

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Pienen kokoluokan CHP puunjalostusteollisuuden
yrityksessä

Small scale CHP in wood processing industry

Työn tarkastaja: Ahti Jaatinen-Värri

Työn ohjaajat: Ahti Jaatinen-Värri ja Antti Uusitalo

Lappeenranta 10.5.2017

Joni Paulasalo

TIIVISTELMÄ

Joni Paulasalo

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaajat: Ahti Jaatinen-Värri ja Antti Uusitalo

Kandidaatintyö 2017

33 sivua, 7 kuvaa, 10 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: hajautettu energiantuotanto, CHP, ORC, Rankine

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan puunjalostusteollisuudessa syntyvien materiaalisivuvirtojen hyödyntämistä energiantuotannossa. Tavoitteena on löytää taloudellisesti kannattava menetelmä tuottaa sähköä ja lämpöä tehtaan tarpeisiin omassa voimalaitoksessa.

Hankkeen teknillistä toimivuutta tarkastellaan laskennallisesti voimalaitosprosessin näkökulmasta. Laskennan lähtötiedot saadaan kaupallisten valmistajien tuotetiedoista ja kohdeyrityksen tarjoamista tiedoista. Laskenta suoritetaan kahdelle kaupalliselle voimalaitosratkaisulle. Rankine-prosessi edustaa perinteistä sekä laajalti käytettyä vesihöyryn kiertoon perustuvaa teknologiaa sähkön ja lämmön tuotannossa. ORC-prosessi (Organic Rankine Cycle), joka käyttää orgaanista kiertoainetta, tarjoaa uuden varhaiskaupallisen vaihtoehdon vanhojen rinnalle ja mahdollisuuden parantaa sähköntuotannon hyötysuhteita pienessä kokoluokassa.

Taloudellinen kannattavuus suoritetaan energia-alan julkaisuiden hintatietojen perusteella ja ne ovat tämän hankkeen kannalta lähinnä suuntaa antavia. Tarkastelussa otetaan huomioon myös mahdollinen tuotantotuki. Kannattavuuteen vaikuttavista muuttujista suoritetaan herkkyysanalyysi ja tarkastellaan hankkeen kannattavuutta erilaisissa tilanteissa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto	6
2	Alkuarvot ja reunaehdot	7
3	Kohteeseen suunniteltavan CHP-laitoksen yleinen toimintaperiaate	9
3.1	Rankine-prosessi	9
3.2	ORC-prosessi.....	11
4	Voimalaitosprosessin laskenta	13
4.1	Laskennassa tarvittavat yhtälöt	13
4.2	Valitut komponentit.....	15
4.3	Laskennan tulokset	17
5	Kannattavuuden tarkastelu	21
6	Yhteenveto	29
	Lähdeluettelo	31
	LIITE I TOLUEENIN LOG P, H-PIIRROS	33

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

q_m	massavirta	kg/s
$q_{p, \text{net, ar}}$	tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	MJ/kg
$q_{p, \text{net, d}}$	tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa	MJ/kg
h	ominaisentalpia	kJ/kg
I	investointi	€
NA	nykyarvo	€
p	paine	Pa
P	teho	kW
q_m	massavirta	kg/s
$q_{p, \text{net, ar}}$	tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	MJ/kg
$q_{p, \text{net, d}}$	tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa	MJ/kg
S	vuosittainen säästö	€/a
t	pitoaika	a
v	ominaistilavuus	m ³ /kg

Kreikkalaiset aakkoset

Φ	lämpöteho	kW
--------	-----------	----

Dimensiottomat luvut

ε	rekuperaatioaste
η	hyötysuhde
M_{ar}	kosteus saapumistilassa
r	laskentakorko

Alaindeksit

el	sähkö
g	generaattori
h	höyry
k	kattila

kyl	kylläinen
lauh	lauhdutin
mg	
p	pumppu
pa	polttoaine
s	isentrooppinen
t	turbiini
th	lämpö
tot	yhteensä

Lyhenteet

CHP	Combined Heat and Power
IEA	International Energy Agency
ORC	Organic Rankine Cycle

1 JOHDANTO

Sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa puuperäiset polttoaineet ovat Suomessa merkittävässä roolissa (SVT 2015). Niiden merkitys tulee vain kasvamaan, kun uusiutuvan energian osuutta pyritään lisäämään (Huttunen 2017, 34). Muutos on tehtävä kestäväällä tavalla, minkä takia nykyisestä korjatun puun määrästä on hyödynnettävä enemmän ja kestävään metsäteollisuuteen on panostettava.

Työn keskiössä on mekaaniseen puunjalostusteollisuuden erikoistunut yritys, jonka tuotannon sivuvirtana syntyy kutterinpurua. Tuotannossa tarvitaan sähkötehoa tuotantoprosessiin ja lämpötehoa rakennusten lämmittämiseen. Nykyisin tarvittava sähkö ja kaukolämpö ostetaan paikalliselta energiayhtiöltä. Biomassaa olisi mahdollista hyödyntää pienen kokoluokan voimalaitoksessa, joka tuottaisi yritykselle sähköä ja lämpöä.

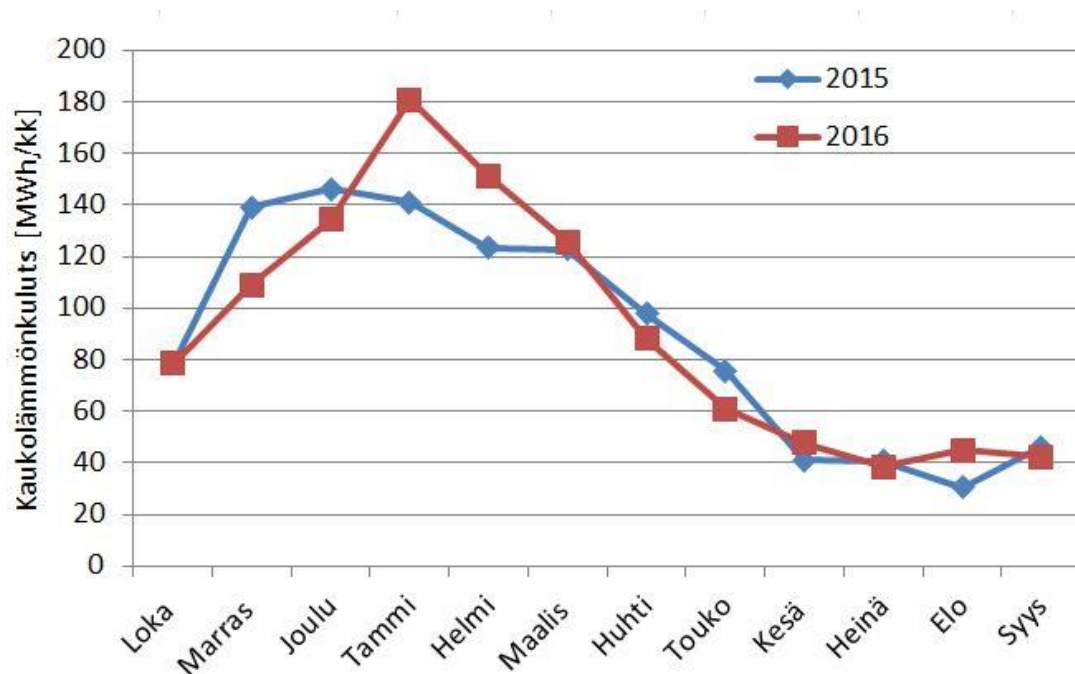
Tässä kandidaatintyössä määritetään yhden mekaanisen puunjalostusteollisuuden yrityksen sähkön ja lämmön yhteistuotannon potentiaali. Työn tavoite on tutkia, miten pienen kokoluokan sähkön- ja lämmöntuotanto toteutettaisiin kohteessa ja olisiko se kilpailukykyinen vaihtoehto nykyisille ratkaisuille. Työssä vertaillaan kahta kaupallista yhteistuotannon sovellusta, jotka ovat Rankine-prosessi ja ORC-prosessi. Rankine-prosessi on perinteinen höyryvoimalaitosprosessi, jonka kiertoaineena toimii vesi. ORC-prosessi toimii pääpiirteissään samalla tavalla kuin Rankine, mutta hyödyntää kiertoaineenaan orgaanisia nesteitä kuten hiilivetyjä ja kylmäaineita.

