



Joonas Anttila

## **Teknis-taloudellinen soveltuvuusarviointi pienen kokoluokan siirrettävälle yhteistuotantovoimalaitokselle jätteenpoltossa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 04.06.2017

Valvoja: Professori Risto Lahdelma

Ohjaajat: DI Esa Ekholm, DI Antti Nikkanen

---

**Tekijä** Joonas Anttila

---

**Työn nimi** Teknis-taloudellinen soveltuvuusarviointi pienen kokoluokan siirrettävälle yhteistuotantovoimalaitokselle jätteenpoltossa

---

**Koulutusohjelma** Energia- ja LVI-tekniikan koulutusohjelma

---

**Pääaine** Energiatekniikka**Koodi** K3007

---

**Työn valvoja** Prof. Risto Lahdelma

---

**Työn ohjaajat** DI Esa Ekholm, DI Antti Nikkanen

---

**Päivämäärä** 04.06.2017**Sivumäärä** 88 + 16**Kieli** Suomi

---

### Tiivistelmä

Maailmalla on kasvava jäteongelma. Tämän diplomityön tarkoitus on selvittää, kannattaako Ferroplan Oy:n kehittää uutta jätteenpolttokonseptia hajautettuun energiatuotantoon ja paikallisten jäteongelmien ratkaisuksi. Tavoitteena on polttaa jätteet ja tuottaa samalla sähköä ja lämpöä yhteistuotannolla. Tässä työssä selvitetään, onko tällainen uusi konsepti teknisesti mahdollista toteuttaa, ja onko se taloudellisesti kannattava Suomessa. Työssä simuloidaan kannattavuuslaskennan menetelmin uuden konseptin soveltuvuutta eri asiakasryhmille. Lisäksi tutkitaan, löytyykö markkinoilta soveltuvaa teknologiaa konseptin toteuttamiseksi. Kirjallisuusselvityksen ja tarjouskyselyjen mukaan haasteita voi tulla löytää sopiva arinapolttolaite pienen kokoluokan jätteenpolttoon ja sopiva höyryä tuottava lämmöntalteenottokattila. Muun tekniikan osalta uusi konsepti on mahdollista toteuttaa Suomessa kohtuullisin kustannuksin. Kannattavuuslaskelma ja herkkyystarkastelut osoittivat, että hajautettu jätteenpolttoon perustuva sähkön ja lämmön yhteistuotanto voi olla kannattavaa liiketoimintaa. Tämän työn tulosten pohjalta on mahdollisuus kehittää uusi voimalaitoskonsepti kannattavaksi liiketoiminnaksi, kun potentiaalisille asiakkaille pystytään perustelemaan investoinnin kannattavuus.

---

**Avainsanat** jätteenpoltto, yhteistuotanto, energiatalous

---



---

**Author** Joonas Anttila

---

**Title of thesis** Techno-economic feasibility study for mobile small scale combined heat and power incineration plant

---

**Degree programme** Energy and HVAC-Technology

---

**Major** Energy technology

---

**Code of professorship** K3007

---

**Thesis supervisor** Prof. Risto Lahdelma

---

**Thesis advisors** M.Sc. (Eng.) Esa Ekholm, M.Sc. (Eng.) Antti Nikkanen

---

**Date** 04.06.2017

---

**Number of pages** 88 + 16

---

**Language** Finnish

---

### **Abstract**

The waste problem in the world is rising. Company in case, the Ferroplan Oy want's to develop a new waste incineration concept. This Master's thesis purpose is to evaluate, if there is a good cause to develop a new waste incineration concept, to answer the waste problems locally. The object is to incinerate different kind of waste and produce energy as decentralized solution. In this thesis it was examined, if this kind of new concept has a technical feasibility and profitability. The profitability analysis was done by calculation simulations for various customer cases. Also the technology availability for the main equipment was investigated from market. Availability of the grate furnace and steam producing waste heat recovery boiler might be a challenge. Other main equipment's for the small scale combined heat and power plant are mature technology. According to the literature survey and the quotations made for the main equipment delivering companies, the new concept is possible to implement in Finland with reasonable investment cost. Profitability study and sensitive analysis indicate that small scale incineration based on the combined heat and power production can be a profitable economic activity. This study can be a platform for developing a new power plant concept for profitable business as the reason for the investment can be demonstrated for potential customers.

---

**Keywords** incineration, combined heat and power, energy economy

---

## Alkusanat

*Tämä työ on tehty osana Ferroplan Oy:n kehitysprojektia, jossa jätteitä halutaan hyödyntää energialähteenä eri sovelluksissa. Idea pienen kokoluokan jätteenpolttolaitoksesta hajautettuun energiatuotantoon oli kypsynyt jo useamman vuoden yhtiön johtoportaan ennen kuin päätettiin uuden voimalaitoskonseptin suunnittelun aloittamisesta. Projektin aloittamiseksi tarvittiin kuitenkin laaja soveltuvuustutkimus, jotta voitaisiin arvioida olisiko laitoksen toteuttaminen teknisesti edes mahdollista, ja olisiko se taloudellisesti kannattava. Tämä diplomityö aloitettiin asian selvittämiseksi.*

*Erityiskiitokset työn aikaansaamiseksi ansaitsevat Pentti Patosalmi, Esa Ekholm, Antti Nikkanen ja Risto Lahdelma.*

Espoo 04.06.2017

*Joonas Anttila*

Joonas Anttila

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Lyhenteet ja käsitteet

Yksiköt

1	Johdanto .....	1
1.1	Kohdeyritys .....	1
1.2	Taustaa ja lähtökohdat .....	1
1.3	Tavoitteet ja rajaus .....	2
2	Jätteestä energiaa pien-CHP -jätteenpolttolaitoksella .....	4
2.1	Jätteiden energiahyötykäyttö Suomessa .....	8
2.2	Jätteiden terminen reformointitekniikka .....	11
2.3	Jätteenpoltossa huomioitavat EU:n direktiivit ja Suomen lainsäädäntö .....	13
2.4	Konseptisuunnittelusta .....	18
2.5	Pien-CHP -jätteenpolttolaitokseen soveltuva teknologia .....	19
2.5.1	Arinapolttotekniikka ja jätepolttoaineet .....	19
2.5.2	Höyryvoimaprozessi .....	25
2.5.3	Höyrykattilatekniikka .....	29
2.5.4	Pienten höyryturbiinien tekniikasta .....	32
2.5.5	Päästöt ja niiden hallinta .....	34
2.5.6	Pien-CHP -jätteenpolttolaitoksen konttiin asentamisesta .....	39
3	Teknistaloudelliset tutkimusmenetelmät .....	42
3.1	Taloudelliset arviointimenetelmät .....	43
3.1.1	Pääkomponenttien saatavuus, valmistajat ja hinnat .....	43
3.1.2	Yhteistuotantolaitoksen kustannukset .....	43
3.1.3	Lainsäädännön vaikutus voimalaitoksen kustannuksiin .....	44
3.1.4	Voimalaitosinvestoinnin kannattavuuden tarkastelu .....	45
4	Uusi voimalaitoskonsepti .....	49
4.1	Tekninen toteutettavuus ja soveltuvuus .....	52
4.1.1	Suunnitellut polttoaineet .....	53
4.1.2	Polttoprosessin tekniset arvot .....	53
4.1.3	Höyryvoimaprozessin tekniset arvot .....	54
4.2	Jätteenpolttolaitoksen laitteiden valmistajat ja saatavuus .....	54
4.2.1	Arina-höyrykattila -systemit .....	54
4.2.2	Höyryturbiinit .....	59
4.2.3	Savukaasujen puhdistusjärjestelmä .....	61
4.2.4	Savukaasujen mittausjärjestelmät .....	62
4.2.5	Merikontit .....	63
4.3	Asiakassegmentit kannattavuuslaskennan pohjana .....	64
4.3.1	Yhdyskunta-asiakas .....	64
4.3.2	Teollisuusasiakas .....	65
4.3.3	Maatalousasiakas .....	66
4.4	Talousarvio .....	66
4.4.1	Voimalaitoksen budjetointi ja pääkomponenttien valinta .....	69
4.4.2	Investointilaskelma .....	70
4.4.3	Kannattavuuslaskennan tulokset .....	72
4.4.4	Herkkyystarkastelun tulokset .....	72
5	Virhe- ja luotettavuusarviointia .....	76
5.1	Kirjallisten ja verkkolähteiden arviointia .....	76

5.2 Laskelmat.....	76
6 Johtopäätökset.....	78
Lähdeluettelo .....	80
Liiteluettelo	
Liite 1. Ilmaan joutuvien päästöjen raja-arvot jätteenpoltossa	
Liite 2. Arinakattilaan sovellettavia teknisiä laskentakaavoja	
Liite 3. Jätepolttoaineiden ominaisuuksia	
Liite 4. Polttoaineen lämpöarvojen laskentakaavoja	
Liite 5. Polttokelpoisia jätteitä Tilastokeskuksen luokituksen mukaan	
Liite 6. Kaukolämmön tehon laskentakaava	
Liite 7. Höyryvoimaproessin teknisiä laskentakaavoja	
Liite 8. Höyryturbiinin teknisiä laskentakaavoja	
Liite 9. Kustannus- ja kannattavuuslaskennan kaavoja	

## Lyhenteet ja käsitteet

AG	osakeyhtiö, saksalainen lyhenne
AS	osakeyhtiö, tanskalainen lyhenne, myös A/S
BAT	eng. Best Available Technology, paras käytettävissä oleva tekniikka
CF	eng. Cash Flow, kassavirta
CFD	eng. Computational Fluid Dynamics, tietokoneavusteinen virtauslaskenta
CHP	eng. Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
EEA	eng. European Environment Agency, Euroopan Ympäristö keskus
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
EN	Euroopassa vahvistettu standardi
EU	Euroopan Unioni
EUVL	Euroopan Unionin Virallinen Lehti
EY	Euroopan Yhteisöt, on nykyään Euroopan Unioni
FTIR	eng. Fourier Transform Infrared Spectroscopy, valon si- rantaan perustuva partikkelien tunnistustekniikka
HC	eng. High Cube, tavallista korkeampi merikontti
HRSG	eng. Heat Recovery Steam Generator
ISO	eng. International Organization for Standardization
JLY	Jätelaitosyhdistys
MSW	eng. Municipal Solid Waste
NPV	eng. Net Present Value
NTP-olosuhteet	eng. Normal Temperature and Pressure, aineen standarditila sovitussa lämpötilassa (20 °C) ja paineessa (101,325 kPa)
OECD	lyhenne, eng. Organisation for Economic Co-operation and Development
Oy	suomalainen lyhenne, osakeyhtiö
PCCD / F	eng. polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans, monikloorautuneet dibentso-p-dioksiinit ja furaanit
PDF	eng. Package Derived Fuel
PV	eng. Present Value
RDF	eng. Refuse Derived Fuel
REF	eng. Recovered Fuel, vanhentunut termi
ROI	eng. Return Of Investment
SCR	eng. Selective Catalytic Reduction, typenoksidien vähen- nystekniikka
SFS-EN ISO	Suomessa, Euroopassa ja kansainvälisessä standardisoimis- järjestössä vahvistettu standardi
SFS-EN	Suomessa ja Euroopassa vahvistettu standardi
SIA	latvialainen lyhenne, osakeyhtiö
SNCR	eng. Selective Non-Catalytic Reduction, typenoksidien vähennystekniikka
SRF	eng. Solid Recovery Fuel
SST	eng. Single Stage Turbine, yksisiipipyöräinen turbiini
STG	eng. Steam Turbo Generator, höyryä voimalähteenä käyttävä turbo-generaattori
SVT	Suomen Virallinen Tilasto

SYKE	Suomen Ympäristökeskus
TEM	Työ- ja Elinkeinoministeriö
TEQ	eng. Total Equivalent Quantity
TKK	Teknillinen Korkeakoulu (nykyinen Aalto Yliopisto)
TOC	eng. Total Organic Carbon
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
WHB	eng. Waste Heat Boiler
WHRB	eng. Waste Heat Recovery Boiler
VNA	Valtioneuvoston Asetus
VTT	Valtion Tieteellinen Tutkimuskeskus
YK	Yhdistyneet Kansakunnat
Ab	osakeyhtiö, ruotsalainen lyhenne
Co.	lyhenne, eng. company
Elspot	Nord Pool Elspot -markkinat, seuraavan vuorokauden fyysiset sähkökaupat
Forwardi	sopimus myydä tai ostaa arvopaperi tiettyyn aikaan tänään sovittavalla hinnalla, sama kuin futuuri
Futuuri	arvopaperi, joka sitoudutaan ostamaan tai myymään tulevaisuudessa, sama kuin forwardi
GmbH	osakeyhtiö, saksalainen lyhenne
Inc.	eng. International company
Ltd.	osakeyhtiö eng. Limited company
Nord Pool	Pohjoismaiden ja Baltian maiden yhdessä omistama sähköpörssi
NO <sub>x</sub>	typen oksidit, sisältää sekä typpioksidia että typpidioksidia
Spot-aluehinta	tuntikohtainen sähkön aluehinta Nord Pool sähköpörssissä tietylle hinta-alueelle
Spot-hinta	tuntikohtainen sähkön hinta Nord Pool-sähköpörssissä
h,s –diagrammi	entalpia – entropia viuhkapiirros, josta voidaan esim. höyrylle lukea entalpia ja entropia eri lämpötiloissa ja paineissa
kpl	kappaletta
niche-markkinointi	markkinoilla keskitytään myymään tiettyä tuotetta tietylle osajoukolle
pilot-laitos	koeluontoinen laitos tai tutkimuslaitos
s.p.a	osakeyhtiö, italialainen lyhenne
§	pykälä, lakiteksteissä käytetty symboli



## Yksiköt

A	ampeeri, sähkövirran yksikkö
GWh	energian mittayksikkö, gigawattitunti
kV	kilovoltti, sähköverkon jännitteestä yleisesti käytetty mittayksikkö
kWe	sähkötehon yksikkö, alaindeksi e viittaa sähköön
kWh	kilowattitunti, energian yksikkö
MVA	megavoltiampeeri, sähkötekniikassa käytetty tehon yksikkö
Nm <sup>3</sup>	normikuutio, tilavuus NTP -olosuhteissa
P	teho, [W]
rpm	eng. rounds per minute, kierrosta minuutissa, kierrosnopeudesta käytetty yksikkö
t / h	tonnia tunnissa, massavirran yksikkö, tonni, t = 1000 kg
t	aika, esim. vuosia [a]
w-%	painoprosentti
40'	ilmaisee pituutta, 40 jalkaa pitkä, esim. merikontti 40 jalkaa on noin 12 m

### SI-mittayksikköjärjestelmän kerrannaisyksiköiden etuliitteitä

T	tera	10 <sup>12</sup>
G	giga	10 <sup>9</sup>
M	mega	10 <sup>6</sup>
k	kilo	10 <sup>3</sup>
h	hecto	10 <sup>2</sup>
da	deka	10 <sup>1</sup>
d	desi	10 <sup>-1</sup>
c	sentti	10 <sup>-2</sup>
m	milli	10 <sup>-3</sup>
μ	mikro	10 <sup>-6</sup>

# 1 Johdanto

Suurissa Euroopan kaupungeissa aloitettiin jätteenpolttolaitosten rakentaminen 1800-luvun lopulla kaupunkilaisten hygienian parantamiseksi (Vesanto 2006). Ensimmäinen jätteenpolttolaitos otettiin käyttöön Nottinghamissa Englannissa vuonna 1874, eikä savukaasujen haitoista tiedetty ennen vuotta 1980. (JLY 2016a.) Nykyään Euroopan Unioni (EU) asettaa jätteenpolttolaitosten tiukat päästöraja-arvot, jotka ovat heikentäneet kiinnostusta rakentaa pienen kokoluokan jätteenpolttolaitoksia, koska savukaasujen puhdistusjärjestelmät ovat nostaneet yksikkökustannuksia varsinkin pienen kokoluokan laitoksille.

## 1.1 Kohdeyritys

Ferroplan Oy on perinteisesti ollut konepajayhtiö, joka valmistaa materiaalin käsittely- ja kuljetusratkaisuja teollisuuden tarpeisiin. Yhtiön Orimattilassa sijaitsevassa päätoimipaikassa on suunnittelutoimisto sekä konepaja tuotantolinjoinen. Yhtiön liikevaihto on vaihdellut viidestä kymmeneen miljoonaan euroon viimeisen viiden vuoden aikana. Henkilöstöä on tällä hetkellä noin 50. Muutama vuosi sitten yhtiö hankki ympäristöliiketoimintaan erikoistuneen yhtiön. Lisäksi yhtiöllä on Latviassa tytäryritys, SIA Ferroplan.

Ferroplan Oy on laajentanut liiketoimintaansa ympäristötekniikan puolelle toimittamalla muun muassa jätteiden erottelu- ja kierrätyslaitoksia. Ympäristötekniikan liiketoimintaa tehdessä ovat asiakkaat usein kyselleet mahdollisuudesta polttaa ylijäänyttä jätteenkäsittelyrejektia samassa prosessissa jätteenkäsittelylinjastojen kanssa. Varsinkin Aasian kehittyvillä markkinoilla rejekti on ollut osa ongelmaa ja siellä kasvavista jätemääristä halutaan eroon. Polttokelpoinen rejekti ennemmin poltettaisiin hyödyksi kuin läjitettäisiin kaatopaikalle. Ferroplan Oy:ssä heräsikin ajatus pienen kokoluokan jätteenpolttolaitoksesta, jolla voitaisiin tehdä jätteenkäsittelylaitoksesta ainakin osaksi energiaomavarainen. Myöhemmin ajatusta laajennettiin sovellettavaksi muille marginaalisille polttoaineille hajautettuun energiatuotantoon ja niin sanotuksi moduulivoimalaitokseksi, joka olisi kontteihin koottu siirrettävyyden helpottamiseksi. Energiaa tuotettaisiin yhteistuotantona sähkön, lämmön, höyryn tai kylmän muodossa asiakkaiden tarpeisiin.

## 1.2 Taustaa ja lähtökohdat

Uusi konsepti tarjoaisi jätteenkäsittely-yhtiöille ja teollisuuslaitoksille mahdollisuuden päästä eroon erilaisista jätteistään tai hyödyntää sivuvirtoja ja näin ollen säästää niiden hävitys- ja käsittelykustannuksissa. Konseptille olisi mahdollista luoda liiketoimintamalli, jonka pohjana olisi useita erilaisia ansaintakeinoja. Ne muodostuisivat jätteen vastaanottotulosta, porttimaksujen säästöistä, energian omakäytösäästöistä tai energian myynnin tuloista tai jostakin niiden yhdistelmästä. Siten ansaintalogiikka eroaisi perinteisestä yhteistuotannosta.

Uuden konseptin tavoitteena olisi myös lähien energian hyödyntäminen. Laitosten päämarkkinat olisivat ulkomailla tai siellä, missä jätettä syntyy tai energiaa tarvitaan hajautetusti. Erittäin kiinnostavana nähdään sellaiset alueet, joissa on huono huoltovarmuus sähkön suhteen tai jätteen hävittämisestä joudutaan maksamaan porttimaksuja. Tällä diplomityöllä halutaan selvittää ensin kotimaan markkinoiden mahdollisuuksia.

Uudesta konseptista tulisi lopulta tuote asiakkaille. Pienen yhteistuotantolaitoksen asiakkaita voisivat olla esimerkiksi pienet syrjäiset metsä- tai maatalousyhdyskunnat tai teollisuuslaitokset, jotka voisivat polttaa omia tai koko teollisuusalueen jätteitä keskite-

tysti. Potentiaalisia asiakkaita olisivat myös esimerkiksi kehittyvien maiden suurempien kaupunkien taajamat, jotka voisivat tarvita hajautettua tuotantoa kuljetuskustannuksien kasvusta, paikallisen energiainfrastruktuurin puutteellisuudesta tai epäluotettavuudesta johtuen. Suuret maatilat tai pienemmät maatilat yhdessä voisivat hyödyntää maatalousjätteensä energiaksi. Myös erilaiset kriisialueet voisivat tarvita nopeasti asennettavaa voimantuotantoa. Tämä voisi avata mahdollisuuksia niin sanotuille leasing-sopimuslaitoksille. Eräs kasvava ongelma kehittyvissä ja kehitysmaissa on sairaalajätteen lisääntyminen ja asiaton hävittäminen. Uudella konseptilla halutaan parantaa myös näiden alueiden hygieenisyyttä.

Monien eri jätejakeiden hyödyntämiseen pyrittiin vastaamaan etsimällä markkinoilta sellainen monipolttoainekattila, jolla useat eri jätejakeet voitaisiin polttaa. Koska tällaista kattilaa ei löytynyt, päätettiin se suunnitella itse. Uuden voimalaitoskonseptin uskottavuuden parantamiseksi Ferroplan Oy rakentaa ”pilot” -laitoksen referenssiksi Orimattilaan, jotta uusi kattila ja muu tekniikka voitaisiin todentaa. Testit ja energiatuotanto aloitettaisiin oljella, jota on Orimattilan lähialueilta runsaasti saatavilla. Olki on maatalousjätettä, jolle on keksitty joitakin hyötykäyttökohteita, mutta viljelijät joutuvat usein jättämään sen pellolle, varastoon tai jotenkin muuten hävittämään. Etsittäessä markkinoilta sopivaa monipolttoainekattilaa huomattiin, että ainakin biomassalla toimivia kattilalaitoksia tarjottiin konttiratkaisuna aina 1 MW kokoluokkaan asti. Tähän kokoluokkaan uudella konseptilla ja testilaitoksellakin tähdättäisiin.

### **1.3 Tavoitteet ja rajaus**

Uuden konseptin nimenä käytetään tässä työssä termiä pien-CHP –laitos (eng. Combined heat and power), jolla tarkoitetaan pienen kokoluokan, nimellisteholtaan 1 MW, yhteistuotantolaitosta, joka tuottaa sekä sähköä että lämpöä. Ferroplan Oy oli päättänyt etukäteen, että tässä diplomityössä olisi tavoitteena tutkia höyryvoimaproessiin ja jätteenpolttoon perustuvan uuden konseptin kannattavuutta. Se rajaisi pitkälti työn koskemaan vain sähköä ja lämpöä tuottavan yhteistuotantolaitoksen prosesseja ja tekniikkaa. Kannattavuuden selvittämiseksi tehtiin kannattavuuden arviointia investointi- ja kannattavuuslaskennan menetelmin simuloimalla kolmea eri asiakasvaihtoehtoa Suomen olosuhteissa. Tavoitteena oli saada voimalaitoksen myyntihinnaksi noin 1 M € ja takaisinmaksuajaksi alle 6 vuotta. Kannattavuuslaskentaa varten tarvittiin tietoja energian hinnoista, polttoaineiden hinnoista sekä porttimaksuista.

Toinen tärkeä tavoite oli selvittää löytyisikö markkinoilta tekniikkaa uuden voimalaitoskonseptin toteuttamiseksi. Teknistä soveltuvuutta arvioitiin kirjallisuudesta ja laitevalmistajilta saatavien tietojen avulla. Näiden tietojen avulla uudelle konseptille suunniteltiin yksinkertaistettu voimalaitoksen prosessi- ja virtauskaavio, josta laskettiin voimalaitoksen teoreettisia suorituskykyarvoja. Näitä lähtötietoja käytettiin kannattavuuslaskennan pohjana.

Pieniä öljy- ja maakaasukattiloita on pitkään saatu siirrettävinä lämpökeskuksina, jotka voidaan rakentaa suoraan siirrettäviin ja helposti toimitettaviin merikontteihin. Erääksi uuden konseptin tavoitteeksi asetettiin suunnitella uusi pien-CHP –laitos siten, että sekin saataisiin mahtumaan merikontteihin. Siirrettävyydellä ja nopealla toimituksella voitaisiin erottua kilpailijoista.

Uusi pien-CHP –laitos vaatisi monipolttoainearinakattilan, jolla voitaisiin polttaa useita eri jätejakeita. Arinakattilan teho määräytyisi sen mukaan, minkä kokoinen saataisiin mahtumaan yhteen merikonttiin. Sähköntuotantoon tarvittaisiin höyryä tuottava jäte-

lämpökattila sekä pienen kokoluokan höyryturbiini. Savukaasut pitäisi puhdistaa EU – direktiivien vaatimalle tasolle, joten savukaasujen puhdistukseen tarvittaisiin vähintään kuiva savukaasujen puhdistusmenetelmä. Sen riittävyys selviäisi vasta käytännön polttokokein. Näillä oletuksilla lähdettiin kohdentamaan markkinoilta löytyviä valmistajia.

Voimalaitoksen pääkomponentit vaikuttaisivat suurelta osin koko laitoksen investointikustannukseen. Pääkomponenttien budjettihinnat sekä voimalaitoksen muut mahdolliset kustannukset selvitettiin lähettämällä tarjouskyselyjä toimittajille. Laitoksen budjetointia varten pääkomponenteista valittiin sopivimmat ja edullisimmat laitteet kullekin asiakasryhmälle.

Diplomityö aloittaa luvusta 2 kirjallisuusosiolla, jonka tarkoituksena on etsiä järkeviä perusteita uuden konseptin toteuttamiseksi. Ensin käydään läpi jätteenpolton nykytilannetta Suomessa sekä miten jätettä tällä hetkellä hyödynnetään energiana ja mitkä asiat siihen vaikuttavat. Luvussa 2 tarkastellaan myös kierrätyspolttoaineita, teollisuuden sivuvirtoja sekä maatalousjätteitä. Polttoainejakeiden tietoja tarvittaisiin myöhemmissä laskelmissa. Polttoainevaihtoehdoista puujäte ja lietteet jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, kuten myös jätteiden rinnakkaispoltto.

Koko 2. luvun taustatyön tarkoituksena on antaa taustatietoa siitä, miten jätteenpoltoa kannattaisi tulevaisuudessa lähestyä hajautetun energiantuotannon kannalta. Kirjallisuudesta etsittiin tietoa yleisesti voimalaitossuunnittelusta, EU:n direktiivien ja Suomen lainsäädännön vaikutuksista jätteenpoltoon sekä näissä huomioon otettavista asioista pienen kokoluokan yhteistuotantolaitoksen toteuttamiseen. Näitä käsitellään luvuissa 2.3, 2.4 ja 3.1.3.

Luvussa 2.5 esitellään pien-CHP –laitokseen soveltuvaa tekniikkaa. Sen alaluvuissa esitellään ensin arinapolttotekniikkaa ja sitten höyryn tuotantoa höyrykattilatekniikalla. Höyry käytettäisiin sähkön tuotantoon höyryturbiinilla höyryvoimaprozessissa, joten höyryturbiinitekniikkaa käsitellään omassa luvussaan. Savukaasujen puhdistusjärjestelmistä esitellään kuiva savukaasujen puhdistusmenetelmä eri kemikaali-injektiovaihtoehdoilla. Myös erilaisia saatavilla olevia kontteja ja niihin asennettuja laitteita esitellään omassa luvussaan. Tekniikan osalta polttoaineen käsittely- ja syöttöjärjestelmät, automaatio- ja sähköjärjestelmät sekä erilaiset liittynät jätettiin tämän työn ulkopuolelle. Niiden aiheuttamat kustannukset kuitenkin arvioitiin yleisellä tasolla asiakasryhmien budjetoinnissa.

Diplomityössä pystytään tarkastelemaan vain rajallinen määrä tietoja ja tekemään rajattu määrä laskelmia. Kannattavuuslaskelmissa sekä herkkyystarkastelussa otettiin huomioon työn rajallisuus muuttujien, parametrien ja oletusten valinnassa. Laskelmiin valittiin sellainen määrä muuttujia ja parametreja, kuin nähtiin oleelliseksi saada tarpeeksi luotettavia tuloksia. Lähtöoletusten tekeminen vaikuttaisi saatuihin tuloksiin, joten niitä tehtiin sellaisin perustein, että vaikutukset jäisivät kokonaisuuden kannalta mahdollisimman vähäisiksi. Herkkyystarkastelun laajuutta rajattiin valitsemalla tarkasteluun vain muutama oleelliseksi nähty muuttuja.

## 2 Jätteestä energiaa pien-CHP -jätteenpolttolaitoksella

Tässä luvussa käsitellään niitä taustoja, jotka vaikuttavat jätteiden energiahyötykäyttöön. Alaluvussa 2.1 käsitellään jätteiden energiahyötykäyttöä, sen syitä ja laajuutta Suomessa. Jätteiden käsittely jaetaan usein eri menetelmiin, joista jätteiden termistä reformointia ja siihen liittyvää tekniikkaa käsitellään luvussa 2.2. EU:n direktiivit ja Suomen lainsäädäntö asettavat omat rajoituksensa jätteen käsittelylle ja polttamiselle, joten niitä tarkastellaan luvussa 2.3.

Jätteitä voidaan käsitellä monella eri tavalla. Suomessa ja Euroopassa jätteiden energia-käyttö on osa laajempaa jätehuoltoa ja jätepolitiikkaa, jota ohjataan EU:n direktiiveillä ja kansallisilla viranomaismääräyksillä. Yhdyskuntajätteiden syntypistelajittelu ja kierätyspoltoaineiden valmistus luovat pohjan jätteiden tehokkaalle materiaali- ja energiahyötykäytölle. Yritysten panostusta jätteiden hyötykäyttöön lisää muun muassa se, että

- vientiyritysten on osoitettava toimintansa ympäristöystävällisyys
- viranomaiset vaativat kaatopaikkakuormituksen vähentämistä
- teknologianvientimahdollisuudet
- hyötykäytöstä kiinnostuneet yritykset näkevät mahdollisuuksia parantaa omaa kilpailukykyään myös raaka-aine- ja energiakulujen alenemisen kautta. (VTT Prosessit 2004, s. 125, 147, 265.)

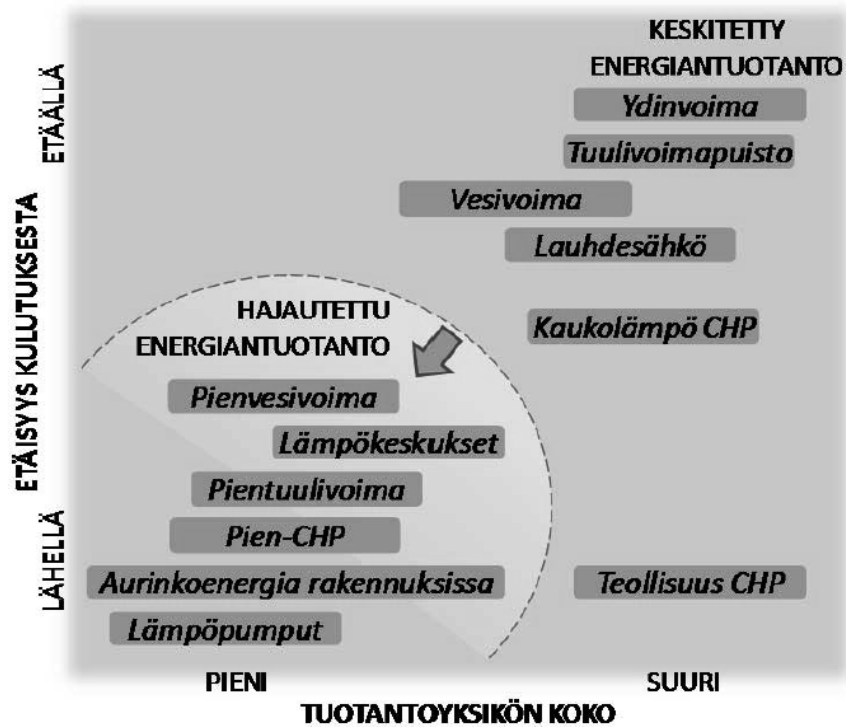
Jätteiden energiahyötykäytölle ollaan jatkuvasti etsimässä uusia materiaali- ja energiahyötykäyttöratkaisuja. Yhtenä kehityskohteenä on alalla ollut uusien, integroitujen materiaali- ja energiahyötykäyttökonseptien luominen. Tavoitteena on ollut optimoida kokonaiskustannuksiltaan ja ympäristövaikutuksiltaan järkeviä jätteiden materiaali- ja energiahyötykäyttöjärjestelmiä. (VTT Prosessit 2004, s. 267.)

Puhuttaessa pienimuotoisesta energian, sähkön tai lämmön tuotannosta, käsitteet vaihtelevat riippuen organisaatiosta ja sen toimialasta, eikä näille yleensä löydy yksiselitteistä määritelmää. Yleensä määritelmät pohjautuvat voimalaitoksen nimellis- tai maksimitehoihin. Pienimuotoisesta tuotannosta käytetään myös usein nimitystä hajautettu tuotanto. (Motiva Oy 2012, Lehto 2009.) Kuvassa 1 on esitetty asemointikuva hajautetusta energiantuotannosta. Hajautettu energiantuotanto on määritelmältään tyypillisesti sellaista,

- joka muistuttaa perinteistä tuotantorakennetta (tuotantolaitteet, varasto, sähköverkko)
- joka on täysin itsenäinen tai kytkeytyy paikalliseen keskitettyyn tuotantorakenteeseen
- joka on liitetty pienjänniteverkkoon oman liittymispisteen kautta tai sähkönkäyttöpaikan rinnalle yhteisen liittymispisteen taakse
- joka tyydyttää paikallisen energiantarpeen (lämpö, kylmä, höyry, termooiljy, sähkö)
- jossa energiantuotanto on lähellä kulutusta, kuten esimerkiksi tehtaan energijärjestelmä
- jossa energian siirto- ja jakelutarve on vähäinen
- joka hyödyntää paikallisesti saatavissa olevaa energianlähdettä tai uusiutuvaa sellaista
- joka hyödyntää hukkaenergiaa

- jonka käyttö ja kunnossapito hoidetaan paikallisesti
- jolla on hyvä toimintavarmuus kaikissa olosuhteissa
- joka sovitetaan maisemallisesti ympäristöön, eli maisemoidaan
- jossa huomioidaan asiakkaiden ja yhteiskunnan näkökulmia
- joka on kokonaistaloudellinen
- joka on moduulirakenteinen.

(Turunen 2004, Motiva Oy 2010.)



Kuva 1. Periaatekuva hajautetusta tuotannosta. (Motiva Oy 2010)

Vartiainen ym. (2002) määrittelevät pienimuotoisen yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon olevan nimellisteholtaan alle 10 MW ja määrittelevät sen hajautetun energiantuotannon käyttökohteen välittömässä läheisyydessä tapahtuvaksi energiantuotannoksi. Turunen (2004) määrittelee tuotantotehon mukaan lähiö- ja tehdaskokoluokan olevan alle 10 MW, kortteli- tai teollisuusluokan olevan alle 5 MW, kiinteistö- ja pienteollisuusluokan olevan alle 500 kW ja kotitalousluokan alle 50 kW.

Sähkömarkkinalain (558/2013) mukaan pienimuotoinen sähköntuotanto on enintään kahden megavoltiampeerin (MVA) sähkövoimalaitos. Sähkön pientuotanto sisältää yleensä mikrotuotannon, jolla useimmiten tarkoitetaan pienjänniteverkkoon kytkettyä voimalaitosta, joka tuottaa ensisijaisesti sähköä kulutuskohteeseen. Pienjänniteverkolla tarkoitetaan 0,4 kV:n jakeluverkkoa ja siihen voidaan liittää pienimmät alle 100 kW sähköntuotantolaitokset. Suuremman kokoluokan laitokset liitetään tyypillisesti keski-jänniteverkkoon, yleensä 10 tai 20 kV. (Motiva Oy 2012, Energiategollisuus ry 2016a.)

