

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka  
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**MÄRÄN BIOMASSAN POLTTAMINEN JA  
LAUHDUTTAVA PESURI  
COMBUSTION OF WET BIOMASS AND CONDENSING  
FLUE GAS SCRUBBERS**

Lappeenrannassa 27.8.2021  
Jere Keskinen

## TIIVISTELMÄ

Jere Keskinen

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2021: Märän biomassan polttaminen ja lauhduttava pesuri

Tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

27 sivua, 10 kuvaa ja 1 taulukkoa

Hakusanat: biomassa, tuore polttoaine, märkä biomassa, savukaasupesuri, hake

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on perehtyä biomassaan polttoaineena, biomassan kosteuden vaikutuksiin ja märän biomassan käytön soveltuvuudesta energiantuotantoon. Märän biomassan polton yhteydessä laitoksen hyötysuhdetta voidaan parantaa lauhduttavan savukaasupesurin avulla jopa korkeammalle, kuin tavallisella voimalaitoksella kuivatua biomassaa poltettaessa.

Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään savukaasupesurien toimintaan, rakenteeseen ja kannattavuuteen teollisessa biomassan poltossa. Savukaasupesuri on investointina arvokas, eikä sen käyttöä voida perustella kuin tietyn tyyppisissä laitoksissa. Polttokattilan on sovellettava märkien ja heikkolaatuisten polttoaineiden polttamiseen. Vaikka kattila olisi soveltuva kyseiseen käyttötarkoitukseen, moni kattilan tärkeimmistä arvoista muuttuu polttoaineen kosteusprosentin kasvaessa. Työssä perehdytään märän polttoaineen vaikutuksiin kattilan arvoissa.

Savukaasupesuri itsekseen on investointina hyvin kannattava ja maksaa itsensä takaisin nopeasti, mutta se yksistään ei riitä perustelemaan voimalaitoksen siirtymistä kuivatusta polttoaineesta märkään. Tulevaisuudessa biomassan osuus energiantuotannossa on varmasti kasvussa ja tulevaisuutta ajatellen märkä biomassa ja savukaasupesuri ovat varteenotettavia vaihtoehtoja.

# SISÄLLYSLUETTELO

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	4
2	BIOMASSA POLTTOAINEENA .....	6
2.1	Puupolttoaineiden koostumus.....	7
2.2	Kuiva-ainetappiot .....	9
2.3	Standardi SFS-EN ISO 18134.....	9
3	KOSTEUDEN VAIKUTUKSET.....	11
3.1	Kattilatypin valinta .....	12
3.2	Vaikutus höyryn tuottoon .....	13
3.3	Vaikutus savukaasujen massavirtaan .....	14
3.4	Vaikutus kattilan hyötysuhteeseen .....	15
3.5	Vaikutus kattilan kapasiteettiin .....	16
3.6	Vaikutus savukaasuista lauhtuvaan lämpöenergiaan.....	17
4	SAVUKAASUPESURIT .....	19
4.1	Savukaasupesurin toimintaperiaate .....	19
4.2	Kannattavuus .....	21
5	YHTEENVETO .....	24
	LÄHTEET .....	26

## 1 JOHDANTO

Nykypäivän yhteiskunnassa päästöjen vähentäminen ja ympäristöystävällisyys ovat nousseet ansaitusti megatrendien asemaan. Alati kiristyvien päästömääräyksien ja poliittisen sekä yhteisöllisen paineen vuoksi energiantuotannossa on siirrytty askel askeleelta kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. Suomen valtio on ollut edelläkävijä matkalla kohti tätä Euroopan unionin määrittämää tavoitetta ja kaikkien maailman maiden yhteistä maalia. Suomessa vesivoiman, tuulivoiman ja aurinkoenergian potentiaali ei riitä saavuttamaan haluttuja tuloksia, joten biovoimalle jää suuri rooli. Varsinkin lämmöntuotannossa biomassalla tuotettu energia on ottanut suuren ja vakaan markkina-aseman.

Perinteinen käsitys biopolttoaineiden poltossa on ollut, että monen biopolttoaineen korkea kosteuspitoisuus heikentää niistä saatavaa energiamäärää. Kosteus heikentää polttoaineen lämpöarvoa, joten perinteisesti on biopolttoaineita kuivattu ennen niiden käyttöä energiantuotannossa. Viime vuosien aikana on kuitenkin kyseiseen ajatteluun tullut muutosta. Tuoreen, kostean biomassan poltto on lisääntynyt. Suurimpana syynä muutokseen on savukaasupesureiden kehitys ja lisääntyminen. Savukaasupesureilla mahdollistetaan lämmön talteenotto savukaasuista ja tehostetaan näin lämmöntuotantoa verrattaessa perinteiseen kuivatun biomassan polttoon. Kuivauksesta syntyvät huonot puolet, kuten kuiva-aine tappiot ja kuivauksesta syntyvät ylimääräiset kustannukset, ovatkin lopulta merkittävimpiä kuin korkean kosteuspitoisuuden aiheuttama matalampi lämpöarvo.

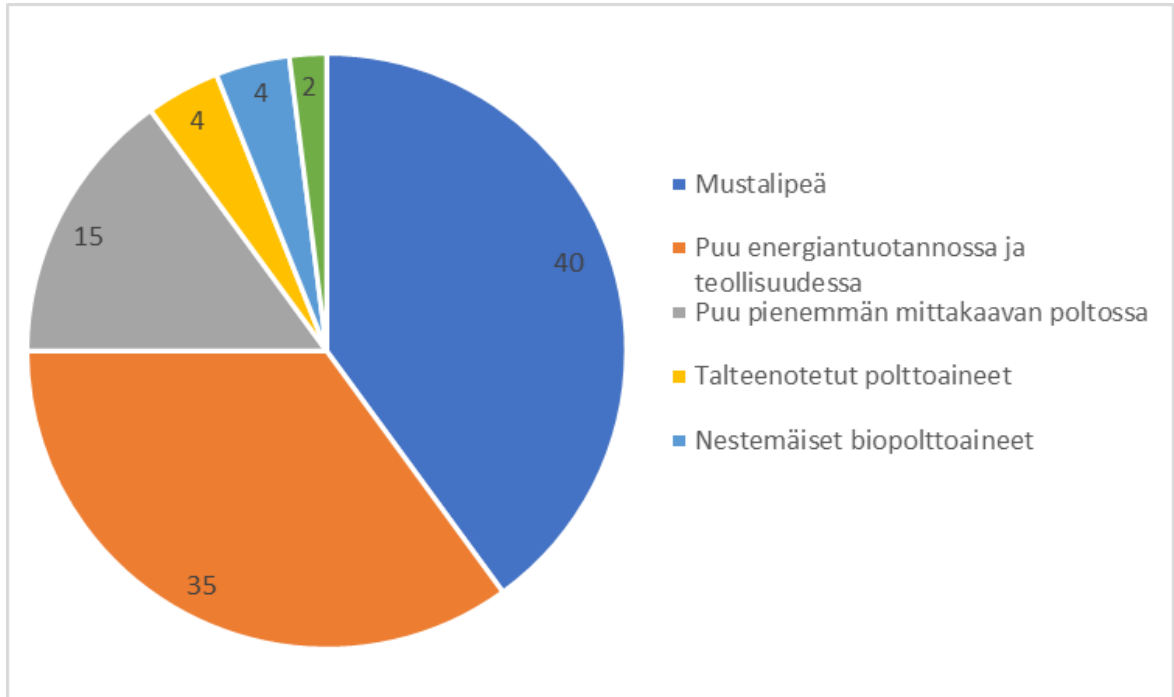
Savukaasupesurit nimensä mukaisesti pesevät savukaasuista haitallisia yhdisteitä. Varsinkin suurempien hiukkasten poistaminen ympäristöön vapautuvista savukaasuista on erittäin tehokasta. Tämä helpottaa nykyisten, erittäin tiukkojen päästövaatimusten saavuttamisessa. Rahan pyörittämässä yhteiskunnassamme on kuitenkin tärkeää tehdä hyvien ympäristötekojen ohella myös tulosta. Savukaasupesurien talteen ottaman energian saadaan laitoksen kokonaishyötysuhdetta kohotettua entisestään, huolimatta kattilan hyötysuhteen heikkeneemisestä. Mitä korkeampi kosteusprosentti polttoaineella on, sitä enemmän energiaa savukaasuista on mahdollista saada talteen. Mutta jopa 70 prosentin kosteuden omaavan polttoaineen käyttö aiheuttaa myös muita ongelmia, eikä sen kaltaisen biomassan polttaminen onnistu kaikilla laitoksilla ja kattilatyypeillä.

