

BIOENERGIAKESKUKSEN HAKELÄMPÖLAITOKSEN HÄIRIÖTILOJEN VÄHENTÄMINEN AUTOMAATIOASETUKSIEN OPTIMOINNILLA

Juha Välimaa

Opinnäytetyö
Toukokuu 2011

Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma
Luonnonvara- ja ympäristöala





Tekijä(t) VÄLIMAA, Juha	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 09.05.2011
	Sivumäärä 30	Julkaisun kieli Suomi
	Luottamuksellisuus () saakka	Verkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi BIOENERGIAKESKUKSEN HAKELÄMPÖLAITOKSEN HÄIRIÖTILOJEN VÄHENTÄMINEN AUTOMAATIOASETUKSIEN OPTIMOINNILLA		
Koulutusohjelma Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) VESISENAHO, Tero		
Toimeksiantaja(t) Rahkolan energiaosuuskunta		
Tiivistelmä <p>Bioenergiakeskuksen 200 kW:n hakelämpölaite tuottaa huomattavan paljon hälytyksiä, ja suurimman osan hälytyksistä oletettiin johtuvan huonoista automaatioasetuksista. Huonojen automaatioasetusten vuoksi palaminen on epätasaista ja kattilan teho on huolellista. Suuri hälytysmäärä aiheuttaa suuren määrän lisätyötä ja kustannuksia lämpörittäjälle. Siksi opinnäytetyössä haluttiin selvittää, miten Bioenergiakeskuksen hakelämpölaitoksen häiriötiloja voitaisiin vähentää automaatioasetuksien optimoinnilla.</p> <p>Työn tavoitteena oli löytää sellaiset automaatioasetukset hakelämpölaitokselle, että sen aiheuttamat hälytykset lämpörittäjälle vähenisivät ja laitoksen vaihteleva palamisprosessi tasaantuisi. Työssä säädettiin kattilan tehoa ohjaavan automaation PI-säätimen ohjausarvoja ja seurattiin, kuinka ne vaikuttavat kattilan toimintaan eri tilanteissa.</p> <p>Säätöjen tuloksena palaminen ja kattilan teho saatiin hieman tasaisemmaksi niin tasa- kuin piikkikuormatilanteissa. Biopolttoaineella lämmitettäessä ei kuitenkaan koskaan päästä vastaaviin reagointiaikoihin verrattuna öljylämmitykseen, joten piikkikuormaa kattilan toiminnassa ilmenee aina lämmitystarpeen kasvaessa äkillisesti.</p> <p>Tulevaisuudessa kattilan tasaisen ja puhtaan palamisen kannalta pitäisi pyrkiä vähentämään suuria äkillisiä piikkikuormatilanteita. Yksi suurimmista äkillisistä kuorman aiheuttajista on Bioenergiakeskuksen lämmityksen kytkeytyminen aamuisin päälle. Lämpölaitoksen puhtaamman ja tasaisemman palamisen kannalta olisikin hyvä, että selvitetäisiin lämmityksen päälle kytkeytymisen mahdollista jaksottamista.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Bioenergia, lämmitysjärjestelmät, automaatio		
Muut tiedot		



Author(s) VÄLIMAA, Juha	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 09.05.2011
	Pages 30	Language Finnish
	Confidential <input type="checkbox"/> Until	Permission for web publication <input checked="" type="checkbox"/>
Title DECREASING THE ERROR CONDITIONS OF THE WOOD CHIP HEATING PLANT OF THE BIOENERGY DEVELOPMENT CENTRE BY OPTIMIZING THE AUTOMATION SETTINGS		
Degree Programme Degree Programme in Agriculture and Rural Industries		
Tutor(s) VESISENAHO, Tero		
Assigned by Rahkolan energiaosuuskunta		
Abstract <p>The 200-kW wood chip heating plant of the Bioenergy Development Centre causes a noticeable amount of alarms. Most of the alarms are assumed to be caused by bad automation settings. Due to the bad automation settings, burning is uneven and the power of the heating boiler fluctuates. The large amount of alarms causes a lot of additional work and costs for heating entrepreneurs. That is why I wanted to study in this thesis how the error conditions of the wood chip heating plant of the Bioenergy Development Centre could be decreased by optimising the automation settings.</p> <p>The aim of the thesis was to find such automation settings for the wood chip heating plant that the alarms caused by it would decrease and the fluctuating burning process of the plant would become more stabilised. The settings of the PI controller of the automation that controls the heating boiler power were adjusted. It was then studied how the adjustments affected the heating boiler functionality in different conditions.</p> <p>As a result of the adjustments, the burning and the heating boiler power became a bit more stabilised in both base and peak load conditions. When heating with biofuel the reaction time can never be as fast as when heating with oil, so the heating boiler functionality always fluctuates slightly when the heating demand increases suddenly.</p> <p>In the future, in order for the heating boiler to burn in a stabilised and clean manner the amount of large and sudden peak load situations should be tried to be decreased. One of the largest factors causing load is the activation of the heating in the Bioenergy Development Centre in the mornings. It would be useful to study whether the heating activation could be arranged serially, so that the burning in the heating plant would be cleaner and more stabilised.</p>		
Keywords Bioenergy, Heating plant, Automation		
Miscellaneous		

SISÄLTÖ

1	LÄMPÖYRITTÄJYYS	3
1.1	YRITTÄJÄTOIMINTA	3
1.2	LÄMPÖYRITTÄJYYDEN KANNATTAVUUS	4
1.3	TYÖN TAUSTA JA TAVOITE	5
2	HAKELÄMMITYS.....	9
2.1	HAKE POLTTOAINEENA	9
2.2	HAKKEEN POLTTO	10
3	BIOENERGIAKESKUKSEN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄ.....	12
3.1	LAITTEISTO.....	12
3.2	AUTOMAATIO HAKELÄMMITYSJÄRJESTELMÄSSÄ.....	13
3.3	PI SÄÄTÖ	14
3.3.1	<i>P-säädin</i>	14
3.3.2	<i>I-säädin</i>	15
4	TOIMENPITEET	16
4.1	ASETUSTEN OPTIMOINTI.....	16
4.2	VIRITTÄMINEN ZIEGLER-NICHOLAS MENETELMÄ.....	17
4.3	POLTTOAINEANALYYSI.....	20
4.3.1	<i>Kosteusanalyysi</i>	21
4.3.2	<i>Irtotiheys</i>	22
4.3.3	<i>Hakkeen energiasältö ja hyötysuhde</i>	23
5	TULOKSET	24
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	27
	LÄHTEET	29

KUVIOT

KUVIO 1. Lämpöyrittäjien keskimääräinen nettotulos	4
KUVIO 2. Bioenergiakeskuksen hakelämpölaitos	6
KUVIO 3. Kattilan seuranta	8
KUVIO 4. Kattila	12
KUVIO 5. Ohjauskeskus	13
KUVIO 6. PI- säätimen toiminta	17
KUVIO 7. Virittämisen aloitus	18
KUVIO 8. Virittämistä, K-arvon muutos 8:aan	18
KUVIO 9. K-arvot 6 ja 4	19
KUVIO 10. Aikavakion määrittäminen	20
KUVIO 11. Hakkeen energiatiheys ja kosteus.....	21
KUVIO 12. Hakkeen tilavuuspainon seuranta.....	22
KUVIO 13. Hakkeen energiasisältö ja hyötysuhde	23
KUVIO 14. Säädetty verrattuna alkuperäiseen.....	24

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Lämpöyrittämisen keskimääräiset kustannukset	5
TAULUKKO 2. Säättöjen vaikutus	17
TAULUKKO 3. Ziegler-Nicholas- säätömenetelmä	20