Työ aloitetaan määrittämällä yrityksen antamista tiedoista lähtöarvot laskentaan ja työn reunaehdot. Tärkeimpinä reunaehtoina toimivat hyödynnettävissä olevan biomassan määrä ja lämmitystehon tarve. Tämän jälkeen esitetään tärkeimmät voimalaitosprosessin laskentaan liittyvät yhtälöt. Reunaehtojen perusteella etsitään tärkeimmät komponentit kahteen prosessiin ja suoritetaan voimalaitosprosessiin liittyvät laskelmat komponenttien arvoja käyttäen. Laskennan tuloksien avulla prosessien kannattavuutta tarkastellaan investoinnin ja mahdollisten säästöjen näkökulmasta. Kannattavuuteen vaikuttaville muuttujille suoritetaan herkkyyksianalyysi, jolla selvitetään kuinka merkittävästi eri muutokset vaikuttavat kannattavuuteen.

2 ALKUARVOT JA REUNAEHDOT

Mitoitettavan voimalaitoksen määräävin reunaehto on yrityksen kaukolämpötehon tarpeen täyttäminen. Muita määrääviä tekijöitä ovat käytettävissä oleva biomassa, sen laatu ja yrityksen tarvitsema sähköteho.

Laskentaa varten yritykseltä saadaan tiedot kaukolämmön kulutuksesta ja käytettävissä olevasta biomassasta. Kahden eri vuoden sääkorjattu kaukolämmön kulutus esitetään kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Sääkorjattu kaukolämmön kulutus vuosilta 2015 ja 2016

Kuvasta 2.1 yhteenlaskettu kaukolämmön kokonaiskulutus oli vuosina 2015 ja 2016 noin 1100 MWh. Kokonaiskulutus oli vuonna 2016 suurempi kuin edellisellä vuonna. Varsinkin tammikuussa 2016 kulutus oli paljon tavallista korkeampaa, sillä kuukauden keskilämpötila oli $-6,7$ °C:ta keskiarvon alapuolella. Tuolloin mitattiin myös alle -30 °C:n lämpötiloja yrityksen alueella.

Tammikuussa sääkorjattu kaukolämmön kulutus oli noin 180 MWh/kk. Tästä saadaan tuntia kohden tarvittavaksi lämmitystehoksi noin 240 kW. Valitaan mitoitetun CHP-laitoksen (Combined Heat and Power) kaukolämpötehoksi 300 kW. Tällä teholla on

tarkoitus kattaa tehtaan vaatima lämmöntarve kokonaisuudessaan. Tässä työssä kuitenkin oletetaan, että laitos pidetään kaukolämpöverkossa kiinni tehtaan lämmityksen turvaamiseksi vikatilanteissa ja kylmimpinä päivinä mahdollisen lisätehotarpeen vuoksi.

Biomassaa syntyy yrityksen toiminnan sivutuotteena noin 4450 tonnia vuodessa. Laadullisilta ominaisuuksiltaan se vastaa kutterinpurua, jonka tehollinen lämpöarvo on 18,9 MJ/kg (Alakangas et al. 2016, 64). Kutterinpurun kosteus on 12–18 %, painottuen 15 ja 16 %:n alueelle.

Lasketaan hyödynnettävissä olevan polttoaineen energiasisältö lämpöarvon kautta. Polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa eli polttoaineen ollessa kostea määritetään yhtälöllä (Alakangas et al. 2016, 29)

$$q_{p, \text{net}, \text{ar}} = q_{p, \text{net}, \text{d}} \left(\frac{100 - M_{\text{ar}}}{100} \right) - 0,02443 M_{\text{ar}} \quad (2.1)$$

missä	$q_{p, \text{net}, \text{ar}}$	tehollinen lämpöarvo saapumistilassa [MJ/kg]
	$q_{p, \text{net}, \text{d}}$	tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa [MJ/kg]
	M_{ar}	kosteus saapumistilassa [-]

Yhtälöllä 3.1 voidaan määrittää polttoaineelle lämpöarvo eri kosteuksilla. Lämpöarvo 18 %:n kosteudella on

$$q_{p, \text{net}, \text{ar}} = 18,9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{100 - 0,18}{100} \right) - 0,02443 \cdot 0,18 = 15,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Vastaavasti 12 %:n kosteudella saadaan tulokseksi 16,6 MJ/kg. Kun tiedetään kosteuden painottuvan 15–16 %:n alueelle, voidaan laskennassa käyttää arvoa 16 MJ/kg keskimääräisenä lämpöarvona. Tällöin vuotuisesti energiasisällöksi biomassalla saadaan 19 800 MWh/a tai keskimäärin kuukautta kohti noin 1600 MWh/kk.

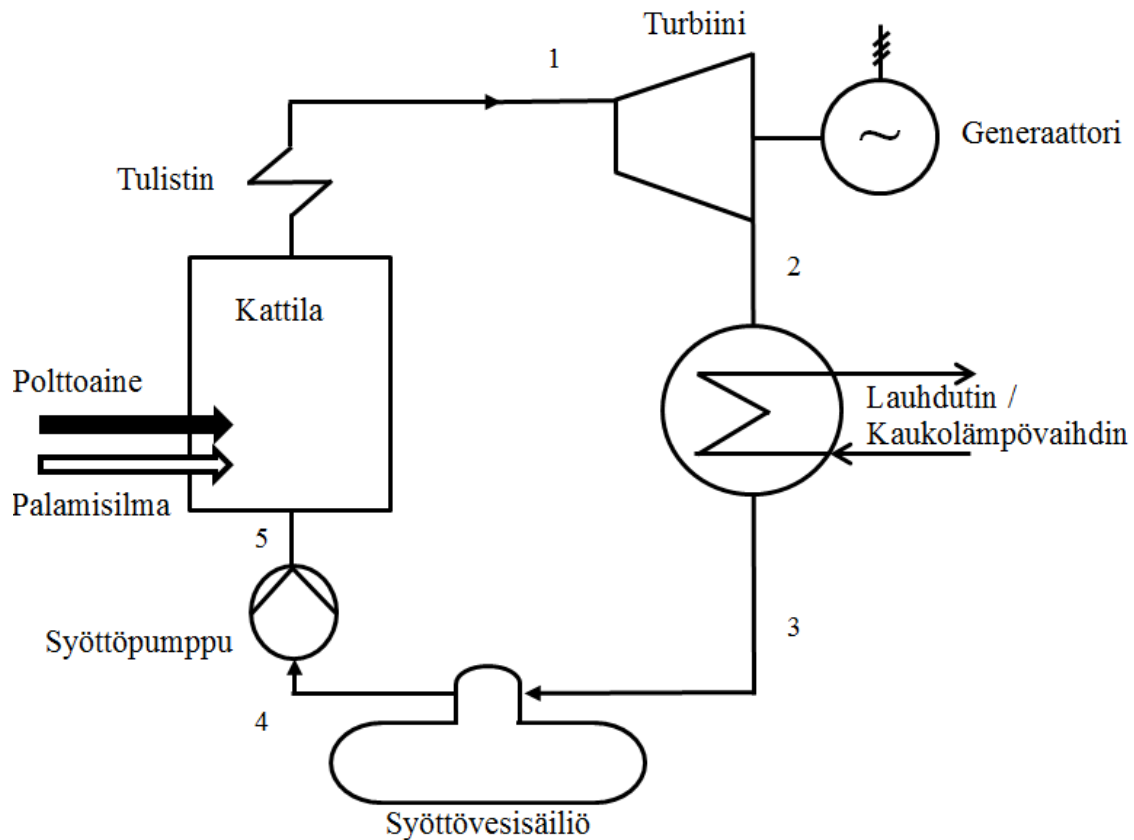
Kun verrataan vuoden 2016 tammikuussa kulutettuun kaukolämpöenergiaa käytettävissä olevan biomassan energiaan, voidaan todeta polttoaineen riittävän kylmimmilläänkin lämpötiloilla.

