

Ari Autio

Tuoreen puun polttaminen lämpölaitoksessa

Opinnäytetyö

Kevät 2017

SeAMK Elintarvike- ja maatalous

Agrologi (AMK)

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: SeAMK Elintarvike ja maatalous

Tutkinto-ohjelma: Agrologi (AMK)

Suuntautumisvaihtoehto: Liiketalous

Tekijä: Ari Autio

Työn nimi: Tuoreen puun polttaminen lämpölaitoksessa

Ohjaaja: Jussi Esala

Vuosi: 2017

Sivumäärä: 41

Liitteiden lukumäärä: -

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Alajärven Lämpö Oy. Opinnäytetyön aiheena oli tuoreenpuun polttaminen Alajärven Lämmön uudella 8 MW:n voimalaitoksella, jossa uutena tekniikkana on yhdistetty savukaasupesuri ja lämpöpumppu. Koepoltto tehtiin tuoreella hakkeella. Uuden voimalaitoksen polttoainekustannuksia ajankajalta 21.11.2016–19.5.2017 suhteutettiin vanhan voimalaitoksen vuosien 2012–2015 polttoainekustannuksiin.

Tavoitteena oli tutkia Alajärven Lämmön lämpölaitoksen energiankulutuksen ja kustannusten säästöä savukaasupesuria ja lämpöpumppua käytettäessä. Opinnäytetyön tavoitteena oli suorittaa tuoreen puun koepoltto ja tutkia, saadaanko poltossa talteen polton aikana vielä hakkeesta haihtumattomia aineita kuten terpeeniä.

Sipilän hallitusohjelmassa tavoitellaan uusiutuvan energian osuuden lisäämistä yli 50 prosentin energian loppukulutuksesta. Alajärven Lämpö on vähentänyt turpeen polttoa ja siirtynyt enenevässä määrin tuoreen puun polttoon.

Tuloksena saatiin selville, että energiatehokkuus lisääntyi savukaasupesurilla ja lämpöpumpulla yli 20 % kokonaisenergiämäärästä.

Tulevaisuudessa, tiukentuvien savukaasujen hiukkaspäästöjen ja energiatehokkuuden vaatimusten kasvaessa Alajärven Lämmön käyttämä tekniikka tulee olemaan yleisessä käytössä.

Avainsanat: tuorepuu, savukaasupesuri, lämpöpumppu, kastepiste

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Food and Agriculture

Degree programme: Agriculture and Rural Enterprises

Specialisation: Business Orientation

Author: Ari Autio

Title of thesis: Combustion of green wood in a district heating plant

Supervisor: Jussi Esala

Year: 2017

Number of pages: 41

Number of appendices: -

The thesis was assigned by Alajärven Lämpö Oy. The theme of the thesis was the combustion of green (wet) wood in Alajärven Lämpö's new 8 MW district heating plant, which features a recently installed combined flue gas scrubber and heat pump. The combustion test was made with green woodchips. The fuel costs for the new district heating plant for the period of November 21, 2016–May 19, 2017 were proportioned with the fuel costs for the old district heating plant for 2012–2015.

The purpose was to study savings in costs and energy consumption for the district heating plant when using the flue gas scrubber and the heat pump. The goal of the thesis was to conduct a combustion test with green wood and to study whether substances which had not yet evaporated from the woodchips, such as terpene, could be recovered during combustion.

Included in Prime Minister Juha Sipilä's Government Programme is the aim to increase the share of renewable energy above 50 per cent of final energy consumption. Alajärven Lämpö has decreased combustion of peat and shifted increasingly towards combustion of green wood.

As a result of the test, it was discovered that, with the flue gas scrubber and the heat pump, energy efficiency increased by more than 20 per cent of the total amount of energy.

In the future, along with more stringent limits for particle emissions in flue gases and increasing requirements for energy efficiency, the technology used by Alajärven Lämpö will be commonly used.

Keywords: green wood, flue gas scrubber, heat pump, dew point

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	1
Thesis abstract.....	2
SISÄLTÖ.....	3
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo.....	4
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 ALAJÄRVEN LÄMPÖ OY.....	8
3 KAUKOLÄMMÖN TOIMINTAYMPÄRISTÖ.....	11
3.1 Leijupoltto.....	12
3.2 Arinapoltto.....	13
3.3 Savukaasupesuri lämpöpumpulla.....	14
3.4 Tuoreen puun poltto.....	19
3.5 Kuori.....	21
3.6 Ensiharvennuksesta metsähaketta.....	22
3.7 Turve.....	24
4 ALAJÄRVEN LÄMMÖN POLTTOTEKNIIKAN KEHITTÄMINEN ...	27
4.1 Polttokokeen järjestelyt.....	27
4.2 Koepolton tulokset.....	31
5 TULOKSET.....	34
6 POHDINTAA.....	37
LÄHTEET.....	39

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluettelo

Kuva 1. Alajärven Lämpö Oy:n uusi 8 MW:n voimalaitos.....	9
Kuva 2. Alajärven Lämmön polttoaine terminaali.....	10
Kuva 3. Täytekappalekerros koostuu yksittäisistä kappaleista	16
Kuva 4. Alajärven Lämmön terminaalissa oleva kuorikasa	22
Kuva 5. Energiapuun korjuuta ensiharvennus metsikössä.....	23
Kuva 6. Rankapuun haketusta mobiilimurskaimella terminaalissa.....	28
Kuva 7. Polttoaineen varastosiiilot koepolton alussa	29
Kuva 8. Savukaasupesurin näyttötaulu koeajon aikana	30
Kuvio 1. Kiinteiden puupolttoaineiden käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa.....	12
Kuvio 2. Renewan 8 MW:n arinakattilan toimintakaavio	14
Kuvio 3. Caligon savukaasupesurin ja lämpöpumpun kytkentä.	17
Kuvio 4. Kastepistelämpötila polttoainekosteuden funktiona	17
Kuvio 5. Savukaasujen luovuttama energia ja kastepiste	18
Kuvio 6. Savukaasusta saatavilla oleva lämmön talteenoton teho hakkeella ja turpeella. Jäännöshappi on savukaasuissa 5 %.	19
Kuvio 7. Tuoreen puun kemiallinen koostumus.....	20
Kuvio 8. Turpeen koostumus kuiva-aineesta	25
Kuvio 9. Turpeen tuotanto ja energiaturpeen kulutus Suomessa.....	26
Kuvio 10. Lämpöpumppu pois päältä 2.5.2017 klo 10.15–3.5.2017 klo 7.00	31

Taulukko 1. Alajärven Lämmön kaukolämpölaitoksessa käytettävät polttoaineet...	9
Taulukko 2. Alajärven Lämmön energiamäärät vuosina 2013–2015	10
Taulukko 3. Alajärven Lämmön polttoaineiden analyysien tulokset.	29
Taulukko 4. Koepolton tulokset 30.3–6.4.2017.	32
Taulukko 5. Alajärven Lämmön 8 MW:n voimalaitoksen käyttödata 21.11.2016– 19.5.2017	32
Taulukko 6. 8 MW:n voimalaitoksen polttoaineiden kulutus ja energiamäärä 21.11.2016–19.5.2017	32
Taulukko 7. Alajärven lämmön polttoaineiden hinnat 2017.....	33
Taulukko 8. 8 MW:n voimalaitoksen energiamäärä ja polttoaineiden hinnat ajalla 21.11.2016–19.5.2017.	33
Taulukko 9. Keskimääräiset energiamäärät vuosina 2012–2015 ja vuonna 2016 toimitettu 30164 MWh energiamäärä asiakkaille suhteutettuna energiaa verkkoon sekä polttoaineisiin (2016) vuosien 2012–2015 keskiarvoista.	34
Taulukko 10. 21.11.2016–19.5.2017 tulokset suhteutettuna 2016 vuoden myyntiin.	35
Taulukko 11. Laskennallinen polttoaine kustannus 4 MW:n ja 3,5 MW:n kattiloilla vuoden 2016 kulutuksen mukaan.	35
Taulukko 12. Laskennallinen polttoaine kustannus uudella 8 MW:n voimalaitoksella vuoden 2016 kulutuksen mukaan.	36

Käytetyt termit ja lyhenteet

Kuori	Ainespuuta kuorittaessa syntyvä tähde
Luvo	Kattilan palamisilman esilämmitin
Metsähake	Ranka-, kokopuu ja hakkuutähdehakkeen yleisnimitys
MW (Megawatti)	Polttoaineteho megawatteina
MWh (Megawattitunti)	Energianmäärä ajan mukaan
Pipo-asetus	Valtioneuvoston asetus polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiantuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista
Rankapuu	Karsittu runko, joka ei yleensä täytä ainespuulle asetettuja vaatimuksia
Turve	Suokasvien hitaan maatumisen seurauksena syntynyttä, epätäydellisesti hajonnutta eloperäistä maalajia
TWh (Terawattitunti)	Polttoaineteho megawatteina

1 JOHDANTO

Tuoreen puun polttaminen ja voimalaitos savukaasupesurilla ja siihen integroidulla lämpöpumpulla ovat vielä näinä päivinä uutta ja harvinaista tekniikkaa Suomessa. Alajärven Lämmön uusi 8 MW:n voimalaitos on suunniteltu polttamaan kosteudeltaan enimmillään 60 prosentin kiinteitä polttoaineita. Voimalaitoksen savukaasupesurilla ja lämpöpumpulla saadaan savukaasujen sisältämä kosteus energiana takaisin. Lämpöpumpulla jäähdytetään kaukolämmön paluuvettä savukaasujen kastepistelämpötilan saavuttamiseksi pesurin lauhduttimessa. Kovilla pakkasilla kaukolämpöverkon meno- ja paluuvirtauksien lämpötila nousee. Lämpötilan nousu heikentää savukaasussa olevan kosteuden tiivistymisen savukaasupesurissa. Savukaasupesurin ja lämpöpumpun tarkoituksena on parantaa energiantuotannon kokonaishyötysuhdetta ja vähentää voimalaitoksen polttoainekustannuksia. Savukaasupesurin tarkoituksena on myös puhdistaa savukaasut pipo-asetuksen vaatimuksen mukaisiksi.

Tämä opinnäytetyö on tehty selvittämään tuoreen puun polttoa laitoksessa, jossa on savukaasupesuri ja lämpöpumppu. Opinnäytetyö vertaa Alajärven Lämmön uuden 8 MW:n voimalaitoksen polttoainekustannussäästöjä Alajärven Lämmön 3,5 MW:n ja 4 MW:n kattiloihin nähden. Opinnäytetyön tehtävä on myös selvittää onko tuoreessa hakkeessa ja kuoressa jäljellä haihtuvia yhdisteitä ja uuteaineita. Opinnäytetyössä perehdyttiin polttoainekustannuksiin niiden ollessa suurin menoerä lämpövoimalaitoksen kustannuksissa.