1 LÄMPÖYRITTÄJYYS

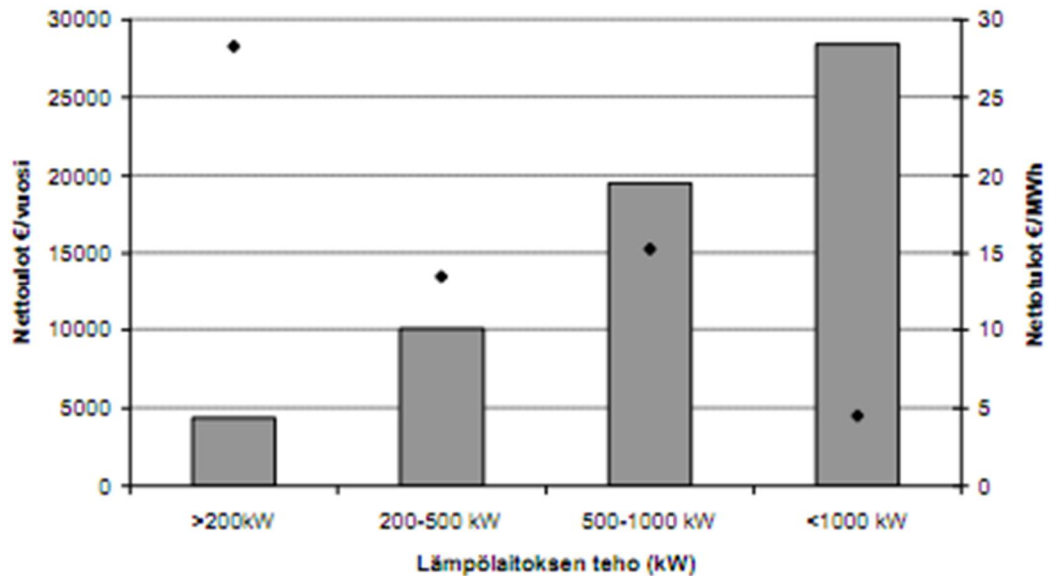
1.1 Yrittäjätoiminta

Lämpöyrittäjyys tarkoittaa sitä että, yksi tai useampi yrittäjä hoitaa paikallisen kiinteistön tai kiinteistöjen lämpöenergian tuotannon. Useissa tapauksissa lämpöyrittäjinä toimivat maanviljelijät ja koneyrittäjät, jotka toimittavat polttoaineen laitokselle sekä huolehtivat sen pyörittämisestä. Lämpöyrittäjien yhtiömuotoja on monia, mutta yleisimmin ne ovat joko osuuskuntia, yhtymiä tai avoimia yhtiöitä. Suuremmissa koluokissa vasta osakeyhtiöittäminen on kannattavaa. Yleisin lämpöyrittäjien käyttämä polttoaine on hake, jota saadaan yleensä omista metsistä tai ostamalla paikalliselta metsänhoitoyhdistykseltä. Varapolttoaineena käytetään yleensä kevyttä polttoöljyä. Lämpöyrittäjille maksettava korvaus maksetaan yleensä myydyn energiamäärän mukaan, jolloin lämpöyrittäjien on kannattamatonta polttaa polttoöljyä sen kaliumin €/MWh hinnan vuoksi. (Tuomi & Solmio 2005, 10.)

Vuonna 2009 Suomessa oli 455 lämpöyrittäjien hoitamaa laitosta, joista 40 % sijaitsee Länsi-Suomessa. Keskimääräinen kattilateho laitoksilla on 550 kilowattia ja laitosten yhteenlaskettu teho oli 250 megawattia. Aluelämpölaitoksien määrä oli 132 kpl ja loput 323 kpl olivat kiinteistökohtaisia lämpölaitoksia. Näitä laitoksia hoiti 244 osuuskuntamuotoisia ja 203 muuta yritysmuotoista lämpöyrittäjää. Lämpöyrittäjien käyttämä hakkeen määrä oli vuonna 2009 noin miljoona kuutiometriä. Muita puupolttoaineita käytetään 80 000 irtokuutiometriä. Polttoturpeen käyttömäärän arvioitiin olevan noin 40 000 irtokuutiometriä. (Solmio & Alanen 2010.)

1.2 Lämpöyrittäjyyden kannattavuus

Kuviosta 1 huomataan, että mitä suurempi laitos, niin sitä suurempi nettotulos. Suurimman eli yli 1000 kW:n laitosten keskimääräinen nettotulos oli 28500 € ja vastaavasti alle 200 kW:n laitoksen vajaa 5000 €. (Savula-Seppälä 2010.)



KUVIO 1. Lämpöyrittäjien keskimääräinen nettotulos (Savula-Seppälä 2010.)

Lämpöyrittäjien liiketoiminnasta kaksi kolmesta on kannattavia. Kannattavuuteen vaikuttaa lämpölaitosten aiheuttamat kustannukset, jotka vaihtelevat laajasti. (ks. taulukko 1). Laitosten kiinteään polttoaineen kattiloiden keskimääräinen käyntiaika on 2250 tuntia vuodessa.

TAULUKKO 1. Lämpöyrittämisen keskimääräiset kustannukset (Solmio & Tuomi 2007.)

<i>Laitos- ja verkostoinvestointien pääomakulut lämmönninnasta</i>	10 -72 %
<i>Laitoksen ja lämpöverkon pääomakulut yhteensä</i>	4,4 - 31,5 €/MWh
<i>Polttoainekulut</i>	9,2 - 28,9 €/MWh
<i>Polttoainekulut prosenttia lämmön hinnasta</i>	16 - 77 %
<i>Korjaus,huolto ja hälytyksistä johtuvien laitoskäyntien kulut yhteensä</i>	0,1 - 5,5 €/MWh (0,3 - 12,2 % Lämmön hinnasta)

Lämpölaitoksien aiheuttamat toimintahäiriöt ovat kaikki pois lämpöyrittäjälle jäävästä katteesta. Niinpä olisi tarkoituksen mukaista, että laitos olisi kaikin puolin kunnossa ja säädöissään, jotta kustannuksilta vältyttäisiin.

Jokaisesta laitoksen toimintahäiriöstä tulee hälytysilmoitus yrittäjälle, jonka tulee lähteä laitokselle tarkastamaan tilanne. Keskimäärin yrittäjälle tulee vuodessa toimintahäiriöistä aiheutuvia hälytyksiä 43 kappaletta, joiden keskimääräinen kestoaika on yksi tunti. Tuotettua megawattituntia kohden pelkät toimintahäiriöt aiheuttavat 0,8 euron kustannukset. Laskelmissa laitoksen hoitajan palkka oli 15 €/h sivukuluneen, sekä laitokselle tehdyillä matkoilla laskettiin oman auton käyttöä 20 kilometriä ja kustannuksena 0,21 €/kilometri. Laitoskäyntien osuus lämmönninnasta vaihtelee 0,1-5,4 prosentin välillä. (Solmio & Tuomi 2007.)

1.3 Työn tausta ja tavoite

Aihe Bioenergiakeskuksen hakelämpölaitoksen (ks. kuvio 2) virhetilojen vähentäminen automaatioasetuksien optimoinnilla lähti liikkeelle siitä, että Bioenergiakeskuksen hakelämpölaitos tuottaa huomattavan paljon hälytyksiä ja kattilan tehossa on huomattavan paljon huojuntaa. Suurin osa hälytyksistä tulee kattilan alilämmöstä, ja tämä aiheuttaa hetkellisesti erittäin huonoa palamista. Laitoksen aiheuttamat häly-

tykset taas ovat suoraan verrannollisia laitoksen aiheuttamiin kustannuksiin lämpöyrittäjälle. Idea ja tahto laitoksen optimointiin saatiin laitosta hoitavalta Rahkolan energiaosuuskunnalta.



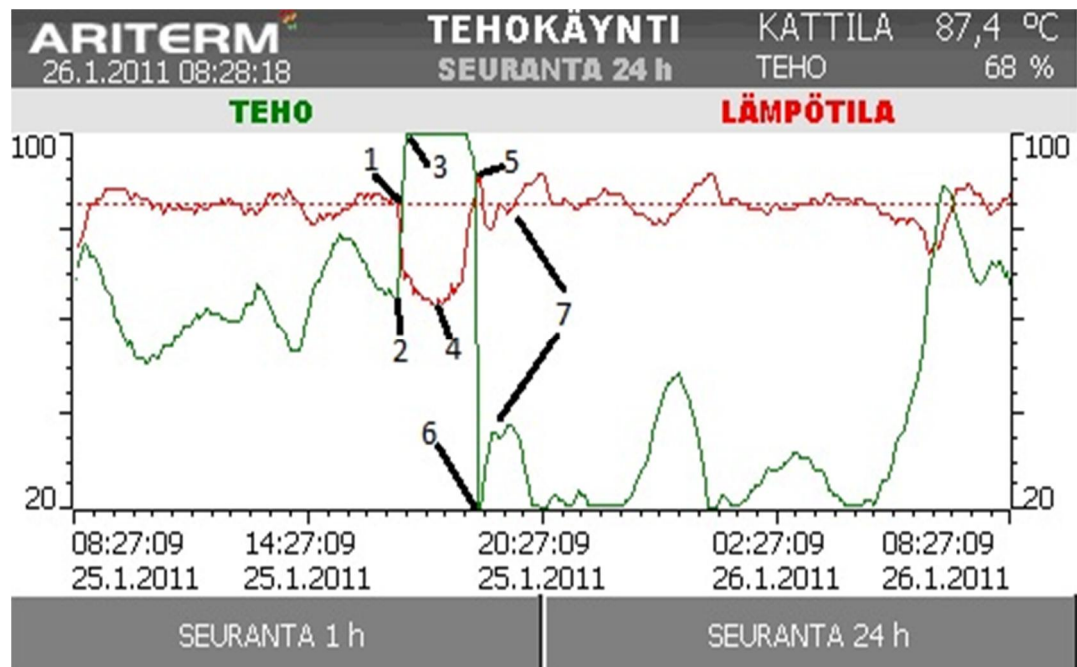
KUVIO 2. Bioenergiakeskuksen hakelämpölaitos

Lämpölaitos on aiheuttanut talvikaudella 2010 - 2011 keskimäärin 8 kappaletta hälytyksiä kuukaudessa, mikä tarkoittaa 96 kappaletta vuodessa. Jokaisesta hälytyksestä seuraa se, että päivystäjän on ajettava laitokselle tarkastamaan tilanne. Keskimäärin päivystäjällä menee aikaa yksi tunti. Hän ajaa keskimäärin 20 km laitokselle. Palkkoina ja kilometrikustannuksina tässä työssä käytettiin samoja lukuja kuin Työteho-seura omissaan. Laitoksen keskimääräinen energianmyyntimäärä kuukaudessa on noin 40 megawattituntia, jolloin keskimääräiseksi kattilatehoksi saadaan 55 kilowattia. Alla olevissa laskuissa nähdään lämpölaitoksen aiheuttamat kustannukset kuukaudessa suhteessa myytyyn energiaan.

$$\begin{aligned}
 &8 \text{ kpl/kk} * ((15 \text{ €/h} * 1 \text{ h}) + (0,21 \text{ €/km} * 20 \text{ km})) \\
 &= 153,60 \text{ €/kk} \\
 &\frac{153,60 \text{ €}}{40 \text{ MWh}} = 3,84 \text{ €/MWh}
 \end{aligned}$$

Bioenergiakeskuksen hakelämpölaitoksen toimintahäiriöt tuottavat 3,84 euron suuriset kustannukset megawattituntia kohden. Yleisesti lämpöyrittäjillä tämä luku on 0,8 €/MWh. (Solmio & Tuomi 2007).

