölaitokselle esimerkiksi traktorin lavalla tuodussa hakekuorma irtotilavuutta kohti (kWh/i-m³):

$$q_{LAVA} = \rho_m v(1 - X)q_{alempi} \quad (13)$$

jossa tulo $\rho_m v$ on hakkeen irtotiheys ja q_{alempi} annettu yksikössä kWh/kg.



Haketilavuus on V (i-m³)
Kokonaismassa on m_{kok} (kg)
Kosteus on X (kg vettä/ kg kostea haketta)



Kuva 2.8. Kostea haketta. Kuva: Martti Härkönen

Kun kaavaan (13) sijoitetaan hakkeen puuaineksen märkätiheyden ρ_m lauseke, niin saadaan rajakosteutta 23 % kuivemmalle hakkeelle:

$$\text{(jos } X \leq 0,23) \quad q_{LAVA} = \frac{v\rho_{kT}q_{alempi}(1 + 0,0003\rho_{kT})(1 - X)}{[1 - X(1 - 0,001\rho_{kT})]} \quad (14)$$

Ja jos hakkeen kosteus on rajakosteutta suurempi eli kosteus on yli 23 %, niin hakkeen energiasisältö saadaan kaavalla

$$\text{(jos } X > 0,23) \quad q_{LAVA} = v\rho_{kT}q_{alempi} \quad (15)$$

Tuloksista siis selviää, että kun hakkeen kosteus on suurempi kuin PSK-raja eli kun kosteus $X > 23\%$, niin kostean hakkeen sisältämä lämpöenergia irto-kuutiota kohti ($\text{kWh}/\text{i-m}^3$) ei riipu millään lailla kosteudesta! Tämä tarkoittaa sitä, että tietyn kokoisella lavalla lämpölaitokselle tuodussa hakekuormassa on hakkeen tuojan kannalta periaatteessa aina saman verran energiaa kosteudesta riippumatta. Sen sijaan pienillä kosteuksilla, kun $X \leq 23\%$, kuorman lämpösisältö riippuu kosteudesta ja on sitä suurempi mitä kuivempaa hake on. Edellä saatu päätelmä pätee tietysti vain, jos hakkeen tiiviys (v) ei riipu kosteudesta.

Esimerkki 10: Metsän omistaja toimittaa lämpölaitokselle 50 i-m^3 kosteudeltaan a) 20 % b) 30 % ja c) 40 % mäntypuuhaketta. Paljonko kuormassa on energiaa? Puun kuiva-aineen lämpöarvo olkoon 18,68 MJ/kg ka. ja männyn kuiva-tuoretiheys 405 kg ka./ m^3 .

Kohdassa a) hake on erityisen kuivaa ja kosteus on alle puun rajakosteuden. Jos hakekuorman tiiviys on vakio 0,40, niin hakkeen lämpösisältö on kaavan (13) mukaan $q_{LAVA} = 856 \text{ kWh}/\text{i-m}^3$ eli 0,856 MWh/ i-m^3 . Näin ollen kuormassa on energiaa $50 \times 0,856 = 42,81$ MWh.

Kohdassa b) hakkeen kosteus on yli rajakosteuden, jolloin käytetään laskenta-kaavaa (14). Hakkeen lämpösisällöksi tulee 0,841 MWh/ i-m^3 ja kuorman energia-määräksi $50 \times 0,841 = 42,03$ MWh.

Kohdassa c) hakkeen kosteus on myös yli rajakosteuden, jolloin kaavan (14) mu-kaan kuorman lämpösisältö on sama kuin 30 % hakeella eli 0,841 MWh/ i-m^3 . Kuorman sisältämä energiamäärä on siten suuremmasta kosteudesta huolimatta ihan sama kuin b-kohdassa eli $50 \times 0,841 = 42,03$ MWh.



a) kosteus 20 % -> 50 i-m³:n kuormassa on energiaa 42,8 MWh.

b) kosteus 30 % -> 50 i-m³:n kuormassa on energiaa 42,0 MWh.

c) kosteus 40 % -> 50 i-m³:n kuormassa on energiaa 42,0 MWh.

Kun $x > 23$ %, niin kuorman energiasisältö ei enää riipu kosteudesta!

Kuva 2.9. Lämpölaitokselle tuodaan haketta. Mikä on kosteuden vaikutus hakkeen energiamäärään? Kuva: Martti Härkönen

Esimerkki 10 ja kuva 2.9 siis osoittavat, että kun hakkeen kosteus on yli PSK-rajan eli yli 23 %, niin hakkeen sisältämä energiamäärä irtokuutiometriä kohti ei riipu kosteudesta. Lämpölaitokset ja/tai energiaosuuskunnat eivät kuitenkaan maksa hakkeen toimittajille tällä periaatteella, vaan maksu tapahtuu standardikaavan mukaan lasketun niin sanotun saapumistilan energiasisällön mukaan (kaava 16).

2.11 Hakkeesta saatava todellinen lämpöenergia kattilassa (q_{KAT})

Kostean hakkeen todellinen energiasisältö (katsottuna hakkeen käyttäjän kannalta) on edellä saatua tulosta (q_{LAVA}) alhaisempi, koska poltettaessa hake ja siinä oleva vesi joudutaan lämmittämään alkulämpötilasta vertailulämpötilaan, hakkeessa mahdollisesti oleva jää sulattamaan, hakkeessa oleva vesi joudutaan "oikeasti irrottamaan" puusta ja höyrystämään ja kaikkeen tähän tarvitaan energiaa. Tarvittava energia otetaan hakkeessa olevan kuivan puuaineksen palaessa synnyttämästä lämmöstä.

Standardikaavasta johdettu tulos hakkeen lämpösisällölle (kWh/i-m^3) irtokuutiota kohti on

$$q_{STD} = \rho_{irto} [q_{alempi} (1 - X) - 0,68X] \quad (16)$$

Tämä tulos ei kuitenkaan ole riittävän tarkka ottamaan huomioon kaikkia palamiseen vaikuttavia tekijöitä, joten mittaustulosten analysointiin ja simulointilaskelmien tekemiseen joudutaan käyttämään tarkempia yhtälöitä.

Kosteasta hakkeesta saatava todellinen lämpöenergia kattilassa q_{KAT} saadaan kaavan (10) avulla (yksikössä kWh/i-m^3):

$$q_{KAT} = \rho_{irto} [q_{alempi} (1 - X) - q_{läm} - q_{des}] \quad (17)$$

joka voidaan saattaa muotoon

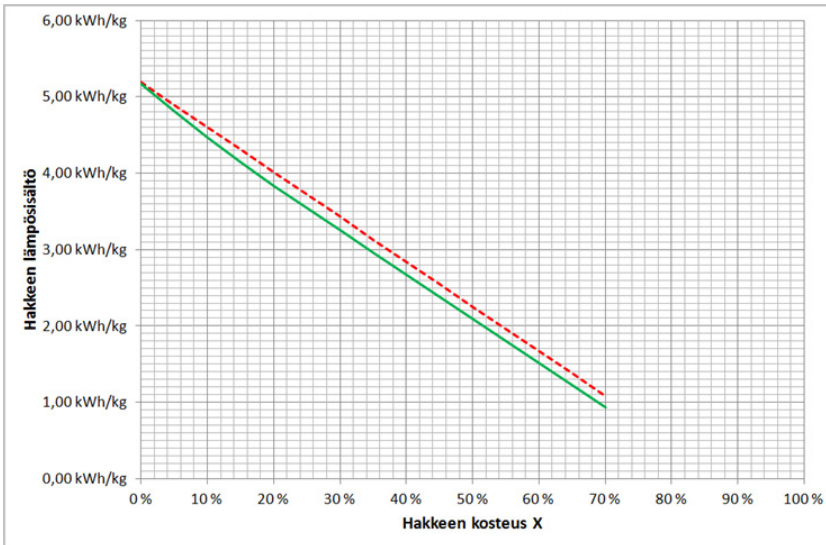
$$q_{KAT} = \rho_m v \left[q_{alempi} (1 - X) - \frac{c_{kok} (T_{vert} - T_0)}{3600} - \frac{\alpha (X - X_{PSK}) I_{sul}}{3600} - X \left[\frac{U - 0,3}{U} 0,68 + \frac{0,3}{U} 1,36 \right] \right] \quad (18)$$

jossa tulo $\rho_m v$ = kostean hakkeen irtotiheys (kg/i-m³), ρ_m = puuaineksen märkätiheys, v = tiiviys, X = hakkeen kosteus, q_{alempi} = puun alempi lämpöarvo yksikössä kWh/kg ka., c_{kok} = määrän puun tehollinen ominaislämpö yksikössä kJ/kgK, $T_{vert} = 25^\circ\text{C}$, T_0 = hakkeen alkulämpötila, $X_{PSK} = 0,23$, kerroin $\alpha = 1$, jos hakkeen alkulämpötila on alle 0°C ja samanaikaisesti X on suurempi kuin X_{PSK} , aina muutoin $\alpha = 0$, veden sulamislämpö $I_{sul} = 333$ kJ/kg ja U on hakkeen kosteutta X vastaava kosteussuhde eli $U = X/(1 - X)$.

Kaava (18) pätee, kun hakkeen alkukosteus on suurempi kuin 23 %. Mikäli alkukosteus on pienempi kuin 23 %, niin käytetään kaavaa:

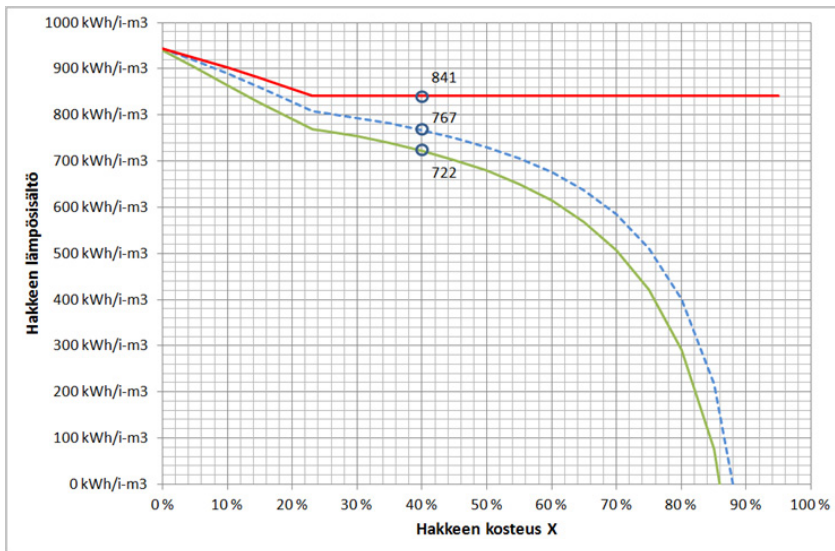
$$q_{KAT} = \rho_m v \left[q_{alempi} (1 - X) - \frac{c_{kok} (T_{vert} - T_0)}{3600} - X \left[2,036 - 4,524 \frac{U}{2} \right] \right] \quad (19)$$

Kehitetyt kaavat (18) ja (19) vastaavat siis standardikaavaa (16), mutta kuvaavat paremmin hakkeen palamisessa vapautuvaa todellista lämpöenergiaa ottaen huomioon muun muassa hakkeen alkulämpötilan ja siinä olevan veden mahdollisen jäässä olemisen sekä eron sidotun ja vapaan veden luonteissa. Kuvasta 2.10 nähdään, että tässä esitelty tarkempi laskentamalli antaa hieman alhaisempia arvoja hakkeen hyötylämpöarvolle (kWh/kg) verrattuna standardimallin antamiin tuloksiin. Hakkeen alkulämpötilan ollessa -15°C (talvi), on ero kosteusalueella 20–60 % keskimäärin noin -5,6 %. Jos lämpötila olisi $+15^\circ\text{C}$ (kesä), keskimääräinen ero pienenesi arvoon -4,1 %.



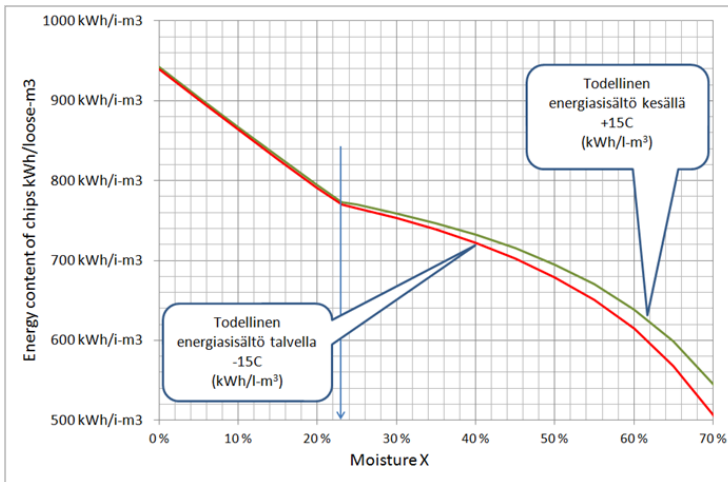
Kuva 2.10. Standardimallin (kaava 16) ja tarkemman mallin (kaavat 18 ja 19) vertailu. Ylempi katkoviiva edustaa standardimallia. Hakkeen alkulämpötila on -15°C . Kuiva-aineen alempi lämpöarvo on 18,68 MJ/kg ka. ja kyseessä on mäntypuuhake.

Kuvassa 2.11 on puolestaan vertailtu standardimallia ja tässä kehitettyä mallia käyttäen hakkeen energiasisällön yksikkönä kWh/i-m³. Lähtöarvot ovat samat kuin edellä. Edelleen kuvassa 2.12 on vertailtu hakkeesta saatavaa todellista energiaa kattilassa kesä- ja talviolosuhteissa. Kesällä hakkeen ollessa lämpimämpää (+15°C), on hyödyksi tuleva lämpöenergia noin 2–4 % suurempi kuin talvella (-15°C). Hakekuorman tiiviys vaikuttaa huomattavasti kuorman energiamäärään, kuten puolestaan kuvasta 2.13 nähdään. Yleensä tiiviytensä käytetään arvoa 0,40 m³/i-m³, mutta tämä on vain ”nyrkkisääntö” eikä läheskään aina vastaa todellisuutta. Kuvan mukaan esimerkiksi hyvin tiiviin kosteudeltaan 40 % hakekuorman (v = 0,46) energiasisältö on noin 28 % suurempi irtokuutiota kohti kuin löysän kuorman (v = 0,36).

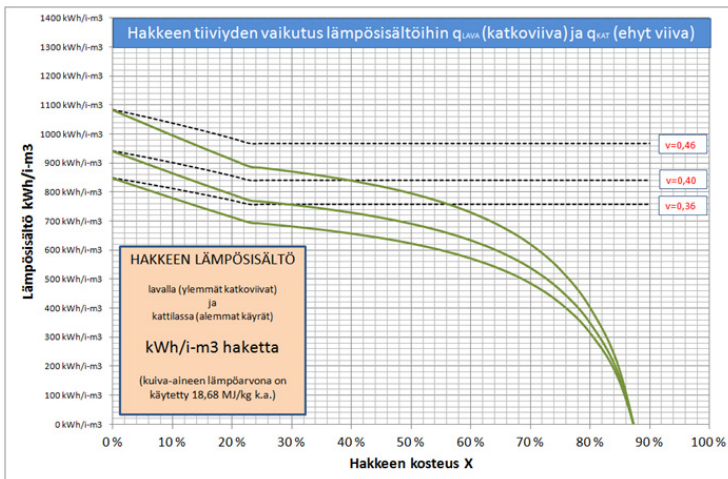


Kuva 2.11. Hakkeen lämpösisältö kosteuden funktiona yksikössä kWh/i-m³. Ylempi käyrä (katkoviiva) vastaa standardimallia. Hakkeen tiiviytensä on käytetty arvoa 0,40. Kaikkein ylin (punainen käyrä) kuvaa hakkeessa olevaa todellista kuivaaineen sisältämää energiamäärää (qalempi = 18,68 MJ/kg ka.).