2 ALAJÄRVEN LÄMPÖ OY

Opinnäytetyön tilaajana oli Alajärven Lämpö Oy, josta Alajärven Kaupunki omistaa 60 prosenttia ja Alajärven Sähkö Oy 40 prosenttia. Alajärven Lämpö Oy perustettiin vuonna 1982 kehittämään kaukolämpötoimintaa Alajärvelle. Toiminta alkoi Alajärven kaupungin laitettua puoli vuotta aikaisemmin 1,2 MWh raskasöljykattilan kaukolämpökeskukseksi Alajärven kaupungin yläasteen alueelle. Kaukolämpötoiminta siirtyi kokonaan Alajärven Lämpö Oy:n haltuun vuoden 1985 alusta alkaen.

Vuoden 1995 syksyllä alkoi suunnanmuutos kun raskas polttoöljy jäi vain huippu- ja varapolttoaineeksi kiinteän biopolttoainekattilan rakentamisen alettua. Syksyllä 1996 valmistui Ekopointin 3,5 MW:n voimalaitos. Kaukolämmön energiamyynnin lisääntyttyä vuosittain, kaukolämmön tuotantoa laajennettiin uudella Termopointin 4 MW:n kattilalla. Uusi 4 MW:n kattila sijoitettiin samaan rakennukseen vanhan kattilan kanssa.

Alajärven uutta lämpölaitosta lähdettiin suunnittelemaan kasvaneen energiantarpeen vuoksi. Suunnitteluun vaikutti myös valtioneuvoston asetus 750/2013, joka tiukentaa olemassa olevien alle 50 megawatin energiatuotantoyksiköiden rikkidioksidin, typenoksidien ja hiukkasten päästöjä vuoden 2018 alusta (A 24.10.2013/750). Projektiin kuului uuden voimalaitoksen rakentaminen savukaasupesurilla ja olemassa olevien voimalaitosten jättäminen huippu- ja varavoimalaitoksiksi. Vähäisen käytön takia olemassa oleviin laitoksiin ei tarvitse asentaa savukaasujen puhdistuslaitteistoja. Raskaan ja kevyen polttoöljyn polttamisesta luovutaan.

Vuonna 2016 valmistui Renewan 8 MW:n lämpölaitos savukaasupesurilla ja lämpöpumpulla (kuva 1) sekä biopolttoaineiden terminaali (kuva 2). Kaikki Alajärven Lämmön kiinteän polttoaineen kattilat ovat arinapolttokattiloita.

Alajärven Lämpö toimittaa kaukolämpöä Alajärven kaupungin keskustan alueelle sekä lämmittää erillisillä hakelämpökeskuksilla Ylikylän ja Hoiskon kouluja. Kaukolämpöenergiaa myytiin vuonna 2016 yhteensä 30 164 MWh.



Kuva 1. Alajärven Lämpö Oy:n uusi 8 MW:n voimalaitos (Tekijän ottama valokuva).

Taulukko 1. Alajärven Lämmön kaukolämpölaitoksessa käytettävät polttoaineet (Pesu, 2017)

Vuosi	Polttoaine MWh	Palaturve %	Hake %	Kuori %	Kierrätyspuu %	Öljy %
2016	40 628	68	19	10,9	0	2,1
2015	38 382	67,3	31,4	0	0,6	0,7
2014	38 328	74,1	21,6	0	3,2	1,1
2013	37 806	61	29	0,6	8,7	0,7
2012	38 498	69,8	17,3	1,5	9,5	1,9
2011	34 384	84,2	12,2	0	1,8	1,8
2010	38 763	84,9	12,4	0	0,7	2

Taulukko 2. Alajärven Lämmön energiamäärät vuosina 2013–2015
(Pesu, 2017).

Vuosi	2015	2014	2013
Polttoaineet MWh	38 382	38 328	37 806
Kaukolämpö verkostoon MWh	32 896	34 038	33 209
Myynti asiakkaille MWh	27 960	28 987	28 126



Kuva 2. Alajärven Lämmön polttoaine terminaali
(Tekijän ottama valokuva).

3 KAUKOLÄMMÖN TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Euroopan Unioni on asettanut ilmasto- ja energiapolitiikan tavoitteet vuoteen 2030. Keskeisintä näissä tavoitteissa on vähentää kasvihuonepäästöjä vähintään 40 prosenttia vuoden 1990 tasosta. Vähennystavoite päästökaupan sektorilla on vähintään 40 prosenttia ja päästökaupan ulkopuolisella taakanjakosektorilla 30 prosenttia vuoden 2005 tasosta. Suomen velvoitteeksi komissio on antanut asetusehdotuksessa 39 prosentin päästöjen vähentämisen taakanjakosektorilla. (Huttunen 2017, 11.)

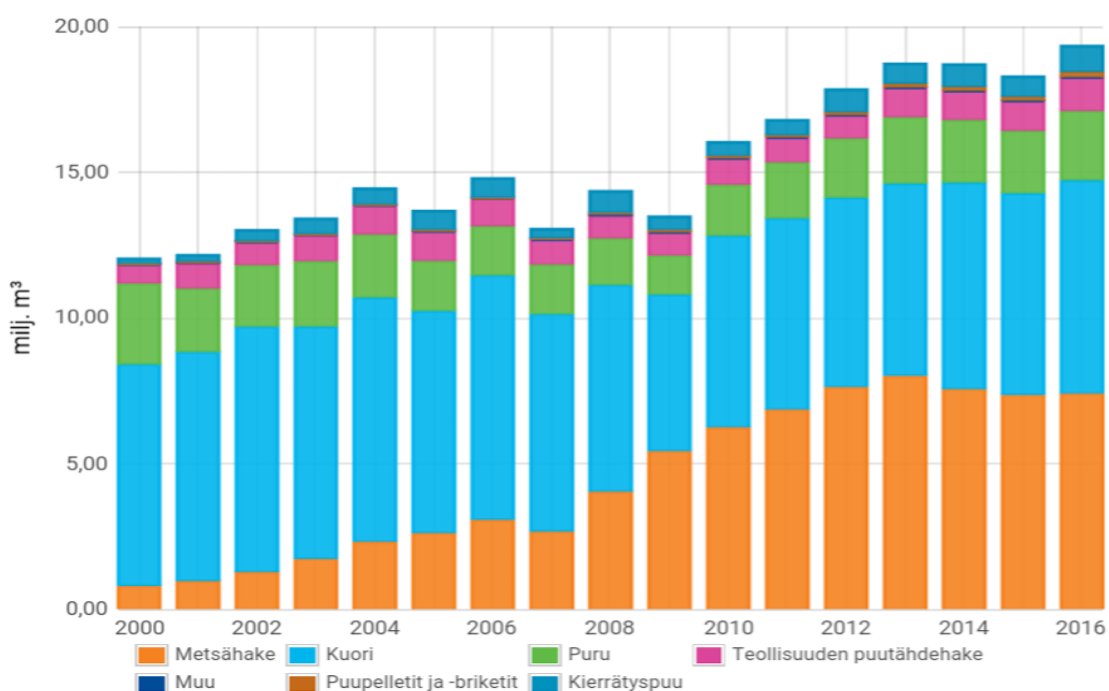
Pääministeri Sipilän hallituksen ohjelmassa on energian osalta asetettu kunnianhimoiset tavoitteet. Hallitusohjelmassa tavoitellaan uusiutuvan energian osuuden lisäämistä yli 50 prosentilla energian loppukulutuksesta. Ohjelmassa tavoitellaan myös energiaomavaraisuuden kasvattamista yli 55 prosentin ja hiilen käytöstä luopumista energiantuotannossa sekä tuontiöljyn kotimaisen käytön puolittamista. Liikenteen uusiutuvien polttoaineiden osuutta tavoitellaan nostettavaksi 40 prosenttiin. Sipilän hallitusohjelmassa nämä pyritään saavuttamaan vuoteen 2030 mennessä. (Huttunen 2017, 11.)

Sipilän hallitus hyväksyi ja antoi selontekona eduskunnalle 24.11.2016 kansallisen energia- ja ilmastostrategian vuoteen 2030. Strategiassa on konkreettisia tavoitteita ja toimia, joilla Suomi pääsee Sipilän hallitusohjelmassa ja EU:ssa sovittuihin energia- ja ilmastotavoitteisiin vuoteen 2030 mennessä. (Huttunen 2017, 11–13.)

Suomessa useat kunnat ovat asemakaavassa maankäyttö- ja rakennuslailla velvoittaneet rakennukset kaukolämmön pakkokäyttöön. Korkein hallinto-oikeus päätti 30.3.2017, että ” *Maalämpöjärjestelmä oli sellainen uusiutuviin energialähteisiin perustuva vähäpäästöinen lämmitysjärjestelmä, jota maankäyttö- ja rakennuslain 57 a §:n 3 momentin 2 kohdassa tarkoitettiin.*” (Korkein hallinto-oikeus 2017).

Korkeimman oikeuden päätös on merkittävä ennakkotapaus kaukolämpöalalle, joka lisää asemakaavasta riippumatta omakotitaloasukkaiden mahdollisuuksia vaihtoehtoisiin energiaratkaisuihin. Kaukolämmön tarvetta vähentävät vaihtoehtoisten energiaratkaisujen lisääntymisen lisäksi myös rakennusten energiatehokkuuden parantuminen. (Leskinen 2017.)

Puun energiakäyttö saavutti kaikkien aikojen ennätyksen lämpö- ja voimalaitoksissa vuonna 2016 (kuvio 1). Kiinteitä puupolttoaineita käytettiin vuonna 2016 kaikkiaan 19,3 miljoonaa kuutiometriä ja energiana se on 37 terawattituntia. Puupolttoaineiden käyttö kasvoi edellisvuodesta 1,1 miljoonaa kuutiometriä. Merkittävintä puupolttoainetta oli metsähake 7,4 miljoonan kuutiometrin käytöllä ja lämmöntuotannossa metsähaketta käytettiin 2,9 miljoonaa kuutiometriä. Metsäteollisuuden sivutuotepuuta käytettiin 10,9 miljoonaa kuutiometriä ja siitä oli eniten kuorta, 7,3 miljoonaa kuutiometriä. (Luonnonvarakeskus 2017.)



Kuvio 1. Kiinteiden puupolttoaineiden käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa (Luonnonvarakeskus 2017).