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus, jossa perehdytään aluksi biomassaan polttoaineena ja sen sisältämän kosteuden vaikutuksiin. Tarkempaan tarkasteluun otetaan kosteuden vaikutus kattilaan ja sen arvoihin, sekä biomassan varastointiin ja kustannuksiin. Savukaasupesureiden toimintaan ja kannattavuuteen perehdytään työn loppuksi.

## 2 BIOMASSA POLTTOAINEENA

Biomassa käsitteenä on laaja. Biomassalla tarkoitetaan joko elollisesta tai lähiaikoina elossa olleesta aineksesta tuotettavaa energianlähdettä, jota polttamalla vapautetaan energiaa. Biomassa voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan: eläinperäiseen biomassaan, joka kattaa esimerkiksi eläinten jätökset ja ruhoista sekä meripohjaisen biomassan ja kasviperäiseen biomassaan, kuten puupohjaisiin aineksiin ja jätteisiin. (Basu 2013, 48.)

Biomassa on Suomen merkittävin uusiutuvan energian lähde ja Suomessa teollisuudessa käytettävästä biomassasta noin kolme neljäsosaa on puupohjaista biomassaa, erityisesti puupohjaista. Tämä johtuu puupohjaisen biomassan helposta saatavuudesta. Suurin osa puupohjaisesta biomassasta on metsäteollisuuden sivutuotteita, kuten kuorta, sahanpurua ja haketta. Tilastokeskuksen mukaan bioenergiasta noin 40 % tuotettiin vuonna 2018 mustalipeällä ja 50 % puulla, joka jakautuu kahteen osaan: 35 % prosenttia tuotetusta bioenergiasta tuotetaan energiantuotannossa ja teollisuudessa ja 15 % pienemmän mittakaavaan puunpoltolla. Loput kymmenen prosenttia tuotetusta bioenergiasta muodostuu biohajojien polttoaineiden talteen otetuista polttoaineen osista, nestemäisistä polttoaineista ja muista polttoaineista. Kuvassa 1 esitettynä kaavio tuotetusta bioenergiasta lähteittäin. (Alakangas et al. 2016, 56.)

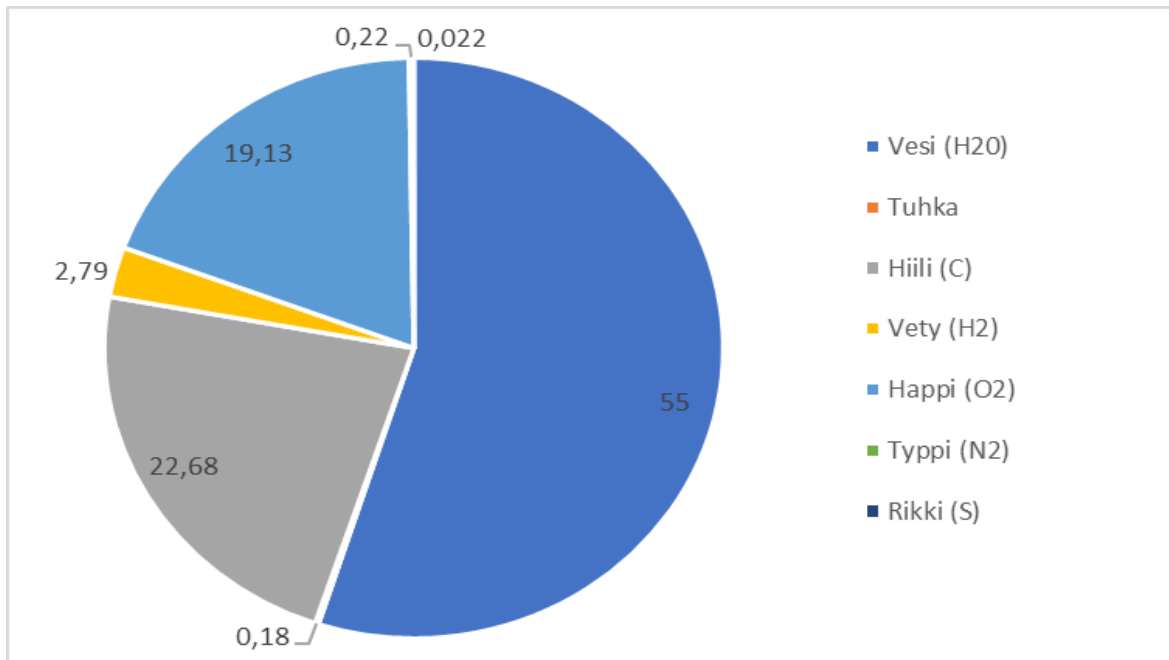


**Kuva 1.** Tuotetun bioenergian osuudet lähteittäin. (Bioenergia Ry 2019.)

Ilmaston muutos ja ilmakehän ohentuminen on pakottanut ihmiskunnan siirtymään pois fossiilisten polttoaineiden luota, uusista investoinneista lähes kaikki ovatkin nykypäivänä uusiutuvaa energiaa. Biomassa lasketaan sekä uusiutuvaksi että hiilineutraaliksi energianlähteeksi huolimatta siitä, että se vapauttaa palaessaan hiilidioksidia. Kyseinen määritelmä perustuu kasvien sitomaan hiilidioksidi määrään kasvunsa aikana eikä palaessaan kasvata maailman kokonaishiilidioksidivarastoa. (Sharma et al. 2018, 177.)

## 2.1 Puupolttoaineiden koostumus

Puuperäisissä polttoaineissa tuoreen vastakaadetun puun painosta jopa yli puolet on vettä. Kosteusprosentti tuoreella puulla on normaalisti 40-60 prosenttia välillä. Kuivamassasta yli 99 prosenttia muodostuu hiilestä, hapesta ja vedystä. Ympäristölle haitallisten typen ja rikin osuudet puussa ovat pieniä. Rikin ja typen reagoidessa hapen kanssa syntyy ympäristölle haitallisia typen- ja rikinoksideja. Typen osuus kuivamassasta on keskimäärin 0,5 prosenttia ja rikin osuus 0,05 prosenttia. Tuhkaa puussa on hieman vajaa 0,4 prosenttia kuivamassasta. Kuvassa 2 on esitettyä vastakaadetun puun massaosuudet. (Huhtinen et al. 1997, 33.)