3 KOHTEESEEN SUUNNITELTAVAN CHP-LAITOKSEN YLEINEN TOIMINTAPERIAATE

Tässä osiossa esitetään CHP-voimalaitokelle kaksi vaihtoehtoista toteutustapaa. Pienessä kokoluokassa on kehityksen alla monia eri vaihtoehtoja, mutta vain muutama on päässyt kaupalliselle tasolle. Ensimmäinen vaihtoehto on perinteinen Rankine-prosessi, jossa kiertoaineena toimii vesi. Toisena vaihtoehtona käytetään ORC-prosessia, joka toimii samantyyppisesti kuin Rankine, mutta käyttää kiertoaineena orgaanista ainetta.

3.1 Rankine-prosessi

Rankine-prosessia käytetään höyryvoimalaitosten ideaalisena vertailuprosessina. Höyryvoimalaitokset ovat laajasti käytössä suuren kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Yhteistuotannossa olevia höyryvoimalaitoksia kutsutaan vastapainevoimalaitoksiksi. Nimitys tulee tavallisesta korkeammasta höyryn paineesta turbiinin jälkeen. Höyryn korkeampi paine ja lämpötila mahdollistavat lämmön tuotannon turbiinin jälkeen. Kuvassa 3.1 esitetään yksinkertainen periaate piirros höyryvoimalaitoksesta.



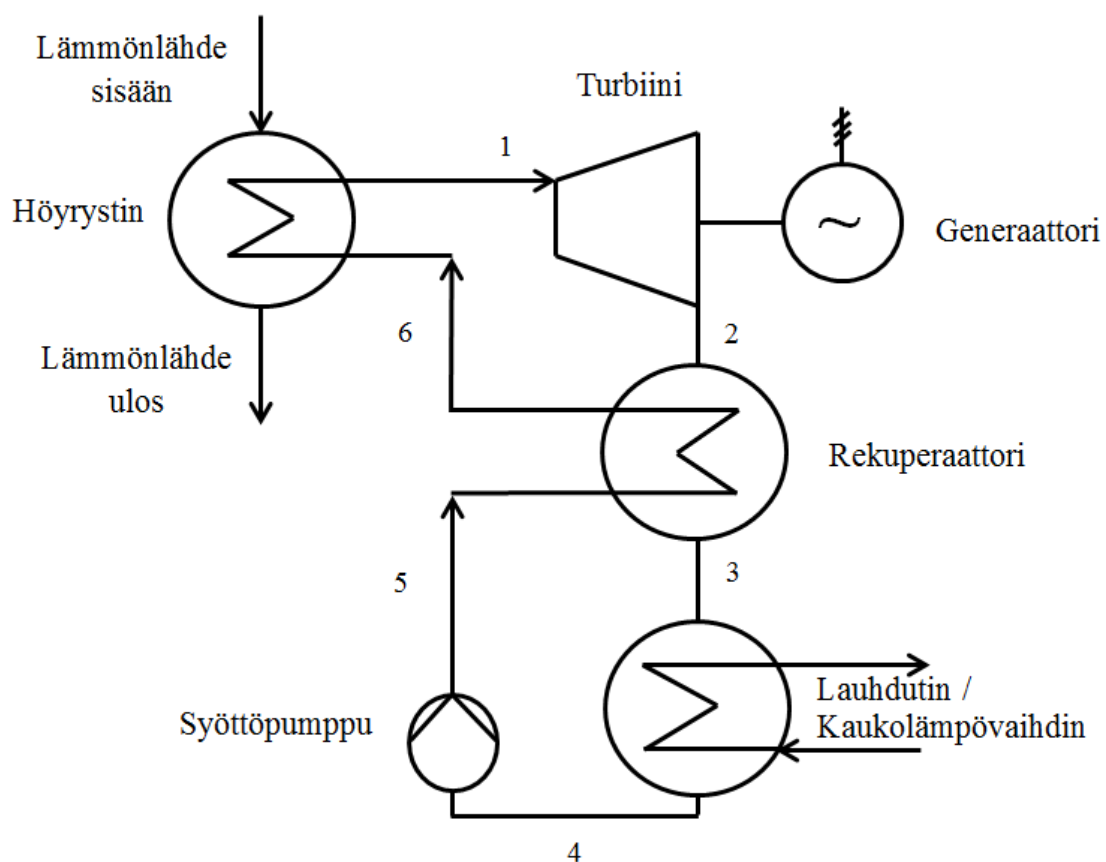
Kuva 3.1. Höyryvoimalaitoksen periaatekaavio.

Kuvassa 3.1 kattilaan syötetään polttoainetta ja palamisilmaa. Palamisesta syntyvät savukaasut höyrystävät ja tulistavat korkeapaineisen syöttöveden. Tulistunut höyry syötetään turbiinille, jossa se paisuu ja pyörittää turbiinin roottoreita. Roottorit ovat kiinni akselissa, joka pyörittää generaattoria. Turbiinilta höyry jatkaa lauhduttimeen, jossa se lauhduu ja lämmittää kaukolämpövähettä. Kylläiseen tilaan lauhdunut vesi matkaa syöttövesisäiliöön, josta se pumpataan syöttövesipumpulla kattilaan. Syöttövesipumpun tehtävänä on myös nostaa syöttöveden painetta.

Rankine-prosessin ensisijainen tehtävä on tuottaa yritykselle sen tarvitsema lämpöteho lauhduttimen kautta. Turbiinin jälkeisen höyryn lämpötilan ja paineen tulee siis olla riittävällä tasolla, jotta lämmitystarve voidaan täyttää kaikkina ajan hetkinä. Turbiinissa tapahtuvaa paisuntaa säädetään aina höyrystä hyödynnettävissä olevan tehon mukaan.

3.2 ORC-prosessi

Orgaanisen kiertoaineen höyrystyminen vaati matalamman lämpötilan kuin vedellä, joten prosessi pystyy toimimaan sähköntuotannossa pienemmillä tehoilla paremmalla hyötysuhteella kuin Rankine-prosessi (Frigolo 2014, 849). ORC:n käyttö on tästä syystä erityisen suosittua matalan lämpötilatason sovelluksissa. Lämmönlähteenä voidaan käyttää esimerkiksi moottorin kuumia savukaasuja tai teollisuusprosessissa kulkevan veden hukkalämpöä. ORC-voimalaitoksen toimintaa on havainnollistettu kuvassa 3.2.



Kuva 3.2. ORC-voimalaitoksen periaatekaavio.

Kuvassa 3.2 esiintyvät numerot edustavat laskennassa tai alkuarvojen perusteella selvitettäviä tilapisteitä. Kohteessa sivutuotteena syntyvää kutterinpurua on tarkoitus käyttää kattilan polttoaineena. Kattilassa syntyvät savukaasut ovat kuitenkin liian korkeassa lämpötilassa, jotta orgaaninen kiertoaineen käyttö olisi mahdollista. Tästä syystä tavallisesti korkeissa lämpötila sovelluksissa ORC:n ja kattilan välillä käytetään välipiiriä, jossa kulkee termooöljy. Termooöljy on tehokas tapa siirtää lämpöä nestemäisen

kiertoaineen muodossa matalassa paineessa. Kuuma termooöljy höyrystää ja tulistaa prosessissa kiertävän orgaanisen kiertoaineen höyrystimessä. Tulistunut kiertoaine paisuu turbiinissa matalampaan paineeseen ja lämpötilaan. Tulistusta poistetaan turbiinin jälkeen vielä rekuperaattorissa, jonka tehtävä on esilämmittää kiertoainetta kattilaa varten. Kiertoaine lauhtuu lauhduttimessa nesteeksi luovuttaen lämpöä kylmäpuolella virtaavalle vedelle. Tässä tapauksessa lauhduttimena toimii kaukolämpövaihdin, jossa kiertää kylmäpuolella lämmitettävä kaukolämpövesi. Nestemäinen kiertoaine nostetaan pumpulla korkeampaan paineeseen kattilassa tapahtuvaa höyrystymistä varten.