Esimerkki 11: Isäntä tuo talvella +2°C lämpötilaista mäntyhaketta lämpölaitokselle 10 i-m³. Kosteus on 40 %. Lämpölaitoksella hake-erästä punnitaan 100 litran tynnyrillinen ja saadaan sen massaksi 27,0 kg. Paljonko kuormasta on saatavissa lämpöenergiaa? Hakkeen mitattu irtotiheys on 27/0,1 = 270 kg/i-m³ ja koko kuorman massa on siten 270*10 = 2700 kg. Hakkeen todellinen lämpöarvo on 40 % kosteudessa 2,71 kWh/kg haketta eli koko kuormassa on energiaa 2700 x 2,71 = 7317 kWh eli 7,32 MWh. Jos energiasisältö sen sijaan arvioitaisiin ilman koe-erän punnitsemista suoraan lavan tilavuuden perusteella, niin kuvan 2.13 mukaan energiasisältö on 40 % kosteudessa 680–860 kWh/i-m³ kasan tiiviyydestä riippuen eli koko kuormalle 6,80–8,60 MWh. Ongelma on siinä, että tiiviyyden silmämääräinen arviointi on jokseenkin mahdotonta.



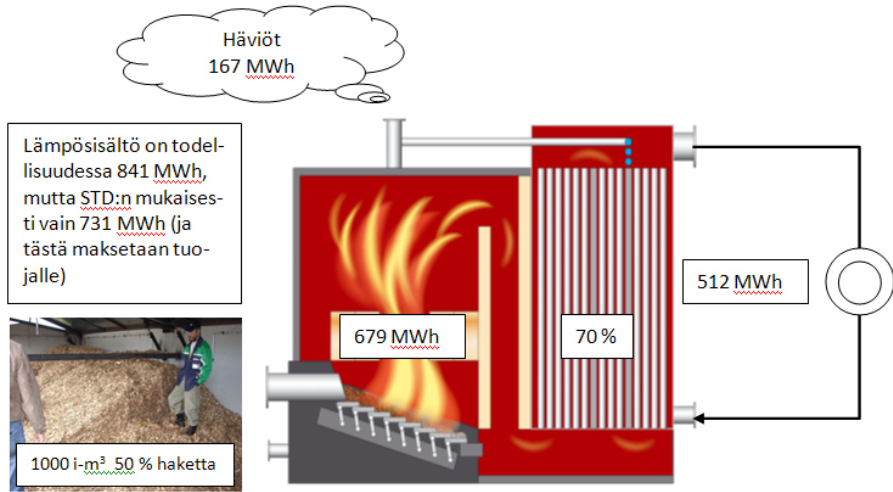
Kuva 2.12. Hakkeesta kattilassa saatava todellinen lämpöenergia erikseen kesällä (+15°C) ja talvella (-15°C).



Kuva 2.13. Hakkeen (+2°C) tiiviuden merkitys hakkeen energiasisältöön yksikössä (kWh/i-m³).

Esimerkki 12: Lämpölaitos polttaa a) 30 % ja b) 50 % mäntyhaketta 1000 i-m³. Hakkeen tiiviys olkoon 0,40 ja lämpötila -15°C. Hakkeesta maksetaan isännälle 15 €/MWh, mikäli kosteus on alle 35 %, muutoin 12 €/MWh. Tuotetusta lämmöstä saa-daan vastaavasti asiakkaalta 60 €/MWh. Kuivemmalle hakkeelle kattilan hyötysuhde on 0,90 ja märälle vain 0,70. Kuivemman hakkeen standardikaavan mukainen lämpöarvo on 793 kWh/i-m³ ja kosteamman 731 kWh/i-m³. Hakkeen todellinen arinalla saatava energiasisältö on kuivemmalla hakkeella noin 753 kWh/i-m³, kun taas märällä hakkeella vain 679 kWh/i-m³. Hakkeen kuiva-aineen lämpösisältö ennen kattilaa on molemmissa tapauksissa sama 841 kWh/i-m³. Hakkeesta maksetaan isännälle: a) $0,793 \cdot 1000 \cdot 15 = 11895$ € ja b) $0,731 \cdot 1000 \cdot 12 = 8772$ €. Hakkeesta saatava lämpöenergia myyntiin on

a) $0,793 \cdot 1000 \cdot 0,90 = 713,7 \text{ MWh}$ ja b) $0,731 \cdot 1000 \cdot 0,70 = 511,7 \text{ MWh}$ eli euroissa a) 42882 € ja b) 30702 € (ks. kuva 2.14).



Kuva 2.14. Esimerkki lämpölaitokselle hakkeena tuodun ja asiakkaalle lämpönä myydyin energiamäärän erosta. Ero kasvaa sitä suuremmaksi, mitä kosteampaa haketta poltetaan. Kuva: Martti Härkönen

3. HAKELÄMPÖLAITOKSELLA TEHTYJÄ MITTAUKSIA

3.1 Kälviän hakelämpölaitokset



Kuva 3.1. Kälviän kaksi 2,0 MW hakelämpölaitosta. Kuvat: Martti Härkönen

Kälviän energiaosuuskunnalla on vastuullaan kaksi likimain samanlaista hakelämpölaitosta, jotka molemmat ovat nimellisteholtaan 2,0 MW. Kattilat ovat Arimax Bio 2000-tyyppisiä mekaanisella liikkuvalla arinalla varustettuja kpa-kattiloita, joissa on märkä tuhkanpoistosysteemi. Märkä tuhkanpoisto tarkoittaa sitä, että kattilan koko pohjaosa on yhtä ja samaa vesiallasta, jonne palamaton polttoaine ja tuhka tippuvat. Samoin savukaasut pääsevät virtaamaan lämpöpinnoille altaan ohi, jolloin osa lentotuhkastakin jää altaaseen. Tuhkamassa poistetaan altaasta vesimäisenä lietteenä.



Kuva 3.2. Hakevarasto ja kattilahuoneessa oleva syöttökammio syöttöruuveineen. Kuvat: Martti Härkönen

Poltettavat energiapuut haketetaan metsässä lähellä puiden kaatamispaikkaa ja valmis hake tuodaan kattilahuoneen vieressä olevaan hakevarastoon, jonka lattialla olevat tankopurkaimet siirtävät hakkeen varaston sivulla olevalle isolle hakeruuville. Hakeruuvi puolestaan siirtää hakkeen varastosta kattilahuoneen puolelle syöttökammioon, josta varsinaiset syöttöruuvit (2 kpl) siirtävät haketta kattilan tulipesään arinan päälle poltettavaksi. Tarvittava palamisilma tuodaan tulipesään ensiö- ja toisioilmapuhaltimilla. Ensiöilmapuhallin syöttää ilmaa pääasiassa arinan alle ja toisioilmapuhallin arinan päälle varmistamaan haihtuvien aineiden hyvän palamisen. Puhaltimia ohjataan savukaasujen jäännöshappipitoisuudella. Poltettava hake on Kälviän energiaosuuskunnan jäsenten omien metsien harvennushakkuista saatavaa pääasiassa melko hyvälaatuista ranka- tai kokopuuhaketta. Hakkuutähteitä ei juurikaan käytetä. Kosteus ja irtotiheys mitataan joka kuormasta vaa’an ja uunin avulla. Kosteus on ollut noin 20–45%. Palaturvetta on kokeiltu hakkeen joukossa hyvin pieniä eriä.

Hakkeen kulutus on viime vuosina ollut molemmissa laitoksissa yhteensä noin 14000–15000 i-m³/a ja lämpöä on tuotettu noin 8000 MWh/a. Määrät riippuvat tietenkin talven keskilämpötilasta. Varalla ovat öljykattilat, joista toinen käyttää raskasta ja toinen kevyttä polttoöljyä. Öljyn kulutus on ollut muutamia kymmeniä tonneja vuodessa, käytön keskittyessä pääasiassa Kälviän vanhemmalle laitokselle (2003) johtuen sen suuremmasta lämpökuormasta. Uudempi lämpölaitos (2006) toimii enimmäkseen osatehoilla kattilaan kytketyn lämpökuorman pienuuden takia.

3.2 Lämpöenergian tuotanto- ja säätöprosessin kuvaus

Hake syötetään tulipesään syöttöruuveilla ja se palaa liikuteltavissa olevan mekaanisen arinan päällä. Ennen varsinaista palamisvyöhykettä on kuivausvyöhyke, jossa syötetty hake kuivuu ennen syttymistä. Palamisilmaa puhalletaan ensiö- ja toisioilmapuhaltimilla sekä arinan alle, että päälle. Muodostuvat kuumat savukaasut virtaavat tulipesän ympärille ja sen jälkeen sijoitettujen lämpöpintojen ohi ja lämmittävät pintojen sisällä virtaavan kaukolämpöveden (KL-veden) ulkoilman lämpötilasta riippuen keskimäärin noin 90–100°C lämpötilaan. Mikäli hakekattilan teho ei tähän riitä, niin KL-veden loppulämmitys hoidetaan varalla olevalla öljykattilalla. Kuuma KL-vesi pumpataan lopuksi lämmönkuluttajille eli asiakkaille, jonka jälkeen noin 50°C lämpötilaan jäähtynyt vesi palaa takaisin kattilaan aloittaen uuden kierroksen. Maahan kaivettua KL-putkistoa on vanhemmalla laitoksella useampi kilometri ja uudemmalla vajaa kilometri.

Palamisessa muodostuneet kuumat savukaasut virtaavat kattilan lämpöpintojen ohi ja samalla jäähtyvät luovuttaen lämpönsä KL-veteen. Savukaasujen poistumislämpötila on tyypillisesti noin 90–180°C riippuen muun muassa lämpöpintojen puhtaudesta ja kattilan kuormitusasteesta. Savukaasut muodostuvat pääasiassa palamisprosessiin käytetystä palamisilmasta, koska polttoaineen (hake) massavirta on tarvittavaan palamisilmamäärään nähden melko pieni (noin 5–15 %). Savukaasut koostuvat pääosin palamisilman mukana

tulleesta tyypestä ja jäännöshapesta sekä palamisessa muodostuneesta hiili-diksidista ja vesihöyrystä. Lisäksi joukossa on hieman häkää ja muita hiili-yhdisteitä sekä jonkin verran hyvin pieniä kiinteitä ja osin palamatta jääneitä partikkeleita.

Prosessin säätötapoja on yleisesti ottaen kattilatyypistä ja sen koosta riippuen tietenkin useita erilaisia, mutta säätö voisi tapahtua seuraavasti: Mikäli kaukolämpö-energian kulutus asiakkailta pienenee, se näkyy hakekattilalle palaavan KL-veden lämpötilan nousuna ja kun säätöä ei vielä ehdi tapahtua, niin tämän seurauksena myös kattilasta poistuvan KL-veden lämpötila nousee. Kun säätöjärjestelmä sitten huomaa kattilasta poistuvan KL-veden lämpötilan nousevan, se alkaa pienentää kattilaan syötettävää hakemäärää, jolloin polttoaineen massavirran pienentyessä palamisilmaa onkin yhtäkkiä liian paljon. Tämä puolestaan johtaa siihen, että jäännöshappipitoisuus savukaasuissa alkaa nousta, koska kaikkea happea ei nyt tarvittukaan palamiseen. Jäännöshappipitoisuuden nouseminen taas vaikuttaa palamisilmapuhaltimiin niin, että ne alkavat syöttää vähemmän ilmaa tulipesään, jolloin hapen määrä palamisilmassa ja samoin savukaasuissa pienenee. Näin tilanne vähitellen stabiloituu ja polttoainemäärä, samoin kuin palamisilmamäärä sekä KL-veden lähtölämpötila vastaavat taas asiakkaiden lämpökuormaa. Toinen säätötapa voisi olla se, että pidetään kuluttajille menevän KL-veden ja sieltä palaavan veden lämpötilat vakioina, jolloin kuormituksen muuttuessa säädetään KL-veden massavirtaa. Tai tietysti molemmat edellä kuvatut säätötavat voisivat toimia yhdessä.

Kattilan lämpöpintojen likaantuminen johtuu pääosin savukaasujen epäpuh-tauksista, jotka vähitellen kertyvät lämpöpinoille. Pinnalla olevan likakerroksen lämmönjohtavuus on hyvin alhainen, joten se lisää lämmönsiirtovastusta savukaasupuolella ja johtaa lämmönsiirtimen niin sanotun kokonaislämmön-läpäisykertoimen eli U-arvon pienentymiseen. Savukaasuista KL-veteen siirtyvä lämpöteho on $\phi = UA\Delta T$, jossa ΔT on keskimääräinen (logaritminen) lämpötilaero savukaasujen ja KL-veden välillä ja A on lämmönsiirtopinta-ala (vakio). Nyt kun likaantumisen takia tulo UA pienenee, niin samalla lämpötilaerolla ΔT ei enää siirrykään samaa lämpötehoa KL-veteen. Kattilan tuottama kaukolämpöteho alkaa siis laskea ja tätä kompensoidaan lisäämällä hakemäärää tulipesään, josta on seurauksena palamisilmamäärän ja savukaasumäärän kasvaminen ja lopulta myös savukaasujen loppulämpötilan nouseminen ja sitä kautta kattilan hyötysuhteen aleneminen. Lämpöpinnat kannattaakin tästä syystä nuohota riittävän usein.

3.3 Höytysuhde- ja päästömittaukset

3.3.1 Hyötysuhdemittaukset

Päästö- ja hyötysuhdemittauksia on tehty Kälviän vanhemmalla lämpölaitok-sella syksyn 2009 ja kevään 2011 välisenä aikana. Savukaasujen hiukkasmai-tauksista sekä tuhka- ja kuonamittauksista on päivastuussa ollut Uumajan

yliopiston ETPC-laitos. Ruotsalaiset partnerit ovat käyneet tekemässä mittauksia kolme kertaa (11/2009, 2/2010 ja 11/2010). Lisäksi CENTRIA on erikseen tehnyt hyötysuhdemittauksia (3/2010 ja 5/2011). Seuraavassa käsitellään esimerkkinä hyötysuhdemittaustapahtumaa 3/2010.

Mittauksessa käytettiin polttoaineena hyvälaatuista rankapuuhaketta, jonka koos-tumukseksi arvioitiin 2 % koivua ja 98 % mäntyä (Ko2Mä98). Hakkeen kosteuden mittaamista varten kerättiin muutamia hakenäyte-eriä ja kosteus mitattiin jälkikäteen laboratoriossa. Kosteudeksi saatiin $X = 26,8 \%$ eli hake-erä oli varsin kuivaa. Hake toimitettiin lämpölaitokselle traktorin lavalla (kuva 4.3). Hakkeen irtotiheys määritettiin punnitsemalla useampaan kertaan 100 litran hake-erä aina eri tavoin ravisteltuna. Irtotiheys vaihteli välillä 213–250 $\text{kg}/\text{i-m}^3$ ravistelusta riippuen. Laskelmissa käytettiin mitattua keskiarvoa 222 $\text{kg}/\text{i-m}^3$, mikä teoreettisen tarkastelun perusteella (ks. raportin osa 1) vastasi hakekuorman tiivyyttä $v = 0,40 \text{ m}^3/\text{i-m}^3$.

Puun alempana lämpöarvona käytettiin laskelmissa arvoa 18,68 MJ/kg ka., mikä vastaa kalorimetristä lämpöarvoa 20,00 MJ/kg ka. Hakekuution lämpösisältö oli standardikaavalla laskettuna noin 803 kWh/i-m³ tai massaa kohti laskettuna noin 803 kWh/i-m³/222 kg/i-m³ = 3,62 kWh/kg. Hakkeen alku-lämpötilaksi kattilahuoneessa mitattiin noin +2°C, joten hakkeen sisältämä vesi ei ollut jäässä. Haketta syötettiin varastohuoneessa isolle hakeruuville käsin lapioimalla ja poltettu haketilavuus arvioitiin mittaamalla traktorikuorman haketilavuus ennen mittausjaksoa ja sen jälkeen mahdollisimman tarkasti. Poltetuksi hakemääräksi kokeen aikana saatiin 3,9 i-m³, mikä vastasi mas-sana noin 866 kg. Mittausjakson pituus oli 116 min.