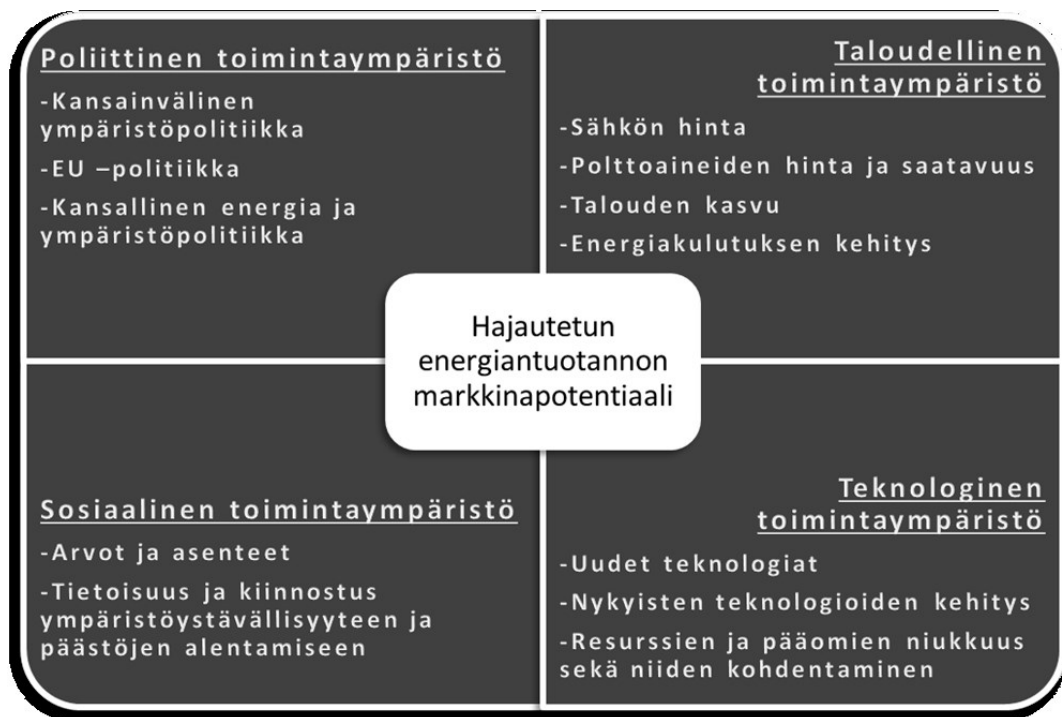
Sähkön pientuotannon arvioidaan lisääntyvän, koska sen edistämällä voidaan tukea paikallisia ratkaisuja ja lisätä uusiutuvan energian käyttöä. Pientuotanto lisää kuluttajan tietoisuutta omasta energiankulutuksestaan, edistää aktiivisuutta energiatehokkuudessa ja –säästöissä. Pientuotannolla voi olla tulevaisuudessa merkittävä vaikutus esimerkiksi liikerakennusten ja maatilojen energiaomavaraisuuden lisääjänä sekä valtakunnallisen

sähköntuotantotarpeen pienentäjänä. Lisäksi pientuotannon edistäminen luo kotimaiset edelläkävijämarkkinat alan suomalaisille yrityksille. Suomessa löytyy eturivin osaamista esimerkiksi pientuotantoon liittyvissä älyverkkoratkaisuissa. Kotimarkkinoiden kehittämisen odotetaan lisäävän huipputekniikan vientipotentiaalia. (TEM 2014.)

Muita sähkön pientuotantoa edistäviä tekijöitä ovat muun muassa:

- EU:n uusiutuvan energian lisäys- ja ilmastotavoitteet
  - pienten tuotantolaitosten hintojen lasku
  - sähkön kuluttajien halu pienentää sähkölaskuaan
  - kulutus päätöksiä enenevästi ohjaava ympäristötietoisuus
  - erilaiset tukijärjestelmät.
- (Energiateollisuus 2016.)

Pien-CHP -laitosten (1...10 MW) markkinapotentiaali, kuten myös teknologinen ja taloudellinen potentiaali, nähdään sekä pitkällä että lyhyellä aikavälillä hyvin korkeana ainakin kaikissa OECD -maissa. Edellytykset ovat sellaisten polttoaineiden hyödyntämisessä, kuten sekapolttoaineet, biopoltonesteet, -kaasut tai polttokelpoiset lietteet. (Vartiainen ym. 2002.) Markkinapotentiaaliin vaikuttavia tekijöitä on esitetty kuvassa 2.



**Kuva 2. Hajautetun energiantuotannon markkinapotentiaaliin vaikuttavia tekijöitä. Soveltaen (Aaltonen & Ukkonen 2008, Lehto 2009)**

Poikonen ym. (2005) teoksessa Aaltonen & Ukkonen (2008) pitävät hajautetun energiantuotannon yhtenä vahvuutena tuotantomarkkinoille pääsemiseksi kuluttajan ehdoilla toimimista ja sitä, että energiantuotanto on lähellä kuluttajaa, mikä vähentää siirtohäviöitä. Erityisesti lämmöntuotanto lähellä kuluttajaa on osoittautunut toimivaksi, koska lämpöä ei ole taloudellista siirtää pitkiä matkoja. Hajautetun energiantuotannon teknologiat eivät ole kehittyneet niin pitkälle, että voisivat vielä kilpailla keskitetyn tuotannon kanssa. Erityisesti kehitettävää on ollut automaatioissa sekä toiminnan valvonnassa ja ohjauksessa. Korkeiden investointikustannusten vuoksi hajautettu energiantuotanto on

ollut harvoin kannattavaa ilman valtion tukea. Teknologian kehitys voi kuitenkin saada hajautetun energiantuotannon kannattavuuden kasvuun.

Uudenlainen pien-CHP –laitokseen perustuva konsepti voisi sopia sellaisille asiakkaille, joilla on saatavissa hinnaltaan kilpailukykyistä polttoainetta. Kannattava toiminta vaatii myös riittävän suuren ja tasaisen sähkö- ja lämpökuorman. Polttoaine voisi tulla esimerkiksi jätehuollosta tai omista sivuvirroista kaupan alalta, teollisuudesta tai maataloudesta. Ylimääräenergia tulisi myydä tuotantokustannuksia korkeampaan hintaan lähiasiakkaille tai verkkoon.

Pien-CHP –laitokselle sopivia asiakasryhmiä ovat esimerkiksi:

- teollisuuslaitokset; sahat, vaneritehtaat, huonekaluvalmistusteollisuus, meijerit, logistiikkakeskukset
  - pienet, keskisuuret ja suuret, muut kuin teollisuuden alalla toimivat yritykset, kuten isot toimistorakennukset
  - suurkiinteistöt: kaukolämpöverkon ulkopuoliset suurkiinteistöt, uimahallit, jäähallit, opetusrakennukset
  - pienet yhdyskunnat tai suurten ja keskikokoisten yhdyskuntien taajamat
  - suuret tai keskisuuret maataloustilat: viljan viljely ja kuivaus, hevostallit, karjan kasvatusta, kasvihuoneet, puutarhat
  - terveysala; sairaalat, terveysasemat
  - hotelli- ja matkailu-ala; suuret hotellit, kylpylät
  - energiaosuuskunnat ja energiapalveluita tuottavat yritykset
  - aluelämmityksen lämpökeskukset.
- (Turunen 2004, Karjalainen 2012.)

Pienen kokoluokan yhteistuotannon houkuttelevuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä Suomessa että ulkomailla maa- ja käyttäjäkohtaisesti ovat muun muassa:

- energiamarkkinoiden paikallinen tilanne
  - hajautetun energiantuotannon tuet
  - energiatuet uusiutuvan energian tuotannolle
  - uusiutuvan energian tuotantovelvoitteet
  - fossiilisilla polttoaineilla tuotetun energian verot
  - pienimuotoisen yhteistuotannon tuet
  - sähkön ja lämmön tai kylmän hinta
  - polttoaineen saatavuus ja varmuus
  - polttoaineen hinta
  - maan ja sijaintikohteen muu infrastruktuuri tai sen puute
  - paikallisiin verkkoihin liittymiset ja energian myynnin kustannukset
  - kilpailevat tuotantomuodot
  - luonnonolosuhteet
  - tekniikan soveltuvuus
  - määräykset, velvoitteet ja lait
  - paikallinen kulttuuri; tottumukset, asenteet ym.
- (Turunen 2004, Lehto 2009.)



## **2.1 Jätteiden energiahöykykäyttö Suomessa**

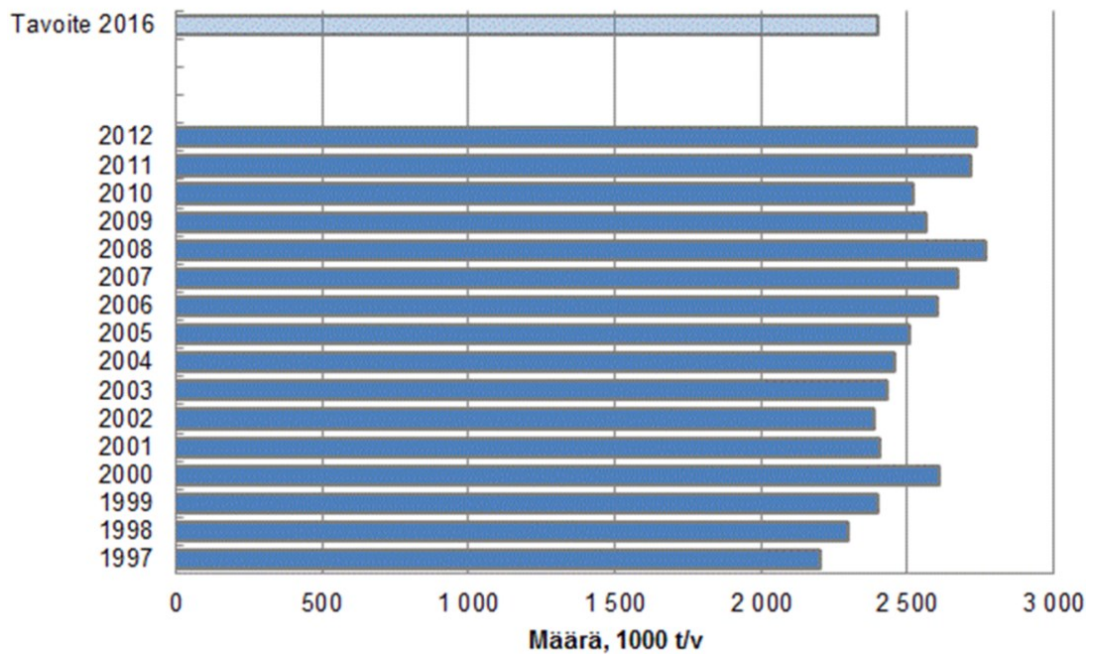
Tässä luvussa käydään läpi jätteenpolton tilannetta yleisesti Suomessa. Lisäksi tarkastellaan jätteenpolton tulevaisuuden näkymiä ja ympäristötekijöitä. Tässä luvussa keskitytään tarkastelemaan yleisesti jätteitä, jotka ovat yhdyskunnan, teollisuuden tai maatalouden kiinteitä jätteitä tai lietteitä.

Jätteiden energiahöykykäyttöön vaikuttaa voimakkaasti sen pohjautuminen EU:n ja Suomen poliittisiin tavoitteisiin. Tällä hetkellä Suomi on sitoutunut ohjeelliseen Euroopan Unionin energiatehokkuustavoitteeseen vähentää kasvihuonepäästöjä 20 %:lla, nostaa uusiutuvan energian osuus keskimäärin 20 %:iin kokonaiskulutuksesta (Suomen osalta 38 %) ja parantaa energiatehokkuutta 20 %:lla vuoteen 2020 mennessä. Vuonna 2015 tuli voimaan ilmastolaki (609/2015), jossa asetetaan pitkän aikavälin kasvihuonekaasujen päästövähennystavoitteeksi vähintään 80 prosenttia vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 1990 päästötasoon. Olemme sitoutuneet myös vähentämään hiilidioksidipäästöjä Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) puitesopimusta tarkentavassa Kioton pöytäkirjassa, jonka toinen velvoitekausi kattaa vuodet 2013 – 2020. Pariisin sopimus on uusiin YK:n ilmastosopimus, joka astui voimaan 4.11.2016 ja se koskee vuoden 2020 jälkeistä aikaa. Se ei velvoita valtioita tiettyihin päästötavoitteisiin, vaan valtiot sitoutuvat siinä omiin kansallisiin panoksiin. Näihin poliittisiin tavoitteisiin pääsemiseksi jätteiden energiahöykykäyttöä pyritään lisäämään. (TEM 2016.)

Työ- ja elinkeinoministeriön TEM (2014) Energia- ja ilmastotiekartta 2050 asettaa Suomen pitkän aikavälin tavoitteeksi hiilineutraalin yhteiskunnan. Vuoden 2012 tilastojen mukaan Suomen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä 3,4 %:n osuus oli peräisin jätesektorilta. Siihen laskettiin mukaan kaatopaikoille menevä jäte, jätevesien käsittely sekä kompostointi. Jätteen polttoainekäytöstä energiantuotannossa syntyvät hiilidioksidipäästöt lasketaan osana energiasektorin päästöjä, eikä niitä huomioida siksi jätesektorin päästöissä. Muita kuin energiaperäisiä jätteitä syntyy myös merkittävä määrä maataloussektorilta; vuoden 2012 tilastojen mukaan jopa 9,4 % Suomen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä. Näistä kotieläinten ruuansulatuksesta ja lannan käsittelystä tuli yhteensä 3,6 %.

Peltobiomassoilla, lannalla ja jätteillä nähdään olevan potentiaalia tulevaisuuden energialähteinä. Maatalouden päästöjen vähentämistä pidetään ongelmallisempänä kuin jätesektorin päästöjen vähentämistä. Siksi on esimerkiksi arveltu, että maatalousjätteiden hyödyntäminen energiaksi on ainoa ja tärkein toimenpide päästöjen vähentämiseksi. Eräs 2014 – 2020 maaseutuohjelman tavoitteista onkin ollut ilmastomuutoksen hillintä ja sopeutuminen ilmastomuutokseen. (TEM 2014, Mroueh ym. 2007.)

Kuvassa 3 on esitetty yhdyskuntajätteen määrä Suomessa vuosina 1997 – 2012 ja kuvassa 3 polttoon viedyn yhdyskuntajätteen määrä vuosina 2006 – 2013. Kaikesta Suomessa syntyvästä jätteestä päättyy tällä hetkellä kaatopaikalle arviolta noin 45 %, kierrätykseen 36 % ja polttoon 10 %. Yhdyskuntajätteen osuus kaikesta jätteestä on noin 3 % ja sen sijoittaminen kaatopaikalle on vähentynyt voimakkaasti. Jätteiden kaatopaikkasijoittamisen vähentäminen ja jätteiden höykykäytön lisääminen vähentävät jätesektorin kasvihuonekaasupäästöjä ja lisäävät aineelliseen hyödyntämiseen soveltumattoman jätteen hyödyntämistä energiantuotannossa. (TEM 2014.)



Kuva 3. Yhdyskuntajätteen määrä Suomessa vuosina 1997 - 2012. (SYKE 2015)



Kuva 4. Polttoon tai kaatopaikalle vietyjen yhdyskuntajätteiden määrät vuosina 2006 - 2013. (SYKE 2015)

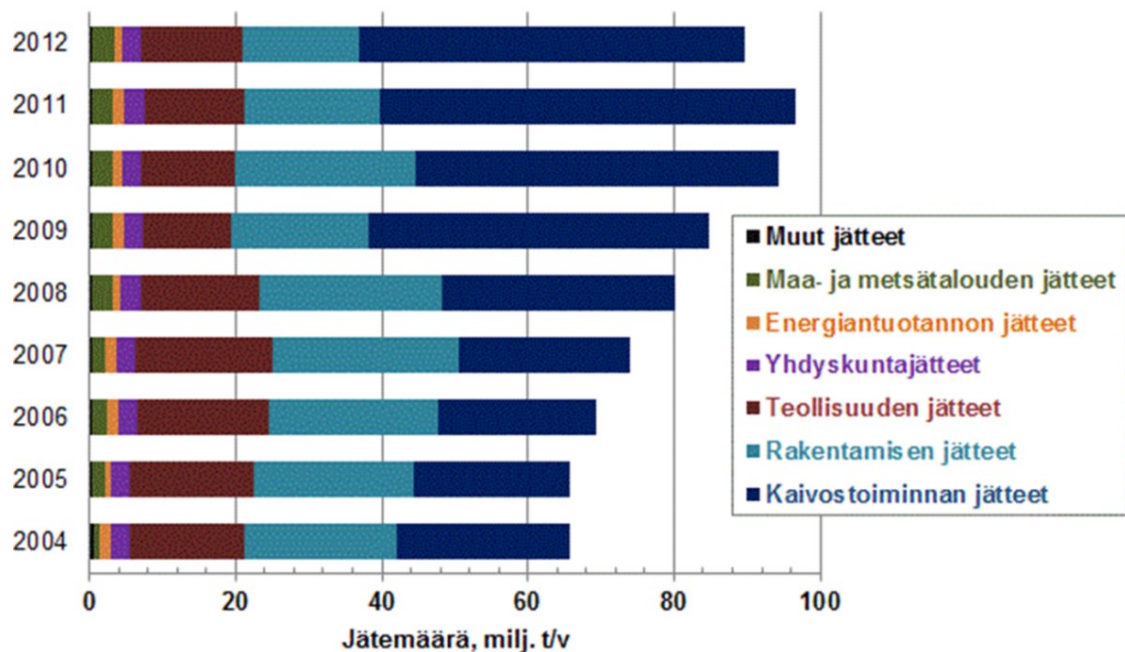
Jätteiden energiahyötykäytöstä Suomessa on tehty Energiateollisuus ry:n tilaamana ajankohtaisempi selvitys ”Jätteiden energiahyödyntäminen Suomessa” (Pöyry 2015). Siinä on arvioitu esimerkiksi, paljonko yhdyskuntajätettä syntyy nyt ja tulevaisuudessa, paljonko päättyy polttoon ja kuinka paljon Suomen nykyiset jätteenpolttolaitokset säästäisivät hiilidioksidipäästöjä, jos ne korvaisivat fossiilisiin perustuvaa tuotantoa. Kasvihuonekaasupäästövähennykset riippuvat kuitenkin vielä siitä, mitä polttoainetta korvataan ja missä (Mroueh ym. 2007).

Jätteiden energiahyötykäyttöä tukee se, että jätteen sijoittaminen kaatopaikalle vapauttaa enemmän ilmastomuutosta ja saastuttamista edistäviä päästöjä (CEWEP 2015). Kaatopaikalta vapautuvan kaasun koostumus on pääosin metaania 55...65 % ja hiilidioksidia 35...45 %. Esimerkiksi metaanin päästämiseltä ilmakehään vältytään, jos jätteet poltetaan. Tämä on osasy syy siihen, että nykyään jätteiden läjittämistä kaatopaikoille pyritään voimakkaasti vähentämään niin Suomessa kuin muuallakin Euroopassa (EEA 2016, CEWEP 2015). On arvioitu, että yhden keskikokoisen suomalaisen kaupungin kaatopaikka tuottaa metaanikaasua noin 200...400 m<sup>3</sup> / h ja, että yksi tonni koti-

talousjätettä tuottaisi 150...200 m<sup>3</sup> hyödynnettävää kaatopaikkakaasua 20 vuodessa. Kontrolloidussa nykyaikaisessa jätteenpoltossa voidaan suurin osa muistakin haitallisista päästöistä pestä ja poistaa hallitusti. (Alakangas 2000, Mroueh ym. 2007.)

Kaatopaikkaongelmien välttämisen lisäksi jätteenpolto antaa jätteelle rahallista arvoa, joka voi johtaa siihen, että joissakin tapauksissa jätteitä tullaan keräämään tehokkaammin. Myös esimerkiksi laiton jätteiden sijoittaminen ja polttaminen voivat vähentyä. Historiassa jätteenpolton tavoite on poikennut muusta polttoaineiden käytöstä siten, että tavoitteena ei ole niinkään ollut energiatuotanto, vaan kaatopaikalle vietävän jätteen painon ja tilavuuden vähentäminen sekä sen inerttisyys, eli reagoimattomuuden, lisääminen. (EEA 2016, CEWEP 2015.)

Jätteitä syntyy muun muassa kotitalouksissa, kaupassa, virastoissa, pienyrityksissä ja teollisuudessa. Kuvassa 5 on esitetty jätekertymät sektoreittain Suomessa vuosina 2004 – 2012. Suomessa jätehuolto perustuu jätteiden syntypistelajitteluun ja kierrätyspolttoaineiden valmistukseen. Syntypistelajitelluista jätevirroista voidaan valmistaa standardin mukaisia, laatukontrolloituja kierrätyspolttoaineita, joita voidaan polttaa CHP- tai lämpölaitoksissa. Näin voidaan saavuttaa korkea yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon rakennusaste vaarantamatta energiantuotannon rakenteita. (VTT Prosessit 2004 s. 265.)



Kuva 5. Jätekertymät sektoreittain Suomessa. (SYKE 2015)

Euroopan Unionin ja Suomen lainsäädäntö edellyttävät, että syntyvät jätteet ensisijaisesti hyödynnetään. Jos näin ei voida tehdä, ne voidaan loppukäsitellä eli esimerkiksi sijoittaa kaatopaikalle. Hyödyntäminen aineena asetetaan etusijalle, mutta jos näin ei voida taloudellisista tai ympäristösyistä tehdä, on jäte hyödynnettävä energiana. (EUVL 2008.) Tätä periaatetta kutsutaan yleisesti kuvassa 6 esitetyksi jätehierarkiaksi.



**Kuva 6. Jätehierarkia. (Ympäristöministeriö 2012)**

Euroopan Unionin jätedirektiivin (2008/98/EY) artiklan 4 mukaista jätehierarkiaa sovelletaan ensisijaisuusjärjestyksenä jätteen syntymisen ehkäisemistä ja jätehuoltoa koskevassa lainsäädännössä ja politiikassa (EUVL 2008). Jätteiden käyttö energiatuotantoon jätehierarkian mukaan on vasta neljänneksi paras vaihtoehto jätteen käytölle. Toisaalta jätteiden energiahyötykäyttöä tukee osaltaan jätehierarkian kohdat 1, 2 ja 3, koska jätteenpoltosta saatavasta pohjatuhkasta voidaan erottaa esimerkiksi metalleja kierrätykseen sekä samalla vähentää jätteiden määrää ja haitallisuutta. Uudelleenkäytön valmistelu (kuva 6, kohta 2) on periaatteessa yhdyskuntajätteen valmistamista kierrätyspolttoaineksi, mikä sisältää sekä lajittelua että kierrätystä ennen polttoa sekä polton jälkeen. (Vesanto 2006.)

Euroopan kiertotaloutta ja resurssitehokkuutta koskevien periaatteiden mukaisesti pitkällä aikavälillä lähestytään vähäjätteistä kierrätisyhteiskuntaa. Kierrätyksen ja aineellisen hyötykäytön osuuden kasvaessa vähenee vähitellen vastaavasti energiana hyödynnettävän jätteen määrä. Jätteen energiahyödyntäminen asettuu tasapainoon yhdyskunnissa siten, että on käytettävissä riittävä ja soveltuva alueellinen laitoskapasiteetti osana muuta energiasektoria. (TEM 2014.) Suomen virallisen tilaston (2016a) mukaan näin on jo tapahtunut.

## **2.2 Jätteiden terminen reformointitekniologia**

Jätteiden yleisin terminen reformointitekniikka on polttaminen, mutta sen rinnalle on kehitetty myös muita lämpökäsittelytekniikoita. Tässä luvussa käsitellään yleisesti lämpöenergiaa tuottavia jätteen reformointiprosesseja, joilla pääasiassa nykyään tuotetaan jätteistä energiaa.

Virallisesti Euroopan Unionin direktiivi jätteenpoltosta (2010/75/EU) tarkoittaa jätteenpolttolaitokselle kiinteää tai liikkuvaa teknistä yksikköä ja laitteistoa, joka on tarkoitettu jätteiden lämpökäsittelyyn. Tämä riippumatta siitä, hyödynnetäänkö poltosta syntyvä lämpö vai ei, kun jäte poltetaan hapettamalla tai käyttämällä muuta lämpökäsittelyä,

kuten pyrolyysiä, kaasutusta tai plasmakäsittelyä, ja jos käsittelystä syntyvät aineet tämän jälkeen poltetaan. (EUVL 2010.)

Erilaisia tyypillisiä jätteenpolttotekniikoita ovat seospoltto, polttaminen arina- ja leijukerroskattiloissa tai kierrätyspolttoaineiden kaasutus ja tuotekaasun polttaminen kattilassa. Yhdyskuntajätettä poltetaan pääasiassa mekaanisesti liikkuvalla arinalla, mutta myös kiinteällä arinalla pienillä jätemäärillä. Leijukerrospolttoa on käytetty lietteelle ja pyöriviä rumpu-uuneja kemiallisille jätteille sekä ongelmajätteille. (Koskelainen ym. 2006 s. 309, Raiko ym. 2002, s. 482, Vesanto 2006.)

Jätteen sisältämää energiaa voidaan hyödyntää polttamalla esimerkiksi kolmella seuraavalla tavalla:

1. Erityisesti suunnitelluissa jätteenpolttolaitoksissa, joissa jäte on ainoa polttoaine.
2. Käyttämällä jätteitä rinnakkais- tai seospolttoaineina tavanomaisen kiinteän polttoaineen kanssa jossakin nykyisessä tai uudessa kattilalaitoksessa.
3. Valmistamalla jätteestä tuotekaasua ja käyttämällä sitä rinnakkaispolttoaineena tai sellaisenaan.  
(Koskelainen ym. 2006, s. 309.)

Lämpökäsittelyvaihtoehdoista pyrolysoinnilla tarkoitetaan termokemiallista menetelmää, jossa kiinteää polttoainetta kuumennetaan hapettomassa tilassa lämpötilaan 300...850 °C, eli ns. kuivatislataan vähähappisessa tilassa, jolloin syntyy kaasuja, nestemäinen tuote ja kiinteä hiiltojäännös. (VTT Prosessit 2004, s. 258-259.)

Polttoaineiden kaasutuksella tarkoitetaan prosessia, jossa kaasutettava aine reagoi kiinteän tai nestemäisen polttoaineen kanssa korkeassa lämpötilassa muodostaen polttokaa-suseoksen. Kaasutus tai polttoaineen kaasuttaminen on muuten samantyyppinen prosessi kuin pyrolyysi, mutta siinä tavoitteena on saada vähähappisessa ympäristössä polttoaine kaasuuntumaan mahdollisimman hyvin noin 800...1700 °C lämpötilaan, jolloin syntyy tuotekaasua, jota voidaan myöhemmin puhdistuksen jälkeen polttaa puhtaammin. (VTT Prosessit 2004, s. 244-246.)

Plasmakaasutuksessa plasmakaasutinreaktorissa puhalletaan plasmasuihku polttoaineen sekaan samalla kaasuttamalla polttoainetta, joka voi olla esimerkiksi biomassaa tai yhdyskuntajätettä. Reaktorissa polttoaine joutuu kosketukseen sähköisesti tuotetun plasman kanssa usein erittäin korkeassa jopa 5500 °C lämpötilassa. Plasmakaasutuksen tavoitteena on tuottaa erittäin korkealaatuista synteetikaasua, jota voidaan käyttää edelleen energiatuotantoon. (GSTC 2017.)

## **2.3 Jätteenpoltossa huomioitavat EU:n direktiivit ja Suomen lainsäädäntö**

Jätteenpolttolaitokseen investoitaessa on olennaista selvittää laitoksen rakentamiseen ja käyttöön tarvittavat luvat sekä noudatettava lainsäädäntö. Näillä voi olla merkittävä vaikutus voimalaitoksen rakentamisen kustannuksiin ja rakennusaikatauluihin. Tässä luvussa tarkastellaan jätteenpolton luvitusta ja niitä lakeja, joita jätteenpoltossa tulee ottaa huomioon. Laitoksen ostajan tai valmistajan kannattaa ottaa huomioon, että lainsäädäntö voi muuttua jatkuvasti. Muutoksen aiheuttamaa poliittista riskiä voi vähentää esimerkiksi seuraamalla Suomessa tai EU:ssa valmisteilla olevia säädöksiä. Tällä hetkellä EU:n asettamista direktiiveistä jätteenpolton suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon ainakin seuraavat:

1. Jätedirektiivi 2008/98/EY. (EUVL 2008.)
2. Direktiivi teollisuuden päästöistä 2010/75/EU. (EUVL 2010.)
3. Direktiivi 2012/27/EU energiatehokkuudesta, direktiivien 2009/125/EY ja 2010/30/EU muuttamisesta sekä direktiivien 2004/8/EY ja 2006/32/EY kumoamisesta. (EUVL 2012.)

Direktiivi teollisuuden päästöistä (2010/75/EU) on kumonnut lähes kokonaan aikaisemmin merkittävän direktiivin jätteenpoltosta (2000/76/EY). Useimmat EU:n direktiivit jätteenpolttoon liittyen on EU:n jäsenvaltioiden pitänyt ratifioida omaan lainsäädäntöönsä. Siksi useimmat samat jätteenpolttoon liittyvät asiat löytyvät myös Suomen omasta lainsäädännöstä. Suomessa jätteenpoltossa noudatettavia tärkeitä ja huomioon otettavia Suomen lakeja ja asetuksia ovat esimerkiksi:

- Valtioneuvoston asetus (VNA) jätteen polttamisesta 151/2013. (Finlex 2013a.)
- Jätelaki 646/2011. (Finlex 2011a.)
- Laki ympäristösuojelulain muuttamisesta 647/2011. (Finlex 2011b.)
- Teknisiä muutoksia 19 muuhun lakiin: 646 – 666/2011.
- Muutokset jätelakiin 646/2011: 1104/2011, 195/2012, 1178/2013, 25/2014 ja 410/2014.
- Ympäristönsuojelulaki 527/2014. (Finlex 2014a.)
- Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 713/2014. (Finlex 2014b.)
- Jäteverolaki 1126/2010. (Finlex 2010.)
- Valtioneuvoston asetus jätteistä 179/2012. (Finlex 2012.)

Lainsäädännön tärkeimpiin kohtiin kuuluvat jätteenpolttajan kannalta kohdat päästöjen raja-arvojen noudattamisesta. Tämän työn liitteessä 1 on esitetty teollisuuden päästöistä annetun direktiivin (2010/75/EU) ilmaan joutuvien päästöjen raja-arvot jätteenpoltossa. Näiden lisäksi on erikseen säädetty teollisuuden päästöistä annetun direktiivin (2010/75/EY) liitteen VI, osassa 3, dibentso-p-dioksiinien ja dibentsofuraanien sekä hiilimonoksidipäästöjen päästöraja-arvoista. Liitteessä 1 on esitetty myös näiden päästöjen raja-arvot jätteenpoltossa. Samat päästöraja-arvot on sisällytetty myös valtioneuvoston asetukseen jätteen polttamisesta (151/2013) liitteeseen 4. (EUVL 2010, Finlex 2013a.)

Huomionarvoista on se, että Suomessa ensisijaisesti noudatettava valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta (151/2013), erityisesti pykälät 18 ja 19, eroavat ilmaan johdettavien päästöjen raja-arvojen mittaumenetelmästä teollisuuden päästöistä annetusta direktiivistä (2010/75/EY) (EUVL 2010, Finlex 2013a). Siten liitteessä 1 olevat diok-

siinit ja furaanit yhteispitoisuudet sekä raskasmetallien yhteispitoisuudet eivät vaadi jatkuvaa mittausmenetelmää, vaan niistä säädetään seuraavasti:

”...vähintään kahdesti vuodessa mittaukset raskasmetalleista, dioksiineista ja furaaneista, kuitenkin siten, että laitoksen ensimmäisen 12 käyttökuukauden aikana mittaukset tehdään vähintään joka kolmas kuukausi.”

Jätteen polttamisesta annetun valtioneuvoston asetuksen (151/2013) 14 §:n mukaan jätteenpolttolaitoksen osalta päästöraja-arvoja sovelletaan sekalaiselle yhdyskuntajätteelle, joka on siis lajiteltua tai lajittelematonta sekalaista yhdyskuntajätettä. Tarkemmin määriteltynä yhdyskuntajätteellä tarkoitetaan jätteistä annetun valtioneuvoston asetuksen (179/2012) mukaan liitteen 4 jäteluettelon numeroitujen lajien 15, 19 ja 20 mukaisesti:

- asumisessa syntyvät jätteet ja niihin rinnastettavat kaupan, teollisuuden ja muiden laitosten jätteet, erilliskerätyt jakeet mukaan lukien
- yksilöidyt jätelajit: jätelajit, joita ei ole mainittu muualla
- puutarha- ja puistojätteet, hautausmaiden hoidossa syntyvät jätteet mukaan luetuina
- muut yhdyskuntajätteet: yhdyskuntajätteet, joita ei ole mainittu muualla. (Finlex 2013a, Finlex 2012.)

Myös jätteenpoltosta tulevalle tuhkalta asetetaan vaatimuksia. Jätteen polttamisesta annetun valtioneuvoston asetuksen (151/2013) 9 § asettaa jätteenpolton olosuhteille vaatimuksen, jonka mukaan kuonassa tai pohjatuhkassa olevan orgaanisen hiilen kokonaismäärän (TOC) tulee olla alle 3 % tai niiden hehkutushäviö alle 5 % aineksen (tuhka ja kuona) kuivapainosta. Orgaaninen hiili viittaa tässä polttoaineen sisältämän bioosuuden hiilen määrään. (Finlex 2013a.)

Ympäristönsuojelulain (527/2014) mukaan ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttavalle toiminnolle, kuten energiantuotanto, tarvitaan tietyin kriteerein lupa. Luvan myöntää ympäristönsuojelulaissa tai asetuksessa määritelty lupaviranomainen, eli aluehallintovirasto tai kunnan ympäristönsuojeluviranomainen. Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukset, eli ELY –keskukset, vastaavat aluehallintovirastojen myöntämien ympäristölupien valvontatehtävistä. (Ympäristöhallinto 2016a.)

Aluehallintavirasto myöntää ympäristölupia merkittävälle jätteenpolttolaitoksille, kun taas kunnan ympäristönsuojeluviranomainen myöntää ympäristöluvat jätehuollon pienimuotoiseen toimintaan. Jos kunnat ovat siirtäneet jätehuollon toiminnat alueelliselle jäteyhtiölle, huolehtii se käytännössä mahdollisista polttolaitoksista. (Ympäristöhallinto 2016b.) Suomessa jätteenpolttoon tarvittavia lupia ja päätöksiä voivat olla esimerkiksi:

- ympäristölupa
- asemakaava
- rakennuslupa
- lentoestelupa
- teollisuusjätevesisopimus
- painelaiteluvat
- vaarallisten kemikaalien teollista käsittelyä ja varastointia koskevat luvat
- sähkö- ja kaukolämpöjohtojen ja edellyttämät luvat. (Saarinen & Leikoski 2009.)

Siitä, mihin ympäristölupaa ei tarvita säädetään ympäristönsuojelulain 32 §:ssä: ”Poikkeus eräiden jätteen käsittelytoimintojen luvanvaraisuudesta”:

- Ympäristölupaa ei tarvita liitteen 1 taulukossa 2 olevaan 13 kohdassa tarkoitettuun jätteen ammattimaiseen tai laitospäiväiseen käsittelyyn mainitun kohdan perusteella silloin, kun kysymyksessä on maa- ja metsätaloudessa syntyvän ympäristölle ja terveydelle haitattomista luonnonaineksista koostuvan jätteen käyttö maa- ja metsätaloudessa; tai maa- ja metsätaloudessa syntyvän ympäristölle ja terveydelle haitattomista luonnonaineksista koostuvan kasviperäisen jätteen hyödyntäminen energiantuotannossa.
- Ympäristölupaa ei myöskään tarvita muuhun liitteen 1 taulukossa 2 olevaan 13 kohdassa tarkoitettuun jätteiden hyödyntämiseen taikka muiden kuin vaarallisten jätteiden syntypaikalla tapahtuvaan loppukäsittelyyn, jos näiden toimintojen ympäristönsuojeluvuorokausista on säädetty tämän lain 10 §:n nojalla tai jätelain 14 §:n nojalla annetulla valtioneuvoston asetuksella. Tällaisen toiminnan rekisteröinnistä säädetään tämän lain 116 §:ssä.  
(Finlex 2014a.)

Voidaan todeta, että ympäristölupaa ei tarvita ympäristönsuojelulain 32 §:n mukaisesti silloin, kun noudatetaan lain 10 §:ää ja jätelain 14 §:ää. Näin tulkittuna ympäristölupaa ei tarvita ympäristönsuojelulain liitteen 1, taulukon 2, kohdan 13 mukaan silloin, kun on kyseessä kiinteää tai nestemäistä jätettä polttava jätteenpolttolaitos tai jätteen rinnakkaispolttolaitos, jonka kapasiteetti muiden kuin vaarallisten jätteiden osalta on enintään 3 tonnia tunnissa (3 h / t) ja vaarallisten jätteiden osalta enintään 10 tonnia vuorokaudessa (10 h / d). (Finlex 2014a, Finlex 2011a.) Ajantasaiset tulkinnat kannattaa kuitenkin aina vielä tarkistaa paikalliselta ympäristöviranomaiselta.

Jos ympäristölupaa ei tarvita, tarvitaan kuitenkin ympäristönsuojelulain 116 §:ssä säädetty rekisteröinti toiminnalle seuraavissa tapauksissa:

- Ympäristönsuojelulain liitteessä 2 säädetystä ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttavasta toiminnasta on tehtävä ilmoitus kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselle ympäristönsuojelun tietojärjestelmään rekisteröintiä varten.
- Ympäristönsuojelulain liite 2, kohta 1: Energiantuotantolaitos, jonka polttoainetehtoon lasketaan yhteen kaikki samalla laitosalueella sijaitsevat polttoainetehtoon vähintään yhden megawatin energiantuotantoyksiköt ja jonka polttoainetehtoo on vähintään 5 megawattia, mutta alle 50 megawattia, ja jossa jokaisen kiinteää polttoainetta käyttävän energiantuotantoyksikön polttoainetehtoo on alle 20 megawattia.  
(Finlex 2014a.)

Toisin sanoen ympäristönsuojelulain mukaan kaikki alle 20 MW polttoainetehtolaitokset, jotka käyttävät kiinteää jätettä polttoaineena, tarvitsevat toimintaluvan ja rekisteröinnin kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselta, mutta ei ympäristölupaa tiettyin aikaisemmin luetelluin ehdoin. (Finlex 2014a.)