4 VOIMALAITOSPROSESSIN LASKENTA

Tässä osiossa esitetään CHP-voimalaitosprosessin laskentaan tarvittavat menetelmät ja oletukset. Rankine- ja ORC-prosessit sisältävät pitkälti samantyyppisiä komponentteja ja niiden toimintaa mallinnetaan samoilla yhtälöillä. ORC-prosessissa on lisäksi rekuperaattori, joka huomioidaan yhtenä lisävaiheena laskennassa.

4.1 Laskennassa tarvittavat yhtälöt

Laskenta suoritetaan kiertoaineen virtauksen suuntaisesti kuvissa 3.1 ja 3.2 olevien numeroiden mukaisessa järjestyksessä. Kattilan jälkeinen tila 1 määräytyy maksimiteholla komponenttien valmistajien asettamien rajoitusten mukaan. Komponentit esitellään myöhemmin esimerkkilaskujen yhteydessä. Turbiinin jälkeinen tilapiste 2 voidaan selvittää isentrooppihyötysuhteen yhtälöstä

$$\eta_{s,t} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (4.1)$$

missä $\eta_{s,t}$ turbiinin isentrooppinen hyötysuhde [-]
 h ominaisentalpia [kJ/kg]

ORC-prosessissa käytetään rekuperaattoria poistamaan kiertoaineen tulistusta ja esilämmittämään kiertoainetta kattilaan. Kiertoaineen tila 3 saadaan rekuperaatioasteen määritelmästä

$$\varepsilon = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{ky1h}} \quad (4.1)$$

missä ε rekuperaatioaste [-]

Kiertoaineen kylläisen höyryn tila $h_{ky1, h}$ saadaan lauhtumispaineen avulla kiertoaineen log p,h- piirroksesta. Kiertoaine lauhtuu kylläiseksi nesteeksi lauhduttimessa. Lauhtumispaine määräytyy halutun lauhduttimen jälkeisen lämpötilan mukaan. Tila 4 saadaan määritettyä kylläisessä tilassa kun tiedetään haluttu lämpötila lauhduttimen jälkeen. Lauhduttimen jälkeen kiertoaine pumpataan korkeampaan paineeseen syöttöpumpulla. Ominaisentalpian muutos pumpussa lasketaan prosessin lauhtumis- ja höyrystymispaineiden avulla.

$$\Delta h_p = \frac{v_4(p_5 - p_4)}{\eta_p} \quad (4.2)$$

missä	Δh_p	ominaisentalpian muutos pumpussa	[kJ/kg]
	v	ominaistilavuus	[m ³ /kg]
	p	paine	[Pa]
	η_p	pumpun hyötysuhde	[-]

Tilan 5 ominaisentalpia saadaan, kun lisätään pumpun aiheuttama ominaisentalpian muutos tilan 4 arvoon. Tilan 6 ominaisentalpia höyrystimen sisäänmenossa h_6 lasketaan rekuperaattorin energiataseesta. Kun kiertoaineen massavirta on sama sekä höyry- että nestepuolella, saadaan yhtälö muotoon

$$h_6 - h_5 = h_2 - h_3 \quad (4.3)$$

Yhtälöillä 4.1–4.4 saadaan määritettyä kiertoaineen tilat prosessin eri vaiheissa. Kiertoaineen massavirta voidaan määrittää lauhduttimen maksimi lämmitystehosta.

$$q_m = \frac{\Phi_{\text{lauh}}}{\Delta h_{\text{lauh}}} \quad (4.5)$$

missä	q_m	massavirta	[kg/s]
	Φ_{lauh}	lauhduttimen lämpöteho	[kW]
	Δh_{lauh}	ominaisentalpian muutos lauhduttimessa	[kJ/kg]

Kun massavirta on tiedossa, voidaan jokaiselle komponentille määrittää sen tuottama tai kuluttama teho. Jokaiselle komponentille teho määritetään yhtälöllä

$$P = q_m \Delta h \quad (4.6)$$

missä	P	teho	[kW]
-------	-----	------	------

Kattilan, höyrystimen ja lauhduttimen tapauksessa tuotettu teho on lämpötehoa. Turbiini tuottaa ja pumppu kuluttaa mekaanista akselitehoa. Generaattorin tuottama sähköteho saadaan vähentämällä voimansiirrossa tapahtuvat mekaaniset häviöt ja generaattorin sähkömagneettiset häviöt akselitehosta.

4.2 Valitut komponentit

Seuraavaksi esitellään kohteeseen sopivien laitteiden kaupallisia ratkaisuja. Tarkoituksena on saada käsitys käytettävien laitteiden kokoluokasta ja toiminnasta. Rankine-prosessia varten esitellään kiertoainetta höyrystävä kattila ja sähkötehoa tuottava turbiini-generaattori koneikko. ORC-prosessissa käytetään savukaasuista lämpöä talteenottavaa laitteistoa. Savukaasut tuotetaan höyrykattilan tyypisellä kattilalla, jonka tehtävä on lämmittää kattilan läpi höyrystinputkissa kulkevaa termoöljyä. Termoöljy pysyy kokoajan matalassakin paineessa nestemäisenä ja toimii välipiirinä kattilan ja ORC-laitteiston välissä. Termoöljy toimii ORC-prosessin lämmönlähteenä höyrystäen orgaanista kiertoainetta. Täysin sopivaa laitetta ei markkinoilta ollut saatavissa, joten tässä työssä sovelletaan höyrykattilan ominaisuuksia orgaanisen kiertoaineen höyrystäjään.

Laitoksissa käytettävä lämmönlähde on itävaltalaisen Kohlbachin 400 kW höyrykattila. Kyseinen kattila pystyy tuottamaan höyryä aina 450 °C lämpötilaan ja 40 barin paineeseen. Kattila on suunniteltu hyödyntämään biomassaa polttoaineenaan. Höyrykattila on kuvattuna kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Kohlbachin höyrykattila (Kohlbach 2017).

Höyrykattilan tuottama korkeapaineinen höyry hyödynnetään turbiini-generaattori koneikossa. Koneikko on tšekkiläisen G-Team a.s.:n valmistama TR 100 mikroturbiini. Generaattorin nimellisteho on 150 kW ja nimellisyörimisnopeus on 3000 rpm. Turbiiniin saapuvan höyryn maksimiarvot ovat 420 °C ja 40 bar. Koneikon rakenne näkyy kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. G-Teamin turbiini-generaattori koneikko (Steamturbo 2013).

ORC-prosessissa savukaasujen lämpö hyödynnetään Alankomaista peräisin olevan Triogenin WB-1 170 CHP järjestelmällä. Järjestelmä tarjoaa parhaimmillaan 140 kW nettosähkötehoa ja 680 kW lämpötehoa. Kiertoaineena käytetään tolueenia ja sen korkeapainepuolen maksimipaine on 32 bar. Käytettävä turbiini on yksivaiheinen radiaaliturbiini, jonka pyörimisnopeus on 18 000 – 28 000 rpm. ORC-järjestelmä esitetään kuvassa 4.3.



Kuva 4.3. Triogenin ORC-järjestelmä (Triogen 2016).

4.3 Laskennan tulokset

Edellä esitettyjen komponenttien toiminta-arvojen perusteella ja tiettyjen oletusten avulla voidaan määrittää kummallekin prosessille tilapisteet ja komponenttien tehot. Laskentaan liittyvät alkuehdot ja oletukset listattu taulukkoon 4.1.

Taulukko 4.1. Komponenttien oletetut hyötysuhteet ja kiertoaineen lauhtumislämpötila.