Kuva 3.3. Hakkeen toimitus traktorilla ja irtotiheyden mittaaminen. Kuva: Martti Härkönen

Kattilaan syötettävän palamisilman lämpötilaksi mitattiin läheltä puhaltimia +10°C ja suhteelliseksi kosteudeksi arvioitiin 70 % ulkolämpötilan ollessa keskimäärin -2°C (ilmanpaine 101,3 kPa). Kattilahuoneen keskilämpötila oli +10°C. Samanaikaisesti mitattiin myös savukaasujen eri kaasukomponenttien pitoisuuksia GASMET-kaasuanalyysatorilla. Mitattavat kaasut olivat muun muassa häkä (CO), hiilidioksidi (CO₂), rikkidioksidi (SO₂), noksit (NO_x), metaani (CH₄) ja vesihöyry (H₂O). Savukaasujen jäännöshappipitoisuutta ei tuolloin 3/2010 valitettavasti kyetty mittaamaan.

Standardikaavan mukaan laskettuna hakemäärän energiasisältö oli $3,9 \cdot 803 = 3131$ kWh ja polttoaineteho keskimäärin 1620 kW. Samanaikaisesti seurattiin koko ajan lämpölaitoksen energiamittareita ja mittausjakson aikana todettiin lämpöenergiaa toimitetun asiakkaille 2500 kWh. Tämän lisäksi on otettava huomioon, että hakekattilan tuottamasta lämpöenergiasta muutama prosentti käytettiin koko mittausjakson ajan erillisen raskasöljysäiliön ja öljykattilahuoneen lämmittämiseen. Tätä osuutta ei pystytty mitenkään mittaamaan ja laskelmissa onkin käytetty arviota, että tämä osuus olisi 4 % kattilaan syötetystä polttoaine-energiasta. Näin ollen kattila olisi tuottanut mittausjakson aikana lämpöenergiaa $2500 + 0,04 \cdot 3131 = 2625$ kWh.

Näillä arvoilla Kälviän hakekattilan mitatuksi hyötysuhteeksi tulee

$$\eta_{KAT} = \frac{2625}{3131} = 0,838$$

Saatu hyötysuhde noin 84 % on melko hyvä. Kattilan nimellisteho on 2000 kW, joten mittauksen aikana kattilan kuormitusaste oli $1620/2000 = 0,81$ eli 81 %.

Mittauksissa oli useita virhelähteitä, joista tärkeimmät olivat energiamittarin tarkkuus, hakkeen kosteuden mittaustarkkuus, irtotiheysmittauksen tarkkuus ja poltetun hakemäärän mittaustarkkuus. Energiamittarin virheeksi voidaan olettaa mittaritoimittajan ilmoittama $\pm 1,5$ %. Irtotiheys laskettiin lapioidulla 100 litran astiaan haketta ja mittaamalla hakemäärän massa. Jos tilavuus saatiin 2 litran tarkkuudella ja punnitustulos 0,2 kg tarkkuudella, niin irtotiheyden virheeksi tulee noin $\pm 2,9$ %. Poltettu hakemäärä saatiin mittaamalla kuorman haketilavuus ennen ja jälkeen mittausjakson. Jos arvioidaan, että kuorman pituus-, leveys- ja korkeusmittaukset tehtiin 0,5 cm tarkkuudella, niin haketilavuuden mittausvirheeksi tulee noin $\pm 2,8$ %. Kosteuden mittaus tapahtui laboratorio-olosuhteissa noin ± 2 % tarkkuudella (arvio). Kosteusmittauksen perusteella lasketaan standardikaavasta poltetun hakkeen lämpösisältö $Q_{STD} = V_{\rho_{irto}}[\rho_{alempi}(1-X) - 0,68X]$, jonka virheeksi tulee näin ollen $\pm 6,3$ %.

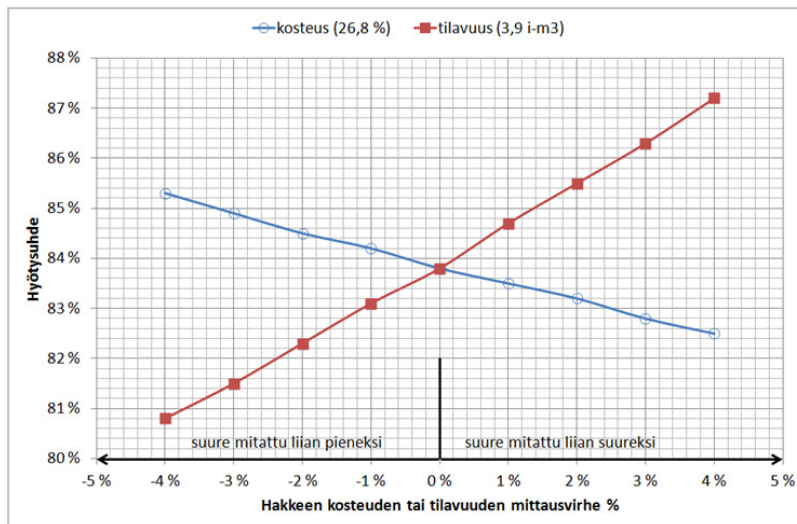
Mitatut laskenta-arvot virherajoineen olivat siis:

- a) kattilassa tuotettu kokonaislämpöenergia $Q_{KAT} = 2625 \pm 45$ kWh
- b) poltetun hakkeen tilavuus $V = 3,90 \pm 0,11$ i-m³
- c) hakkeen kosteus $X = 26,8 \pm 0,5$ %
- d) hakkeen irtotiheys $\rho_{irto} = 222 \pm 6$ kg/i-m³
- e) poltetun hakkeen standardilämpösisältö $Q_{STD} = 3131 \pm 197$ kWh

Kattilan hyötysuhde lasketaan kattilan tuottamasta kokonaislämpöenergiasta ja siihen tuodusta standardikaavalla lasketusta hakkeen sisältämästä lämpöenergiasta. Näihin tekijöihin taas vaikuttavat edellä mainitut virhelähteet. Hyötysuhteen suhteelliseksi kokonaisvirheeksi tulee edellä mainitut virhelähteet huomioon ottamalla noin 8,9 %. Näin ollen mitattu hyötysuhde olisi

virherajoiheen:

$$\eta_{KAT} = 83,8 \pm 7,5\%$$



Kuva 3.4. Herkkyysanalyysi hakkeen kosteuden ja poltetun haketilavuuden mittausvirheiden vaikutuksista mitattuun hyötysuhteeseen.

Virherajat ovat siis hyvin suuret ja tarkempia mittauksia olisi syytä tehdä. Kuvassa 3.4 on esitetty herkkyysanalyysi parille virhelähteelle. Kuvasta nähdään, että jos hakkeen kosteus olisi mitatun 26,8 % asemasta ollutkin todellisuudessa suurempi (eli mitattiin kosteus liian pieneksi), niin sen vaikutus hyötysuhteeseen olisi sitä lisäävä. Vastaavasti jos poltettu hakemäärä olisi todellisuudessa ollut mitattua arvoa 3,9 i-m³ pienempi, niin mitattu hyötysuhteen arvo olisi taas kasvanut. Haketilavuuden mittaustarkkuudella näyttää olevan kosteutta suurempi merkitys mitatun hyötysuhteen arvoon. Jatkomittauksissa tulisikin päästä kokonaan eroon hakemäärän tilavuuden arvioinnista ja pyrkiä mittaamaan suoraan poltetun hakkeen massa, jolloin kokonaisvirhe pienenesi huomattavasti.

3.3.2 Muut hyötysuhdemittaukset

Hyötysuhdemittauksia tehtiin myös 5/2011. Mittaukset tehtiin toukokuussa ulkolämpötilan ollessa noin 20–25°C, jolloin kattilan polttoaineteho jäi hyvin alhaiseksi ollen keskimäärin noin 306 kW eli vain 15 % nimellistehosta. Polttoaineesta pääosa oli tehty hakettamalla piensahalta saatuja mänty- ja kuusi-puiden sahauspintoja. Hakkeen kosteus oli 21,2 % eli hyvin alhainen. Poltettu hakemäärä mitattiin tällä kertaa suoraan punnitsemalla, jolloin päästiin eroon irtotilavuuden ja haketilavuuden mittausvirheistä. Lisäksi varalla olevan öljylämmityskattilan raskasöljysäiliön lämmitysvesipiiri suljettiin mittauksen ajaksi, jolloin energiamittarin lukema vastasi suoraan hakekattilan lämpöener-

gian tuottoa ilman epävarmaa korjauskerrointa. Kattilan hyötysuhteeksi saatiin virherajoinen $83,1 \pm 6,4$ %. Tulos on samaa suuruusluokkaa aikaisempaan mittaukseen verrattuna, jossa kattilan kuormitusaste oli selvästi suurempi (81 % vs. 15 %). Toisaalta poltettu hake oli kuivempaa (26,8 % vs. 21,2 %). Tässä mittauksessa palamisilmakerroin oli huomattavan suuri, ollen $\lambda = 3,30$. Tämä vastasi savukaasujen jäännöshappipitoisuutta 14,6 % kuivissa savukaasuissa. Suuri palamisilmakerroin johtui siitä, että kattilan säätöjärjestelmä ei kyennyt pudottamaan palamisilmamäärää pienemmäksi, vaan palamisilmapuhaltimia ajettiin koko mittauksen ajan säätöjärjestelmään asetetulla minimikierrosluvulla. Tästä oli toisaalta seurauksena alhaiset häviöt palamattomien kaasujen osalta sekä myös hyvin alhaiset häviöt palamattoman polttoaineen osalta.

	3/2010	5/2011
Haketyyppi	rankahake Ko2Mä98	sahauspintoja Ku50Mä50
Kosteus	26,8 %	21,2 %
Poltettu määrä	866 kg	415 kg
Tuotettu energia	2625 kWh	1400 kWh
Hake-energia (STD)	3131 kWh 803 kWh/i-m ³	1684 kWh 832 kWh/i-m ³
Kattilakuormitus	81 %	15 %
Hyötysuhde	83,8 %	83,1 %
Virherajat	$\pm 7,5$ %	$\pm 6,4$ %
Savukaasumäärä	2867 Nm ³ /h	1005 Nm ³ /h
Häkäpäästöt	1361 mg/Nm ³ 10% O ₂ dry	869 mg/Nm ³ 10% O ₂ dry
Polton ilmakerroin	1,58	3,30

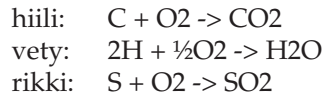
Taulukko 3.1. Hyötysuhdemittausten yhteenveto.

3.3.3 Savukaasuanalyysin periaate

Kattilassa muodostuvien savukaasujen koostumus ja määrä on laskettavissa teoreettisesti niin sanotun savukaasuanalyysin avulla. Tähän tarvitaan lähtötietoina käytetyn polttoaineen (eli tässä hakkeen) kosteus, tuhkapitoisuus, alkuainekoostumus ja poltettava määrä sekä tarvittavan palamisilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja määrä. Savukaasuanalyysin avulla voidaan lisäksi epäsuorasti laskea myös kattilan hyötysuhde. Tähän tarvitaan edellisten lisäksi lähtötiedoiksi vielä hakkeen alkulämpötila ja sen todellinen kosteuden ja alkulämpötilan huomioonottava hyötylämpöarvo. Näiden tietojen avulla voidaan laskea kattilaan hakkeen ja palamisilman mukana tuleva lämpöteho ja/tai -energia eli $\phi_{\text{sisään}} = \phi_{\text{KAT}} + \phi_{\text{p-ilmä}}$ (ks. kuva 3.5).

Savukaasuanalyysiin perustuva laskenta perustuu oletukseen hakkeen täydellisestä palamisesta, jolloin savukaasuihin muodostuu palamisilman hapen, typen ja vesihöyryn lisäksi teoreettisesti vain hiilidioksidia, rikkidioksidia ja

lisää vesihöyryä. Palamisreaktiot ovat:



Palamiseen tarvittava happi saadaan osittain polttoaineesta itsestään, mutta lisäksi tarvitaan palamisilmassa olevaa happea. Ilman koostumus on likimain 21 til-% happea, 79 til-% typpeä ja hiukan vesihöyryä sekä hyvin vähän muita alkuaineita. Palamisilmaa tarvitaan käytännössä aina enemmän, kuin mikä olisi teoreettinen minimitarve. Tämä ilmaistaan niin sanotulla ilmakertoimella λ , mikä siis käytännössä on aina suurempi kuin yksi. Menetelmän periaate selvinnee parhaiten esimerkiksi 13.

Käytännössä savukaasut sisältävät epätäydellisestä palamisesta johtuen aina jonkin verran myös palavia kaasukomponentteja, pääasiassa häkää (CO) ja lisäksi vähän erilaisia hiilivetyjä, joista mainittakoon muun muassa metaani (CH₄). Näiden komponenttien pitoisuuksia ei voi laskea savukaasuanalyysin perusteella, joten ne on erikseen mitattava. Häkääkaasun ja hiilivetyjen prosentuaalinen osuus savukaasuista on kuitenkin hyvin pieni. Esimerkiksi häkäpitoisuus on tyypillisesti vain noin 1000–3000 ppm eli 0,1–0,3 %. Metaanipitoisuus on noin 10–100 ppm eli 0,001–0,01 %. Näin ollen savukaasuanalyysi laskentamenetelmänä on edelleen syntyvien savukaasumäärien suhteen riittävän tarkka. Häkä- ja metaanikaasupitoisuudet savukaasuissa täytyy kuitenkin ottaa huomioon erillisinä häviöinä kattilan lämpötaseessa, koska näiden kaasujenhan olisi pitänyt palaa jo tulipesässä ja niiden lämpöarvot (häkä: 10,1 MJ/kg ja metaani: 51,4 MJ/kg) ovat hyvin suuria. Kattilan märästä tuhkanpoistomenetelmästä johtuen tuhka-altaasta haihtuu savukaasujen joukkoon lisäksi jonkin verran ylimääräistä vettä lisäten siten savukaasujen vesihöyrypitoisuutta teoreettiseen savukaasuanalyysiin verrattuna. Tuntemalla vielä lopuksi savukaasujen poistumislämpötila kattilasta, voidaan laskea savukaasujen mukana poistuva kokonaislämpöteho $\phi_{\text{savukaasu}}$ (sisältää myös häkä- ja metaanikaasun lämpöarvon).