Polton aikaisten määräysten tärkeimmät kohdat löytyvät muun muassa valtioneuvoston asetuksista jätteenpolttamisesta (151/2013) pykälistä 9-11. Esimerkiksi pykälän 9 mukaan poltto- ja rinnakkaispolttolaitoksissa on oltava käytössä automaattinen järjestelmä, joka estää jätteen syötön käynnistyksen aikana kunnes 850 °C lämpötila on saavutettu ja



aina, kun lämpötila alittaa 850 °C ja aina, kun jatkuvat mittaukset osoittavat, että jokin päästörajoista ylittyy puhdistuslaitteiden häiriöiden tai vikojen vuoksi. Tämän lisäksi poltto- ja rinnakkaispolttolaitokset on suunniteltava, varustettava ja rakennettava ja niitä on käytettävä siten, että ehkäistään ilmaan joutuvat päästöt, jotka aiheuttavat merkittävää ilman pilaantumista maanpinnan tasolla. Erityisesti savukaasut on poistettava valvotusti sekä yhteisön ilmanlaatustandardien mukaisesti savupiipulla, jonka korkeus määritetään siten, että suojellaan ihmisten terveyttä ja ympäristöä. Poltosta syntyvä lämpö on hyödynnettävä niin hyvin kuin se on käytännössä mahdollista. Laitoksen hoitajan on oltava pätevä hoitamaan laitosta. (Finlex 2013a.)

Pienimuotoisen sähkön tuottajalle asetetaan Suomen lainsäädännössä tietyt erikoisvaatimuksia tai -helpotuksia. Sähkön pientuotannolle määritellään Suomen laissa joitakin helpotuksia esimerkiksi mittauksen ja verotuksen suhteen. Sähköä sähköverkkoon syötävä voimalaitos on pääsääntöisesti varustettava mittalaitteistolla. Sähkön pientuotantolaitteistot, joissa on enintään 3 x 36 A pääsulakkeilla varustettu käyttöpaikka, on vapautettu tuotannon mittauksesta ja näihin kohteisiin riittää verkosta otetun ja verkkoon syötetyn energian mittaus. Niitä ei kuitenkaan saa summata, vaan niille on oltava eri rekisterit. Verkonhaltija vastaa aina verkosta oton ja verkosta syötön mittaamisesta. Mittari on verkonhaltijan omistuksessa ja verkonhaltija vastaa ja huolehtii sen lukemisesta. Pienimuotoisen sähköntuotannon mittauksen on perustuttava tuntimittaukseen ja sen on oltava etäluettava. (Motiva Oy 2016a.)

Sähköverovelvollisuutta tarkoittavan lainsäädännön mukaan verotettava sähkö on mitattava. Verkonhaltijat ja sähköntuottajat ovat sähköverovelvollisia ja heidän on tehtävä ilmoitus sijaintipaikastaan tulli- ja veripiirille. Sähköverovelvollisella viitataan sekä sähkön valmisteveroon että huoltovarmuusmaksuun. Valmisteveroa ei kuitenkaan tarvitse maksaa verkkoon siirtämättömästä sähköstä, joka on tuotettu alle 2 MVA:n tehoisessa generaattorissa. Pientuottaja on velvollinen maksamaan sähköveroa ja huoltovarmuusmaksua verkosta ostetusta sähköstä. (Motiva Oy 2016a.) Aiheeseen kannattaa tutustua tarkemmin esimerkiksi Tullin ja Motiva Oy:n nettisivuilta sekä teoksesta *Opas sähkön pientuottajalle*. (Motiva Oy 2012.)

Sähkön syötöstä verkkoon peritään yleensä kiinteä vuosimaksu sekä kWh –perusteinen vuosimaksu. Toisaalta kaikki verkkoyhtiöt eivät peri kiinteää maksua ja pienen kokoluokan laitoksella (< 100 kWe) vuotuinen tuotannon volyyymiin perustuva maksu on hyvin pieni. Pienen kokoluokan sähköntuotannon liittäminen verkkoon vaatii tapauskohtaisesti erilaisia investointeja kytkentöihin ja suojuksiin. Jo alkuvaiheessa, ennen kuin suunnittelu aloitetaan, on parasta olla yhteydessä paikalliseen verkkoyhtiöön. (Haavisto 2010.)

Muita yleisesti höyryä ja kaukolämpöä tuottavaan yhteistuotantolaitokseen sovellettavia direktiivejä sekä Suomen lakeja ja asetuksia ovat:

1. Energiatieteiden ja teknologian ministeriön asetus sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten sähkön ja lämmön tuotannon mittaamisesta 1429/2014 (Finlex 2014c.)
2. Painelaitedirektiivi 2014/68/EY (EUVL 2014.)
3. Sähkömarkkinalaki 588/2013 (Finlex 2013b.)
4. Sähköturvallisuuslaki 1135/2016 (Finlex 2016a.)
5. Valtioneuvoston asetus sähkömarkkinoista 65/2009 (Finlex 2009a.)
6. Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksesta 66/2009 (Finlex 2009b.) muutoksineen

7. Työ- ja elinkeinoministeriön asetus sähkökaupassa ja sähköntoimitusten selvi-tyksessä noudatettavasta tiedonvaihdosta 273/2016 (Finlex 2016b.)
8. Painelaitelaki 1144/2016 (Finlex 2016c.)
9. Asetus kattilalaitosten käytön valvojen pätevyyskirjoista 891/1999 (Finlex 1999a.)
10. Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaiteturvallisuudesta 953/1999 (Finlex 1999b.) muutoksineen
11. Direktiivi 2006/32/EY: Energian loppukäytön tehokkuudesta ja energiapalve-luista sekä neuvoston direktiivin 93/76/ETY kumoamisesta (EUVL 2006.)
12. Valtioneuvoston asetus 750/2013: Polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energi-antuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista eli niin sanottu PIPO -asetus (Finlex 2013c.)

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Suomen Tukes valvoo ja suojelee ihmisiä, omaisuutta ja ympäristöä turvallisuusriskeiltä. Siksi se voi hyväksyä ja tunnustaa tarkastuslaitoksia ja valtuutettuja laitoksia esimerkiksi sellaisilta toimialoilta, joihin liittyvät esimerkiksi kontit, mittauslaitteiden varmentaminen, painelaitteet tai sähköturvallisuus. Painelaittei-den käytön turvallisuutta edistetään valvomalla painelaitesäädösten noudattamista. Val-vontaa varten pidetään yllä painelaiterekisteriä, johon on rekisteröidyttävä tiettyjen kri-teerien täytyessä. Samoin, tietyin kriteerein, voivat voimalaitoksen painelaitteet olla määräaikaistarkastusvelvoitteisia tai henkilökunta lisäpätevyysvelvoitteisia. Sähköä, lämpöä tai höyryä tuottavan energiatuotantolaitoksen omistajan kannattaa arvioida etu-käteen näiden mahdollisesti aiheuttamat kustannukset. Tukes:n nettisivuilla kannattaa tutustua erityisesti ajankohtaiseen turvallisuuslainsäädäntöön, joka koskee voimalaitos-ten kattiloita ja niiden käyttöä. (Tukes 2016a, Tukes 2016b.)

Energiatuotantolaitoksen ostajan tai valmistajan kannattaa tutustua lainsäädäntöön ja sen määritelmiin huolellisesti välttyäkseen myöhempien muutosten lisäkustannuksilta. Monesti oma käsitys jostakin laitteesta ei vastaa viranomaisen määritelmää. Esimerkiksi höyrykattilalla tarkoitetaan Suomen lainsäädännössä, ei pelkästään höyrynkehittintä, vaan laitekokonaisuutta, jossa

- on vähintään yksi lämmitetty painelaite vesihöyryn tuotantoon
- johon kuuluu syöttöveden esilämmittimet sekä höyrystimet ja tulistimet yhdys-putkineen
- johon kuuluu tyhjennykseen, ulospuhallukseen ja ilmanpoistoon käytettävät osat
- johon kuuluu savukaasuilla lämmitettävät syöttöveden esilämmittimet, tulistimet ja välitulistimet
- käyttöturvallisuuteen vaikuttavat laitteet ja laitejärjestelmät. (Finlex 1999b.)

## 2.4 Konseptisuunnittelusta

Konseptisuunnitteluvaiheessa haetaan monipuolisesti ja avarakatseisesti vaihtoehtoja halutun tavoitteen saavuttamiseksi. Tavoitteena voi olla energiantuotannon uudistaminen tai lisääminen, päästöjen vähentäminen tai jopa kokonaan uuden tuotteen tai toimintatavan kehittäminen. (Novox Oy 2017.)

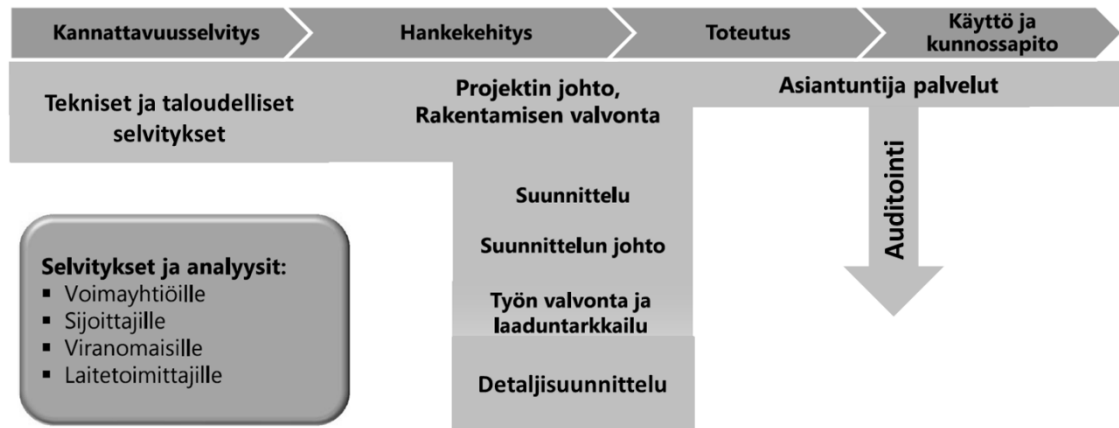
Uuden voimalaitoskonseptin suunnittelussa on ymmärrettävä nykyinen prosessi, miten asiakas arvioi ja tekee päätöksiä energiatuotantolaitoksen hankkimiseksi. Voimalaitoksen käyttäjä tai hankkija arvioi markkinoilla olevaa energiatuotantoteknologiaa ja sen soveltuvuutta omiin tarkoituksiinsa etsien kustannustehokkainta vaihtoehtoa itselleen. Siksi uuden voimalaitoksen suunnittelijan on tunnettava vaihtoehtoiset markkinoilla olevat energiatuotantotavat sekä niiden kustannusrakenne ja hinnat voidakseen suunnitella edullisemmän ratkaisun asiakkaalle kuin kilpailevat vaihtoehdot. Erilaisia projektityyppejä voivat olla uuden energiatuotantolaitoksen hankinta tai vanhan uusiminen, esimerkiksi kohteena oleva

- lämpölaite
- kylmäntuotantolaitos
- yhteistuotantolaitos
- lämpöä, sähköä ja kylmää tuottava laite
- jätelämmön hyödyntäminen energiaksi
- teollisuuden lämmön- ja, tai höyryntuotanto
- jonkin ongelmallisen jätteen hävittäminen ja hyödyntäminen energiaksi
- jonkin teollisuuden sivuvirran hyödyntäminen energiaksi.  
(BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH 2017a.)

Tällaiset projektit voivat sisältää monia osaprosesseja, kuten esimerkiksi

- energianhankinnan yleissuunnittelu ja –suunnitelma
- soveltuvuustutkimukset
- alustava laitossuunnittelu
- lupienhankintasuunnittelu
- yksityiskohtien suunnittelu
- ehdotusten kartoitus: tarjouskilpailu tai tarjousten pyytäminen
- laitoksen rakentamisen valvonta ja toimeksianto
- laitoksen seuranta, prosessien ja suorituskyvyn optimointi.  
(BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH 2017a.)

Nämä prosessit voivat jakautua tehtäväksi eri organisaatioille ja sidosryhmille, mutta sekä asiakkaan että voimalaitoksen toimittajan on hyvä tietää mitä kukin prosessi sisältää. Näitä selventää lisää kuva 7. Hyvä suunnittelu on kaiken lähtökohta ja heti alkuvaiheessa on hyvä pohtia eri tuotantomuotojen mahdollisuudet omassa järjestelmässä. Tarvekartoituksella selvitetään mihin aikaan vuodesta tai päivästä energiaa tarvitaan. Sen merkitys korostuu tuotantomuodon valinnassa ja erityisesti laitteiston mitoituksessa. Mikäli kyseessä ei ole uudiskohde, on hyvä selvittää päivittäinen, viikoittainen ja kuukausittainen energiankulutus esimerkiksi verkonhaltijan online -palvelusta. (Motiva Oy 2016b.)



Kuva 7. Voimalaitoshankkeen elinkaari. Soveltaen (Pirhonen 2014)

Ennen laitoksen hankintaa on tärkeää perehtyä tekniikkaan, pientuotannon mahdollisuuksiin sekä sitä koskevaan lakiin. Tuottaja tarvitsee tietoa mm. tarvittavista luvista, tuista, verotuksesta, verkkoon liittämisen vaatimuksista ja käytännöistä sekä tietoa liityksen sähkön myyntiin ja velvoitteisiin sähkömarkkinoilla. (Motiva Oy 2012.)

Voimalaitoshankinnan voi hoitaa halutessaan lähes kokonaan itse. Toinen vaihtoehto on ostaa kaikki ”avaimet käteen” –palveluna tai sitten voi tehdä jotain näiden väliltä. Jos laitoksen hankkii paketina, ei erillisiä suunnittelu- tai asennuspalveluita tarvita. Jos laitoksen hankkii erikseen, kannattaa teettää myös suunnittelu ja muu asennus asiantuntevalla suunnittelijalla ja asentajalla. (Motiva Oy 2016b.)

## 2.5 Pien-CHP –jätteenpolttolaitokseen soveltuva teknologia

Tämän diplomityön päätarkoituksena oli löytää teknologiaa, joka soveltuisi pien-CHP –laitoksen toteuttamiseen. Siksi tämän luvun alaluvuissa on esitetty kirjallisuudesta löytyvää tietoa, mitä vaihtoehtoja on toteuttaa eri voimalaitoksen prosessit. Luvuissa keskitytään kuvaamaan höyryvoimaprozessilla toteutettavaa energiatuotantoteknologiaa. Soveltuvaa teknologiaa etsiessä tulee vastaan monia kysymyksiä. Tässä pyritään vastaamaan esimerkiksi seuraaviin:

- Minkälaiset höyryvoimalaitosprosessin vaihtoehdot ovat olemassa pienessä kokoluokassa sähkön ja lämmön tuotantoon?
- Minkälaiset ovat voimalaitoksen poltto-, höyryvoima- ja savukaasujen puhdistusprosessit ja miten ne ovat yleensä toteutettu?
- Mitä osia voimalaitokseen tarvitaan ja on saatavilla pienessä kokoluokassa?
- Voiko voimalaitoksesta tehdä siirrettävän konttiratkaisun?
- Mitä jätteenpolttaminen merkitsee ja vaatii laitteistolta?
- Mitkä ovat jätteenpolton päästöt ja miten niitä voitaisiin hallita?

### 2.5.1 Arinapolttotekniikka ja jätepolttoaineet

Tässä luvussa on selvitetty arinatulipesän toimintaa jätteenpoltoissa. Lisäksi tarkastellaan, mistä eri jätteet koostuvat ja mitä aineita ne voivat sisältää sekä mitä tulisi ottaa huomioon polttaessa niitä arinalla.

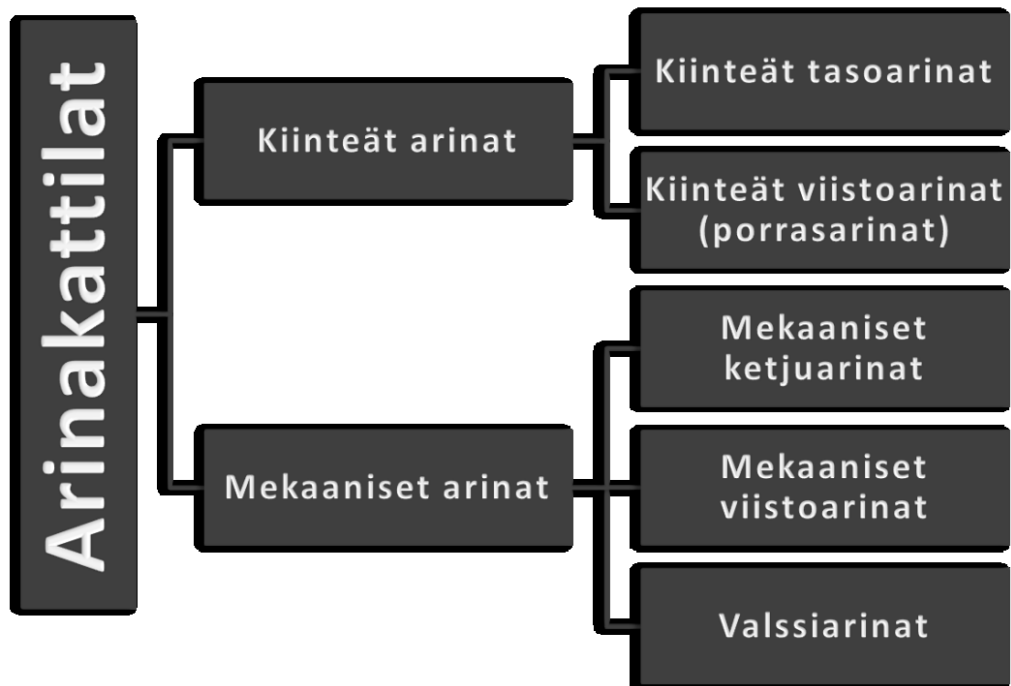
Aivan teollistumisen alusta asti ensimmäiset puuta polttavat laitokset käyttivät arinapolttotekniikkaa. Aluksi kattiloissa käytettiin kiinteitä arinoita, mutta myöhemmin mekaaniset arinat syrjäyttivät kiinteät arinat. Suomessa arinakattiloita on toimitettu polttoainete-

holtaan noin 80 MW:n kokoluokkaan asti. Lämpöteholtaan yli 10 MW olevissa laitoksissa leijupolttto on suuresti syrjäyttänyt arinapoltttoa 1980 –luvulta lähtien. Leijupolttotekniikka voi olla kiertoleijupoltttoa teholuokassa, yli 5 MW tai kerrosleijupoltttoa teholuokassa, 2...100 MW. Tätä pienemmissä yksiköissä arinapolttto on edelleen yleisin, ainakin turpeen ja puun polttomenetelmä, ja sitä käytetään eniten teholtaan alle 5 MW:n kokoluokassa kotimaisilla polttoaineilla. Kattilakoon ollessa lämpöteholtaan 2...10 MW käytetään myös kaasutuspoltttoa. (Koskelainen ym. 2006 s. 285-286, VTT Energia 1999 s. 209-210, Raiko ym. 2002, s. 466.)

Arinakattiloiden päätyyppejä ovat kiinteä tai mekaaninen arina sijoitettuna joko vaakatasoon tai viistoon, ketjuarinat tai näiden yhdistelmät. Joissakin arinatyypeissä liike ja polttoaineen sekoittuminen tuotetaan värinällä, pyörivillä rullilla tai mekaanisilla sekoittimilla (Vesanto 2006). Valmistajat ovat kehitelleet omat erikoisratkaisunsa polttoainetyyppejä ja kokoluokkaa vastaaviksi. (Koskelainen ym. 2006 s. 286.) Arinapolton etuja, ovat mm.

- mahdollisuus polttaa polttoainetta suurina partikkeleina, jolloin jätteiden esikäsitteilyä ei välttämättä tarvita,
  - suuri polttoaineen kosteuspitoisuus, joka voi olla jopa 60 %, sekä
  - alhainen omakäyttötehon tarve.
- (Koskelainen ym. 2006 s. 286.)

Jätelaitosyhdistys ry:n (2016b) mukaan pääpolttoaineena kierrätyskelvotonta yhdyskuntajätettä polttavien jätteenpolttolaitosten on arinapolttto osoittautunut varmimmaksi tekniseksi ratkaisuksi. Myös Raiko ym. (2002, s. 482) ovat sitä mieltä, että jätteiden polttoon soveltuu parhaiten nykyinen mekaanisesti liikkuva jäähdytetty porrasarinakattila, johon sovelletaan nykyaikaista entistä kehittyneempää polttotekniikkaa. Arinapoltttoa on ajan myötä paranneltu esimerkiksi erilaisilla savukaasujen takaisinkiertosysteemeillä, arinarautojen nuohous- ja jäähdytystekniikoilla sekä CFD –simuloinneilla. Arinakattilan etuja jätteenpolttossa ovat riippumattomuus polttoaineen palakoosta ja kosteudesta sekä kehittyneet nykyaikaiset automaattoratkaisut, jotka auttavat palamisen ja päästöjen hallinnassa. Arinakattilat voidaan jaotella esimerkiksi kuvan 8 mukaisesti.

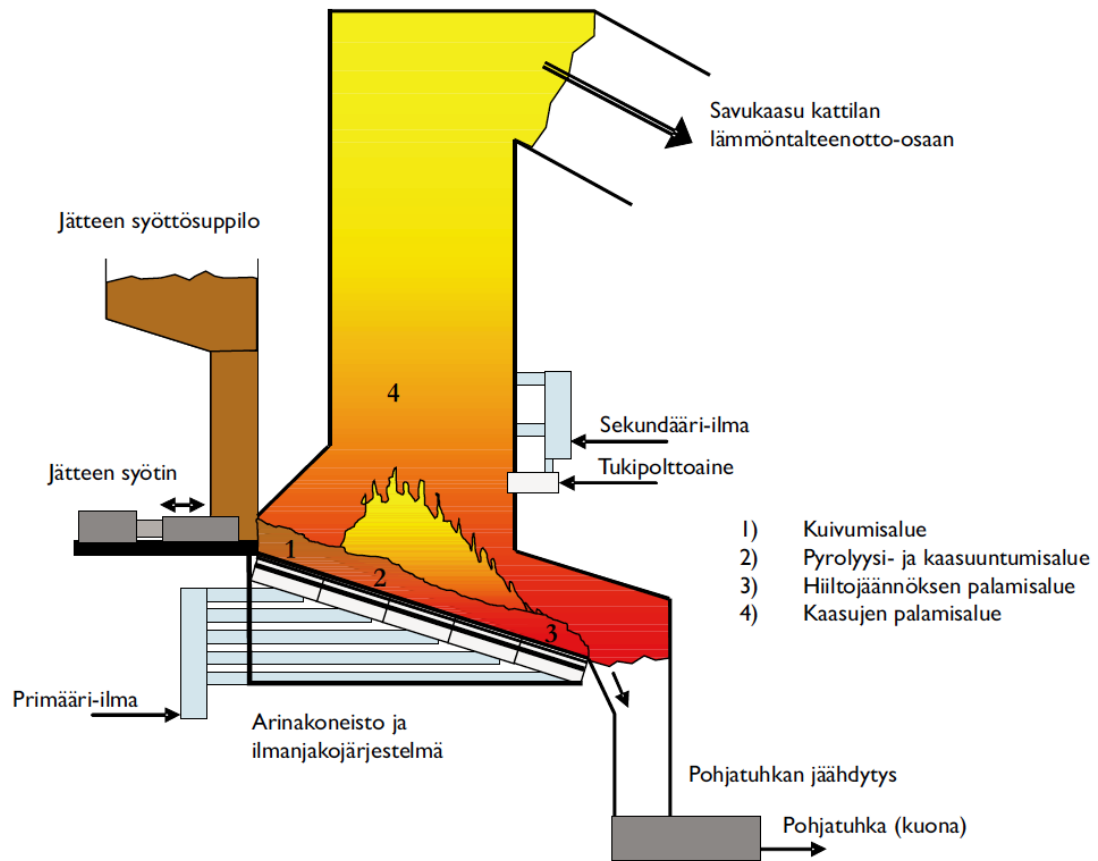


**Kuva 8. Arinapolttolaitteiden jaottelu arinan tyypin ja liikkuvuuden perusteella. Soveltaen (Huhtinen 2000 s. 147-151, Raiko ym. 2002 s. 472, 483-486, Koskelainen ym. 2006 s. 286-287)**

Arinatekniikkaa on jaoteltu myös seuraavilla määritelmillä:

1. Mekaaninen porrassarina voi olla myös edestakaisin liikkuva viistoarina, jota kutsutaan myös vuoroittain liikkuvaksi viistoarinaksi, joka voi olla myötäsytötarina tai vastaan työntävä arina, tai lyhemmin ilmaistuna vastasyöttöarina.
2. Horisontaalinen edestakaisin liikkuva tasoarina.
3. Kiinteä tasoarina.
4. Kiinteä viistoarina tai porrassarina.
5. Ketjuarina: vino tai horisontaalisesti asennettu ”spreader-stoker” –arina.
6. Pyörivä kekoarina tai vinoarina.
7. Valssiarina.
8. Kaasutuspoltto arinalla.  
(Koskelainen ym. 2006 s. 285-288, VTT Energia 1999 s. 209, Martin GmbH 2016, Raiko ym. 2002 s. 472, 484.)

Kuva 9 esittää arinan tulipesän toimintaa jätteenpoltossa. Arinan tyypistä riippumatta polttoaineen halutaan liikkuvan eteenpäin vyöhykkeet, joissa tapahtuu eri palamisvaiheet.



Kuva 9. Esimerkki arinatulipesän toiminnasta jätteenpoltossa. (Vesanto 2006)

Ensimmäisessä palamisvaiheessa kuivumisvyöhykkeessä polttoaine kuivuu, kun se lämpenee ja siitä poistuu vesi höyrynä. Pyrolyysivaiheessa polttoainepeti saavuttaa lämpötilan noin 300...500 °C, jolloin alkaa muodostua savukaasuja hapettomissa olosuhteissa ja osa polttoaineesta syttyy. Palamisprosessin kaasutusvaiheessa kaasuuntunut osa polttoaineesta palaa polttokammiossa noin 850...1100 °C lämpötilassa. Jännöshiili palaa loppuun arinan viimeisessä vaiheessa. Poltosta jäävä tuhka johdetaan arinan alta sekä sen loppupäästä esimerkiksi ruuvikuljettimilla säiliöön. Jätteen mukana tuleva kuona ja metalli jäävät arinatuhkaan (Koskelainen ym. 2006, s. 309). Liitteessä 2 on esitetty arinakattilan tehon laskentakaavoja. Arinakattilasta saadaan tehoa noin 300...1000 kW / m<sup>2</sup> polttoaineesta ja arinatyyppistä riippuen (VTT Energia 1999 s. 209). Taulukossa 1 on tarkempaa tietoa eri arinatyyppien soveltuvuudesta jätteiden polttamiseen.

Taulukko 1. Arinapolttotekniikan soveltuvuudesta jätteenpolttoon. Soveltaen (Vesanto 2006)

Prosessi /tekniikka	Tyypillinen käyttö ja soveltuvuus/rajoitukset	Kapasiteetti, uudet yksiköt	Edu	Haitat	Kustannus-kommentti.
Arinatulipesä, ilma-jäähdytteinen	Koostumukseltaan ja kappalekooltaan vaihtelevan jätteen poltto. Yleinen yhdyskuntajätteen poltossa. Poltettavan jätteen lämpöarvo 5 – 15 MJ/kg. Kiinteän yhdyskuntajätteen joukossa voidaan polttaa pieni määrä yhdyskuntalietettä ja sairaalajätettä.	5 – 30 t/h	Jätettä ei tyypillisesti tarvitse esikäsitellä. Pitkäaikainen käyttökokemus	Ei sovellu jauheille eikä nestemäisille tai sulaville jätteille. Sähköntuotannon hyötysuhde matala. Suuri pohjatuhtakan määrä	Edullinen käyttökustannus Pohjatuikka on mahdollisesti käsiteltävä ennen sijoittamista tai hyötykäyttöä.
Arinatulipesä, neste-jäähdytteinen	Poltettavan jätteen lämpöarvo 10 – 20 MJ/kg. Muutoin kuten edellä.	5 – 30 t/h	Polton säätö parempi kuin ilmajäähdytteisellä arinalla	Teknisesti edellistä vaativampi.	Investoinniltaan ilmajäähdytteistä arinaa kalliimpi.
Arinatulipesän ja rumpu-uunin yhdistelmä	Voidaan käyttää hyvin vaihtelevan jätteen polttoon. Melko harvoin käytetty	1 – 10 t/h	Hyvä pohjatuhtakan laatu.	Kapasiteetiltaan pienempiä kuin arinalatokset	Kallis investointi ja käyttö.
Kiinteä tasoarina ja mekaaninen sekoituslaitteisto	Soveltuu myös jauhemaisten jätteiden polttoon. Muu jäte on murskattava.	Yleensä pieniä.	Yksinkertainen.	Tukipolttoaineen tarve jos jätteen lämpöarvo on matala.	Kilpailukykyinen erityiskohteissa.



Suunnitellun polttoaineen tai sen seoksen koostumuksen selvittäminen on tärkeää, jotta voidaan arvioida sen soveltuvuutta polttoon. Arviointia tehdään yleensä selvittämällä polttoaineen käyttök teknisii ominaisuuksia, ellei sellaisia ole valmiiksi saatavilla. Polttoaineen käyttök teknisiksi ominaisuuksiksi voidaan lukea ne ominaisuudet, joita tarvitaan arvioitaessa polttoaineen teknistä käytettävyyttä. Tällaisia ominaisuuksia ovat, esimerkiksi

- kosteus
  - palakoko
  - tuhka ja sen pitoisuus, sulamiskäyttäytyminen, koostumus, likaantumis- ja kuonaantumisominaisuudet
  - tehollinen lämpöarvo, myös saapumistilassa
  - alkuainekoostumus
  - haihtuvat aineet
  - rikki- ja klooripitoisuus
  - korroosio-ominaisuudet
  - jauhautuvuus
  - paisuvuus
  - leipoutuvuus.
- (Raiko ym. 2002 s. 469.)

Liitteessä 3 on esitetty yhteenveto, jossa on vertailtu eri jätepolttoainejakeiden lämpötek nisiä ominaisuuksia ja alkuainepitoisuuksia. Lämpötek nistä ominaisuuksista tärkeimmät ovat lämpöarvo, haihtuvat aineet, tuhka ja kosteus (Raiko ym. 2002 s. 121-123, 469). Polttolaitteen suunnittelua varten, polttoaineen tarkemman elemantaarianalyysin avulla voidaan laskea esimerkiksi sen poltossa syntyvien savukaasujen koostumus tai adiabaattinen palamislämpötila (Lampinen & Seppälä 2010). Polttoaineen erityyppisiä lämpöarvoja voidaan laskea elementaarianalyysin avulla esimerkiksi liitteen 4 kaavoilla, jos niitä ei ole valmiiksi saatavilla.

Yksi tärkeimmistä polttoaineen selvitettävistä ominaisuuksista on sen poltosta syntyvän tuhkan sulamiskäyttäytymisen tutkiminen. Sillä voidaan arvioida esimerkiksi tuhkan kuonaantumis- ja likaantumisvaikutuksia kattilassa. Esimerkiksi kierrätyspolttoaineen tuhkapitoisuus ei aiheuta poltossa ongelmia, ellei lasin ja metallin määrä ole korkea. Teräs saadaan tuhkasta kohtuullisen helposti pois, mutta se on jo sitä ennen ehtinyt kuluttaa käsittelylaitteita. Ei-magneettiset metallit, kuten alumiini ja kupari, saadaan poistettua tuhkasta siihen soveltuvalla tekniikalla, mutta ruostumattoman metallin poistaminen on hankalaa. Lasin poisto onnistuu huonosti tuhkasta, vaikka onkin mahdollista poistaa esimerkiksi ilmaerotustekniikalla. Tuhkan aiheuttamat ongelmat polton yhteydessä ovat suurin yksittäinen syy kattiloiden ennakoimattomiin alasajoihin. (VTT Energia 1999 s. 237, Raiko ym. 2002 s. 269.)

Jätteiden seassa voi olla hyvin monenlaisia jakeita, jotka voivat päätyä keräyksen mukana polttoon, ellei niitä jalosteta kierrätyspolttoaineiksi. Näitä on kuvattu liitteessä 5, jossa on eritelty polttokelpoisia jättejakeita Tilastokeskuksen mukaan luokiteltuna. Siinä esimerkiksi kierrätyspolttoaineet kuuluvat luokkaan ”Muut bio- ja sekapolttoaineet” ja alaluokkaan ”Sekapolttoaineet”. Sen lisäksi kierrätyspolttoaineita on luokiteltu standardin EN 15359 mukaisesti, josta yhteenvetona on esitetty taulukko 2. Siinä kierrätyspolttoaineet luokitellaan kolmen ominaisuuden tai kriteerin perusteella eri luokkiin.

**Taulukko 2. Kiinteiden kierrätyspolttoaineiden luokitusjärjestelmä. (SFS-EN 2012)**

Luokitusominaisuus	Tilastollinen mitta	Yksikkö	Luokat				
			1	2	3	4	5
Tehollinen lämpöarvo (NCV)	Keskiarvo	MJ/kg (ar)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Luokitusominaisuus	Tilastollinen mitta	Yksikkö	Luokat				
Klooripitoisuus (Cl)	Keskiarvo	% (d)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Luokitusominaisuus	Tilastollinen mitta	Yksikkö	Luokat				
Elohopeapitoisuus (Hg)	Mediaani 80. prosentti-piste	mg/MJ (ar) mg/MJ (ar)	≤ 0,02 ≤ 0,04	≤ 0,03 ≤ 0,06	≤ 0,08 ≤ 0,16	≤ 0,15 ≤ 0,30	≤ 0,50 ≤ 1,00

Kierrätyspolttoaineeseen saattaa päätyä biomassaa, mikä vaikuttaa sen koostumukseen ja polttoteknisiin ominaisuuksiin. Biomassan tai –polttoaineen määritelmät vaihtelevat jonkin verran organisaatiosta riippuen. Virallisesti teollisuuden päästöistä annetun direktiivin 2010/75/EU mukaan biomassalla tarkoitetaan:

”...mitä tahansa tuotteita, jotka muodostuvat maa- tai metsätaloudesta peräisin olevasta kasviaineksesta, jota voidaan käyttää energiasisällön hyödyntämiseen polttoaineena tai sellaisia jätteitä, jotka ovat maa- ja metsätalouden kasviperäinen jäte, lämpönä hyödynnettävä elintarviketeollisuuden kasviperäinen jäte tai ensiomassan tuotannon ja massasta valmistettavan paperin tuotannon yhteydessä syntyvä kuituainetta sisältävä kasviperäinen jäte, jos rinnakkaispoltto tapahtuu tuotantopaikalla ja syntyvä lämpö hyödynnetään.”

(EUVL 2010.)

Lisäksi biomassalla tarkoitetaan korkkijätettä ja puujätettä, lukuun ottamatta puujätettä, joka voi puunsuoja-ainekäsittelyn tai pinnoituksen seurauksena sisältää halogenoituja orgaanisia yhdisteitä tai raskasmetalleja, ja johon kuuluu erityisesti tällainen puujäte, joka on peräisin rakennus- ja purkujätteestä. Rakennusten ja yhdyskuntarakennuskohdeiden purkamisesta syntyvä purkupuu kuuluu standardin kiinteät kierrätyspolttoaineet vaatimukset ja luokat SFS-EN 15359 soveltamisalaan (SFS-EN 2012).

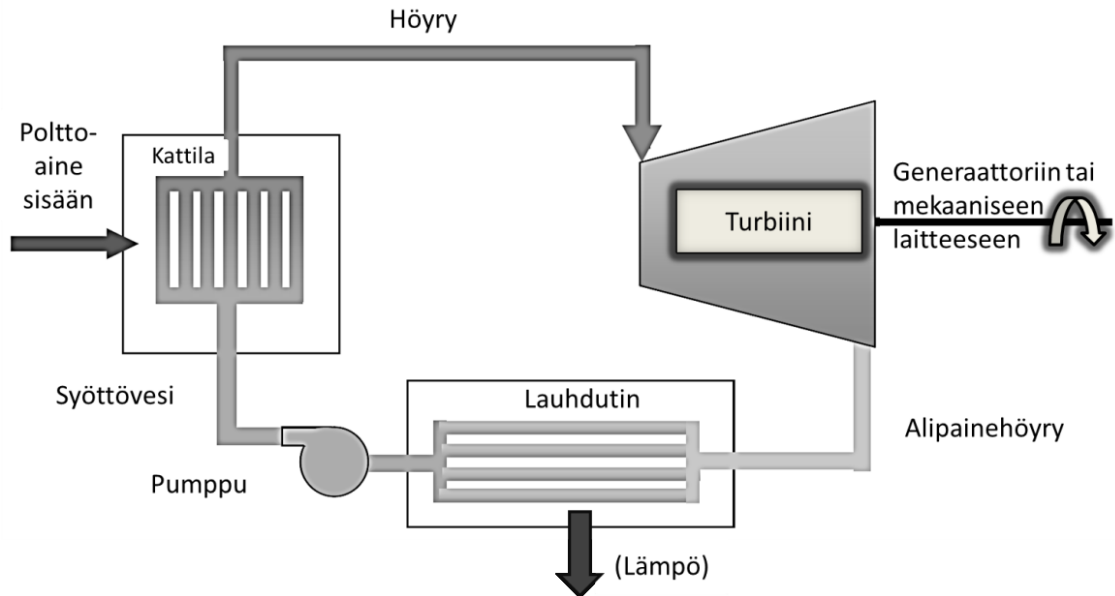
Kiinteä biopolttoaine on suoraan tai epäsuorasti biomassasta tuotettu kiinteä polttoaine (SFS-EN 2011). Kiinteä biomassa kattaa orgaanisen, biologisesta alkuperästä olevan ei –fossiilisen materiaalin, mitä voidaan käyttää polttoaineena sähkön ja lämmön tuotantoon. Standardi SFS-EN ISO 17225 sisältää kiinteiden biopolttoaineiden laatuvaatimukset ja luokat sekä raaka-aineille ja prosessoiduille materiaaleille, jotka ovat peräisin

- metsätaloudesta tai –hoidosta,
- maataloudesta ja puutarhan hoidosta tai
- vesitaloudesta.