3.1 Leijupoltto

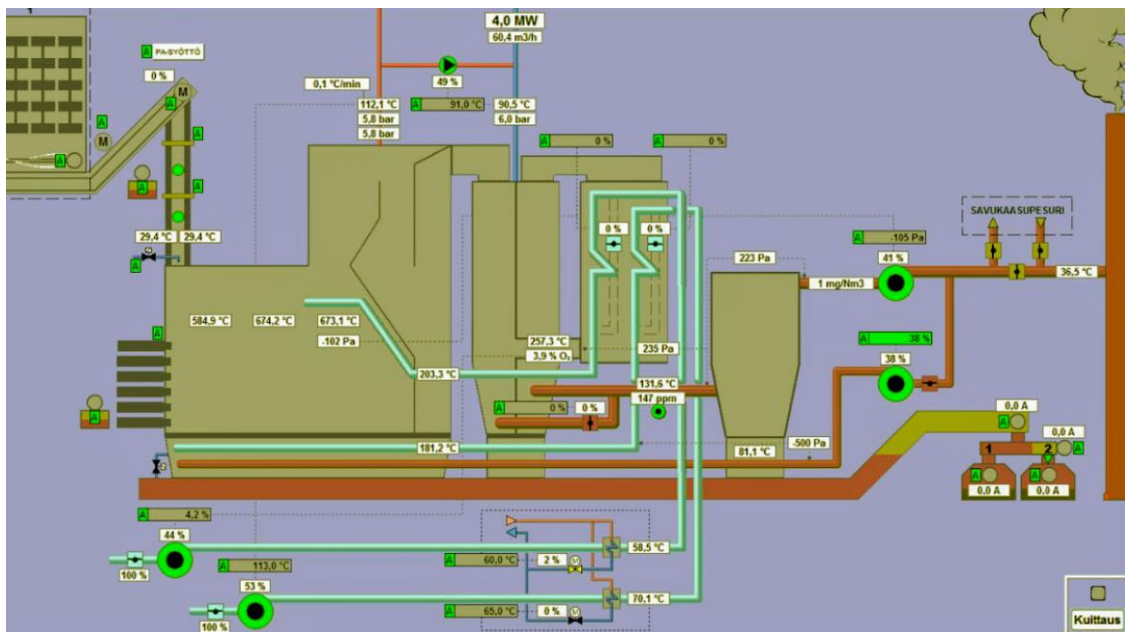
Leijupolton kehittämisessä Suomi on ollut maailman johtavia maita. Leijupoltoa on joko kerros- tai kiertoleijupoltto. Leijupolttoon soveltuvat erityisen huonolaatuiset polttoaineet. Kerrosleiju soveltuu paremmin märille ja matalalämpöarvoisille polttoaineille ja on halvempi kuin kiertoleiju. Polttoaine joutuu leijupoltossa tekemisiin kuumen leijutushiekan kanssa. Tällöin aineen- ja lämmönsiirto on tehokasta. (Leijupoltto 2010.)

Leijupoltossa polttoainetta ei tarvitse juurikaan esikäsitellä. Polttoaineen nopeat ja suuretkin vaihtelut ovat mahdollisia. Leijupoltto vaatii paljon energiaa ja se voidaan laskea leijupolton haitaksi. (Leijupoltto 2010.)

3.2 Arinapoltto

Arina- ja leijupoltossa polttoaine puretaan purkaimilla varustettuun siiloon. Polttoaine siirtyy purkaimien avulla kuljetinjärjestelmään, joka siirtää polttoaineen syötösuppilon kautta mekaaniselle viistoareenalle, jossa varsinainen palaminen tapahtuu (kuvio 2). Tässä arinatyyppissä ei ole varsinaista tuhka-arinaa. Etupesässä eli varsinaisessa tulipesässä alipaine pidetään savukaasupuhaltimen ja säätöjärjestelmän avulla. Kattilatehoa säädetään ensiöilmapuhaltimen säätöpellin ja taajuusmuuttajan avulla. Palamistapahtumaa eli lähinnä savukaasujen jäännöshappipitoisuutta säädetään toisiöilmapuhaltimen säätöpellin ja taajuusmuuttajan avulla. Kaksi vesikiertoista patteria ja savukaasuluvo lämmittävät palamisilmaa. Kosteaa polttoainetta palamista tehostetaan lämmittämällä palamisilmaa. Sekoitusilmapuhaltimella arinan alle savukaasua ajamalla voidaan alentaa tulipesän lämpötilaa ja mahdollistaa kuivan polttoaineen käyttö. (Renewa 2016.)

Lämmön talteenotto tapahtuu kattilalla, joka on yhdistetty etupesään vesijäähdytetyn yhdyskanavan kautta. Kuumat savukaasut tulevat ylhäältä kaksivetoiseen tuliputki-tyyppiseen pystykattilaan. Ykkösvedosta kaasut laskeutuvat ylhäältä alaluvon sisäänmenokanavaan ja kulkevat luvon läpi ylös (ellei laite ole ohituksella) ja sen jälkeen laskeutuvat pystykattilan 2. vetoa myöten alas. Kattilasta savukaasut menevät multisykloniin, jossa hiukkaskooltaan yli 0,5 µm:n hiukkaset erottuvat 75–100-prosenttisesti savukaasuista. (Renewa 2016.)



Kuvio 2. Renewan 8 MW:n arinakattilan toimintakaavio (Tekijän ottama valokuva tietokoneen näytöltä).

Märkäkolakuljetin on koko voimalaitoksen alla ja poistaa palamisesta aiheutuvan tuhkan etupesästä pois. Tuhka siirtyy levityslaitteella varustetulle tuhkalavalle. Pinnanmittausjärjestelmä ja magneettiventtiilit pitävät märkäkolakuljettimen vedenpinnan vesialtaassa vakiona. Samaan vesialtaaseen johdetaan myös savukaasupuhdistimessa erottunut tuhka ja savukaasupesurista tuleva liete. Tuhkarinan, mekaanisen arinan, kattilan ja luvon alla ovat tuhkanpudotussuppilot, joiden helmat ovat vedenpinnan alapuolella ja tuhka sekä slagi putoaa tuhkakuljettimelle vapaasti. Tuhkakuljettimen vesialtaan tarkoituksena on toimia myös räjähdysluukkuna ja tiivistää ilmuvuodot. (Renewa 2016.)

3.3 Savukaasupesuri lämpöpumpulla

Lämpöyhtiön ongelmasta tuli innovaatio. Perinteisellä turvelämpölaitoksella savukaasupesurin lämmön talteenottotehot romahtivat kylmillä ilmoilla. Kylmillä pakkasjaksoilla hukkalämmön talteenottotehoa olisi kipeimmin tarvittu. Kylmillä ilmoilla kaukolämpöverkon paluuvirtauksen lämpötila kohoaa, mikä estää savukaasuissa olevan kosteuden lauhtumisen ja mistä seuraa lämmön talteenoton estyminen perinteisessä lauhdutinratkaisussa. (Järvenreuna & Nummila 2015.)

Alajärven Lämmön Caligo CSX savukaasupesuri edustaa uutta sukupolvea. *CSX:n huippuunsa viritetyt lämmön talteenotto-ominaisuudet perustuvat lämpöpumpun ja pesurin lauhtutinvyöhykkeen termodynaamiseen yhteistyöhön optimaalisen lauhtumisen ja lämmön siirtymisen aikaansaamiseksi lauhtutinyksikössä.* (Caligo 2017). Lämmön talteenoton kannalta on oleellista saada aikaiseksi olosuhteet, jossa savukaasujen kastepistelämpötila alittuu. (kuvio 4) Kastepisteeseen vaikuttaa polttoaineen laatu, kosteus ja palamisen ilmakerroin. (Järvenreuna & Nummila 2015.)

Lämpöpumpupesurilla saadaan olosuhteisiin nähden korkein mahdollinen lämmön talteenottoteho riippumatta kaukolämmön paluulämpötilasta ja kastepistelämpötila saavutetaan takuuvarmasti. Lämpölaitoksen laitostehoa pystytään nostamaan vähintään 20 prosenttia. (Järvenreuna & Nummila 2015.)

Voimalaitoksen multisyklonista savukaasut johdetaan pesurin pesukammioon, jossa savukaasun virtaus on ylhäältä alas (kuvio 3). Savukaasut tulevat pesukammion yläpäässä olevaan hajotuskartioon, jolla savukaasun virtausnopeus jarrutetaan pesukammioon tultaessa. Pesukammioon ruiskutetaan pesuvettä suuttimien kautta. Savukaasut jäähtyvät pesukammiossa tulolämpötilasta (100–180°C) märkälämpötilaan (60–65°C) ja hiukkaset peseytyvät savukaasuvirrasta. Hiukkaset päätyvät pesukammion alaosaan ja laskennallisesti hiukkasten erotusaste on > 80 prosenttia. Pohjalle kertynyt liete poistetaan pumpulla lauhteen käsittelyyn. Kammion alaosassa pesuvesivirta erotetaan savukaasuvirrasta ja savukaasut jatkavat ylöspäin lämmön talteenottovyöhykkeeseen. (Järvenreuna & Nummila 2015.)

Lämmön talteenotto tapahtuu kahdessa päällekkäisessä täytekappalekerroksessa, jotka koostuvat yksittäisistä kappaleista (kuva 3). Alemman täytekappalekerrokseen päälle ruiskutetaan vettä, joka kiertää lämmönvaihtimen kautta, jonka toisella puolen on kaukolämmön paluuvesi. Ylemmälle täytekappalekerrokselle ruiskutetaan vettä, joka kiertää lämmönvaihtimen kautta, jonka toisella puolella on lämpöpumpulla jäähdytetty kaukolämmön paluuvesi. Savukaasut kulkevat alhaalta ylöspäin ja vastavirtaan syötetään lämmön talteenotto kierron vettä. Savukaasut ovat 35–45°C lämpötilassa savukaasupesurista poistuessa. (Järvenreuna & Nummila 2015.)



Kuva 3. Tätekappalekerros koostuu yksittäisistä kappaleista (Tekijän ottama valokuva).

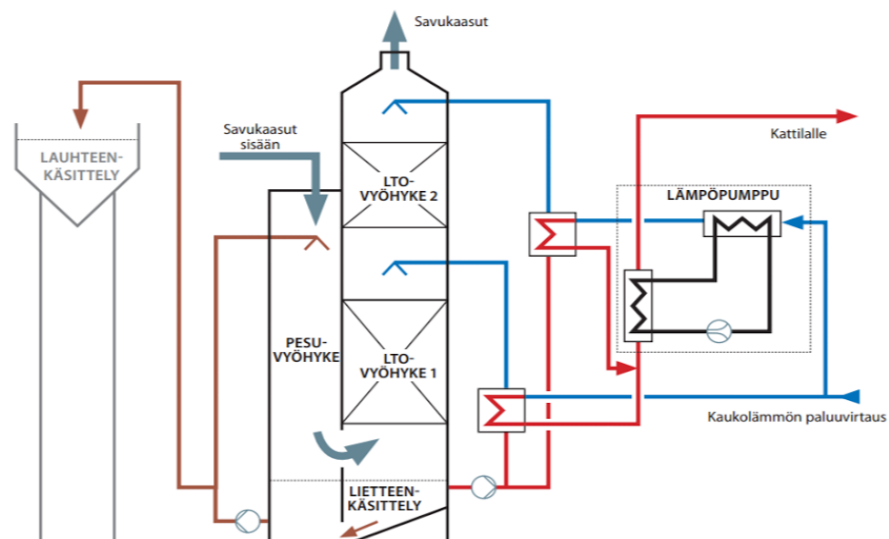
Lämpöpumpulla tehostetaan lämmön talteenottoa pesurissa. Palaavasta kaukolämpövedestä osa johdetaan lämpöpumpun höyrystimeen, jossa lasketaan veden lämpötilaa $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$ paluulämpötilaa kylmemmäksi. Jäähdytetty vesi johdetaan höyrystimestä lämmönsiirtimeen, jonka ensiöpuolen vesi johdetaan pesurin ylemmän tätekappalekerrokseen. Kaukolämmön paluueden koko massavirta johdetaan lämpöpumpun lauhduttimen kautta, joka on palanut pesurin lämmönsiirtimiltä. Kaukolämpövesi johdetaan lämpöpumpun lauhduttimen jälkeen kattilalle. (Järvenreuna & Nummila 2015.)