Esimerkki 13: *Poltetaan 1 kg haketta, jonka kuiva-aineen alkuainekoostumus olkoon 51,0 % hiiltä, 6,0 % vetyä, 0,005 % rikkiä, 0,3 % typpeä ja 0,7 % tuhkaa sekä loput 41,995 % happea. Olkoon ilmakerroin $\lambda = 2,0$ ja hakkeen kosteus 40 %. Kun kosteus otetaan huomioon, on hakkeen koostumus (paino-%) seuraavanlainen: hiiltä 30,6 %, vetyä 3,6 %, rikkiä 0,0039%, typpeä 0,18 %, tuhkaa 0,42 %, happea 25,2 % ja vettä loput 40 %. Palamisilman lämpötila on 24°C ja suhteellinen kosteus 50 %. Palamisilman sisältämät typpi ja kosteus (vesi) siirtyvät sellaisenaan suoraan savukaasuihin. Laskelmat on käteväintä tehdä taulukkomuodossa:*

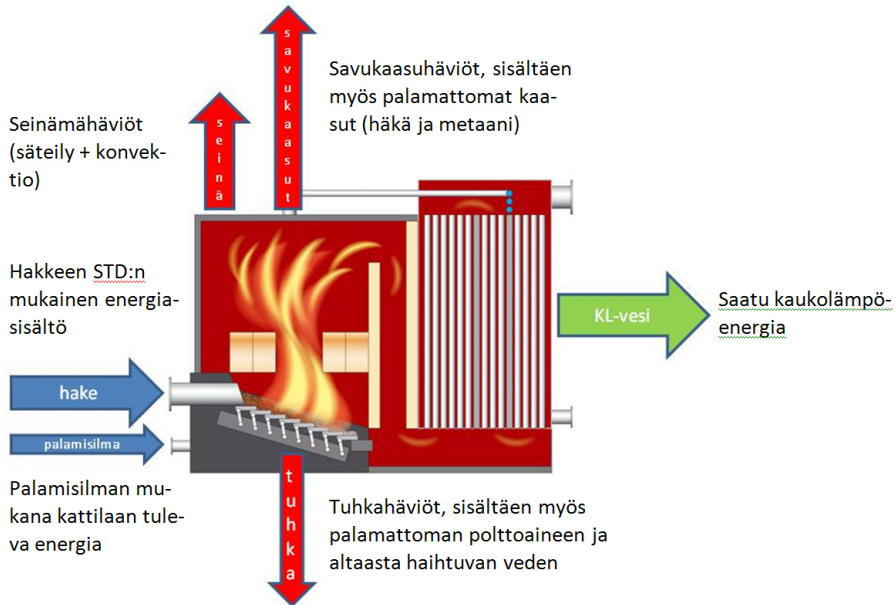
Polton ilmakerroin $\lambda =$		2,00							
Polttoaine		HAKE		Hapen tarve		Savukaasut (mol/kg pa.)			
Aine	M (g/mol)	g/kg pa.	mol/kg pa.	mol/kg pa.	CO2	N2	SO2	O2	H2O
Hiili	12,00	306,0	25,50	25,50	25,50				
Vety	2,00	36,0	18,00	9,00					18,00
Rikki	32,00	0,0	0,00	0,00			0,00		
Happi	32,00	252,0	7,87	-7,87					
Typpi	28,00	1,8	0,06			0,06			
Vesi	18,00	400,0	22,22						22,22
Tuhka		4,2							
Summa		1000,0	73,66	26,63	25,50	0,06	0,00	0,00	40,22
Typeä palamisilmasta						200,93			
Happea palamisilmasta								26,63	
Vettä palamisilmasta									3,84
Summa					25,50	200,99	0,00	26,63	44,07

Taulukosta nähdään, että 1000 g kosteaa haketta sisältää 306 g hiiltä, joka tarvitsee täydellisesti palaakseen 25,50 mol eli $25,50 \cdot 32 = 816$ g happea. Palamistuloksena on 25,50 mol eli $25,50 \cdot 44 = 1122$ g hiilidioksidia. Hakkeessa on 36 g vetyä, joka tarvitsee palaakseen 9,00 mol eli 288 g happea ja palamistuloksena on 18,00 mol eli 324 g vesihöyryä. Rikkiä on hakkeessa niin vähän, ettei se näy taulukossa lainkaan. Hakkeen sisältämä happi 252 g eli 7,87 mol käytetään palamiseen ja hakkeessa oleva kosteus eli vesi, jota on 400 g eli 22,22 mol, siirtyy sellaisenaan suoraan savukaasuihin. Lopputuloksena on, että 1000 g haketta vaatii täydellisesti palaakseen $25,50 + 9,00 = 34,50$ mol eli 1104 g happea. Polttoaineessa itsessään on happea 7,87 mol eli 252 g, joten lopun on tullava palamisilmasta. Palamisilman mukana kattilaan tulee kuitenkin myös tyypeä ja vesihöyryä, jotka siirtyvät suoraan savukaasuihin. Nyt käytettiin ilmakerrointa 2, joten ilmaa on 100 % enemmän kuin mitä olisi tarvittava teoreettinen minimimäärä. Savukaasuja syntyy lopulta 297,19 mol eli noin 8395 g ja niiden koostumus on: hiilidioksidia 8,6 %, tyypeä 67,6 %, rikkidioksidia 0,00032 %, jäännöshappea 9,0 % ja vesihöyryä 14,8 %. Palamisilmaa käytetään kaiken kaikkiaan noin 7381 g ilmakertomella $\lambda = 2$.

Kattilan seinämien kautta siirtyy myös lämpöä pois kattilasta. Tämä lämpöhäviö $\phi_{\text{seinä}}$ voidaan laskea kahdellakin tavalla. Tuntemalla kattilan ulkoseinien pintalämpötila ja pinta-ala, voidaan seinämähäviö arvioida lämmönsiirtoteknisin keinoin ottamalla huomioon sekä konvektiivinen, että säteilylämmönsiirto seinien pinnasta kattilahuoneeseen. Seinämähäviötä voidaan toisaalta arvioida myös palamisilmamäärän, kattilahuoneen sisälämpötilan ja ulkoilman lämpötilan perusteella. Kattilahuoneissa kun ei tyypillisesti ole muuta lämmitystä kuin kattilasta vuotava lämpö, jolloin kattilahuoneen sisälämpötila muodostuu tämän seinämälämpöhäviön perusteella. Seinämälämpöhäviö on tyypillisesti noin 1–2 % kattilan polttoainetehosta.

Kattilasta poistuu lämpöä myös tuhkan ja siinä olevan arinalla palamatta jääneen kiinteän aineksen mukana. Kälviän lämpölaitoksen kattilassa on märkä tuhkanpoistosysteemi, jolloin tuhka ja palamatta jäänyt aines (pääosin puuhiiltä) tippuvat joko arinan läpi tai sen loppupäästä vesialtaaseen. Hakkeen tuhkapitoisuus saadaan selville hakkeen alkuaineanalyysin perusteella, mutta poistuvan lietemäisen tuhkamassan seassa olevan palamatta jääneen aineksen osuus täytyy selvittää mittaamalla. Palamatta jääneen aineksen osuus riippuu muun muassa kattilan kuormituksesta ja palamisilmakertoimesta ja on suuruusluokkaa 20–200 % varsinaisen tuhkan määrästä. Lämpöhäviö ϕ_{tuhka}

koostuu siis paitsi kuumen tuhkamassan mukana poistuvasta lämmöstä, niin myös palamatta jääneen polttoaineen lämpöarvosta (puuhiili: 32,8 MJ/kg). Lisäksi tuhkamassan mukana poistuu altaasta jonkin verran vettä, jota täytyy näin ollen vastaavasti lisätä ulkopuolelta. Altaasta haihtuu myös hieman vettä savukaasuihin. Tähän haihtumiseen tarvittava lämpöenergia otetaan savukaasuista, joten se on laskettava myös häviötehoksi.



Kuva 3.5. Hakekattilan lämpötase.

Loput hakkeen palamisessa muodostuneesta lämpötehosta siirtyykin sitten kaukolämpöveeteen, joten kattilan kehittämäksi KL-tehoksi tulee

$$\Phi_{KL} = \Phi_{sisään} - \Phi_{seinä} - \Phi_{tuhka} - \Phi_{savukaasu} \quad (20)$$

jossa $\phi_{sisään} = \phi_{KAT} + \phi_{p-ilm}$ ja ϕ_{KAT} on arinalla vapautunut todellinen teho (pienempi kuin standardikaavalla laskettu polttoainetehto ϕ_{STD}). Kattilan hyötysuhde voidaan lopuksi laskea kaavalla

$$\eta_{KAT} = \frac{\Phi_{KL}}{\Phi_{STD}} \quad (21)$$

jossa ϕ_{KL} = kaukolämpöteho ja ϕ_{STD} = standardikaavan mukainen polttoaineteho.

3.3.4 Savukaasuanalyysiin perustuvan mallin tuloksia

Mittauksissa 3/2010 käytetyn hakkeen alkuaineanalyysi on tehty Uumajan

yliopiston ETPC-laitoksella ja on esitetty osana kuvaa 3.7. Vedettömän eli täysin kuivan hakkeen hiilipitoisuus oli 50,9 %, vetypitoisuus 6,2 %, typpipitoisuus 0,2 %, rikkipitoisuus alle 0,010 %, tuhkapitoisuus 0,7 % ja loput happea eli 42,0 %. Hakkeen alkukosteus oli 26,8 %. Savukaasujen poistumislämpötila pysytteli lähes koko mittausjakson ajan vakiona ollen keskimäärin noin 122°C. Kattilan seinämien pintalämpötilaksi mitattiin noin 43°C, jolloin seinämien lämpöhäviöksi tulee konvektio ja säteily huomioon ottaen noin 20 kW vastaten noin 1,2 % polttoainetehosta.

Näyte-erä	Tuhkapitoisuus näytteessä	Palamattomien määrä tuhkanäytteessä (kg / kg tuhkaa)
1	32,0 %	2,13 kg / kg tuhkaa
2	29,6 %	2,38 kg / kg tuhkaa
3	31,4 %	2,18 kg / kg tuhkaa
4	43,7 %	1,29 kg / kg tuhkaa
5	32,6 %	2,07 kg / kg tuhkaa
	Keskiarvo:	2,01 kg / kg tuhkaa

Taulukko 3.2 Tuhka-analyysi palamattomien mittaamiseksi (3/2010)

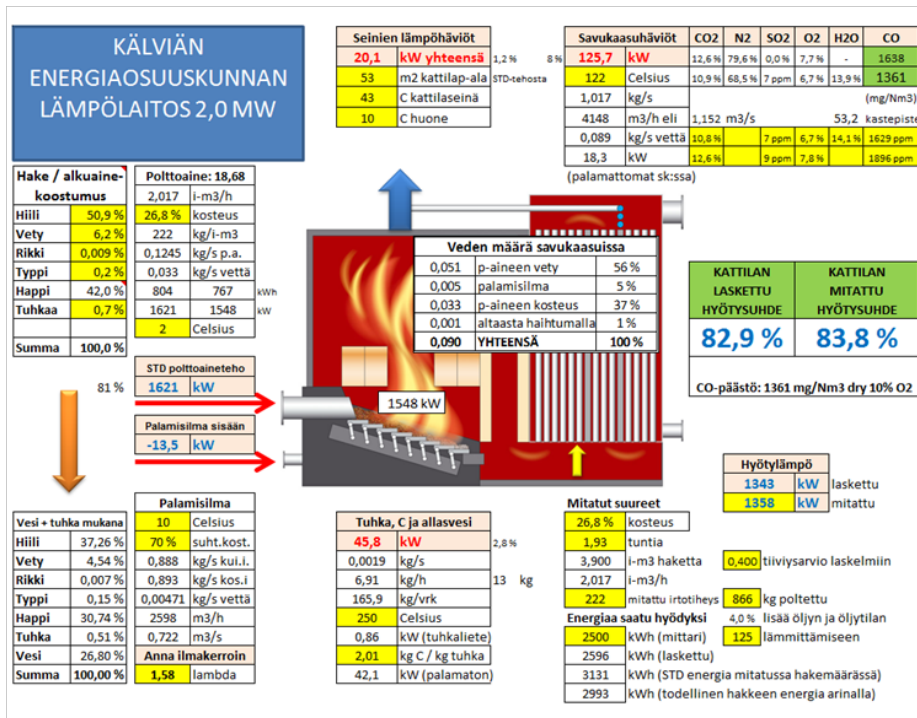


Kuva 3.6. Tuhkanäytteessä olevan kuiva-aineen analysointia laboratoriossa. Kuvat: Anu-Sisko Perttunen

Tuhkanäytteen sisältämä palava aines oli laboratoriomittausten mukaan keskimäärin 201 % tuhkan määrästä. Hehkutusjännös mitattiin kuivaamalla tuhka-altaan kuljettimelta otettu märkä näyte ensin 105°C lämpötilassa vedettömäksi ja sen jälkeen kuumentamalla jäännöstä 550°C:seen lämpötilaa vähitellen nostamalla. Saatu tulos tarkoittaa siis sitä, että altaan kuljettimelta kerätty ”tuhkanäyte” sisälsi palavia aineita 2,01 kertaa niin paljon kuin varsinaista palamatonta tuhkaa (Taulukko 3.2).

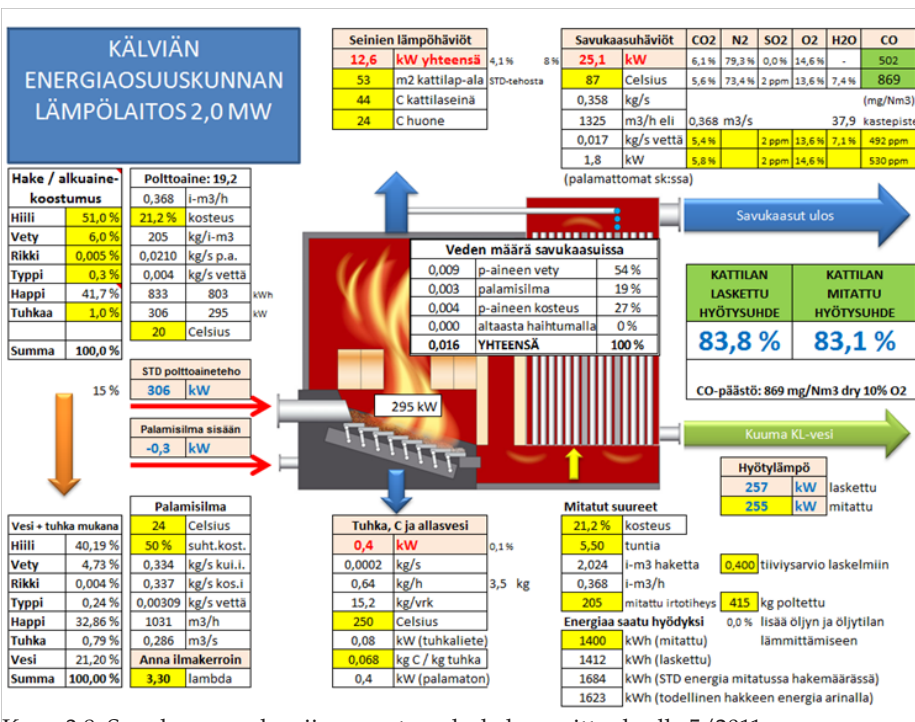
Kuvassa 3.7 on esitetty savukaasuanalyysiin perustuvan Excel-simulointimallin avulla tehty epäsuora hyötysuhdelaskelma mittaustapahtumalle 3/2010. Palamisen ilmakerroin on arvioitu jäännöshappimittauksen puuttuessa niin, että mitattu ja laskettu kosteiden savukaasujen hiilidioksidipitoisuus täsmää-

vät. Kuvassa 3.8 on puolestaan savukaasuanalyysiin perustuva laskelma mitustapahtumalle 5/2011.



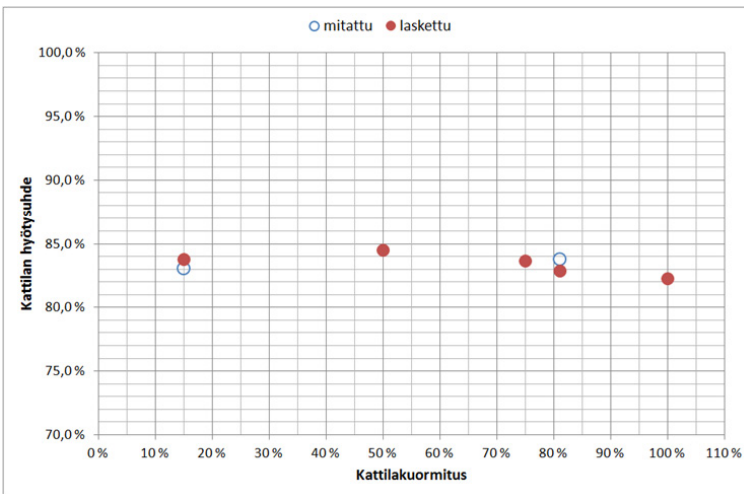
Kuva 3.7. Savukaasuanalyysiin perustuva laskelma mittaukselle 3/2010.

Laskettu ja mitattu hyötysuhde ovat melko lähellä toisiaan ja ero mahtuu selvästi suoran hyötysuhdemittauksen virherajojen piiriin. Mielenkiintoisena yksityiskohtana on savukaasuissa olevan vesihöyryn alkuperä. Yli puolet eli 56 % savukaasujen sisältämästä vesihöyrystä on peräisin hakkeen sisältämästä vedystä ja vain vähän reilu kolmannes itse hakkeesta. Ilmakerroin $\lambda = 1,58$ vastasi jäännöshappipitoisuutta 7,7 % kuivissa savukaasuissa. Myös toisen mittauksen tulokset vastasivat kuvan 3.8 perusteella hyvin toisiaan. Toisen mittauksen erikoisuutena oli hyvin suuri ilmakerroin $\lambda = 3,30$, mikä johtui erittäin pienestä kattilan lämpökuormasta. Palamisilmapuhaltimet oli säädetty niin, etteivät ne kyenneet antamaan pienempää palamisilmamäärää. Suuri palamisilmamäärä pienensi savukaasujen häkäpäästöjä, samoin palamattoman hiilen osuus tuhkalietteessä oli hyvin alhainen.

