

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Biomassan kuivaus pienissä CHP-laitoksissa

Biomass drying in small CHP-plants

Työn tarkastaja: Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: Esa Vakkilainen

Lappeenranta 25.11.2017

Tomi Nevalainen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Tomi Nevalainen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Esa Vakkilainen

Kandidaatintyö 2017

35 sivua, 8 kuvaa, 7 taulukkoa ja 2 liitettä

Hakusanat: Biomassan kuivaus, pien-CHP, hukkalämpö

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia biomassan kuivausta. Työssä tutkitaan myös kuivauksen energiankulutusta ja ilmantarvetta teoreettisessa kuivausprosessissa sekä tutustutaan itse biomassan kuivumiseen käymällä läpi aiheeseen liittyvää kirjallisuutta ja tutkimuksia. Pääpaino työssä on kuitenkin tutkia biomassan kuivaamisen kannattavuutta pienessä CHP-laitoksessa, sekä tarkastella kuivaukseen kehitettyjä teknologioita. Kannattavuuslaskelmia varten tietoja laitteista sekä niiden hinnoista kyseltiin laitevalmistajilta. Työn kohteena on Valtimolle suunnitella oleva CHP-laitos, mutta työn tulokset soveltuvat myös muihin vastaavanlaisiin projekteihin.

Kuivauslämpötilan huomattiin vaikuttavan erityisen paljon prosessin energiankulutukseen ja ilmantarpeeseen. Myös ulkoilman lämpötilalla ja kosteudella huomattiin olevan jonkinlainen merkitys. Pienen kokoluokan CHP-laitokselle soveltuvimpia kuivaintyyppisiä katsottiin olevan viirakuivain sekä rumpukuivain varsinkin, jos hukkalämmön käyttämisen halutaan olevan mahdollista. Muiden kuivaintyyppien ongelmina olivat muun muassa liian suuri koko tai liian korkean kuivauslämpötila.

Kannattavuuslaskelmissa huomattiin, että hukkalämpöä hyödynnettäessä biomassan kuivaaminen pienessä CHP-laitoksessa on kannattavaa, mutta lämpöenergian ottaminen esimerkiksi kaukolämpöverkosta tekee kuivauksesta monissa tilanteissa kannattamatonta. Hukkalämmön hyödyntäminen on siis avainasemassa, mikäli biomassaa halutaan kuivata pienissä CHP-laitoksissa kannattavasti.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	6
2 Biomassan kosteuden vaikutukset	7
3 Yleistä biomassan kuivauksesta	9
3.1 Kuivaukseen vaikuttavat tekijät	9
3.2 Teoreettinen kuivausilman tarve	9
3.3 Teoreettinen ominaisenergiankulutus.....	13
4 Erilaisia kuivaintyyppisiä	15
4.1 Viirakuivain.....	16
4.2 Rumpukuivain	18
4.3 Virtauskuivain	19
4.4 Leijupetikuivain.....	20
5 Valtimon laitoshanke	21
5.1 Korvattava laitos.....	21
5.2 Suunnitteilla oleva laitos	21
6 Kuivuri-investointi	22
6.1 Kannattavuuteen vaikuttavat tekijät	22
6.2 Laskentaperusteet	22
6.3 Hankintakustannukset	24
6.4 Investointi käyttäen hukkalämpöä.....	25
6.4.1 Takaisinmaksuaika.....	26
6.4.2 Annuiteettimenetelmä	28
6.4.3 Nykyarvomenetelmä	28
6.5 Investointi käyttäen kaukolämpöä.....	29
6.5.1 Takaisinmaksuaika.....	30
6.5.2 Annuiteettimenetelmä	30
6.5.3 Nykyarvomenetelmä	31
7 Päätelmät investoinnin kannattavuudesta	32
8 Yhteenveto	33
Lähdeluettelo	34

Liite 1. Kuvaajat investointilaskelmista käytettäessä hukkalämpöä

Liite 2. Kuvaajat investointilaskelmista käytettäessä kaukolämpöä

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

a	nykyarvotekijä	[-]
A	pinta-ala	[m ²]
c	annuiteettitekijä	[-]
h	lämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
i	laskentakorko	[%], [-]
I	investointi	[€]
p	paine	[Pa]
P	teho	[W]
Q	lämpöarvo	[kWh/kg]
R	kaasuvakio	[J/kgK]
S	säästöt	[€/a]
q	lämmönsiirtoteho	[W]
q_m	massavirta	[kg/h]
T	lämpötila	[K], [°C]
v	ominaistilavuus	[m ³ /kg]
V	tilavuus	[m ³]
x	absoluuttinen kosteus	[kg _{H2O} /kg _{k.i.}]

Kreikkalaiset aakkoset

η	hyötysuhde	[%], [-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]

Alaindeksit

b	biomassa
e	sähkö
h	lämpö
H ₂ O	vesi
i	ilma
k	kuivauskaasu

Lyhenteet

CHP	Combined Heat and Power - Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto
k.i.	Kuiva ilma
NA	Nykyarvo
p.a.	Polttoaine
TMA	Takaisinmaksuaika

1 JOHDANTO

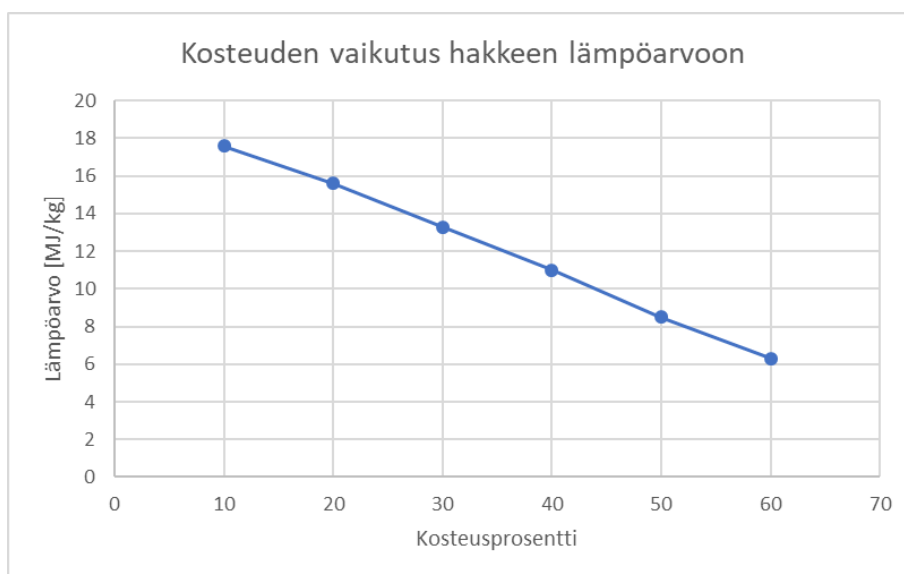
Hiilidioksidin päästövähennyksiin sitoutuminen ajaa energiantuottajia käyttämään hiilineutraaleja energiantuotantomenetelmiä, joista biomassan polttaminen on hyvin yleinen vaihtoehto. Energiantuotannossa biomassalla tarkoitetaan yleisesti kaikenlaisia eloperäisiä, polttamiseen soveltua jätteitä, kuten esimerkiksi hakkuutähteitä. Biomassasta on kehittymässä kovaa vauhtia hyvin tärkeä energianlähde, sillä maailmanlaajuisesti biomassalla vuosittain tuotetun energian määrä on yli kaksinkertaistunut viimeisen kymmenen vuoden aikana, eikä kasvu ole näyttänyt laantumisen merkkejä. Esimerkiksi vuonna 2015 maailman kaikesta tuotetusta energiasta reilut 14 prosenttia tuotettiin biomassalla. (REN21 2017, s. 47) Suomessa biomassa on vielä merkittävämmässä asemassa, sillä vuonna 2016 hieman yli neljännes kaikesta Suomessa kulutetusta energiasta oli tuotettu pelkästään puupolttoaineilla (Statistics Finland 2017, s. 4).

Biomassan käytön lisääntyessä huomiota tulee kiinnittää entistä enemmän biomassan käsittelyn ja polttamisen tehokkuuteen. Polttamisen tehokkuutta saadaan parannettua esimerkiksi kuivaamalla biomassaa ennen polttoa. Kuivaaminen onkin biomassan käsittelyssä yksi tärkeimmistä tekijöistä, jolla voidaan vaikuttaa polttoaineen ominaisuuksiin. Kuivaaminen on samalla myös paljon energiaa ja pääomaa vaativa prosessi. Joissain tapauksissa, esimerkiksi pelletöinnissä ja kaasutuksessa, biomassan kuivaaminen on jopa aivan välttämätöntä, jotta se soveltuu käytettäväksi polttoaineeksi (Gebreegziabher et al. 2013, s. 1).

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on arvioida biomassan kuivaamisen kannattavuutta pienissä CPH-, eli sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa. Erityisenä kohteena on Valtimolle suunnitteilla oleva CHP-laitos, mutta työn tuloksia voi hyvin käyttää myös muiden vastaavanlaisten hankkeiden yhteydessä. Tässä työssä biomassalla tarkoitetaan lähinnä metsähaketta, sillä se tulee olemaan Valtimolle valmistuvan laitoksen polttoaine. Kuivauksen kannattavuutta tarkastellaan käyttämällä hyväksi valmistajilta saatuja tietoja kuivureiden hinnoista sekä energiankulutuksesta. Työssä tarkastellaan myös laitteen hankintahinnan sekä metsähakkeen hintojen vaihtelun vaikutusta kuivuri-investoinnin kannattavuuteen. Näiden lisäksi työssä perehdytään hieman myös kuivauksen peruseräisiin ja tutustutaan kuivaukseen ilmiönä.

2 BIOMASSAN KOSTEUDEN VAIKUTUKSET

Kuten jo aiemmin mainittiin, biomassan käyttö energialähteenä on lisääntynyt jatkuvasti kuluneen vuosikymmenen aikana. Vaikka biomassalla on erittäin hyvä energianlähde, on sillä kuitenkin omat heikkoutensa. Erilaisten biomassojen yhteisenä ongelmana on niiden sisältämä kosteus, joka laskee polttoaineiden lämpöarvoja merkittävästi. Esimerkiksi tuoreen metsähakkeen kosteus voi olla jopa 60 painoprosenttia ja tällöin hakkeen alempi lämpöarvo on alle 7 MJ/kg (Alakangas et al. 2016, s. 71). Oikeanlaisella kuivauksella hakkeen kosteus voidaan saada laskemaan kymmeneen painoprosenttiin tai jopa alle. Näissä kosteuksissa samaisen hakkeen alempi lämpöarvo voi olla jopa 18 MJ/kg (Alakangas et al. 2016, s. 71). Kuivauksella on siis hyvin merkittävä rooli biomassapohjaisten polttoaineiden energiatiheyteen. Kuvassa 1 on graafisesti esitettyä kosteuspitoisuuden vaikutus metsähakkeen lämpöarvoon.



Kuva 1. Kosteuden vaikutus hakkeen lämpöarvoon. (Lähde: Alakangas et al. 2016, s.71)

Energiatiheyden lisäksi kosteudella on myös vaikutusta polttoprosessiin. Kosteuden lisääntyessä polton lämpötila laskee ja tämä johtaa joissain tapauksissa epätäydelliseen palamiseen. (Gebreegziabher et al. 2013, s. 1) Tämän lisäksi kosteus laskee kattilan hyötysuhdetta, sillä häviöt kasvavat, kun osa energiasta menee polttoaineen sisältämän veden höyryttämiseen. Kosteus myös lisää savukaasujen ja poltossa tarvittavan ilman määriä. Tämä taas voi jossain tapauksissa johtaa ongelmiin laitosta ajettaessa. Vaikka

biomassan tavanomainen polttaminen voikin onnistua vielä hiukan suuremmilla kosteuspitoisuuksilla, on olemassa prosesseja, joissa kosteuden täytyy olla hyvin pientä. Hyvänä esimerkkinä tästä on kaasutus. Kaasutettavan biomassan kosteuden tulee olla noin 10-15 painoprosenttia käytettävästä teknologiasta riippuen (McKendry 2002, s. 55).