Lämmön talteenottopuoli on pesurin puhdas puoli, joka koostuu kahdesta tätekappalekerroksesta. Savukaasujen kondensoituminen alkaa tätekappalekerrokseen saapumisen jälkeen. Kondensoituminen vapauttaa lämpöä 2350 kJ/kg kondensoituvaa vettä kohden. Jos savukaasuista kondensoituu vettä 100 g sekunnissa, on lämmön talteenottoteho savukaasupesurista 235 Kw . Lämmön talteenoton vyöhykkeissä syntyvä lauhde johdetaan pesurin alaosasta pesukam-

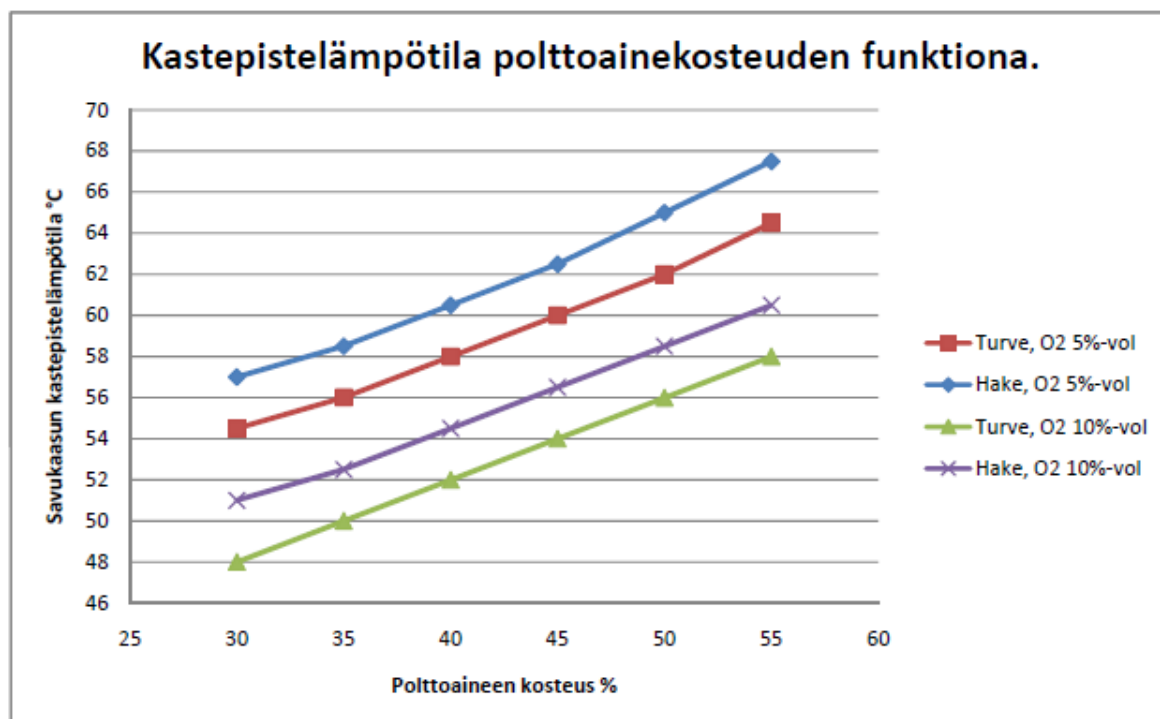
mioon, josta lauhde poistetaan lietteen mukana selkeyttimeen. (Järvenreuna & Nummila 2015.)

Caligo PHP-kytkentä

kaukolämmön paluulämpötila 65°C:een asti

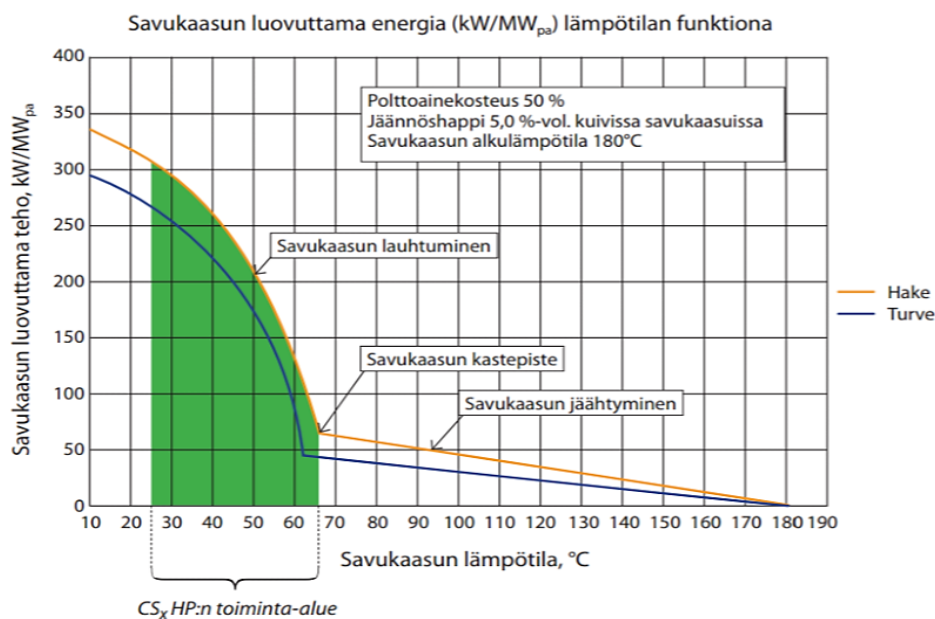


Kuvio 3. Caligon savukaasupesurin ja lämpöpumpun kytkentä. (Caligo 2017).



Kuvio 4. Kastepistelämpötila polttoainekosteuden funktiona (Järvenreuna & Nummila 2015).

Savukaasun luovuttama energia



Kuvio 5. Savukaasujen luovuttama energia ja kastepiste (Caligo 2017).

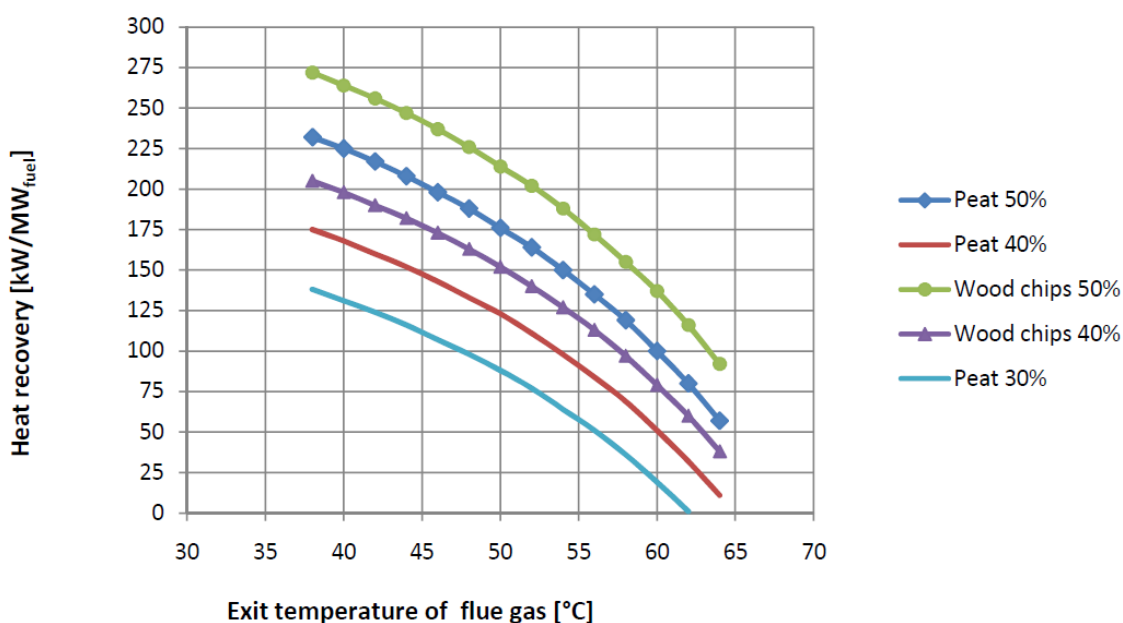
Toiminnaltaan Alajärven Lämmön käyttämä Caligon savukaasupesuri on ns. märkäpesuri. Savukaasupesurissa savukaasut ovat suorassa kontaktissa lämpöä sitovan ja siirtävän pesuveden kanssa. Lämmön talteenoton lisäksi märkäpesurin ominaisuuksiin kuuluu hiukkasten ja rikin oksidien (SO_x) poisto. (Järvenreuna & Nummila 2015.)

Lämmön talteenotto perustuu savukaasujen jäähtymiseen sekä savukaasun sisältämän veden kondensoitumiseen savukaasupesurissa. Lämmönsiirto tapahtuu kierrättämällä kondensoituvaa vettä lämmönsiirtimen kautta takaisin lauhduttimeen. Lämmönsiirtimen toisiopuolella kiertää kaukolämpövesi, johon lauhdeveden lämpöenergia siirtyy. Lämmön talteenoton kannalta suurin merkitys on savukaasujen jäähdyttäminen riittävästi alle savukaasun kastelämpötilan, joka riippuu polttoaineen kosteudesta, laadusta ja palamisen ilmakertoimesta (kuvio 4 ja 5). Kaukolämmön paluulämpötila on eräs merkittävimmistä tekijöistä lämmön talteenotossa. Lämpöpumpulla ja lämpöpumppukytkenällä saadaan laskettua kaukolämmön paluuvien lämpötilaa. Järjestelmä on dynaaminen, ts. lämpöenergian siirtymistä kahden lämmönsiirtimen ja lämpöpumpun höyrystymisen sekä lauhduttimen välillä

hallitaan ja säädetään ohjelmallisesti jatkuvasti ja siten lämpöpumppupesuri eroaa perinteisistä staattisista pesureista. Caligon lämpöpumppupesurin kytkentätapa ja säätöohjelmisto on patentoitu. (Järvenreuna & Nummila 2015.)

Kuviossa 6 on esitetty savukaasun loppulämpötilan ja polttoaineen vaikutus saatavilla olevaan lämmön talteenoton tehoon. Käyrästä on laadittu 40 prosentin ja 50 prosentin hakkeelle (*wood chips*) sekä 30 prosentin, 40 prosentin ja 50 prosentin turpeelle (*peat*). Lämmön talteenoton / laitoksen polttoainetehto MW voidaan lukea käyrästä pystyakselilta. Vaaka-akselilla on savukaasun loppulämpötila pesurin jälkeen. Käyrästä on laadittu jäännöshapen ollessa 5 prosenttia kuivissa savukaasuissa ja 180°C tulevalle savukaasuille. (Järvenreuna & Nummila 2015.)