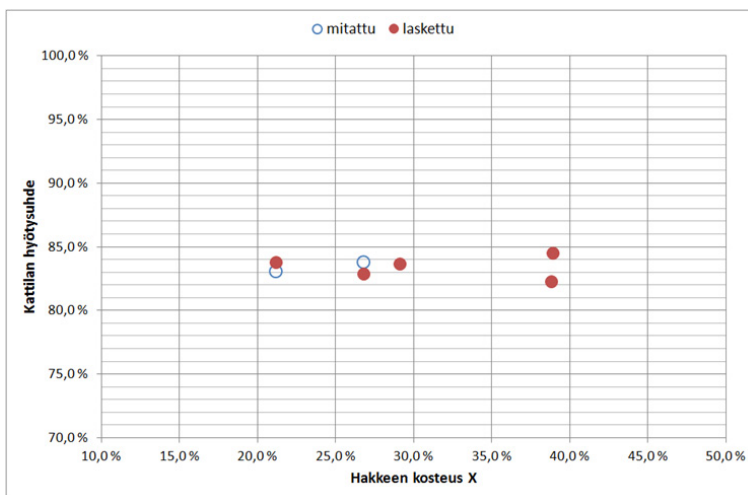


Kuva 3.8. Savukaasuanalyysiin perustuva laskelma mittaukselle 5/2011.

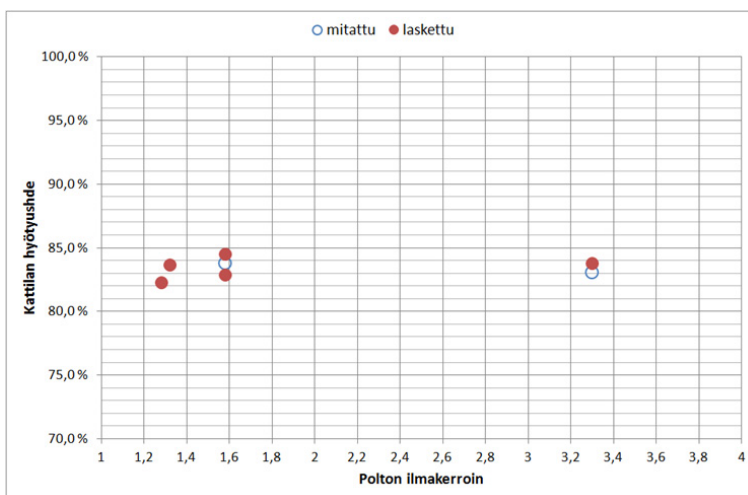
Kuvissa 3.9 - 3.11 on esitetty kaikkien viiden mittaustapahtuman tulokset. Suoria hyötysuhdemittauksia tehtiin vain 3/2010 ja 5/2011. Loppujen kolmen mittaustapahtuman osalta hyötysuhde on laskettu epäsuorasti savukaasuanalyysiin perustuvan mallin avulla. Tuloksista nähdään, että hyötysuhde oli kaikissa mittauksissa välillä noin 82 – 84 %. On kuitenkin huomattava, että tuloksia ei välttämättä voi verrata toisiinsa, koska jokaisessa mittaustapahtumassa hakkeen kosteus oli erilainen, samoin palamisilmakerroin ja kattilakuorma vaihtelivat.



Kuva 3.9. Kälviän kattilan hyötysuhde kattilakuorman funktiona.



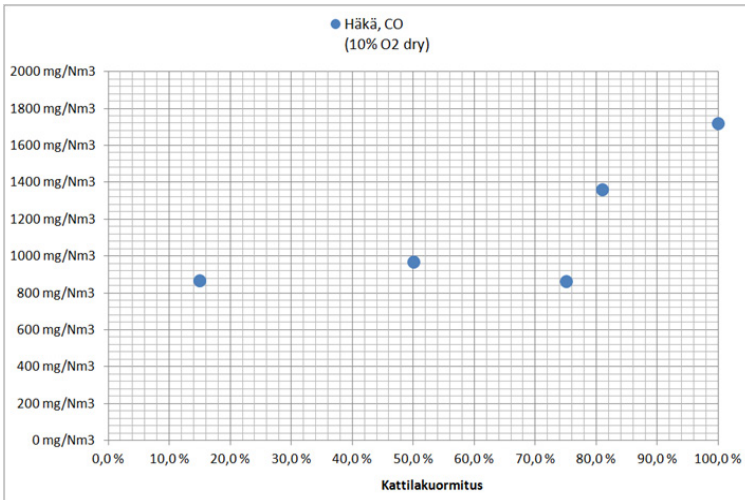
Kuva 3.10. Kälviän kattilan hyötysuhde hakkeen kosteuden funktiona.



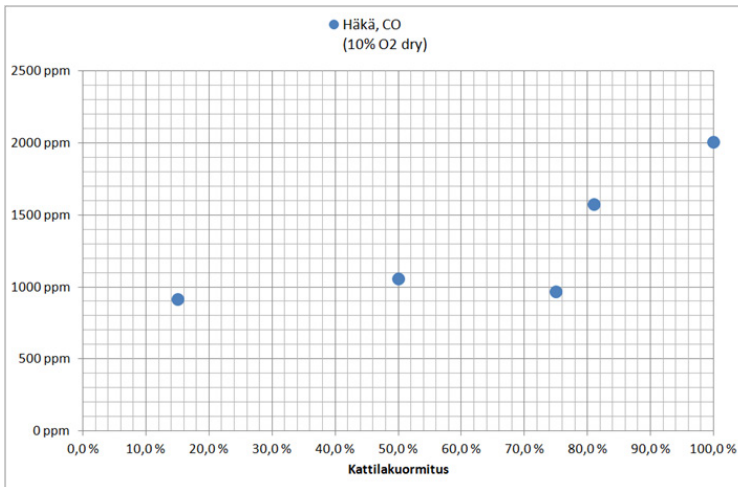
Kuva 3.11. Kälviän kattilan hyötysuhde ilmakertoimen funktiona.

3.3.5 Savukaasujen kaasumaiset päästöt

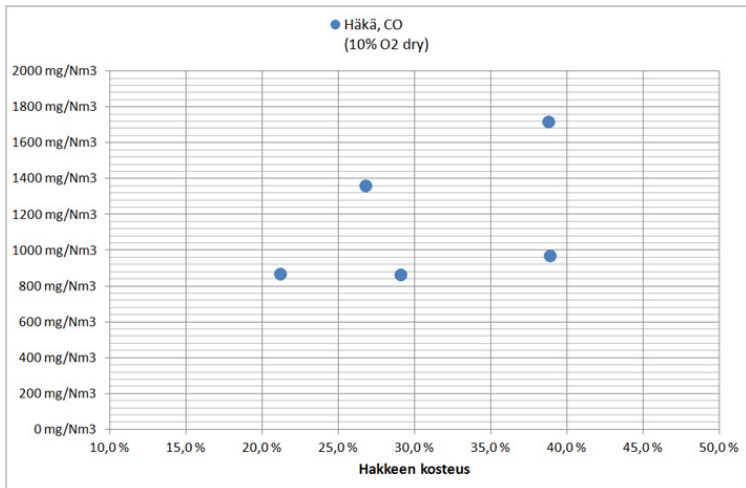
Savukaasuissa olevat kaasumaiset päästöt mitattiin GASMET-kaasuanalyysaattorin avulla. Tärkeimpiä palavia kaasukomponentteja olivat lähinnä vain häkä (CO) ja metaani (CH₄). Tulokset on esitetty kuvissa 3.12 – 3.15 normeerattuna 10 % jäännöshappipitoisuuteen kuivissa savukaasuissa. Kosteiden savukaasujen häikäpitoisuus vaihteli noin välillä 1000–2000 ppm. Rikinoksideja tai rikkivetyä ei savukaasuissa juurikaan ollut. Pitoisuudet olivat tyypillisesti luokkaa 2–8 ppm. Tämä johtui tietenkin polttoaineena käytetyn puun erittäin alhaisesta rikkipitoisuudesta. Muista palavista kaasuista metaanipitoisuus oli noin 10–100 ppm. Typen oksidien (NO_x) yhteismäärä oli selvästi alle 100 ppm. Tuloksia on annettu myös yksikössä mg/Nm³.



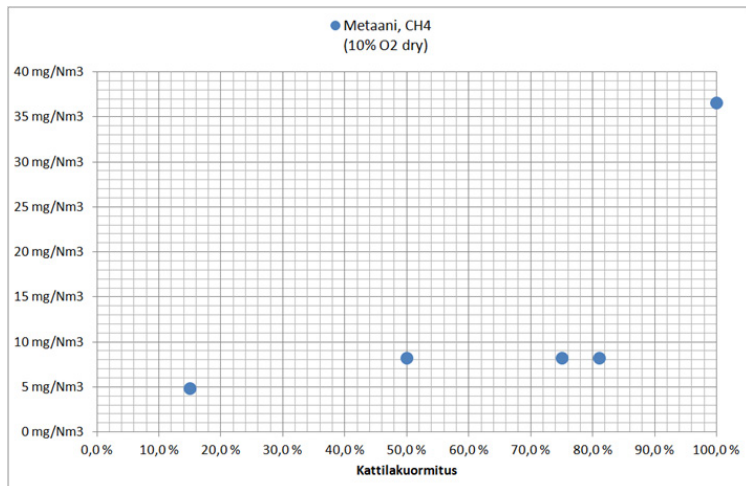
Kuva 3.12. Savukaasujen häkäpitoisuus kattilakuorman funktiona yksikössä mg/Nm³ (normeerattu 10 % O₂-pitoisuuteen kuivissa savukaasuissa).



Kuva 3.13. Savukaasujen häkäpitoisuus kattilakuorman funktiona yksikössä ppm (normeerattu 10 % O₂-pitoisuuteen kuivissa savukaasuissa).



Kuva 3.14. Savukaasujen häikäipitoisuus hakkeen kosteuden funktiona yksikössä mg/Nm³ (normeerattu 10 % O₂-pitoisuuteen kuivissa savukaasuissa).



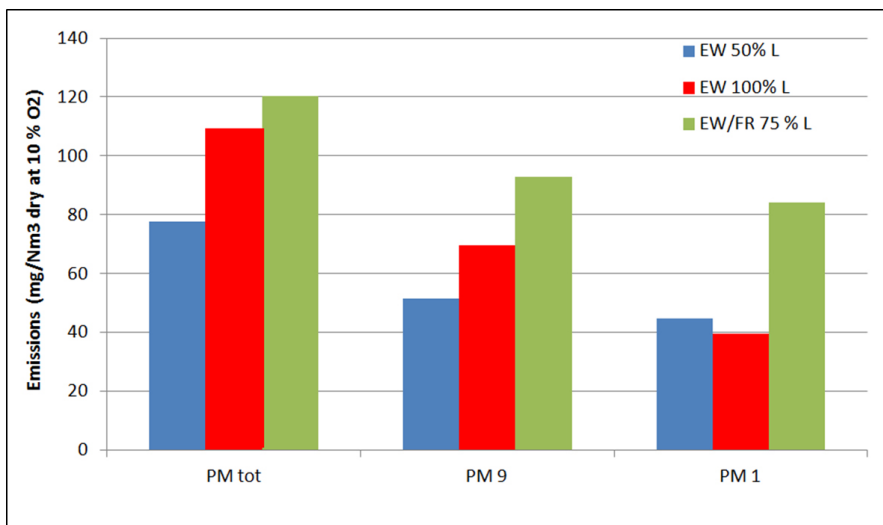
Kuva 3.15. Savukaasujen metaanipitoisuus kattilakuorman funktiona yksikössä mg/Nm³ (normeerattu 10 % O₂-pitoisuuteen kuivissa savukaasuissa).

3.3.6 Savukaasujen hiukkaspäästöt

Savukaasujen hiukkaspäästöjä mitattiin mittauskampanjoissa 11/2009, 2/2010 ja 11/2010 ruotsalaisten partnerien toimesta (UmU/ETPC). Haketyypit ja kosteudet sekä kattilakuormat on annettu taulukossa 3.3 ja tulokset kuvassa 3.16.

Mittauskampanja	Haketyyppi	Kosteus	Kattilakuorma
11/2009	Energiapuu 100%	38,9 %	50 %
02/2010	Energiapuu 100%	38,8 %	100 %
11/2010	Energiapuu 50% Hakkuutähte 50%	29,1 %	75 %

Taulukko 3.3. Hiukkaspäästöissä ja tuhka-analyyseissä käytettyjen hakkeiden ominaisuuksia.



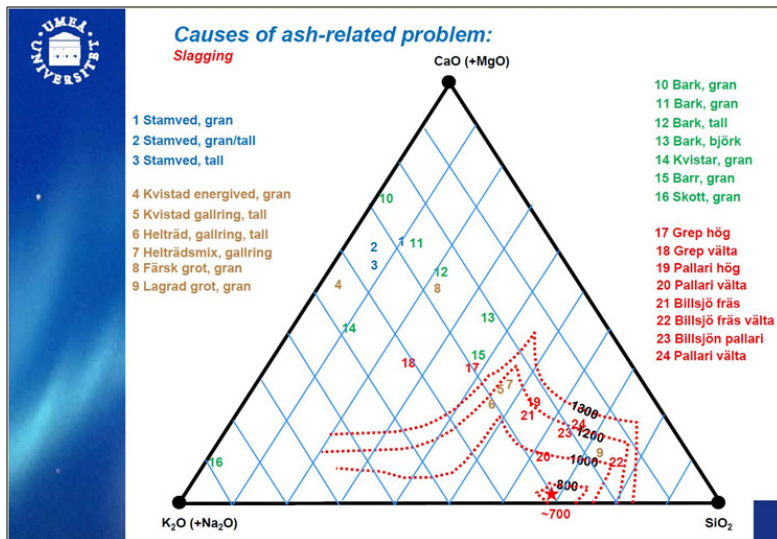
Kuva 3.16. Savukaasujen hiukkaspäästöt normeerattuna 10 % jäännöshappipitoisuuteen. Kuva: Jonathan Fagerström, Umeå

Kuvassa 3.16 esiintyvä termi PMtot tarkoittaa kokonaishiukkaspäästöjä, termi PM1 tarkoittaa hiukkasia, joiden tehollinen halkaisija on alle 1 mikrometrin ja PM9 vastaavasti alle 9 mikrometriä. Kuvan perusteella hiukkaspäästöjä esiintyy sitä enemmän, mitä suurempi on kattilakuorma. Samoin hiukkaspäästöt lisääntyvät poltettaessa hakkuutähteitä. Edelleen kuvasta nähdään, että iso osa hiukkasista on luokkaan PM1 kuuluvia erittäin pieniä hiukkasia, joiden poistaminen savukaasuista on hankalaa. Kokonaishiukkaspäästöt ovat luokkaa 80–120 mg/Nm³.

Hiukkaspäästöille ei toistaiseksi ole tässä kattilakokoluokassa minkäänlaisia rajoituksia. Tulevaisuudessa asia voi kuitenkin olla toisin. EU-tasolla on esitetty otettavaksi käyttöön Saksan normit, joiden mukaan hiukkaspäästöjen tulisi olla vuonna 2015 tasolla 30 mg/Nm³. Tähän verrattuna Kälviän hakeämpölaitoksen hiukkaspäästöt ovat liian suuret. Tarkempi analyysi hiukkaspäästöistä löytyy Forest Power-hankkeen nettisivuilta osoitteesta (ks. Jonathan Fagerströmin englanninkielinen esitelmä) http://www.forestpower.net/sivu.aspx?page_id=921&luokka_id=221&main=2

3.3.7 Tuhkamittaukset ja -analyysi

Kälviän hakkeen tuhkaa muodostavien alkuaineiden analyysi sekä tuhka- ja kuonanäytteiden analysointi on tehty Uumajan Yliopiston ETPC-laitoksella. Tulokset on esitetty kuvassa 3.17 erityisen ”tuhkakolmion” avulla. Tarkempi selostus tuhkakolmion käytöstä ja sen muodostamisperiaatteista löytyy Forest Power-hankkeen nettisivuilta osoitteesta (ks. Dan Boströmin englanninkielinen esitelmä) http://www.forestpower.net/sivu.aspx?page_id=921&luokka_id=221&main=2



Kuva 3.17. Tuhkan sulamiskäyttäytymistä kuvaava kolmio. Kuva: Dan Boström, Umeå. Kuvassa olevat kirjaimet A, B ja C kuvaavat Kälviän hakkeen sijoittumista kolmioon.