(SFS-EN ISO 2014.)

## 2.5.2 Höyryvoimaproessi

Yksinkertaistettu höyryvoimalaitoksen prosessi sähköntuotantoon on esitetty kuvassa 10. Tulistettua höyryä käyttävä höyryvoimalaitosprosessi on nimeltään Claius-Rankine –prosessi ja se on höyryvoimalaitoksen perusprosessi, jonka mukaan höyryvoimalaitokset periaatteessa toimivat. (Wikstén 1993, Lampinen ym. 2010.)



**Kuva 10. Yksinkertaistettu höyryvoimalaitoksen tuotantoprosessi. Soveltaen (US Department of Energy... 2004)**

Höyryvoimalaitokset ovat tyypiltään joko lauhdutus- tai vastapainevoimalaitoksia. Lauhdutusvoimalaitos on pelkästään sähkön tuottamiseen rakennettu laitos. Yhteistuotantolaitos saadaan, kun lauhdutuslaitokseen lisätään sekundäärilämmön hyödyntäminen, esimerkiksi kaukolämpönä. Vastapainevoimalaitos on periaatteessa aina yhteistuotantolaitos, jolla tuotetaan sähköä ja lämpöä tai höyryä. (Koskelainen ym. 2006, s. 47-48.)

Vastapainelaitoksessa kaukolämpövettä lämmitetään turbiinin ulostulohöyryllä. Väliottolauhduksilaitoksessa kaukolämpövettä lämmitetään väliottohöyryllä ja matalapaineista höyryä turbiinin loppupäästä käytetään pelkästään sähköntuotantoon. Väliottohöyry voidaan ottaa esimerkiksi sellaisesta suuresta höyryturbiinista, jossa on selkeästi korkea- ja matalapaineosat tai se voidaan ottaa erikseen kuristusventtiilillä ennen höyryturbiinia, kuten esimerkiksi kuvan 11 pienen kokoluokan sovelluksessa. Kaukolämpöä tuottavista voimalaitoksista käytetään myös nimityksiä kaukolämpövoimalaitos tai lämmitysvoimalaitos. (Koskelainen ym. 2006, s. 297.)

Vastapainevoimalaitoksen primäärituote on lämpö, joten sen tuotantoteho mitoitetaan lämpökuorman mukaan ja sähköä saadaan tietyssä suhteessa lämmöntuotantoon. Väliottolauhduksilaitos eroaa vastapainevoimalaitoksesta siten, että kaukolämpövettä lämmitetään väliottohöyryllä ja väliottohöyryvirta määräytyy lämpötehon tarpeen mukaan. Väliottolauhduksilaitoksessa sähkön ja lämmön tuotantoa voidaan säätää tietyissä rajoissa erikseen. Lämpötehon tarpeen laskiessa voidaan höyryvirtaa turbiinille kasvattaa ja siten sähköntuotantotehoa nostaa. Näin ollen väliottolauhduksilaitos on joustavampi tuotannon suhteen kuin vastapainevoimalaitos. Toisaalta vastapainevoimalaitosta voidaan vastaavasti säätää lämpökuorman laskiessa esimerkiksi lisä- tai varalauhduttimella, jolloin sähköntuotantoteho voidaan säilyttää. Vastapainevoimalaitoksessa voidaan lisäksi kaukolämpötehoa nostaa, esimerkiksi höyryn väliotolla ennen höyryturbiinia. (Koskelainen ym. 2006, s. 297.)

Vastapainevoimalaitoksella kaukolämpöä tuotetaan lämmönsiirtimissä, joissa turbiinista tuleva höyry lauhtuu luovuttaen lämpönsä esimerkiksi kaukolämpöpaluuveteen, mutta lauhdutusvoimalaitoksessa höyrystä saatava energia jakautuu kahteen eri osaan:

1. Väliottoon saakka höyry toimii yhteistuotannossa samalla tavoin kuin vastapainelaitoksessa.
2. Matalapaineosassa höyry tuottaa vain sähköä ja toimii samalla tavoin kuin lauhdutuslaitoksessa.  
(Koskelainen ym. 2006, s. 298-299.)

Sähköntuotannossa höyryturbiinilla saadaan sitä enemmän sähkötehoa mitä suuremmat ovat höyryn lämpötila ja paine. Höyryvoimalaitoksessa käytettävän lämpötilan ja paineen ylärajat määräytyvät materiaalien kestävyysmukana. Tavallisesti voimalaitoksissa höyryn arvot ovat ylimmillään tasolla 550 °C ja 225 bar. Tasolle yli 570...600 °C lämpötiloihin ei höyryn tulistuksessa voida mennä rautaa sisältävillä höyryputkilla, koska tässä lämpötilassa alkaa nopea raudan hapettuminen, eli raudan kuumakorrosio. (Lampinen & Seppälä 2010, Huhtinen ym. 2000.) Myös savukaasujen sisältämät kaasut voivat olla syövyttäviä, eli niin sanottuja happokaasuja. Esimerkiksi klooripitoisilla jätepolttoaineilla kuumakorrosioriski alkaa, kun höyryn tulistustemperatuurilämpötila ylittää 480 °C. Pienitehoisissa kattiloissa klooriin liittyvää ongelmaa ei esiinny, koska lämpötilat jäävät yleensä reilusti alle 480 °C. (Alakangas 2000, Raiko ym. 2002 s. 284, 489, Huhtinen 2000.)

Tavanomaisessa höyryvoimalaitoksessa päästään noin 30...35 %:n sähköhyötysuhteeseen, mutta koska höyryn tulistustemperatuurilämpötilaa ei jätteenpoltossa voida nostaa yli 480 °C, niin jätevoimalaitoksen jää tasolle 20...25 %. Sähköntuotannon hyötysuhdetta voitaisiin nostaa erillisellä jälkitulistimella 30...35 %:n tasolle. Suuremmat paineet puolestaan vaativat paksumpia ja kestävämpiä materiaaleja, jotka nostavat investointikustannuksia. (Alakangas 2000, Raiko ym. 2002 s. 284, 489, Huhtinen ym. 2000.)

Vastapainevoimalaitoksessa suositeltavat matalapaineisen höyryn arvot turbiinin jälkeen ovat paineelle  $p \geq 0,6$  bar ja lämpötilalle  $T \geq 100$  °C, jotta siitä riittää vielä lämpöenergiaa kaukolämmön tuotantoon. Näitä raja-arvoja voidaan nostaa tai alentaa, jos käytetään esimerkiksi väliottohöyryä lisänä kaukolämmön tuotantoon. (Lampinen ym. 2010, Lampinen & Seppälä 2010.) Kaukolämpövesi lähtee voimalaitokselta lämpötilassa 65...120 °C ja palaa voimalaitokselle 15...65 °C lämpötilassa. Kaukolämpöverkon rakennepaine on 16 bar, mutta paine pyritään pitämään tasolla 60...400 kPa. (Koskelainen ym. 2006, s. 66-67, 113, 137.) Kaukolämmön tuotantotehon laskentakaava on esitetty liitteessä 6.

Lauhdutusvoimalaitoksen teknisen tason mitta, eli karakteristika, on sen ominaislämmönkulutus, eli kulutussuhde, kun taas vastapainevoimalaitokselle on kaksi teknisen tason mitta: rakennus- ja kulutussuhde. Vastapainevoiman rakennussuhde ilmaistaan tuotetun sähköenergian ja polttoainelämmön suhteena ja se lasketaan kaavalla (1). Rakennussuhteesta on käytetty myös nimitystä rakennusaste.

$$r = \frac{P_{e,netto}}{\phi_{kl}} \quad (1)$$

jossa

r on rakennussuhde, [-]  
 $P_{e,netto}$  on nettosähköteho, [MW]  
 $\phi_{kl}$  on prosessi- tai kaukolämpöteho, [MW].  
 (Koskelainen ym. 2006, s. 295.)

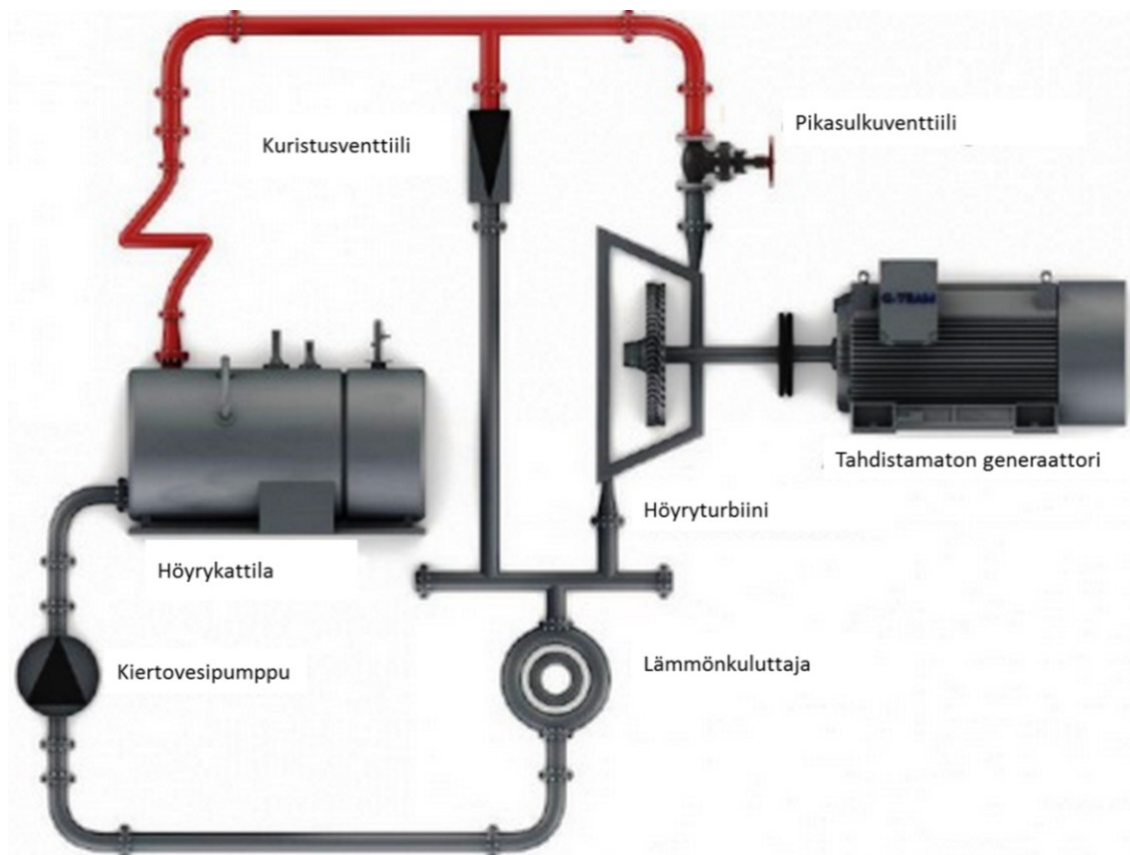
Vastapainevoiman kulutussuhde tarkoittaa vastapainesähkön lämmönkulutusta, joka ilmaistaan sähköenergian tuottoon kuluvan polttoainelämmön ja sähköenergian suhteessa. Vastapainevoiman kulutussuhde lasketaan kaavalla (2).

$$q_{vs} = \frac{P_{pa}}{P_{e,netto} + \phi_{kl}} \quad (2)$$

jossa

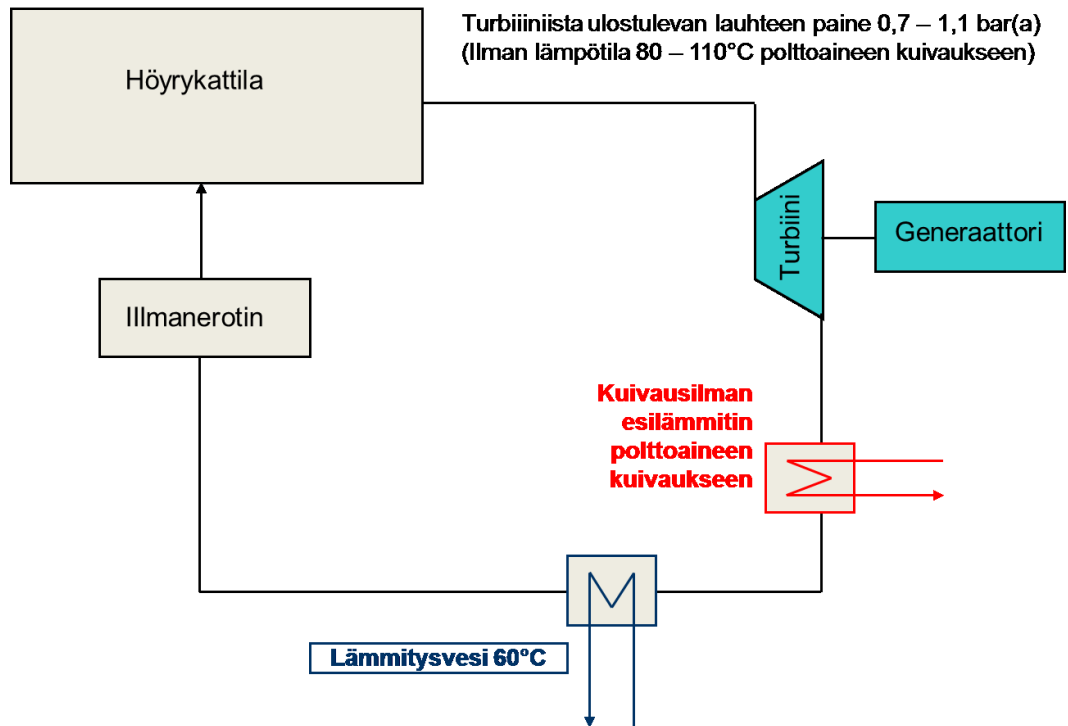
$q_{vs}$  on vastapainevoiman kulutussuhde, [-]  
 $P_{pa}$  on polttoaineteho, [MW]  
 $P_{e,netto}$  on nettosähköteho, [MW]  
 $\phi_{kl}$  on prosessi- tai kaukolämpöteho, [MW].  
 (Koskelainen ym. 2006, s. 293, 295.)

Pien-CHP –laitoksen energiatuotanto voidaan toteuttaa joko lauhdutus- tai vastapainevoimalaitostekniikalla. Kuvassa 11 on esitetty vastapainetekniikalla toteutettu sähkön- ja lämmöntuotanto pienessä kokoluokassa.



Kuva 11. Yksinkertaistettu virtauskaavio höyryturbiinin TR-100 kytkenästä höyrypiiriin. Soveltain (G-Team a.s. 2013)

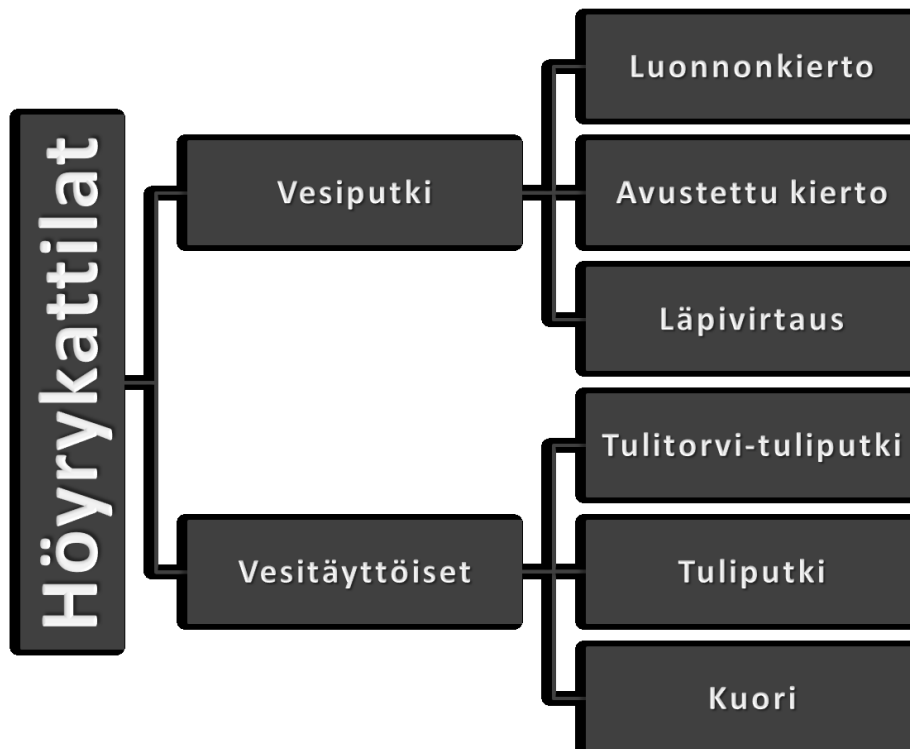
Kuvassa 12 on esimerkki siitä, miten voimantuotantoprosessi pien-CHP –laitoksella voitaisiin myös toteuttaa. Samaan prosessiin on lisätty polttoainekuivaus, jossa kuivaukseen käytettävä ilma lämmitetään höyryturbiinilta tulevan lauhteen avulla. Höyryvoimaproessiin liittyviä laskentakaavoja on esitetty liitteessä 7.



Kuva 12. Yksinkertaistettu höyryturbiinin kytkentätapa höyrykattilaan. Soveltaen (Siemens Turbomachinery Equipment... 2011)

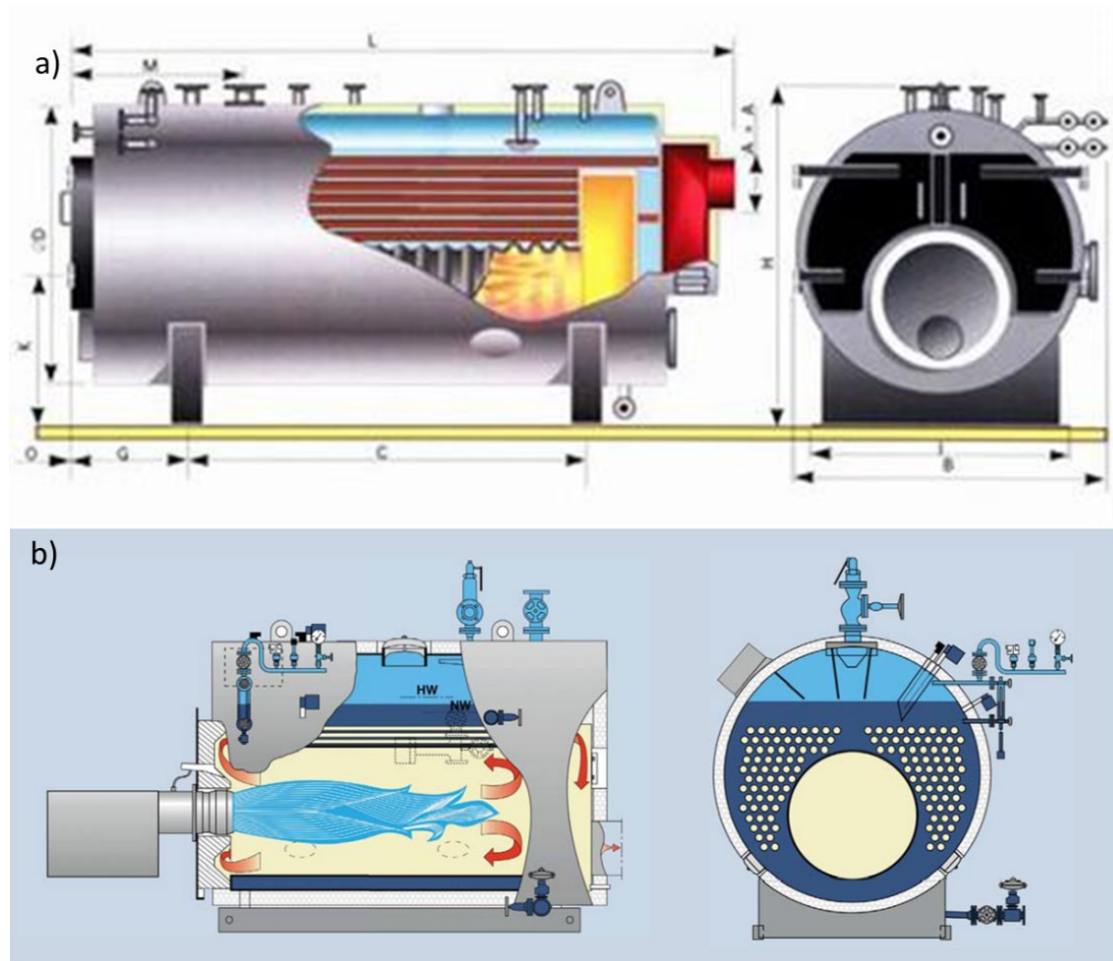
### 2.5.3 Höyrykattilatekniikka

Höyrykattilavaihtoehtoja on periaatteessa kaksi erityyppistä kylläisen tai tulistetun höyryn tuotantoon. Höyrykattilat voidaan luokitella esimerkiksi kuvan 13 mukaisesti. Jätteenpoltossa kattilasta veteen tai höyryyn siirtyvä energian osuus on noin 60...90 % riippuen jätteen tyypistä ja tekniikasta (Vesanto 2006).



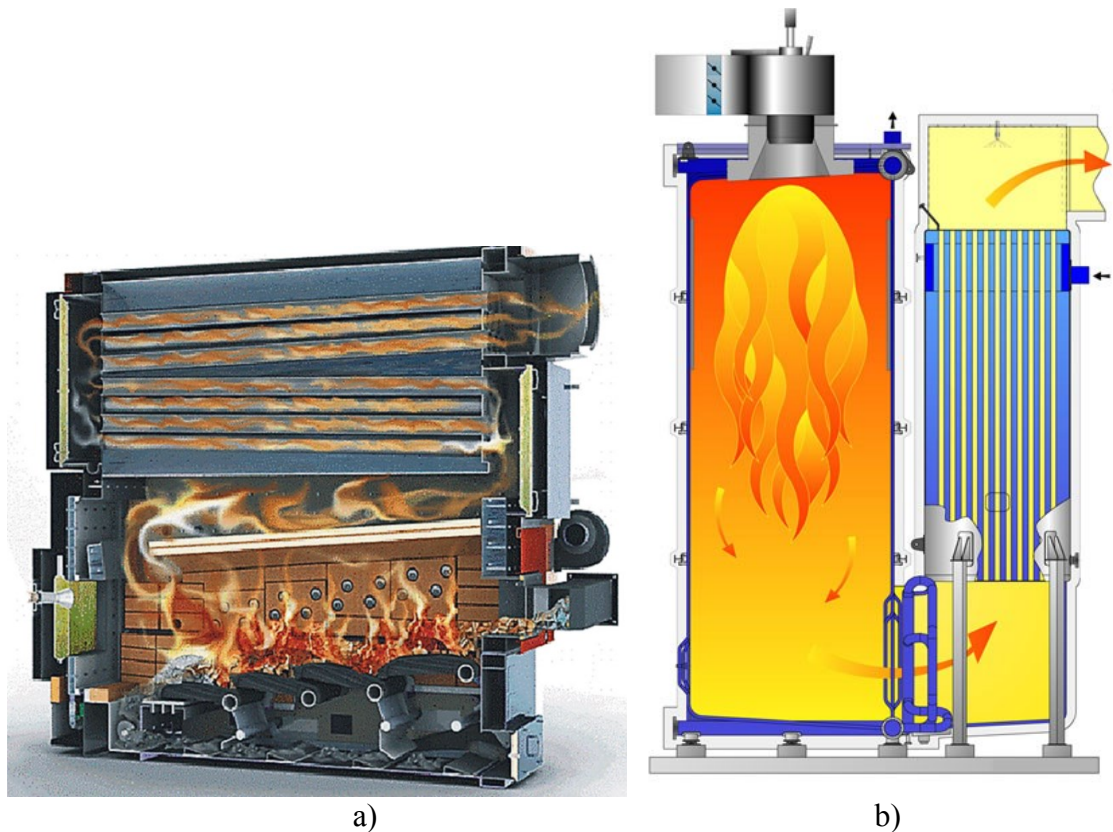
Kuva 13. Höyrykattiloiden luokittelua. Soveltaen (Koskelainen ym. 2006 s.282-283, Huhtinen 2000)

Yleisimmät höyrykattilatyypit ovat tulitorvi-tuliputkikattila ja vesiputkikattila. Tulitorvi-tuliputkikattilassa savukaasut virtaavat tulitorvessa ja tuliputkien sisäpuolella. Tulitorvi-tuliputkikattilan tehot ovat yleensä  $\leq 12 \dots 15$  MW ja paine alle 20 bar. Kahdella tulitorvella varustettuja kattiloita valmistetaan  $20 \dots 30$  MW kattilatehoon asti, mutta sitä suuremmat kattilat ovat tyypiltään vesiputkikattiloita, koska rakenteesta johtuen paksut ainevahvuudet ja suuri tilantarve tulevat epätaloudellisiksi suurempiin teholuokkiin. (Koskelainen ym. 2006, s. 282.) Kuvassa 14 on esitetty kaksi eri valmistajan tulitorvi-tuliputkikattilaa.



**Kuva 14. a) Tulitorvi-tuliputkikattila asennettuna vaakasuoraan asentoon (Taishan Group Co... 2017) ja b) malli U-ND höyryntuotantoon (Bosch Industriekessel GmbH 2012).**

Kuvassa 15 a) on esitetty arinakattilasysteemi, jossa tuliputkikattila on polttokammion päällä. Tuliputkikattiloissa savukaasut virtaavat tuliputkissa suurvesikattilan sisällä luovuttaen lämpöä ympäröivään veteen. Kolmivetoisessa tuliputkikattilassa savukaasu kulkee kahden kääntökammion kautta kolme kertaa lämmittävän pinta-alan yli ennen poistumista kattilaosasta. Tuliputkikattiloissa ei ole samanlaista tulitorvea kuten kuvan 14 b) tulitorvi-tuliputkikattilassa, vaan vettä lämmitetään ainoastaan tuliputkissa virtaavalla savukaasulla. (VTT Energia 1999 s. 209, Huhtinen ym. 2000.)

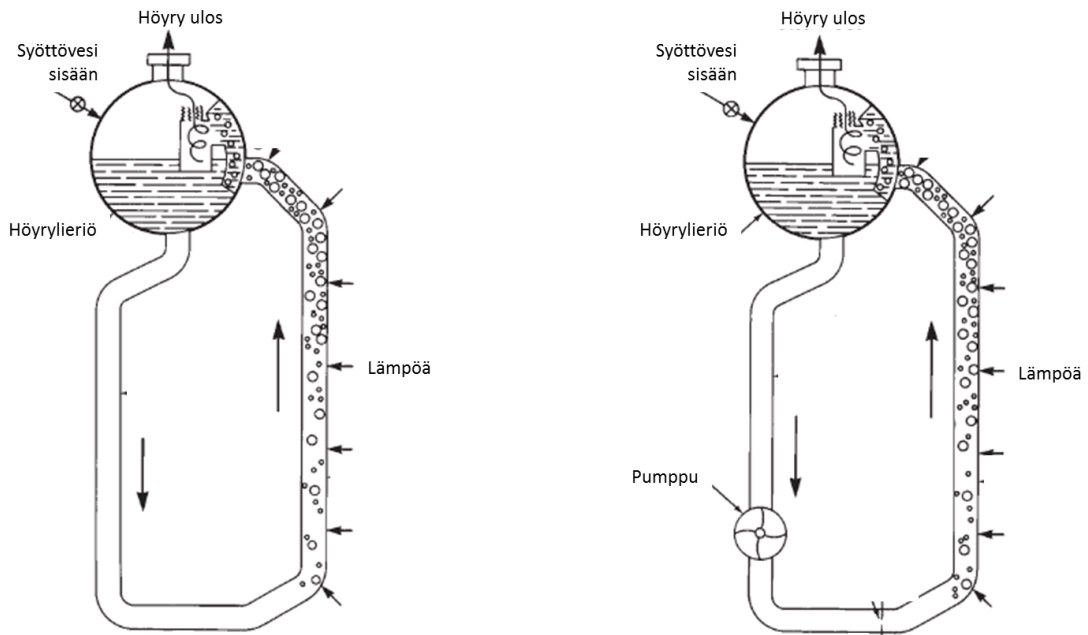


**Kuva 15. a) Arinakattilasysteemi tuliputkikattilalla (Satabio Oy 2017a) ja b) vesiputkikattila pysytysuoraan asennettuna. (KPA Unicon Oy 2014)**

Kuvassa 15 b) on esitetty myös vesiputkikattila, jossa on lisäksi syöttöveden esilämmitys polttokammion ympärillä olevalla vesivaipalla. Siinä polttoteknologia on eräänlainen pölypolttoteknologian ja perinteisen höyrykattilatekniikan kombinaatio. Pölypoltossa jauhettu kiinteä polttoaine sekoitetaan palamisilman kanssa ja sumutetaan polttokammioon. (KPA Unicon Oy 2014.)

Vesiputkikattila voi olla luonnonkiertoon perustuva tai pakotettuun kiertoon perustuva kattilatyyppejä, kuten kuvassa 16 on esitetty. Luonnonkiertoon perustuvassa vesiputkikattilassa veden ja vesihöyryn kierto höyrylieriön ja höyrystimen välillä perustuu veden ja höyryn tiheyseroon. Höyrylieriön tehtävänä on erottaa kattilan höyrystinputkissa höyrystynyt kylläinen höyry kylläisestä vedestä. Erona avustettuun tai pakkokierto-kattilaan on se, että lieriöstä vesi johdetaan pumpulla höyrystimeen, josta höyry virtaa takaisin lieriöön pumpun aiheuttaman paineen johdosta. (Huhtinen ym. 2000.)





Kuva 16. Luonnonkierto- ja pakkokierto-kattilan periaate. Soveltaen (Enggcyclopedia 2012, Huhtinen ym. 2000)

Molemmissa kiertotyypeissä höyrylieriöstä lähtevä kylläinen höyry johdetaan tulistiimiin halutun tulistetun höyryn lämpötilan saavuttamiseksi. Pakkokierrolla saadaan aikaan suurempia paineita kuin luonnonkiertoon perustuvalla systeemillä. Sen höyrystintputkisto voidaan rakentaa mihin asentoon tahansa ja on hinnaltaan edullisempi kuin luonnonkiertosysteemi. Höyrylieriön ansiosta höyry on puhtaampaa, koska suolat jäävät suurimmaksi osaksi höyrylieriön veteen toisin kuin läpivirtauskattiloissa, joissa höyrylieriö ei ole erottamassa nestettä ja kaasua. (Huhtinen ym. 2000.)

### 2.5.4 Pienten höyryturbiinien tekniikasta

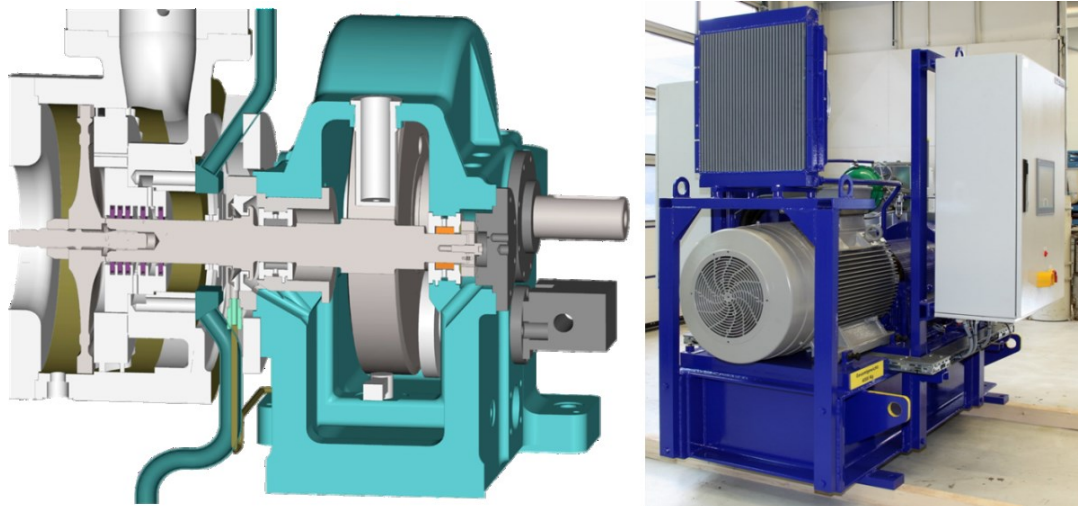
Höyryturbiinit voidaan jaotella kahteen erityyppiseen tekniikkaan siipikoneiston toimintaperiaatteen mukaan: impulssi- ja radiaaliturbiini. Tavallisesti höyryturbiineja luokitellaan kuitenkin toimintatavaltaan lauhdutus- ja vastapaineturbiineiksi, jotka kuvaavat enemmän sen soveltuvuutta kohteeseen. Lauhdutusturbiini voi olla täysin lauhtuva- tai väliottotyyppinen. Höyryturbiinin tyyppi pienitehoisessa tuotannossa on yleensä ollut vastapaineperiaatteella toimiva radiaaliturbiini, johon höyryvirta tulee kohtisuoraan höyryturbiinin akseliin nähden. Nimi ”vastapaine” tulee siitä, että vastapaineturbiinissa höyry paisuu turbiinissa ja tulee suuremmissa paineissa ulos kuin tulisi lauhdeturbiinista. Vastapaineturbiinista höyry voi tulla ulos paineissa 0,2...0,6 bar(g), mutta lauhdutusturbiinista alemmassa, 0,02...0,05 bar(g) paineissa. (Lampinen ym. 2010, Koskelainen 2006 s. 299, US Department of Energy... 2004.)

Paine bar(g) tarkoittaa painemittarin näyttämää painetta (eng. gauge), jossa ei ole ympäröivää ilmanpainetta laskettu mukaan. Toinen paineen kuvaamiseen käytetty arvo on bar(a), joka kuvaa absoluuttista painetta, johon ilmanpaine on otettu mukaan, esimerkiksi 0,2 bar(g) = 1,2 bar(a). Höyryturbiinista saatava teho riippuu läpimenevän höyryn massavirrasta sekä entalpiaerosta turbiinin yli, joka taas riippuu höyryn lämpötilasta ja paineesta. Höyryrubiinista saadaan sitä enemmän mekaanista energiaa ulos, mitä suurempi entalpiaero tai höyryn massavirta turbiinin yli ovat. Liitteessä 8 on esitetty höyryturbiinin tehon laskentakaavoja. (Lampinen ym. 2010, Koskelainen 2006 s. 299, US Department of Energy... 2004.)

Lauhdutusturbiinilla sähköntuotannon hyötysuhde on parempi, koska siinä paineen annetaan laskea alemmaksi kuin vastapaineturbiinissa. Toisaalta vastapaineturbiinilla saadaan osa lauhdelämmöstä hyödylliseen käyttöön, mikä johtaa kokonaisuutena laitoksen parempaan taloudellisuuteen. Lauhdutusturbiinin hyötysuhde on noin 30...40 %, mutta se on tavallisesti kalliimpi investointi kuin vastapaineturbiini. Vastapaineturbiinin hyötysuhde on tyypillisesti 15...35 % ja niitä on saatavilla pienemmässä kokoluokassa kuin lauhdutusturbiineja. Lisäksi vastapaineturbiinit ovat tavallisesti edullisempi investointi. (Wikstén 1993, US Department of Energy... 2004.) Höyryturbiinin ”hyvyyttä” tai sisäistä hyötysuhdetta kuvaa sen isentrooppinen hyötysuhde, joka määritellään liitteen 8 kaavalla (3). Isentrooppinen hyötysuhde voi olla alimmillaan 50 % pienillä ja jopa 90 % suurilla höyryturbiineilla (Environmental Protection Agency... 2008).

Matalapaineturbiinista poistuva höyry on kostean höyryn alueella, jolloin se sisältää nestepisaraita. Vesipisarot aiheuttavat turbiinisiipien voimakasta kulumista, minkä vuoksi turbiinista poistuvan höyryn tulisi olla vähintään 88 %:sta kaasua, eli veden (pisaroiden) massaosuus korkeintaan 12 %. (Lampinen ym. 2010, Lampinen 1997.) Suurissa höyryturbiineissa ei kuitenkaan yleensä oteta riskiä, että nestepisarot pääsisivät vaurioittamaan turbiinin siipiä, jolloin ulostuleva höyry halutaan pitää aina tulistetulla alueella. Pienissä yksivaiheisissa höyryturbiineissa voidaan käyttää kylläistä höyryä, jolloin ulostuleva höyry voi olla kostean höyryn alueella.