Thermal output of a scrubber in function of flue gas exit temperature ($T_{\text{gas in}} = 180^{\circ}\text{C}$, $\lambda = 1.3$)

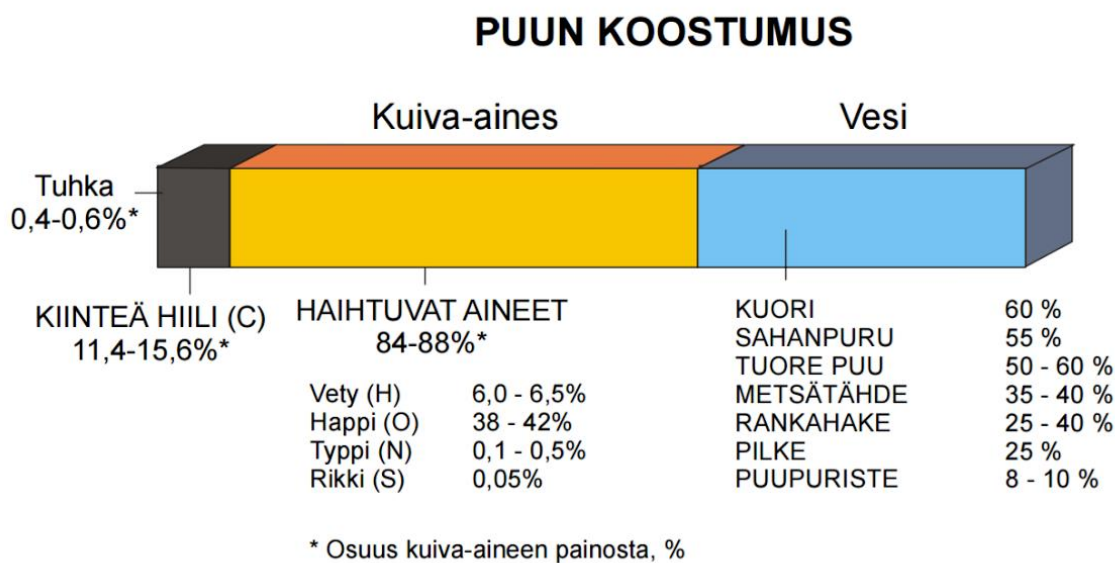


Kuvio 6. Savukaasusta saatavilla oleva lämmön talteenoton teho hakkeella ja turpeella. Jäännöshappi on savukaasuissa 5 %.
(Järvenreuna & Nummila 2015).

3.4 Tuoreen puun poltto

Puun tärkeimmät rakenneaineet ovat ligniini, selluloosa ja hemiselluloosa. Männyn ja kuusen hemiselluloosapitoisuus on 25–28 prosenttia ja selluloosan 40–45 pro-

senttia. Ligniini pitoisuus on havupuissa 24–33 prosenttia. Ligniini sitoo puun kuidut toisiinsa ja antaa puulle mekaanisen lujuuden. Ligniinissä on paljon lämpöä tuottavia aineita hiiltä ja vetyä. Puussa on lisäksi terpeenejä, rasva-aineita ja feno-jeja jotka ovat uuteaineita. Yleensä puussa on uuteaineita vajaat 5 prosenttia, mutta kuoressa niitä voi 30–40 prosenttia. Puussa on haihtuvia aineita 80–90 prosenttia (kuvio 7) ja tästä syystä puu on pitkäliekkinen polttoaine ja vaatii suuren palotilan. (Alakangas 2000, 35.)



Kuvio 7. Tuoreen puun kemiallinen koostumus (Alakangas 2000).

Helsingin Yliopiston kemian professori Timonen (2017) kertoi, kun puu katkaistaan alkaa tapahtua kemiallinen ilmiö, jossa puun immuunijärjestelmä häviää. Puu alkaa välittömästi lahota, jossa hemiselluloosa ja selluloosa alkavat muuttua sokereiksi. Hän toteaa, sokeri on hyvä kasvupohja bakteereille, jossa bakteerit elää sekä syö energiaa puusta samalla hapetus konstilla, kuin puu poltettaisiin kattilassa.

Timosen (2017) mukaan haihtuvista aineista puolet on terpeeneitä ja kuoressa ne haihtuvat viikon sisällä ja rankapuusta kuukauden sisällä, lämpötilasta riippuen. Hän kertoo, että vetyä on puun aineosana noin 6 prosenttia ja vety on hyvin energiapitoista ($119/142 \text{ MJ kg}^{-1}$) Puun kaasutuksessa muodostuvassa kaasussa on vetyä 8-20 prosenttia. Puun sisältämästä vedestä osa hajoaa ilmeisesti korkeissa lämpötiloissa. Siinä muodostuu hehkuvaa hiiltä puun pintaan ja puun sisältämä

vesi kaasuuntuu tämän katalyyttisen pinnan läpi. Palamisessa tämän kaltaiset kemialliset reaktiot ovat monimutkaisia, eikä niitä tunneta Hän toteaa.

Haakeyrittäjä Palojärvi (2017) kertoi havainneensa eroja hakettaessa kuivaa ja tuoretta puuta. Kuiva puu (kosteus 30 prosenttia) vaatii hakettaessa hakkurilta enemmän voimaa kuin tuore puu. Palojärvi on seurannut moton mittaamia kiintokuutioita tuoretta ja kuivaa puuta hakettaessa. Kuivan puun kiintokuutiosta on tullut 2,5 m³ haketta ja tuoreesta puusta 2,8 m³:n haketta.

3.5 Kuori

Puun kuori muodostuu sisäkuoresta, eli nilasta, ja ulkokuoresta. Puun ja kuoren välissä sijaitseva jälsi tuottaa sisäpuolelleen puuainetta ja ulkopuolelleen nilaa. Puu kuljettaa nilaa pitkin yhteyttämistuotteita latvuksesta runkoon ja juuristoon. Tuohi ja kaarna ovat ulkokuorta. Kuoren määrä puuston kasvusta vuonna 1998 oli noin 8,8 miljoonaa m³ ja metsään jäävän kuoren määräksi on arvioitu noin miljoonaa kuutiota. Puunjalostusteollisuuden sivutuotteena syntyy 6,5 miljoonaa kuutiota havupuun kuorta. Kuoren epähomogeenisuus aiheuttaa ongelmia voimalaitoksen käsittely- ja syöttölaitteistossa. (Alakangas 2000, 65–66.)

Etelä-Suomessa kuusentukin kuoriprosentti on 10,1 prosenttia, koivulla 11,5 prosenttia ja männyllä 12,2 prosenttia. Kuoren osuus kuorellisesta tilavuudesta vaihtelee rungon pituuden ja koon mukaan. Pienissä puissa kuoren osuus on suurimmillaan ja pienenee puun koon kasvaessa. (Sipi 2009, 51.)

Kuoren lämpöarvo on korkea, koska siinä on huomattavia määriä ligniiniä. Kuoren lämpöarvo on lähes sama rungon eri korkeuksilla. Puulajien kuorten lämpöarvot vaihtelevat huomattavasti siten, että havupuiden lämpöarvot ovat selvästi alhaisempia kuin lehtipuilla. (Alakangas 2000, 66.)

Alakankaan mukaan kuoren korkeat kosteus- ja tuhkapitoisuudet heikentävät huomattavasti kuoren polttoaineominaisuuksia. Hänen mielestään kuoren polttaminen on mieluummin kuorijätteen hävittämistä kuin energian tuottamista.

Alajärven Lämmön polttoaineena käyttämä kuori varastoidaan voimalaitoksen vieressä olevassa terminaalissa (kuva 4). Kuori tuodaan rekka-autolla terminaaliin jossa kuori nostetaan pyörökuormaajalla korkeammaksi kasaksi.



Kuva 4. Alajärven Lämmön terminaalissa oleva kuorikasa (Tekijän ottama valokuva).

3.6 Ensiharvennuksesta metsähaketta

Metsän ensiharvennukseksi tarkoitetaan harvennusta, josta saadaan ensimmäistä kertaa myyntikelpoista puutavaraa (kuva 5). Ensiharvennuksessa ei tavoitella suuria hakkuutuloja, vaan metsikön kehittämistä tulojen toivossa myöhemmin tulevaisuudessa. (Kärkkäinen 2010, 208.)

Ensiharvennuksessa valtapuuston pituus on yleensä Etelä-Suomessa 10–16 metriä ja harvennuksen ajankohta riippuvat metsikön aiemmasta käsittelystä. Ensiharvennus pitää tehdä, kun männyn valtapuiden latvussuhde on yli 40 prosenttia. Kuusella ja koivulla raja on 50 prosentissa. Jos taimikonhoito on jäänyt metsässä

tekemättä, latvukset supistuvat aiemmin kuin hoidetussa metsikössä. Ensiharvennus joudutaan tekemään aikaisemmin ja poistettavat puut ovat pieniä sekä niistä kertyy puuta vähemmän, jopa alle 30 kuutiometriä hehtaarilta. Hyvän taimikonhoidon ansiosta ensiharvennusta voidaan lykätä kymmenellä vuodella ja taloudellinen kannattavuus paranee, koska hakkuukertymä voi olla kaksinkertainen. (Kärkkäinen 2010, 209.)



Kuva 5. Energiapuun korjuuta ensiharvennus metsikössä (Tekijän ottama valokuva).

Ensiharvennus on yksi vaativimmista hakkuista, koska ensiharvennuksessa tehtävät päätökset riippuvat tulevaisuuden odotuksista. Harvennettaessa joudutaan miettimään mitkä puulajit jätetään ja mitkä hakataan pois. Yleisin ratkaisu on, että ensiharvennuksessa poistetaan enemmän koivuja ja muita lehtipuita. Jäävä puusto on enimmäkseen mäntyjä ja kuusia ja niiden laatu mahdollistaa tukkipuusadon vuosikymmenien kuluttua. (Kärkkäinen 2010, 210.)

Ravinteita poistuu metsästä vähän kuorettoman runkopuun mukana. Puun ravinteet ovat pääasiassa neulasissa, kuorissa ja muissa lehdissä. Hakkuutähteiden poistaminen metsästä aiheuttaa merkittäviä ravinnetappioita, koska hennoissa oksissa kuoren osuus voi olla 40 prosenttia. (Kärkkäinen 2006, 104–105.)

Järeässä kuusikossa puuston tyypestä on hakkuutähteissä 60 prosenttia, fosforista 80 prosenttia ja kalista 55 prosenttia. Ravinteiden määrät ovat suuret hakkuutähteissä, kun vertaa hakkuutähteiden määrää runkopuuhun. (Kärkkäinen 2006, 105.)

Hakkuutähteitä ei kannata kerätä soilta, koska kalista saattaa tulla puutetta. Vähä-ravinteisilta karuilta kasvupaikoilta puulajista riippumatta ei kannata kerätä hakkuutähteitä. Hakkuutähde kannattaa aina jättää harvennushakkuussa lannoitteeksi. (Kärkkäinen 2006, 106.)