Kuvaan 3.17 on piirretty jälkikäteen soikio kuvaamaan sitä aluetta, johon poltettava hake sen tuhkaa muodostavien aineiden perusteella ei saisi sijoittua. Soikion sisällä vallitsevat sellaiset olosuhteet (tuhkan koostumus ja tulipesän lämpötila), että hakkeen palamisessa muodostunut tuhka sulaa osittain tai jopa kokonaan. Sulamisesta on seurauksena arinan tukkeutuminen ja kattilan lämpöpintojen kuonaantuminen. Arinan tukkeutuminen estää muodostuneen tuhkan poistumisen uuden poltettavan hake-erän tieltä ja lämpöpintojen likaantuminen puolestaan alentaa kattilasta KL-veteen siirtyvää lämpötehoa, nostaten savukaasujen loppulämpötilaa ja alentaen siten kattilan hyötysuhdetta.

Kuvan 3.17 perusteella Kälviällä poltetut hakkeet (pisteet A, B ja C) sijoittuvat melko kauas ”kielleyttä” alueesta, joten voidaan päätellä hakkeen palamisesta muodostuvan tuhkan sulamiskäyttäytymisen olevan kohtuullisen hyvä. Kovin suurta vaaraa tuhkan kokonaan sulamiseen ei siis pitäisi olla, joskin osittaista sulamista saattaa esiintyä aiheuttaen kattilan lämpöpintojen suhteellisen nopeaa likaantumista. Kuvan numeroidut pisteet 1–24 edustavat UmU/ETPC-laitoksen muiden hankkeiden yhteydessä tekemiä vertailumittauksia erilaisilla hakkeilla.

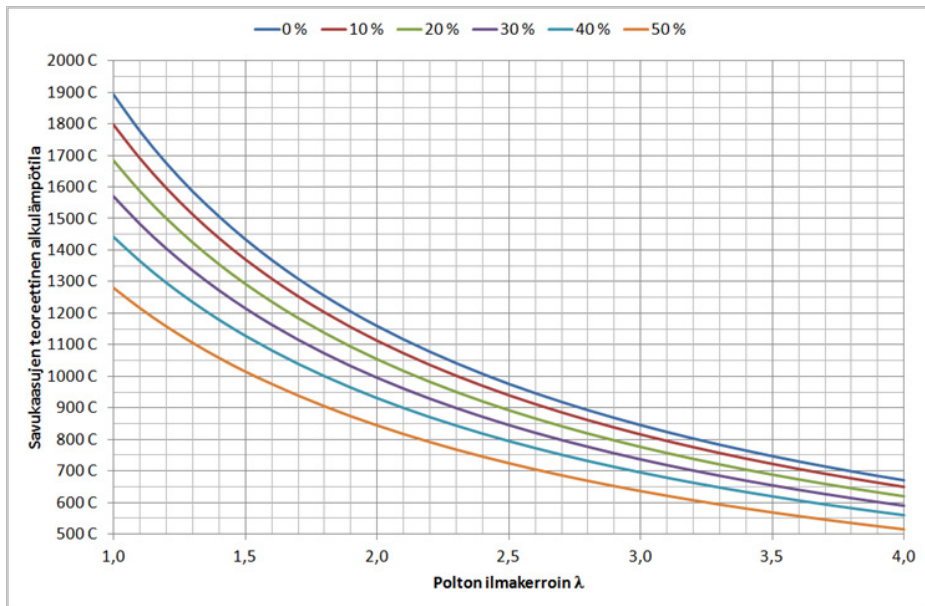
4. KÄLVIÄN HAKEKATTILAN SIMULOINTIMALLI

4.1 Savukaasujen teoreettinen alkulämpötila

Polttoaineen palamisen yhteydessä tulipesään muodostuvien savukaasujen teoreettista alkulämpötilaa voidaan arvioida niin sanotun adiabaattisen palamislämpötilan avulla. Adiabaattinen palamislämpötila tarkoittaa palamisessa syntyvien savukaasujen teoreettista maksimilämpötilaa välittömästi palamistapahtuman jälkeen, kun mitään häviöitä ei ole vielä ehtinyt tapahtua. Tämä lämpötila voidaan laskea, kun tunnetaan polttoaineen lämpöarvo, polttoaineen ja palamisilman massavirratt sekä muodostuvien savukaasujen määrä ja koostumus. Pienellä kattilakuormituksella (kattilakuormitus = polttoaineteho per kattilan nimellisteho) käytetään usein selvästi suurempaa palamisilmakehitystä kuin isolla kuormituksella. Myös hakkeen kosteuden lisääntyessä palamisilmamäärää usein lisätään. Nämä toimenpiteet alentavat tulipesässä muodostuvien savukaasujen alkulämpötilaa ja siten vaikuttavat kattilan tuottamaan lämpötehoon ja hyötysuhteeseen.

Savukaasujen teoreettinen alkulämpötila ennen KL-veden lämmityskanaviin virtaamista on hieman adiabaattista palamislämpötilaa alhaisempi, koska nyt täytyy ottaa huomioon kattilan seinämähäviöt kattilahuoneeseen sekä hakkeen puuaineksen palamatta jäänyt osuus. Esimerkkinä (kuva 4.1) on laskettu palamisilmakerroimen vaikutus savukaasujen teoreettiseen alkulämpötilaan hakkeen kosteuden ollessa parametrina. Hakkeen kuiva-aineen alempana lämpöarvona on esimerkkilaskelmassa käytetty arvoa 18,68 MJ/kg, hakkeen ja kattilahuoneen sekä palamisilman lämpötilana 15°C ja palamisilman suhteellisenä kosteutena 60 %. Poltettava hakemäärä on vakio 1,0 i-m³/h ja siinä on 2 % koivua ja 98 % mäntyä (rankapuuta).

Kuvasta 4.1 nähdään, että poltettaessa täysin kuivaa esimerkkihaketta ilmakerroimella $\lambda = 1$, olisi muodostuvien savukaasujen teoreettinen alkulämpötila lähes 1900°C. Todellisuudessa ilmakerroin on hakekattiloissa kattilakuormituksesta ja hakkeen kosteudesta riippuen suuruusluokkaa $\lambda = 1,3\text{--}3,5$ ja hakkeen kosteus $X = 20\text{--}40\%$. Hyvin suurilla kattilakuormituksilla palamisilmakerroin on tyypillisesti pieni ollen suuruusluokkaa 1,2–1,8. Tällöin savukaasujen teoreettinen alkulämpötila on hakkeen kosteudesta riippuen 1000–1400°C. Hyvin pienillä kattilakuormituksilla, esimerkiksi kesäisin, palamisilmakerroin on säätöjärjestelmän asetuksista johtuen tyypillisesti hyvin suuri ollen jopa suuruusluokkaa 2,5–3,5. Tällöin savukaasujen alkulämpötila jää melko matalaksi, tyypillisesti välille 600–900°C. Näin laskettua savukaasujen teoreettista lämpötilaa voidaan käyttää simuloinneissa kuvaamaan syntyvien savukaasujen alkulämpötilaa, ennen kuin ne alkavat luovuttaa lämpöään kattilan lämpöpinnoille jähdyttävälle KL-vedelle.

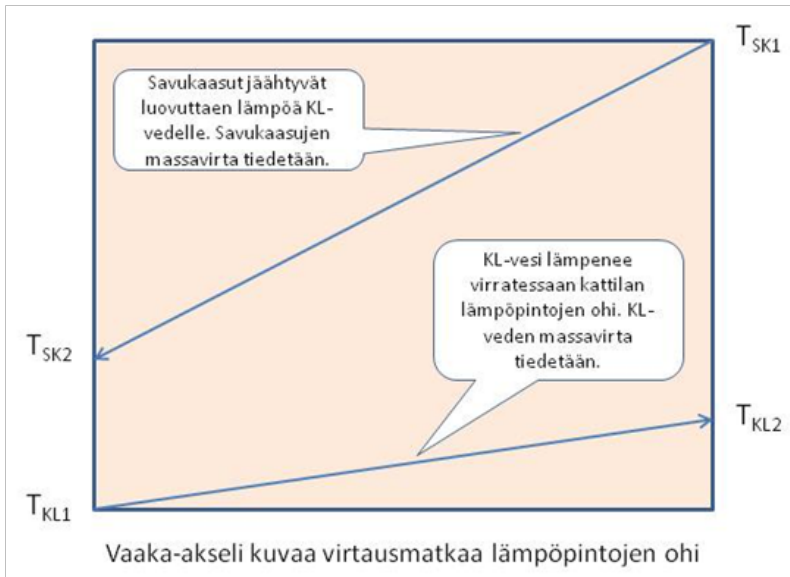


Kuva 4.1. Savukaasujen teoreettinen alkulämpötila polton ilmakerroimen ja hakkeen kosteuden funktiona. Kuvan ylin käyrä vastaa kosteutta 0 % ja alin kosteutta 50 % (käyrät on piirretty 10 %-yksikön välein).

4.2 Kattilan lämmönsiirtimen mallintaminen

4.2.1 Konduktanssi ja lämmönläpäisykerroin

Kattilan tuottamaa lämpöenergiaa KL-veteen siirtävät lämpöpinnat muodostuvat tulipesää ympäröivästä vesivaipasta ja varsinaisista tulipesän jälkeisistä konvektiolämmönsiirtimistä. Konvektiolämmönsiirtimet ovat tyypillisesti pystyasentoisia ja kuumat savukaasut virtaavat niiden välisessä tilassa vuoroin alas- ja vuoroin ylöspäin ennen poistumistaan savukaasumurin avulla savupiippuun ja sieltä ympäristöön. Savukaasut jäähtyvät ulos virratessaan ja vapautunutta lämpöenergiaa siirtyy konvektiolämmönsiirtimien sisällä virtaavaan KL-veteen. Kokonaislämmönläpäisykerroimen (U -arvo) arvioiminen on hankalaa, mutta sen sijaan tulo UA eli niin sanottu konduktanssi on mitattavissa (A = lämmönsiirtopinta-ala). Kattilan lämmönsiirtopinta-ala on Kälviän kattilassa valmistajan esitteiden mukaan 212,7 m².



Kuva 4.2. Periaatekuva lämpötilojen muuttumisesta konvektiolämmönsiirtimessä.

Mittaamalla kattilassa KL-veteen siirretty lämpöteho (ϕ_{KL}) ja samanaikaisesti tule-van ja lähtevän KL-veden lämpötilat (T_{KL1} ja T_{KL2}) sekä vielä kattilasta poistuvan savukaasun loppulämpötila (T_{SK2}), voidaan edellä mainittu tulo UA laskea. KL-veteen siirtynyt teho on nimittäin laskettavissa kaavalla $\phi_{KL} = UA\Delta T$, jossa ΔT on niin sanottu keskimääräinen logaritminen lämpötilaero kuumien savukaasujen ja lämmitettävän KL-veden välillä. Lisäksi täytyy vielä tietää lämpöpinnoille tulevien savukaasujen alkulämpötila T_{SK1} , jota voidaan mittaussmahdollisuuksien puuttuessa arvioida aikaisemmin kuvatulla tavalla (ks. kuva 4.1). Suoritettujen hyötysuhdemittausten yhteydessä (3/2010 ja 5/2011) edellä mainittuja asioita mitattiin ja tulokset on esitetty taulukoissa 4.1 ja 4.2.

	KL-teho (kW)	KL-veden massavirta (kg/s)	T_{KL1}	T_{KL2}	T_{SK1}	T_{SK2}	ΔT	Tulo UA (kW/K)	U-arvo, W/m²K (A = 212,7 m²)
1.	1230	5,78	45	96	1193	126	389	3,155	14,83
2.	1322	6,08	45	97	1193	120	381	3,473	16,33
3.	1269	5,99	46	97	1193	119	378	3,360	15,80
4.	1310	5,92	45	99	1193	122	383	3,418	16,07
ka.	1283	5,94	45,3	97,3	1193	122	383	3,352	15,76

Taulukko 4.1. Kattilan lämmönsiirtopintojen keskimääräisen konduktanssin eli tulon UA määrittäminen (A = lämmönsiirtopinta-ala 212,7 m²) mittaustapahtumalle 3/2010.

	KL- teho (kW)	KL-veden massavirta (kg/s)	T_{KL1}	T_{KL2}	T_{SK1}	T_{SK2}	ΔT	Tulo UA (kW/K)	U-arvo, W/m²K (A = 212,7 m²)
1.	258	1,61	46	85	726	83	212	1,218	5,73
2.	276	1,54	46	89	726	87	217	1,270	5,97
3.	262	1,63	46	84	726	88	220	1,191	5,60
4.	245	1,50	46	85	726	83	212	1,157	5,44
5.	232	1,50	49	86	726	88	215	1,080	5,08
ka.	255	1,56	46,6	85,8	726	85,8	215	1,183	5,56

Taulukko 4.2. Kattilan lämmönsiirtopintojen keskimääräisen konduktanssin eli tulon UA määrittäminen (A = lämmönsiirtopinta-ala 212,7 m²) mittaustapahtumalle 5/2011.

Taulukoiden alimmalla rivillä on mittausten keskiarvotulokset. Mittaustapahtumassa 3/2010 oli savukaasujen laskennallinen massavirta 1,017 kg/s (2867 Nm³/h) ja mittaustapahtumassa 5/2011 muun muassa alhaisemmasta kattilakuormasta johtuen vain 0,358 kg/s (1005 Nm³/h). Lämmönsiirtopintojen kokonaislämmönläpäisykerroin eli U-arvo riippuu pääosin vain savukaasupuolen olosuhteista eli savukaasujen massavirrasta ja pintojen likaantumisas- teesta. Kattilan lämmönsiirtopinnat oli nuohottu ennen molempia mittausta- pahtumia, joten saatuja tuloksia voitaneen pitää puhtaiden pintojen arvoina. Lämmönsiirtotekniikan lainalaisuuksien perusteella voidaan savukaasupuolen lämmönsiirtokertoimelle kirjoittaa lauseke:

$$\frac{1}{h_{sk}} = \frac{1}{U} - \left(\frac{s}{\lambda} \right)_{\text{teräs}} - \frac{1}{h_{vesi}} - \left(\frac{s}{\lambda} \right)_{\text{lika}} \quad (22)$$

jossa s = kerrospaksuus ja λ = kyseisen kerroksen lämmönjohtavuus.

Oletetaan $(s/\lambda)_{\text{teräs}} = 0,0025/25 = 0,0001 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (vakio) ja $1/h_{\text{vesi}} = 1/1500 = 0,00067 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (oletetaan myös vakioksi) sekä likakerroksen vastus nollassi, jolloin kaavasta (22) saadaan savukaasupuolen lämmönsiirtokertoimelle arvoksi $h_{sk} = 15,95 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Tämä arvo riippuu voimakkaasti savukaasupuolen massavirrasta. Oletetaan riippuvuuden olevan muotoa $h_{sk} = 15,95 \cdot (m_{sk}/1,017)$ N, jossa eksponentille N saadaan tehtyjen kahden mittauskampanjan perusteella tulos N = 1,03. Riippuvuus on siis lähes lineaarinen. Nyt siis tiedetään, kuinka savukaasupuolen lämmönsiirtokerroin riippuu savukaasujen massa- virrasta.