3 YLEISTÄ BIOMASSAN KUIVAUKSESTA

Kuivaamisen päämääränä on kaikessa yksinkertaisuudessaan poistaa biomassan sisältämää kosteutta, eli vettä ja siirtää sitä ympäröivään aineeseen, joka yleensä on ilmaa. Kuivumisilmiö voidaan kuvata tapahtuvan kahdessa yhtä aikaa käynnissä olevassa prosessissa. Ensimmäisen prosessin muodostaa biomassan pinnalta haihtuva ja höyrystyvä vesi. Toisessa prosessissa biomassan sisällä oleva kosteus pyrkii biomassan pintaan sitä mukaa, kun pinnalla olevaa kosteutta poistuu. Veden haihtuminen ja höyrystyminen tarvitsevat kuitenkin energiaa, joka on tässä prosessissa lämpöä. Lämpöenergia voi siirtyä väliaineesta biomassaan kolmella eri tavalla; konvektiona, johtumisena tai säteilylämmönsiirtona. Biomassan kuivauksessa lämpötilat ovat kuitenkin sen verran matalia, että lämmönsiirtyminen voidaan olettaa käytännössä kokonaan olevan joko konvektiota tai johtumista. (Rajala 2013, s.61)

3.1 Kuivaukseen vaikuttavat tekijät

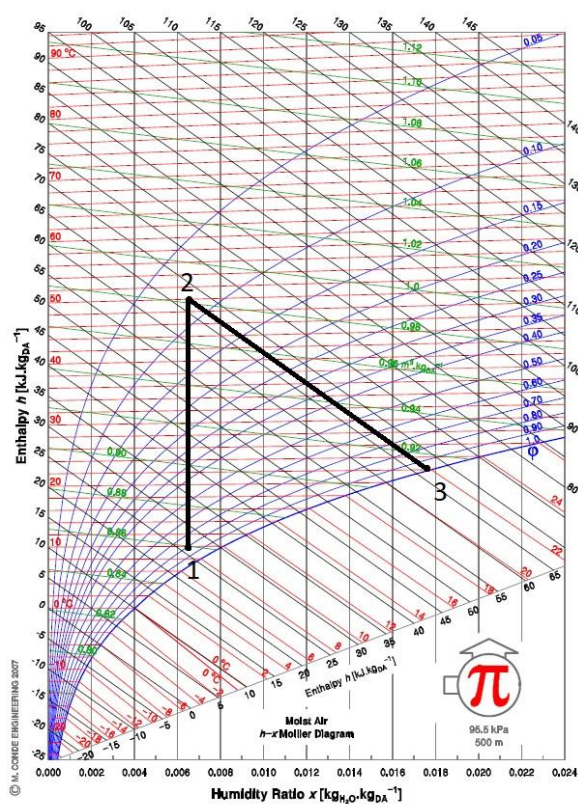
Mikäli biomassan kuivaus halutaan toteuttaa tehokkaasti, on huomioon otettava hyvin monia tekijöitä. Kuivausprosessiin vaikuttaa muun muassa kuivausilman absoluuttinen kosteus, biomassan lämpötila, sekä lämmönsiirron tehokkuus kuivausilmasta biomassaan. Lämmönsiirron tehokkuuden kanssa käsikädessä kulkee myös aineensiirron tehokkuus, eli se kuinka tehokkaasti vettä siirtyy biomassasta kuivausilmaan.

3.2 Teorettinen kuivausilman tarve

Kuivausilman tarpeeseen vaikuttaa hyvin paljon tuloilman absoluuttinen kosteus sekä lämpötila johon kuivausilma lämmitetään. Mitä lämpimämmäksi kuivausilma lämmitetään, sitä enemmän se pystyy sitomaan kosteutta yhtä massa- tai tilavuusyksikköä kohden. Toisaalta, mitä pienempi absoluuttinen kosteus ilmalla on ennen kuivauksen aloittamista, sitä enemmän siihen pystyy vielä sitoutumaan kosteutta. Tarkastelemalla teoreettista kuivausprosessia voidaan saada jonkinlaista käsitystä biomassan kuivauksessa tarvittavasta ilmamäärästä sekä energian kulutuksesta. Mikään todellinen kuivausprosessi ei tietenkään tapahdu aivan ideaalisesti vaan prosessissa syntyy aina häviöitä. Tarkastellaan nyt kuitenkin ideaalista kuivausprosessia ymmärtääksemme kuivauksen periaatteita.

Ideaalinen, aivan kuten todellinenkin, kuivausprosessi muodostuu kahdesta eri vaiheesta; tuloilman lämmityksestä haluttuun lämpötilaan, sekä kosteuden siirtymisestä kuivausilmaan. Prosessin voi helposti hahmottaa ottamalla avuksi kostean ilman Mollier-piirroksen. Kuvassa 1 on esitettyä ideaalinen kuivausprosessi kostean ilman Mollier-piirroksessa. Piirroksen pisteiden 1-2 välillä tapahtuu ilman lämmitys ja välillä 2-3 itse biomassan kuivaus. (Nummelin et al. 2014, s.8)

Teoreettinen kuivausilman määrä saadaan selville, kun luetaan piirroksen alareunasta pisteiden 3 ja 2 absoluuttinen kosteus. Näiden lukujen erotus kertoo sen, kuinka monta grammaa vettä yksi kilogramma ilmaa voi kyseisessä prosessissa sitoa. Tästä saadaan siis laskettua tarvittava ilmamäärä tiettyä veden massayksikköä kohden. Esimerkiksi kuvan prosessin pisteessä 3 absoluuttinen kosteus on noin 0,0173 kg/kg_{k.i.} ja pisteen 2 noin 0,006 kg/kg_{k.i.}. Tästä saadaan erotukseksi 0,0113 kg/kg_{k.i.}. Yksi kilogramma ilmaa pystyy sitomaan siis 11,3 grammaa vettä esimerkin prosessissa.



Kuva 2. Teoreettinen kuivausprosessi kostean ilman Mollier-piirroksessa. (M. Conde Engineering 2012.)

Tarvittava ilmamäärä saadaan ratkaistua, kun kosteudensitomiskyvyn lisäksi tiedetään ilman tiheys. Tiheyden arvo tietyssä lämpötilassa saadaan joko ideaalikaasun tilanyhtälöllä tai erilaisista taulukoista. Ratkaistaan esimerkin vuoksi ilman tarve, kun lämpötila on 50 °C. Ilman tiheys saadaan siis ideaalikaasun tilanyhtälöstä, joka tässä työssä on yhtälö 1.

$$pv = RT \quad (1)$$

Missä, p on ilman paine [Pa]

v on ilman ominaistiheys [m³/kg]

R on ilman kaasuvakio [J/kgK]

T on ilman lämpötila [K]

Tämän lisäksi tiedetään, että ominaistilavuus on tiheyden käänteisluku, joten yhtälö 1 saadaan yhtälön 2 muotoon.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (2)$$

Missä, ρ on ilman tiheys [kg/m³]

Ilman tiheyden jälkeen voidaan laskea tarvittava ilmamäärä yhtä haihdutettavaa vesi kilogrammaa kohden yhtälöllä 3.

$$V = \frac{1}{(x_3 - x_2) \cdot \rho} \quad (3)$$

Missä, V on ilman tilavuus [m³]

x_3 on ilmakilogramman sisältämän veden massa

pisteessä 3 [kg_{H2O}/kg_{k.i.}]

x_2 on ilmakilogramman sisältämän veden massa

pisteessä 2 [kg_{H2O}/kg_{k.i.}]

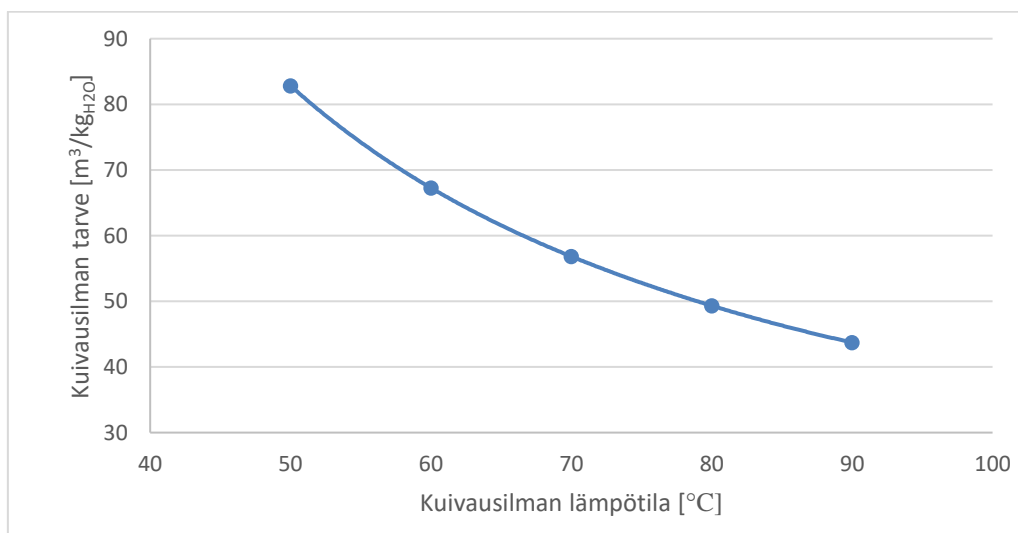
Oletetaan kuivauksen tapahtuvan normaalissa ilmanpaineessa, eli asetetaan ilmanpaineeksi 101 kPa. Ilman kaasuvakio on 287 J/kgK ja kuivauslämpötilana pidetään aiemmin mainittu 50 °C, eli 323 K. Ratkaistaan näillä arvoilla ilman tiheys yhtälöllä 2

$$\rho = \frac{101 \cdot 10^3 \text{ Pa}}{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 323 \text{ K}} = 1,09 \text{ kg/m}^3$$

Luetaan kostean ilman mollier-piirroksesta ilman sisältämän veden massat pisteissä kaksi ja kolme, kun lähtötilanteessa absoluuttinen kosteus on 6 g_{H2O}/kg_{k.i.} ja tuloilman lämpötila on 10 °C. Pisteessä kaksi absoluuttinen kosteus on sama kuin lähtötilanteessa ja pisteen kolme arvoksi voidaan lukea kuvaajasta 17,5 g_{H2O}/kg_{k.i.} Sijoitetaan arvot yhtälöön 3, jolloin saadaan ratkaistua tarvittava ilmanmäärä.

$$V = \frac{1}{\left(0,0173 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{k.i.}}} - 0,006 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{k.i.}}}\right) \cdot 1,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 81,2 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Kuvassa 3 on esitettyä juuri laskettu esimerkki sekä ilmantarve muutamalla muulla lämpötilalla. Kuvaajasta nähdään selvästi, että suuremmassa lämpötilassa kuivausilman tarve on selvästi pienempi.



Kuva 3. Kuivausilmantarve lämpötilan funktiona, kun tuloilman lämpötila on 10 °C ja suhteellinen kosteus 80%.