3.7 Turve

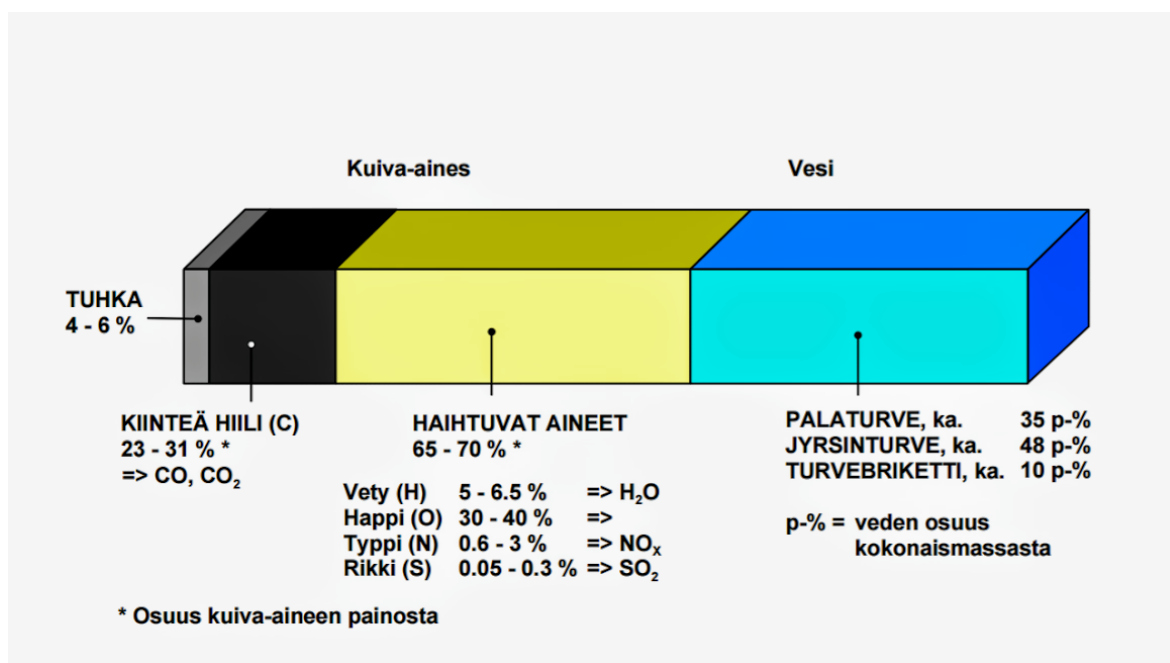
Suokasvien jäänteistä on muodostunut turve epätäydellisen hajoamisen seurauksena hapettomassa ja kosteissa olosuhteissa. Turve luokitellaan eloperäiseksi maalajiksi, joka on kerrostunut muodostumispaikalleen. Turpeeksi luokitellaan maalaji, jonka kuivamassa on vähintään 75 prosenttia orgaanisia aineita. Maaperässä turpeen muodostumisen liikkeelle lähdettyään on jatkuva itseään ruokkiva geologinen prosessi. Turpeen rakenne ja koostumus vaihtelevat kasvilajikoostumuksen ja maatumisasteen mukaan. Turvekerrostumat ovat eri alueilla erityyppisiä. (Geologinen Tutkimuskeskus 2017.)

Turpeen fysikaaliset ominaisuudet lämpöarvo, kuiva-aineen määrän, tuhkapitoisuus ja rikkipitoisuus sekä suon turvekerrostuman paksuus, laajuus, maatumisuus ja turvelaji ovat määrääviä tekijöitä arvioitaessa suon soveltuvuutta energiantuotantoon. EU:ssa turve on luokiteltu päästökauppavelvolliseksi polttoaineeksi ja Suomessa hitaasti uusiutuvaksi biomassapolttoaineeksi. (Geologinen tutkimuskeskus 2017.)

Turpeesta pääosa on hiiltä ja hiilipitoisuus vaihtelee maatumisasteen ja turvelajin mukaan 53–56 prosentin välillä. Hiilipitoisuus turpeen maatuessa kasvaa. Maatumisasteen kasvaessa selluloosan ja hemiselluloosan pitoisuudet alenee, mutta

ligniini pitoisuudet kasvaa. Turpeen kuiva-aine sisältää happea 30–40 prosenttia, vetyä 5–6 prosenttia, typpeä 0,6–3 prosenttia ja rikkiä alle 0,3 prosenttia (kuvio 8). Turpeen suuren hiilipitoisuuden takia turve palaa ”hitaammin” kuin puu. (Alakangas 2000, 86.)

Alakankaan (2000, 90) mukaan turpeessa on vähemmän haihtuvia aineita kuin puussa eli 65–70 prosenttia. Kuiva-aineen teholliseen lämpöarvoon vaikuttavat Hänen mukaan myös maatumisaste, turvelaji sekä hiili- ja tuhkapitoisuus. Lämpöarvo paranee maatumisasteen kasvaessa.

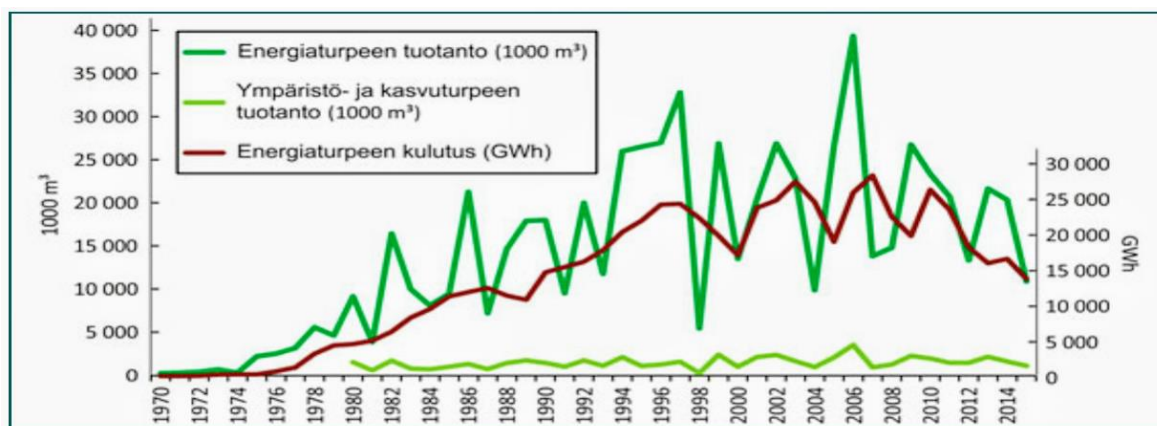


Kuvio 8. Turpeen koostumus kuiva-aineesta (Alakangas 2000).

Geologinen Tutkimuskeskus arvioi, että turvetuotannon kannattavuuden edellytyksenä on vähintään 1,5 metrin turvepaksuus. Suomessa on Geologisen tutkimuskeskuksen mukaan turvemaita 9,2 miljoonaa hehtaaria. Ne ovat metsä- ja maatalous sekä soiden suojele- ja turvetuotantokäytössä, ja kolmasosa on käyttämättömänä joutomaana.

Turvetta käytetään pääasiassa energian tuotannossa ja ympäristö- sekä kasvuturpeen osuus on alle 10 prosenttia (kuvio 9). Suomen energiahuollosta turve kattaa

7 prosenttia ja kaukolämmöstä noin 20 prosenttia. Energiaturvetta on käytetty energian tuottamiseen 20–29 TWh viime vuosina. Energiaturpeen tuotanto ja kulutus ovat laskeneet voimakkaasti viime vuosina. (Geologinen Tutkimuskeskus 2017.)



Kuvio 9. Turpeen tuotanto ja energiaturpeen kulutus Suomessa (Geologinen tutkimuskeskus).

4 ALAJÄRVEN LÄMMÖN POLTTOTEKNIIKAN KEHITTÄMINEN

4.1 Polttokokeen järjestelyt

Tuoreen puun koepoltto suoritettiin Alajärven Lämmön 8 MW:n voimalaitoksessa 30.3.–6.4.2017 välisenä aikana. Koepolton puut kaadettiin harvesterilla ja männyt sekä koivut hakattiin kustannussyistä samaan kasaan. Puut ajettiin metsästä tienvarteen ajokoneella ja siitä puutavara-autolla Alajärven Lämmön terminaaliin. Terminaalissa hakeyrittäjä (kuva 6) haketti rankakasan. Hakeyrittäjä haketti hakkeen kuorma-autoon (kuva 6) ja siirsi hakkeen kuorma-autolla varastoon.

Hakeyrittäjä Palojärvi (2017) kertoi, että kuorma-auton alustan päälle on laitettu Bruksin 805 rumpuhakkuri, jossa on Volvo Pentan 550 hevosvoiman moottori. Palojärvi on hakettanut mobiilihakkurilla rankapuusta 130–140 m³ haketta tunnissa. Mobiili hakkurista menee läpi halkaisijaltaan 60 cm puu. Hake siirretään terminaalissa kuorma-autolla ja sen kuormatilavuus on 55 m³.

Rankapuusta ei ollut harvesterin jäljiltä kiintokuutioita selvillä. Koepolttoon menevästä hakkeesta otettiin näytteet, jotka lähetettiin tutkittavaksi luonnonvarakeskukseen (taulukko 3). Koepolttihakkeen kosteus oli 54,01 prosenttia.

Valtion Teknillisen Tutkimuskeskuksen eli VTT:n tutkimusjulkaisu 2045:n mukaan ensiharvennusmännyn tehollinen lämpöarvo 50 %:n kosteudessa on 1,78 MWh/m³. Kuorellisen ensiharvennusmännyn 58:n kosteusprosentilla lämpöarvo on 1,64 MWh/m³. Koepolttoon menevän hakkeen kosteuden ollessa 54,01 prosenttia käytetään tässä opinnäytetyössä lämpöarvoa 1,71 MWh/m³. (Alakangas 2000, 62–63.)

VTT:n julkaisun mukaan yleensä hakkeen tiiviys on 0,37–0,45. Tiiviys osoittaa kiintotilavuuden ja irtotilavuuden suhteen eli kiintokuutioiden määrän yhdestä hake irtokuutiosta. Perästä puhaltava hakkuri ei puhalla yhtä tiivistä kuormaa kuin kuorman päältä puhaltava hakkuri. Hakekuutiot laskettiin kuorma-auton kuorman tilavuuksista. Kuorma ei ehtinyt tiivistyä kuormaa terminaalissa siirrettäessä. Tässä koepolton tutkimuksessa käytetään tiiviyssuhdelukua 0,40. (Alakangas 2000, 48–49.)



Kuva 6. Rankapuun haketusta mobiilimurskaimella terminaalissa (Tekijän ottama valokuva).