**Kuva 2.** Tuoreen puun alkuaineiden massaosuudet. (Huhtinen et al. 1997, 33.)

Massaosuudet vaihtelevat eri puulajien välillä merkittävästi ympäristölle haitallisen typen osalta. Muiden osuuksien muutokset eivät ole yhtä merkittäviä energiantuotannon yhteydessä. Lehtipuilla, kuten lepällä ja koivulla, typen osuus on mainittua 0,5 prosentin luokkaa, kun taas Suomessa yleisillä havupuilla kuusella ja männyllä typen osuus on vain 0,1 prosenttia. (Huhtinen et al. 1997, 32-33.)

Puunkosteuteen vaikuttavat puulajin lisäksi merkittävästi myös vuodenaika, puun ikä ja kasvuolosuhteet. Nuorten, kasvuvaiheessa olevien puiden kosteus on vanhoja puita korkeampi ja luonnollisesti puun kosteus on korkeampi kasvualueilla, joissa vettä on helpommin saatavilla. Esimerkiksi koivun kosteusprosentti on korkeimmillaan keväällä jopa 50 prosenttia, kun puu kerää kosteutta ennen lehtien kasvatusta. Kesällä koivun lehdet haihduttavat vettä ja puun kosteus laskee jopa yli kymmenen prosenttiyksikköä keväisestä. Syksyn aikana puun kosteus taas nousee ja tasoittuu talveksi puun siirtyessä lepoon. Talvella puun kosteus tasoittuu noin 45 prosenttiin. Koska havupuut eivät pudota neulasiaan talveksi, niiden kosteuden vaihtelu eri vuodenaikojen välillä on vähäisempää kuin lehtipuilla. Kosteuden vaihtelun vuoksi varsinkin lehtipuiden otollisin hakkuuaika onkin loppukesällä. (Alakangas et al. 2016, 60.)

Nykyajan laitoksista vasta harva sisältää savukaasujen mukana kulkeutuvaa vesihöyryä lauhduttavan savukaasupesurin. Lähes kaikki biomassa täten kuivataan ennen käyttöä voimalaitoksilla. Puuperäisen biomassan kuivatusaika Suomessa sijoittuu keskikeväältä alkusyksyyn, jolloin ilman lämpötila on korkeimmillaan ja ilman kosteus alhaisimmillaan. Puussa olevan veden uskotaan olevan suurin yksittäinen biomassan lämpöarvoon vaikuttava tekijä. Kuivattamalla puun kosteutta saadaan laskettua yhden kesän aikana jopa 35 prosenttia ja kahden kesän aikana 45 prosenttia. (Laine & Sahrman. 1985, 20.)

## **2.2 Kuiva-ainetappiot**

Puun kuivatuksen tarkoituksena on poistaa kosteus poltettavasta puuaineksesta palamisen täydellisen palamisen parantamiseksi. Puun lähes täydellinen palaminen, sen kosteuden ollessa kuivauksen jälkeen 30 prosenttia, vaatii noin 850 celsiusasteen lämpötilan. Tuoreen puun lähes täydellinen palaminen, kosteuden ollessa 65 prosenttia, vaatii kattilalta 1000 celsiusasteen lämpötilan. 1000 celsiusasteen saavuttaminen pienemmillä kattiloilla on haastavaa, mutta kattilakoon kasvaessa yli 3 megawatin täydelliseen palamiseen vaadittavan lämpötilan saavuttaminen on mahdollista. (Huhtinen et al. 1997, 83.)

Puun kuivauksen heikkous, kuivaukseen kuluvan ajan lisäksi, on puun kuiva-ainetappiot kuivauksen aikana. Tutkimuksien mukaan puun kuiva-ainetappiot ovat 1-3 prosenttiyksikköä kuukaudessa ja kuivausajan ollessa 9 kuukautta saattavat puun kuiva-ainetappiot nousta jopa 20 prosenttiin. Puulajien välillä on tässäkin eroavaisuuksia. Männyn kuiva-ainetappiot ovat kuivausaikana keskimäärin 5 prosenttia. (Alakangas et al. 2016, 61.)

## **2.3 Standardi SFS-EN ISO 18134**

Kuivatun biomassan kosteuspitoisuus ei aina ole tasainen. Koska biomassan kuivaus suoritetaan yleisesti ottaen suurissa kasoissa, kasan pohjalla ja reunoilla oleva massa kuivaa paremmin, kuin keskellä oleva massa. Tuoreen biomassan kosteus on pääsääntöisesti tasaisempaa, kun käytetty biomassa on peräisin samasta paikasta, eikä polttoaine-eriä sekoiteta keskenään.

Biomassan kosteuden tarkistamiseen käytetään standardia SFS-EN ISO 18134, jossa on kolme osaa. Standardia voidaan soveltaa kaikille kiinteille biopolttoaineille. Ensimmäinen

osa on vertailumenetelmä. Siinä vähintään 300 gramman painoinen näyte kuivataan 105 celsiusasteisessa uunissa, jonka ilma vaihtuu vähintään kolme kertaa tunnin aikana. Kun biomassanäyte saavuttaa tasapainokosteuden, voidaan sen kosteusprosentti laskea näyte-kappaleen massahäviön avulla. Kappale punnitaan kuumana, mikä aiheuttaa nosteen aiheuttamaa heittoa mittaustulokseen, joka otetaan huomioon laskennallisesti erityistä tarkkuutta vaativissa tilanteissa. Toinen standardin osa on yksinkertaistettu menetelmä, jossa periaate on sama kuin ensimmäisessä osassa. Suurin ero ensimmäiseen osaan on, ettei toisessa osassa nosteen vaikutusta huomioida. Kolmas osa on yleisen analyysinäytteen kosteus. Siinä näytteitä otetaan kaksi, mikä erottaa kolmannen osan kahdesta ensimmäisestä. (SFS-EN ISO 18134: 2017.)

### 3 KOSTEUDEN VAIKUTUKSET

Poltettavan polttoaineen kosteus vaikuttaa monella tapaa kattilan arvoihin. Poltettaessa tuoretta biopohjaista polttoainetta, saattaa polttoaine sisältää kuivattua polttoainetta suurempia pitoisuuksia klooria ja kaliumia. Kloori ja kalium saattavat aiheuttaa kostean polttoaineen vaatimissa korkeissa lämpötiloissa kattilan likaantumista sekä korkealämpötilakorroosiota. Puun latvusbiomassa, kuten havupuiden neulaset, sisältää huomattavasti suurempia kloorin ja kaliumin pitoisuuksia kuin puun rungon osista saatava runkobiomassa. Tavallisesti viheraineita sisältävä biomassa karisee pois kuivauksen yhteydessä, eikä täten päädy polttoon. Kyseisten alkuaineiden päätymistä polttoon yritetään välttää tuoreen biomassan polton yhteydessä yleensä karsimalla puuaineksesta oksat, neulaset ja kannot pois ennen rungon käyttöä energian tuotannossa. (Alakangas, E et al. 2016, 200.)

Kosteus aiheuttaa ongelmia myös tuotantoketjun muissa vaiheissa. Suomessa olosuhteiden vaihtelu aiheuttaa jäätymisvaaran talvikaudella ja homehtumisvaaran muina vuodenaikoina. Biomassan pitkäaikaiseen säilömiseen liittyy riskinsä, niin kuivattuna kuin märkänäkin. Kuivatun biomassan säilömiseen suurissa tiiviissä kasoissa liittyy itsestään syttymisen riski. Saman kaltaisessa tilanteessa, kun massan kosteus on korkeampi, syttymisvaara on luonnollisesti pienempi. Suurempi kosteuspitoisuus synnyttää homehtumisvaaran. (Alakangas et al. 2016, 89.)