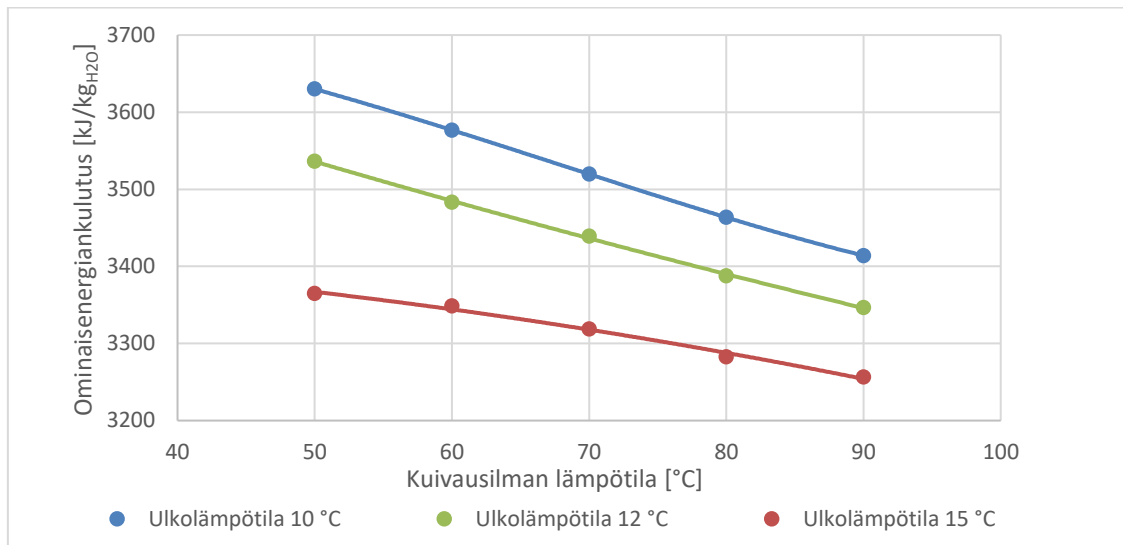
Biomassan kuivaaminen vaatii paljon ilmaa toimiakseen optimaalisesti. Ilmamäärän lisääntyessä myös tarvittava puhallinteho kasvaa merkittävästi ja samalla kuivauksen

sähkökäyttö kasvaa. Mitä suuremmassa lämpötilassa kuivaus saadaan toteutettua, sitä vähemmän puhallintehoa tarvitaan ja samalla sähkönkulutus laskee. Toisaalta kuivauksessa käytetty lämpö on pois jostain muusta prosessista, joten matalamman lämpötilan lämmönlähde voi olla kannattavampi. Lämmön kulutuksesta on kerrottu enemmän seuraavassa kappaleessa. (Nummelin et al., s.10)

3.3 Teorettinen ominaisenergiankulutus

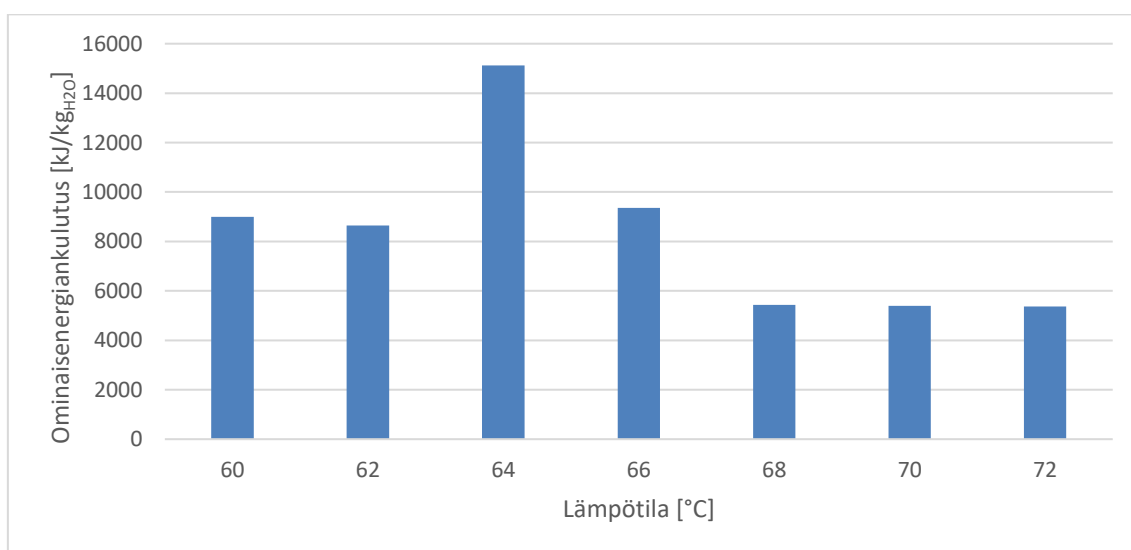
Ominaisenergiankulutuksella tässä yhteydessä tarkoitetaan lämpöenergian määrää, joka joudutaan käyttämään yhden vesikilogramman poistamiseen biomassasta. Omaisenergian kulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa ulkolämpötila, kuivauslämpötila sekä se, millainen kuivurin prosessikytkentä on. Ulospuhallusilman lämmöntalteenotolla voidaan saada aikaan merkittäviä säästöjä energiankulutuksessa, kuten myös jakamalla kuivaus useampaan vaiheeseen.

Jos kuivausprosessi on yksivaiheinen, kuten edellisessä kappaleessa, ominaisenergiankulutus saadaan ratkaistua laskemalla ilman lämmittämiseen kuluva energia ilmakilogrammaa kohden ja jakamalla se pisteiden 3 ja 2 absoluuttisten kosteuksien erotuksella. Lämmittämiseen kuluva energia saadaan ratkaistua pisteiden 1 ja 2 entalpioiden erotuksesta. Mollier-piirroksessa entalpiat voidaan lukea vinottaisista viivoista. Esimerkiksi kuvan 2 prosessissa entalpia pisteessä 1 on noin 25 kJ/kg ja pisteessä 2 noin 67,5 kJ/kg. Erotukseksi saadaan siis 40,5 kJ/kg. Jakamalla tämä pisteiden 2 ja 3 absoluuttisen kosteuden erotuksella, joka oli 0,0113 kg_{H2O}/kg_{k.i.}, saadaan ominaisenergiankulutukseksi tässä tapauksessa 3522 kJ/kg_{H2O}. Kuvassa 4 on esiteltyä ulkolämpötilan sekä kuivauslämpötilan vaikutus ominaisenergiankulutukseen. Kuvassa 4 on laskettuna ominaisenergiankulutuksia muutamalla eri ulkolämpötilalla. Kaikissa tapauksissa ulkoilman suhteellisena kosteutena on pidetty 80% ja kaikkien prosessien on oletettu olevan ideaalisia. Kuvasta voidaankin päätellä, että Suomen oloissa teorettinen ominaisenergiankulutus on noin 3-4 MJ/kg_{H2O}. Ulkoilman lämpötilalla on myös selvästi melko suuri vaikutus energiankulutukseen.



Kuva 4. Kuivauksen teoreettinen ominaisenergiakulutus lämpötilan funktiona eri ulkolämpötiloissa.

Todelliset prosessit kuluttavat tietenkin teoreettista prosessia enemmän energiaa. Esimerkiksi Antti-Jussi Rajalan diplomityössä tutkittiin erään viirakuivurin energiakulutusta ja tehdyissä mittauksissa päästiin kuvan 5 kaltaisiin tuloksiin. Kuivaimen parhaan tehokkuuden alueellakin energiakulutus on noin 1,5-kertainen ideaaliseen prosessiin verrattuna. Tässä vertailussa täytyy kuitenkin huomioida, että Rajalan mittaukset tehtiin $-4,3\text{ °C}$ – $11,1\text{ °C}$ lämpötilassa. (Rajala 2013, s. 72-73)

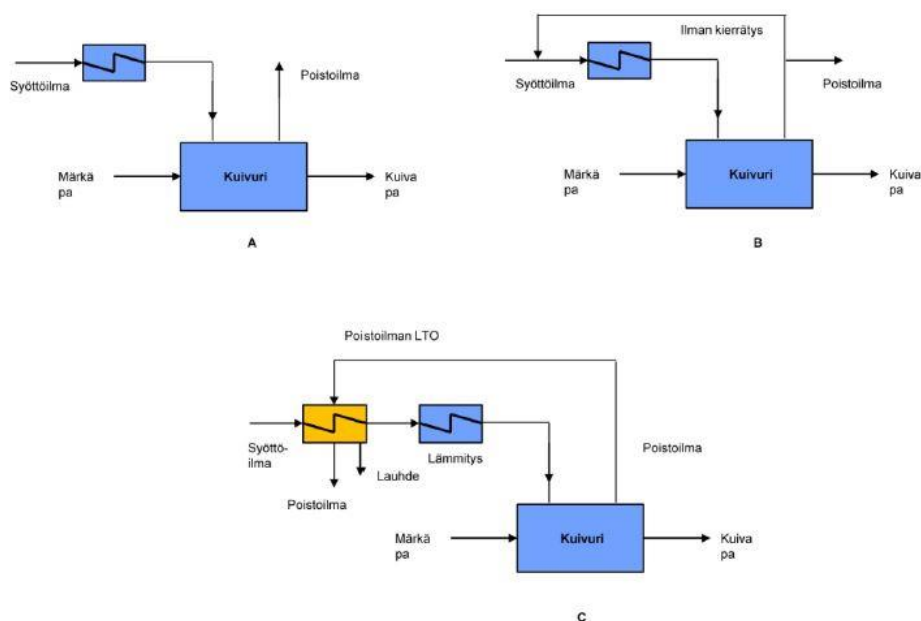


Kuva 5. Todellisen kuivausprosessin ominaisenergiakulutus. (Lähde: Rajala 2013, s. 73)

4 ERILAISIA KUIVAINTYYPPEJÄ

Kuivaintyyppejä, kuten kuivausmenetelmiä, on hyvin monia erilaisia. Niitä voidaan jaotella esimerkiksi käytettävän lämmönlähteen, kuivausvaiheiden määrän, sekä lämmöntuontitavan mukaan. (Rajala 2013, s.63) On olemassa myös kuivaimia, jotka eivät perustu termiseen kuivaukseen, vaan mekaaniseen työhön, kuten esimerkiksi biomassan puristamiseen (Roos 2008, s. 6). Tässä työssä keskitytään kuitenkin vain kuivaimiin, jotka perustuvat termiseen kuivaukseen.

Lämpöenergiaa siirretään ympäröivästä aineesta biomassaan joko konvektiolla tai johtumisena. Konvektio on selvästi yleisimmin käytetty lämmönsiirtotapa. Väliaineena yleensä toimii ilma, mutta myös tulistettua höyryä ja savukaasuja käyttäviä kuivaimia on kehitetty. Johtumista käyttävät kuivaimet soveltuvat yleensä paremmin todella kosteiden, sekä hyvin ohuiden massojen kuivaukseen. (Mujumdar 2015, s. 20) Koska lämmönlähteenä kuivauksessa voi toimia höyry, savukaasu tai ilma, voi kuivainten prosessikytkennät vaihdella paljonkin toistensa välillä. Variaatioita kytkentöihin tuo myös se, että vaiheiden määrä voi vaihdella, sekä laitteisto on mahdollisesti varustettu lämmöntalteenottojärjestelmällä. Kuvassa 6 on esitettyinä muutamia havainnollistavia kuivausprosessikytkentöjä.



Kuva 6. Erilaisia prosessikytkentöjä. KytKentä a on yksivaiheinen kuivausprosessi, b on poistoilman takaisinkierrätyksellä varustettu kytkentä ja c kytkennässä on hyödynnetty poistoilman lämmöntalteenottoa. (Lähde: Nummelin et al. 2014, s. 11)

Käytännössä katsoen kuivurityypistä riippumatta kuivumisnopeus kasvaa, eli kuivumisaika lyhenee lämmönsiirron kasvaessa (Tapanainen 1982, s. 9). Yleensä myös kuivurityypeiltä vaadittava fyysinen koko pienenee. Lämmönsiirron suuruuteen vaikuttavia tekijöitä konvektiossa ovat aineiden välinen lämmönsiirtokerroin sekä kuivausilman ja biomassan lämpötilaero. Johtumisessa tilanne on lähes samankaltainen, mutta lämmönsiirtokerroimen sijasta tehokkuuteen vaikuttaa materiaalien lämmönjohtavuus. Konvektiossa perusyhtälön muodostaa niin sanottu Newtonin jäähtymislaki, joka voidaan tässä yhteydessä kirjoittaa yhtälön 4 muotoon. (Incropera et al. 2011, s. 4-8)

$$q = Ah(T_k - T_b) \quad (4)$$

Missä	q on lämmönsiirtoteho	[W]
	A on lämmönsiirron pinta-ala	[m ²]
	h on lämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
	T_k on kuivauskaasun lämpötila	[K]
	T_b on biomassan lämpötila	[K]

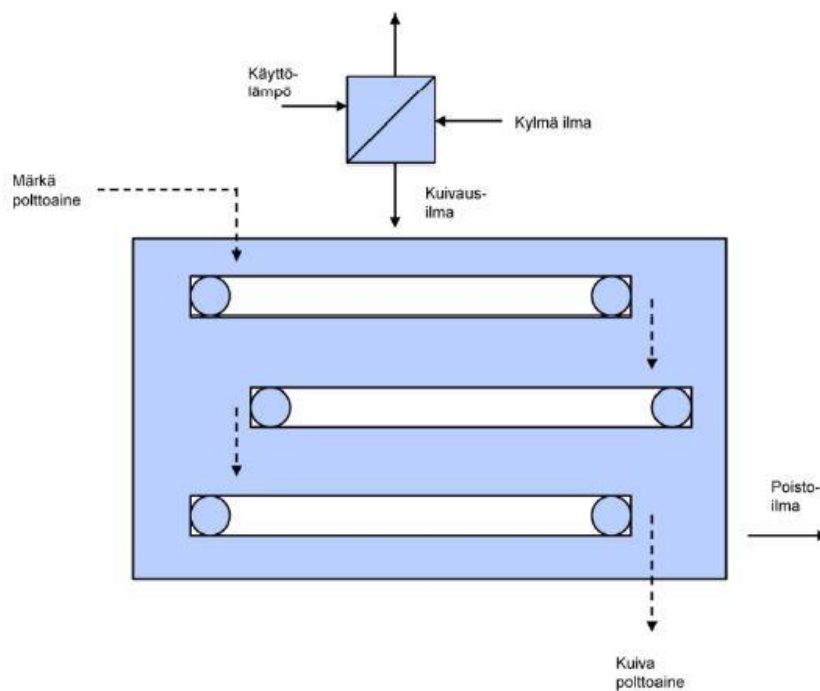
Kun tiedetään vielä, että lämmönsiirtokerroin h ei juurikaan muutu lämpötilaerojen muuttuessa, voidaan yhtälöstä 4 nähdä, että lämmönsiirron tehoon vakio pinta-alalla vaikuttaa ainoastaan kuivauskaasun ja biomassan välinen lämpötilaero. Toisinaan yhtälössä 4 käytetään pinta-alan sijasta tilavuutta ja samalla lämmönsiirtokerroin on määritettyä tilavuusyksikköä kohden (Poirier 2015, s.399). Tämä johtuu siitä, että hyvin epäsäännöllisen massan pinta-alaa on hankala arvioida, joten on helpompi käyttää hyväksi tietoa tilavuuksista.