Kuviosta 3 selviää tämän hetkinen lämpölaitoksen ongelma. Kohdassa (1) nähdään, kuinka kuvassa oleva punainen käyrä eli lämpötila lähtee laskuun, jolloin kattilan automaatio käskee kattilan nostamaan tehoa (2). Automaatio lähtee nostamaan tehoa (3), eli polttoainetta syötetään palopäälle täydellä teholla. Lämpötila lähtee nousemaan (4), ja täysi teho jatkuu niin kauan, kuin lämpötila saadaan nostettua takaisin tavoitearvoon 85°C (5). Tässä tapauksessa kuitenkin lämpötila nouseekin liian korkeaksi (mahdollinen yllämpöhälytys), jolloin kattilan teho tippuu kerrasta ylläpitolämmölle (6). Ylläpitolämpö tarkoittaa sitä, että kattilan palopäälle syötettävän polttoaineen määrää ja palamisprosessiin syötettävän ensiö- ja toisioilman määrää vähennetään. Tässä tapauksessa kuitenkin palopäällä on jäljellä vielä suuri määrä palavaa polttoainetta, jolle ylläpilotilanteessa vähennetään ilman syöttö lähes olemattomaan, eli palamisprosessi niin sanotusti tukehtuu. Palamisprosessin tukahduttamisen seurauksena ovat kohonneet ympäristöpäästöt kuten häkä. Lämpölaitoksen aiheuttamat hälytykset aiheuttavat myös suuren määrän lisätyötä lämpöyrittäjälle, joka joutuu tulemaan jokaisen hälytyksen takia laitokselle tarkastamaan tilanteen. Jokaisesta hälytyksestä aiheutuu siis kustannuksia, jotka koostuvat yrittäjän palkasta ja lämpölaitokselle tulevan matkan aiheuttavista kustannuksista.



KUVIO 3. Kattilan seuranta

- 1 Lämpötilan tarve kasvaa
- 2 Kattilan teho lähtee nousemaan
- 3 Kattilan teho 100%
- 4 Lämpötila lähtee nousemaan
- 5 Lämpötila menee yli asetusarvon
- 6 Teho tippuu äkillisesti tehokäynniltä ylläpitokäynnille
- 7 Lämpötila tasaantuu

Työn tavoitteena oli löytää sellaiset automaatioasetukset hakelämpölaitokselle, että sen aiheuttamat hälytykset lämpöyrittäjälle vähenisivät ja laitoksen vaihteleva palamisprosessi tasaantuisi. Työssä säädettiin kattilan tehoa ohjaavan automaation PI-säätimen ohjausarvoja ja seurattiin, kuinka ne vaikuttavat kattilan toimintaan eri tilanteissa.

2 HAKELÄMMITYS

2.1 Hake polttoaineena

Hake on puusta saatavaa puhdasta energiaa, joka on koneellisesti hakettua karsittua tai karsimatonta kokopuuta. Palakoko voidaan säätää hakkurin terien ja seulojen avulla. Hakelämmitys on yleistynyt huomattavan paljon maatalous-, teollisuus- ja kunnallisissa kiinteistöissä. Hakelämmitys voidaan toteuttaa melkein joka kohteeseen joko omatoimisesti tai ostamalla lämpö lämpöyrittäjältä. (Säätötuli Oy 2009.)

Hakelämmitykseen vaikuttavat tärkeät ominaisuudet ovat kosteus, tehollinen lämpöarvo, palakoko ja irtokuutiometrin tiheys. Näistä ominaisuuksista tärkein on kosteus, koska se vaikuttaa hakkeen teholliseen lämpöarvoon. Veden höyrystyessä se vaatii energiaa, mikä taas huonontaa palamisen hyötysuhdetta. Palamisprosessissa puun sisältämät aineet yhtyvät happeen ja syntyy erilaisia yhdisteitä. Polttoaine, joka sisältää runsaasti hiiltä ja vetyä, on tehokas polttoaine, koska näiden polttoaineiden palassa vapautuu runsaasti lämpöenergiaa, kun taas runsas hapen ja typen määrä alentavat lämpöenergiaa. Puhtaassa ja täydellisessä palamisprosessissa hiili palaa hiilidioksidiksi ja vety vedeksi. Puun ollessa lähes rikitön polttoaine ei rikkipäästöjä synny paljoa. Rikki kuitenkin on haitallinen poltettaessa, koska se synnyttää rikkioksideja. Rikki myös syövyttää kattilaa. (Alakangas 2001, 5.)

Puun rakenneaineita ovat ligniini, selluloosa ja hemiselluloosa. Ligniini on aine, joka sitoo puun kuidut toisiinsa. Sen määrä vaihtelee puulajeittain 16 – 33 %:iin. Ligniini sisältää runsaasti hiiltä ja vetyä, jolloin myös puu jossa on paljon ligniiniä, on hyvä lämpöarvoltaan. (Alakangas 2001, 6.)

Puu sisältää 80 – 90 % haihtuvia aineita. Tästä syystä se on pitkäliekkinen polttoaine ja vaatii kattilalta suuren palotilan. Puun kosteus tuoreena on yleensä 40 – 60 %. Kosteutta haihdutetaan yleensä luonnonmukaisesti pinokuivauksena. Pienemmillä laitoksilla hakkeen tulisi olla n. 30 % ja suuremmilla laitoksilla n. 40 %. Puun polttamisestahan ei sinänsä synny nettohiilidioksidipäästöjä sillä puunpolton yhteydessä va-

pautuu sama määrä hiilidioksidia kuin tapauksessa, jossa puu lahoaa luonnossa. Polton sivutuotteena syntyvä puutuhka voidaan palauttaa takaisin metsään, jossa se toimii lisäravinteena. (Alakangas 2001, 9.)

2.2 Hakkeen poltto

Hakkeen palamisprosessi voidaan yksinkertaistettuna jakaa seuraaviin osiin: puu kuivuu, vesihöyry vapautuu, puu kaasuuntuu ja kaasuja vapautuu kuivuneesta puusta, kaasut syttyvät palamaan ja jäljelle jää kiinteä hiili, kiinteä hiili palaa ja jäljelle jää tuhkaa. Päästöt eli ilmansaasteet ovat palamisen seurauksena syntyviä kaasuja, jotka pilaannuttavat ilmaa. Kaasuja ovat mm. hiilidioksidi (CO_2), rikkidioksidi (SO_2), typen oksidit (NO_x) ja pienhiukkaset. Kaasujen määrät ilmoitetaan yleensä, joko prosentteina tai ppm:nä. Yksi ppm vastaa yhtä milligrammaa ainetta litrassa ilmaa. (Alanen 2001, 39.)

Puhdasta palamista seurataan yleensä tekemällä palamisprosessista syntyvästä savukaasusta analyysi eli savukaasuanalyysi. Tyypillisimpiä mitattavia suureita ovat jäännöshappi (O_2), hiilimonoksidi eli häkä (CO), ilmaylimäärä, savukaasujen lämpötila, palamisen hyötysuhde, typen oksidit (NO_x).

Typenoksidit ja jäännöshappi

Yleensä typen oksideilla (NO_x) tarkoitetaan typpioksidia ja typpimonoksidia. Jäännöshappi taas kertoo palamisen jälkeen jäljelle jääneen hapen määrää, joka kertoo palamisen hyötysuhteesta. Happi ja typpi reagoivat vain korkeassa lämpötilassa. Palamisprosessiin syötettävän ilman vaiheistamalla voidaan vähentää typen oksidien muodostumista. Vaiheistaminen tarkoittaa sitä, että syötettävän ilman määrää eri kohtiin liekkiä muutetaan. Kuumimpaan osaan liekkiä annetaan vähemmän ilmaa ja savukaasujen sekaan syötettävän ilman määrää lisätään. (Harju & Keränen 2004.)

Häkä

Häkä on hiilen ja hapen yhdiste, joka on myrkyllistä, hajutonta, helposti syttyvää ja reaktioherkkää kaasua. Kaasua syntyy, kun hiiltä sisältävä polttoaine palaa liian pienessä happimäärässä tai liian korkeassa lämpötilassa, häkä reagoi hapen kanssa vasta yli 605 °C:ssa. Häkä on erittäin vaarallista hengitettynä, sillä se sitoutuu veren hemoglobiinin punasoluihin ja estää näin ollen happimolekyylien tarttumisen, jolloin ihminen alkaa kärsiä hapen puutteesta. (OVA-Ohje: Hiilimonoksidi 2011.)

Ilmaylimäärä

Ilmaylimäärä on ilmaa, joka menee palamisprosessin ohi savukaasujen mukana eikä osallistu palamisprosessiin. Savukaasujen seassa pitäisi olla aina ylimääräistä ilmaa, jolloin kattilan piippu ja konvektiopinnat eivät nokeennu. Ylimääräinen ilma takaa myös riittävän hapensaannin ja näin saadaan täydellinen palamisprosessi. (Mitä on yli-ilmamäärä? 2003.)