Kattilan hyötysuhde	η_k	85 %
Pumpun hyötysuhde	η_p	75 %
Höyryturbiinin isentrooppi- hyötysuhde	$\eta_{s,h}$	50 %
Turbiini isentrooppi- hyötysuhde	$\eta_{s,o}$	70 %
Turbiini-generaattorin hyötysuhde	η_{mg}	96 %
Rekuperatioaste	ε	60 %
Kiertoaineen lauhtumislämpötila	T_{lauh}	80 °C

Taulukossa 4.1 olevat kattilan ja pumpun hyötysuhteet on valittu hieman tavallisia arvoja pienemmiksi, komponenttien pienen koon vuoksi. Turbiinina käytetään molemmissa prosesseissa radiaalista yksivaiheista impulssiturbiinia, joten hyötysuhde laskee merkittävästi monivaiheisiin isomman kokoluokan turbiineihin. Kiertoaineen

lauhtumislämpötila asetetaan kaukolämpöpiirille sopivaksi (Jyväskylän Energia 2017, 4). Höyrykattilan, turbiinin ja ORC-järjestelmän asettamien rajoitusten perusteella asetetaan kiertoaineille alkuarvot, jotka ovat taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2. Kiertoaineiden tila ennen turbiinia.

Kiertoaine	Lämpötila	Paine	Entalpia
	T_1 [°C]	p_1 [bar]	h_1 [kJ/kg]
Vesi	420	40	3261
Tolueeni	292	30	600

Taulukosta 4.2 nähdään, että Rankine-prosessissa toimitaan korkeammilla paine- ja lämpötilatasoilla kuin ORC-prosessissa. Lisäksi tulistuneen vesihöyryn ominaisentalpia on moninkertaisesti tolueenia korkeampi. Taulukon 4.2 arvoista lasketaan muiden tilapisteiden arvot yhtälöiden 4.1–4.4 mukaisesti. Taulukossa 4.3 esitetään Rankine-prosessin tilapisteet.

Taulukko 4.3. Rankine-prosessin tilapisteiden lämpötilat, paineet ja ominaisentalpiat.

Tilapiste	Lämpötila	Paine	Entalpia
	T [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]
Ennen turbiinia	420	40	3261
Turbiinin jälkeen	168	0,47	2816
Lauhduttimen jälkeen	80	0,47	335
Ennen syöttövesipumppua	80	0,47	335
Syöttövesipumpun jälkeen	80	40	340

Taulukosta 4.3 nähdään, että vesihöyry tulee lauhduttimeen tulistuneena. Lauhduttimessa vesihöyry lauhtuu kylläiseen tilaan ja sen tila muuttuu vasta paineen nousun myötä syöttövesipumpussa. Tilapisteiden laskennassa on käytetty liitteessä I olevaa tolueenin $\log p, h$ -piirrosta. Taulukossa 4.4 esitetään ORC-prosessin tilapisteet.

Taulukko 4.4. ORC-prosessin tilapisteiden lämpötilat, paineet ja ominaisentalpiat.

Tilapiste	Lämpötila T [°C]	Paine p [bar]	Entalpia h [kJ/kg]
Ennen turbiinia	292	30	600
Turbiinin jälkeen	192	0,39	481
Rekuperattorin jälkeen	125	0,39	384
Lauhduttimen jälkeen	80	0,39	-65
Syöttöpumpun jälkeen	80	30	-60
Ennen kattilaa	128	30	36

Taulukosta 4.4 nähdään, että turbiinista poistuvan kiertoineen lämpötila on suuri ja sitä käytetään hyväksi rekuperattorissa. Rekuperattorissa tapahtuva lämpötilan lasku on merkittävä ja samaa luokkaa turbiinin kanssa. Lauhduttimeen saapuva tolueeni on tulistunutta ja se lauhtuu kyläiseen tilaan. Kyläisen kiertoineen paine nostetaan syöttöpumpussa ja kiertoinetta esilämmitetään kattilaa varten rekuperattorissa. Prosessi on havainnollistettu liitteessä I olevaan tolueenin log p,h -piirroksen.

Kappaleessa 2 määritetyn kaukolämpötehon avulla lasketaan tarvittavan massavirta prosessissa yhtälön 4.5 avulla. Massavirran ja tilapisteiden avulla määritetään jokaisen voimalaitoskomponentin teho yhtälön 4.5 mukaisesti. Taulukossa 4.5 esitetään molemmille prosesseille määritetyt kiertoineiden massavirrat, komponenttien tehot ja polttoaineen kulutus.

Taulukko 4.5. Rankine- ja ORC-prosesseista lasketut massavirrat ja tehot.

		Rankine	ORC	
Kiertoineen massavirta	$q_{m,k}$	0,12	0,67	kg/s
Lauhduttimen lämpöteho	Φ_{lauh}	300	300	kW
Turbiinin akseliteho	P_t	53,8	79,4	kW
Generattorin sähköteho	P_g	51,7	76,3	kW
Pumpun sähköteho	P_p	0,66	3,23	kW
Kattilan lämpöteho	Φ_k	353	376	kW
Polttoaineteho	Φ_{pa}	416	443	kW
Polttoaineen massavirta	$q_{m,pa}$	93,5	99,6	kg/h

Taulukosta 4.5 nähdään, että kiertoineen massavirta on ORC-prosessissa huomattavasti suurempi kuin vastaavan kokoluokan Rankine-prosessissa. Tuotettu sähköteho on kuitenkin suurempi, mutta niin on myös syöttöpumpun kuluttama teho. Prosessin vaatima polttoaineteho on hieman suurempi kuin Rankine-prosessilla ja vastaavasti

polttoainetta kuluu enemmän. Kappaleessa 2 määritettiin vuotuiseksi lämmitysenergian tarpeeksi 1100 MWh ja tästä voidaan laskea huipunkäyttöajaksi noin 3700 h. Tällä huipunkäyttöajalla polttoainetta kuluisi noin 340 – 370 tonnia vuodessa. Lasketuista tehoista voidaan määrittää laitoksen sähkön-, lämmön- ja yhteistuotannon hyötysuhteet. Hyötysuhteet lasketaan yhtälöllä

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{el}} + \eta_{\text{th}} = \frac{P_{\text{el}}}{\Phi_{\text{pa}}} + \frac{\Phi_{\text{lauh}}}{\Phi_{\text{pa}}} \quad (4.7)$$

missä	η_{tot}	yhteistuotannon hyötysuhde	[-]
	η_{el}	sähköntuotannon hyötysuhde	[-]
	η_{th}	lämmöntuotannon hyötysuhde	[-]
	P_{el}	sähköteho	[kW]
	Φ_{pa}	polttoaineteho	[kW]

Hyötysuhteiden laskennassa on otettu huomioon laitoksen omakäyttöteho, joka on Triogenin mukaan ORC-järjestelmälle 5 kW. Rankine-prosessille käytetään omakäyttöhyötysuhteena 95 %:ia. Yhtälöllä 4.7 lasketut hyötysuhteet esitetään taulukossa 4.6

Taulukko 4.6. Rankine- ja ORC-prosessin hyötysuhteita.

Prosessi	Sähköntuotannon	Lämmöntuotannon	Yhteistuotannon
	hyötysuhde	hyötysuhde	hyötysuhde
	η_{el} [%]	η_{th} [%]	η_{tot} [%]
Rankine	12	72	84
ORC	16	68	84

Taulukosta 4.6 nähdään, että Rankine-prosessi tuottaa tehokkaammin lämpöä ja ORC-prosessi tuottaa sähköä paremmalla hyötysuhteella. Yhteistuotannon hyötysuhde on sama molemmilla prosesseilla. Laskennassa ei ole otettu huomioon todellisissa prosesseissa esiintyviä paine- ja lämpöhäviöitä, jotka pienentäisivät molempien laitoksien hyötysuhteita.