Koepoltossa oleva hakemäärä on 880 m^3 , joka oli hakattu kahta viikkoa aikaisemmin. Rankapuukasan männyn ja koivun suhde laskettiin viidestä eri kohdasta ja saatiin tulokseksi 80 prosenttia mäntyä ja 20 prosenttia koivua. Koepolttoon menevästä mäntyhakkeesta otettiin näyte Luonnonvarakeskukselle analysoitavaksi (taulukko 3) ja samalla otettiin täysin koivua sisältävästä samaan aikaan haketusta tuoreesta koivuhakkeesta näyte (taulukko 3). Hakkuutähdettä oli terminaalin varastossa ja siitä myös otettiin näyte. Syksyllä terminaaliin oli ajettu kuorta varastoon ja keväällä ajettu tuoretta kuorta. Molemmista kuorikasoista otettiin näyte ja näillä näytteillä haluttiin nähdä muuttuuko kuorikasassa kosteus varastoinnin aikana.

Taulukko 3. Alajärven Lämmön polttoaineiden analyysien tulokset.

	Hake mänty	Hake Lehtipuu	Kuori tuore	Kuori varastossa	Hakkuutähde
Kosteus saapussa %	54,01	47,84	66,78	68,86	54,32
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa %	0,47	0,45	1,98	1,78	3,13
Kalorimetrinen lämpöarvo MJ/kg	20,49	20,17	20,59	20,92	20,82
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	19,16	18,79	19,30	19,63	19,43
Tehollinen lämpöarvo saapumiskosteudessa MJ/kg	7,49	8,63	4,78	4,43	7,55

30.3.2017 varastosiihot ajettiin lähes tyhjäksi ja jäljellä olevan hakkeen määräksi arvioitiin 60 m³. (kuva 7) Varastosiihoon jäänyt polttoaineseos sisälsi 30 m³ kuorta, 15 m³ haketta ja 15³ m turvetta.

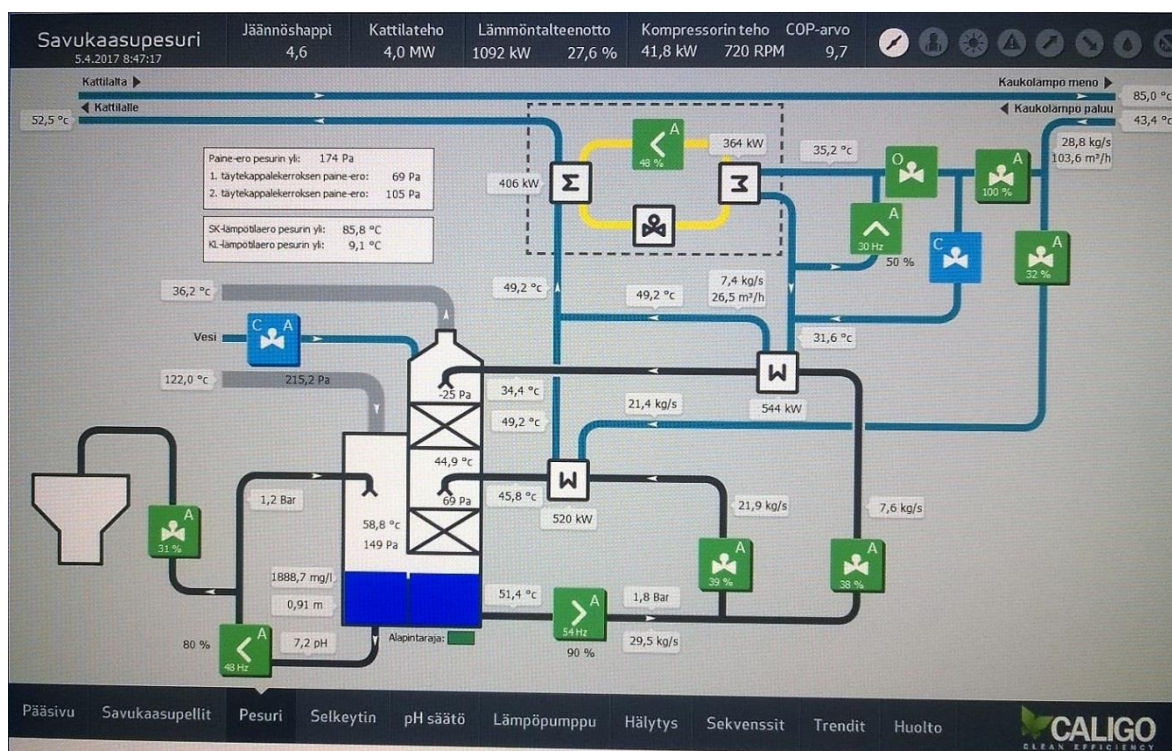


Kuva 7. Polttoaineen varastosiihot koepolton alussa (Tekijän ottama valokuva).

Samana päivänä klo 14.00 otettiin voimalaitoksen energialaskureista lukemat ylös. 3.4.2017 polttoerän viimeiset hakkeet siirrettiin voimalaitoksen varastosiihoon. Kun siirryttiin kuoren, metsähakkeen ja turpeen polttoaine seoksesta pelkästään metsähakkeen polttoon, savukaasujen häikäpitoisuudet nousivat 100–150

ppm:stä keskimäärin 1000 ppm. Toimitusjohtaja Pesu (2017) toteaa, että arinais-
kujen taukoajoja pitää muuttaa ja arinan alta tulevan ensiöilman määrää pitää
pienentää sekä toisioilman määrää suurentaa, jotta häkäpitoisuuden saadaan las-
kemaan. 6.4.2017 klo 7.30 koepoltto loppuu ja arvioidaan voimalaitoksen varas-
tosiilossa olevan hakkeen määräksi 56 m^3 sekä otetaan energialaskurista lukemat
ylös.

Kuvassa 8 on savukaasupesurin näyttötaulu ja kuva on otettu koeajon aikana
5.4.2017. Kaukolämmön menoveden lämpötila on $85 \text{ }^\circ\text{C}$ ja paluuveden lämpötila
on $43,4 \text{ }^\circ\text{C}$, jota lämpöpumpulla lasketaan $31,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ennen savukaasupesuria. Katti-
lan teho on 4 MW ja savukaasupesurista sekä lämpöpumpusta saadaan lisäksi
1,092 MW. Lämpöpumppu ottaa 41,8 kW sähköä ja COP-kerroin on 9,7, eli läm-
pöpumpusta saadaan 405 kW ja savukaasupesurille jää 687 kW. Savukaasujen
tulo lämpötila pesurille on $122 \text{ }^\circ\text{C}$ ja pesurista lähtevien savukaasujen lämpötila on
 $36,2 \text{ }^\circ\text{C}$.



Kuva 8. Savukaasupesurin näyttötaulu koeajon aikana
(Pesu, 2017).

Kuviossa 10 nähdään kuinka lähteiden savukaasujen lämpötila nousee 10 °C, kun lämpöpumppu on pois päältä. Savukaasupesuri toimii teknisesti samalla tavalla, oli lämpöpumppu päällä tai ei. Savukaasujen lämpöenergiaa menetetään korkeamman savukaasun lämpötilan takia.



Kuvio 10. Lämpöpumppu pois päältä 2.5.2017 klo 10.15–3.5.2017 klo 7.00 (Tekijän ottama valokuva).

4.2 Koepolton tulokset

Koepoltossa 30.3–6.4.2017 poltettiin haketta, jonka puut oli hakattu kaksi viikkoa aikaisemmin. Mänty hakkeen kosteus oli 54,01 prosenttia ja haketta poltettiin 880 m³. Taulukko 4 esittää, paljonko energiaa tuotettiin koepoltossa kattilassa ja pesurin lämpöpumpulla sekä paljonko energiaa meni kaukolämpö verkoston.

Taulukoissa 5–8 on esitetty ajanjaksolla 21.11.2016–19.5.2017 lämpölaitoksella poltetut polttoaineet ja tuotettu energiamäärä verkostoon, tuotettu lämpö kattilalla ja lämpöpumpulla sekä polttoaineiden yksikköhinnat. Lopuksi polttoainekustannukset on laskettu yhteen ajanjaksolla. Ajanjakson 21.11.2016–19.5.2017 polttoainekustannukset ja tuotettu energiamäärä verkkoon suhteutetaan koko vuoden kulutukseksi asiakkaille taulukoissa 9-12. Vertailulukuna käytetään vuonna 2016 toimitettu energiamäärä asiakkaille 30 164 MWh. Julkisesta versiosta on poistettu energia yksikköhinnat.

Taulukko 4. Koepolton tulokset 30.3–6.4.2017.

	Energiamäärä MWh	Energiamäärä %
Verkostoon	686,1	100
Kattila	537,1	78,28
Pesuri lämpöpumpulla	149	21,72
Pesurin sähkön kulutus	9	

Taulukko 5. Alajärven Lämmön 8 MW:n voimalaitoksen käyttödata 21.11.2016–19.5.2017

Energiaa verkostoon	19 896,70 MWh	100 %
Biokattilan tuotanto	15 659,70 MWh	78,7 %
Pesurin lämmön talteenotto	4 237 MWh	21,3 %
Lämpöpumpun sähkönkulutus	262 MWh	
Lauhdeveden määrä	4 515 M ³	

Taulukko 6. 8 MW:n voimalaitoksen polttoaineiden kulutus ja energiamäärä 21.11.2016–19.5.2017

Polttoaine	Tilavuus		Energiamäärä MWh	
	m³	prosenttia	Energiamäärä	Prosenttia
Kuori	12 609	52,6	5 910	36,14
Metsähake	6 801	28,4	4 651	28,44
Turve	4 575	19	5 530	33,82
Sähkö			262	1,6
Yhteensä	23 985	100	16 353	100

Taulukko 7. Alajärven lämmön polttoaineiden hinnat 2017.

Polttoaine	Euroa/ MWh
Kuori	
Metsähake tuore	
Metsähake kuiva	
Turve (sis. turveveron)	
Sähkö	

Taulukko 8. 8 MW:n voimalaitoksen energian määrä ja polttoaineiden hinnat ajalla 21.11.2016–19.5.2017.

Polttoaine	MW	e/MWh	Yhteensä euroa
Kuori	5 910		
Metsähake	4 651		
Turve	5 530	(sis. turveveron)	
Sähkö	262		
Yhteensä	16 246		318 621

5 TULOKSET

Opinnäytetyössä vertailtiin myös uuden 8 MW:n voimalaitoksen kannattavuutta vanhoihin 3,5 MW:n ja 4 MW:n kattiloihin verrattuna. Taulukko 9 on laskettu vuosien 2013–2015 keskiarvot polttoaineiden energia sisällöstä, verkkoon menevästä energiasta ja asiakkaille menevästä energiasta. Taulukossa on myös keskiarvo luvut suhteutettuna vuoden 2016 asiakkaille menevän energian mukaan.

Taulukko 9. Keskimääräiset energiamäärät vuosina 2012–2015 ja vuonna 2016 toimitettu 30164 MWh energiamäärä asiakkaille suhteutettuna energiaa verkkoon sekä polttoaineisiin (2016) vuosien 2012–2015 keskiarvoista.