Savukaasujen lämpötila

Savukaasujen lämpötila riippuu palamisprosessin laadusta ja ilmaylimäärästä. Ilmaylimäärä laimentaa savukaasujen CO₂-pitoisuutta ja laimentaa näin ollen savukaasujen lämpötilaa. Savukaasujen lämpötilan tulisi olla korkeampi kuin veden ja happojen kastepisteen. Kattilan liitinhormin ja piipun välikohdassa tulisi olla mahdollisimman korkea lämpötila, jotta konvektiopintojen ja piipun yläosan lämpötila ei laskisi liian alas. Lämpötilan laskiessa liian alhaiseksi kondensoituu pinnoille rikkihappoa, joka syövyttää niin piippua kuin kattilaakin. Toisaalta savukaasut eivät saa olla liian korkeatkaan, koska se laskee kattilan hyötysuhdetta. (Kuinka kuumaa savukaasun tulisi olla? 2003.)

Palamisen hyötysuhde

Palamisen hyötysuhde tulee savukaasujen lämpötilasta ja jäännöshapen määrästä, ja näitä verrataan poltettavan polttoaineen tyypillisiin arvoihin.

3 BIOENERGIAKESKUKSEN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄ

3.1 Laitteisto

Bioenergiakeskuksen lämmitysjärjestelmä koostuu Ariterm Oy:n 200 kW:n kattilan (ks. kuvio 4) ja Multijet polttimen yhdistelmästä. Talvella lämpölaitoksen keskimääräinen teho ei kuitenkaan ole kuin noin 70 kW, joten pelkän Bioenergiakeskuksen lämmittämiseen kyseinen lämpölaitos on hieman ylimitoitettu. Multijet polttimessa on liikkuva arina, joka mahdollistaa melkein kaiken tyyppisten kiinteiden polttoainneiden polttamisen.



KUVIO 4. Kattila

Järjestelmää ohjataan poltinautomaatiikalla kattilan lämpötilan perusteella. Järjestelmä täytyy ylösajettaessa sytyttää itse, mutta jatkossa automaatiikka pitää huolen laitoksen toiminnasta.

Syöttöruuvien avulla ajetaan polttoainetta polttimelle ja palotilanteessa polttoaineseen sekoitetaan ensiö- ja toisiopuhaltimien avulla palamisilmaa. Polttimelle syöte-

tyn polttoaineen ja siihen sekoitetun ensiöilman määrä määräävät polttimesta otettavan tehon. Toisioilmapuhaltimella säädetään palamistapahtuman puhtaus ja jäännöshapen määrä. Savukaasut menevät konvektiopinnoille ja luovuttavat lämpönsä kattilaveteen ja poistuvat savukaasuja puhdistavan syklonin kautta pihalle. Lämmitetty kattilavesi lähtee kiertämään lämmitysverkossa. Kierrosta takaisin tulevaan veteen sekoitetaan lämmintä vettä, jotta kattilaan ei pääsisi kylmää vettä. Kylmä vesi huonontaa kattilan käyttöikää ja hyötysuhdetta.

Mahdollinen takapalo on estetty takapalonestojärjestelmällä ja kaikki hälytykset ja häiriötilat saadaan tekstiviestinä kännykkään.

3.2 Automaatio hakelämmitysjärjestelmässä

Bioenergiakeskuksen lämpölaitosta ohjataan Siemens S7-200 -logiikalla ja sen graafinen käyttöliittymä on Siemens TP170Micro. Graafinen käyttöliittymä on helppo hallita (ks. kuvio 5).



KUVIO 5. Ohjauskeskus

3.3 PI Säättö

PI-säättö (proportional integral control) on teollisuudessa yleisin käytetty säätömuoto. Säättö tuntee erosuureen suuruuden, suunnan ja kestoajan. Erosuure on mittauksen sisäänmenosuureen ja ulostulosuureen erotus eli erosuure. Jos erosuure eroaa, niin ajaa ohjaussuure (P) eroa korjaavaan suuntaan ja integrointiajan (I) määräämällä nopeudella niin kauan kuin ero on nollassa. (PID-säätimen virittäminen 2006.)

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{t_1} \int_0^t e(t) dt \right)$$

PI-säätimen kaava muodostuu kahdesta osasta: erosuureen verrannollisesta P-osasta ja erosuureen aikaintegraaliin verrannollisesta I-osasta. Jos säädin on viritetty varovasti eli t_1 on laitettu suureksi, säädin toimii aluksi vain P-säätimenä. Säädön loppuvaiheessa alkaa vasta integrointivaikutus näkyä ja muutosta tapahtuu niin kauan, kunnes erosuure on nollassa. (Hettula 2010.)

3.3.1 P-säädin

P-säädin (proportional) tarkoittaa suhteuttavaa säätöä. Tämä säädin ei yksinään pysty pitämään mittausarvoa asetusarvossa, vaan pitää sen vahvistuksen mukaan määrättyllä säätöalueella. Tämän vuoksi mittausarvo harvoin saavuttaa asetusarvon. Pysyvää eroa sanotaan säätöpoikkeamaksi. Säätimen toimitus $u(t)$ on suoraan verrannollinen erosuureeseen $e(t)$. (Hettula 2010.)

$$u(t) = Kp * e(t)$$

Säädettävä parametri on Kp eli vahvistus. Vahvistusta muutettaessa se vaikuttaa myös pysyvästi erosuureeseen.

Jos vahvistukseksi laitetaan suuri luku, pienikin erosuure aiheuttaa suuren ohjauksen eli säätö on voimakas. Vahvistuksen ollessa pieni, ohjaus ei juuri muutu ja säätö on

hidas ja jää suuri poikkeama. Tyypillinen P-säädin on esimerkiksi patterin termostaatti. (Frondelius 2007.)

3.3.2 I-säädin

I-säädin (integral control) integroi asetus- ja mittausravon erosuuretta niin kauan kuin erosuure on poistunut. I-säätimen kaava kuvataan alla.

$$u(t) = u(0) + \int_0^t k * e(t) dt$$

I-säätimen lähtöarvo ei muutu kovinkaan nopeasti erosuureen syntyessä, koska alkuvaiheessa erosuureen t integraali ei muutu paljoakaan alkuarvostaan. (Hettula 2010.)

Jos valitaan hyvin pieni I-arvo, sen seurauksena ohjauksesta tulee suuri eli jo pienikin eroarvo (mittauksen ja asetusarvon ero) aiheuttaa suuren ohjauksen ja sen seurauksena mittaus alkaa heilua. Pahimmillaan seurauksena on jatkuvasti suureneva mittausravon heiluminen eli säätö huojuu. (Frondelius 2007.)

4 TOIMENPITEET

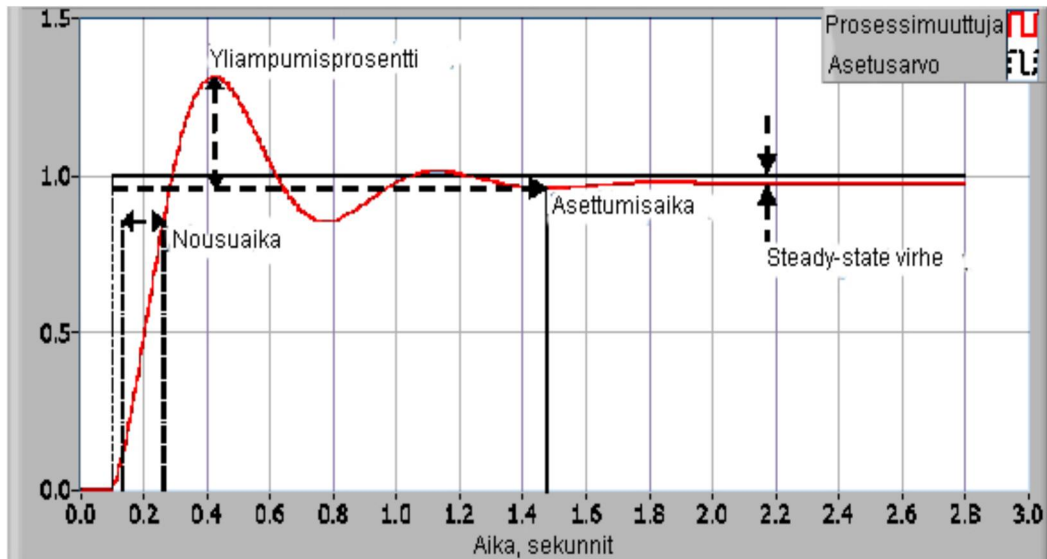
4.1 Asetusten optimointi

Työtä lähdettiin suorittamaan niin, että ensiksi tutustuttiin laitteiston toimintaan vakioasetuksilla. Tämän jälkeen perehdyttiin automaatioasetuksien periaatteisiin, minkä pohjalta lähdettiin virittämään järjestelmän PI-säätöä. Virittämisellä tarkoitetaan sitä, että etsitään sellaiset K- ja I-arvot, joilla saadaan aikaan hyvä säätö, eli mittaus saavuttaa asetetun asetusarvon mahdollisimman nopeasti eikä jää värähtelemään.