4.1 Viirakuivain

Viirakuivaimen toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen. Kuivatettava massa kulkee hiljakseen verkkomaisen hihnan taikka kuljettimen päällä suhteellisen ohuena, yleensä korkeintaan noin 15 senttimetriä paksuna kerroksena (Brammer 1999, s. 273). Kuivausilmaa pakotetaan samanaikaisesti biomassan kerroksen läpi, useimmissa

tapauksissa ylhäältä alaspäin, mutta myös vastakkaiseen suuntaan puhaltavia kuivaimia on olemassa. (Rajala 2013, s. 67) Yksinkertaisuudestaan huolimatta viirakuivain on hyvin käyttökelpoinen monenlaisten materiaalien kuivaamiseen. Se ei kuitenkaan sovellu hyvin tiiviiden massojen käsittelyyn, koska ilma ei pääse välttämättä läpäisemään kuivatettavana olevaa massaa riittävän tehokkaasti. (Poirier 2015, s. 393)

Viirakuivaimia on olemassa niin yksi- kuin monivaiheisia malleja. Yksivaiheinen malli on kaikista yksinkertaisin ja siinä on nimensä mukaisesti vain yksi taso, jolla kuivausta tapahtuu. Monivaiheisen mallit ovat yksivaiheisia monimutkaisempia mutta niiden energiatehokkuus on parempi. Parempi energiatehokkuus perustuu siihen, että kuivaava ilma kulkee biomassan läpi useamman kerran ja kerkeää sen vuoksi absorboimaan paremmin kosteutta. Toinen vaikuttava tekijä on kuivausilmalta vaadittava lämpötila, jonka ei monivaiheisessa kuivauksessa olla niin korkea kuin yksivaiheisessa. Monivaiheisissa kuivureissa kuivausilmaa lämmitetään hieman jokaisen kuivausvaiheen jälkeen, mutta silti kokonaisenergiatarve jää yksivaiheista pienemmäksi. (Holmberg 2007, s. 23) Kuvassa 7 on esitettyä monivaiheisen viirakuivaimen periaate.



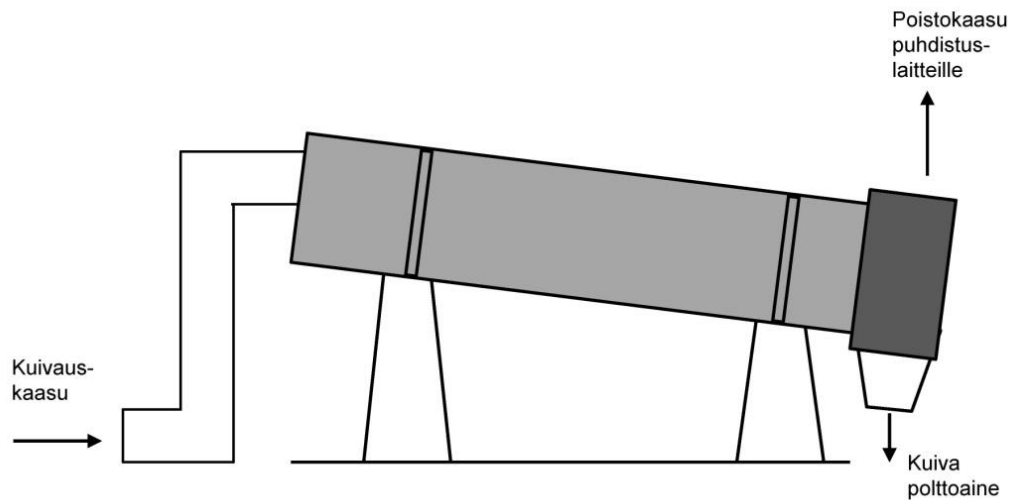
Kuva 7. Monikerroksisen viirakuivaimen toimintaperiaate (Lähde: Nummelin et al. 2014. s.23)

Lämmönlähteiksi useimmille viirakuivaimille kelpaavat matalapaineinen höyry tai kuuma vesi, jotka lämmönvaihtimessa siirtävät lämpöenergian kuivausilmaan. Esimerkiksi Swiss Combin kehittämässä viirakuivaimessa voidaan käyttää lämmönlähteenä 60-120 °C vettä, mikä jossain tapauksissa mahdollistaa hukkalämmön käyttämisen energianlähteenä (Urwyler 2017). Ominaisenergiankulutus tällaisella laitemallilla on valmistajan mukaan noin 0,9 MWh/ton_{H2O}, kun kuivauslämpötila on 100 °C ja ulkolämpötila 30 °C. Vastaavasti ulkolämpötilan ollessa -20 °C, on kuivaimen energiankulutus noin 1,3 MWh/ton_{H2O}. Kuivauslämpötilan laskiessa ominaisenergiankulutus kasvaa, kuten kappaleessa 3.3 todettiin.

Viirakuivainten yhteydessä mainittakoon myös tasokuivain. Tasokuivaimen rakenne on hyvin lähellä viirakuivaimen rakennetta, mutta kuivattavan massan liikuttelemisessa on eroja. Pöytäkuivaimessa ei ole liikkuvaa hihnaa, jonka päällä massa lepäisi, vaan massan liikuttamisen hoitavat poikittain olevat telat. Telat liikkuvat massan seassa ja samalla sekoittavat ja liikuttavat biomassaa eteenpäin sopivalla nopeudella. Kuivausilman puhaltaminen toimii tasokuivaimessa samalla tavalla kuin viirakuivaimessa.

4.2 Rumpukuivain

Rumpukuivain on laajalti teollisuudessa käytetty kuivaintyyppi. Kuivain koostuu suuresta sylinterin muotoisesta rummusta, joka pyörii laakereiden päällä. Rumpu asennetaan pieneen kulmaan, jotta kuivattava materiaali valuu pyöriessään hiljalleen alaspäin, kohti rummun alapäätä, josta biomassa otetaan ulos. Rummun pyörimisnopeus on yleensä vain muutamia kierroksia minuutissa, mutta sekin nopeus riittää sekoittamaan kuivattavaa materiaalia melko tehokkaasti. Rumpukuivaimen yksi etu onkin tasainen kuivaustulos. (Brammer & Bridgwater 1999, s. 274-276) Kuvassa 8 on esiteltynä rumpukuivaimen rakennetta ja toimintaa.



Kuva 8. Rumpukuivurin rakenteen periaatekuva. (Lähde: Nummelin et al. 2014. s.21)

Rumpukuivurit voidaan jakaa vielä kahteen ryhmään; suoriin ja epäsuoriin rumpukuivureihin. Suorissa rumpukuivureissa kuivausilma puhalletaan rummun sisälle, eli kuivausilma on kosketuksissa kuivattavan massan kanssa. Epäsuorissa kuivureissa kuivausilma ei sen sijaan ole kosketuksissa kuivattavan materiaalin kanssa, vaan ilma lämmittää rummun seinämiä, josta lämpö johtuu rummun sisälle. (Alpua 2011, s. 14) Epäsuorien kuivureiden energiatehokkuus on suoria huonompi, sekä niiden käyttö- ja kunnossapitokulut ovat suuremmat (Roos 2008, s. 8).

4.3 Virtauskuivain

Virtauskuivain, jota toisinaan kutsutaan myös pneumaattiseksi kuivuriksi, on kuivaintyyppi, jossa kuivattava materiaali asetetaan kovalla nopeudella etenevään virtaukseen. Kuivauskaasuna voi toimia savukaasut, kuuma ilma tai tulistettu höyry. Kuivauskaasun lämpötila on yleensä korkea, vähintään 150 °C ja joissain sovelluksissa jopa 700 °C (Alpua 2011, s. 16). Virtauskuivaimen etuna on hyvin tehokas lämmönsiirto ja täten kuivausajat ovat varsin lyhyitä. Nopean kuivauksen myötä virtauskuivainten koot ovat verrattain pieniä ja rakenne yksinkertainen. Virtauskuivain vaatii toimiakseen hyvin hienojakeista biomassaa, mikä rajoittaa kuivaimen käyttömahdollisuutta esimerkiksi kaasutuslaitoksilla. (Levy & Borde 2015, s. 381-382)

4.4 Leijupetikuivain

Leijupetikuivaimen toiminta perustuu kuivattavan massan alta puhallettavaan kaasuun, joka saa massan leijumaan kuivauskaasun seassa. Toimiakseen optimaalisesti täytyy virtausnopeuden olla suurempi kuin minimileijutusnopeus, sillä muuten biomassa pysyy kuivauskammion pohjalla. Biomassan palakoko tulee olla melko pientä ja tasalaatuista, jopa alle 10 millimetriä, jotta leijuttaminen ja partikkeleiden liikehdintä olisi optimaalista. Mitä suuremmaksi palakoko kasvaa, sitä suurempi täytyy virtausnopeuden olla. Tämä palakoon suureneminen johtaa myös pitempään kuivatusaikaan. (Brammer & Bridgwater 1999, s. 281) Leijutuksen ylläpitäminen vaatii paljon puhallintehoa ja samalla kuivaimen sähkönkulutus on melko suuri. Etuna leijupetikuivauksessa on sen tehokas kosteudenpoistokyky, hyvä lämpöenergiatehokkuus ja melko alhaiset kunnossapitokustannukset. (Law & Mujumdar 2015, s. 164)

5 VALTIMON LAITOSHANKE

Valtimon kunta on suunnitellut uusivansa nykyisen kaukolämpölaitoksen lähivuosina. Nykyinen täysin automatisoitu laitos on jo käyttöikänsä lopussa ja tästä syystä kunta on jo tehnyt selvityksiä uuden laitoksen hankinnasta.