5 KANNATTAVUUDEN TARKASTELU

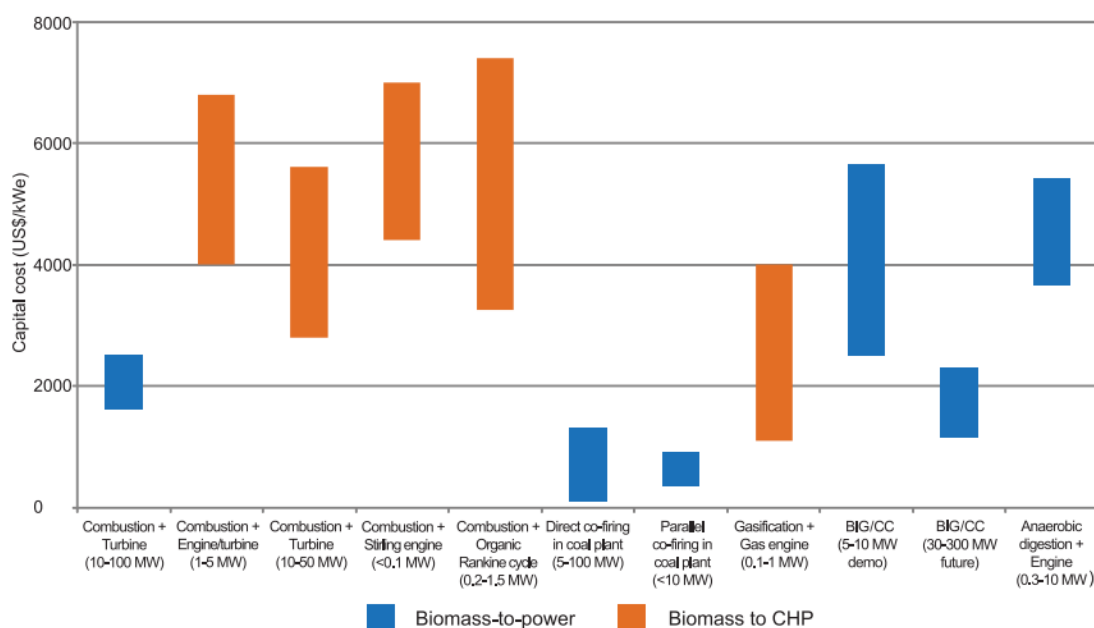
Voimalaitosinvestoinnin kannattavuuden määrittämiseksi tarkastellaan investoinnista koituvia kustannuksista ja tuloja. Kustannukset muodostuvat investoinnin rahoituksen sekä huolto ja käyttö aiheuttamista kuluista. Lisäksi yhteistuotannossa syntyvän sähkön myynnistä verkkoyhtiö veloittaa siirtomaksua, mikä lasketaan kuluihin. Polttoaineen tuotannon ja käsittelyn ei oleteta aiheuttavan ylimääräisiä kustannuksia. Voimalaitoksen tulot muodostuvat kaukolämpöenergian korvaamisesta omalla tuotannolla sekä sähkö- ja lämpöenergian tuotantotuesta.

Suomessa tuotantotukea maksetaan uusiutuvilla energialähteillä toimiville metsähake-, tuuli-, biokaasu- ja puupolttoainevoimaloille. Tuki maksetaan tuotetulle sähköenergialle, mutta hyötykäyttöön menevästä lämpöenergiasta on mahdollisuus saada lisätukea. Suunniteltu voimalaitos käyttää puuperäistä polttoainetta, joten luetaan puupolttoainevoimaloihin. Tukea voi hakea voimala, joka on täysin uusi, sen sähköntuotannon nimellisteho on vähintään 0,1 MVA ja puupolttoainevoimalaitoksen pitää tuottaa lämpöä hyötykäyttöön 50 %:n hyötysuhteella. Lisäehtona on, että voimala ei ole saanut aikaisempaa valtiontukea esimerkiksi suoran rahallisen avustuksen tai verohuojennuksen muodossa. Perustuki on sähkön hinnalle 83,5 €/MWh:n ja markkinahinnan erotus. Lisätuki on puupolttoainevoimalalle 20 €/MWh lämpöpremio. Lämpöpremiota maksetaan voimalaitoksen hyötylämmöstä, johon kuuluu esimerkiksi kaukolämpö- tai prosessihöyryverkkoon luovutettu lämpö. Kaikesta voimalaitoksen tuottamasta hyötylämmöstä maksetaan tuen mukaisesti, mutta perustuessa omakäyttösähköstä ei makseta tukea. Tukea maksetaan korkeintaan kahdentoista vuoden ajan. (Finlex 1396/2010)

Mitoitettava voimalaitoksen nimellinen sähköteho on asetettu molemmilla prosesseilla niin, että tuen piiriin pääseminen olisi mahdollista. Lisäksi edellä laskettu voimalaitoksen hyötysuhde on tarpeeksi suuri, että se täyttää tuelle asetetut vaatimukset. On tärkeää, että voimala täyttää kaikki vaatimukset, sillä tuotantotuki on kannattavuuden kannalta merkittävässä roolissa.

Voimalaitoksen kustannuksia on arvioitu IEA:n (International Energy Agency) julkaisuiden tiedoista. Investointi, käyttö- ja huoltokustannukset arvioidaan saman

tyyppisistä laitoksista kuin suunnitteilla olevat. Tehtävää vaikeuttaa useiden maiden ja erilaisten kohteiden välillä tapahtuva vaihtelu. Suunniteltavan voimalaitoksen ominaiskustannukset nousevat korkeiksi pienen kokoluokkansa vuoksi. Ominaiskustannukset molemmille prosesseille arvioidaan kuvasta 5.1.



Kuva 5.1. Biomassalla toimivien voimalaitosten ominaiskustannukset. (IEA Bioenergy 2009, 30)

Kuvassa 5.1. ominaiskustannukset ilmoitetaan Yhdysvaltojen dollareina sähkötehoa kohti. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa käytettävän Rankine-prosessin ominaiskustannus luetaan kuvan 5.1 toisesta sarakkeesta ja ORC-prosessin kustannukset viidennestä sarakkeesta. Pienen kokoluokan tapauksessa ominaiskustannuksiksi valitaan 6500 \$/kWe Rankine-prosessille ja 7000 \$/kWe ORC-prosessille. Investoinnin kustannus saadaan kertomalla ominaiskustannus laitoksen nimellisellä sähköteholla ja dollarit muutetaan euroiksi käyttämällä julkaisuvuoden euron ja dollarin välistä keskimääräistä vaihtokurssia (Suomen pankki 2017.) Käyttö- ja huoltokustannukset arvioidaan olevan 40 \$/MWh kiinteää biomassaa käyttävissä voimalaitoksissa (IEA 2013, 56–57). Käytön ja huollon vuosikustannus saadaan kertomalla ominaiskustannus sähkön vuosituotannolla ja vuoden 2013 keskimääräisellä vaihtokurssilla. Taulukkoon 5.1 kootaan kustannusarviossa käytettävät parametrit.

Taulukko 5.1. Kannattavuuslaskennassa tarvittavat tiedot.