PI- säätimen virittämisen voi suorittaa joko alla kuvattua yritys-erehdys menetelmää tai Ziegler-Nicholas-menetelmään (Ohtonen 2007) käyttäen. Työssä kokeiltiin molempia menetelmiä.

PI- säätimen yritys-erehdys menetelmässä haetaan K ja I arvojen parametrit yksi kerrallaan. Ensiksi otetaan I-arvo pois päältä. Seuraavaksi asetetaan K-arvolle sellainen luku, jonka oletetaan olevan sopiva. Jos mittausarvo ei saavuta asetusarvoa tai huojuu, muutetaan K- arvoa. Liian suuri K-arvo niin säätö värähtelee rajusti ja liian pieni K-arvo niin mittaukseen jää suuri poikkeama asetusarvosta. I-arvo haetaan samalla tavalla sitten, kun sopiva K-arvo on löydetty. Liian suuri I-arvo niin sillä ei ole mitään merkitystä ja liian pieni I-arvon niin säätö värähtelee.

PI-säädintä voidaan säätää yksinkertaistettuna niin, että kuviosta 6 katsotaan, mikä suure menee pieleen ja taulukosta 2 katsotaan kuinka suuretta muutetaan. Muutokset tapahtuvat, kun kyseistä suuretta kasvatetaan eli lukua suurennetaan.



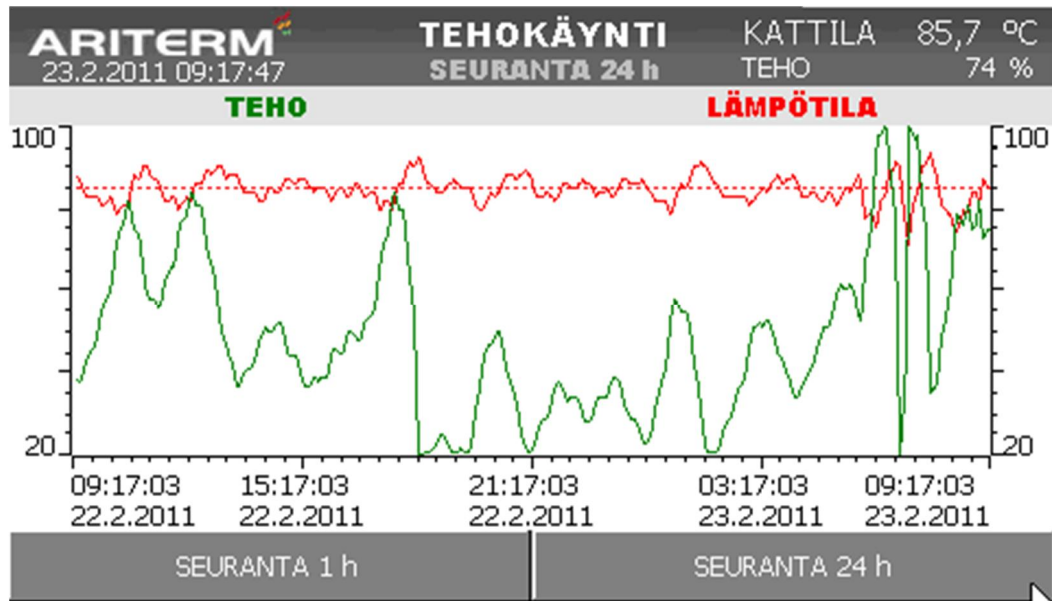
KUVIO 6. PI- säätimen toiminta (Ohtonen 2007.)

TAULUKKO 2. Säättöjen vaikutus (Ohtonen 2007.)

Parametri	Nousuaika	Yliampuminen	Asettumisaika	Steady-State
P	<i>Pienenee</i>	<i>Suurenee</i>	<i>Pieni muutos</i>	<i>Pienenee</i>
I	<i>Pienenee</i>	<i>Suurenee</i>	<i>Suurenee</i>	<i>Eliminoituu</i>

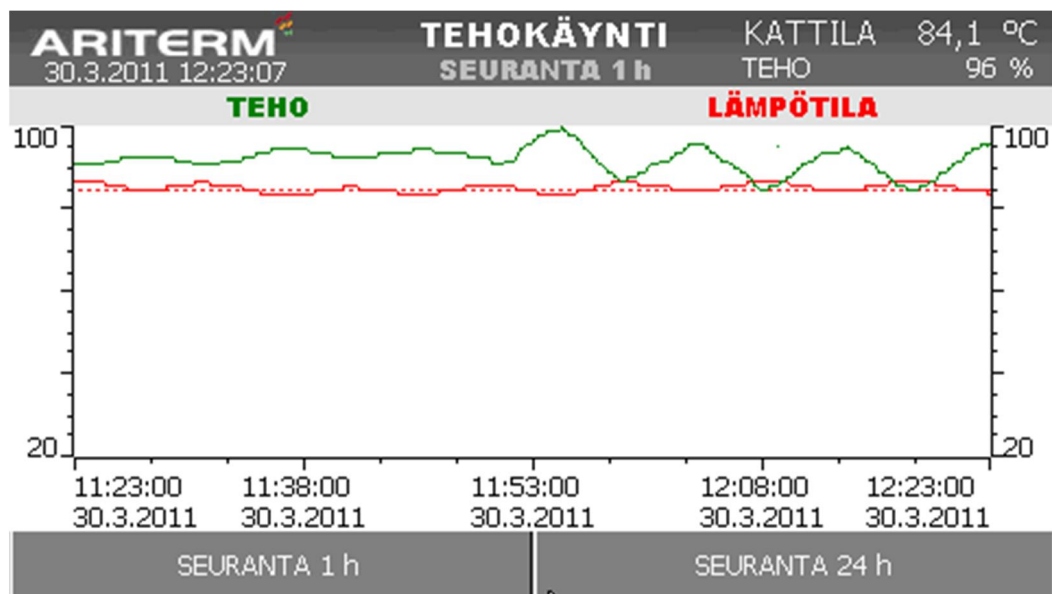
4.2 Virittäminen Ziegler-Nicholas menetelmä

Kuviossa 7 on laitteiston toimintaa 24 tunnin ajalta ennen säätämisen aloittamista. Lämpötila ja teho ovat molemmat huojuneet huomattavasti. Virittäminen aloitetaan laittamalla I-arvo pois päältä ja K-arvoksi 8.

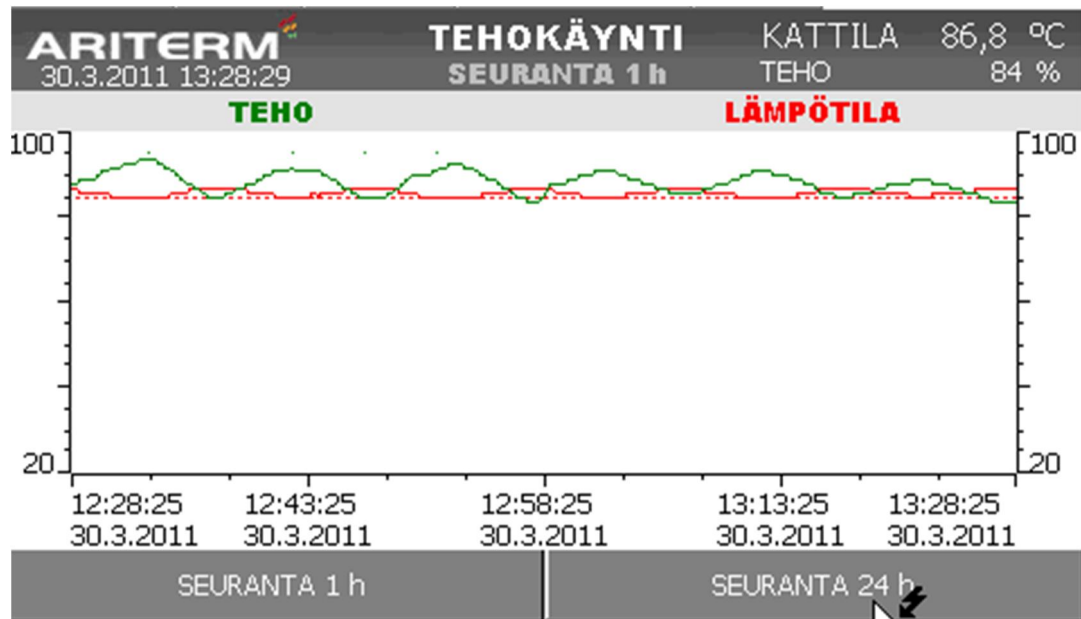


KUVIO 7. Virittämisen aloitus

Kuviosta 8 huomaa, kuinka säätö värähtelee, kun K-arvoa nostetaan reilusti. Tässä tapauksessa K-arvona oli luku 8,0 ja I arvo oli pois päältä. K-arvo oli liian suuri, minkä vuoksi säätö värähtelee, eikä saavuta asetusarvoa. Sama huojunta tapahtui arvolla 6,0 ja 4,0 (ks. kuvio 9). Arvojen tiputtaminen kuudesta neljään tapahtuu kuvion 9 puolessavälissä. Virittämisen tuloksena saatiin parhaaksi arvoksi 3,0, jolla järjestelmä vielä oskilloi eli säätö huojuu.