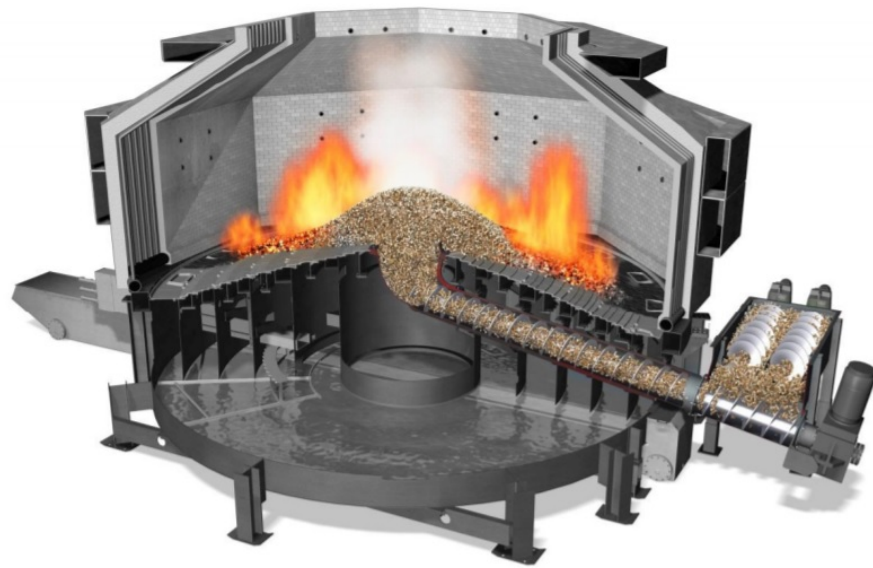
Talvella ajankohtainen jäätymisvaara on todennäköisintä polttoaineen säilytysiloissa ja kolakuljettimilla. Polttoaineen kosteuden haittavaikutukset olisi hyvä ottaa huomioon ajon lisäksi myös jo suunnitteluvaiheessa. Jäätymisriskiä voidaan helposti pienentää lisäämällä pakkasessa seisoviin siiloihin lämmittimet siilojen seinämiin ja pohjaan. Vaihtoehtoisesti siilot voitaisiin sijoittaa lämmitettäviin tiloihin. Polttoaineen jäätyminen kolakuljettimilla aiheuttaa pahimmissa tapauksissa kitkan vähäisyyden vuoksi sen kulkeutumisen väärään suuntaan. Tämän välttämiseksi huomiota tulisi kiinnittää suunnitteluvaiheessa valittuihin materiaaleihin ja ajon aikana pysäytyksen sattuessa kolakuljettimet olisi ajettava tyhjäksi ennen pysähdystä välttääkseen biomassan jäämisen kylmään ilmaan pysäytyksen ajaksi, jos se vain on ajoteknisistä syistä mahdollista tyhjentää ennen pysäytystä. (Ympäristöministeriö. 2012, 22-33.)

### 3.1 Kattilatyypin valinta

Märkä biomassa ei sovi poltettavaksi kaikilla kattilatyypeillä sen vaatiman korkean lämpötilan ja polttoaineen heikon lämpöarvon vuoksi. Ainoat taloudellisesti kannattavat kattilamallit märälle biomassalle ovat kerrosleijukattila ja arinakattila.

Kerrosleijukattila soveltuu hyvin polttotapansa puolesta myös heikompi laatuisten polttoaineiden polttamiseen. Kerrosleijupoltto perustuu nimensä mukaisesti kattilassa leijuvan hiekan vaikutukseen. Kattilan pohjalla leijuvan kuuma tehostaa aineen- ja lämmönsiirtoa. Hiekkakerroksen korkeus on keskimäärin 0,4-0,8 metriä ja käytetyn hiekan keskiraekoko on 1-3 millimetriä. Ennen polttoaineen lisäämistä peti ja hiekka on lämmitettävä vähintään 500 celsiusasteiseksi, jotta voidaan varmistaa polttoaineen turvallinen syttyminen. Polton aikana lämpötila kohoaa 900 celsiusasteeseen, noin 100 astetta tuhkan pehmenemispisteen alapuolella. Polttoaineen erillistä kuivausta ei kerrosleijupoltossa tarvita, koska kostea polttoaine kuivaa kattilassa nopeasti sekoittuessaan kuuman hiekan kanssa ja kuumenee syttymislämpötilaansa. Polttoaineen laadun vaihtelut eivät ole ongelma kyseisessä polttotekniikassa sen suuren lämpökapasiteetin sekä tehokkaan sekoittumisen vuoksi. Kerrosleijupolton heikkous on sen suuri energiantarve suhteessa muihin kattilatyyppeihin. (Huhtinen et al. 1997, 153-158.)

Yleisimmin käytetty kattilatyypin märän biomassan polttamiseen on arinakattila. Varsinkin mekaanisilla kekoarinalla ja viistoarinalla on saavutettu hyviä tuloksia korkean kosteuden biomassan poltossa. Hyvänä lisänä mekaaniseen kekoarinaan on ollut arinan jako vyöhykkeisiin, joista yksi kahdesta tai kolmesta pyörii. Arinakattilan toiminta perustuu polttoaineen tasaiseen levitykseen koko arinan leveydelle tasaisella paksuudella mahdollisimman hyvän palamisen saavuttamiseksi. Arinakattilalla polttoaineen sekoittuvuus on heikkoa, vaikka osa kattilan osista liikkuisikin, minkä vuoksi polttoaineen tasainen levitys on erityisen tärkeää. Arinakattilan heikkous on suuri palamattomien partikkelien määrä. (Jalovaara et al. 2003,29.) Kuvassa 3 on esitettyinä Wärtsilän pyörivä kekoarina GeoGrate:

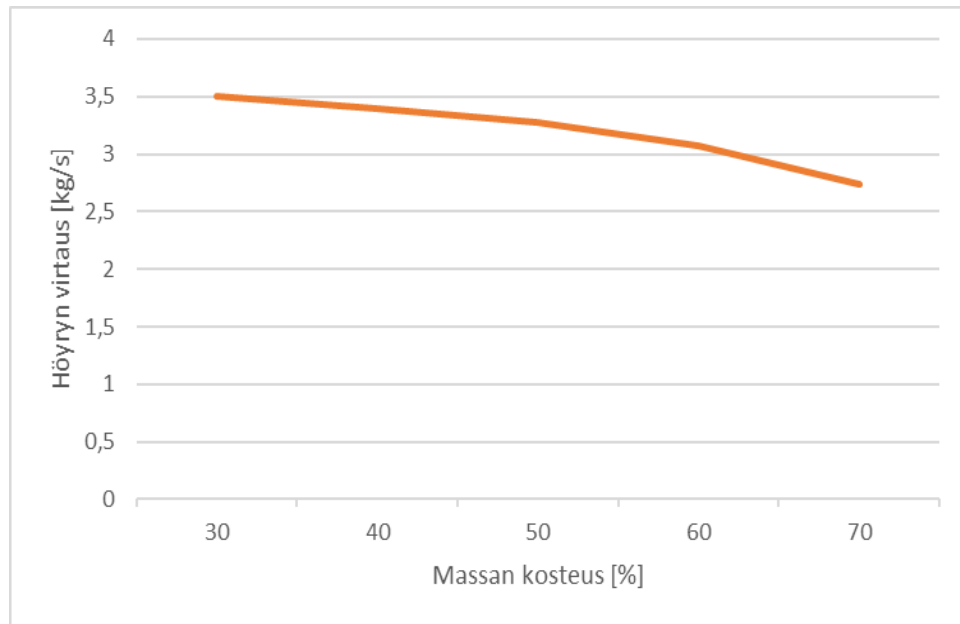


**Kuva 3.** Pyörivä kekoarinakattila, BioGrate. (Wärtsilä Oyj.)

Molemmissa määrän biomassan polttoon käytetyissä kattilatyypeissä on erillinen polttoaineen syöttö. Polttoaine kuljetetaan kattilan läheisyydessä sijaitsevasta polttoainesiilosta kuljettimella kattilalle, josta se kulkee kerrosleijukattilaan pudotusputken kautta ja arinakattilaan syöttöruuvien kautta. (Jalovaara et al. 2003, 32.)