Kuvassa 17 on esitetty Siemensin höyryturbiinimalli SST-040, joka on suunniteltu käytettäväksi sähköntuotantoon teollisuuslaitoksissa. Se on niin sanottu hyllyturbiini, jota voidaan valmistaa sarjatuotantona nopealla aikataululla.

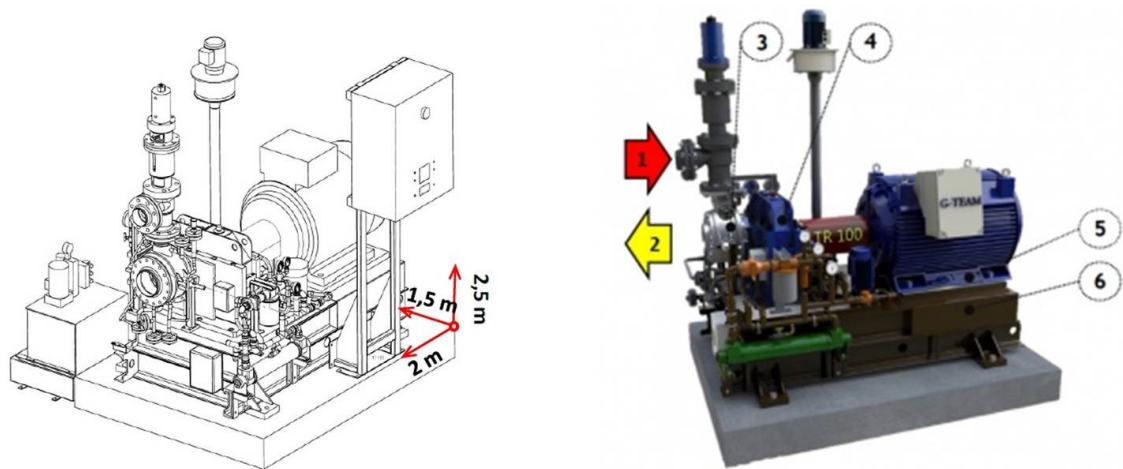


Kuva 17. Siemens SST-040 höyryturbiini. Soveltaen (Siemens Turbomachinery Equipment... 2011)

Höyryturbiini SST-040 voi käyttää kuivaa tai kylläistä höyryä ja sen operointi voidaan täysin automatisoida. SST-040 tekniset ominaisuudet:

- Sähköteho 75...300 kWe.
- Höyrynpaine  $\leq 40$  bar (a).
- Höyryn lämpötila  $\leq 400$  °C.
- Lauhteen höyrynpaine 0,1...7 bar (g).
- Tyyppi: Impulssisiipinen vastapaineturbiini.  
(Siemens Turbomachinery Equipment... 2011.)

Kuvassa 18 on esitetty toinen pienen kokoluokan höyryturbiini TR-100, jota valmistaa Tšekkiläinen yhtiö G-Team. Yhtiö on peruja Skôdan höyryturbiiniliiketoiminnasta.



- |                   |                              |
|-------------------|------------------------------|
| 1. Höyry sisään   | 4. Vaihdelaatikko            |
| 2. Höyry ulos     | 5. Asynkroninen generaattori |
| 3. Turbiinikammio | 6. Jalusta                   |

**Kuva 18. Höyryturbiini TR-100. Soveltaen (G-Team a.s. 2013)**

Höyryturbiinin TR-100 tekniset ominaisuudet:

- |                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| • Höyryn maksimipaine sisään     | 40 bar(g) |
| • Höyryn maksimilämpötila sisään | 420 °C    |
| • Höyryn maksimipaine ulos       | 6 bar(g)  |
| • Generaattorin maksimiteho      | 150 kW    |
| • Generaattorin pyörimisnopeus   | 3000 rpm. |
- (G-Team a.s. 2013.)

### 2.5.5 Päästöt ja niiden hallinta

Jätteenpolton päästöraja-arvot on esitetty liitteessä 1. Taulukossa 3 on esitetty jätteenpoltossa syntyvän puhdistamattoman savukaasun koostumus. Jotta jätteenpoltto olisi vähemmän haitallista ympäristölle, on savukaasu puhdistettava annettujen päästöraja-arvojen tasolle. Tässä luvussa käsitellään menetelmiä, joilla tähän tavoitteeseen voidaan päästä.

**Taulukko 3. Puhdistamattoman savukaasun koostumus jätteenpoltossa (kuiva kaasu, 11 % happipitoisuus). (Raiko ym. 2002, s. 488)**

Savukaasun komponentti	mg / Nm <sup>3</sup>	
	min.	maks.
Pöly, hiukkaset	2000	5000
HCl	800	3000
HF	10	100
SO <sub>x</sub> (SO <sub>2</sub> :na)	200	1500
NO <sub>x</sub> (NO <sub>2</sub> :na)	200	500
CO	10	50
TOC (C:nä)	1	20
Raskasmetallit		
Hg	0,1	1
Cd	0,1	0,5
muut	1	5
PCDD/F [ng TEQ / m <sup>3</sup> ]	1	10

Savukaasujen haitallisuuden vähentämiseksi jaetaan menetelmät yleensä primäärimenetelmiksi, joilla päästöihin pyritään vaikuttamaan polttoaineen koostumuksen tai poltto-teknisin menetelmin sekä sekundäärisiksi menetelmiksi, jotka ovat varsinaisia lisälaitteiden avulla toteutettuja savukaasujen puhdistusmenetelmiä. Polttoteknisellä menetelmällä, kuten esimerkiksi palamisilman vaiheistuksella, voidaan vaikuttaa vähentävästi typenoksidipäästöihin. Tässä luvussa käsitellään kuitenkin pääasiassa sekundäärisiä menetelmiä siten, että menetelmiä käsitellään siinä järjestyksessä, kun ne soveltuvat kyseessä olevan päästön hallintaan. Ensin käsitellään typenoksidipäästöjen hallintaa, josta siirrytään rikkidioksidien poistomenetelmiin. (Fogelholm 1994.)

Primäärimenetelmänä arinapoltossa ei juurikaan voida vaikuttaa HCl-, HF- ja SO<sub>2</sub> –päästöihin, vaan ne määräytyvät sisään syötetyn jätteen Cl-, F- ja S –yhdisteiden määrän perusteella. Poikkeus on mahdollinen Ca –yhdisteiden syöttö, mikä vähentää päästöjä, mutta heikentää pohjatuhkan laatua sitoessaan siihen muita yhdisteitä. Partikkeleihin voidaan jossain määrin vaikuttaa primääri-ilmamäärällä ja tavalla, jolla ilmaa puhalletaan arinalohkojen läpi. Pääsääntönä on, mitä suurempi kaasun nopeus jätekerroksen pinnalla, sitä suuremmat päästöt. Typenoksidien (NO<sub>x</sub>), hiilimonoksidin (CO), palamattomien hiilivetyjen C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> – ja PCCD / F –päästöt määräytyvät palamisen parametrien mukaan, jotka hallitsevat palamisen täydellisyyttä. PCCD / F –yhdisteitä syntyy merkittävästi tulipesän jälkeisissä olosuhteissa lämpötila-alueella, noin 250...400 °C, De-Novo –synteesin kautta, mutta epätäydellinen palaminen edesauttaa sitä. (Raiko ym 2002 s. 487.)

Puhdistusmenetelmiä savukaasuista typenoksidin puhdistusta varten on käytössä tai kehitteillä ainakin seuraavia päätyyppejä:

- SNCR (eng. Selective Non-Catalytic Reduction), eli selektiivinen ei -katalyyttinen vähentäminen.
- SCR (eng. Selective Catalytic Reduction), eli selektiivinen katalyyttinen vähentäminen.
- Simultaaniset menetelmät NO<sub>x</sub>- ja SO<sub>x</sub> -päästöjen vähentämiseksi: elektronisäteilymenetelmä, simultaaninen pesumenetelmä ja selektiivinen pesumenetelmä.  
(Fogelholm 1994, Raiko ym. 2002 s. 332, 350, Lampinen ym. 2010.)

Poltossa syntyvät rikkiyhdisteet aiheuttavat maaperän ja vesistöjen happamoitumista. Polton yhteydessä vapautuvan rikkipäästön suuruus riippuu polttoaineeseen sitoutuneen rikin määrästä. Valittaessa rikinpoistomenetelmää voimalaitokselle ovat tärkeimmät valintakriteerit:

- Rikinerotuskyvyn sopivuus vaatimukseen nähden.
- Kokonaiskustannukset.
- Lopputuotteen käyttömahdollisuudet.  
(Fogelholm 1994.)

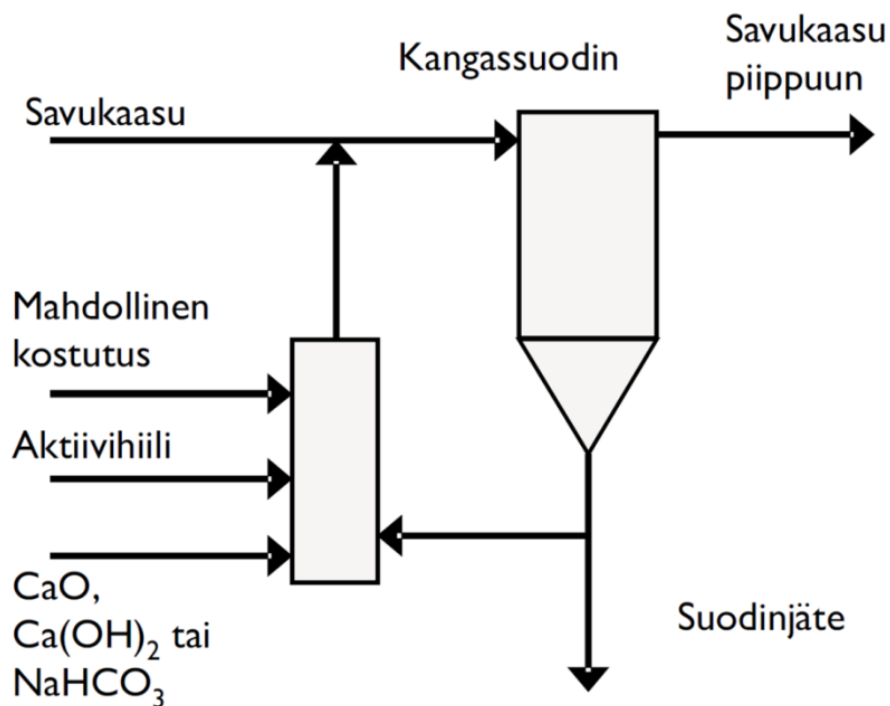
Rikinpoistomenetelmät voidaan jaotella esimerkiksi seuraavasti:

- Polton yhteydessä tapahtuvaan rikinpoistoon
  - Kuumapuhdistus hapettavissa tai pelkistävässä olosuhteissa
  - Injektiomenetelmä
  - Metalliin perustuva sorbentti
- Rikinpoistoon savukaasuista
  - Kuivat menetelmät
  - Puolikuivat menetelmät
  - Märät menetelmät
  - Lopputuotemenetelmät: regeneratiivinen tai ei-regeneratiivinen
  - Talteenottomenetelmät  
(Fogelholm 1994, Koskelainen ym. 2006 s. 289, 311, VTT Prosessit 2004 s.154)

Kuiva, puolikuiva ja märkä rikinpoistomenetelmä ovat periaatteessa simultaanisia savukaasujen puhdistusmenetelmiä, joilla pyritään poistamaan kaksi tai useampi haitallinen epäpuhtaus savukaasuista. Rikinpoistomenetelmän sopivuus riippuu polttoaineen rikkipitoisuudesta ja laitospuhtautuksesta. Uusille pienen kokoluokan arinakattilalaitoksille suositellaan lievien normien täyttämiseksi kuivaa tai puolikuivaa rikinpoistomenetelmää. Tiukkojen normien täyttämiseksi suositellaan kustannustehokkaasti kuivaa, puolikuivaa tai märkää menetelmää joko regeneratiivisesti tai ei-regeneratiivisesti. (Fogelholm 1994.)

Letkusuodatin, toiselta nimeltään pussi- tai kuitusuodatin, on yleinen suurien laitosten rikinpoistolaite. Se voi olla yksinkertainen reaktori, jonka letkujen pinnalla sorbentille saadaan pitkä kontaktaika savukaasujen kanssa. Rikinpoistotulosta voidaan vielä parantaa, jos savukaasuja kostutetaan jäähdyttämällä savukaasua lämmönvaihtimella tai ruiskuttamalla vettä savukaasuihin. Tällaisella prosessilla voidaan päästä yli 60 %:n rikinerotusasteeseen. Rikinpoistoastetta voidaan parantaa kierrättämällä reagoimatonta sorbenttia takaisin suodattimeen. (Fogelholm 1994.)

Kuvassa 19 on esitetty kuivan savukaasunpuhdistuksen periaatekuva. Menetelmä on yksinkertainen ja mahtuu pieneen tilaan. Sillä saavutetaan jätteenpoltoasetuksen mukaiset päästöraja-arvot edellyttäen, että poltettava jäte on tasalaatuista. Verrattuna puolikuivaan menetelmään, kalsiumoksidin ( $\text{CaO}$ ) kulutus on tyypillisesti hieman suurempi. Natriumbikarbonaattia ( $\text{NaHCO}_3$ ) käytetään sorbenttina kalsiumhydroksidin ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) tilalla silloin, kun savukaasun lämpötila on puhdistusvaiheessa  $150\text{...}160\text{ }^\circ\text{C}$  tai korkeampi, koska kalsiumhydroksidi ei näin korkeissa lämpötiloissa reagoi tehokkaasti savukaasun rikki- ja klooriyhdisteiden kanssa. Natriumbikarbonaatti on hinnaltaan kalliimpaa kuin kalsiumoksidi. (Vesanto 2006.)



Kuva 19. Savukaasujen kuivan puhdistusmenetelmän periaate. (Vesanto 2006)

Seuraavassa taulukossa 4 on esimerkki kuivalla savukaasujen puhdistusmenetelmällä saavutetuista päästömääristä. Myös Tekesin (2009) mukaan kuivalla menetelmällä voidaan saavuttaa Jäppi-projektin tulosten mukaan liitteessä 1 olevat jätteenpolton ilmaan johdettavien päästöjen raja-arvot.

**Taulukko 4. Esimerkki päästöraja-arvojen alittamisesta kuivalla savukaasujen puhdistusmenetelmällä. (Makkonen 2015)**

<b>Norrköpingin jätteenpolttokattilassa mitatut kaasumaiset päästöt käytettäessä kuivaa savukaasujen puhdistusta aktiivihiiilen ja sammutetun kalkin syötöllä, VTT:n Jäppi-projekti.</b>		
	Uppmätt rengas (100 % last)	
CO	4	mg/Nm <sup>3</sup> tg
NH <sub>3</sub>	0,22	mg/MJ
N <sub>2</sub> O	0,6	mg/MJ
TOC (som kol)	0,1	mg/Nm <sup>3</sup> tg
NO <sub>x</sub>	46	mg/MJ
Stoft	0,29	mg/Nm <sup>3</sup> tg
Dioxin och furan (TEQ)	0,0052	ng/Nm <sup>3</sup> tg
HCl	6,4	mg/Nm <sup>3</sup> tg
SO <sub>2</sub>	<0,15	mg/Nm <sup>3</sup> tg
HF	<0,03	mg/Nm <sup>3</sup> tg
Cd+Tl	0,019	µg/Nm <sup>3</sup> tg
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	24	µg/Nm <sup>3</sup> tg
Hg	2,1	µg/Nm <sup>3</sup> tg

Voimalaitoksen polttoprosessissa suurin osa tuhkasta poistuu pohjatuhkana ja vain pieni osa lentotuhkana. Arinakattilalla poltettaessa kotimaisia kiinteitä polttoaineita, savukaasujen puhdistukseen riittää hiukkasten poistoon sykloni tai sähkösuodatin, koska suurin osa tuhkasta jää arinalle. Myös pesureita on käytetty sekä lämmön talteenottoon kosteiden polttoaineiden savukaasuista että savukaasujen puhdistukseen. Savukaasupesurin materiaali- ja komponenttivalinnat on tehtävä huolella, jotta varmistetaan hyvä käytettävyys ja alhaiset kunnossapitokustannukset. Suurten investointikustannusten takia märkämenetelmä sopii parhaiten suuriin peruskuormalaitoksiin (Fogelholm 1994, VTT Prosessit 1999, s.237.) Taulukossa 5 on esitetty yhteenveto eri hiukkaspäästöjen erottelulaitteiden eduista ja haitoista 1...50 MW kokoluokan voimalaitoksiin.

**Taulukko 5. Poltossa syntyvien pienhiukkasten erotusmenetelmien soveltuvuus 1...50 MW laitoksiin. Soveltaen (Savolainen ym. 2009)**

Tekniikka	Soveltuvuus	Edut	Haitat
Sykloni/multisykloni	Arinakattilat 1–50 MW Kerrosleijukattilat 5–50 MW	Halpa investointi ja alhaiset käyttökustannukset Vaatii vähän tilaa Voidaan lisätä olemassa oleviin kattiloihin	Suuri painehäviö Huono erotusaste pienhiukkasille Herkkä polttoaineen laadun vaihtelulle Erotusaste heikkenee tyypillisesti osateholla
Sähkösuodatin	Arinakattilat 3-50 MW Leijukattilat 5-50 MW (kerros- ja kiertoleiju)	Hyvä erotusaste ja alhaiset käyttökustannukset Pieni painehäviö	Korkeahkot investointikustannukset Soveltuvuus olemassa oleviin laitoksiin tapauskohtaista, koska vie paljon tilaa
Kuitusuodatin	Arinakattilat 5-50 MW Leijukattilat 5-50 MW (kerros- ja kiertoleiju)	Hyvä erotusaste myös pienillä hiukkasilla Poistaa myös raskasmetalleja ja kaasumaisia yhdisteitä	Suuri painehäviö Korkeahkot investointi- ja käyttökustannukset Herkkä palamisolosuhteille Soveltuvuus olemassa oleviin laitoksiin tapauskohtaista, koska vaatii tilaa
Pesuri	Arinakattilat 5-50 MW Leijukattilat 5-50 MW (kerros- ja kiertoleiju)	Yhtäaikainen kaasu- ja hiukkasmaisten päästöjen poisto Mahdollistaa lämmön talteenoton savukaasuista	Korroosio ja eroosio Lisääntyneet jäteveden käsittelykustannukset Huono erotustehokkuus pienimmille hiukkasille

Eräs yksinkertainen ilmaan johdettavien päästöjen pienentämiskeino on savukaasun takaisinkiertosysteemi, jossa osa puhdistettua tai puhdistamatonta savukaasusta kierrätetään takaisin polttokammioon. Tämä voi tapahtua sekoittamalla takaisin kierrätettävää savukaasua primääri-ilmaan, jota puhalletaan arinana alta, tai puhaltamalla sitä sellaiseen tulipesään. Takaisinkierrolla pyritään vähentämään typenoksidien syntyä pienentämällä palamisvyöhykkeen happipitoisuutta, parantamalla polttoaineen ja ilman sekoitumista ja laskemalla tulipesän lämpötilaa. Savukaasuista otetaan noin 10...25 % kokonaisuudesta takaisinkiertoon. (Fogelholm 1994.) Esimerkiksi Schmid energy solutions:n (2017) kattilat voidaan varustaa savukaasun takaisinkierrolla, jolla voidaan estää sellaisten polttoaineiden poltossa syntyvän tuhkan sintraantumista, joilla on matala tuhkan sulamispiste, alentamalla sillä polttokammion lämpötilaa.

### 2.5.6 Pien-CHP -jätteenpolttolaitoksen konttiin asentamisesta

Markkinoilla olevat pienet lämpö- tai voimalaitokset toimitetaan usein konttiratkaisuuksina ja ne voidaan ottaa käyttöön ”avaimet käteen” –periaatteella. Joiltain osin tilaaja joutuu itse rakentamaan ja täydentämään laitteistoa saadakseen toimivan kokonaisuuden. (Haavisto 2010.) Kontteihin modulaarisesti modifioitu pien-CHP –laitos on helpommin liikuteltavissa kuin kiinteä voimalaitos. Se voidaan kuljettaa kontteina käyttökohteeseen, jossa loput kokoonpanosta voidaan suorittaa paikan päällä. Lisäksi sitä voidaan käyttää väliaikaisena energiatuotantoratkaisuna, joka on helppo purkaa ja siirtää tarvit-



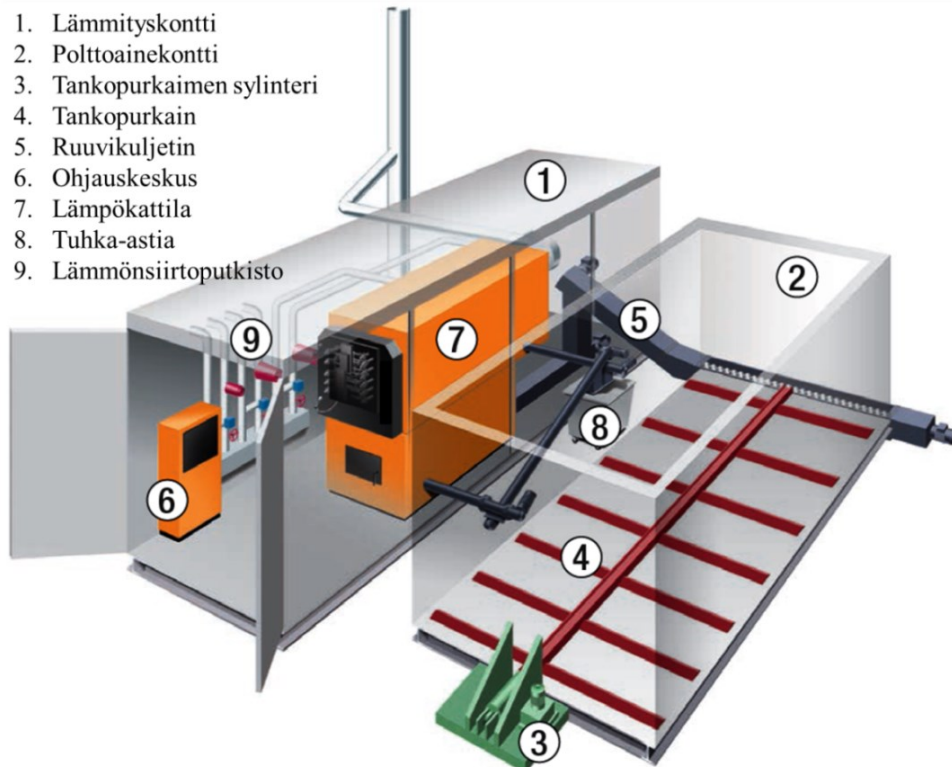
taessa, esimerkiksi kohteen omaisuudenmuutostilanteissa tai halutessa vaihtaa lämmitysmuotoa.

Kuvassa 20 on esitetty erilaisia kontteja ja niihin asennettuja lämpölaitoksia. Jotkut valmistajat rakentavat kontit itse, eivätkä käytä esimerkiksi standardisoituja merikontteja alustana. Tilavaruksen ollessa rajallinen, voidaan kuvan 23 mukaista kokoonpanoa muuttaa esimerkiksi kuvan 20 mukaiseksi, jolloin laitoksen maapinta-alaa on saatu pienennettyä laittamalla kaksi tai kolme konttia päällekkäin.



Kuva 20. Erilaisia kontteja ja niihin asennettuja lämpölaitoksia. (Schmid energy solutions 2017, A.P. Bioenergietechnik GmbH 2016, Satabio Oy 2017b)

Kuvassa 21 on esimerkki konttiin integroidusta lämpövoimalaitoksesta sekä sen viereen asennetusta polttoainesäiliökontista tankopurkaimilla varustettuna.



Kuva 21. Kontteihin modifioitu lämpövoimalaitos ja polttoainesäiliö. Soveltaen (Schmid energy solutions 2017)

Kontteja on saatavilla hyvin erilaisia riippuen halutusta käyttötarkoituksesta. Kansainvälisen mittastandardin täyttävä kontti on ISO-kontti ja CSC on kansainvälinen standardi kontin kunnolle. Käytetyn kontin CSC –voimassaolokilpi kertoo, kauanko CSC on kyseisessä kontissa voimassa. CSC tarkistuksella tarkistetaan kontti tietyn standardin mukaan konttivarikolla, jolloin selviää voidaanko CSC voimassaoloaika jatkaa. (Scandic Container Oy 2015a.)

Kontteja saa perinteisten päätyovien lisäksi esimerkiksi sivusta-avattavina, liukuovilla varustettuna, molemmista päädyistä avattavina sekä pressusta tehdyllä katolla varustettuna. Saatavilla on myös näyttelykontteja, joissa kontin kaikki seinät voidaan tehdä lasista sekä kiinteiksi tai kokonaan aukeaviksi. Kontteja saa myös lisävarusteltuina esimerkiksi sähköistettynä, ilmastoituna, eristettynä, lämmitettynä sekä hyllyillä, telineillä tai vaihtolavakiskoilla varustettuna. Konttien valmistajat sekä myös siirrettäviä voimalaitoksia valmistavat yritykset toimittavat mittatilauskontteja asiakkaan tarpeiden mukaisesti. Taulukossa 6 on esimerkkejä erilaisista konteista, mitä markkinoilta on saatavilla. (Scandic Container Oy 2015b.)

**Taulukko 6. Erilaisia kontteja ja niiden ominaisuuksia. (Scandic Container Oy 2015b, Ariterm Oy 2017)**

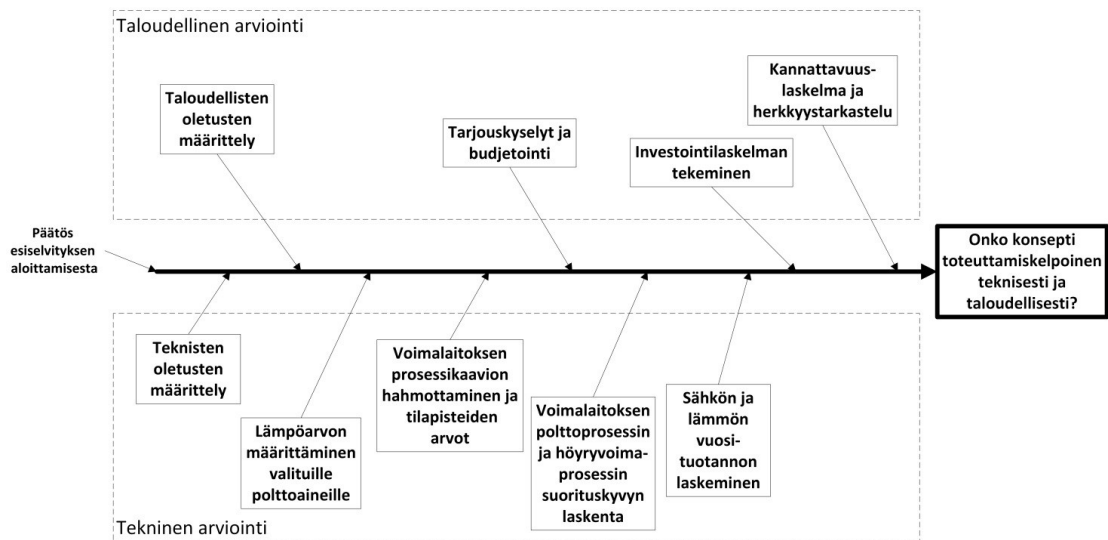
Toimittaja	Nimike	Kontin tyyppi	Teholuokka, kW	Sisämitat			Paino, (kantavuus), kg	Lisätietoja
				Pituus, mm	Leveys, mm	Korkeus, mm		
Scandic Container Oy	Merikontti	40'DC (ISO) (Dry Cube)	-	12 030	2 340	2 370	4000 (26 000)	saatavilla myös versio, jossa sisäleveys + 9 cm
	Korkeampi merikontti	40'HC (High Cube)	-	12 030	2 340	2 690	4000 (26 000)	saatavilla myös versio, jossa sisäleveys + 9 cm
	Katosta aukeva kontti	40'OT (Open Top)	-	12 015	2 340	2 240	4300 (26000)	Saatavana myös modifioituna
	Ympäristökontti	40'	-	12 030	2 340	2 370	4000 (26 000)	Erilaisten ympäristölle haitallisten aineiden lakisääteeseen varastointiin tarkoitettu kontti, sis. valumallas, saatavana myös modifioituna
	Eristekontti	40'IC (Insulated Container)	-	12 030	2 340	2590, 2890	4000 (26 000)	Vaihtoehtoinen rikkiäinen 40'RC pakkas- tai lämpökontti on edullisempi
Ariterm Oy	Pellettikontti	BKP700-1000	700 - 1000	8 990	3 990	4 380	-	Seinämitat

Se, millaisia kontteja tarvitaan pien-CHP –laitokseen, riippuu siitä, millaisiin olosuhteisiin laitos tulee ja mikä on tilattavan laitoksen tilavarausmahdollisuus. Suomen olosuhteisiin tuleva konteista moduuleittain koottu voimalaitos voidaan eristää ja sähköistää siten, että se säilyy hyvin myös talvipakkasilla, vaikka se ei olisikaan käytössä. Luvussa 4 kuvan 23 mukaisessa kokoonpanossa on mahdollista myös väliseinien poisottaminen tai ilmanvaihtokanavien asentaminen niin, että laitoksesta vapautuva hukkalämpö voidaan käyttää hyödyksi kaikissa, ainakin toisissaan kiinni olevissa, konteissa. Polttoainevalivarasto voidaan joutua erikseen lämmittämään ja eristämään, jos vaarana on materiaalin jäätyminen polttoainevalarastossa tai kuljettimissa.

### 3 Teknitaloudelliset tutkimusmenetelmät

Tässä luvussa käsitellään niitä tutkimusmenetelmiä ja aineistoa, jota tarvittiin pien-CHP –laitoksen teknitaloudellisessa arvioinnissa. Luvussa 4 esitetään tuloksia tässä luvussa 3 käytetyin menetelmin. Tässä työssä teknitaloudellinen soveltuvuustutkimus oli luonteeltaan tiedon hakemista kirjallisuudesta ja taulukkolaskentaa. Taulukoita ja laskelmia tehtiin MS Excel –taulukko-laskentaohjelmalla (lyhenne MS eng. Microsoft). Kuvia muokattiin MS Power Point –ohjelmalla. Prosessikaaviot piirrettiin käyttäen MS Visio -piirto-ohjelmaa.

Kuvassa 22 on esitetty tässä työssä käytettävän teknitaloudellisen arvioinnin läpivientiprosessi. Keskinuoli kuvaa aikaa ja siihen kytkeytyvät laatikot eri prosessin vaiheita toteutusjärjestyksessä. Teknisillä arviointimenetelmillä etsittiin parhaiten sopivaa voimalaitosprosessia jätteenpolttolaitokseen, eli minkälaiset poltto-, höyryvoima- ja savukaasujenpuhdistusprosessit soveltuisivat konseptiin. Teknisistä arviointimenetelmistä saatiin voimalaitokselle tekniset reunaehdot ja suorituskykyarvot taloudellista laskentaa sekä lopuksi herkkyystarkasteluja varten.



Kuva 22. Kalanruotodiagrammi esiselvityksen prosessista.

Taloudellisilla arviointimenetelmillä selvitettiin, minkälaisia pääkomponentteja markkinoilta on saatavissa ja mihin hintaan. Voimalaitoksen kannattavuutta tarkasteltiin ensin etsimällä kirjallisuudesta tietoa, miten pien-CHP –laitoksen kannattavuutta voitaisiin arvioida. Sitten valittiin tietyt kriteerit ja laskentamallit, joilla kannattavuutta arvioitiin. Tähän tarvittiin tietoa esimerkiksi voimalaitoksen kustannusrakenteesta sekä Suomen markkinoilla vallitsevista sähkön- ja lämmön hinnoista sekä koroista. Näitä käytettiin teknisten ja taloudellisten laskelmien pohjana.

Laskelma alkoi keskimääräisten teoreettisten arvojen laskemisesta voimantuotantoprosessille ja päättyi taloudellisen kannattavuuden arvioimiseen. Voimantuotantoprosessi käsitti sähkön- ja lämmöntuotannon. Laskelman suorittamiseksi jouduttiin tekemään karkeita oletuksia esimerkiksi laitoksen tulevasta toiminnasta sekä sähkön ja lämmön hinnoista.

### **3.1 Taloudelliset arviointimenetelmät**

Tässä luvussa käydään läpi niitä tutkimus- ja laskentamenetelmiä, joilla voimalaitoksen tekninen soveltuvuus ja kannattavuus voidaan arvioida. Näitä tietoja sovellettiin luvussa 4 tehtyyn tutkimukseen.

#### **3.1.1 Pääkomponenttien saatavuus, valmistajat ja hinnat**

Pääkomponenttien saatavuus, valmistajat ja hinnat ovat selvitetty kirjallisuuden perusteella, tutkimalla laitteiden valmistajien kotisivuja ja esitteitä sekä tekemällä tarjouskyselyjä sopiviin yrityksiin. Näistä löydettyjä tuloksia esitellään luvussa 4.2.

#### **3.1.2 Yhteistuotantolaitoksen kustannukset**

Voimalaitoksen kustannukset muodostuvat voimalaitoksen toimituksesta eli laitteiden hankinnasta ja asentamisesta sekä käytön vaatimista kustannuksista. Lisäksi kustannuksia tulee rakennuksista, liittymistä ja lupien hankinnasta. Tässä luvussa esitetään miten yhteistuotantolaitoksen kustannukset yleensä jaotellaan ja miten ne muodostuvat. Mitä tarkemmin nämä kustannukset saadaan selvitettyä kirjallisuudesta tai tarjouskyselyistä, sitä varmemmin päästään lähemmäksi todellista kustannusrakennetta ja ennustetta voimalaitoksen kannattavuudesta. Tässä luvussa esiintyvät kustannuserät kootaan yhteen luvussa 4.4.1.

Voimalaitoksen kustannukset jaetaan yleensä kahteen eri osaan: kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. (Koskelainen ym. 2006 s. 312–313, VTT Prosessit 2004, s.180.) Voimalaitoksen kiinteitä kustannuksia ovat,

- investointikustannukset eli pääomakustannukset
- kiinteät käyttö- ja kunnossapitokustannukset: sis. varastojen korko, esim. polttoaine- ja varaosavarasto, henkilöstökustannukset; voimalaitoksen henkilöstön palkat, muut kulut (terveydenhuoltokulut sosiaalikulut), vuotuiset huolto- ja kunnossapitokustannukset; perushuolto, kiinteistöhuolto, lämmityskulut, vakuutukset.

(Koskelainen ym. 2006, s. 312.)

Pirilä & Mankki (2003) ovat arvioineet investointikustannuksista rakennuskustannusten karkeasti jakautuvan seuraavasti:

- Koneet ja laitteet höyryvoimalaitokselle; kattila, höyrypiiri, turbiini 50...65 %.
- Sähkötekniset laitteet 10...15 % .
- Voimalaitosrakennus 10...20 %.

Jos tiedetään voimalaitoksen voimalaitoksen investointikustannusten summa tai budjettilähintä, voidaan arvioida vuotuiset pääomakustannukset esimerkiksi annuiteettimenetelmällä, johon liittyvät laskentakaavat on esitetty liitteessä 9. On arvioitu, että Suomessa käytössä olevien kiinteillä polttoaineilla toimivien CHP -laitosten investointikustannukset ovat olleet noin 1400...4800 € / kW (Aaltonen & Ukkonen 2008).

Muuttuvia kustannuksia ovat

- polttoainekustannukset
- muuttuvat käyttö- ja kunnossapitokustannukset: käyttöaineet (vedenkäsittely-, kemikaali- ja tuhkan käsittelykustannukset), varaosat ja yllättävät kunnossapitokustannukset
- muut muuttuvat kustannukset: päästöjen rajoittamiskustannukset, omakäyttö-sähkö, kunnossapidon aineet ja tarvikkeet.  
(Koskelainen ym. 2006, s. 313, 314.)

CHP –laitoksen energiahankinnan vuosikustannukset voidaan laskea esimerkiksi liitteen 9 kaavalla (3). Energiahankintakustannukset (vuodessa) voidaan jakaa erikseen lämmön- ja sähkönhankintakustannuksiin ja ne muodostuvat

- investoinnin vuosittaisesta pääomakustannuksesta (annuiteetti)
- polttoainekustannuksesta (suunnitellun tai toteutuneen käytettävän polttoaineen ostot)
- laitoksen käyttö- ja kunnossapitokustannuksista vuodessa
- laitoksen käyttöhenkilökunnan palkoista vuodessa
- omakäyttö-sähköstä ja muista kustannuksista vuodessa, kuten esimerkiksi tappiot energian myynnistä alle markkinahinnoin tai ostoista yli markkinahinnoin, tappiot finanssijohdannaisista.  
(Turunen 2004, Pirilä & Mankki 2003.)