4.2.2 Pintojen likaantumisen huomioonottaminen

Savukaasupuolen pinnat likaantuvat ajan myötä johtuen savukaasujen epä- puhtauksista, jotka pikku hiljaa kiinnittyvät lämmönsiirtopinnoille lisäten

siten savukaasupuolen lämmönsiirtovastusta. Likakerroksen vaikutus lämmönläpäisykertoimeen U voidaan ottaa huomioon kaavalla (22), jossa likakerroksen vastusta on merkitty termillä $(s/\lambda)_{lika}$. Oletetaan likakerroksen lämmönjohtavuudeksi $0,25 \text{ W/mK}$ ja maksimipaksuudeksi ennen nuohousta 5 mm , jolloin likakerroksen maksimilämmönsiirtovastus on $0,005/0,25 = 0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$. Tämän jälkeen tapahtuu siis aina kattilan nuohous, jolloin likakerroksen oletetaan poistuvan kokonaan. Lämmönläpäisykertoimeksi saadaan nyt lauseke:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{sk}} + \left(\frac{s}{\lambda} \right)_{teräs} + \frac{1}{h_{vesi}} + 0,02A \quad (23)$$

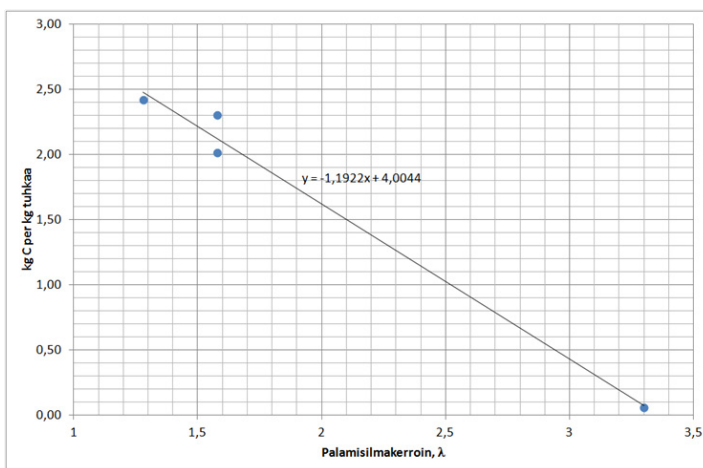
jossa likaantumisasteella A voidaan ottaa simuloinneissa huomioon likakerroksen vaikutus (puhtaalle pinnalle $A = 0$ ja täysin likaiselle $A = 1$).

Kattilan lämmönsiirrin mallinnetaan lopuksi olettaen se vastavirtalämmönsiirtimeksi, vaikkei se sitä todellisuudessa olekaan. Virhe on kuitenkin oletettavasti hyvin pieni.

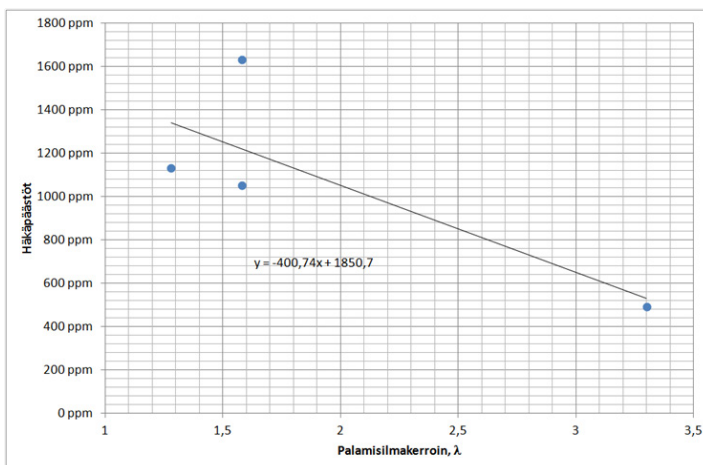
4.3 Palamattomien kaasujen ja jäännöshiilen määrät

Todellisessa palamistapahtumassa muodostuu savukaasuihin aina palamattomia kaasuja, kuten häkää ja metaania. Näiden muodostumista ei voi savukaasuanalyysin perusteella laskea, joten näiden kaasujen muodostuminen päätellään tehtyjen mittausten avulla. Lisäksi kattilan tuhka-altaaseen joutuu kattilassa syystä tai toisesta palamatta jäänyttä ainesta eli jäännöshiiltä, jonka määrää arvioidaan niin ikään tehtyjen mittausten avulla. Yleisesti ottaen palamattomia kaasuja ja myös jäännöshiiltä muodostuu sitä enemmän, mitä pienempi on palamisilmakerroin ja päinvastoin. Oletetaan, että vain palamisilmakertoimella on merkitystä ja että muodostuvien määrien riippuvuus ilmakertoimesta on lineaarinen.

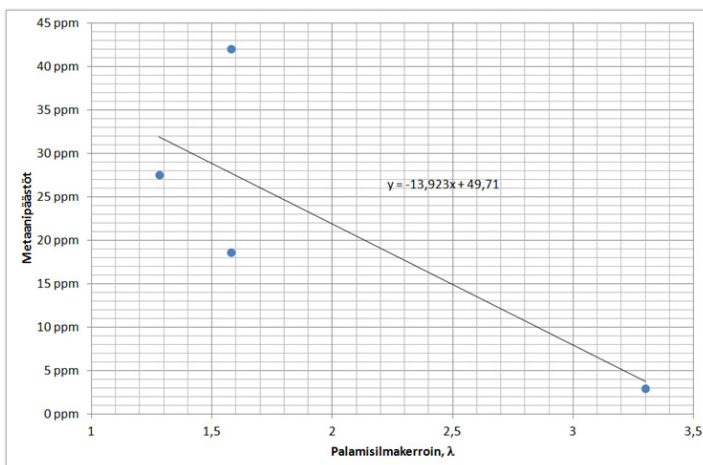
Kuvissa 4.3, 4.4 ja 4.5 on esitetty kaikkien mittaustapahtumien perusteella saadut tulokset savukaasujen häkä- ja metaanipitoisuuden sekä jäännöshiilen osalta. Jäännöshiiltä lukuun ottamatta riippuvuudet eivät oikein hyvin vastaa lineaarista riippuvuutta, mutta näillä mennään. Laskelmissa tarvittavat korrelaatiot on esitetty kuvissa. Häkä- ja metaanikaasut ovat palavia kaasuja ja niiden mukanaolo savukaasuissa tarkoittaa aina epätäydellistä palamista ja siten kattilahäviöitä. Samoin jäännöshiilen esiintyminen tuhkalietteen seassa tarkoittaa kattilahäviöitä. Häviöt voidaan nyt laskea, kun tiedetään pitoisuudet ja komponenttien lämpöarvot (häkä: $10,1 \text{ MJ/kg}$, metaani $51,4 \text{ MJ/kg}$ ja jäännöshiili $32,8 \text{ MJ/kg}$).



Kuva 4.3. Jäännöshiilen määrän riippuvuus palamisilmakertoimesta.



Kuva 4.4. Savukaasujen häkäpitoisuuden riippuvuus palamisilmakertoimesta.

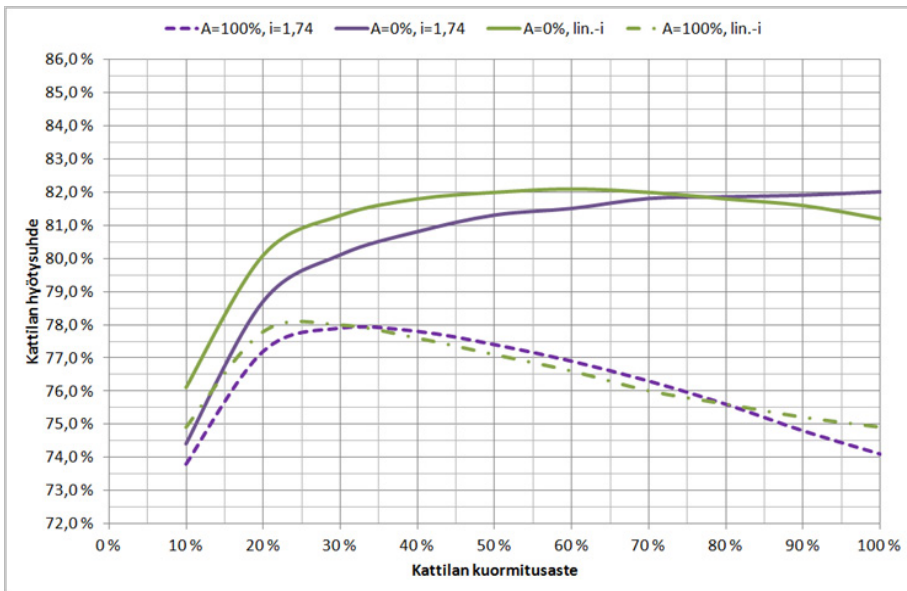


Kuva 4.5. Savukaasujen metaanipitoisuuden riippuvuus palamisilmakertoimesta.

4.4 Simulointilaskelmia

4.4.1 Kattilakuormituksen vaikutus hyötysuhteeseen

Hyötysuhdelaskelmat on tehty puhtaalle mäntyhakkeelle ja kosteudella $X = 40\%$, olettaen kattilan lämmönsiirtopinnat joko täysin puhtaiksi (likaisuusaste $A = 0\%$) tai täysin likaiseksi ($A = 100\%$). Hakkeen ja palamisilman alkulämpötilat ovat $+10^\circ\text{C}$ ja palamisilman suhteellinen kosteus 60% . Palamisilmakerrotimeksi on käytetty vakioarvoa $\lambda = 1,74$ (vastaa 9% jäännöshappipitoisuutta kuivissa savukaasuissa). Kuvassa 4.6 on esitetty kattilan hyötysuhde lisäksi tilanteessa, jossa palamisilmakerroin muuttuu lineaarisesti välillä $1,3 < \lambda < 3,3$ siten, että pienin arvo vastaa kattilakuormaa $K = 100\%$ ja suurin arvoa $K = 10\%$ kuvaten siten paremmin todellisuutta.



Kuva 4.6. Kattilan hyötysuhde kattilakuormituksen funktiona.

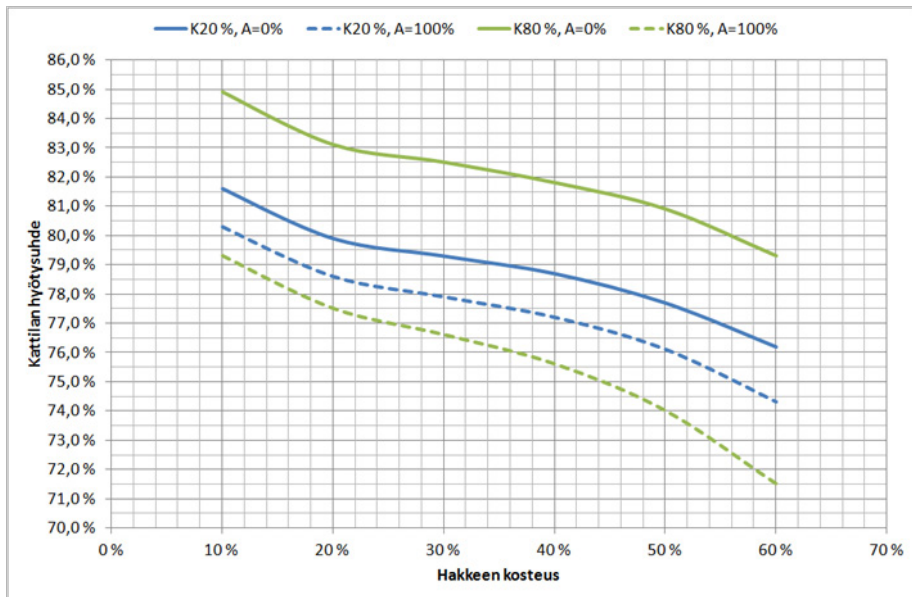
Kuvasta 4.6 nähdään, että hyötysuhdekäyrä kääntyy laskuun likaisilla lämmönsiirtopinnoilla ($A = 100\%$) kattilakuormituksen kasvaessa. Tämä johtuu savukaasujen massavirran lisääntymisestä kattilakuormituksen kasvaessa. Liikaantumista johtuva lämmönsiirron heikkeneminen korostuu suurilla massavirran arvoilla. Puhtailla pinnoilla ($A = 0\%$) hyötysuhde ei käänny laskuun isoillakaan kattilakuormituksilla. Käyttämällä kattilakuormituksen mukaan lineaarisesti muuttuvaa palamisilmakerrointa, saadaan hyötysuhdekäyrästä puhtailla pinnoilla tasaisempi. Lisäksi hyötysuhde on pienillä kattilakuormituksilla parempi. Likaisilla pinnoilla palamisilmakerroimen säädön merkitys vähenee.

4.4.2 Hakkeen kosteuden vaikutus

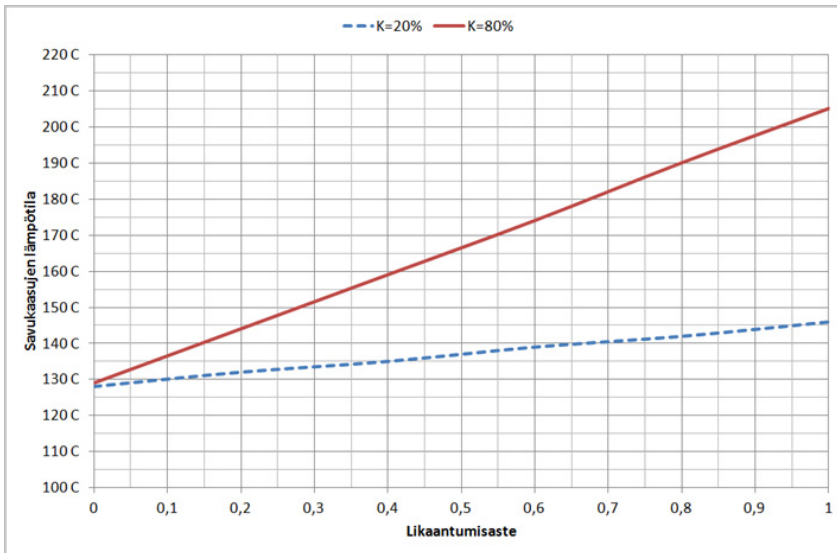
Kuvassa 4.7 on esitetty hakkeen kosteuden vaikutus hyötysuhteeseen. Muuttujina ovat myös kattilakuormitus K ja lämpöpintojen likaisuusaste A. Palamisilmakerroin on koko ajan vakio 1,74 (vastaten savukaasujen jäännöshappipitoisuutta 9 %). Kuvasta havaitaan selvästi hakkeen kosteuden lisääntyessä tapahtuva hyötysuhteen laskeminen. Kosteuden lisääntyessä 20 %:sta 50 %:iin hyötysuhde laskee noin 2 %-yksikköä. Pintojen likaisuuden merkitys korostuu varsinkin suurilla kattilakuormituksilla (K = 80 %), jolloin puhtailla pinnoilla hyötysuhde on jopa 6–7 %-yksikköä likaisia pintoja korkeampi. Pienillä kuormituksilla ero on vain 1 %-yksikön luokkaa.

4.4.3 Pintojen likaantumisen vaikutus

Kuvassa 4.8 on esitetty kattilan lämpöpintojen likaantumisen vaikutus kattilasta poistuvien savukaasujen lämpötilaan (hakkeen kosteus 40 %). Savukaasujen lämpötila nousee likaantumisen lisääntyessä nopeammin isoilla kattilakuormituksilla.



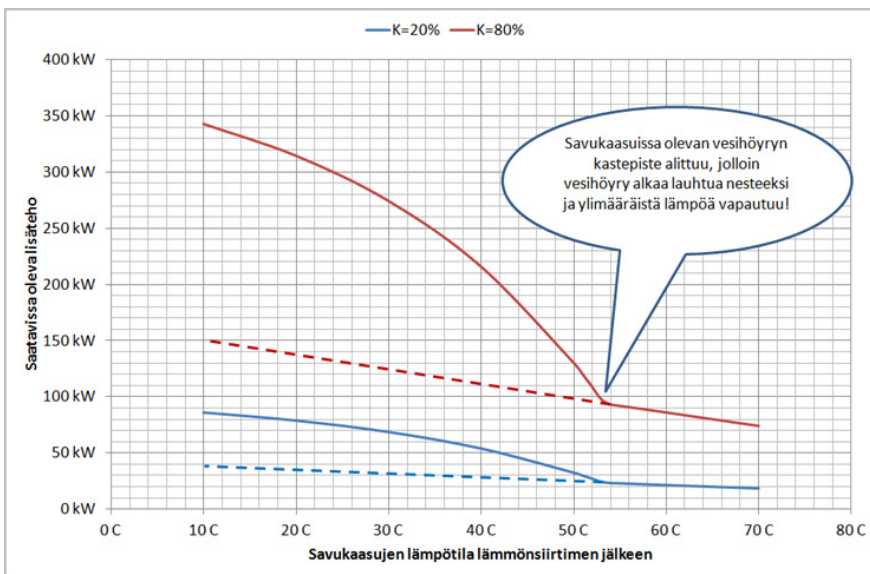
Kuva 4.7. Kattilan hyötysuhde hakkeen kosteuden funktiona.