	2012–2015 vuosien keskiarvo (taulukko 5)		Vuoden 2016 energian myynti asiakkaille suhteutettuna vuosien 2012–2015 keskiarvoon MWh
	MWh	%	
Polttoaineet	38 172	100	40 603
Energiaa verkkoon	33 381	87,45	35 508
Energia asiakkaille	28 358	74,29	30 164

Taulukko 10 on esitetty uuden 8 MW:n voimalaitoksen tuotanto verkostoon 19 896,70 MWh ajalta 21.11.2016–19.5.2017 suhteutettu vuoden 2016 verkostoon menevän energian mukaan ja näin saadaan laskennallinen koko vuoden tuotanto uudelle 8 MW:n voimalaitokselle. Jotta uutta voimalaitosta voidaan verrata vanhoihin kattiloihin, niin verrataan verkostoon menevää energia määrää 35 508 MWh, jolla saadaan tuotettua asiakkaille energiaa 30 164 MWh (taulukko 9).

Taulukko 10. 21.11.2016–19.5.2017 tulokset suhteutettuna 2016 vuoden myyntiin.

	21.11.2016–19.5.2017 tulokset (taulukko 5)	21.11.2016–19.5.2017 tulokset suhteutettuna vuoden 2016 energia määrän verkostoon (taulukko 9)
Energiaa verkostoon	19 896,70	35 508
Biokattilan tuotanto	15 659,70	27 946
Pesurin lämmön talteenotto	4 237	7 561
Lämpöpumpun sähkön kulutus	262	468
Lauhdeveden määrä	4 515	8 058

Taulukossa 11 on laskettu laskennallinen polttoainekustannus 4 MW:n ja 3,5 MW:n kattiloilla, kun olisi tuotettu asiakkaille energiaa 30 164 MWh ja tähän määrään olisi tarvittu polttoaineita 40 603 MWh. Laskelmassa on käytetty eri polttoaineiden osalta vuosien 2010–2015 keskiarvoa. Polttoaineiden hintoina on käytetty tämän päivän hintoja.

Taulukko 11. Laskennallinen polttoaine kustannus 4 MW:n ja 3,5 MW:n kattiloilla vuoden 2016 kulutuksen mukaan.

Polttoaineet	MWh	%	e/MWh	Euroa
Turve	29 864	73,55		
Hake	10 183	25,08		
Öljy	556	1,37		
Yhteensä	40 603	100		802 135

Taulukossa 12 on laskettu uuden 8 MW:n voimalaitoksen polttoaine kustannuksia koko vuodelle. Ajan jaksolta 21.11.2016–19.5.2017 poltetun polttoaineiden mukaan on otettu eri polttoaineiden suhde (taulukko 6). Taulukossa 10 on koepolton ajalta 21.11.2016–19.5.2017 tuotettu energia verkostoon (19 896,7 MWh) suhteutettuna koko vuoden (35 508 MWh) tarvittavaan energiamäärään nähden ja saadaan kertoimeksi 1,7846. Tällä luvulla on kerrottu koeajo jaksolla (21.11.2016–19.5.2017) poltetut polttoaineet ja saadaan laskennallinen koko vuoden polttoaineiden kulutus.

Vuonna 2016 meni asiakkaille energiaa 30 164 MWh. Jos tämä energiamäärä olisi tuotettu vanhoilla kattiloilla ja vuosien 2013–2015 hyötysuhteella sekä vuosien 2010–2015 polttoaineiden suhteilla, polttoaineisiin olisi mennyt 802 135 euroa. Uudella voimalaitoksella olisi mennyt ajan jakson 21.11.2016–19.5.2017 polttoaineiden suhteilla ja savukaasupesurin sekä lämpöpumpulla tuotetun energia huomioiden 30 164 MWh energian tuottamiseen asiakkaille 568 572 euroa polttoaineisiin. (taulukko 12) Säästöä polttoaineiden hankinnassa saadaan uudella voimalaitoksella vuodessa 233 563 euroa.

Taulukko 12. Laskennallinen polttoaine kustannus uudella 8 MW:n voimalaitoksella vuoden 2016 kulutuksen mukaan.

	MWh	%	e/MWh	
Kuori	10 547	36,14		
Metsähake	8 300	28,44		
Turve	9 869	33,82		
Sähkö	468	1,6		
Yhteensä	29 184	100		568 572

6 POHDINTAA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää tuoreen puun polttoa laitoksessa, jossa on savukaasupesuri ja lämpöpumppu. Opinnäytetyö vertaa Alajärven Lämmön uuden 8 MW:n voimalaitoksen polttoainekustannussäästöjä Alajärven Lämmön 3,5 MW:n ja 4 MW:n kattiloihin nähden. Opinnäytetyön tehtävä on myös selvittää onko tuoreessa hakkeessa ja kuoressa jäljellä haihtuvia yhdisteitä ja uuteaineita. Opinnäytetyössä perehdyttiin polttoainekustannuksiin niiden ollessa suurin menoerä lämpövoimalaitoksen kustannuksissa.

Koepoltonhakkeen polttamisen aikana häikäpitoisuudet nousivat korkealle. Pesuriin muodostui tervaa, jota täytyi puhdistaa pesurin lauhduttimesta pois. Normaalissa poltossa mukana oli turvetta ja tämä poisti ongelman korkeasta häikäpitoisuudesta. Häikäpitoisuuden saatiin laskemaan kattilan säätöjä muuttamalla.

Kattila on suunniteltu kosteudeltaan enimmillään 60 %:n polttoaineelle. Talvella voimalaitokselle saapunut kuori on ollut kosteudeltaan 68 %. Mielenkiintoista olisi ollut suorittaa koepoltto pelkästään kuorta polttamalla. Kevään 2017 oltua viileä ja kostea, niin kuorta oli ilman metsähaketta ja turvetta lisättynä liian märkää polttaa. Palavista yhdisteistä osa haihtuu kasalla kuoresta viikon sisällä kuorimisesta. Kiinnostavaa olisi ollut selvittää koepolton yhteydessä muuttuuko kuoren energiapitoisuus kasalla olon aikana sekä olisiko haihtuvia yhdisteitä saatu talteen ja muutettua energiaksi voimalaitoksessa.

Tutkimuksessa kävi ilmi, että taloudellista kannattavuutta saadaan enemmän turpeen ja metsähakkeen osuutta pienennettäessä kuoren määrään nähden. Laskentajakson aikana lämpöpumpun höyrystimen jäähdytys on ollut 12 °C. Lämpöpumpulla pystytään jäähdyttämään 15–16 °C, COP:n kertoimen pysyessä samalla tasolla. Vaikka sähkönkulutus kasvaa, niin lämpöpumpulla kannatta ottaa kaikki mahdollinen lämpö talteen enemmän, kuin polttaa polttoaineita lisää. Laitoksen kokonaiskannattavuus edelleen paranisi laskelmista.

Kevään 2017 aikana on huomattu, että kuoren määrää on mahdollista lisätä polttoaineseoksessa. Alajärven Lämmön polttoainevarastoja olisi taloudellisuuden kannalta järkevää pienentää, koska varastointi tuottaa heikentymistä puun lämpöarvoissa.

Savukaasupesuri lämpöpumpulla osoittautui tutkimuksissa kannattavaksi investoinniksi. Ensimmäisen puolen vuoden aikana tehdyt laskelmat polttoaineen määrästä ja energiantuotannosta suhteutettuna vuoden energiamyyntiin vääristävät kuitenkin hieman laskelmia, koska kattilan hyötysuhde on kesällä pienempi kuin talvella. Toisaalta kuoren polttoa lisäämällä saadaan kannattavuutta lisää.

Tuoreen puun polttaminen ja voimalaitos savukaasupesurilla ja siihen integroidulla lämpöpumpulla on hyvin merkittävä asia Suomen metsätalouden, energiahuollon sekä ilmastopolitiikan kannalta.

LÄHTEET

- A 24.10.2013/750. Valtioneuvoston asetus polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiatuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. [Verkkojulkaisu]. Espoo: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. [Viitattu 23.5.2017]. Saatavana: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>
- Caligo. 2017. Clean efficiency. [Verkkosivu]. [Viitattu 10.6.2016]. Saatavana: http://www.caligoindustria.com/files/Caligo_CSX_Brochure_FIN_2016.pdf?.
- Geologinen Tutkimuskeskus (GTK). 2017. Turve raaka-aineena. [Verkkosivu]. [Viitattu 4.6.2017]. Saatavana: <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/turve/>.
- Huttunen, R. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017 [Viitattu 29.5.2017]. Saatavana: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=111.
- Järvenreuna, J & Nummila, M. 28.8.2015. Savukaasupesurinkoulutus [Ppt-esitys]. [Viitattu 31.5.2016]. Saatavana: Vaatii käyttöoikeuden.
- Korkein hallinto-oikeus (KHO). 30.3.2017. KHO:2017:48. [Verkkosivu]. [Viitattu 20.5.2017]. Saatavana: <http://www.kho.fi/fi/index/paatoksia/vuosikirjapaatokset/vuosikirjapaatos/1490766244219.html>
- Kärkkäinen, M. 2006. Kärkkäisen tehokas metsätalous: valikoima kolumneja. Hämeenlinna: Metsäkustannus.
- Kärkkäinen, M. 2010. Metsieni kirja. Hämeenlinna: Metsäkustannus Oy.
- Leijupolttu. 2010. [Verkkolehtiartikkeli]. Metsäalan Ammattilehti 14.12.2010. [Viitattu 11.5.2017.]. Saatavana: <https://www.ammattilehti.fi/uutiset.html?1960>.
- Leskinen, JR. 2017. 12.5.2017. [Verkkolehtiartikkeli]. Onko kaupungin kaukolämpöä pakko käyttää? - KHO ratkaisi riidan porvoalaispariskunnan hyväksi. Tekniikka & Talous. [Viitattu 16.5.2017]. Saatavana: <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/onko-kaupungin-kaukolampoa-pakko-kayttaa-kho-ratkaisi-riidan-porvoalaispariskunnan-hyvaksi-6648788>

- Luonnonvarakeskus (Luke). 26.5.2017. Puun energiakäyttö 2016. [Verkkosivu]. [Viitattu 30.5.2017]. Saatavana: http://stat.luke.fi/puun-energiak%C3%A4ytt%C3%B6-2016_fi
- Palojärvi, J. 2017. Toimitusjohtaja. Hakeurakointi Palojärvi Oy. Haastattelu 4.6.2017.
- Pesu, K. 2017. Toimitusjohtaja. Alajärven Lämpö Oy. Haastattelu 31.3.2017.
- Renewa. 24.11.2016. Kattilan toimintaselostus. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 8.6.2017]. Saatavana: Vaatii käyttöoikeuden.
- Sipi, M. 2009. Puuraaka-aineen mittaus: mittausmenetelmät ja niiden perusteet. Helsinki: Helsingin yliopisto. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 44.
- Timonen, R. 2017. Kemian professori. Helsingin Yliopisto. Haastattelu 19.5.2017.