Kannattavuustarkastelua varten kustannuksia ei välttämättä tarvitse jakaa sähkön ja lämmön osille. Yleensä riittää tarkastella yhteistuotantolaitoksen kokonaiskustannuksia ja vertailla niitä vaihtoehtoisten hankintatapojen kokonaiskustannuksiin. (Koskelainen ym. 2006, s. 316–317.)

### **3.1.3 Lainsäädännön vaikutus voimalaitoksen kustannuksiin**

Tässä luvussa tarkastellaan, miten lainsäädäntö saattaa vaikuttaa pien-CHP –laitoksen kustannuksiin ja suunnitteluarvoihin, kun kyseessä on jätteenpolttolaitos. Suurimmat lisäkustannukset jätteenpoltossa aiheuttaa investoinnit savukaasujen puhdistus- ja mittausjärjestelmiin, joita ei tarvita esimerkiksi biopolttoaineita käyttävillä pien-CHP –laitoksilla.

Luvussa 2.3 kuvattiin jätteenpolttoon liittyvää Suomen ja EU:n lainsäädäntöä. Koska jäteliiketoiminta, mukaan lukien jätteiden poltto, on hyvin säänneltyä toimintaa, sisältyy siihen suurempi poliittinen riski kuin esimerkiksi biomassapohjaiseen energiatuotantoon. Riski voi realisoitua esimerkiksi lakisääteisten maksujen tai verojen nousuna tai päästöraja-arvojen tiukentumisena.

Voimalaitoksella on yleensä jonkinlaiset käyttöhenkilökunnan kustannukset, vaikka laitos voi olla pitkälle automatisoitu. Joissakin tapauksissa käyttöhenkilökuntaa ei tarvita, mutta laitoksella on aina oltava joku vastuuhenkilö, joka vastaa laitoksen asianmukaisesta toiminnasta. Käyttöhenkilökunnalta vaaditaan tietty pätevyys riippuen esimerkiksi laitoksen koosta, veden tai höyryn paineesta tai polttoaineen tyypistä. Voimalaitoksen käyttäjältä vaadittava pätevyyskirja kannattaa tarkistaa Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksestä painelaiteturvallisuudesta 953/1999. (Finlex 1999b.) Käyttöhenkilökunnan osalta täysin miehitetyn laitoksen henkilöstökulut voivat olla jopa 20 000 € / kk, kun laitoksella vaaditaan olevan jatkuvasti vähintään yksi henkilö paikalla (Pirilä & Mankki 2003). Tällä voi olla jo merkittävä vaikutus pienen voimalaitoksen investoinnin kannattavuuteen.

Lainsäädännön aiheuttamia lisäkustannuksia voidaan välttää, kun pienen kokoluokan jätteiden polttamiseen perustuva voimalaitos suunnitellaan siten, että

- vältetään ympäristölupahakemuksen aiheuttamista aikataulu- ja lisäkustannuksilta
- pysytään voimalaitoksen käyttölaitteiden osalta sellaisilla lämpötila- ja painealueilla, että vältetään painelaitteiden rekisteröinniltä
- investoidaan voimassa olevien BAT –määräysten mukaisiin laitteisiin, jolloin vältetään myöhemmiltä tuotannon keskeytyksiltä ja lisäinvestoinneilta
- vältetään täysin miehitetyn laitoksen tapaukselta.

### **3.1.4 Voimalaitosinvestoinnin kannattavuuden tarkastelu**

Edellisissä luvuissa 3.1.2 ja 3.1.3 tarkasteltiin kuinka yhteistuotantolaitoksen kustannukset muodostuvat ja kuinka lainsäädäntö voi vaikuttaa voimalaitoksen investointi- ja käyttökustannuksiin. Tässä luvussa tarkastellaan niiden pohjalta miten pien-CHP –laitoksen kannattavuutta voidaan arvioida.

Yksinkertaisin tapa saada peruskäsitys laitoksen kannattavuudesta on laskea tarkasti sähkön- ja lämmöntuotannon arvo ja vähentää siitä kaikki voimalaitostoimintaan liittyvät kulut. Tarkasteltava kokonaisuus voi olla koko yritys tai tietty hankekokonaisuus, kuten voimalaitoksen toimitus tai sen operointi. (Pirilä & Mankki 2003.) Yhteistuotantolaitoksen kannattavuutta voitaisiin arvioida myös seuraavilla tavoilla:

1. Arvioidaan sähköntuotannon tuotot tarkastelujaksolla ja vähennetään ne kustannuksista. Erotusta käsitellään lämmöntuotannon kustannuksena, jota verrataan muihin lämmöntuotannon vaihtoehtoihin.
2. Valitaan lämmölle laskennallinen myyntihinta sekä arvioidaan sähkön tulevat myyntihinnat ja lasketaan näiden perusteella eri vaihtoehtojen nettonykyarvot (lyhenne NPV, eng. Net Present Value). (Pirilä & Mankki 2003.)

Näitä vielä tarkempi laskelma edellyttää laitoksen käytön laskentaa esimerkiksi tuntitasolla, kulutuksen muuttuessa vähitellen vuodesta toiseen, kun uusia asiakkaita liittyy tai lähtee sähkö- tai lämpöverkosta. Tällöin olisi selvitettävä tunneittain, millä tavoin laitosta käytetään ja laskettava kustannukset sen perusteella. Sähkön- ja lämmöntuotannon eri vaihtoehtojen edullisuusvertailussa tarkempaan lopputulokseen päästään, kun otetaan huomioon

- voimalaitosten tekniset ominaisuudet kustannusten laskemisessa, kokonaistehojen ja rakennusasteiden vaihtelurajojen määrittämisessä
- herkkyysanalyysi, jossa tuottovaatimusta muutetaan suhteessa laskentakorkoon
- herkkyysanalyysijä hintakehityksen suhteen esimerkiksi polttoaineelle, lämmölle ja sähkölle
- hankkeen ajoitukseen, kuten rakentamisen alkamiseen vaikuttavat päätökset suhteessa, esimerkiksi rahoitusmarkkinoihin, inflaatioon tai yleiseen talosutilanteeseen, eli milloin voimalaitosta kannattaa alkaa rakentamaan, jotta saadaan suurin tuotto. Viivästetty päätöksenteko voi olla optio, joka kannattaa sijoittaa analyysien avulla omaan päätöksentekoon.

(Pirilä & Mankki 2003.)

Kannattavuuden laskentamenettelyssä arvioidaan sellaiset kassavirrat, joihin päätökset vaikuttavat. Hankkeen tuottovaatimuksena voidaan käyttää laskennan pohjana yrityksen omaa pääomarakennetta ja sille asetettua tuottovaatimusta. Tuottovaatimus määräytyy pohjimmiltaan yleisten korko- ja tuottotasojen ohella hankkeen omasta riskiprofiilista. Kun tuottovaatimus on tiedossa, voidaan laskea erilaisten kassavirtavaihtoehtojen (lyhenne CF, eng. Cash Flow) nettonykyarvot ja niistä edelleen odotusarvot. Kannattavuuslaskentaan kannattaa ottaa mukaan vain olennainen tieto, eli käytännössä olennaisimmat muuttujat ja parametrit, koska epävarmuustekijöitä otetaan usein liikaa mukaan, jolloin työmäärä ja virhetulkintojen mahdollisuudet kasvavat. (Pirilä & Mankki 2003.)

Takaisinmaksuaika kertoo, missä ajassa investointi on maksanut itsensä takaisin (TKK 2002). Yksinkertainen takaisinmaksuaika on yleensä se aika vuosina, jolloin investoinnista saatavat tulot ovat kumulatiivisesti yhtä suuret kuin alun perin investoinnin kokonaiskustannus. Yksinkertaisen ja koron huomioon ottavan takaisinmaksuajan kaavat ovat esitetty liitteessä 9.

Investoinnin takaisinmaksuajan laskeminen on hyvä menetelmä laskettaessa mahdollista sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksen kannattavuutta. Hankkeen epävarmuuksien arviointiin voidaan käyttää menetelmää, jossa verrataan kahta eri tapaa hankkia sähkö ja lämpö. Voidaan esimerkiksi tarkastella tilannetta, jossa kohteeseen rakennetaan lämpölaite ja sähkö hankitaan ostamalla. Tätä verrattaisiin tapaukseen, jossa hankitaan yhteistuotantolaitos, joka tuottaa osaksi tai kokonaan tarvittavan sähkön ja lämmön. (Aaltonen & Ukkonen 2008.)

Pitkä takaisinmaksuaika on merkki suuremmasta epävarmuudesta. Yhteistuotantolaitoksen tapauksessa voidaan ajatella takaisinmaksuajan olevan aika, jossa sähköntuotannon tuomat säästöt vastaavat lisäinvestointien määrää. Kannattavuuden edellytyksenä on silloin se, että takaisinmaksuaika on lyhyempi kuin investoinnin käyttöikä. (Aaltonen & Ukkonen 2008.)

Annuiteettimenetelmän ajatuksena on muuntaa investointiin kuuluvat eriaikaiset suoritukset keskenään yhtä suuriksi vuosisummiksi, annuiteeteiksi, jotta ne olisivat vertailukelpoisia keskenään. Investointi on kannattava, mikäli vuosittaiset tulot ovat suuremmat kuin menot. (TKK 2002.) Vuosikustannusten laskentakaava on esitetty liitteessä 9.

Nykyarvomenetelmällä (diskonttausmenetelmä, nykyarvolaskenta) voidaan saattaa eriaikaiset suoritukset vertailukelpoisiksi. Menetelmässä kaikki tulevaisuuden suoritukset kerrotaan diskonttauskertoimella, jolloin saadaan suorituksia vastaavat nykyarvot, PV (eng. Present Value). Jotta investointi olisi kannattava, tulee kaikkien suoritusten nykyarvojen summan NPV (Net Present Value) olla suurempi tai yhtä suuri kuin nolla, eli nettonykyarvon tulee olla investoinnille vaadittavalla korolla (diskonttauskorko) lasketuna positiivinen tai nolla. Useamman investoinnin vertailussa edullisin on se, jonka NPV summa on suurin. (TKK 2002, Pirilä & Mankki 2003.)

Sijoitetun pääoman tuotolla, ROI (eng. lyhenne Return Of Investment) voidaan arvioida, montako prosenttia investointi tuottaa vuosittain sen pitoaikana suhteessa siihen sijoitettuun pääomaan. Sijoitetun pääoman tuotto voidaan laskea liitteen 9 kaavalla (10).

Voimalaitoksen tuotot perustuvat energian myyntiin tai omakustannussäästöön sekä mahdolliseen porttimaksujen välttämiseen. Seuraavassa listassa on lueteltu mahdollisia keinoja saada tuloja pien- CHP -laitoksella:

1. Sähkön omakäytön korvaaminen.
2. Sähkön myynti spot-hinnoin markkinoille (energiayhtiöt, sähkönmyyntiyhtiöt, sähkön tukkumyyjät ym.).
3. Sähkön myynti ulkopuolisista myyntisopimuksista, jos spot-hinta tai sähkön oma ostohinta pystytään ylittämään.
4. Tuotot sähkökaupan taloudelliseksi suojaamiseksi hankituista finanssijohdannaisista (elspot futuurit tai forwardit).
5. Ostolämmön tai vaihtoehtoisen kalliimman lämmön omatuotannon korvaaminen omalla halvemmalla tuotannolla.
6. Lämmön myynti asiakkaille erillissopimuksin.
7. Lämmön myynti paikalliselle kaukolämpöyhtiölle.
8. Porttimaksujen välttäminen, käytettäessä omia jätejakeita polttoaineena.

Jätettä hyödyntävä toimija voi tehdä säästöjä esimerkiksi porttimaksuissa (Myllymaa ym. 2008). Taulukossa 7 on esitetty yritysten porttimaksuja Suomessa eri jätejakeille. Hinnat eivät sisällä arvonlisäveroa ja punnitusmaksuja. Jos jätteet poltetaan, tulee ottaa huomioon, että tuhka on myös hävitettävä tai läjitettävä yleensä kaatopaikalle, jolloin porttimaksuilta ei täysimääräisesti vältytä. Esimerkiksi Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy:llä (2016) oli kattilatuhan porttimaksu ilman veroja ja punnitusta 65,00 € / t.



**Taulukko 7. Eri jätelajeille asetettuja porttimaksuja Suomessa vuonna 2016. (Pirkanmaan jätehuolto 2017, Kiertokapula Oy 2017, Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy 2016)**

Hinnat, € / t	Jätehuoltoyhtiö			Keskiarvo, € / t
	Pirkanmaan Jätehuolto	Kiertokapula Oy, Hämeenlinna	Päijät- Hämeen Jätehuolto	
Sekajäte	140,00	134,05	131,50	135,18
Biojäte	95,00	111,35	79,00	95,12
Energiajäte	130,00	100,00	45,00	91,67
Sekalainen jäte tai yhdyskuntajäte	140,00	134,05	131,50	135,18
Hevosen lanta (lanta ja kuivike)	33,00	38,71	79,00	50,24
Teollisuusjäte	140,00	149,19	153,40	147,53
Rakennus- ja purkujäte	130,00	149,19	131,50	136,90

Energian hintoja tarvitaan kannattavuuslaskelman tekemiseksi. Sähkön ja lämmön hinnat vaihtelevat kuluttajatyypin ja energialähteen mukaan. Esimerkiksi kuluttaja maksaa sähköstä eri hinnan, mitä sähkön myyjä saa myymästään sähköstä pohjoismaiseen sähköpörssiin, Nord Pooliin. Pohjoismaisen sähköpörssin spot-hinta Suomen alueella oli vuonna 2016 keskimäärin 32,45 € / MWh (SVT 2016c). Sähkön kuluttajalle hinta sisältää erilaisia veroja, siirtomaksuja tai muita maksuja, jolloin hinta on yleensä aina pörs-sihintaa suurempi. Sähkön kuluttajahinnat Suomessa syyskuussa 2016 olivat keskimää-rin eri kuluttajaryhmille

- L2 (pientalo, osittain varaava sähkölämmitys, sähkön käyttö 20 000 kWh / vuosi), 116,8 € / MWh,
- M1 (maatilatalous, ei sähkölämmitystä, sähkön käyttö 10 000 kWh / vuosi), 143,2 € / MWh,
- M2 (maatilatalous, karjatalous, huonekohtainen sähkölämmitys, sähkön käyttö 35 000 kWh/vuosi), 120,9 € / MWh,
- T7 (Yritys- ja yhteisöasiakkaat 500 – 1999 MWh / vuosi), 85,5 € / MWh. (SVT 2016d.)

Lämmön hinta riippuu lämmönhankintaan käytetystä polttoaineesta, kaukolämmön hinnasta tai sähkön hinnasta. Kaukolämmön hinta oli rivi- tai pienkerrostalolle 77,36 € / MWh (SVT 2016b). Energiateollisuus ry:n (2016b) mukaan Suomessa vuonna 2015 kaukolämmön hinnan Energiateollisuudelle raportoitujen tilastojen aritmeettinen keskiarvo oli 82,8 € / MWh.

## 4 Uusi voimalaitoskonsepti

Tämän luvun alaluvuissa esitetään tutkimuksen tulokset soveltamalla luvuissa 2 ja 3 esitettyjä asioita. Saadut tulokset ovat tämän diplomityön päätarkoitus, eli syy uuden pien-CHP –laitoksen teknistaloudelliseen soveltuvuustutkimukseen. Tämä luku alkaa esityksellä minkälaista uutta konseptia on suunniteltu ja miten.

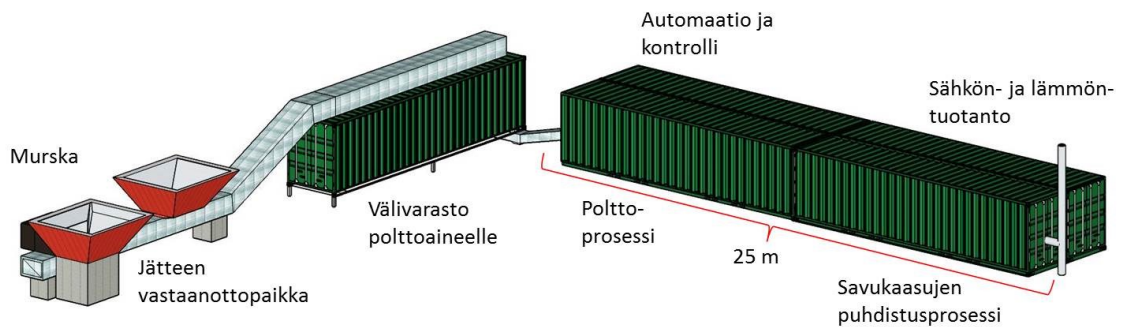
Ferroplan Oy kehittää uutta konseptia, jolla voidaan polttaa jätteitä, jotka on valmistettu teollisuuden sivuvirroista, yhdyskuntajätteestä tai maatalousjätteistä. Tarkoituksena on myydä asiakkaille siirrettäviä pien-CHP –laitoksia hajautettuun sähkön- ja lämmöntuotantoon ensisijaisesti ulkomaille, mutta myös Suomeen. Konseptin suunnittelu sisältää esimerkiksi seuraavia työvaiheita:

- Esiselvitykset.
- Laaja soveltuvuustutkimus.
- Rahoitussuunnitelma.
- Pilot –laitoksen suunnittelu ja rakentaminen.
- Tekniikan todentaminen.
- Liiketoimintasuunnitelma.
- Markkinatutkimukset.

Konseptin suunnittelussa on lähdetty liikkeelle siitä, että Ferroplan Oy aikoo rakentaa pilot-laitoksen Orimattilaan testatakseen toimiiko konseptiin suunniteltu tekniikka. Testilaitos toimisi referenssinä, jolla tekniikka voidaan todentaa asiakkaille. Pilot –laitos on tarkoitus toteuttaa ensin käyttämällä olkea polttoaineena, mutta se varustetaan soveltuvaksi myös jätteenpoltoon.

Koska markkinoilta ei löytynyt sellaista monipolttoainekattilaa, joka soveltuisi suunnitelluille jätejakeille, päätettiin arinapolttosysteemi suunnitella itse niille soveltuvaksi. Myös polttoainenkäsittelyjärjestelmä, joka tässä työssä jätetään käymättä läpi, joudutaan suunnittelemaan ja valmistamaan pääosin itse. Muuten konseptin suunnittelun lähtökohtana on ollut täysin valmiin ja toimivaksi todetun tekniikan hankinta ulkopuolelta. Mitään uutta ei ole haluttu kehittää tai keksiä vaan konseptin suunnittelun lähtökohtana on ollut pääosin olemassa olevan tekniikan uudelleen järjestäminen.

Konseptin suunnittelussa lähdettiin liikkeelle siitä, että mahdollisimman suuri osa polttoaineen sisältämästä energiasta saataisiin hyötykäyttöön sähköksi ja lämmöksi. Tämä tarkoittaa myös mahdollisimman pitkää käyntiaikaa vuodessa, jolloin teknologian on oltava niin toimintavarmaa, että voimalaitosta voidaan käyttää peruskuorman tuotantoon luotettavasti, eli vähintään 8000 h / a (tuntia vuodessa). Seuraavassa kuvassa 24 on esitelty hahmotelma laitoksesta sekä suunnitellut tuotantoarvot.



- Jätteenpolttokapasiteetti 2 000 – 6 500 t / vuosi
- Nimellisteho 1,0 MW
- Lämmitysteho 0,35 – 0,96 MW<sub>th</sub>
- Sähköteho 40 – 100 kW<sub>e</sub>
- Prosessin kokonaishyötysuhde 96 % (parhaissa olosuhteissa)
- Täyttää EU:n asettamat direktiivit jätteenpoltosta:
  - Päästöt ilmaan

**Kuva 23. Hahmotelma ja tuotantoarvoja suunnitellusta voimalaitoskonseptista.**

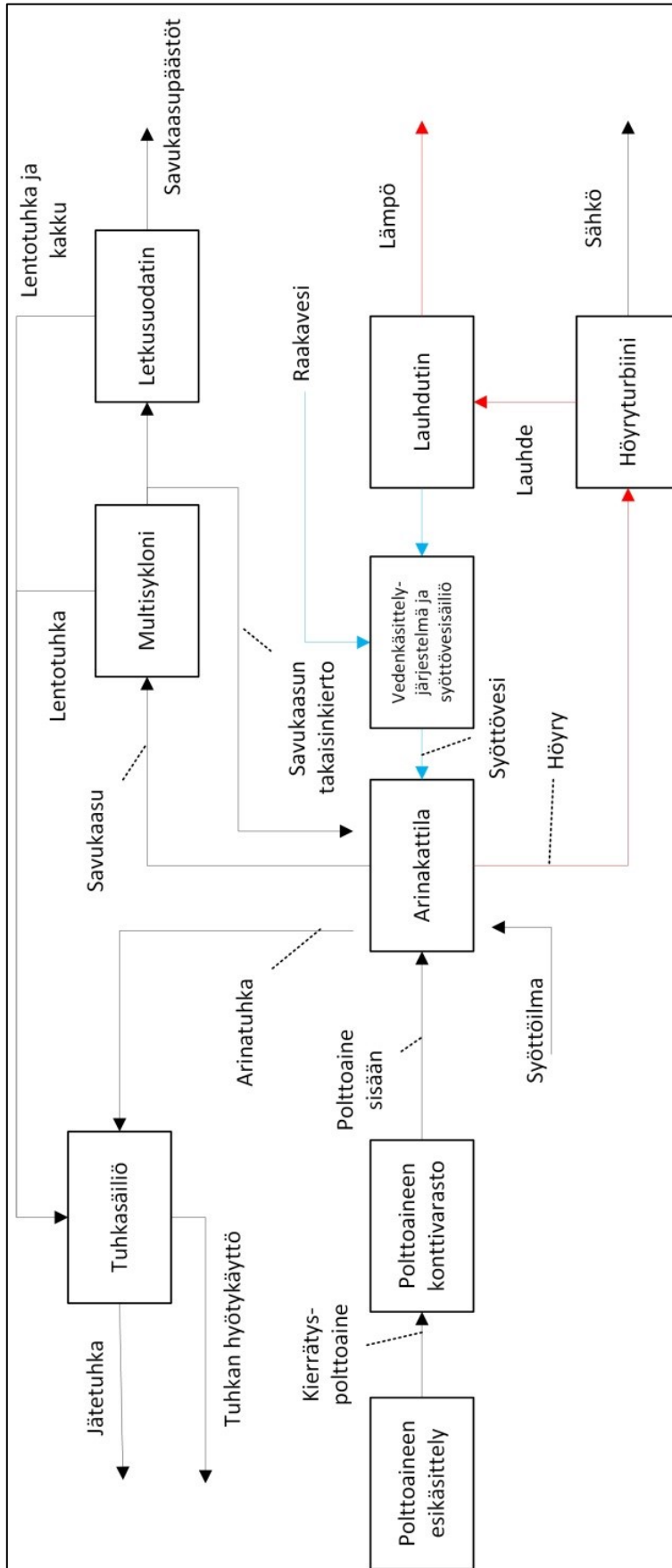
Konseptin suunnittelussa lähdettiin liikkeelle siitä, että jokainen pien-CHP –laitoksen prosessi asennetaan omaan konttiinsa. Prosessit kontteihin on alustavasti jaettu seuraavasti:

1. Välivarasto polttoaineelle: polttoaineen purku hydraulisilla tankopurkaimilla.
2. Polttoprosessi: arina-höyrykattila –systemi.
3. Höyryvoimaprozessi: sähkön ja lämmön tuotanto höyryturbiinilla.
4. Savukaasujen puhdistusprosessi: kuiva tekniikka kemikaali-injektiolla.
5. Automaatio ja kontrolli: ohjaus- ja mittakeskus sekä huoltotarviketilat.

Modulaarinen konttiratkaisu helpottaa kuljetusta sekä nopeuttaa käyttöönottoa, kun eri prosessit on suunniteltu siten, että ne voidaan yhdistää laippaliitoksien asennuspaikalla. Lisäksi voidaan olettaa lopputuloksen olevan laadukkaampi kuin paikalla koottu, koska järjestelmät voidaan etukäteen tarkastaa.

Polttoaineensyöttöjärjestelmässä on kaksi erillistä vastaanottosuppilaa. Toisesta voidaan syöttää sellaista palavaa materiaalia, joka on valmiiksi sopivassa palakoossa. Liian suuren palakoon jäte voidaan syöttää toisesta suppilosta ja murskata sopivaksi. Tarvittaessa polttoaineen käsittelyyn voidaan lisätä esimerkiksi seula, metallinerotuslaite, ruuvi- tai höyrykuivuri lietteelle. Spontaanin palon välttämiseksi tai räjähdysvaaran torjunnan varmistamiseksi voidaan asentaa esimerkiksi kemikaaliruiskutus tai vesisuihkutus polttoainevarastokonttiin, murskaan tai kuljettimiin.

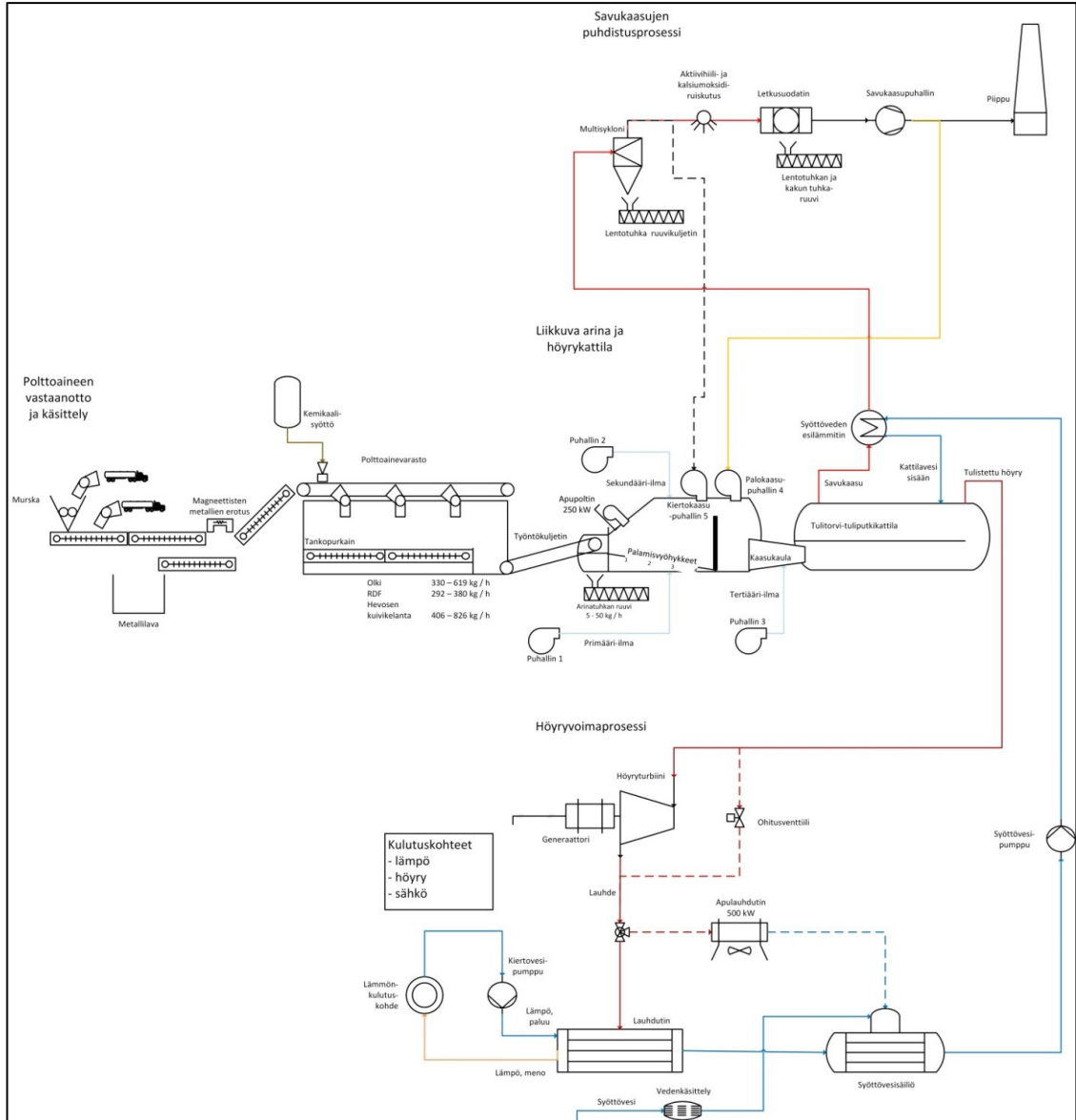
Voimalaitoksen eri osakokonaisuuksia ja materiaalivirtoja voidaan esittää laatikkopiirroksella. Uuden konseptin laatikkopiirros on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Uuden konseptin laatikkopiirros.

## 4.1 Tekninen toteutettavuus ja soveltuvuus

Uuden konseptin toimivuus riippuu siitä, löydetäänkö voimalaitokseen tarvittavat osat ja komponentit täyttämään tarvittavat tehtävänsä kokonaisuudessa. Voimalaitoksen kriittisimpiä pääkomponentteja on esitetty kuvassa 25 alustavalla prosessi- ja virtauskaaviolla.



Kuva 25. Hahmotelma pien-CHP -laitoksen pääprosessi- ja virtauskaaviosta.

Kuvan 25 mukaisesti tulitorvi-tuliputkihöyrykattila on sijoitettu vaakasuoraan arinakattilan kaasulierion jälkeen. Syöttövesi esilämmitetään höyrykattilasta poistuvalla savukaasulla. Höyryturbiini voi olla periaatteessa lauhdutusturbiini tai vastapaineturbiini halutusta sovelluskohteesta riippuen. Lämmöntarpeen pienentyessä voidaan lämmöntuotantoa laskea käyttämällä apulauhdutinta ja ylläpitää sähköntuotantoa tiettyyn pisteeseen asti. Apulauhdutin on suunniteltu sijoitettavan konttivoimalaitoksen katolle, jossa se jäädyttää lauhdevirtaa puhaltamalla ulkoilmaa lämmönvaihtimen kennoston läpi. Savukaasujen puhdistusprosessiksi on valittu kuiva savukaasujen puhdistuslaitteisto. Sammutettu kalkki ja aktiivihili ruiskutetaan savukaasukanavaan juuri ennen letkusuodatinta, jolloin lisäkemikaalien mahdolliselta likaavalta riskiltä vältetään sitä aikaisemmin olevissa laitteistoissa. Lisäksi multisykloni ei poista tärkeitä kemikaaleja

savukaasukanavasta ennenaikaisesti. Savukaasun takaisinkierto voidaan toteuttaa joko palokaasulla, kiertokaasulla tai molemmilla. Kiertokaasu voidaan ottaa heti multisyklonin jälkeen, jolloin osa multisyklonin läpi menneistä hiukkasista johdetaan uudestaan tulipesään. Palokaasu on puhdistettua savukaasua ja sillä voidaan säätää tulipesän polttoprosessia sekä pienentää päästöjä.

#### **4.1.1 Suunnitellut polttoaineet**

Voimalaitoskonseptin monipolttoainekattilan polttoaineeksi on suunniteltu käytettäväksi ennalta lajiteltuja jätepolttoaineita kuten teollisuuden, yhdyskuntien ja maatalouden jättejakeita tai muita sivuvirtoja. Jätteet voidaan murskata tai syöttää sellaisenaan polttoaineen välivaraston kuljettimelle.

Kuvassa 25 on esitetty joidenkin polttoaineiden syöttömääriä 1 MW kokoiselle laitokselle. Jos kohteessa halutaan käyttää pelkästään biomassapohjaista polttoainetta kuten olkea, ei laitoksessa välttämättä tarvita kuivaa savukaasujen puhdistusprosessia, vaan pelkkä multisykloni riittää. Vaihdellessa jäte- ja biopolttoaineiden käytössä voidaan laitoksen tyyppi joutua muuttamaan viranomaisprosessien kautta biopolttolaitoksen ja jätteenpolttolaitoksen välillä. Pelkästään biomassaa polttava laitos tulee investointikustannuksiltaan edullisemmaksi, koska savukaasujen puhdistus- ja mittausjärjestelmä voidaan jättää pois. Silloin menetetään jätteen vastaanottamisesta saatava tulo.

#### **4.1.2 Polttoprosessin tekniset arvot**

Polttoprosessin lämpötila etu- ja takapesässä on suunniteltu pidettäväksi 850 °C, koska tässä lämpötilassa sekä rikki- että typpidioksidipäästöt ovat yleensä pienimmillään. Höyrylieriössä on tarkoitus nostaa lämpötila 1100 °C lämpötilaan. Lämpötilaa tulipesässä säädetään ilmapuhalluksella ja savukaasujen takaisinkierrolla. Liian kuivan polttoaine-erän sattuessa menemään tulipesään saa säätöjärjestelmä käskyn lisätä savukaasun takaisinkiertoa palotilaan sekä pienentää tarvittaessa polttoaineen syöttönopeutta ja palamisilman puhallusta. Liian märän polttoaine-erän sattuessa menemään polttokammioon syttyy tarvittaessa apupoltin ylläpitämään tavoiteltua lämpötilaa.

Lukujen 2 ja 3 kirjallisuustutkimusten mukaan jätteenpolttoon soveltuu parhaiten mekaaninen viistoarina. Palamisprosessin kannalta arinarautoitus on suositeltavaa suunnitella niin, että jokainen arinarauta hankaa alemman portaan arinarautaa samalla nuohoten sitä puhtaaksi. Arinarivit kannattaa suunnitella siten, että ne liikkuvat epätahdissa riveittäin sekä nopeutuvassa tahdissa arinapintaa alaspäin mentäessä. Silloin polttoaineen sekoittuminen, kulkeutuminen ja leviäminen ovat paremmin hallittavissa. Arinaraudat palavat helposti, jos lämpötila tai säteilyn määrä nousee tulipesässä liian korkeaksi. Ilmajäähdytys auttaa osaltaan viilentämään arinarautoja, mutta ei poista säteilyn vaikutusta. Siksi polttoainepeti on pidettävä 30...50 cm paksuna arinarautojen päällä, jotta saadaan tarpeeksi hyvä eristyskerros ja vältetään puhkipalamisen riskeiltä. Polttokammio vuorataan mahdollisimman paksulla kerroksella tulenkestävää massaa sekä eristysmassaa. Tällä on tärkeä rooli polttokammion lämpötilan hallinnassa. Suuri massamäärä varastoi lämpöä, joka auttaa pitämään lämpötilan tasaisempana polttoprosessissa polttoaineen laadun vaihdellessa.

Palamisilmasta noin 50...60 % johdetaan arinoiden alta primääri-ilmana, noin 30...40 % arinakattilan sivuilta sekundääri-ilmana sekä etu- että takapesään, ja lopulta noin 10 % tertiääri-ilmana kaasulieriöön. Polttokammio suunnitellaan kauttaaltaan ilmajähdytteiseksi siten, että seinissä, katossa ja lattiassa kiertää ilma. Ilmajähdytys toimii samalla ilman esilämmittimenä, kun primääripalamisilma imetään polttokammioon arinapolttolaitteen ilmanavavaipan läpi, ja puhalletaan erillisiä kanavia pitkin arinan alle.

### **4.1.3 Höyryvoimaproessin tekniset arvot**

Höyryvoimaproessi suunnitellaan painetasolle 10 bar(g), jolloin vältetään tietyiltä viranomais määräyksiltä lukujen 2.3 ja 3.1.3 mukaisesti. Höyryn lämpötila pyritään saamaan mahdollisimman korkeaksi, mutta käytännössä ylärajan asettaa materiaalien kestävyys, sekä tulistinpinta-ala. Höyryn lämpötilaksi halutaan vähintään 210 °C, jolloin se on hieman tulistettua. Tällä lämpötilalla varmistetaan kattilan ja tulistimien korrosiokestävyys, kuten luvussa 2.5.2 todettiin.

Luvussa 4.2.2 on esitetty yrityksiä, joilta saatiin tarjouksia pienen kokoluokan höyryturbiineista. Näiden tarjousten mukaan pienten höyryturbiinien hyötysuhde on vaatimaton ja parhaimmillaankin vain 12 %. Varsinkin tässä valittujen höyryn matalamman lämpötilan ja paineen vuoksi, näistä höyryturbiineista ei saada täyttä tehoa hyödyksi. Tämä tarkoittaa, että 1 MW tehoisesta pien-CHP –laitoksesta voidaan saada teoriassa maksimissaan nettosähkötehoa, noin 100 kWe. Jotkut valmistajat lupaavat tietyillä höyrynarvoilla vain 40 kWe sähkötehoa. Yhteistuotannolla lämpöä voidaan saada talteen vielä vähintään 800 kW höyryturbiini jälkeisestä lauhteesta.