### **3.2 Vaikutus höyryn tuottoon**

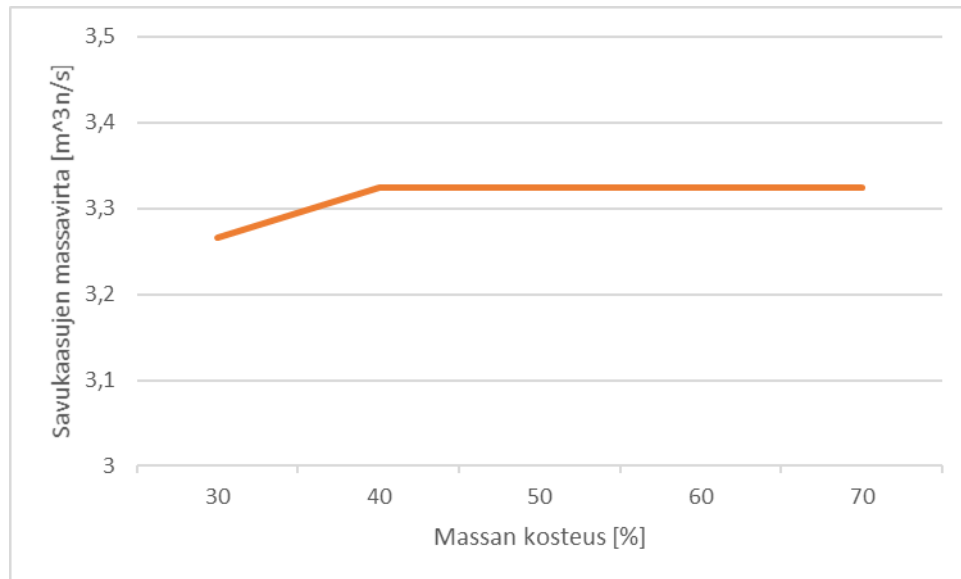
Kattilan höyryn tuotto laskee biomassan kosteusprosentin kasvaessa ja höyryn virtaus täten vähenee. Tuorehöyryn virtaus kuivatun polttoaineen 30 prosentin kosteudella on 3,5 kg/s, ja se laskee 2,74 kg/s kosteuden ollessa 70 %. Kuvien 4, 5, 6, 7 ja 8 excel-tiedoston alkuarvoina on käytetty polttoaineena puuhaketta, jonka kosteus vaihtelee 30 % ja 70 % välillä. Kuvassa 4 on esitettyä graafisesti biomassan kosteuden vaikutus tuorehöyryn virtaukseen:



**Kuva 4.** Tuorehöyryn virtaus suhteessa biomassan kosteuteen.

### 3.3 Vaikutus savukaasujen massavirtaan

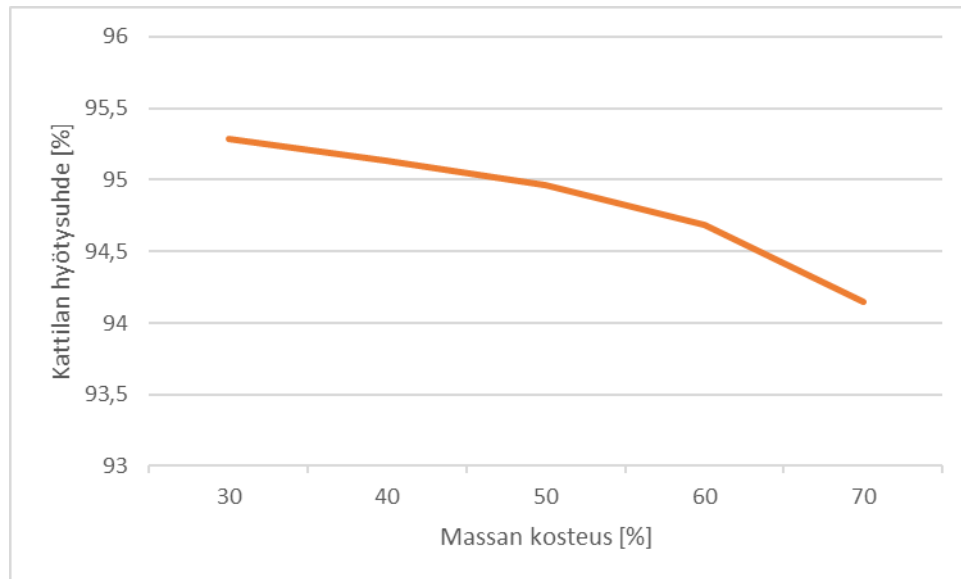
Savukaasujen massan virtauksen vaikutukset ovat pienempiä, eikä massan virtaus muutu enää kosteuden kasvaessa yli 40 prosentin. Polttoaineen kosteuden ollessa alle neljäkymmentä prosenttia, savukaasujen massavirta on hieman vähäisempää kuin suuremmilla kosteuksilla. Märkä massavirta on 3,266 m<sup>2</sup>n/s kosteuden ollessa 30 prosenttia ja se kasvaa 3,324 m<sup>2</sup>n/s polttoaineen kosteuden noustessa 40 prosenttiin ja sitä korkeammaksi. Savukaasujen kuivamassavirta pysyy samana riippumatta polttoaineen kosteudesta. Savukaasujen massavirtaa kasvattaa siis ainoastaan ylimääräinen höyrystyvä neste. Kuvassa 5 on esitettyä graafisesti savukaasujen massavirran muutos biomassan kosteuden suhteen:



**Kuva 5.** Savukaasujen massavirta suhteessa biomassan kosteuteen.

### 3.4 Vaikutus kattilan hyötysuhteeseen

Poltettavan biomassan kosteus vaikuttaa myös oleellisesti myös kattilan hyötysuhteeseen. Poltettavan biomassan kosteuden kasvaessa 30 prosentista 70 prosenttiin, kattilan hyötysuhde laskee yli yhden prosenttiyksikön verran. Tavallisesti kattilan hyötysuhde on 30 prosentin kosteudella 95,3 prosenttia, kun taas maksimaalisella 70 prosentin kosteudella hyötysuhde tippuu 94,1 prosenttiin. Kuvassa 6 on esitettyinä graafisesti kattilan hyötysuhteen muutos suhteessa poltettavan biomassan kosteuteen:

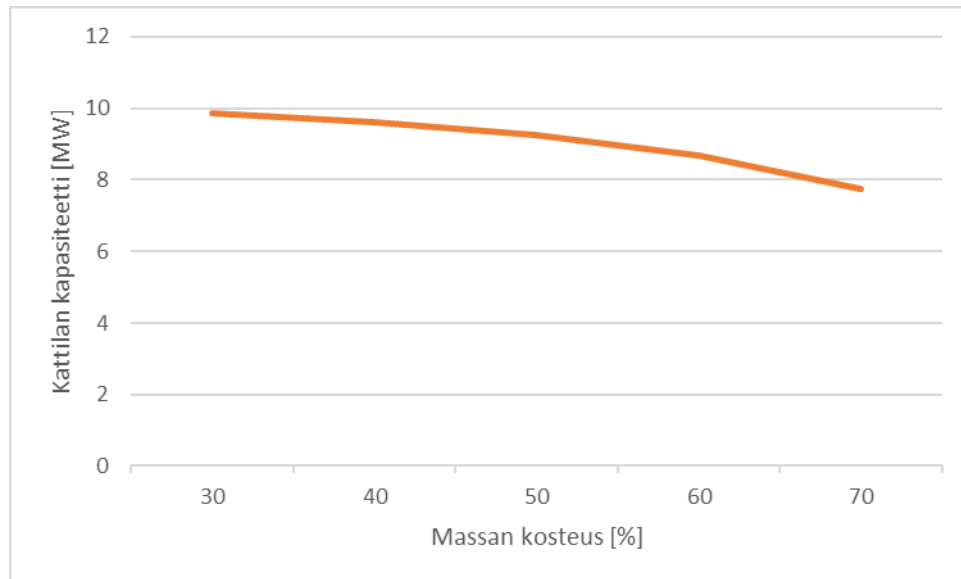


**Kuva 6.** Kattilan hyötysuhde suhteessa biomassan kosteuteen.

Kattilan hyötysuhteeseen vaikuttaa kostean biomassan polton yhteydessä polttoaineen kosteusprosentin lisäksi myös savukaasujen lämpötilan ja -happi-pitoisuus. Näiden lisäksi hyötysuhteeseen vaikuttaa palamatta jääneen palavan aineksen määrä lentopölyssä savukaasujen seassa. Palamatta jääneen aineksen vaikutus hyötysuhteeseen ei ole yhtä merkittävä, kuin muiden edellä mainittujen tekijöiden vaikutus, kunhan savukaasujen häkäpitoisuus ei kasva liian suureksi. (Ympäristöministeriö 2012.)

### 3.5 Vaikutus kattilan kapasiteettiin

Polttoaineen kosteuden kasvaessa kattilan kapasiteetti pienenee. Kapasiteetti 30 prosentin kosteudella on  $9,88 \text{ MW}_t$ , josta se lähtee laskemaan jyrkemmin mitä suuremmaksi polttoaineen kosteus kasvaa. Maksimaalisella 70 prosentin biomassan kosteudella kattilan kapasiteetti on enää  $7,73 \text{ MW}_t$ . Kuvassa 7 on esitettyä kuvaaja kattilan kapasiteetin laskusta poltettavan biomassan kosteuden kasvaessa:



**Kuva 7.** Kattilan maksimi lämpökapasiteetti suhteessa biomassan kosteuteen.

### 3.6 Vaikutus savukaasuista lauhtuvaan lämpöenergiaan

Kattilasta savukaasuihin siirtyvän lämpöenergian määrä kasvaa polttoaineen kosteuden kasvaessa. Kuvasta 8 voimme nähdä selkeästi, kuinka savukaasuista mahdollisesti talteen saatavan lämpöenergian määrä kasvaa mitä kosteampaa polttoainetta kattilassa poltetaan. Savukaasuista 30 prosentin kosteudella saatava lauhtuva lämpö on 0 MW<sub>t</sub>, kunnes lauhtuvan lämmön määrä lähtee jyrkkään kasvuun. 70 prosentin kosteudella savukaasuista saatavilla oleva lämpöenergia on 1,84 MW<sub>t</sub>.



**Kuva 8.** Savukaasuista lauhtuva lämpö suhteessa biomassan kosteuteen.

## 4 SAVUKAASUPESURIT

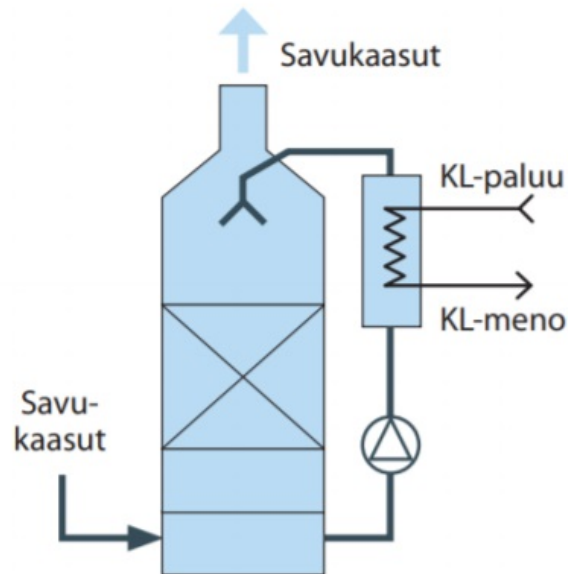
Märkää biomassaa poltettaessa kosteuden vuoksi polttoaineen palaminen muuttuu epätäydellisemmäksi ja merkittävä osa lämpöenergiasta karkaa savukaasujen mukana taivaalle. Tämä lämpöenergia on mahdollista hyödyntää lisäämällä savupiipun yhteyteen lauhduttava savukaasupesuri. Savukaasupesurin avulla voidaan saavuttaa merkittävä taloudellinen hyöty kierrättämällä prosessissa savukaasuista talteen otettu lämpöenergia. Savukaasupesurien toinen oleellinen hyöty on niiden toiminnan mekaaninen periaate. Savukaasupesurin pesun yhteydessä savukaasuista lauhtuu veteen ympäristölle haitallisia yhdisteitä ja pienhiukkasia. Savukaasujen pesun jälkeen piipusta taivaalle lopulta päätyvä savukaasu sisältää tässä vaiheessa mahdollisimman vähän ympäristölle haitallisia yhdisteitä. Savukaasupesurin käyttö edesauttaa tehdasta saavuttamaan nykyajan tiukat ympäristövaatimukset päästöjen suhteen. (Caligo Industria n.d.)

Lauhduttuvan savukaasupesurin avulla saadaan syntyvistä savukaasuista suodatettua ympäristöön karkaavasta osasta pois 90 prosenttia pienhiukkasista, joiden hiukkaskoko on 0,5 mikrometriä tai alle ja 98-100 prosenttia sitä suuremmista hiukkasista. Savukaasupesuri on letkusuodattimen jälkeen toiseksi tehokkain puhdistin savukaasuille. (Huhtinen et al. 2000, 251.)