		Rankine	ORC
Vaihtokurssi 2009	€/€	0,72	0,72
Vaihtokurssi 2013	€/€	0,75	0,75
Huipunkäyttöaika	h	3700	3700
Lämmön vuosituotanto	MWh/a	1100	1100
Sähkön vuosituotanto	MWh/a	182	264
Investointi	€	699 794	728 504
Käyttö ja huolto	€/a	5472	7941
Siirtomaksu	€/a	127	185
Perustuki	€/a	15 172	22 016
Lisätuki	€/a	22 000	22 000
Kaukolämpö, kiinteä	€/a	16 177	16 177
Kaukolämpö, energia	€/a	71 801	71 801
Sähkön myynti	€/a	5451	7910

Taulukossa 5.1 eritellään eri lähteistä syntyvät kustannukset ja tulot. Kuvasta 2.1 arvioidaan keskimääräinen lämpöenergiatarve vuositasona. Siitä lasketaan huipunkäyttöaika maksimilämpöteholla ja aikaisemmin lasketusta sähkötehosta saadaan tuotettu sähköenergia vuodessa. Käyttö-, huolto- ja siirtomaksut määräytyvät sähköntuotannon perusteella. Siirtomaksua sähkönsiirtoyhtiöt perivät verkkoon tuotetusta sähköstä 0,07 snt/kWh (Finlex 65/2009). Perustuki lasketaan sähkövuosituotannon ja sähkölle asetetun takuuhinnan avulla sekä lisätuki lasketaan lämpöpreemiosta ja lämmöntuotannosta. Kaukolämmön kulutuksesta aiheutuvat kustannukset on saatu yritykseltä ja energiaan pohjautuva kustannus on laskettu arvioidun lämpöenergiatarpeen avulla. Sähkön myynti edustaa tuottoa, joka myydystä sähköstä saataisiin ilman tuotantotukea, olettaen sähkön hinnaksi 30 €/MWh. Sähkön hinta on arvioitu energiaviraston tilastoimista markkinahintojen 3 kk:n keskiarvoista (Energiavirasto 2017).

Vuotuinen säästö saadaan laskemalla taulukossa 5.1 olevat rahavirrat yhteen niin, että käyttö ja huolto, siirtomaksu ja kaukolämmön kiinteä maksu merkitään negatiivisena taseeseen. Loput termit ovat positiivisia ja tällöin saadaan tuotantotuetuksi säästöksi

Rankinella 87 197 €/a ja ORC:lla 93 984 €/a. ORC:llä korkeampi sähköntuotanto nostaa perustukea ja sitä kautta kasvattaa säästöjä. Ilman tuotantotukea ja tavallisella sähkönmyynnillä saadaan tuloksiksi Rankinella 55 476 €/a ja ORC:lla 57 878 €/a. Hankkeen kannattavuutta arvioidaan nykyarvomenetelmällä yhtälöllä

$$NA = \sum_{t=1}^n \frac{S}{(1+r)^t} - I \quad (5.1)$$

missä	NA	nykyarvo	[€]
	S	vuosittainen säästö	[€/a]
	t	pitoaika	[a]
	r	laskentakorko	[-]
	I	investointi	[€]

Mikäli nykyarvoksi tulee positiivinen arvo, on hanke tällöin kannattava. Pitoaikana käytetään 20 vuotta ja korkokantana 5 %:a. Laskennassa oletetaan, että 12 ensimmäistä vuotta voimalaitos saa tuotantotukea ja loput pitoajasta sähköä myydään markkinahintaa. Voimalaitoksen jäännösarvoksi oletetaan 0 €. Nettokassavirta Rankine-prosessille on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2. Rankine-prosessin kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta.

Vuosi	Investointi	Nettosäästö	Diskonttaus tekijä	Säästön nykyarvo	Kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta
a	€	€/a		€/a	€
0	699 794				-699 794
1		87 197	0,9524	83 044	-616 750
2		87 197	0,9070	79 090	-537 660
3		87 197	0,8638	75 324	-462 336
4		87 197	0,8227	71 737	-390 600
5		87 197	0,7835	68 321	-322 279
6		87 197	0,7462	65 067	-257 211
7		87 197	0,7107	61 969	-195 242
8		87 197	0,6768	59 018	-136 224
9		87 197	0,6446	56 208	-80 017
10		87 197	0,6139	53 531	-26 486
11		87 197	0,5847	50 982	24 496
12		87 197	0,5568	48 554	73 051
13		55 476	0,5303	29 420	102 471
14		55 476	0,5051	28 019	130 490
15		55 476	0,4810	26 685	157 175
16		55 476	0,4581	25 414	182 589
17		55 476	0,4363	24 204	206 793
18		55 476	0,4155	23 051	229 844
19		55 476	0,3957	21 954	251 798
20		55 476	0,3769	20 908	272 706

Taulukosta 5.2 nähdään, että nykyarvo on positiivinen pitoajan lopussa, joten hanke on kannattava. Sisäiseksi koroksi saadaan 9,7 %:a ja korolliseksi takaisinmaksuajaksi 10,5 vuotta. Ilman tuotantotukea Rankine investoinnin nykyarvo olisi pitoajan lopussa -8443 €, eikä hanke olisi tällöin kannattava. Taulukossa 5.3 esitetään ORC-prosessin nettokassavirta.

Taulukko 5.3. ORC-prosessin kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta.

Vuosi	Investointi	Nettosäästö	Diskonttaus tekijä	Säästön nykyarvo	Kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta
a	€	€/a		€/a	€
0	728 504				-728 504
1		93 984	0,9524	89 508	-638 995
2		93 984	0,9070	85 246	-553 749
3		93 984	0,8638	81 187	-472 563
4		93 984	0,8227	77 321	-395 242
5		93 984	0,7835	73 639	-321 603
6		93 984	0,7462	70 132	-251 471
7		93 984	0,7107	66 793	-184 678
8		93 984	0,6768	63 612	-121 066
9		93 984	0,6446	60 583	-60 484
10		93 984	0,6139	57 698	-2786
11		93 984	0,5847	54 950	52 165
12		93 984	0,5568	52 334	104 498
13		57 878	0,5303	30 694	135 192
14		57 878	0,5051	29 232	164 424
15		57 878	0,4810	27 840	192 264
16		57 878	0,4581	26 514	218 779
17		57 878	0,4363	25 252	244 030
18		57 878	0,4155	24 049	268 080
19		57 878	0,3957	22 904	290 984
20		57 878	0,3769	21 813	312 797

Taulukosta 5.3 nähdään, että ORC-prosessin nykyarvo on positiivinen ja vielä suurempi kuin Rankinella. Myös sisäinen korko on hieman suurempi, 10,2 %:a, ja korollinen takaisinmaksuaika on lyhyempi, 10,1 vuotta. Vaikka ORC:n investointikustannukset olivat suuremmat, saadaan suuremmalla sähköntuotannolla hankkeesta kannattavampi. Ilman tuotantotukea ORC investoinnin nykyarvo olisi pitoajan lopussa -7221 €:a, eikä hanke olisi tällöin kannattava.

Laskennassa käytetyt kustannusarviot ovat lähinnä suuntaa-antavia ja tapauskohtaisesti ne voivat vaihdella merkittävästi, varsinkin ominaiskustannukset investoinnissa, käytössä ja huollossa. Lisäksi jotkut lähteet ovat melko vanhoja ja laitteiden kehittyessä sekä tuotantomäärien kasvaessa kustannukset tippuvat. Tämä edistäisi hankkeen kannattavuutta vielä enemmän.

Investointilaskennan epävarmuuden vuoksi suoritetaan herkkyyssanalyysi viidelle muuttujalle. Investointia, sähkön hintaa, korkokantaa, pitoaikaa sekä käyttö- ja huoltokustannuksia muutetaan 20 %:a epäedullisempaan suuntaan perustilanteeseen nähden. Tällöin investointi, käyttö- ja huoltomaksut sekä korkokanta kasvavat. Sähkön hintaa alennetaan ja pitoaikaa lyhennetään. Näillä muutoksilla laskettuja tuloksia vertaillaan perustilanteeseen ja selvitetään muuttujat, jotka vaikuttavat voimakkaimmin kannattavuuteen. Herkkyyssanalyysin tulokset esitetään taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4. Herkkyyssanalyysin tulokset viidellä eri muuttujalla.