5.1 Korvattava laitos

Korvattava laitos koostuu yhdestä kahden megawatin kiinteänpolttoaineen kattilasta, sekä kahdesta kevyen polttoöljyn kattilasta, jotka ovat kooltaan 1,5 ja 2,5 megawattia. Vuosittainen kaukolämmöntuotanto on ollut noin 9900 megawattituntia ja siitä määrästä hakkeella on katettu 8900 megawattituntia, eli lähes 90 prosenttia. Talvikauden peruskuorma on siis kyetty tuottamaan täysin käyttämällä polttoaineena haketta. Huippukuorman tuottamiseen on sen sijaan käytetty polttoöljykattiloita tarpeen mukaan. (Hankehakemus 2017, s. 2)

5.2 Suunnitteilla oleva laitos

Uusi suunnitteilla oleva laitos olisi nykyistä monipuolisempi. Pelkän kaukolämmön sijasta tarkoituksena olisi tuottaa myös jonkin verran sähköä pienessä CHP-yksikössä. Laitos koostuisi siis yhdestä isommasta pelkkää kaukolämpöä tuottavasta kattilasta, sekä pienemmästä yksiköstä jolla tuotetaan lämpöä ja sähköä. CHP-laitoksen sähkötehoksi on suunniteltu noin 200 kW. Tuotettu sähkö käytetään Ammattiopisto Valtimon tarpeisiin, eikä tavoitteena ole tuottaa sähköä myyntiin asti. (Hankehakemus 2017, s. 4)

Laitoshankkeeseen liittyy myös suunnitelma omasta hakkeenkuivausyksiköstä. Tavoitteena olisi hankkia laitosalueelle kaukolämmöntuotantoon soveltuvaa haketta ja kuivata sitä tarvittava määrä CHP-yksikön käyttöön omalla kuivaimella. CHP-yksikkö olisi mahdollisesti kaasutuslaitos, jolloin käytettävän polttoaineen kosteuspitoisuus pitäisi saada alle 20 painoprosentin. Niin alhaisen kosteuspitoisuuden saavuttaminen vaatii erillistä kuivausta. Aiemmin esitellyistä kuivaintyypeistä tämän kokoluokan kaasutuslaitokselle olisivat sopivia käytännössä katsoen vain viira- ja rumpukuivuri. Leijupetikuivain on yleisesti suuremman kokoluokan ratkaisu ja virtauskuivain vaatii hyvin korkean kuivauslämpötilan, minkä saavuttaminen kaukolämpö- ja kaasutuslaitoksilla on hankalaa.

6 KUIVURI-INVESTOINTI

6.1 Kannattavuuteen vaikuttavat tekijät

Kuten mitä tahansa investointia, tulee myös kuivuri-investointia tarkastella arvioimalla erilaisten tekijöiden vaikutusta kokonaisuuteen. Kuivuri-investoinnin kannattavuuteen vaikuttaa hyvin monet tekijät kuten; käytettävä lämmönlähde, hakkeen hinta, sähkön hinta, sekä jo olemassa oleva infrastruktuuri. Näiden lisäksi vaikuttaa tietenkin itse kuivaimen hinta. Mikä tahansa näistä tekijöistä voi yllättäen nousta kannattavuutta rajoittavaksi tekijäksi.

Valmiiksi kuivatun hakkeen halpa hinta voi romahduttaa oman kuvausyksikön kannattavuuden, kuten myös sähkön hinnan suuri vaihtelu. Mikäli hukkalämpöä ei saada käytettyä kuivauksen lämmönlähteenä, voi lämpöenergian hinta tehdä investoinnista kannattamattoman. Seuraavissa kappaleissa on tehty esimerkkilaskentoja erilaisilla kuivausteknologiolla sekä erilaisilla prosessikytkennöillä.

6.2 Laskentaperusteet

Tässä työssä ei lähdetä tutkimaan itse pien-CHP yksikön investointia, vaan keskitytään pelkästään kuivurin talousvaikutuksiin. Tämä johtaa siihen tilanteeseen, että kuivurin kannattavuutta tarkastellaan vain kuivurin itsensä tuomien kulujen ja säästöjen näkökulmasta. Herkkyysanalyysin avulla yritetään löytää rajat investoinnin kannattavuuden ja kannattamattomuuden välille. Oletuksena on, että hankittava CHP-yksikkö on kaasutuslaitos, joten kuivan polttoaineen saaminen on toiminnan perusedellytys. Kuivurin tuomat säästöt muodostuvat polttoainekustannuksien vähenemisestä, sillä laitokselle voidaan hankkia tuoretta metsähaketta, mikä on huomattavasti käsiteltyä polttoainetta halvempaa. Polttoaineiden hinnan arvioinnissa on kuitenkin haasteita, sillä kaasutukseen kelpaavan hakkeen hankintahinta on erittäin vaikea määrittellä, koska sellaista ei juurikaan ole myytävänä. Tästä syystä laskennassa kuivalle hakkeelle käytetään puupelletin markkinahintaa.

CHP-laitoksen sähkötehoksi on kaavailtu 200 kW ja tätä arvoa myös käytetään laskennassa. Laitoksen lämpötehoksi oletetaan 500 kW, jolloin rakennusasteeksi saadaan kutakuinkin järkevä arvo. Kun tarkastellaan investointia koron huomioon ottavilla

menetelmillä, käytetään laskentakorkona viittä prosenttia ja pitoaikana 25 vuotta sekä jäännösarvoksi oletetaan 0 euroa. Tuoreelle metsähakkeelle käytetään hintana 21 €/MWh, sillä se vastaa melko lailla nykyistä hakkeen markkinahintaa. Huipunkäyttöajaksi laitokselle asetetaan niinkin korkea, kuin 8000 tuntia ja kokonaishyötysuhteeksi 85 %. Näiden lisäksi kuivatetun hakkeen kosteudeksi asetetaan 15 massaprosenttia. Taulukossa 1 on esitettyinä kaikki alkuarvot, joiden mukaan laskelmia aletaan toteuttamaan.

Taulukko 1. Laskennassa käytettäviä alkuarvoja.

Alkuarvo	Arvo
Sähköteho	200 kW
Lämpöteho	500 kW
Kokonaishyötysuhde	85 %
Huipunkäyttöaika	8000 h
Laskentakorko	5 %
Pitoaika	25 a
Jäännösarvo	0 €
Tuoreen hakkeen hinta	21 €/MWh
Loppukosteus	15 m%

Nyt tiedetään laitoksen lämpöteho, joten tarvittava kuivan hakkeen massavirta voidaan määrittää yhtälöllä 5. Asetetaan 15 massaprosenttisen hakkeen lämpöarvoksi 4,65 kWh/kg (Alakangas et al. 2016, s. 71).

$$q_m = \frac{P}{Q \cdot \eta} \quad (5)$$

Missä	q_m on hakkeen massavirta	[kg/h]
	P on laitoksen lämpöteho	[W]
	Q on kuivatun hakkeen lämpöarvo	[kWh/kg]
	η on laitoksen kokonaishyötysuhde	[-]

Annetuilla alkuarvoilla kuivan hakkeen massavirraksi saadaan 126,5 kg/h, jolloin vuotuinen hakkeenkulutus 8000 tunnin huipunkäyttöajalla on 1012 tonnia. Kostean hakkeen massavirta puolestaan riippuu tietenkin alkukosteudesta, mutta esimerkiksi 55 massaprosentin kosteudella kostean hakkeen massavirraksi saadaan 240 kg/h. Kuivaimen

tunnissa höyrystämän veden massa on siis noin 113 kilogrammaa mikäli kuivaimen kapasiteetti on mitoitettu juuri kyseiselle massavirralle.

6.3 Hankintakustannukset

Kuivuria hankittaessa täytyy muistaa, että itse kuivurin hinnan lisäksi investointiin tulee todennäköisesti paljon myös muita kustannuksia. Tarvittavan kuivurin kuivauskapasiteetti tulisi olla siis vähintään 240 kilogrammaa kosteaa haketta tunnissa mutta todellisuudessa kapasiteetin tulee olla jonkin verran tätä isompi, jotta haketta voidaan kuivata tarvittavia määriä myös varastoon. Tätä työtä tehdessä kuivureiden hintoja kyseltiin monilta eri valmistajilta mutta vastauksia ei saatu kuin yhdeltä. Stela Laxhuber GmbH ilmoitti 500 kg/h kuivauskapasiteetin omaavan viirakuivurin hinnaksi 220 000 euroa. Kyseinen kuivain on hieman tarvetta suurempi, mutta se antaa melko hyvän kuvan kuivureitten hinnoista. Tämän kuivurin kuivauslämpötila olisi noin 80-90 °C ja hinta sisältää lämmönvaihtimen. (Stummer 2017) Kyseinen kuivain soveltuisi siis hyvin niin kaukolämpöenergian hyödyntämiseen. Myös hukkalämmön käyttäminen samaisella kuivurilla on mahdollista, sillä vaikka kuivauslämpötila hieman laskee ja samalla kuivausnopeus hidastuu, riittää kuivurin kapasiteetti kattamaan tarpeen.

Muita kustannuksia arvioitaessa tässä työssä käytettiin hyväksi muista, tosin paljon suuremmista, kuivuri-investoinneista saatuja tietoja. Muodostuvia kustannuksia skaalattiin tämän työn kokoluokkaan, joten ne ovat vain arvioita mutta näyttävät jonkinlaisen suunnan muodostuvista kokonaiskustannuksista. Kustannuksia aiheutuu, jos kuivaimelle täytyy erikseen rakentaa perustuksia sekä katos tai jopa mahdollisesti pieni halli. Aiemmin mainitun kuivurin kuivauspinta-ala on 8 m², jonka mukaan tarvittavat rakennuskustannukset on laskettu. Näin ollen perustusten rakennuskustannuksiksi arvioitiin noin 20 000 euroa. Mikäli kuivaimelle halutaan umpinainen halli, voidaan tämä summa tuplata, jolloin hinnaksi tulee 40 000 euroa. Tämän lisäksi kuivuri vaatii kuivalle polttoaineelle esimerkiksi siilon, johon muutamien tuntien hakemäärä voidaan varastoida. Siilosta täytyy myös lähteä syöttöruuvi CHP-yksikölle. Tällaisen paketin hinnaksi arvioitiin noin 8 000 euroa. Kuivurin toiminta vaatii paljon automaatiota ja sähköistyksiä, jotka eivät välttämättä kuulu suoraan kuivurin hintaan. Näiden hinnan arviointi on hyvin vaikeaa, mutta toisaalta ne saattavat äkkiä muodostaa yhdessä hyvinkin

ison summan. Asetetaan nyt automaation ja sähköistysten yhteenlasketuksi hinnaksi 35 000 euroa.

Edellä käsiteltyjen kustannuksien lisäksi kuivurin hankintaan tulee useasti suunnittelu- ja asennuskustannuksia, jotka tämän kokoluokan projektille voivat olla noin 18 000 euroa. Yksinkertaisiinkin projekteihin tulee yleensä muutoksia sekä yllättäviä lisäkuluja, joten muiden sekalaisten kulujen voidaan katsoa olevan noin 10 % kaikkien edellä mainittujen kulujen summasta. Tässä tapauksessa se on 32 100 euroa. Nyt kaikkien kulujen summaksi saadaan näillä arvioilla 353 100 euroa mikä olisi siis koko kuivuri-investoinnin hinta. Investoinnille tehdään tässä työssä vielä herkkyystarkastelut, sillä edellä olleet hinnat ovat todellakin vain arvioita. Todellinen hinta alkaa hahmottua vasta, kun toimittajilta on pyydetty tarjoukset jokaisesta työvaiheesta.

6.4 Investointi käyttäen hukkalämpöä

Jos kuivaus saadaan toteutettua hukkalämmöllä, ei kuivurin käyttämälle lämmölle tarvitse laskea hintaa. Kuivauksen kulut muodostuvat siinä tapauksessa pelkästään käyttö- ja kunnossapitokuluista sekä pääomakuluista. Laskettaessa kustannuksia käyttäen hukkalämpöä, tulee kuitenkin muistaa, että hukkalämmön hyödyntäminen vaatii jonkinlaisen lämmöntalteenottojärjestelmän. Yksi vaihtoehto on esimerkiksi savukaasupesuri, joka ottaa lämpöä talteen ulkoilmaan päästettävistä savukaasuista. Joissain tapauksissa tällainen lämmöntalteenottojärjestelmä voi kuulua laitoksen kokoonpanoon automaattisesti, mutta jos näin ei ole, täytyy savukaasupesurin hinta ottaa huomioon.