Kuva 4.8. Kattilan lämpöpintojen likaantumisen vaikutus savukaasujen poistumislämpötilaan.

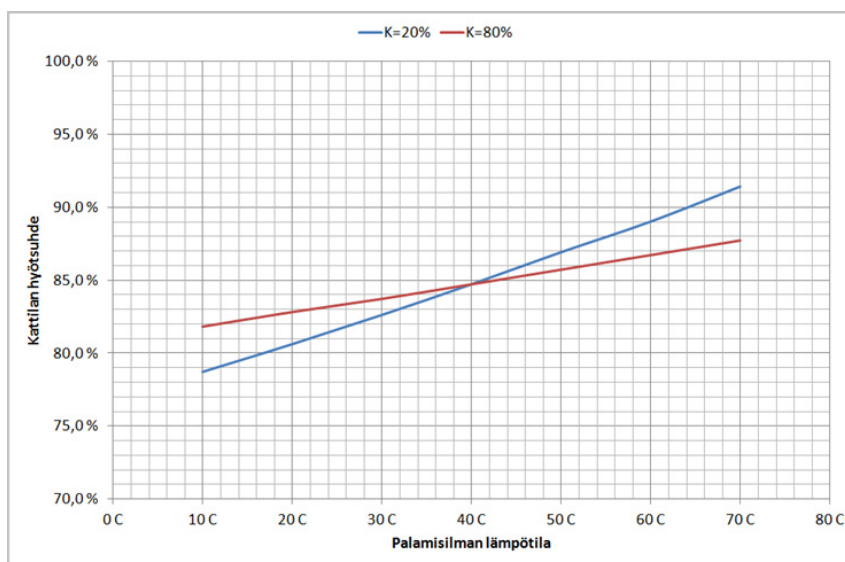
4.4.4 Savukaasuissa olevan vesihöyryn lauhtuttaminen

Kuvassa 4.9 on esitetty savukaasuista saatavissa oleva lisäteho, jos savukaasuja jäähdytettäisiin erillisellä lämmönsiirtimellä ennen niiden johtamista savupiippuun. Lisätehoa vapautuu savukaasujen lämpötilan laskun myötä, mutta lämpöä syntyy myös savukaasuissa olevan vesihöyryn lauhtumisesta. Vesihöyry alkaa tiivistyä nesteeksi heti, kun savukaasujen lämpötila laskee alle vesihöyryn kastepisteen. Tämä kastepisteen lämpötila riippuu savukaasujen paineesta ja vesihöyrypitoisuudesta (laskelmissa savukaasujen paineeksi on oletettu 101,3 kPa).



Kuva 4.9. Savukaasuissa olevan vesihöyryn lauhtuttamisesta saatavissa oleva lisälämpöteho. Katkoviivat esittävät tilannetta, jossa lauhtumista ei tapahdu lainkaan.

Kuvan 4.9 esimerkissä on poltettu kosteudeltaan 40 % mäntyhaketta kattilakuormituksen ollessa joko 20 % tai 80 %. Palamisilmakerroin on vakio $\lambda = 1,74$ (vastaten savukaasujen jäännöshappipitoisuutta 9 %). Käytetyillä lähtöarvoilla savukaasujen lämpötila heti kattilan jälkeen on noin 130–132°C ja vesihöyryn kastepisteen lämpötila on noin 52°C. Kuvasta 4.9 nähdään selvästi, että heti kun savukaasujen lämpötila saadaan alle kastepisteen, niin ylimääräistä lisätehoa on saatavissa runsaasti ja sitä enemmän mitä alhaisempaan lämpötilaan savukaasut voitaisiin jäähdyttää. Kuvassa olevat katkoviivat edustavat tilannetta, jos vesihöyry ei lauhduisi lainkaan. Miten tätä ylimääräistä lämpötehoa voisi hyödyntää? Lämmönkuluttajilta palaavan KL-veden lämpötila on tyyppillisesti noin 45–50°C, joten sillä ei savukaasuja saisi jäähdytettyä juurikaan alle 70°C. Vapautuvalla teholla KL-vesi esilämpenisi vain muutaman asteen. Toinen mahdollisuus hyödyntää savukaasujen lauhduttamista on esimerkiksi palamisilman esilämmitys. Varsinkin talvisin palamisilman lämpötila on hyvin alhainen, joten ainakin periaatteessa savukaasut olisi mahdollista jäähdyttää selvästi alle kastepisteen lämpötilan ja samalla esilämmittää vapautuvalla lämmöllä kylmää palamisilmaa useita kymmeniä asteita.



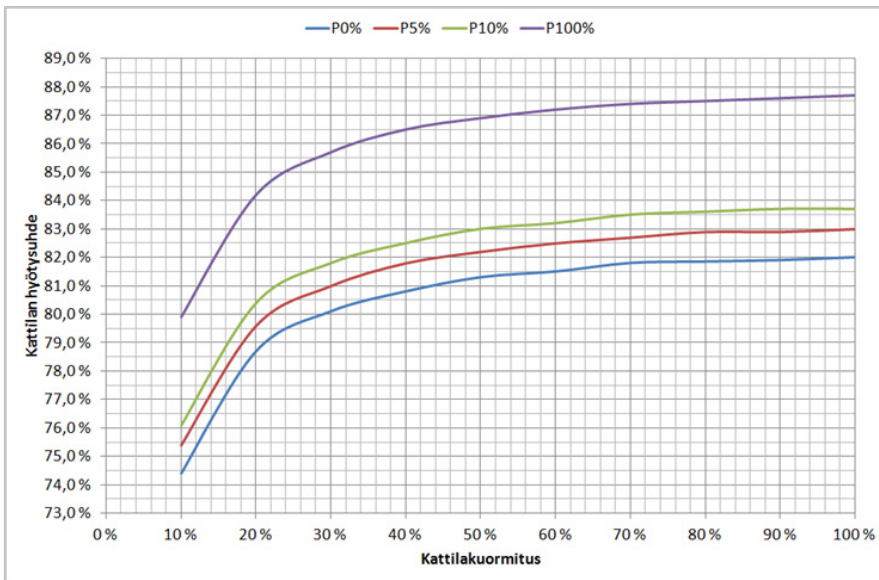
Kuva 4.10. Palamisilman lämpötilan merkitys kattilan hyötysuhteeseen.

Peruslähtökohtana laskelmissa on palamisilman lämpötila 10°C ja suhteellinen kosteus 60 %, jolloin absoluuttinen kosteus on 0,00454 kg vettä/kg kuivaa ilmaa. Ilmaa edelleen lämmitettäessä sen sisältämä vesimäärä ei vähene, ainoastaan lämpötila nousee. Näin ollen lämmitetyn palamisilman mukana ei kattilaan tule yhtään enempää vettä kuin mitä sitä muutenkaan tulisi. Kuvassa 4.10 on esitetty palamisilman alkulämpötilan vaikutus kattilan hyötysuhteeseen kattilakuormituksen ollessa joko 20 % tai 80 %. Kuvasta nähdään, että nostamalla palamisilman lämpötilaa 10°C -> 50°C, paranee hyötysuhde jopa 4–8 %-yksikköä kattilakuormituksesta riippuen. Vaikutus on suurempi pienillä kattilakuormituksilla ja tietyn lämpötilan jälkeen hyötysuhde on pienellä kuormituksella jopa korkeampi.

4.4.5 Pelletin sekoittaminen hakkeen joukkoon

Kuivan puupelletin sekoittaminen kostean hakkeen joukkoon alentaa polttoaineen keskimääräistä kosteutta ja nostaa palamislämpötilaa ja siten muodostuvien savukaasujen alkulämpötilaa. Lisäksi polttoaineseoksen energiasisältö irtokuutiometriä kohti laskettuna nousee. Pelkällä mäntyhakkeella ($X = 40\%$) energiasisältö on 767 kWh/i-m^3 . Jos seassa on 5 til.-% pellettiä, on energiasisältö 883 kWh/i-m^3 ja jos joukossa on 10 til.-% pellettiä, on energiasisältö peräti 998 kWh/i-m^3 .

Kuvassa 4.11 on esitetty kattilan hyötysuhde kattilakuormituksen funktiona, kun mäntyhakkeen sekaan on lisätty kosteudeltaan 10 %:sta pellettiä. Hakkeen itsensä kosteus on 40 %. Laskelmat on tehty olettaen kattilan lämpöpinnat täysin puhtaiksi. Kuvan mukaan kattilan hyötysuhde paranee sekoittamalla hakkeen joukkoon pellettiä. Hyötysuhde nousee aluksi keskimäärin yhden %-yksikön aina 5 til.-% pellettimäärää kohti. Polttamalla pelkkää pellettiä, olisi hyötysuhde laskennallisesti kuitenkin vain noin 6 %-yksikköä korkeampi kuin pelkällä kostealla hakkeella.



Kuva 4.11. Pelletin lisäämisen vaikutus hyötysuhteeseen. Alin käyrä vastaa pelkkää haketta ($X = 40\%$). Likaisuusaste on $A = 0\%$.

5. YHTEENVETO

Tämä hakelämmityskirjanen on laajan yhteispohjoismaisen Forest Power-hankkeen loppuraportti CENTRIAn vastualueiden osalta. CENTRIAn osuus koko hankkeesta oli tutkia Keski-Pohjanmaan maakunnan alueella toimivien energiaosuuskuntien pieniä hakelämpölaitoksia: kartoittaa energiaosuuskunnat ja lämpölaitokset, mittauksin selvittää yhden tai useamman hakelämpölaitoksen hyötysuhde, kaasumaiset ja kiinteät päästöt sekä tuottaa materiaalia alueen puuenergiaa käyttäville ja siitä kiinnostuneille tahoille. Tutkimus toteutettiin vuosien 2009–2011 aikana yhteistyössä muun muassa Keski-Pohjanmaan Metsänomistajien Liiton ja Uumajan Yliopiston ETPC-laitoksen kanssa.

Keski-Pohjanmaan maakunnan alueella toimii seitsemän energiaosuuskuntaa ja yksi hakeosuuskunta ja näillä on vastuullaan kuusi pienen kokoluokan hakelämpölaitosta nimellistehoiltaan 120–2000 kW. Jokaiseen lämpölaitokseen tutustuttiin paikan päällä ja haastateltiin osuuskuntien vetäjiä ja lämpölaitosten käytöstä vastaavia sekä laadittiin kaikista kohteista yhteenvetona niin sanotut datakortit. Lämpölaitokset käyttävät nykyisin haketta yhteensä noin 27000 i-m3 vuodessa tuottaen asiakkaille noin 17000 MWh/a kaukolämpöenergiaa.

Lämpölaitoksista valittiin tarkempiin tutkimuksiin Kälviän energiaosuuskunnan vastuulla olevista kahdesta laitoksesta vanhempi vuonna 2003 käyttöön otettu 2 MW hakevoimala sen suuremman käyttöasteen takia. Lämpölaitoksella tehtiin hankkeen aikana kenttämittauskampanjoita yhteensä viisi kertaa, joista kolmena kertana mukana olivat myös ruotsalaiset partnerit Uumajan Yliopistolta. Hyötysuhde määritettiin sekä suoralla mittauksella, mutta myös epäsuoralla menetelmällä häviö- ja savukaasuanalyysiin perustuen. Mittauskampanjoitten aikana kattilan hyötysuhde vaihteli hyvin vähän ollen 82–84 %. Poltetun hakkeen kosteus vaihteli mittauksissa välillä 21–39 % ja kattilan kuormitusaste välillä 15–100 %. Mittauksissa käytetty hake oli pääosin hyvälaatuista mäntyvaltaista energiapuuta, joskin yhdessä mittaustapahtumassa poltettiin koemielessä myös hakkuutähteistä tehtyä huonompilaatuista haketta. Savukaasujen kaasumaiset päästöt (normeerattuna 10 % jäännöshappipitoisuuteen kuivissa savukaasuissa) olivat kohtuullisen alhaisia: häkäpäästöt olivat välillä 1000–2000 ppm, metaanipäästöt välillä 5–100 ppm ja typen oksidipäästöt noin 50–70 ppm. Rikin oksideja ei savukaasuissa juurikaan ollut. Savukaasujen hiukkaspitoisuudet olivat luokkaa 75–125 mg/Nm³. Uumajan yliopistolla tehtyjen tuhka-analyysien perusteella laitoksella poltetut energiapuut soveltuvat hyvin pienen kokoluokan hakelämpölaitoksissa poltettaviksi tuhkan alhaisen sulamistaipumuksen takia. Tämän kokoluokan hakekattiloiden päästöille ei varsinaisia päästörajoja ole toistaiseksi lainkaan olemassa. Mittausten perusteella ainakin Kälviän lämpölaitoksen päästöt ovat yleisesti ottaen pieniä, ainoastaan hiukkaspäästöjen osalta saattaa tulevaisuudessa tulla ongelmia, mikäli EU-tasolla suunnitellut hyvin tiukat rajat otettaisiin käyttöön.

Mittauksissa saatuun dataan pohjautuen laadittiin Kälviän hakelämpölaitoksen kattilalle myös staattinen Excel-simulointimalli, jonka toimivuus varmis-

tettiin suorilla hyötysuhdemittauksilla ja samaan aikaan tehdyillä savukaa-sumittauksilla. Mallin avulla voitiin simuloida kattilan toimintaa erilaisilla lähtöarvoilla ja polttoaineseoksilla ilman varsinaisia mittauksia. Saadut tulokset ovat järkeenkäyviä, joskaan niitä ei ole mittauksin mitenkään varmistettu.

Hankkeen puitteissa tehtiin myös yksi opinnäytetyö koskien sähköntuotantomahdollisuuksia hakelämpövoimalan yhteydessä. Työssä koottiin yhteen erilaisia sähköntuotantotapoja, joista laadittiin esimerkkilaskelmat ORC-, Stirling- ja kuumailmaturbiiniprosesseille.

LÄHTEET

Työ- ja elinkeinoministeriön nettisivut:

<http://www.tem.fi/index.phtml?s=2070>

Forest Power-hankkeen nettisivut:

www.forestpower.net

Eija Alakangas, Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT:n tiedote T2045.

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

Antti Hukka, Puun kuivumisen matemaattinen mallintaminen korkeissa lämpötiloissa. VTT:n julkaisu J815.

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1996/J815.pdf>

Pertti Viitaniemi, luentomateriaalia TKK:ssa.

<http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/Viitaniemi.pdf>

Joonas Malmberg, Selvitys pienen ja keskisuuren lämpölaitoksen sähköntuotantomahdollisuuksista. Opinnäytetyö. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu, 2012 (ei vielä julkaistu).

Nettisivut: www.puuinfo.fi ja www.puuproffa.fi

B: CENTRIA tutkimus ja kehitys

ISBN 978-952-6602-33-2 (nid.)

ISBN 978-952-6602-34-9 (PDF)

ISSN 1459-8949

Botnia-Atlantica



Gränsoverskridande samarbete över fjäll och hav
Merit, vuoret ja räjät ylittävää yhteistyötä
Gränsöverskridande samarbete över fjäll og hav
Cross-border cooperation over mountain and sea

EUROOPAN UNIONIN
Euroopan unionin
merkki

www.botnia-atlantica.eu



Regeringens
Folksamhets
Sitt

LANDBRUKS- OG MATDEPARTEMENTET



Länsstyrelsen
Västerbotten



LÄNSSTYRELSEN
VÄSTERBOTTEN



Nordland
FYLKESKOMMUNE



Fylkesmannen i
Nordland