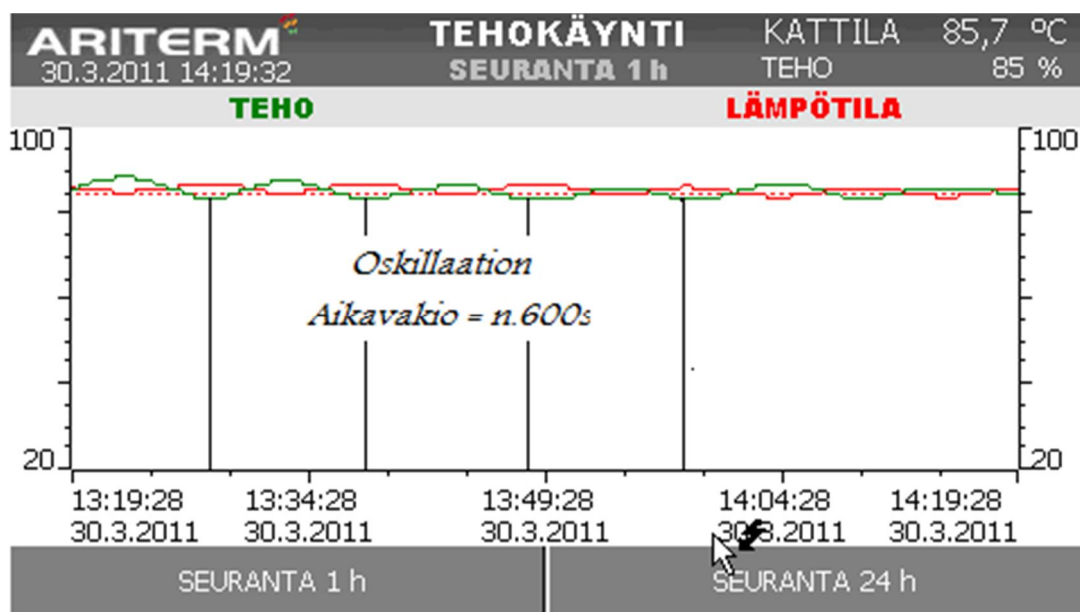
KUVIO 8. Virittämistä, K-arvon muutos 8:aan



KUVIO 9. K-arvot 6 ja 4

Virittämisen tarkoituksena on siis löytää sellainen K-arvo, jolla säätö vielä oskilloi, ja selvittää kuvaajasta sen aikavakio. Aikavakio on aika, joka menee ns. yhdessä huojunnassa.

Aikavakion määrittämisen jälkeen käytettiin PI- säätimen säädössä yleisesti käytettyä Ziegler-Nicholas-säätömenetelmää. Menetelmässä I-arvo asetetaan nolnaan ja K-arvoa kasvatetaan, kunnes järjestelmä oskilloi. Tämän jälkeen määritetään aikavakio (ks. kuvio 10) ja järjestelmä säädetään taulukon 3 mukaisilla laskukaavoilla.



KUVIO 10. Aikavakion määrittäminen

TAULUKKO 3. Ziegler-Nicholas- säätömenetelmä (Ohtonen 2007)

Säädin	P	I
PI	$0,45 \cdot K$	$Aikavakio/1,2$

Ziegler-Nicholas menetelmän mukaan laitettavat arvot ovat seuraavat:

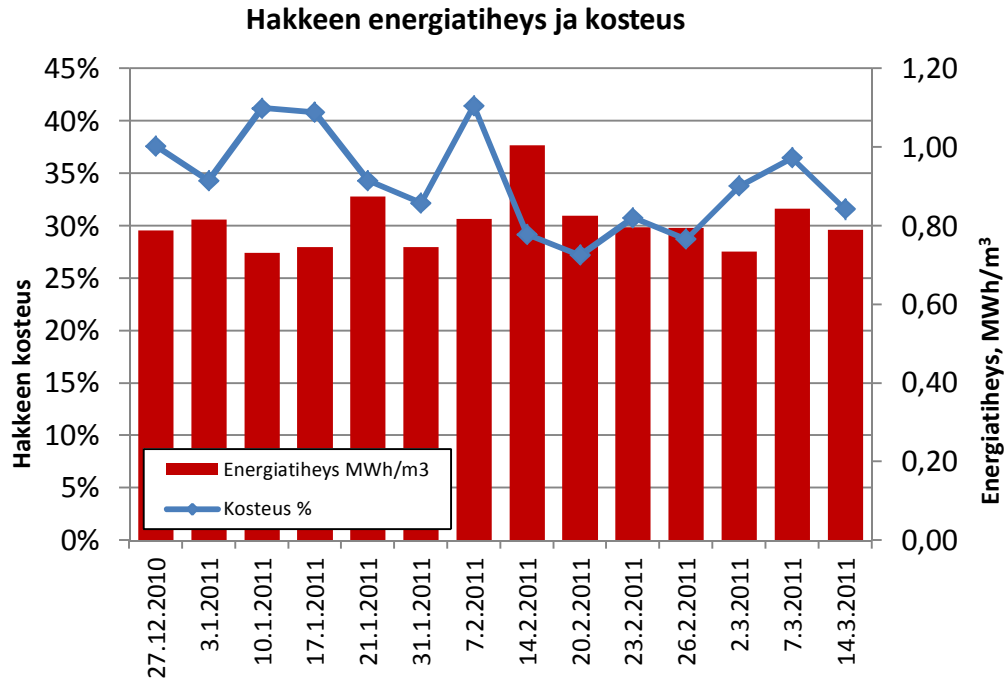
- $P = 1,35$
- $I = 505s$.

Yllä olevat arvot antoivat hyvät tulokset tasakuormatilanteessa. Tuloksen varmuudesta ei kuitenkaan voi olla aivan varma, koska varsinaista pakkasjakson piikkikuormatilannetta ei testijakson aikana ollut ja ulkolämpötilan lähenteli plussaa. Arvoja voisi testata uudestaan ulkolämpötilan laskiessa reilusti pakkaselle, jolloin myös Bioenergiakeskuksen lämmitystarve kasvaa ja piikkikuormatilanne ilmastoinnin päälle kytkeytyessä korostuisi.

4.3 Polttoaineanalyysi

Opinnäytetyössä määritettiin Bioenergiakeskuksen hakelämpölaitoksella poltettavan polttoaineen tilavuuspaino ja kosteuspitoisuus, jokaisesta sinne toimitetusta hakeerästä välillä 27.12.2010 - 14.3.2011, jotta pystyttiin vertaamaan säätöjen ja poltto-

aineen ominaisuuksien välistä suhdetta. Tavoitteena oli selvittää säädöt kahdelle eri polttoaineelle, mutta lämpölaitokselle toimitettu hake oli liian tasalaatuista (ks. kuvio 12 ja 13).



KUVIO 11. Hakkeen energiatiheys ja kosteus

4.3.1 Kosteusanalyysi

SFS-EN 14774-2 Kiinteiden biopolttoaineiden kosteuspitoisuuden määrittäminen. Kosteusanalyysissä mitataan hake-erän kosteuspitoisuus. Kuormasta otetaan edustava näyte ja siitä punnitaan n. 500 g:n painoinen erä. Punnituksen jälkeen näyte laitetaan kuivauskaappiin 24 tunniksi 105 asteeseen ja punnitaan sen paino uudestaan. Märän ja kostean näytteen erotuksesta lasketaan kosteusprosentti. $\text{Erotus} / \text{märkäpaino} * 100 \% = \text{kosteusprosentti}$. Menetelmä soveltuu melkein kaikkien kiinteiden polttoaineiden kosteuden määrittämiseen.

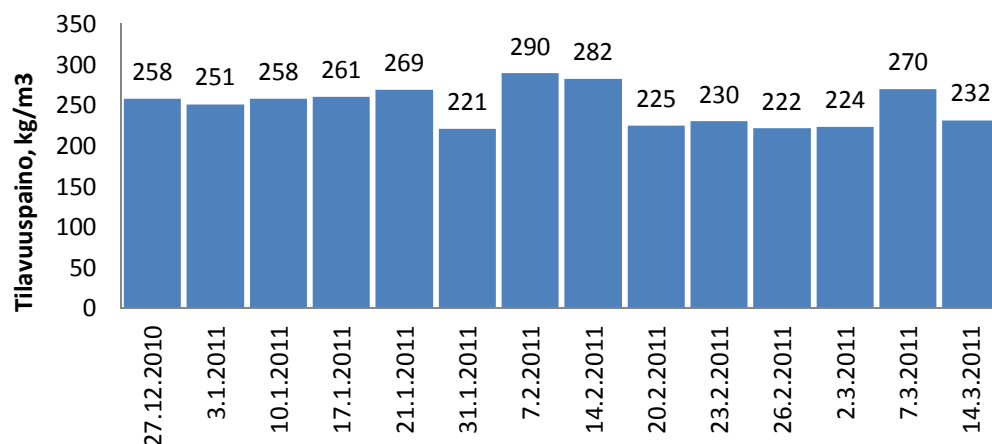
4.3.2 Irtotiheys

Irtotiheys kertoo sen kuinka paljon puu painaa yhdeltä kuutiometriltä. Irtotiheys on polttoaineen tärkeä ominaisuus, koska tehollisen lämpöarvon ja irtotiheyden perusteella voidaan laskea polttoaineen energiatiheys.

Menetelmä perustuu SFS-EN 15103 kiinteiden biopolttoaineiden irtotiheyden määrittämisen mukaiseen standardiin.