Oletetaan vuotuiset tulot ja menot yhtä suuriksi joka vuosi, joten samalla siis oletetaan, että laitoksen huipunkäyttöaika on likimain sama joka vuosi. Kuivauksen kulut muodostuvat siis ostettavan tuoreen hakkeen hinnasta, kuivurin sähkönkulutuksesta sekä kuivurin käyttö- ja kunnossapitokuluista. Laitoksen huipunkäyttöajan ollessa 8 000 tuntia on sen tuottaman energian määrä 4 000 MWh. Kokonaishyötysuhteen ollessa 85 % on laitoksen kuluttaman hakkeen energiasisältö 4 706 MWh. Hakkeen hinnaksi asetettiin 21 €/MWh, jolloin vuosittainen hakkeen hankintakustannus on 98 824 €. Hankittavan kuivurin sähkötehoksi arvioidaan noin 100 kW, jolloin kapasiteetin ollessa 500 kilogrammaa tuoretta haketta tunnissa, saadaan kuivurin ominaissähkönkulutukseksi 0,43

MWh/ton_{H2O}, kun alkukosteus on 55 m% ja loppukosteus 15 m%. Sähkön hintana tässä tapauksessa voidaan pitää periaatteessa vain sen tuotantoon kuluviin polttoaineiden hintaa, eli 21 €/MWh, ottaen huomioon laitoksen hyötysuhteen. Näin sähkön hinnaksi saadaan 24,7 €/MWh_e. Valmistaja kertoi vuotuisiksi käyttö- ja kunnossapitokustannuksiksi 2 % kuivurin hinnasta, jolloin tässä tapauksessa nämä kustannukset ovat 4400 €/a. Kokonaiskulut vuosittaisessa toiminnassa on kaikkien aiempien summa eli noin 112 700 euroa.

Vuotuiset säästöt koostuisivat kalliimman polttoaineen hankinnan ja edellisessä kappaleessa laskettujen kulujen erotuksesta. Valmiiksi kuivatun polttoaineen hintana käytetään siis puupelletin hintaa, kuten aiemmin mainittiin. Bioenergia-lehti on listannut puupelletin hintoja, ja lokakuussa 2017 puupelletin hinta lehden mukaan on 32,6 €/MWh (Pöyry Finland Oy 2017). Jos kaikki käytettävä polttoaine olisi pelletin hintaista, olisi vuosittaiset polttoainekulut 153 412 euroa. Näillä arvoilla vuosittaiset säästöt olisivat noin 40 700 euroa.

Tarkastellaan investointia nyt muutamilla laskentamenetelmillä; TMA-, eli takaisinmaksuajan menetelmällä, annuiteettimenetelmällä ja nykyarvomenetelmällä. Tehdään samalla myös herkkyysanalyysiä muuttamalla investoinnin suuruutta sekä kuivan polttoaineen hintaa.

6.4.1 Takaisinmaksuaika

Koroton takaisinmaksuaika saadaan yksinkertaisesti, kun investointi jaetaan vuosittain saatavilla säästöillä yhtälön 6 mukaisesti.

$$TMA = \frac{I}{S} \quad (6)$$

Missä TMA on takaisinmaksuaika [a]

I on investointi [€]

S on vuotuinen säästö [€/a]

Aiemmin lasketuilla arvoilla korottomaksi takaisinmaksuajaksi saadaan 8,7 vuotta. Tämä menetelmä ei kuitenkaan ota huomioon minkäänlaisia korkoja eikä pääomakustannuksia.

Sen vuoksi tehdään laskelma myös korollisen takaisinmaksuajanmenetelmällä yhtälön 7 mukaisesti.

$$TMA = \frac{-\ln\left(\frac{1}{i} - \frac{1}{S}\right) - \ln(i)}{\ln(1 + i)} \quad (7)$$

Missä i on laskentakorko [-]

Sijoittamalla asetettu laskentakorko, 0,05, sekä vuotuiset säästöt yhtälöön 7 saadaan korolliseksi takaisinmaksuajaksi 11,6 vuotta.

Tehdään seuraavaksi herkkyyssanalyysiä muuttamalla investointia ja kuivan polttoaineen hintaa 30 % pienemmäksi sekä suuremmaksi, jolloin nähdään paremmin niiden vaikutus kuivuri-investoinnin kannattavuuteen. Jos investointi pienenee syystä tai toisesta 30 % alkuperäisestä oletuksesta, on investoinnin koroton TMA 5,9 vuotta ja korollinen TMA 7,1 vuotta. Jos investointi kasvaa 30 % muodostuu korottomaksi TMA:ksi 11,7 vuotta ja korolliseksi TMA:ksi 17,9 vuotta. Kuivan polttoaineen hinnan aleneminen 30 % aiheuttaa jo niin merkittäviä muutoksia, että kuivurin käyttäminen ei enää tuota ollenkaan säästöjä, jolloin investointi ei ole kannattava. 30 prosentin nousu hinnoissa puolestaan tiputtaa korottoman TMA:n 4,1 vuoteen ja korollisenkin 4,7 vuoteen.

Taulukko 2. Takaisinmaksuajat vuosina investoinnin sekä kuivan polttoaineen hinnan muuttuessa.

	Investointi [€]	Kuivan p.a. hinta [€/MWh]	Koroton TMA [a]	Korollinen TMA [a]
Investointi ja kuiva p.a. ±0 %	353 100	32,6	8,7	11,6
Investointi -30 %	247 170	32,6	5,9	7,1
Investointi +30 %	459 030	32,6	11,7	17,9
Kuivan p.a. hinta -30 %	353 100	22,8	-	-
Kuivan p.a. hinta +30 %	353 100	42,4	4,1	4,7

Taulukosta 2 nähdään, että kuivan polttoaineen hinnan muuttuminen on erittäin merkittävä tekijä investoinnin kannattavuuden kannalta. Myös investoinnin suuruuden muuttuminen vaikuttaa takaisinmaksuaikoihin paljon, mutta sen muuttuminen ei tee investoinnista täysin kannattamatonta yhtä nopeasti kuin kuivatun polttoaineen hinnan muuttuminen.

6.4.2 Annuiteettimenetelmä

Annuiteettimenetelmä poikkeaa takaisinmaksuajan menetelmistä melko paljon. Se ottaa huomioon laskentakoron, eli omaisuudelle asetetun tuotto-odotuksen sekä investoinnin pitoajan. Annuiteettimenetelmässä investointi jaetaan koko pitoajalle yhtä suuriksi vuosittaisiksi summiksi eli annuiteeteiksi. Annuiteettitekijä saadaan yhtälöllä 8.

$$c = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (8)$$

Missä	c on annuiteettitekijä	[-]
	i on laskentakorko	[-]
	n on investoinnin pitoaika	[a]

Sijoittamalla aiemmin asetettu laskentakorko 5%, sekä pitoaika 25 vuotta yhtälöön 8, saadaan annuiteettitekijäksi 0,07. Investointi on kannattava, mikäli nettosäästöt ovat suurempia, kuin investoinnin annuiteetti, eli mikäli yhtälö 9 pätee.

$$S - c \cdot I > 0 \quad (9)$$

Sijoitettaessa arvioitu investointi sekä vuotuiset säästöt käytettäessä hukkalämpöä on tulos 15 667 euroa positiivinen, eli niillä arvoilla investointi olisi kannattava. Tehdään tällekin menetelmälle herkkyysoanalyysi, eli muutetaan vuorotellen investoinnin ja kuivan polttoaineen hintoja. Herkkyysoanalyysin tulokset ovat esitettynä taulukossa 3.

Taulukko 3. Investoinnin tulos annuiteettimenetelmällä laskettuna, kun investointi ja kuivan polttoaineen hinta muuttuvat.

	-30 %	0 %	30 %
Investointi	24 503 €	15 667 €	6 831 €
Kuiva polttoaine	-30 356 €	15 667 €	61 691 €

6.4.3 Nykyarvomenetelmä

Nykyarvomenetelmä tarkastelee kattaako tulevaisuudessa investoinnin tuomat tuotot tai säästöt siitä aiheutuvat kulut. Tämän lisäksi kuluiksi huomioidaan rahan aika-arvo, jonka saadaan laskettua laskentakoron avulla. Mikäli vuosittaiset tuotot taikka säästöt ovat

samansuuruisia saadaan nykyarvotekijä yhtälöllä 9 ja investoinnin nykyarvo yhtälöllä 10. Mitä suurempi on laskettu investoinnin nykyarvo, sitä kannattavampi se on.

$$a = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (9)$$

$$NA = -I + a \cdot S \quad (10)$$

Missä NA on investoinnin nykyarvo [€]

Tämän työn puitteissa nykyarvotekijäksi saadaan 14,09 ja oletusarvoilla investoinnin nykyarvoksi hukkalämpöä käytettäessä saadaan 220 813 euroa, eli investointi olisi kannattava. Nykyarvomenetelmälle herkkyyksanalyysin tulokset ovat esitettynä taulukossa 4.

Taulukko 4. Herkkyyksanalyysin tulokset nykyarvomenetelmälle.

	-30 %	0 %	30 %
Investointi	345 347 €	220 813 €	96 279 €
Kuiva polttoaine	-427 840 €	220 813 €	869 466 €

Kuten aiemmissakin laskentamenetelmissä, myös tällä menetelmällä kuivan polttoaineen hinnan vaihtelu on investoinnin suuruuden vaihtelua merkittävämpää kannattavuudelle. Vaikka investointi kasvaisikin 30 prosenttia, ei nykyarvo mene vielä siltikään alle nollan. Liitteessä 1 on vielä esiteltynä graafisesti eri laskentamenetelmien tuloksia hukkalämpöä käytettäessä.

6.5 Investointi käyttäen kaukolämpöä

Laskettaessa investointia käyttäen kaukolämpöä muodostuvat kustannukset muuten samoin kuin hukkalämpöä käytettäessä, mutta nyt täytyy huomioida myös lämmölle hinta. Lämmön hinta on selkein ja todenmukaisin laskea lämmöntuotantoon kulutetun polttoaineen mukaan. Tällöin lämmön hinnaksi voidaan olettaa sama kuin tuotetun sähkön hinnaksi eli 24,7 €/MWh_n. Lämmön kulutus riippuu täysin kuivaimen ominaisenergiankulutuksesta, joten kulutkin muodostuvat sen mukaan. Oletetaan energiankulutuksen olevan noin 1,2 MWh/ton_{H2O}, mikä vastaa Swiss Combin ilmoittamaa viirakuivaimen ominaisenergiankulutusta Suomen olosuhteissa.

Aiemmin laskettiin, että tunnissa biomassasta poistettavan veden massa on noin 113 kilogrammaa, jolloin 8 000 tunnin käyttöajalla vuosittaiseksi lämpöenergiankulutukseksi tulee 1 080 MWh ja kustannukset lämpöenergiasta nousevat 26 670 euroon. Muut kustannukset pysyvät samoina kuin hukkalämpöä käytettäessä, joten vuotuiset säästöt näillä arvoilla ovat 14 051 euroa. Nyt voidaan tehdä edellisen kappaleen tavoin investoinnin kannattavuuslaskelmat eri menetelmillä.

6.5.1 Takaisinmaksuaika

Koroton takaisinmaksuaika saadaan nytkin näppärästi yhtälöllä 6, sijoittamalla siihen investoinnin arvo, 353 100 € ja vuotuiset säästöt 14 051 €. Näillä arvoilla korottomaksi takaisinmaksuajaksi muodostuu 25,1 vuotta. Korollinen takaisinmaksuaika puolestaan saadaan yhtälöllä 7. Sijoitettaessa arvoja yhtälöön, huomataan, että investointi ei ole kannattava, sillä säästöt eivät kata haluttua korkoa. Taulukkoon 5 on listattuna herkkyyssanalyysin tulokset, kun käytettävä lämmönlähde on kaukolämpö. Taulukossa olevat viivat tarkoittavat, että kyseisillä arvoilla takaisinmaksuaikaa ei voida määrittää, sillä säästöt eivät kata kuluja.

Taulukko 5. Herkkyyssanalyysi investoinnille, kun lämmönlähteenä kaukolämpö.

Investointi	-30 %	0 %	30 %
Koroton TMA	16,1	25,1	36,1
Korollinen TMA	33,4	-	-
Kuiva polttoaine	-30 %	0 %	30 %
Koroton TMA	-	25,1	5,9
Korollinen TMA	-	-	7,1

Takaisinmaksuajat ovat selvästi pidempiä, kun lämpöenergialle joudutaan laskemaan hinta. Samalla myös kannattavuuden raja tulee nopeammin vastaan ja tässä tapauksessa esimerkiksi investoinnin kasvaminen 30 prosentilla tekee hankkeesta kannattamattoman, toisin kuin hukkalämmön tilanteessa.