## **4.2 Jätteenpolttolaitoksen laitteiden valmistajat ja saatavuus**

Tässä luvussa esitellään tuloksia siitä, minkälaisia laitteita markkinoilta löydettiin. Laitteiden tiedot on saatu kirjallisuudesta, valmistajilta tai jälleenmyyjiltä. Tässä budjettihinnat ovat sellaisia hintoja, joilla tarjouksessa luvattu laite voidaan ostaa. Laitteen lopullinen hinta määräytyy esimerkiksi siitä, miten tai kuka toimittaa asennuksen, mahdolliset muut liitännät, rahdin tai saadaanko alennuksia. Hinnat ovat tässä esitetty ilman arvonlisäveroa.

### **4.2.1 Arina-höyrykattila –systemit**

Markkinoilta oli hyvin haastavaa löytää sellaista arinapolttolaitetta, jolla olisi voitu suoraan käyttää polttoaineena mitä tahansa jätejätettä sekä tuottaa höyryä 1 MW teholla. Siksi Ferroplan Oy päätyi suunnittelemaan ja valmistamaan tällaisen monipolttolaitteiden itse.

Taulukossa 8 on esitelty yhteenveto tutkituista arinapolttolaitteiden valmistajista, jotka lupaa toimittaa tai valmistaa sellaisia arinapolttolaitteita, joilla voidaan polttaa vähintään yhtä jätejätettä. Monet näistä arinoista pystyvät polttamaan myös useampaa biomassajätettä. Kaikki taulukon 8 arinapolttolaitteet sopivat höyrytuotantoon joko niiden omalla ratkaisulla tai arinapolttolaitteen jälkeen asennettavalla erillisellä lämmöntalteenottokattilalla. Ainoa poikkeus tästä on REKA AS, jolta saa vain kuumaa vettä tuotantoon sopivia kattiloita integroituna heidän polttolaitteeseen.

Taulukon 8 budjettihinta-arviot perustuvat Ferroplan Oy:n tekemiin tarjouspyyntöihin ja ovat vain suuntaa-antavia arvioita pelkälle arinapolttolaitteelle ilman lämmön- tai höyryntuotantoyksikköä. Valmistajilta oli hyvin haastavaa saada tarjousta, joten budjettihinta-arvioita saatiin hyvin vähän ja ne jotka saatiin, koskevat vain sellaisia arinoita, jolla voidaan polttaa olkea, hevosenlantaa tai muuta biomassaa. Saatujen tarjousten mukaan (RKA AS, CARBOROBOT Co. LTD, Ökotherm) keskimääräinen budjettihinta-arvio sellaiselle arinapolttolaitteelle, jolla voitaisiin polttaa olkea, hevosenlantaa ja mahdollisesti myös muita biomassoja 1 MW kokoluokassa oli noin 171 €/kW.



**Taulukko 8. Sopivia arinapolttolaittevalmistajia jätteenpolttoon.**

Yritys	Maa	Kokoluokka, kW	Laitteen nimi	Sopivia polttoaineita	Kontti-ratkaisut	Huomioitavaa	Lähde
Swebo Bioenergy AB	Ruotsi	3 - 20 000	Swebo Biotherm Combustor	Siiplikarja, kalajäte, teurasjäte, hevosenlanta, kananlanta	Bio-kattiloille	-	<a href="http://www.swebo.com/en">www.swebo.com/en</a>
Hurst Boiler & Welding Co Inc.	USA	37 - 2 200	Solid Fuel Fired Boilers	Maatalouden biomassat, MSW, olki, hevosenlanta, kananlanta	-	-	<a href="http://www.hurstboiler.com">www.hurstboiler.com</a>
REKA AS	Tanska	22 - 6 500	Waste Heat Burning Plant type GRAF	Olki, MSW, RDF, lajiteltu teollisuusjäte, vilja- ja viljätätteet, maatalousjätteet, hevosen kuivikelanta	Kyllä	Ei höyryntuotantoa	<a href="http://www.reka.com/en/">www.reka.com/en/</a>
Eurobiomass	Puola	1000 - 10 000	Integra 500 - 5000 DS/S ja Integra 500 - 5500WP	Biomassat, olki, liete, puujätteet	-	-	<a href="http://www.eurobiomass.info/">www.eurobiomass.info/</a>
Polytechnik Luft-und Feuerungstechnik GmbH	Itävalta	300 - 30 000	-	Hevosenlanta (seospolttu), paperijäte, puujäte, kananlanta	-	-	<a href="http://www.polytechnik.com/ENG/">www.polytechnik.com/ENG/</a>
Danstoker A / S	Tanska	200 - 100 000	Type PFH, Type VP, Special keeller	Biomassat, olki, jätteet, rakennusjäte, perinteiset kiinteät polttoaineet	Kyllä	-	<a href="http://www.danstokergroup.dk/">www.danstokergroup.dk/</a>
Uniconfort srl	Italia	350 - 35 000	Global	Biomassat, olki, hevosenlanta, puutähteet, kananlanta	Bio-container	-	<a href="http://www.uniconfort.com/en">www.uniconfort.com/en</a>
CARBOROBOT Co. LTD	Unkari	40 - 300	300 BIO Automat	hevosen- ja karjanlanta (kuivattuna ja sekoitettuna), olki (pellettinä)	Kyllä	Suuremmat tehot saadaan yhdistämällä useampi polttolaitte	<a href="http://www.carborobot.hu/EN/EN/G.htm">www.carborobot.hu/EN/EN/G.htm</a>
Ökothem (A.P. Bioenergietechnik GmbH)	Saksa	49 - 3 600	C6, MD4	olki, hevosenlanta (kuivattuna), kananlanta (kuivattuna), biomassat	Kyllä	-	<a href="http://www.oeko-therm.net">www.oeko-therm.net</a>
Weiss A / S	Tanska	500 - 80 000	Steam Boiler, Biomass Boiler Plant, Energy Power Plant	Olki, kotitalousjäte, paperijäte, SRF, RDF, liete, teollisuuden jäte, biomassat, eläinten lanta	-	-	<a href="http://www.weiss2energy.eu">www.weiss2energy.eu</a>
INNERGY Heavy Industries (INNERGY GROUP)	Espanja	125 - 18 000	INCITERM, MOVILTERM	MSW, sairaalajäte, eläinten jäännökset, liete, teollisuusjäte, biomassat, lanta	-	-	<a href="http://www.innergy-hi.com/en">www.innergy-hi.com/en</a>
LAMBION Energy Solutions GmbH	Saksa	1000 - 50 000	Inclined Feed Grate Furnace	MSW, teollisuuden jäte, biomassat, olki (pellettinä), mädätysjäännökset, elefanttiheinä	Kyllä	-	<a href="http://www.lambion.de/en">www.lambion.de/en</a>

Sopivia lämmöntalteenottokattiloita oli vieläkin haastavampaa löytää markkinoilta. Näille kattiloille ei ole tässä vaiheessa budjettihinta-arviota, koska lähes kaikki valmistajat tai toimittajat olivat muualla kuin Suomessa, mikä vaikeutti mahdollisuutta erityisesti saada tarjous mittatilauskattilasta – eikä niitä saatu. Tähän voi olla useita muita syitä, kuten

- isoja toimijoita ei kiinnosta rahallisesti pienet toimitukset, vaan he keskittyvät suurempiin,
- mittatilauskattila vaatii suunnitteluresursseja,
- yrityksillä ei ole kiinnostusta lähteä mukaan tuotekehitysprojekteihin,
- tarjousten laatijat käyttävät aikaansa varmimpiin kauppoihin tai
- yritykset eivät uskalla luvata, että heidän ratkaisu kestää jätteenpolton savukaasujen korroosion, joka on riski myös yrityksen maineelle.

Taulukossa 9 on esitetty lämmöntalteenottokattiloiden toimittajia tai valmistajia. Niistä jokainen soveltuu höyryn tuotantoon jätteenpoltossa yritysten omien internetsivujen tietojen mukaan. Jätteenpolttoon soveltuvat höyrykattilat voivat olla huomattavasti kalliimpia kuin tavanomaiset öljy- tai kaasukäyttöiset kattilat, johtuen hintavista korroosioita kestävästä materiaaleista. Lopullista hintaa voi vielä nostaa haluttu höyryn paine- ja lämpötila-alue sekä varustelu, kuten ekonomaiseri, tulistimet tai palamisilman esilämmitys.

**Taulukko 9. Sopivia lämmöntalteenottokattiloita jätteenpolttoon ja höyryn tuotantoon.**

Yritys	Maa	Kokoluokka, kW	Kokoluokka höyryntuotannon mukaan, kg/h	Laitteen nimi	Lämpötila-alue, °C	Painealue, bar (g)	Huomioitavaa	Lähde
Axis Industries (AXIOMA) JSC Enerstena Group	Liettua Liettua	500 - 50000 1000 - 20000	-	XILO Steam Termonerg	≤ 500	≤ 90	Myös vesiputki-kattiloita saatavilla	<a href="http://www.axis.lt/">www.axis.lt/</a> <a href="http://www.enerstena.lt/en/">www.enerstena.lt/en/</a>
Viessmann Werke GmbH & Co. KG	Saksa	1,5 - 120000	-	Vitomax 200-RS	-	-	-	<a href="http://www.viessmann.fi/kauppa/hoyrykattilat.html">www.viessmann.fi/kauppa/hoyrykattilat.html</a>
Danstoker Group (Danstoker A/S, Boilerworks A/S)	Tanska	200 - 100000	-	WHRB, Type PFH, Type VP, Special kedler	≤ 500	≤ 90	-	<a href="http://www.danstokergroup.dk/">www.danstokergroup.dk/</a>
ICI Caldaie S.p.A.	Italia	100 - 1600	-	WHB, GXC	-	≤ 25	-	<a href="http://www.icicaldaie.com/">www.icicaldaie.com/</a>
Clayton Industries	USA	245 - 9810	-	The Clayton Waste Heat Steam Generator (WHSG)	≤ 450	≤ 30	Ristivirtaperiaatteella toimiva vesi putki kattila	<a href="http://www.daytonindustries.com">www.daytonindustries.com</a>
Bosch Industriekessel GmbH	Saksa	650 - 38000	-	Self-fired waste heat boiler, HRSB, UL-S	≤ 235	≤ 30	Muut savukaasut pyynnöstä	<a href="http://www.bosch-industrial.com/en/">www.bosch-industrial.com/en/</a> <a href="http://www.hansapower.fi/">http://www.hansapower.fi/</a>
Aningas-Ergos S.A.	Espanja	-	250 - 50000	HRSB, UL-S	≤ 400	≤ 25	-	<a href="http://www.aningas.com/eng">www.aningas.com/eng</a>
INNERGY Heavy Industries (INNERGY GROUP)	Espanja	116 - 40000	100 - 150000	Steam boiler	≤ 400	≤ 80	-	<a href="http://www.innergy-hi.com/en">www.innergy-hi.com/en</a>
LAMBION Energy Solutions GmbH	Saksa	500 - 18000	-	Pre-Chamber Smoke Tube Boiler	≤ 450	≤ 36	-	<a href="http://www.lambion.de/en">www.lambion.de/en</a>
Cleaver-Brooks	USA	12 - 298500	4500 - 454000	Waste Heat Boiler (WHB)	≤ 565	≤ 103	Erikoiskattilaiset asiakkaan tarpeen mukaan, myös vesi putki-kattilat	<a href="http://www.cleaverbrooks.com/">www.cleaverbrooks.com/</a>
Boilersmith Ltd.	Kanada	147 - 6800	-	Waste Heat Boiler	-	≤ 20,6	Erikoiskattilat pyynnöstä	<a href="http://www.boilersmith.com/">www.boilersmith.com/</a>
Superior Boiler Works Inc.	USA	100 - 14700	-	Boiler Waste Heat Recovery	-	15 - 20,6	Savukaasun lämpötila 1315 °C asti, erikoistarpeisiin mittailauskattilaiset	<a href="http://www.superiorboiler.com/waste-heat-recovery/">www.superiorboiler.com/waste-heat-recovery/</a>
Greens Power Limited	England	≤ 1000000	1000 - 120000	Waste Heat Boiler	≤ 515	≤ 60	-	<a href="http://www.greenspower.co.uk/">www.greenspower.co.uk/</a>
ERK Eckrohrkessel GmbH	Saksa	1000 - 174000	-	Corner Tube Boiler	≤ 535	8 - 136	Vesi putki kattilat	<a href="http://www.edkrohrkessel.com">www.edkrohrkessel.com</a>
RENTECH Boiler System Inc.	USA	1000 - 40000	≤ 181000	Waste Heat Boiler	≤ 537	10 - 68	Myös vesi putki kattilat	<a href="http://www.rentechboilers.com/">www.rentechboilers.com/</a>
Industrial Boilers Ltd. (IBL Group)	Intia	-	-	Waste Heat Recovery Boiler	-	-	Yksityiskohtaiset pyynnöstä	<a href="http://www.indboilers.com/">www.indboilers.com/</a>
Babcock Wanson (CNIM Group)	Ranska	≤ 12000	≤ 20000	REC ja EXT Series	≤ 400	≤ 25	-	<a href="http://www.babcock-wanson.com/">www.babcock-wanson.com/</a>
CMI Groupe	Belgia	-	2000 - 120000	Denapak, Denarad	≤ 520	8 - 140	Suunnitella ja asentaa, mutta ei itse valmistaa	<a href="http://www.cmigroupe.com/">http://www.cmigroupe.com/</a>
Cochran Ltd	UK	204 - 22000	-	Heat Recovery Steam Boiler	-	≤ 35	-	<a href="http://www.cochran.co.uk">www.cochran.co.uk</a>

#### 4.2.2 Höryturbiinit

Pienen kokoluokan höryturbiinivalmistajia tai toimittajia löytyi useita. Saatujen tarjousten perusteella (Oy Konwell Ab, Elliot Company, Mizun Consultants & Engineers, Siemens AG) höryturbiinin keskimääräinen budjettihinta asettui arvoon noin 1076 €/kWe.

Taulukossa 10 on esitetty valmistajia tai toimittajia pienen kokoluokan höryturbiineille. Pienen kokoluokan höryturbiinista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä yhdistelmää, joka sisältää itse höryturbiinin, vaihdelaatikon ja generaattorin. Joskus koko yhdistelmää sanotaan myös turbogeneraattoriksi tai ”ekspanderiksi”, jolla viitataan englannin kielen termiin ”turbo expander”, jolla periaatteessa tarkoitetaan laitetta, jossa höyry paisuu. Englannin kielen lyhenne höryturbiinien katalogeissa, ”STG” tarkoittaa ”steam turbo generator”, eli höryturbiini-turbogeneraattori –yhdistelmää.

Pienen kokoluokan höryturbiinit ovat yleensä yksivaiheisia, mikä tarkoittaa, että höryturbiinin kotelossa on vain yksi juoksupyöräsiivistö. Malleissa esiintyy usein nimitys ”SST”, jolla viitataan englanniksi ”single stage turbine”, eli yksivaiheiseen turbiiniin. Siivistön malli voi olla joko radiaali- tai impulssityyppinen. Generaattori voi olla suoraan yhteydessä roottoriin tai vaihdelaatikon kautta, jolloin puhutaan synkroonisesta tai asynkroonisesta kytkennästä.

**Taulukko 10. Valmistajia ja toimittajia pienen kokoluokan höyryturbiineille.**

Valmistaja (edustaja)	Maa	Laitte	Malli	Paine		Lämpötila		Lämpötila sis. ulos degC	Höyryn tuotto kg / h	Nimellis- teho kWe	Huomioitavaa!	Lähde	Referenssit
				sis. bar(a)	ulos bar(a)	sis. degC	ulos degC						
G-Team AS (Oy Konwell AB)	Tsekki	Höyryturbiini + ohjauspaneeli	TR100 TR320	18	1,2 - 1,5	207- 320	105 - 203	1440 - 2000	150	Nimellisähköteho saavutetaan vain maksimiarvoilla	<a href="http://www.steamturbo.com">www.steamturbo.com</a> , <a href="http://www.kowell.fi">www.kowell.fi</a> , tarjoukset	Useita	
				18	1,2	207	105	≤ 4500	200				
Elliot Company	USA	Höyryturbiini- paketti	DYR/STG# 1	10	1,1	210	115	1285	150	Nimellisähköteho saavutetaan vain maksimiarvoilla	tarjouspyyntö, <a href="http://www.elliott-turbo.com">www.elliott-turbo.com</a>	Ei tietoa	
Mizun Consultants & Engineers	Kiina	Höyryturbiini- paketti	BHEEM, BG150H	16	-	-	100	1800	144	Sisältää generaattorin ja vaihteen, mutta ei kontrollipaneelia	tarjouspyyntö, <a href="http://www.alibaba.com">www.alibaba.com</a>	Muutama	
Siemens AG, Siemens Turbomachinery Equipment GmbH	Saksa	Höyryturbiini- paketti	SST-040	10	1,5	200	111	1500	300	Nimellisähköteho saavutetaan vain maksimiarvoilla	Tarjouspyyntö <a href="http://www.energy.siemens.com/br/en">http://www.energy.siemens.com/br/en</a>	Useita	
PBS ENERGO (Hansa Power Oy)	Tsekki	Höyryturbiini- paketti	STG-1	≤ 65	1,2 - 25	≤ 535	-	≤ 60 000	≥ 100	-	<a href="http://www.pbsenergo.cz/">http://www.pbsenergo.cz/</a>	Muutama	
Turbolub	Ranska	Höyryturbiini	TL15 / TLV 15	9	-	-	-	-	88	-	<a href="http://www.turbolub.fr/en">www.turbolub.fr/en</a>	Muutama	
N.S. Terbo Ltd.	Intia	Höyryturbiini- paketti	Single-Stage Steam Turbine, Curtis Turbine	≤ 67	-	≤ 538	-	-	0,75 - 1400	-	<a href="http://www.nsterbo.in">www.nsterbo.in</a>	useita	

### 4.2.3 Savukaasujen puhdistusjärjestelmä

Savukaasujen puhdistusmenetelmäksi oli ennalta päädytty valitsemaan kuiva savukaasujen puhdistusmenetelmä. Se tulisi muodostumaan multisyklonista, kemikaali-injektiojärjestelmästä sekä letkusuodattimesta. Puhdistusjärjestelmiä löydettiin sekä kotimaisia että ulkomaisia. Taulukossa 11 on esitetty muutama valmistaja, joilta saatiin tarjoukset.

**Taulukko 11. Pienen kokoluokan jätteenpolttoon soveltuvia savukaasujenpuhdistuslaitteita.**

Valmistaja (edustaja)	Maa	Laite	Malli	Huomioitavaa!	Lähde
BETH Filter GmbH (SolarBiox Oy)	Saksa	Letkusuodatinjärjestelmä	AERSTAR, AAS 1 5x2.12/2	Järjestelmän saamittatilausena konttiin asennusta varten	Tarjouskysely, <a href="http://www.rrbeth.com/en/home.html">http://www.rrbeth.com/en/home.html</a> , <a href="http://www.solarbiox.fi/">http://www.solarbiox.fi/</a>
Dust Control Systems, DCS	Suomi	Multisykloni	DCPS-25, Finn Cleaner kombi 3x3	Finn Cleaner kombi -malli on vaakamallinen multisykloni, joka sisältää savukaasupuhaltimen	Tarjouskysely, <a href="http://www.dcs.fi/">www.dcs.fi/</a>
LÜHR FILTER GmbH & Co. KG (DCS)	Saksa	Letkusuodatinjärjestelmä	Flat-Bag-Filter	koko 2000 mm x 2500 mm per yksikkö	<a href="http://www.luehr-filter.de/">www.luehr-filter.de/</a>
Orions	Latvia	Multisykloni	MC-6	Automaattisella tuhkanpoistolla	Tarjouskysely, <a href="http://www.orions.lv/en.html">http://www.orions.lv/en.html</a>
Donaldson Company Inc. (Dustec Oy)	USA	Letkusuodatinjärjestelmä	DLMC	Automaattisella tuhkanpoistolla	Tarjouskysely, <a href="http://www.dustec.fi">www.dustec.fi</a>
GARANT-Filter GmbH	Saksa	Letkusuodatin- ja kemikaali-injektiojärjestelmä	Flue gas cleaning system	Automaattisella tuhkanpoistolla, sisältää kemikaali-injektiojärjestelmän silloineen	Tarjouskysely, <a href="http://www.garant-filter.de/">http://www.garant-filter.de/</a>

Taulukon 11 saatujen tarjousten perusteella keskimääräiseksi budjettihinnaksi muodostui multisyklonille (DCS, Orions) noin 13 465 € ja letkusuodattimelle (SolarBiox Oy, Dustec Oy, GARANT-Filter GmbH) noin 73 633 €. Laskelmassa arvioitiin GARANT-Filter GmbH:n tarjouksesta kemikaali-injektiojärjestelmän olevan 70 % tarjotusta kokonaishinnasta, jota muissa tarjouksissa ei ollut mukana.

Kemikaali-injektio menetelmä aiheuttaa lisäaineiden osalta muuttuvan kustannuksen, joka määräytyy vuositasolla siitä, paljonko kemikaaleja kuluu. Tarjousten perusteella (NordKalk, smaminal, Polynova Oy, Carbon Link Ltd.) keskimääräinen hinta voimalaitoskäyttöön suunnitelluille kemikaaleille asettuu taulukon 12 mukaiseksi. Teoreettinen kulutus perustuu konsultin laskelmaan (Makkonen 2015). Laskelmassa on käytetty oletuksena laitoksen tehona 1 MW ja vuotuisina käyttötunteina 8000 h / a.

**Taulukko 12. Kuivan savukaasupuhdistuksen käyttökemikaalien kustannusarviot.**

	Kemiallinen kaava	Keskimääräi- nen hinta	Vuoden kulutus, maks. (varmuuskerroin 1,2)	Arvioitu vuosikustannus, maks.	Huomioitavaa
Kemikaalit		€/t	t/a	€/a	
Sammuttamaton kalkki	CaO	175	71	12425	Ei sisällä toimituskuluja
Sammutettu kalkki	Ca(OH) <sub>2</sub>	190	94	17860	Ei sisällä toimituskuluja
Aktiivihili	C	1186	7	8302	Sisältää toimituskulut
Sammuttamaton kalkki ja aktiivihili	-	-	78	20727	-
Sammutettu kalkki ja aktiivihili	-	-	101	26162	-

#### 4.2.4 Savukaasujen mittausjärjestelmät

Savukaasujen mittausjärjestelmiä on olemassa sekä jatkuvatoimisia että kertanäytteenottoon perustuvia. Liitteessä 1 on esitetty mitkä kaasukomponenttien mittaukset ovat lakisääteisiä jätteenpoltossa. Mittausten tarkemmasta suorituksesta löytyy tietoa luvun 2.3 luetelluista laeista ja direktiiveistä.

Jatkuvia FTIR-tekniikkaan (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) perustuvia savukaasumittausjärjestelmiä löytyi Suomesta kaksi toimittajaa. Molempien tarjoamat järjestelmät olivat lähes samanlaisia ja samanhintaisia. Molemmissa ratkaisussa tarjottiin monikomponenttianalysaattoria tarvittavien kaasukomponenttien mittaukseen sekä mahdollisuus hiukkasten mittaukseen, ja niistä saisi analyysit suoraan päätteelle. Saatujen tarjousten perusteella (SICK Oy, Gaset Technologies Oy) keskimääräinen kustannus jatkuvalla jätteenpolton savukaasujen komponenttien ja hiukkasten mittausjärjestelmälle oli noin 87 652 €.

**Taulukko 13. Kaksi jatkuvien savukaasumittausjärjestelmien toimittajaa Suomessa.**

Toimittaja	Maa	Laite	Malli	Sisältää, mm.
SICK Oy	Suomi	Savukaasujen jatkuva mittausjärjestelmä	SICK MCS 100 FT ja DUSTHUNTER SP 100	FTIR -analysaattori ja kaappi, happianalysaattorin, näytteenottolinjat, sondi, asennus, koulutus, käyttöohjeet
Gaset Technologies Oy	Suomi	Savukaasujen jatkuva mittausjärjestelmä	CEMS II	FTIR -päästömittausjärjestelmä, happianalysaattorin, näytteenottoyksikkö ja -sondi, näytteenottolinjat, asennus, koulutus, dokumentit, kalibrointikaasut

Mittausjärjestelmien päälaitteet olivat analysaattorikaappi, kuuma näytelinja ja näytteenottosondi. Analysaattorikaapissa ovat FTIR –yksikkö, ohjauselektroniikka, paikallinäyttö ja mittauskyvetti. Mittausjärjestelmä on herkkä ympäristön muutoksille kuten lämpötilalle ja värinälle. Siksi sen sijoitukselle vaaditaan ilmastoitua tilaa ja etäisyyttä värinää aiheuttavista laitteista. Myös analysaattori on herkkä kaasun tilan muutoksille, siksi sondin ottama näyte johdetaan analysaattorikaappiin kuumaa näytelinjaa pitkin. Monikomponenttianalyisaattorijärjestelmä vaatii myös kalibrointikaasuja. Molempien toimittajien analysaattorit pystyvät mittaamaan ainakin seuraavat peruskomponentit:

- HCL, HF, CO, NO<sub>x</sub> (NO ja NO<sub>2</sub>), N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>.
- Mitattavat TOC –yhdisteet lasketaan yhdisteestä CH<sub>4</sub> (metaani).
- Hiukkasten mittaamiseen käytetään erillistä jatkuvatoimista hiukkaspitoisuusmittaria.

Edellisten lisäksi Gaset Technologies Oy:n laajennettu CEMS II jatkuvatoiminen kaasuanalysaattori pystyy mittaamaan pitoisuuden tietyin rajoituksin aineista: C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (asetyleeni), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (etaani), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (eteeni), C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (n-propaani), C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> (benzeeni), C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> (n-hexaani), C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> (styreeni), HCN (vetysyanidi) ja HCOH (formaldehydi).

Jatkuvatoimisella mittausjärjestelmällä ei pystytä mittaamaan liitteessä 1 esitettyjä ilmaan joutuvien päästöjen raskasmetallipitoisuuksia eikä dioksiinien ja furaanien pitoisuuksia. Näiden mittaus on suoritettava kertamittauksin esimerkiksi ostamalla tähän erillinen palvelu.

Eräältä suomalaiselta yhtiöltä saadun ei-julkisen tarjouksen mukaan hinta-arvio dioksiinien ja furaanien sekä raskasmetallien mittaukselle, joka sisältää mittaukset savukaasuista, analyysit ja raportin, olisi luokkaa 6000 € per mittaus, johon lisätään vielä matkakulut. Näin ollen luvun 2.3 esitetyn mukaisesti lakisääteiset dioksiinien ja furaanien sekä raskasmetallien mittaukset tulisivat maksamaan ensimmäisenä vuonna vähintään 18 000 €, johon päälle tulisi vielä niiden kolmen mittauskerran matkakulut. Muina vuosina vaadittaisiin vähintään kaksi mittauskertaa, jolloin kustannukset olisivat vähintään 12 000 €, johon lisättäisiin vielä matkakulut kahdesta mittauskerrasta. Olettaen lisäkuluksen olevan esimerkiksi 500 € per mittauskerta, saadaan 20 vuoden käyttöajalle keskimääräiseksi vuosikustannukseksi epäjatkuville mittauksille noin 13 325 € / a.

#### 4.2.5 Merikontit

Markkinoilla on sekä uusia että käytettyjä merikontteja. Käytettyjä ei kuitenkaan suositella laitosrakentamiseen, koska niiden kunnosta ei voida olla varmoja ja lisäksi ne ovat usein ruosteessa ja likaisia, jolloin niiden käyttöönottoon voi tulla lisäkuluja oikaisuista, siivouksesta tai maalaamisesta. Toisaalta ruostekaani ei haittaa, jos laitos halutaan maaisemoida ja esimerkiksi paneloida halutun näköiseksi. Myös teräsrakenteet voivat olla vääntyneitä tai rasittuneita, jolloin niiden kantavuus ja mitat eivät ole välttämättä enää kohdallaan. Seuraavassa taulukossa 14 on esitetty konttien toimittajia.



**Taulukko 14. Merikonttien toimittajia.**

Toimittaja	Maa	Tyyppi tai malli	Kuvaus	Lähde
O.V. Lahtinen Oy	Suomi	40'HC	käytetty, siisti, ehjä	Tarjouspyyntö, <a href="http://www.ovlahtinen.fi">www.ovlahtinen.fi</a>
		40'HC reefer	eristetty pakkaskontti, sisäseinät RST peltiä	
Suomen Vuokrakontti Oy	Suomi	40'HC	uusi teräskontti	Tarjouspyyntö, <a href="http://www.vuokrakontti.fi">www.vuokrakontti.fi</a>
		40'HC	käytetty teräskontti	
Orions	Latvia	40 feet container	uusi teräskontti	Tarjouspyyntö, <a href="http://www.orions.lv/eng.html">www.orions.lv/eng.html</a>
Scandic Container Oy	Suomi	40'HC	uusi teräskontti	Tarjouspyyntö, <a href="http://www.scandiccontainer.fi">www.scandiccontainer.fi</a>

Taulukon 14 yrityksiltä saatujen tarjousten mukaan uuden 40'HC teräskontin keskimääräinen hinta oli noin 3300 € / kpl ja käytetyn 1200 € / kpl.

### 4.3 Asiakassegmentit kannattavuuslaskennan pohjana

Tässä diplomityössä tarkastellaan laitoksen taloudellista kannattavuutta kolmen esimerkkiasiakkaan tapauksissa, jotta voidaan arvioida laitoksen kannattavuus eri asiakassegmenteissä:

1. Yhdyskunta-asiakas.
2. Teollisuusasiakas.
3. Maatalousasiakas.

Tässä yhdyskunta-asiakkaalla tarkoitetaan sellaista asiakasta, joka on kiinnostunut hankkimaan laitoksen jollekin alueelle, jossa on asutusta. Asutus voi olla esimerkiksi syrjäseudulla tai kaupungin laidalla, jokin yhteisö tai kylä. Teollisuusasiakas voi olla esimerkiksi yksittäinen teollisuuslaitos tai monen teollisuuslaitoksen ryhmä, jollakin syrjäisellä alueella tai kaupungin laidalla. Maatalousasiakas voi olla esimerkiksi yksittäinen iso maatila tai monen maatilan muodostama yhteisyritys. On yleistä, että yhteisö tai yritykset muodostavat oman yhtiön hankkimalleen energiatuotantolaitokselle, jolloin on helpompaa sopia esimerkiksi vastuualueet ja rahoitusjärjestelyt kullekin osapuolelle.

Esimerkkiasiakas voi saada tuloa periaatteessa neljällä eri tavalla: säästämällä vaihtoehdoisen energian käytössä, myymällä energiaa, säästämällä porttimaksuissa, veroissa tai muissa pakollisissa maksuissa, tai jollakin näiden yhdistelmällä.

Luvuissa 4.3.1, 4.3.2 ja 4.3.3 esitellään esimerkkiasiakkaat tarkemmin ja annetaan taloudellista tarkastelua varten niille teknisiä ja taloudellisia lähtötietoja. Asiakasryhmäkohtaiset laskelmat on esitetty luvussa 4.4 taulukossa 15.

#### 4.3.1 Yhdyskunta-asiakas

Yhdyskunta-asiakkaalla tarkoitetaan tässä työssä sellaista asiakasta, joka hankkii voimalaitoksen yhdyskunnan tai sen osan käytettäväksi, jolloin se voi olla esimerkiksi paikallinen energiayhtiö tai suoraan tätä tarvetta varten muodostettu yhtiö, joka hallinnoi ja käyttää laitosta.

Oletetaan laskelmaa varten, että yhdyskunta-asiakas

- myy kaiken tuottamansa sähkön ja saa myymästään sähköstä luvussa 3.1.4 mainitun, Suomen keskimääräisen spot-aluehinnan 2016 mukaisen hinnan, 32,45 € / MWh
- myy kaiken tuottamansa lämmön luvussa 3.1.4 mainittuun hintaan 77,36 € / MWh rivi- ja pienkerrostaloasukkaille yhdyskunnan alue- tai kaukolämpöverkon kautta
- myy asiakkailleen lämpöä ja sähköä sen ajan, kun voimalaitos ei ole toiminnassa samaan hintaan kuin ostaa itse
- jalostaa sekajätteestä kierrätyspolttoainetta ja saa siitä hyötyä luvun 3.1.4 taulukon 7 mukaisesta yritysten sekajätteiden porttimaksuista lasketusta keskiarvosta 50 %, jolloin kierrätyspolttoaineen säästöksi tulee noin 67,60 € / t
- käyttää kierrätyspolttoainetta, jonka kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo määritetään ottamalla liitteestä 3, RDF –jakeiden tehollisten lämpöarvojen keskiarvo sekä niiden kosteuden keskiarvo, ja sijoittamalla ne liitteen 4 kaavaan (4), jolloin saadaan, noin  $q_{iw,RDF} = 12,55 \text{ MJ / kg}$ .

### 4.3.2 Teollisuusasiakas

Tässä työssä tarkoitetaan teollisuusasiakkaalla sellaista asiakasta, joka hankkii voimalaitoksen omaan käyttöönsä oman energiantarpeen tyydyttämiseksi. Tämä asiakas tarvitsee laitoksen tuottamaan sähköä ja lämpöä omalle tuotantolaitokselle.

Oletetaan laskelmaa varten, että teollisuusasiakas käyttää kaikesta tuottamastaan sähköstä 8 tuntia päivästä itse, mutta muun vuorokauden aikaan myy kaiken tuottamansa sähkön, jolloin vuorokautinen omakäyttöosuus on 30 % tuotetusta sähköstä. Oletetaan sähkön omakäytösäästön olevan luvussa 3.1.4 mainittu yritys- ja yhteisöasiakkaan sähkön hinta 85,50 € / MWh ja myyntihinta Suomen keskimääräinen spot-aluehinta 32,45 € / MWh vuodelta 2016.

Oletetaan ettei teollisuuslaitos tarvitse kaikkea tuottamaansa lämpöä, vaan myy siitä 90 % paikalliselle kaukolämpöyhtiölle. Omakäytösäästön lämmönhankinnalle kaukolämpöverkosta oletetaan olevan 82,80 € / MWh, joka on luvussa 3.1.4 mainittu aritmeettinen keskiarvo Energiateollisuudelle raportoiduista tilastoista Suomessa vuodelta 2015. Siitä ei kuitenkaan saada täyttä korvausta, kun lämpö myydään, vaan 50 % omakäytösäästön arvosta eli 41,40 € / MWh.

Oletetaan, että teollisuusasiakas pystyy kattamaan omilla jätteillään 50 % vuotuisesta tarvittavasta määrästä energiatuotantoon. Loput 50 % saadaan läheisen teollisuusalueen jätteistä, jotka otetaan vastaan porttimaksulla, joka on 50 % luvun 3.1.4 taulukon 7 teollisuusjätteiden porttimaksujen keskiarvosta, eli noin 73,77 € / t. Omista jätteistä säästetään täysimääräinen porttimaksu, noin 147,54 € / t. Porttimakuista tuleva keskimääräinen hyöty on siten noin 110,66 € / t.

Liitteessä 3 on taulukossa rivillä ”Useita teollisuuden polttojakeita, keskimäärin”, tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, 20,2 MJ / kg ja kosteus 18,30 %. Liitteen 4 kaavalla (4) laskettuna saadaan tälle teollisuuden keskimääräiselle polttojakeelle kostean polttoaineen teholliseksi lämpöarvoksi noin,  $q_{iw} = 16,06 \text{ MJ / kg}$ . Käytetään laskelmissa teollisuuden jätteelle tätä keskimääräistä arvoa.

### 4.3.3 Maatalousasiakas

Maatalousasiakas käyttää polttoaineena itselle kertyvää maatalousjätettä, joka muodostuu hevosen kuivikelannasta, jossa kuivikkeena olkea, sekä maatalousmuovijätteestä. Maatalousjätettä on käytössä riittävästi kattamaan vuotuinen energiantarve. Maatalousasiakas tarvitsee itse kaiken tuottamansa sähkön ja lämmön tilallaan.

Oletetaan, että maatalousasiakas

- säästää sähkön ostoissa luvussa 3.1.4 mainitun M2 -luokan sähkön hinnan, 120,9 € / MWh
- käyttää paikallista aluelämpöverkkoa lämmön hankintaan ja säästää lämmön hankinnassa 82,80 € / MWh, joka on luvussa 3.1.4 mainittu aritmeettinen keskiarvo Energiateollisuudelle raportoiduista kaukolämpötilastoista Suomessa vuodelta 2015.

Oletetaan, että maatalousasiakas polttaa maatalousjätettä seoksena, jossa on painoprosentteina hevosenlantaa 40 %, olkikuiviketta 50 % ja maatalousmuovijätettä 10 %. Liitteestä 3 saadaan hevosenlantalle tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, 16,397 MJ / kg ja kosteus 73,80 %. Näillä arvoilla laskettuna saadaan liitteen 4 kaavalla (4) hevosenlannan kostean polttoaineen teholliseksi lämpöarvoksi noin 2,5 MJ / kg. Samalla periaatteella laskettuna saadaan oljelle vastaavasti kostean polttoaineen teholliseksi lämpöarvoksi noin 13,23 MJ / kg. Muoviseoksen tehollinen lämpöarvo on 31,8 MJ / kg (Alakangas 2000). Käytetään tätä arvoa laskelmissa maatalousasiakkaan tapauksessa olettamalla, että muovit varastoidaan sisätiloissa ja ne ovat täysin kuivia, jolloin 31,8 MJ / kg on muoviseokselle myös kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo. Maatalousjätteen seokselle saadaan keskimääräiseksi kostean polttoaineen teholliseksi lämpöarvoksi painoprosenttiosuuksilla laskettuna noin 10,80 MJ / kg.