### 4.1 Savukaasupesurin toimintaperiaate

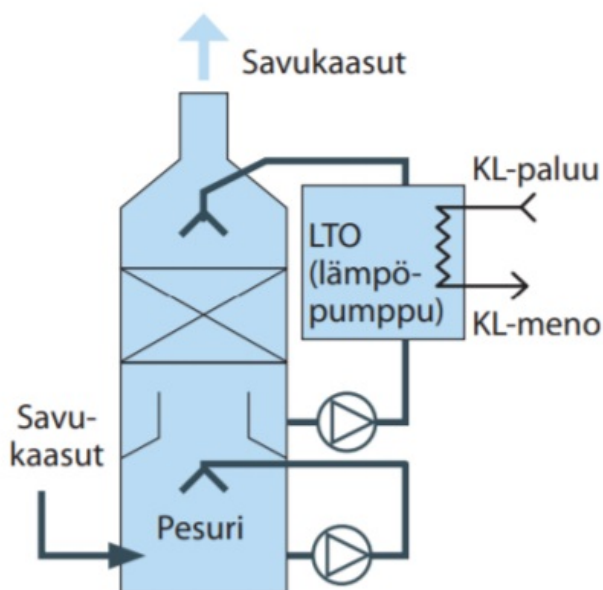
Toimintaperiaatteeltaan savukaasupesuri on märkäpesuri, jonka toiminta perustuu kahteen osaprosessiin. Ensimmäisessä prosessin osassa savukaasut pestään ja savukaasuissa olevista haitallisista pienhiukkasista poistuu savukaasuista pesuveden mukana vesikiertoon. Pesuvaiheessa savukaasujen lämpötila laskee 180 celsiusasteesta savukaasujen märkälämpötilaan, joka on noin 60-70 celsiusastetta. Tuolloin savukaasut ovat saavuttaneet kosteuspiirteen eli niiden suhteellinen kosteus nousee 100 prosenttiyksikköön ja höyry alkaa tiivistyä vedeksi. Mitä alhaisemmiksi savukaasujen loppulämpötila saadaan, sitä enemmän lämpöenergiaa on mahdollista saada siirrettyä savukaasuista takaisin hyötykäyttöön. Tapahtuneen faasimuutoksen vuoksi entalpiamuutokset ovat suurempia kuin yhden faasin sisällä tapahtuvien muutosten aiheuttamat entalpiamuutokset. Prosessin toisessa osassa savukaa-

sut kulkevat lauhduttimen läpi, jossa niiden sisältämä lämpö ja lämpöenergia siirtyvät lämmönvaihtimen kautta ristivirtaan kulkevaan kiertoveteen. Kuvassa 9 on esitettyinä savukaasupesurien perinteinen rakenne. (Caligo Industria n.d.)



**Kuva 9.** Perinteinen savukaasupesurin rakenne. (Caligo Industria n.d.)

Savukaasupesurin toimintaa voidaan tehostaa parhaimmillaan jopa 4-8 kertaiseksi lisäämällä prosessiin lämpöpumppujärjestelmä. Lämpöpumpulla on mahdollista säätää kaukolämpöverkon paluuvirtauksen lämpötilaa. Pesurissa ilman lämpöpumppujärjestelmää kaukolämmön paluulämpötila rajoittaa savukaasujen loppulämpötilan keskimäärin 3–5 celsiusastetta paluuvien lämpötilaa korkeammaksi. Lisäämällä prosessiin lämpöpumppujärjestelmä kaukolämmön paluulämpötilaa sekä savukaasujen loppulämpötilaa voidaan saada laskettua jopa 20 astetta verrattuna perinteiseen savukaasupesuriin. Savukaasujen loppulämpötilaa laskemalla saadaan otettua talteen yhä enemmän hukkaan menevää lämpöenergiaa. Lämpöpumpulla siirretty energia ohittaa pesurin ja siirtyy suoraan lämmönvaihtimen kautta kaukolämpöverkkoon. Kuvassa 10 on esitettyinä savukaasupesurin rakenne lämpöpumpun kanssa. (Caligo Industria n.d.)



**Kuva 10.** Savukaasupesuri lämpöpumppukytkenällä. (Caligo Industria n.d.)

Biopolttoaineista savukaasuihin irtoava tuhka on emäksistä ja näin ollen neutralisoi hapan-  
 ta pesurin lauhdevettä ja pesurin pohjalle kertyvää lietettä. Tavallisesti lauhteen ja lietteen  
 neutralisoimiseen käytetään neutralisointikemikaaleja, joista yleisimmin käytössä on nat-  
 riumhydroksidi. Pesurin pohjalle kertyy savukaasuista irtoavaa lietettä, joka pumpataan  
 pois pesurista joko muun palamattoman aineen sekaan kattilan tuhka-astiaan tai kattilan  
 ulkopuolella sijaitsevaan jäteastiaan. Pesurin lauhdevesi on myös puhdistettava ennen sen  
 laskemista viemärikanaaliin tai vesistöön. Lauhdeveden puhdistus sisältää nesteen neutra-  
 loimisen neutralointikemikaalilla ja sen suodatuksen ympäristölupien mukaisesti riittävän  
 puhtaaksi. Lauhdeveden pH-arvon muutokset ovat suuria, minkä takia puhdistusprosessissa  
 on käytettävä erityistä tarkkaavaisuutta. Savukaasupesurilta tulevien jätevesien puhdistus  
 määrittyy Suomen lain ja Valtioneuvoston asetuksen 750/2013 mukaan. (Ympäristöminis-  
 teriö 2012)

## 4.2 Kannattavuus

Uusimmat savukaasupesurit on optimoitu käyttämään pelkästään niiden vaatima määrä  
 vettä, jolloin pesurin investointi voidaan mitoittaa optimaaliseksi kulloiseenkin ympäris-  
 töön. Rovaniemen Energian käyttöön ottaman Valmetin toimittaman savukaasupesurin ko-

konaisinvestointi oli 5,9 miljoonaa euroa. Arvioiden mukaan savukaasupesurin tuottama hyöty on noin 1,5 miljoonaa euroa vuodessa, riippuen olosuhteista, kuten lämpötiloista ja kattilan kuormasta. Tällöin Rovaniemen Energian savukaasupesurin investoinnin takaisinmaksuajaksi muodostuu hieman alle neljä vuotta. (Valmet n.d.) Optimistisempien savukaasupesurien toimittajien, kuten Caligo Industrian mukaan takaisinmaksuaika saattaa olla jopa alle 2,5 vuotta riippuen investoinnin koosta ja laitoksesta, johon savukaasupesuri asennetaan (Caligo Industria n.d.).

Ympäristöministeriön arvion mukaan savukaasujen puhdistukseen käytettävän pesurin, joka sisältää lämmöntalteenottoyksikön, investointikustannukset ovat 35 000 e/MW<sub>pa</sub> (Ympäristöministeriö 2012). Savukaasupesurien investoinnit ovat miljoonakokoluokkaa, mutta niistä saatava hyöty on selkeä. Savukaasupesurien käyttö kasvattaa laitoksen kokonaislämmöntuotantoa 20 prosenttia ja vähentää polttoaineen kulutusta jopa 30 prosenttia. (Nevel 2020.)

Savukaasupesurista saatava hyöty kasvaa, mitä korkeammaksi poltettavan biomassan kosteus kasvaa. Kuten kuvasta 8 voimme todeta, kosteuden kasvaessa savukaasujen mukana pesurille kulkeutuvan lämpöenergian määrä kasvaa ja pesurilta talteen otettavan energian määrä kasvaa. Myös haitallisten hiukkasten määrä savukaasuissa vähenee polttoaineen kosteuden pienentyessä, joten myös savukaasupesurista saatavan toisenkin hyödyn merkitys vähenee pienemmillä polttoaineen kosteuksilla.

Tuorehakkeen hankinnassa oleelliset edut ovat nopeampi toimitus ja edullisemmat toimituskustannukset. Kuivatetun puuaineksen toimitusaika vaihtelee puolesta vuodesta reilusti yli vuoteen, mutta sen nopeampaa toimitusta kuivatetulle puulle harvemmin nähdään. Tuorehakkeen toimitusaika vaihtelee yhdestä päivästä muutamaan viikkoon. Kuivatun hakkeen toimitusaikaa säätelee hakkeen kuivatus, kun taas tuorehakkeen toimitusajan määrää lähinnä kuljetusmatka. Tuorehakkeen hankinta kulut ovat kuivatun hakkeen hankintakuluja pienemmät.