6.5.2 Annuiteettimenetelmä

Annuiteettimenetelmällä laskettuna investointi ei näytä kovinkaan kannattavalta, jos hukkalämpöä ei pystytä hyödyntämään. Oletusarvoilla investoinnin nettosäästöt jäävät

melko tarkalleen 11 000 euroa pienemmäksi kuin investoinnin annuiteetti ja näin ollen hanke ei olisi kannattava. Hanketta ei oletusarvoisella polttoaineen hinnalla saada kannattavaksi, vaikka investointi pienenesi 30 %, sillä silloin tulos olisi 2 166 euroa miinuksella. Kuivan polttoaineen hinnan merkitys on taas kerran suuri, sillä jo 7,5 % kasvu kuivan polttoaineen hinnassa tekee investoinnista juuri ja juuri kannattavan. Taulukossa 6 esitellään vielä herkkyystarkastelun tulokset annuiteettimenetelmällä.

Taulukko 6. Herkkyystarkastelu annuiteettimenetelmälle, kun lämpöenergiana on kaukolämpö.

	-30 %	0 %	30 %
Investointi	-2 166 €	-11 002 €	-19 838 €
Kuiva polttoaine	-57 026 €	-11 002 €	35 021 €

6.5.3 Nykyarvomenetelmä

Nykyarvomenetelmän tulokset mukaillet melko pitkälti annuiteettimenetelmän tuloksia. Kaukolämmön käyttäminen lämmönlähteenä heikentää kannattavuutta myös tällä laskentamenetelmällä merkittävästi. Kuivan polttoaineen hinnan nousu sen sijaan voi tehdä investoinnista kannattavan jo samaisella 7,5 prosentin kasvulla. Oletusarvoilla hanke ei ole kannattava. Taulukossa 7 on nykyarvomenetelmälle tehdyn herkkyystarkastelun tulokset. Liitteessä 2 on vielä esitelty graafisesti kappaleen 6.5 taulukoiden tulokset.

Taulukko 7. Herkkyystarkastelun tulokset nykyarvomenetelmälle.

Nykyarvomenetelmä	-30 %	0 %	30 %
Investointi	-30 534 €	-155 068 €	-279 602 €
Kuiva polttoaine	-803 721 €	-155 068 €	493 585 €

7 PÄÄTELMÄT INVESTOINNIN KANNATTAVUUDESTA

Työssä tarkasteltiin investointia monella eri laskentamenetelmällä. Eri menetelmien avulla saatiin keskenään hyvin samanlaisia tuloksia. Hukkalämmön käyttäminen piti investoinnin kannattavana kaikissa muissa tilanteissa, paitsi jos kuivan polttoaineen hinta romahtaa merkittävästi. Sen sijaan kaukolämpöä käytettäessä investoinnin kannattavuus vaatisi merkittävää kuivan polttoaineen hinnan nousemista. Kuivan polttoaineen hinnan vaihtelu on muutenkin paljon investoinnin suuruuden muuttumista merkittävämpi tekijä.

Investoinnissa olisi kyse kunnallisesta hankkeesta, joten koron huomioon ottaminen laskentamenetelmissä voi toisaalta olla hieman tarpeetonta. Todennäköisesti kunnallisissa projekteissa investoinnilta ei odoteta kovinkaan suurta tuottoa, joten koroton takaisinmaksuaika voi hyvinkin olla järkevin laskentamenetelmä. Korottomaksi takaisinmaksuajaksi saatiin hukkalämpöä käytettäessä hieman vajaa yhdeksän vuotta ja kaukolämpöä käytettäessä hieman yli 25 vuotta. Kaukolämpöä käytettäessä takaisinmaksuaika alkaa olemaan laitteiden käyttöikä huomioon ottaen aika pitkä, kun taas hukkalämmöllä investointi vaikuttaisi hyvinkin kannattavalta.

Näiden laskelmien yhteydessä huomioon on otettava jo aiemmin mainitut lämmöntalteenottojärjestelmän mahdolliset lisäkulut sekä se, että kuivan polttoaineen saaminen muualta voi olla haasteellista. Toisin sanoen oman kuivurin hankkiminen voi olla pakollista, mikäli laitoksen halutaan olevan kaasutuslaitos. Toisaalta mikäli kuivaa polttoainetta saataisiin hankittua muualta, sen hinta voi hyvinkin olla paljon arvioituna kalliimpaa, sillä toimituserät eivät ole valtavan suuria ja lähimmät toimittajat voivat olla kaukana, jolloin kuljetuskustannukset kasvavat. Hukkalämmön käyttäminen voi myös jossain tapauksissa kasvattaa itse kuivaimen hankintahintaa jonkin verran, sillä kuivauspinta-alan tulee olla suurempi, jos lämpötila laskee.

Vaikka laskelmia tehtiin erikseen hukkalämmölle ja kaukolämmölle, olisi todellinen tilanne varmaankin jotain siltä väliltä. Mikäli sähkö halutaan tuottaa tasaisella teholla ympäri vuoden, tuotetaan samalla myös lämpöä ympäri vuoden. Kesäaikaan kaukolämmön kulutus on hyvin vähäistä, joten sille ei välttämättä löydy käyttöä. Tällaisessa tilanteessa voidaan kuivauksessa käytettävän lämmön olevan periaatteessa hukkalämpöä.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia biomassan kuivausta, erilaisia kuivaimia sekä eritoten tarkastella kuivauksen kannattavuutta pienen kokoluokan CHP-laitoksessa. Kuivauksen teoriaa tarkasteltiin tutustumalla aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen sekä tutkimuksiin. Erilaisten kuivaimien toimintaa selvitettiin myös tutkimalla kirjallisuutta sekä kyselemällä tietoja useilta laitevalmistajilta. Muutamilta valmistajilta saatiin vastauksia kysymyksiin ja erityisesti hintatiedot pienen kokoluokan kuivaimesta olivat erittäin tärkeitä.

Kuivausprosesseista voidaan tarkastelun perusteella todeta, että kuivauslämpötilalla on suuri merkitys ominaisenergiankulutukseen sekä myös tarvittavaan kuivausilmanmäärään. Tämän lisäksi korkeammassa lämpötilassa lämmön- ja samalla myös aineensiirto ovat suurempia, joten kuivausaika on lyhyempi. Lyhyempi kuivausaika johtaa myös pienempään kuivurin kokoon. Ympäristön lämpötilalla on myös oma merkityksensä energiankulutukseen, sillä kylmempää ulkoilmaa joudutaan lämmittämään enemmän, jolloin energiaa kuluu vastaavasti enemmän.

Kirjallisuuden ja laitevalmistajien tietojen perusteella tultiin siihen tulokseen, että pienen kokoluokan CHP-laitokselle soveltuvimmat kuivaintyyppit ovat viirakuivain ja mahdollisesti myös rumpukuivain. Varsinkin viirakuivaimia on saatavana riittävän pienessä kokoluokassa, jotta kapasiteettia ei mene hukkaan. Investoinnin kannattavuus riippuu eniten korvaavan polttoaineen hinnasta ja toisaalta jonkin verran myös investoinnin suuruudesta. Hukkalämmön käyttö ei ole pelkästään energiatehokasta, vaan myös hyvin kannattavaa, mikäli lämmöntalteenottojärjestelmän kulut eivät ole suuret.

LÄHDELUETTELO

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J., Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. Espoo, Teknologian tutkimuskeskus VTT.

Alpua, J. 2011. Biopolttoaineen kuivaus voimalaitoksessa. Tampere, Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Brammer, J., Bridgwater, A. 1999. Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 3, pp. 243-289.

Gebreegziabher, T., Oyedun, A., Hui, C. 2013. Optimum biomass drying for combustion – A modelling approach. *Energy*, vol. 53, pp. 67-73.

Hankehakemus. 2017. BIO-Valtimo -monienenergisestä laitoksesta lämpöä ja sähköä Valtimon kunnalle ja Ammattiopisto Valtimolle.

Holmberg, H. 2007. Biofuel drying as a concept to improve the energy efficiency of an industrial CHP plant. Espoo, Helsinki University of Technology.

Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., Lavine, A. 2011. *Principles of Heat and Mass Transfer*. 7 ed. John Wiley & Sons, Inc.

Krokida, M., Marinos-Kouris, D., Mujumdar, A. 2015. Rotary Drying. In: Mujumdar, A. (ed.) *Handbook of Industrial Drying*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press.

Law, C., Mujumdar, A. 2015 Fluidized Bed Dryers. In: Mujumdar, A. (ed.) *Handbook of Industrial Drying*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press.

Levy, A., Borde, I. 2015. Pneumatic and Flash Drying. In: Mujumdar, A. (ed.) *Handbook of Industrial Drying*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press.

Nummelin, J., Hankalin, V. & Raiko, M. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen, polttoaineen kuivatustekniikat. Helsinki, Motiva.

McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. Bioresource Technology, vol. 83, pp. 55-63.

M. Conde Engineering. 2012. WinPsychro. [verkkojulkaisu]. [viitattu 21.11.2017]. Saatavissa: <http://www.mrc-eng.com/winpsychro.htm>

Mujumdar, A. 2015. Principles, Classification and Selection of Dryers. In: Mujumdar, A. (ed.) Handbook of Industrial Drying. 4. ed. Boca Raton: CRC Press.

Poirier, D. 2007. Conveyor Dryers. In: Mujumdar, A. (ed.) Handbook of Industrial Drying. 4 ed. Boca Raton: CRC Press.

Pöyry Finland Oy. 2017. Polttoaineiden hintataso. Bioenergia, 5/2017.

Rajala, A. 2013. Drying of chips in a gasifier plant. Lappeenranta, Lappeenranta University of Technology.

REN21, 2017. Renewables 2017 Global Status Report. Paris, REN21 Secretariat.

Roos, C. 2008. Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power. U.S. Department of Energy.

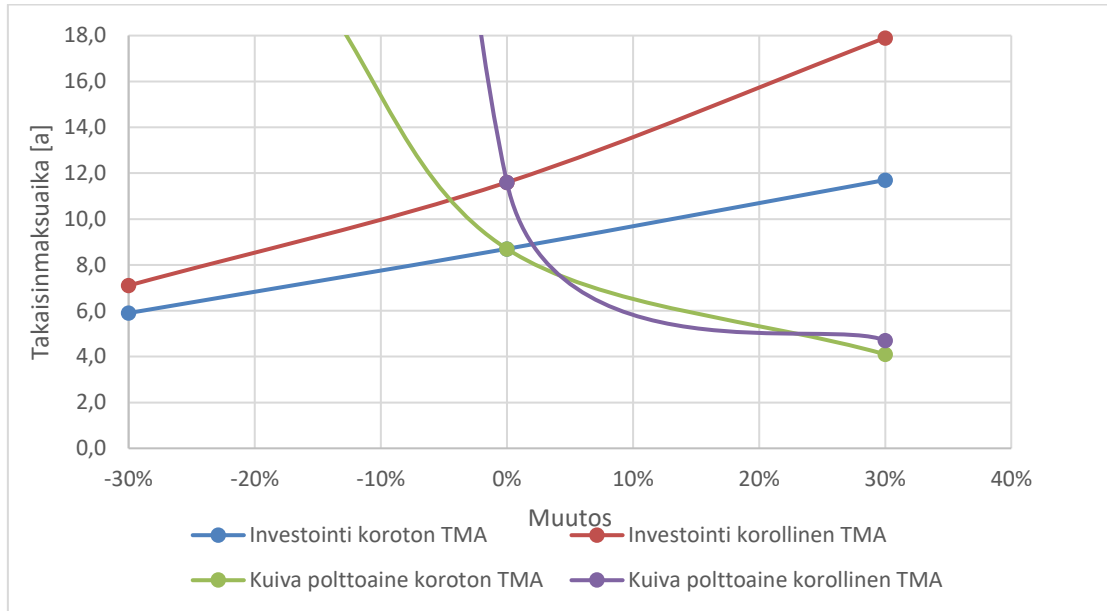
Statistics Finland, 2017. Energy in Finland 2017.

Stummer, B. 2017. Stela Laxhuber GmbH. Sähköpostikeskustelu.