Ensiksi otetaan tilavuuspainon määrittämiseen soveltuva astia. Astia täytetään kukkuralleen hakkeella ja tiputetaan kaksi kertaa 15 cm korkeudesta lattialle. Tämän jälkeen ylimääräinen hake otetaan astian päältä pois niin, että haketta on astian reunojen tasalle. Lopuksi punnitaan hakeastia ja tulos jaetaan astian tilavuudella. Tulokseksi saadaan kg/m^3 .

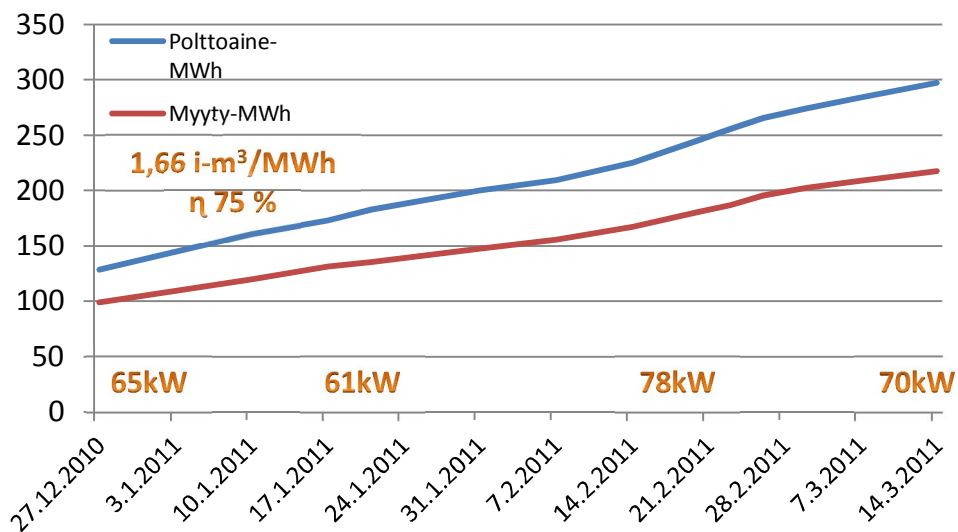
Tilavuuspaino vaihteli opinnäytetyössäni otettujen näytteiden aikana 221 kg/m^3 – 290 kg/m^3 (ks. kuvio 13).



KUVIO 12. Hakkeen tilavuuspainon seuranta

4.3.3 Hakkeen energiasisältö ja hyötysuhde

Bioenergiakeskuksen lämpölaitoksella on energiamittari, josta nähdään kulutettu energiamäärä. Vastaavasti hakenäytteiden perusteella voitiin laskea lämpölaitoksella käytetyn hakkeen energiasisältö. Kun verrataan kulutettua ja hakkeen sisältämää energiaa toisiinsa saadaan tulokseksi lämpölaitoksen hyötysuhde, joka tässä tapauksessa oli keskimäärin 75 %. Testijakson aikainen keskiteho on laskettu näistä arvoista.



KUVIO 13. Hakkeen energiasisältö ja hyötysuhde

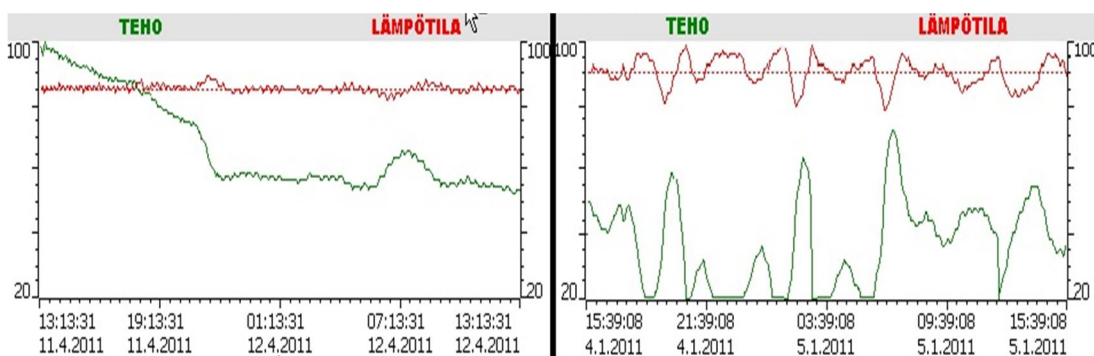
5 TULOKSET

Säätöjen tuloksena ei varsinaisesti päästy alkuperäiseen tavoitteeseen, jossa palaminen ja kattilan reagointi saataisiin optimaaliseen tilaan, mutta parannusta alkuperäiseen syntyi.

Järjestelmän virittäminen Ziegler-Nicholas menetelmällä antoi arvot, jotka toimivat parhaiten niin tasa- kuin piikkikuormatilanteessakin verrattuna alkuperäiseen (ks. kuvio 15). Ziegler-Nicholas tavalla saadut arvot tekevät laitoksen toiminnasta hitaasti reagoivan. Laitoksen toiminta on huomattavasti parempaa kuin ennen säätötoimenpiteitä. Laitoksen lämpötila pysyy asetusarvossa, jos lämpötilantarve on suhteellisen vakio. Piikkikuormatilanteissakin laitoksen toiminta on rauhallisempaa kuin aikaisemmin, mutta pienimuotoista huojuntaa kuitenkin tapahtuu. Huojunta kuitenkin tasaantuu huomattavasti rauhallisemmin kuin alkuperäisillä säädöillä.

Puhtaan ja hyvän palamisprosessin lähtökohtana on, että tehon nostot ja laskut ovat rauhallisia. Tällöin lämpötila ja teho pysyvät melko stabiilina ja eikä valtavaa huojuntaa ilmene.

Alkuperäisten säätöjen reagoidessa aggressiivisesti jokaiseen lämpötilanmuutokseen, tuloksena oli huojuva teho sekä lämpötila. Nykyinen säätö reagoi rauhallisesti, jolloin ei tapahdu liian nopeaa tehon nostoa. Liian tehokkaan reagoinnin tuloksena on nopea tehon nosto, jonka tuloksena taas vastaavasti lämpötila nousee liian nopeasti ja teho lähtee taas jyrkkään laskuun, tuloksena huojuva lämpötila ja teho.



KUVIO 14. Säädetty verrattuna alkuperäiseen

Jos järjestelmä haluttaisiin aivan optimaaliseksi niin kuin oli alkuperäinen tavoite, joudutaan piikkikuormatilanteessa lämpötilaa nostamaan hakekattilan rinnalla olevalla öljypolttimella. Jos taas järjestelmä säädetään nopeasti reagoivaksi niin, että öljyä ei tarvitse käyttää lisälämmitykseen, kasvaa lämpölaitoksen hälytysten määrä mahdollisen alilämmön seurauksena, sekä palaminen on epätasaista. Onko sitten parempi, että järjestelmä palaa tasaisesti ja puhtaasti biopolttoaineella, mutta piikkikuormatilanteessa käytetään öljyä lisälämmitykseen vai se, että palaminen on epätasaisempaa ja huonompaa, mutta öljyä ei käytetä?

Pelkällä biopolttoaineella lämmitettäessä en tutkimuksen tulosten perusteella usko, että hakekattilan toimintaa saadaan paremmaksi suuren piikkikuorman sattuessa. Järjestelmä säädettyä nopeasti reagoivaksi ilmenee alkuperäinen ongelma eli kattila nostaa tehonsa nopeasti, mutta vastaavasti asetusarvon saavuttamisen jälkeen lämpötila jatkaa vielä nousuaan ja laitos siirtyy ylläpitokäynnille, seurauksena epäpuhdas palaminen. Järjestelmä säädettyä hitaammin reagoivaksi niin nopean lämmitystarpeen tullessa kattila ei ehdi vastaamaan siihen tarpeeksi nopeasti, kattilan lämpö laskee liian alas ja tulee alilämpöhälytys. Toisaalta, jos hitaan järjestelmän rinnalla on öljykattila, niin öljyllä voitaisiin korvata hetkellisesti hakekattilan hidas reagointi. Hakkeella poltettaessa ei koskaan päästä nopeaan reagointiin lämmitystehotarpeen kasvaessa nopealla aikavälillä.

Itse kokisin parhaaksi ja ympäristöystävällisemmäksi Ziegler-Nicholas tyyppisen viritämisen tuloksena saatua säätöä. Tämän tyyppisen säädön ongelmana sen hitauden vuoksi on se, että kattila reagoi hitaasti muutoksiin, jolloin suurten piikkikuormien hallintaan tarvitaan öljypoltinta. Öljypolttimen ei tarvitse koskaan olla kauaa päällä sillä hakekattilan noustessa takaisin tiettyyn lämpöön öljypoltin sammuu.

Bioenergiakeskuksen kattilan koko on 200 kW, mutta keskimääräinen tehontarve on vain n.70 kW, kovalla pakkasjaksolla. Nykyinen lämpölaitos on siis hieman ylimitoitettu, mistä johtuukin, että säätilan kääntyessä plussalle ja lämmitystarpeen tippuessa, lämpölaitoksen palamisprosessi muuttuu. Tutkimuksessa saadut säädöt toimivat hyvin pakkasjaksolla, mutta säätilan lämmitessä sama alkuperäinen lämpötilan ja te-

hon huojunta ilmeni jälleen. Johtopäätöksenä voi pitää, että lämpölaitos toimisi kokonaisuudessaan paremmin, jos se olisi hieman pienempi ja saisi näin ollen toimia suuremmalla teholla. Nykyinen 200 kW laitos tuottaa kevätaikaan melkein ylläpitoajolla Bioenergiakeskuksen tarvitseman lämmön. Ylläpitoajo tarkoittaa samaa kuin ns. auton tyhjäkäynti.