Perustilanne	Rankine	ORC	
Nykyarvo	272 706	312 797	€
Takaisinmaksuaika	10,5	10,1	a
Sisäinen korko	9,7	10,2	%
Investointi +20 %	Rankine	ORC	
Nykyarvo	132 747	167 097	€
Takaisinmaksuaika	14,4	13,4	a
Sisäinen korko	7	7,4	%
Sähkönhintaa 24 €/MWh	Rankine	ORC	
Nykyarvo	220 470	236 995	€
Takaisinmaksuaika	11,5	11,3	a
Sisäinen korko	8,8	9,0	%
Käyttö ja Huolto +20 %	Rankine	ORC	
Nykyarvo	259 067	299 158	€
Takaisinmaksuaika	10,7	10,2	a
Sisäinen korko	9,5	10,0	%
Korkokanta 6 %	Rankine	ORC	
Nykyarvo	202 451	238 056	€
Takaisinmaksuaika	11,3	10,7	a
Sisäinen korko	9,7	10,2	%
Pitoaika 16 a	Rankine	ORC	
Nykyarvo	182 589	218 779	€
Takaisinmaksuaika	10,5	10,1	a
Sisäinen korko	8,7	9,3	%

Taulukossa 5.4 muutokset kannattavuuteen esitetään kolmen yleisen tunnusluvun nykyarvon, takaisinmaksuajan ja sisäisen koron avulla. Taulukosta 5.4 nähdään, että investoinnin hinnalla on suurin vaikutus hankkeen kannattavuuteen. Molemmilla

prosesseilla nykyarvo putoaa 20 vuoden pitoajalla noin 140 000 €:a, takaisinmaksuaika pitenee useilla vuosilla ja sisäinen korko putoaa lähes kolme prosenttiyksikköä. Kannattavuuslaskennassa kannattaa siis perehtyä erityisen tarkkaan investoinnin arviointiin. Sähkön hinnan vaikutuksessa tulee huomioida tuotantotukilakiin kirjattu ehto, jolla tuotanto tukea vähennetään 30 €:lla, mikäli sähkön hinta laskee alle 30 €/MWh:lta.

6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli mitoittaa sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos yhdelle puunjalostusteollisuuden yritykselle. Mitoitus perustui yrityksen antamiin tietoihin kaukolämmityksestä ja käytettävissä olevasta biomassasta.

Kohteeseen suunniteltavalle voimalaitokselle esitettiin kaksi mahdollista toteutustapaa, Rankine- ja ORC-prosessi. Mitoitus suoritettiin laskennallisesti määrittämällä tilapisteet molemmille prosesseille. Laskennassa hyödynnettiin voimalaitoskomponenttien kaupallisten valmistajien tarjoamia laitteiden toiminta-arvoja. Mitoituksen rajoittavina tekijöinä olivat haluttu lämmitysteho ja kiertoaineen lauhtumislämpötila kaukolämpövaihtimessa. Laskennassa selvitettiin prosessien tilapisteet komponenttien toiminta-arvojen ja lauhtumislämpötilan avulla. Tämän jälkeen massavirta selvitettiin mitoitettavan maksimilämpötehon mukaan. Massavirran ja tilapisteiden avulla voitiin määrittää jokaiselle komponentille teho. Lisäksi lasketuista tehoista muodostettiin prosessille erilliset sähkön- ja lämmöntuotanto sekä yhteistuotannon hyötysuhteet.

Tuloksiksi saatiin, että ORC-prosessi tuottaa tehokkaammin sähköä, mutta kuluttaa myös hieman enemmän polttoainetta. Polttoaineen kulutukset olivat Rankinelle 346 tonnia ja ORC:lle 368 tonnia vuodessa. Molemmat prosessit käyttäisivät noin 8 %:a kaikesta tehtaalla vuoden aikana syntyvästä biomassasta.

Voimalaitosinvestoinnin kannattavuutta tarkasteltiin IEA:n tuottamien julkaisuiden perusteella. Laskelmia varten määritettiin hankkeelle ominaisinvestointi, käyttö- ja huoltokustannukset, korkokanta sekä pitoaika. Kannattavuuslaskelmissa huomioitiin myös puupolttoainelaitoksille myönnettävä tuotantotuki niin sähkölle kuin lämmölle. Laskennassa tarvittava huipunkäyttöaika arvioitiin vuotuisen lämmitystarpeen perusteella. Kannattavuutta tarkasteltiin nykyarvon, sisäisen korkokannan ja takaisinmaksuajan perusteella. Näiden lukujen mukaan ORC-laitos olisi kannattavampi vaihtoehto, mikäli sähkön tuotantotukea voidaan hyödyntää mahdollisimman paljon.

Investointilaskelmiin liittyy aina epävarmuutta ja laskennan muuttujien vaikutuksen arvioimiseksi suoritettiin herkkyyshanalyysi. Tarkasteltavina tekijöinä olivat investointi, sähkön hinta, käyttö- ja huoltokustannukset, korkokanta sekä pitoaika. Näistä

merkittävimmin laskelmiin vaikutti investoinnin suuruus. Lisähuomiona todettiin, että sähkön hinnan lasku vaikuttaa alhaisilla hinnoilla maksettavan tuen määrään ja sitä kautta melko paljon myös kannattavuuteen.

LÄHDELUETTELO

Alakangas Eija et al. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 229 s. VTT Technology 258. ISBN 978-951-38-8419-2

Energiavirasto. 2017. Markkinahintojen keskiarvot. [www-sivu] [viitattu 3.5.2017]
Saatavissa: <https://tuotantotuki.emvi.fi/MarketPrice>

Finlex 65/2009. 2009. Valtioneuvoston asetus sähkömarkkinoista. [viitattu 8.4.2017]
Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090065>

Finlex 1396/2010. 2010. Lakiuusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. [viitattu 8.4.2017] Saatavissa:
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20101396?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=1396%2F2010#Pidp1856976>

Frigolo Stefano et al. 2014. Small-Scale Wood-Fuelled CHP Plants: a Comparative Evaluation of the Available Technologies. Chemical Engineering Transactions, 2014 vol 37. Italia: AIDIC. 847-852. ISBN 978-88-95608-28-0.

Huttunen Riku. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriö. 119. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. [viitattu: 13.3.2017] Saatavissa:
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6>

IEA. 2015. Projected costs of generating electricity. [verkkodokumentti] [viitattu 5.4.2017] Saatavissa: <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>

IEA Bioenergy. 2009. Bioenergy a sustainable and reliable energy source. [verkkodokumentti] [viitattu 5.4.2017] Saatavissa: <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/MAIN-REPORT-Bioenergy-a-sustainable-and-reliable-energy-source.-A-review-of-status-and-prospects.pdf>

Jyväskylän Energia. 2017. Kaukolämpölaitteiden seuranta- ja käyttöohjeita. [verkkodokumentti] [viitattu 31.3.2017] Saatavissa: <http://www.jyvaskylanenergia.fi/filebank/210-kaukolampolaitteidenopas.pdf>

Kohlbach. 2017. Product brochure. [verkkodokumentti] [viitattu 1.4.2017] Saatavissa: <http://www.innasol.com/wp-content/uploads/2016/12/Kohlbach-product-brochure.pdf>

Steamturbo. 2013. [www-sivu] [viitattu 1.4.2017] Saatavissa: <http://www.steamturbo.com/steam-turbines/tr-100-6.html>

Suomenpankki. 2017. Valuuttakurssit vuodesta 2008. [www-sivu] [viitattu 8.4.2017] Saatavissa: <https://www.suomenpankki.fi/fi/Tilastot/valuuttakurssit/taulukot/>

SVT, Suomen virallinen tilasto. 2015. Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkojulkaisu]. ISSN 1798-5072. 2015, Liitetaulukko 1. Sähkön ja lämmön tuotanto tuotantomuodoittain ja polttoaineittain vuonna 2015. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 13.3.2017]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatuo/2015/salatuo_2015_2016-11-02_tau_001_fi.html

Triogen. 2016a. Lämmöstä sähköksi. [verkkodokumentti] [viitattu 1.4.2017] Saatavissa: http://www.triogen.nl/upload/files/20161018_Triogen_Broschuere_A4_finnish_03_RZ_WEB.pdf

Triogen. 2016b. Specification: Biomass application. [verkkodokumentti] [viitattu 1.4.2017] Saatavissa: <http://www.triogen.nl/upload/files/productflyer%20WB-1%20Biomass%20application.pdf>

LIITE I TOLUEENIN LOG P, H-PIIRROS