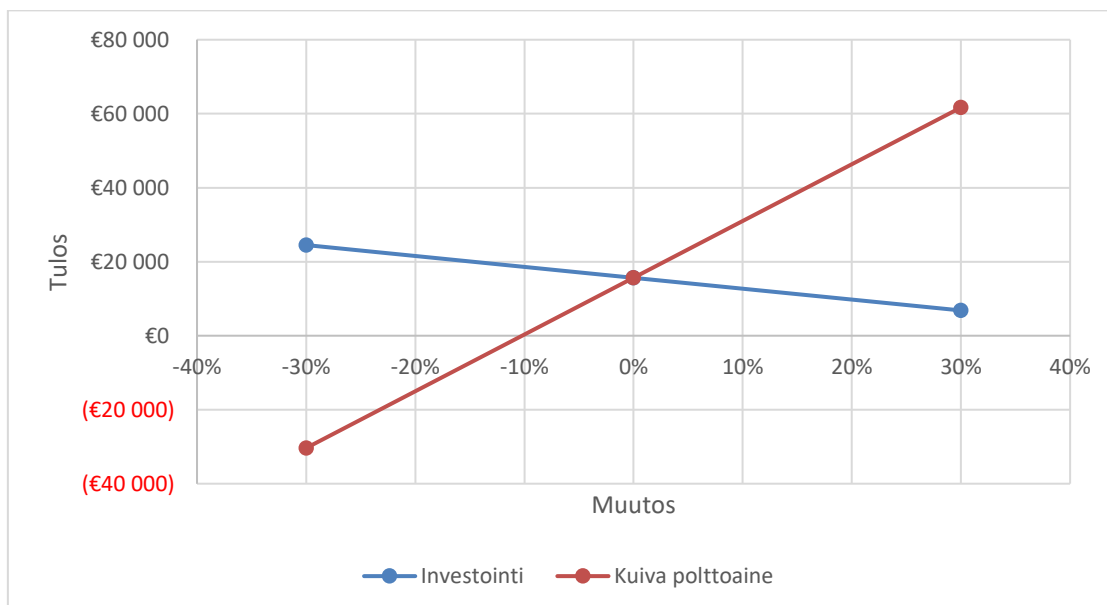
Tapanainen, J. 1982. Turpeen ja puubiomassan kuivaus. VTT Tiedotteita 107. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT.

Urwyler, K. 2017. Swiss Combi. Sähköposti.

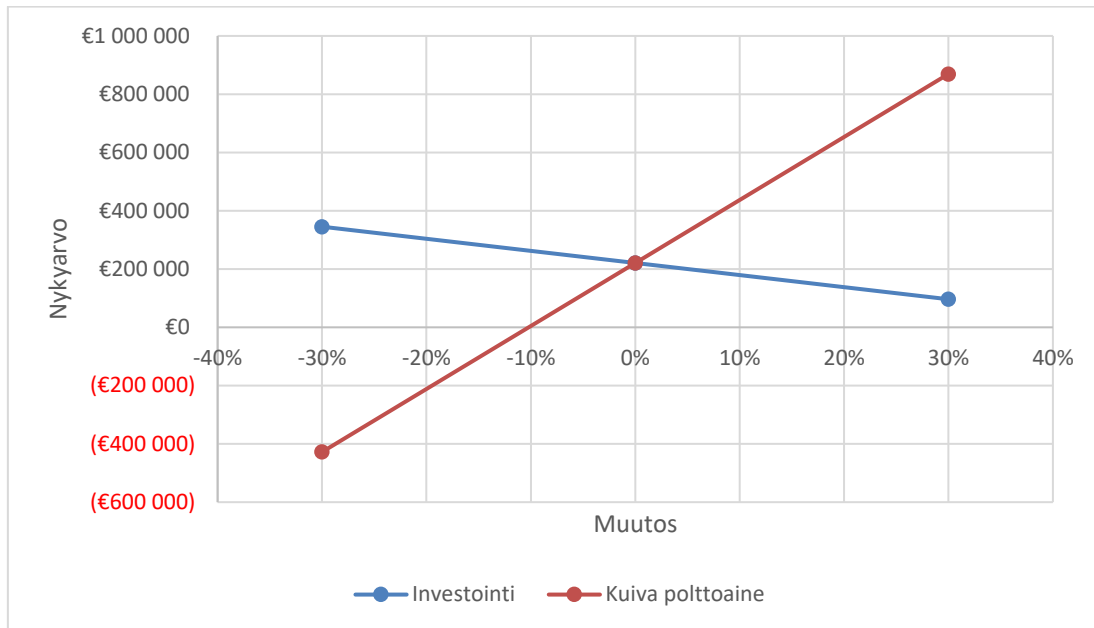
LIITE 1. KUVAAJAT INVESTONITILASKELMISTA KÄYTETTÄESSÄ HUKKALÄPÖÄ



Koroton ja korollinen takaisinmaksuaika muutettaessa investointia sekä kuivan polttoaineen hintaa.

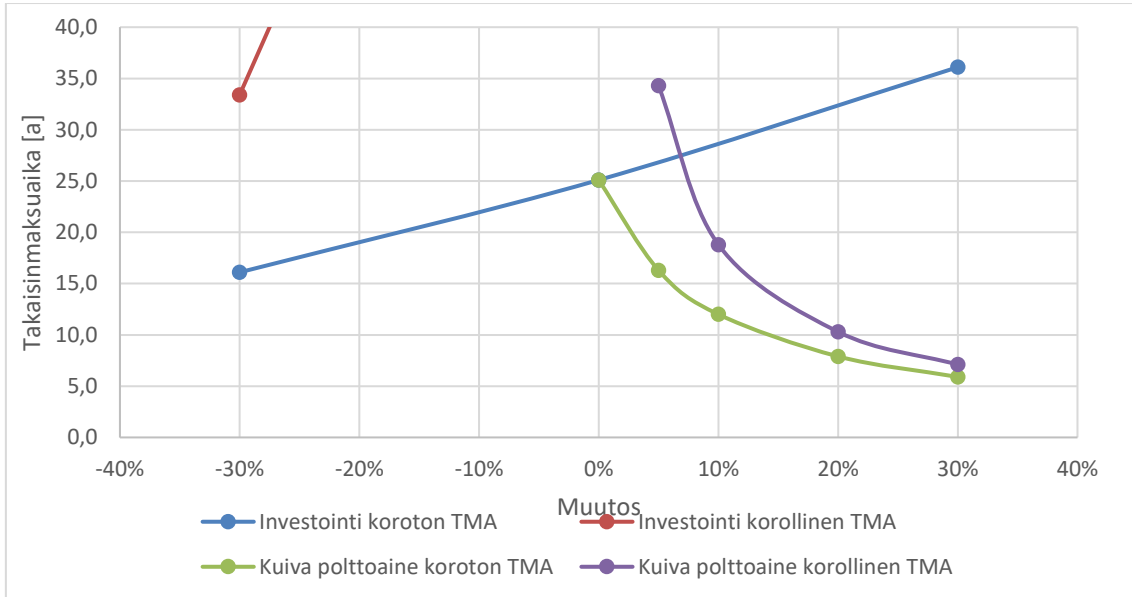


Annuiteettimenetelmän tulokset muutettaessa investointia sekä kuivan polttoaineen hintaa.

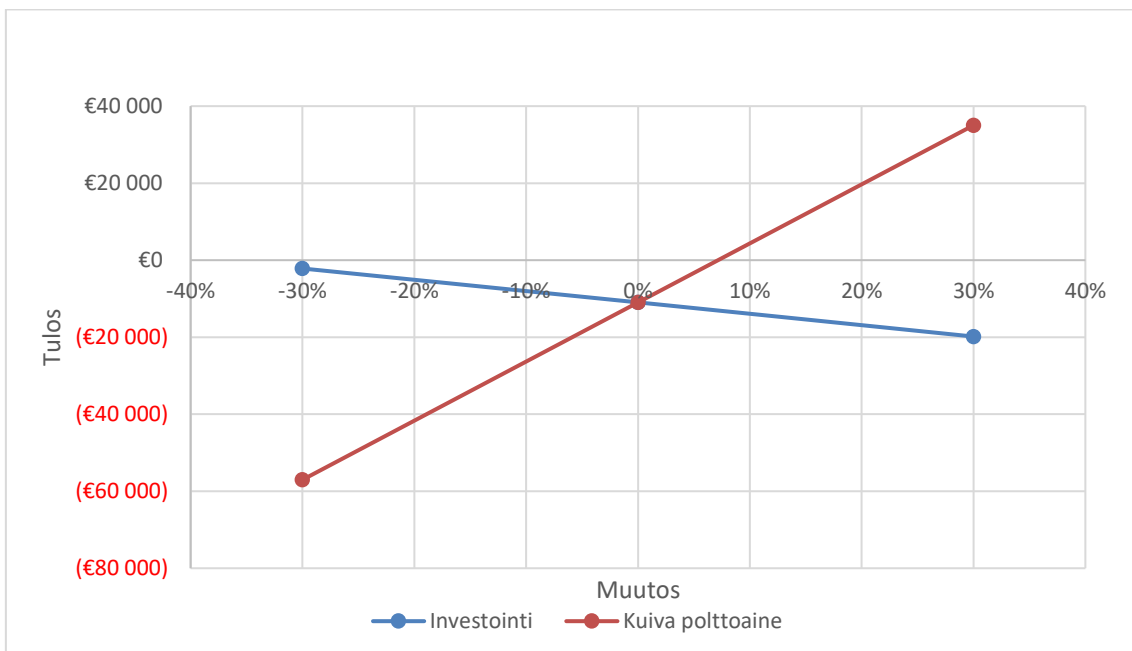


Investoinnin nykyarvo muutettaessa investointia sekä kuivan polttoaineen hintaa.

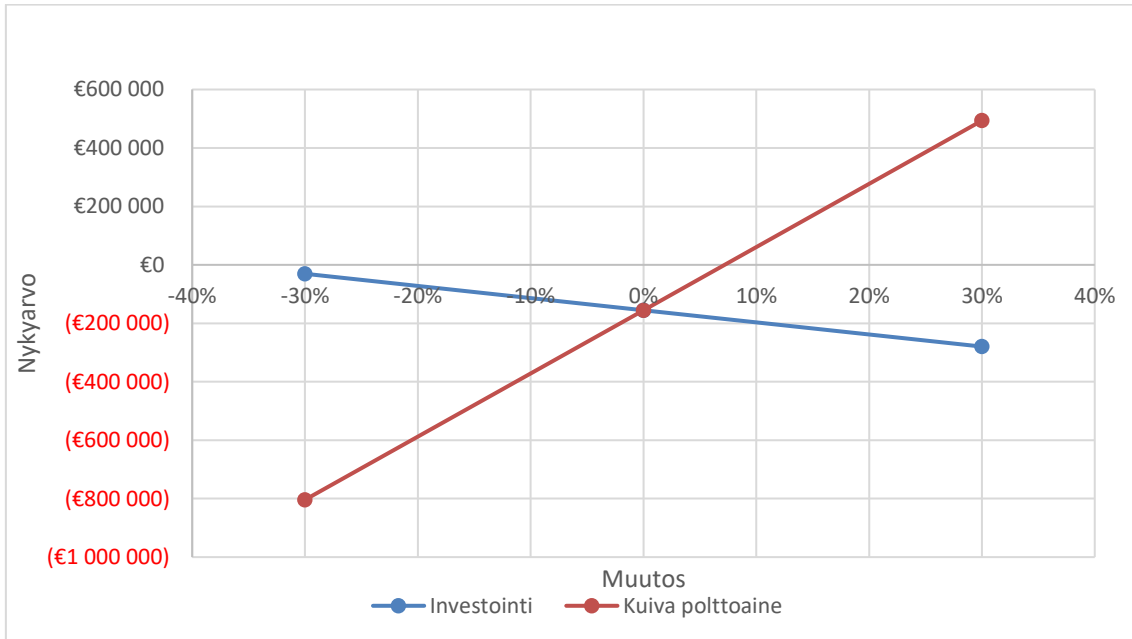
LIITE 2. KUVAAJAT INVESTOINTILASKELMISTA KÄYTETTÄESSÄ KAUKOLÄMPÖÄ



Koroton ja korollinen takaisinmaksuaika muutettaessa investointia sekä kuivan polttoaineen hintaa.



Annuiteettimenetelmän tulokset muutettaessa investointia sekä kuivan polttoaineen hintaa.



Investoinnin nykyarvo muutettaessa investointia sekä kuivan polttoaineen hintaa.