Yhtenä mahdollisuutena olisi myös rakentaa kattilan rinnalle varaaja, joka suuren piikkikuorman tullessa luovuttaisi lämpöä ja näin ollen kattilan ei tarvitsisi äkillisesti reagoida lämmöntarpeeseen. Kattilan palaminen olisi tasaisempaa, kun sen ei tarvitsisi suoranaisesti vastata piikkikuorman aiheuttamiin äkillisiin lämpötarpeisiin. Varaaja olisi myös hyvä turva lyhytaikaisten häiriöiden aikana.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn suorittamisessa ilmeni huomattavan paljon ongelmia verrattuna alkuperäiseen suunnitelmaan. Säättötoimenpiteitä suoritettaessa bioenergiakeskuksen uuden testauslaboratorion 70 m³ lämminvesivaraajaa lämmitettiin työssäni käsittelevällä lämpölaitoksella. Lämminvesivaraajan lämmittäminen suoritettiin epäsäännöllisinä aikoina ja lämmitystehoa otettiin vaihtelevia määriä. Edellä mainitun syyn johdosta opinnäytetyössäni tekemistäni säättöajoista moni epäonnistui. Kesken testiajon testauslaboratorio saattoi alkaa ottamaan lämmitysvettä varaajaan, jolloin sen hetkistä testisäättöjen vaikutuksesta vakiotilaan ei saatu tietää.

Alkuperäisen suunnitelman mukaan tarkoituksena oli löytää hyvät säädöt kahdelle erilaiselle polttoaineelle, mutta koska niin sanottuihin hyviin optimaalisiin säätöihin ei päästy yhdelläkään polttoaineella, niin jätettiin toinen polttoaine pois toteutuksesta. Toisena syynä toisen polttoaineen pois jättämisestä oli lämpölaitokselle toimitetun polttoaineen liiallinen tasalaatuisuus, joten sen vaikutusta palamiseen ei pystytty toteamaan.

Alkuperäisessä suunnitelmassa oli myös, että laitteiston antamia savukaasuaroja verrataan savukaasuanalysointilaitteen antamiin tuloksiin. Bioenergiakeskuksen savukaasuanalysointilaitteisto on kuitenkin rikki, joten tämä testaus jäi pois työn toteutuksesta.

Työtä aloitettaessa oletuksena oli, että työssä säädettävä automaation PI- säätö toimii samalla tavalla kuin muissakin prosessiteollisuudessa. Säädin toimii periaatteessa samalla tavalla, mutta käytännössä ei. Hakelämmitysjärjestelmän käyttäytyminen on huomattavan hidasta. Tyypillisesti PI- säätöä käytetään tilanteissa, joissa säätimen vasteajat ovat muutamasta millisekunnista minuuttiin (ks. kuvio 6), työssä olevassa lämmitysjärjestelmässä vasteajat olivat kuitenkin useita minuutteja (ks. kuvio 10). Hakelämmitysjärjestelmän suuri viiveellisyys toi lisähaastetta työhön, koska säätöä piti aina seurata pitkään ja katsoa kuinka se vaikuttaa eri tilanteissa. Tapauksessa jossa vasteaika olisi lyhyt, säätäminen olisi helpompaa, koska silloin oltaisiin varmoja,

että säätö toimii juuri sillä hetkellä. Hake lämmitysjärjestelmään tehdyistä säädön vaikutuksista ei voinut olla koskaan varma, koska aikana jolla säätöä seurattiin, saattoi tulla muita ulkoisia muuttujia sekoittaen tulosta.

Tässä tutkimuksessa olisi voinut heti työn aloittaessa tehdä suurempia muutoksia järjestelmän PI-säätöön, jolloin olisi nopeammin päässyt kiinni järjestelmän toimintaan. Alussa kuitenkin tein liian pieniä muutoksia, jotka eivät vaikuttaneet paljoakaan ja näin ollen alussa aikaa meni paljon saamatta tuloksia. Nyttemmin olisinkin käyttänyt enemmän aikaa rajujen säätöjen tekemiseen enkä pieneen hienosäätöön. Prosessin ollessa viiveellinen ei hienosäädöllä ole niinkään merkitystä vaan järjestelmä pitää saada toimimaan laajana kokonaisuutena.

Tulevaisuudessa vastaavan tyyppisissä rakennuksissa kannattaisi enemmän kiinnittää huomiota lämmitysjärjestelmän mitoitukseen ja sen soveltuvuuteen kohteeseen. Toisaalta on hyvä ottaa huomioon mahdolliset laajennukset, jolloin lämmitystarve kasvaa. Luulen, että Bioenergiakeskuksen lämpölaitoksen suunnittelussa on myös otettu mahdollinen laajennus mukaan, josta johtuen laitos on nyt ylimitoitettu.

Opinnäytetyössä käsitellyn Bioenergiakeskuksen hakelämpölaitoksen toiminnan epätasaisuutta saatiin työssä tasaisemmaksi pakkastalvella, mutta kevät ja syksy eivät parantuneet. Ideana kattilan rinnalle asennettavasta lämminvesivaraajasta kannattaisi tulevaisuudessa pohtia. Jo aikaisemmin työssä kerroin kuinka sillä saataisiin kattilan palamisprosessia tasaisemmaksi ja näin ollen piikkikuormatilanteessa varaaja toimisi tietynlaisena puskurina ja turvana. Varaaja luultavasti myös tasaisi kevään ja syksyn palamista, jolloin epätasainen palaminen näinä aikoina korjaantuisi. Työssä ei kuitenkaan paneuduttu tarkemmin varaajan tuomiin hyötyihin tai haittoihin eikä sen taloudellisiin näkökulmiin, mutta tulevaisuutta ajatellen tätä kannattaisi pohtia.

LÄHTEET

Alakangas, E. 2001. Hakelämmitysopas. Helsinki, Joensuu: Motiva, Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu.

Alanen, V-M. 2001. Hakelämmitysopas. Helsinki, Joensuu: Motiva, Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu

Frondelius, L. 2007. Harjoitustehtäviä PI säätimen virittämisestä. Viitattu 16.2.2011. <http://moodle.keuda.fi/kansiot/KAO-LF/SAATO/VIRITYSHARJOITUS/index.htm>

Harju, M &, Keränen, R-M. 2004. Typen oksidit. Viitattu 1.3.2011. <http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/hiilivoimala/typenoksidit.htm>

Hettula, K. 2010. Säätojärjestelmät ja energiansääto. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 25.3.2011. https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/17303/Hettula_Kari.pdf?sequence=1

Kuinka kuumaa savukaasun tulisi olla? 2003. Vtt rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Viitattu 5.2.2011. <http://www.rte.vtt.fi/webdia/oljylampo/opastus/faq.asp?Viite1=OF138>

Mitä on yli-ilmamäärä? 2003. Vtt rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Viitattu 5.2.2011. <http://www.rte.vtt.fi/webdia/oljylampo/opastus/faq.asp?Viite1=OF136>

Ohtonen, O. 2007. Lämpötilan PID- säätö reaaliaikajärjestelmässä. Insinöörityö. Kajaanin ammattikorkeakoulu, Tekniikan ja liikenteen ala, Tietotekniikan koulutusohjelma. Viitattu 30.3.2011. <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/13008/TTI9SOlliO.pdf?sequence=1>

Ova-ohje: Hiilimonoksidi. 2011. Työterveyslaitos. Viitattu 28.2.2011. <http://www.ttl.fi/ova/hiilmono.html>.

PID- säätimen virittäminen. 2006. Oulun yliopisto. Viitattu 16.2.2011. <http://cc.oulu.fi/~posyswww/opiskelu/sytelabrat/tyo1.pdf>

Savula-Seppälä, T. 2010. Lämpöyrittäjyyden kannattavuus lämmönostajan ja –myyjän sekä metsänomistajan näkökulmasta. Maataloustieteen Päivät 2010 Helsingissä 12-13.1.2010.

SFS-EN 15103. 2010. Kiinteiden biopolttoaineiden irtotiheyden määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 15.1.2011. <http://www.jamk.fi/kirjasto>, Nelli-portaali, SFS Online.

SFS-EN 14774-2. 2010. Kiinteiden biopolttoaineiden kosteuspitoisuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 15.1.2011.
[Http://www.jamk.fi/kirjasto](http://www.jamk.fi/kirjasto), Nelli-portaali, SFS Online.

Solmio, H. & Alanen, V-M. 2010. Lämpöyrittäjätoiminta vuonna 2009. Rajamäki: TTS tutkimus.

Solmio, H. & Tuomi, S. 2007. Lämpöyrittäjien kustannukset ja toiminnan kannattavuus. Rajamäki: TTS tutkimus.

Säätötuli Oy. 2009. Hake. Viitattu 11.2.2011.
http://www.saatotuli.fi/tmp_saatotuli_site_8.asp?sua=1&lang=1&s=45&q=y

Tuomi, S. & Solmio, H. 2005. Miksi lämpöyrittäjäksi? Teoksessa Hakelämmöstä yritystoimintaa. Toim. A. Kokkonen ja I. Lappalainen. Kuopio: Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, Motiva Oy, Työtehoseura.