Kun käytetään esimerkkitilannetta puun hakkuun hinnoittelusta, jossa lasketaan hinta puun ostotilanteesta aina sen polttoon saakka ja käytetään laskentaan 40 kilometrin kaukokulje-

tusetäisyyttä. Kuivatun mäntyhakkeen hankintakulut ovat keskimäärin  $49 \text{ e/m}^3$ , kun ne vastaavasti tuoreelle mäntyhakkeelle on  $42 \text{ e/m}^3$ . Hakkeen hankinnan hinnoittelussa on siis keskimäärin 7 euron ero kuutiometriä kohti tuorehakkeen hyväksi. Suurin ero hinnoissa syntyy haketuksesta, kun kuivattu puu haketetaan välivarastolla ja tuore puu sen käyttöpaikalla. Tästä syntyvä ero on noin  $4 \text{ e/m}^3$ . Toiseksi suurin säästö tulee polttoaineen kaukokuljetuksesta. 40 kilometrin matkalla tuoreiden puurankojen kuljettaminen on keskimäärin  $2 \text{ e/m}^3$  halvempaa kuin kuivatun hakkeen kuljetus. Toimitusmatkan kasvaessa tästä suuremmaksi ero kuljetuksen hinnassa kasvaa entisestään. Tietysti näiden etujen saavuttaminen edellyttää laitokselta haketuslaitteistoa, jota ei tällä hetkellä kuitenkaan löydy läheskään jokaiselta voimalaitokselta. (Laitila et al. 2010)

## 5 YHTEENVETO

Tämän kandidaatin työn tavoitteena oli tutkia kirjallisuuden lähteitä liittyen biomassaan, sen kosteuteen ja savukaasupesureihin. Biomassa on tärkeä palanen matkalla kohti hiili-neutraalia tulevaisuutta. Suomessa bioenergian on pakko ottaa suuri rooli taistelussa fossiilisia polttoaineita vastaan, jotta Euroopan unionin asettamat tavoitteet ovat edes teoriassa mahdolliset saavuttaa.

Märän biomassan polttamisella voidaan saavuttaa oikeanlaisella tekniikalla suuri hyöty. Ja hyötyä on mahdollista saada monesta eri prosessin vaiheesta. Taloudellista hyötyä aletaan saavuttaa jo ennen polttoaineen saapumista tehdasalueelle, kun pitkästä kuivatusajanjak-sosta luovutaan. Polttoaineen toimitusaika lyhenee merkittävästi ja kuivatuksesta aiheutu-vien kuiva-aine tappioiden määrä vähenee todella merkittävästi.

Savukaasupesureilla saatava talteen otettu hukkaenergia mahdollistaa laitoksen hyötysuh-teen kasvun ja polttoaineen kulutuksen vähenemisen. Savukaasupesurin tuomien taloudel-listen hyötyjen lisäksi se tuo myös ympäristöllistä hyötyä. Savukaasupesuri puhdistaa pol-tosta aiheutuvista savukaasuista ilmakehälle ja ympäristölle haitallisia yhdisteitä ja helpot-taa tiukkojen päästövaatimusten saavuttamista.

Korkean kosteuspitoisuuden omaavan polttoaineen polttaminen aiheuttaa toisaalta myös tiukkoja vaatimuksia laitokselta, eikä märän biomassan polttaminen sovellu suurimmalle osalle tämän hetken voimalaitoksista. Savukaasupesurin lisäksi yhtiön pitäisi tehdä suuria investointeja myös prosessin muihin osiin, jos tarkoituksena olisi ottaa käyttöön märkä biomassaa kuivatun sijasta. Tulevaisuudessa märällä biomassalla on kuitenkin mahdollisesti suurempi vaikutus energiantuotannossa ja uusien voimalaitosten suunnittelussa tämä vaih-toehto on varmasti mietinnän alla. Taulukossa 1 on esitettyä vielä lopuksi SWOT-analyysi märän biomassan ja lauhduttavan savukaasupesurin hyödyistä ja haitoista:

**Taulukko 1.** Määrän biomassan ja lauhduttavan pesurin SWOT-analyysi.

<b>Vahvuudet</b>	<b>Heikkoudet</b>
<p>Savukaasupesurin avulla mahdollisuus saavuttaa parempi kokonaishyötysuhde</p> <p>Pienempi polttoaineen kulutus</p> <p>Puhtaammat ympäristöön vapautuvat savukaasut</p>	<p>Vaatii merkittävän määrän tietyntyyppisiä laitteita ollakseen kannattava</p> <p>Kallis investointi</p>
<b>Mahdollisuudet</b>	<b>Uhat</b>
<p>Nopeampi polttoaineen toimitusaika</p> <p>Vähemmän kuiva-aine tappioita</p>	<p>Ei kovin yleinen; Ongelmat polttoaineen toimituksessa</p> <p>Polttoaineen jäätyminen tai homehtuminen</p>

## LÄHTEET

Alakangas, E. Hurskainen, M. Laatikainen-Luntama, J. Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT.

Basu, Prapir. 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction Practical Design and Theory. 2. painos. Amsterdam. ISBN-9780123965431.

Bioenergia ry. 2019. Perustietoa bioenergiasta. [verkkoaineisto]. [viitattu 22.8.2021].

Saatavissa:

[https://www.bioenergia.fi/wpcontent/uploads/2020/03/Bioenergia\\_perustietopaketti.pdf](https://www.bioenergia.fi/wpcontent/uploads/2020/03/Bioenergia_perustietopaketti.pdf)

Caligo Industria Oy. n.d. Nykyaikainen savukaasupesuri – merkittävä biolämpölaitosten kannattavuuden parantaja [verkkoaineisto]. [viitattu 25.8.2021]. Saatavissa:

[http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo\\_Savukaasupesuri.pdf](http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf)

Huhtinen, M. Kettunen, A. Nurminen, P. Pakkanen, H. 1997. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki. ISBN-951-37-3360-2.

Jalovaara, J. Aho, J. Hietämäki, E. Hyytiä, H. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. ISBN 952-11-1488-6.

Laine, R. Sahrman, K. 1985. Puupolttoaineiden ominaisuudet ja hinnoitteluperusteet. Tiedotteita 513. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT.

Laitila, J. Leinonen, A. Flyktman, M. Virkkunen, M. Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. Tiedotteita 2564. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. ISBN 978-951-38-7677-7.

Nevel. 2020. Energiainfrayhtiö Nevel investoi savukaasupesuritekologiaan useilla paikkakunnilla – Miljoonaluokan investoinnilla parannetaan energiatehokkuutta. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.8.2021] Saatavissa:

<https://nevel.com/fi/story/energiainfrayhtio-nevel-investoi-savukaasupesuritekologiaan-useilla-paikkakunnilla-miljoonaluokan-investoinnilla-parannetaan-energiatehokkuutta/>

SFS-EN ISO 18134-2:2017. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uusi menetelmä. Suomen standardoimisliitto SFS.

Sharma, A. Shukla, A. Aye, L. 2018. Low Carbon Energy Supply Trends, Technology, Management. Singapore. Springer. ISBN 978-981-10-7325-0.

Valmet. n.d. Energiaa talteen ottava savukaasupesuri leikkaa lämmityskustannuksia Rovaniemellä. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.8.2021]. Saatavissa:

<https://www.valmet.com/fi/media/artikkelit/all-articles/savukaasupesurillalammityskulut-kuriin/>

Wärtsilä Oyj. BioGrate 3. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.8.2021]. Saatavissa:

<https://www.wartsila.com/fi>

Ympäristöministeriö. 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5-30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. [verkkoaineisto]. [viitattu 28.8.2021]. Saatavissa:

<https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BC1EA01A4-C78E-4152-A601-3AE51323EDEB%7D/119826>