Oletetaan, että porttimaksusäästöt tulevat maatalousasiakkaalle sekä hevosen kuivikelannasta että muovista. Luvun 3.1.4 taulukon 7 mukaan hevosenlannan porttimaksu on keskiarvona yritysten hinnoista noin 50,24 € / t. Muovit voitaisiin toimittaa suoraan energiajätteenä, jonka porttimaksu on luvun 3.1.4 taulukon 7 mukaan keskiarvona yritysten hinnoista noin 91,67 € / t. Maatalousjätteseoksesta on hevosen kuivikelantaa noin 90 % ja muovia 10 %, jolloin maatalousjätteen keskimääräiseksi porttimaksusäästökseksi saadaan noin 54,38 € / t.

## 4.4 Talousarvio

Tässä luvussa on arvioitu pien-CHP -laitokselle sen kannattavuus toteutettuna Suomen olosuhteissa. Talousarvion tuloksena saatiin luvussa 4.3 määriteltyjen esimerkkiasiakkaiden tapauksissa selville voimalaitoksen investointikustannus, kassavirtalaskelma sekä taloudellisia kannattavuuden tunnuslukuja. Tämän laskelman tekemiseksi valittiin aikaisemmista luvuista sellaisia todennäköisiä arvoja laskelmaan, joiden arvioitiin soveltuvan siihen parhaiten. Talousarviota varten muodostettiin ja arvioitiin esimerkkiasiakkaille tuotannolliset lähtöarvot. Näistä on esitetty yhteenveto taulukossa 15.

Kullekin asiakasryhmälle määritettiin aluksi lähtötilanne teknisillä perusarvoilla kolmelle eritasoiselle voimalaitokselle profiilit:

- Hyvin toimiva laitos, joka toimii ilman ylimääräisiä tuotantohäiriöitä ja keskeytyksiä, hyvällä hyötysuhteella ja optimaalisesti oikein säädettynä, ja jota ajetaan hyvin huolellisesti ja seuraten ja reagoiden muutoksiin.
- Keskinkertaisesti toimiva laitos, joka toimii keskimääräisillä käyttötunneilla, ilman sen suurempia tuotantokeskeytyksiä tai häiriöitä, ja jota ajetaan aika huolettomasti.
- Huonosti toimiva laitos, jota ajetaan alitehoisena tai väärin, ja jossa esiintyy useita ylimääräisiä tuotantokeskeytyksiä ja häiriöitä vuoden aikana sekä virheellisiä tai väärin asennettuja ajoasetuksia tai muita ongelmia.

Näille jokaiselle pien-CHP –laitoksen eri profiileille määritettiin niitä vastaavat tekniset suorituskykyarvot:

- Arinapolttolaitteen teho (kW): 800, 900, 1000
- Käyttöaika vuodessa (h / a): 6500, 7500, 8500
- Nettosähköteho (kW): 40, 70, 100

Nämä arvot kirjattiin teknisiksi lähtöarvoiksi taulukkoon 15 eri asiakasryhmille.

Oletetaan, että kaikkien esimerkkiasiakkaiden perustapauksessa,

- investoinnin pitoaika on 20 vuotta
- investointiin otetun lainan korko on 5 %
- voimalaitos tarvitsee laitoshoitopalvelua, joka määritetään henkilöstökustannuksena 3000 € / kk
- muut käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat 10 000 € / vuosi.

Käytetään näitä oletuksia laskelmissa, jotka esitetään luvussa 4.4.2 taulukossa 18.

Perustilanteessa laskettiin eri asiakasryhmille,

- nettonykyarvo (NPV),
- takaisinmaksuaika vuosina,
- sijoitetun pääoman tuotto prosentti (ROI).

Myöhemmin tilannetta muutetaan herkkyystarkastelussa luvussa 4.4.4, jossa valitaan muuttujia investointien ja niiden riskien arvioimiseksi. Teknisiä tai taloudellisia muuttujia vaihdellaan tietyissä valituissa rajoissa, jotta nähdään miten ne voivat vaikuttaa investoinnin kannattavuuden lukuihin.

**Taulukko 15. Investointi ja kannattavuuslaskentaa varten lasketut tuotantoarvot lähtöoletuksineen.**

Asiakastiedot	Yhdyskunta-asiakas		Teollisuusasiakas		Maatalousasiakas		Tietolähde tai peruste
	Huono	Hyvä	Huono	Hyvä	Huono	Hyvä	
Tuotetusta sähköstä myyntiin, %	100	100	70	70	0	0	
Tuotetusta lämmöstä myyntiin, %	100	100	90	90	0	0	Luku 4.3
Oman polttoaineen osuus, %	100	100	50	50	100	100	
Polttoaine	Yhdyskuntajäte						Luku 4.3
<b>Tuotannolliset lähtöarvot</b>							
Laitoksen profiili	Yhdyskunta-asiakas		Teollisuusasiakas		Maatalousasiakas		Tietolähde tai peruste
	Huono	Hyvä	Huono	Hyvä	Huono	Hyvä	Luku 4.4
Polttoaineteho, kWpa	909	1136	909	1136	909	1136	Liite 2 kaava (2)
Arinapolttolaitteen teho, kW	800	1000	800	1000	800	1000	Lähtöarvo, luku 4.4
Hyötysuhde (arina ja kattila)	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	Lähtöarvo, liite 7
Höyrykattilan teho, kW	704	792	704	792	704	792	Liite 2 kaava (3)
Nettolämpöteho, kWth	664	712	664	712	664	712	Liite 7 kaava (3)
Käyttöaika vuodessa, h / a	6500	7500	6500	7500	6500	7500	Lähtöarvo, luku 4.4
Nettosähköteho, kWe	40	80	40	80	40	80	Lähtöarvo, luku 4.1.3
Energiantuotanto, lämpö, MWhth	4316,0	5340,0	4316,0	5340,0	4316,0	5340,0	Laskettu arvo
Energiantuotanto, sähkö, MWhe	260,0	600,0	260,0	600,0	260,0	600,0	Laskettu arvo
Energiantuotanto yhteensä, MWhe	4576	5940	4576	5940	4576	5940	Laskettu arvo
Rakennusaste	0,06	0,11	0,06	0,11	0,06	0,11	Laskettu kaavalla (1)
Kulutussuhde	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	Laskettu kaavalla (2)
Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo, MJ / kg	12,55	12,55	16,06	16,06	10,8	10,8	Luku 4.3
Polttoaineen kulutus, kg / s	0,072	0,081	0,057	0,064	0,084	0,095	Laskettu arvo
Polttoaineen kulutus, t / d	6,259	7,041	4,891	5,502	7,273	8,182	Laskettu arvo
Polttoaineen kulutus, t / a	1695	2200	1325	1719	1970	2557	Laskettu arvo
Polttoaineen kulutus, GWh / a	5,91	7,67	5,91	7,67	5,91	7,67	Laskettu arvo
Sähkön omakäyttöosuus, MWh / a	0	0	78	180	260	850	Laskettu arvo
Lämmön omakäyttöosuus, MWh / a	0	0	432	534	4316	6630	Laskettu arvo
Sähköä myyntiin, MWh / a	260	600	182	420	0	0	Laskettu arvo
Lämpöä myyntiin, MWh / a	4316	5340	3884	4806	0	0	Laskettu arvo

#### 4.4.1 Voimalaitoksen budjetointi ja pääkomponenttien valinta

Kannattavuusarviointi lähti liikkeelle voimalaitoksen pääkomponenttien valinnasta, jotka periaatteessa määräisivät voimalaitoksen kokoonpanon ja investointikustannuksen. Taulukkoon 16 on arvioitu saatujen budjettitarjousten ja Ferroplan Oy:n arvioiden pohjalta esimerkkiasiakkaille voimalaitosten kokoonpano pääkomponentteittain ja näiden osalta budjettihinta-arvio. Kaikille esimerkkiasiakkaille tulee sama voimalaitoksen kokoonpano ja siten myös budjettihinta.

**Taulukko 16. Pien-CHP -laitoksen budjetti pääkomponentteittain.**

		Tietolähde tai peruste
Arinapolttolaitteen tyyppi Budjettihinta* Sisältää	Monipolttoainearina 300 000 € Polttolaitteen ja polttoainesyöttöjärjestelmän*	Luku 4.2.1
Lämmöntalteenottokattilan tyyppi Budjettihinta* Sisältää	Höyrykattila 100 000 € Tulistimet ja varusteet	
Höyryturbiinin tyyppi Budjettihinta, teholle 100 kWe Sisältää	STG 108 000 € Generaattori ja kontrollipaneeli	Luku 4.2.2
Savukaasujen puhdistusjärjestelmän tyyppi Budjettihinta* Sisältää	Kuiva savukaasujen puhdistusjärjestelmä 100 000 € Multisykloni, pussisuodatinsysteemi, kemikaalisyöttö	Luku 4.2.3
Savukaasujen mittausjärjestelmän tyyppi Budjettihinta Sisältää	FTIR 88 000 € Analysaattorit, näytteenottolinjat, hiukkasmittaus, anturit ym.	Luku 4.2.4 Luku 4.2.4
Merikontit uudet, 40'HC Budjettihinta Sisältää	4 kpl voimalaitosrakennukseen ja 1 kpl polttoainesyöttöjärjestelmään 13 200 € -	Luku 4.2.5
Yhteensä, budjettihinta	709 200 €	

\* Ferroplan Oy arvio

Taulukossa 16 esiintyvät budjetoidut hinnat eivät sisällä toimituskustannuksia eivätkä arvonlisäveroa. Arinapolttolaitteeksi valittiin Ferroplan Oy:n itse kehittämä monipolttoainekattila, koska ei löydetty muita näiden polttoaineiden polttamiseen tarkoitettuja höyryntuotantoon soveltuvia arinakattiloita sellaisenaan sopivaksi. Arinakattilan budjettihinta sisältää myös polttoaineensyöttöjärjestelmälle arvioidut kustannukset.

Taulukon 16 lisäksi budjetoitiin voimalaitokseen muut investointiin liittyvät kustannukset. Ne arvioitiin Ferroplan Oy:n saaman ei-julkisen, Tiusasen (2015) tarjouksen mukaan. Taulukossa 17 on esitetty mitkä laitekokonaisuudet ja työt laitokseen liittyy pääkomponenttien lisäksi ja esitetty yhteenlaskettu voimalaitoksen kokonaisbudjetti.

**Taulukko 17. Voimalaitoksen budjettihinta.**

Budjettihinta	
Muut laitteet	Työ
Apupoltin	Automaatio
Eristysmateriaalit ja pinnoitukset	Eristys
Höyrykattilan oheislaitteet	Instrumentointi
Höyryputkisto	Käynnistys ja koeajot
Lisäputkistot vesi ja höyry	Laadunvarmistus
Maakaasuputkisto	Mekaaninen valmistus ja valvonta
Savukaasupuhallin	Perussuunnittelu
SK-kanavisto, tuenta, savupiippu	Pinnoitukset, maalaukset
Syöttövesijärjestelmä	Sähköistys
Syöttövesiputkisto	Valvonta
Sähkölaitteet	Yksityiskohtainen suunnittelu
Tuhkankeruu järjestelmä, siilot	
Valvonta ja kontrollilaitteet	
137 500,00 €	69 500,00 €

Muut laitteet ja työ, yhteensä:	207 000,00 €
---------------------------------	--------------

Pääkomponenttien budjettihinnat yhteensä:	709 200,00 €
Voimalaitoksen budjetti yhteensä:	916 200,00 €

#### 4.4.2 Investointilaskelma

Tässä luvussa arvioitiin pien-CHP –laitokselle eri asiakastapauksille voimalaitoksen kiinteät ja muuttuvat kustannukset sekä laina-aika ja lainan korko. Tässä laina-ajalla tarkoitetaan samaa kuin investoinnin pitoaika. Seuraava taulukko 18 esittää investointilaskelmaan taloudellisia lähtöarvoja ja eri asiakastapauksille muodostuneita kustannuksia sekä kassavirtalaskelman. Laskelman pohjana oli luvun 4.4, taulukon 15 ja 17 lähtötiedot.

**Taulukko 18. Taloudelliset lähtöarvot ja kustannukset sekä kassavirtalaskelma eri asiakasryhmillä.**

Taloudelliset lähtöarvot	Yhdyskunta-asiakas					Teollisuusasiakas					Maatalousasiakas					Tietolähde tai peruste
	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
Investoinnin pitoaika, a	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	Luku 4.4
Laskentakorko, %	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	0,0802	Luku 4.4
Annuiteettitekijä, C	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	916 200 €	Liite 9 kaava (5)
Investointikustannus, €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	73 518 €	Taulukko 17
Investoinnin vuosikustannukset (annuiteetti), €																Liite 9 kaava (5)
Henkilöstökustannukset, miehitettömän laitoksen, €/a	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	36 000 €	Luku 4.4
Savukaasupuhdistuksen, kemikaalit	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	17 860 €	Luku 4.2.3
sammutettu kaikki, €/a	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	8 302 €	Luku 4.2.3
aktiivihiihi, €/a	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	13 325 €	Luku 4.2.4
Päästömittauskustannus, €/a	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	10 000 €	Luku 4.4
Muut käyttö- ja kunnossapitokustannukset, €/a																
Sähkön myyntihinta, €/MWh	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	32,45 €	
Kaukolämmön myyntihinta, €/MWh	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	77,36 €	
Sähkön ostohinta, €/MWh	-	-	-	-	-	85,50 €	85,50 €	85,50 €	85,50 €	85,50 €	85,50 €	85,50 €	85,50 €	85,50 €	85,50 €	Luvut 4.3.1, 4.3.2 ja 4.3.3
Lämmön ostohinta, €/MWh	-	-	-	-	-	82,80 €	82,80 €	82,80 €	82,80 €	82,80 €	82,80 €	82,80 €	82,80 €	82,80 €	82,80 €	
Porttimaksusta saatava hyöty, €/t	67,60 €	67,60 €	67,60 €	67,60 €	67,60 €	110,66 €	110,66 €	110,66 €	110,66 €	110,66 €	110,66 €	110,66 €	110,66 €	110,66 €	110,66 €	
<b>Kassavirtalaskelma</b>	<b>Yhdyskunta-asiakas</b>					<b>Teollisuusasiakas</b>					<b>Maatalousasiakas</b>					<b>Tietolähde tai peruste</b>
Kiinteät kustannukset, €/a	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	119 518 €	Luku 3.1.2
Muuttuvat kustannukset, €/a	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	39 487 €	Tässä kemikaalit ja päästömittauskustannus yhteensä
Myyty sähköenergia, €/a	8 437 €	19 470 €	27 583 €	27 583 €	27 583 €	5 906 €	13 629 €	19 308 €	19 308 €	19 308 €	- €	- €	- €	- €	- €	Laskettu arvo.
Myyty lämpöenergia, €/a	333 886 €	413 102 €	512 897 €	512 897 €	512 897 €	160 814 €	198 968 €	247 034 €	247 034 €	247 034 €	- €	- €	- €	- €	- €	Laskettu arvo.
Säästöt porttimaksuissa, €/a	114 585 €	148 740 €	187 302 €	187 302 €	187 302 €	73 289 €	95 135 €	119 799 €	119 799 €	119 799 €	107 112 €	139 040 €	175 087 €	175 087 €	175 087 €	Laskettu arvo.
Säästöt lämmön hankinnassa, €/a	-	-	-	-	-	35 736 €	44 215 €	54 896 €	54 896 €	54 896 €	357 365 €	442 152 €	548 964 €	548 964 €	548 964 €	Laskettu arvo.
Säästöt sähkön hankinnassa, €/a	-	-	-	-	-	6 669 €	15 390 €	21 803 €	21 803 €	21 803 €	31 434 €	72 540 €	102 765 €	102 765 €	102 765 €	Laskettu arvo.
Vuositulot, €/a	456 907 €	581 312 €	727 781 €	727 781 €	727 781 €	282 414 €	367 337 €	462 840 €	462 840 €	462 840 €	495 911 €	653 732 €	826 816 €	826 816 €	826 816 €	Laskettu arvo.
Vuosittaiset kustannukset, €/a	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	159 005 €	Laskettu arvo.
Kassavirta (CF), €/a	297 902 €	422 307 €	568 776 €	568 776 €	568 776 €	123 409 €	208 332 €	303 834 €	303 834 €	303 834 €	336 906 €	494 727 €	667 811 €	667 811 €	667 811 €	Liite 9 kaava (4)
Kassavirta (CF), €/kk	24 825 €	35 192 €	47 398 €	47 398 €	47 398 €	10 284 €	17 361 €	25 320 €	25 320 €	25 320 €	28 075 €	41 227 €	55 651 €	55 651 €	55 651 €	Laskettu arvo.



### 4.4.3 Kannattavuuslaskennan tulokset

Taulukossa 19 on esitetty kannattavuuslaskennan tulokset taulukoiden 15, 17 ja 18 pohjalta.

**Taulukko 19. Kannattavuuslaskennan tulokset eri asiakasryhmille.**

Kannattavuuden luvut	Laitoksen profiili	Nettonykyarvo, NPV, €	Takaisinkasuaika vuosina, a	Sijoitetun pääoman tuotto prosentti, ROI, %
Yhdyskunta-asiakas	Huono	2 796 318 €	3	32,51 %
	Keskinkertainen	4 346 675 €	2	46,09 %
	Hyvä	6 172 003 €	2	62,08 %
Teollisuusasiakas	Huono	621 751 €	7	13,47 %
	Keskinkertainen	1 680 077 €	4	22,74 %
	Hyvä	2 870 248 €	3	33,16 %
Maatalousasiakas	Huono	3 282 389 €	3	36,77 %
	Keskinkertainen	5 249 186 €	2	54,00 %
	Hyvä	7 406 199 €	1	72,89 %
Tietolähde tai peruste		Liite 9 kaava (7)	Liite 9 kaava (1)	Liite 9 kaava (10)

### 4.4.4 Herkkyystarkastelun tulokset

Herkkyystarkastelu esitetään taulukoilla simuloimalla muuttuvia olosuhteita investointiympäristössä. Muuttamalla taulukoiden 15 tai 18 arvoja saadaan erilaisia muutoksia aikaan taulukkoon 19. Valitaan herkkyystarkasteluun vain ”keskinkertaisen laitoksen” tapaus kullekin asiakasryhmälle taulukosta 15, 17 ja 18. Muuttujia vaihdellaan yksi kerrallaan siten, että muut arvot pysyvät ennallaan.

Valitaan herkkyystarkastelun kohteeksi viisi kriittistä ympäristömuuttujaa, joilla arvioitaisiin olevan suurin riskivaikutus investoinnin kannattavuuteen:

1. Investointikustannuksen muutos.
2. Investoinnin pitoaika eli asiakkaan lainan takaisinmaksuaika rahoittajalle.
3. Korko.
4. Lämmön myyntihinta.
5. Jätteen porttimaksu.

Kohdassa 1, investointikustannuksen muutos voi tapahtua esimerkiksi laitoksen kustannusrakenteen muutoksen vaikutuksesta tai siitä, että laitoksesta pyydetään suurempaa tai pienempää markkinahintaa. Muuttamalla laskelmassa investointikustannusta pidetään korkotaso alkuperäisessä taulukon 18 arvossa. Investointikustannusta muuttamalla voidaan arvioida, missä menee sellaiset rajat, jotka asiakas näkee vielä houkuttelevana investoida laitokseen.

Kohdat 2 ja 3 liittyvät rahoitus- tai lainamarkkinoihin ja siihen, minkälaista lainaa on saatavissa, kuinka pitkällä takaisinmaksuajalla ja millä korolla. Näillä voidaan arvioida itsestä riippumatonta riskiä voimalaitoksen hankintaan asiakkaan näkökulmasta ja sillä voi olla keskeinen vaikutus hankintapäätökseen.

Kohta 4 lämmön myyntihinta voi muuttua tarkasteltavalla aikajaksolla kilpailevien polttoaineiden hintojen mukaan lämmönhankinnassa. Lämmönhinnan vaihtelu otetaan mukaan herkkyystarkasteluun, koska sillä on suhteellisen suuri vaikutus koko voimalaitoksen tulo- tai kustannusrakenteeseen.

Jätteen porttimaksu, kohta 5, eli eri asiakasryhmien porttimaksun aiheuttama nettohyöty otetaan mukaan herkkyystarkasteluun, koska sillä oletetaan olevan keskeinen vaikutus jätteenpolton kannattavuuteen.

Seuraavissa taulukoissa esitetään herkkyystarkastelu eri asiakasryhmien tapauksissa vaihtelemalla kyseessä olevaa muuttujaa välillä – 60 %...+60 %, 20 %:n välein verrattuna taulukoissa 15, 18 ja 19 esitettyihin perustapauksiin. Taulukko 20 esittää herkkyystarkastelua investointikustannuksen muutokseen sekä muutosta kannattavuuden tunnuslukuihin.

### Taulukko 20. Investointikustannuksen herkkyystarkastelu.

Kyseessä oleva muuttuja: investointikustannus

Vaikutus muuttujaan, %	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60
------------------------	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----

Yhdyskunta-asiakas							
Muuttujan arvo	366 480 €	549 720 €	732 960 €	916 200 €	1 099 440 €	1 282 680 €	1 465 920 €
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	5 446 115 €	5 079 635 €	4 713 155 €	4 346 675 €	3 980 195 €	3 613 715 €	3 247 235 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	1	1	2	2	3	3	4
ROI, %	127,27 %	82,17 %	59,62 %	46,09 %	37,07 %	30,63 %	25,80 %

Teollisuusasiakas							
Muuttujan arvo	366 480 €	549 720 €	732 960 €	916 200 €	1 099 440 €	1 282 680 €	1 465 920 €
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	2 779 517 €	2 413 037 €	2 046 557 €	1 680 077 €	1 313 597 €	947 117 €	580 637 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	1	2	3	4	6	7	9
ROI	68,88 %	43,25 %	30,43 %	22,74 %	17,61 %	13,95 %	11,20 %

Maatalousasiakas							
Muuttujan arvo	366 480 €	549 720 €	732 960 €	916 200 €	1 099 440 €	1 282 680 €	1 465 920 €
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	6 348 626 €	5 982 146 €	5 615 666 €	5 249 186 €	4 882 706 €	4 516 226 €	4 149 746 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	1	1	1	2	2	3	3
ROI, %	147,03 %	95,35 %	69,50 %	54,00 %	43,66 %	36,28 %	30,74 %

Taulukossa 21 on esitetty herkkyystarkastelu kuinka lainan pitoaika vaikuttaa pien-CHP –laitoksen kannattavuuteen eri asiakasryhmillä. Tässä rahoituksen 5 %:n on pidetty samana koko tarkastelulle.

## Taulukko 21. Investoinnin pitoajan herkkyytarkastelu.

Kyseessä oleva muuttuja: investoinnin pitoaika

Vaikutus muuttajaan, %	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60
------------------------	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----

Yhdyskunta-asiakas							
Muuttujan arvo	8	12	16	20	24	28	≈ 45
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	1 372 222 €	2 562 222 €	3 541 237 €	4 346 675 €	5 009 311 €	5 554 464 €	6 980 428 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	3	2	2	2	2	2	2
ROI, %	38,65 %	42,84 %	44,89 %	46,09 %	46,87 %	47,41 %	48,49 %

Teollisuusasiakas							
Muuttujan arvo	8	12	16	20	24	28	≈ 45
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	- 10 742 €	665 710 €	1 222 228 €	1 680 077 €	2 056 751 €	2 366 641 €	3 177 226 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	7	5	5	4	4	4	4
ROI, %	15,29 %	19,48 %	21,54 %	22,74 %	23,52 %	24,05 %	25,14 %

Maatalousasiakas							
Muuttujan arvo	8	12	16	20	24	28	≈ 45
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	1 840 287 €	3 204 096 €	4 326 106 €	5 249 186 €	6 008 606 €	6 633 383 €	8 267 622 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	2	2	2	2	2	2	2
ROI, %	46,55 %	50,74 %	52,79 %	54,00 %	54,77 %	55,31 %	56,40 %

Taulukossa 22 on esitetty kuinka lainan korko vaikuttaa investoinnin kannattavuuteen eri asiakasryhmillä. Tässä lainan pitoaika 20 vuotta on pidetty samana koko tarkastelulle.

## Taulukko 22. Lainan koron herkkyytarkastelu.

Kyseessä oleva muuttuja: lainan korko, %

Vaikutus muuttajaan, %	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60
------------------------	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----

Yhdyskunta-asiakas							
Muuttujan arvo	2	3	4	5	6	7	8
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	6 275 049 €	5 544 224 €	4 906 023 €	4 346 675 €	3 854 674 €	3 420 377 €	3 035 683 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	2	2	2	2	2	2	2
ROI, %	48,00 %	47,40 %	46,76 %	46,09 %	45,40 %	44,68 %	43,93 %

Teollisuusasiakas							
Muuttujan arvo	2	3	4	5	6	7	8
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	2 776 256 €	2 360 820 €	1 998 037 €	1 680 077 €	1 400 400 €	1 153 526 €	934 847 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	4	4	4	4	5	5	5
ROI, %	24,65 %	24,04 %	23,40 %	22,74 %	22,04 %	21,32 %	20,58 %

Maatalousasiakas							
Muuttujan arvo	2	3	4	5	6	7	8
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	7 459 217 €	6 621 647 €	5 890 232 €	5 249 186 €	4 685 323 €	4 187 593 €	3 746 711 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	2	2	2	2	2	2	2
ROI, %	55,91 %	55,30 %	54,66 %	54,00 %	53,30 %	52,58 %	51,84 %

Taulukossa 23 on esitetty kuinka lämmön myyntihinnan keskimääräinen vuosivaihtelu voi vaikuttaa investoinnin kannattavuuteen eri asiakasryhmillä.

**Taulukko 23. Kaukolämmön myyntihinnan herkkyytarkastelu.**

Kyseessä oleva muuttuja: kaukolämmön myyntihinta, €/ MWh

Vaikutus muuttujaan	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60
---------------------	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----

Yhdyskunta-asiakas							
Muuttujan arvo	30,94	46,42	61,89	77,36	92,83	108,30	123,78
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	1 257 508 €	2 287 674 €	3 317 175 €	4 346 675 €	5 376 176 €	6 405 677 €	7 435 843 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	5	4	3	2	2	2	1
ROI, %	19,04 %	28,06 %	37,08 %	46,09 %	55,11 %	64,13 %	73,15 %

Teollisuusasiakas							
Muuttujan arvo	16,56	24,84	33,12	41,40	49,68	57,96	66,24
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	192 325 €	688 243 €	1 184 160 €	1 680 077 €	2 175 994 €	2 671 912 €	3 167 829 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	10	7	5	4	4	3	3
ROI, %	9,71 %	14,05 %	18,40 %	22,74 %	27,08 %	31,43 %	35,77 %

Maatalousasiakas							
Muuttujan arvo	30,94	46,42	61,89	77,36	92,83	108,30	123,78
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	Ei vaikutusta			5 249 186 €	Ei vaikutusta		
Takaisinmaksuaika, vuotta	Ei vaikutusta			2	Ei vaikutusta		
ROI, %	Ei vaikutusta			54,00 %	Ei vaikutusta		

Taulukossa 24 on esitetty miten porttimaksusta saatava hyöty vaikuttaa investoinnin kannattavuuteen eri asiakasryhmillä.

**Taulukko 24. Jätteen porttimaksusta saatavan hyödyn herkkyytarkastelu**

Kyseessä oleva muuttuja: jätteen porttimaksu, €/ t

Vaikutus muuttujaan	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60
---------------------	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----

Yhdyskunta-asiakas							
Muuttujan arvo	27,04	40,56	54,08	67,60	81,12	94,64	108,16
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	3 234 501 €	3 605 226 €	3 975 950 €	4 346 675 €	4 717 400 €	5 088 125 €	5 458 850 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	3	3	2	2	2	2	2
ROI, %	36,35 %	39,60 %	42,85 %	46,09 %	49,34 %	52,59 %	55,83 %

Teollisuusasiakas							
Muuttujan arvo	44,26	66,40	88,53	110,66	132,79	154,92	177,06
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	968 681 €	1 205 885 €	1 442 981 €	1 680 077 €	1 917 173 €	2 154 269 €	2 391 473 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	6	5	5	4	4	4	3
ROI, %	16,51 %	18,59 %	20,66 %	22,74 %	24,82 %	26,89 %	28,97 %

Maatalousasiakas							
Muuttujan arvo	21,75	32,63	43,50	54,38	65,26	76,13	87,01
Vaikutus investoinnin tunnuslukuihin							
NPV	4 209 476 €	4 556 152 €	4 902 510 €	5 249 186 €	5 595 862 €	5 942 219 €	6 288 895 €
Takaisinmaksuaika, vuotta	2	2	2	2	2	2	2
ROI, %	44,89 %	47,93 %	50,96 %	54,00 %	57,03 %	60,07 %	63,10 %

## 5 Virhe- ja luotettavuusarviointia

### 5.1 Kirjallisten ja verkkolähteiden arviointia

Verkkolähteisiin on aina suhtauduttava kriittisesti, koska ei voida tietää, onko sisältö kolmannen osapuolen rahoittama, jolla voi olla oma agenda vaikuttaa yleisön mielipiteisiin. Hyvin tärkeää on erottaa mielipiteet faktoista. Monesti esimerkiksi yritysten nettisivuilla ja esitteissä kuvaillaan tuotteita sanoilla hyvä tai suorituskykyinen, mutta näiden tueksi ei lukijalla ole välttämättä empiiristä kokemusta tai tutkimusnäyttöä. Referenssilaitteet kannattaa aina käydä katsomassa paikan päällä, jotta saa kuvan, jos ei täysin saman laitteen, niin yrityksen jonkun muun samantyyppisen laitteen toiminnasta ja luotettavuudesta.

Laitevalmistajien tietojen kaunistelu näyttää olevan enemmän sääntö kuin poikkeus. Useat valmistajat eivät esitä muita kuin omia lähteitä taulukoidensa ja diagrammiensa tueksi. Tästä tulee lukijalle sellainen kuva, että tiedot tulevat yrityksen omista tutkimuksista, jolloin lukija saattaa luottaa tietoihin sen mukaan, kuinka hän kokee yleisesti yrityksen luotettavuustason. Myös esitteiden ja internet-sivujen tiedot voivat olla vanhentuneita, jolloin puhelinvarmistukset ovat aina paikallaan, kun asioita selvittää. Usein tarjouksen selvitysvaiheessa tulee ilmi, että jokin laite ei sovellukaan tarkoituksiin, vaikka esitteiden tai internet-sivuilta sellainen käsitys saadaan.

EU:n direktiivien ja Suomen lain päätösten ja säädösten tulkinnassa tulee olla erityisen huolellinen, koska väärintulkinnat voivat johtaa koko projektin kaatumiseen. Tässä työssä näitä direktiivejä ja lakeja ei ole välttämättä tulkittu oikein, ja ajankohtaiset tiedot tulisikin aina tarkistaa viranomaisilta, lakimiehiltä tai konsulteilta varmuudeksi. Tämä lisää riskiä tämän työn analyysien paikkansapitävyydestä.

### 5.2 Laskelmat

Laskelmien totuudenmukaisuutta kuvataan yleisesti esimerkiksi seuraavasti, johon myös tämän työn kohdalla voidaan yhtyä:

- Yleisimpiä kannattavuustarkastelussa tehtyjä arviointivirheitä ovat huipunkäyttöaikojen ja sähköntuotannon arvioiminen liian suureksi. Myös käyttö- ja kunnossapitokustannuksia aliarvioidaan. Oleellisesti lopputulokseen vaikuttaa laskennassa käytetty energian hinta. (Aaltonen & Ukkonen 2008.)
- Vertailun vuoksi laskelmat tulee tehdä erikseen jokaiselle vaihtoehdolle. Tarkkuuden saavuttaminen voi olla hyvin hankalaa, mutta se ei ole ongelma suurempien epävarmuustekijöiden vallitessa. Esimerkiksi sähkön ja polttoaineen hinta-arviot ovat hyvin usein suurimmat epävarmuustekijät. Laskennan sisäistä tarkkuutta on saatu parannettua vain, jos lähtötietoja on ollut perusteltua käsitellä vastaavalla tarkkuudella. (Pirilä & Mankki 2003.)
- Omat laskelmat sisältävät riskin tehdä virheitä. Taulukkolaskenta Excel –ohjelmalla voi olla hyvin virheeltistä. Kaavojen ja erilaisten laskentapolkujen virheettömyyden tarkastaminen on työlästä ja taulukoihin virheellisellä tavalla tehdyt muutokset johtavat hyvinkin yllättäviin virheisiin. Myös ohjeiden ja teorioiden tulkinta, varsinkin ulkomaalaisista lähteistä, voi johtaa teorioiden vä-

riin soveltamismenetelmiin laskennassa. Virheiden välttäminen edellyttää sekä Excelin toimintasäntöjen tai analogian syvää tuntemusta sekä suurta huolellisuutta. Suosittelemme laskemaan kaikki kolmeen kertaan, jotta varmistetaan tulosten oikeellisuudesta. (Pirilä & Mankki 2003.)

Tämän työn kannattavuuslaskennan tuloksia on tarkasteltava kriittisesti, koska lähtöoletusten kerrannaisvaikutukset kumuloituvat voimakkaasti laskelmien tuloksiin, joista suurimmat johtopäätökset tehdään. Laskelmat ovat siis voimakkaasti riippuvaisia lähtöoletuksista ja niissä olevista mahdollisista virheistä. Virhemahdollisuus kasvaa myös muuttujien tai parametrien määrän tai prosessien monimutkaisuuden kasvaessa. Siksi saadut tulokset voivat olla vain likimääräisiä tai suuntaa-antavia. Lisäksi on otettava huomioon lähtötietojen oikeellisuus. Esimerkiksi laitteiden hinnat saattavat muuttua ajan edetessä ja kuten on monesti nähty, etenkin polttoaineiden hinnat voivat muuttua hyvin paljon lyhyelläkin aikavälillä. Muita laskelmien luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä on pohdittu olevan:

- Taulukkolaskenta oli osaksi teoreettinen, jossa tehtiin karkeita oletuksia.
- Sähkön, kuin muunkin energian hintaa on vaikeaa ennustaa pitkällä aikavälillä.
- Voimalaitoksen ja varsinkin rakenteilla olevan monipolttolaitoksen käytettävyyttä on vaikea arvioida ja siten esimerkiksi vuosittaisia todellisia käyttötunteja.
- Taloudelliset tunnusluvut voivat olla liian optimistisia, koska esimerkiksi taulukon 18 ”Kaukolämmön myyntihinta” sisältää verot ja muut maksut.
- Herkkyystarkastelu ei ottanut huomioon eri muuttujien kerrannaisvaikutuksia, eli useamman muuttujan samanaikaista vaikutusta. Tätä kannattaisi vielä tutkia myöhemmin syvällisemmin riskien tiedostamiseksi.
- Muuttuviin kustannuksiin ei ole taloudellisissa laskelmissa huomioitu poltosta syntyvän tuhkan hävityskustannusta.

Tekniset alkutiedot voivat vaikuttaa merkittävästi herkkyystarkastelun tuloksiin eri asiakasryhmillä. Työssä tehty laskentasimulointi pyrittiin tekemään siitä näkökulmasta, mikä eri asiakastapauksissa voisi olla kyseessä tilanne keskimäärin. Koska uutta pien-CHP –laitosta ei ole vielä testattu käytännössä, simuloinnissa pyrittiin arvioimaan laitoja erilaisten suorituskykyprofiilien kautta. Sillä osoittautui olevan eri asiakasryhmien kannattavuuteen jonkin verran vaikutusta.

Laskelmissa ei ole huomioitu mitä esimerkkiasiakas tekee, kun laitos ei ole toiminnassa. Tältä ajalta asiakas joutuu edelleen maksamaan käyttämästään energiasta, kuten ennen pien-CHP –laitoksen hankintaa, joten sillä ei nähty olevan merkitystä tässä työssä tehtyihin esimerkkiasiakkaiden laskelmiin.

Esimerkkilaskelmissa on oletettu, että alue- tai kaukolämpöverkko on aina saatavilla. Jos näin ei ole, tilanne voi olla täysin toisenlainen kannattavuuden lukujen suhteen. Jatkossa olisi hyvä tutkia, jos kaikkea lämpöä ei pystytä hyödyntämään, kuinka paljon lämpöä pitäisi pystyä hyödyntämään, jotta laitos olisi kannattava. Ylijäämälämpö pitäisi ajaa esimerkiksi apulauhduttimilla taivaalle, jos sähköntuotantoa haluttaisiin pitää täydellä teholla. Olisi myös huomioitava apulauhduttimen investointikustannuslisä.

## 6 Johtopäätökset

Kirjallisuudesta löydettyjen tietojen mukaan hajautettu energiatuotanto on trendi, joka tulee kasvamaan. Tämä kasvu tarjoaa mahdollisuuksia uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämiseen hajautetusti entistä tehokkaammin. Tässä työssä etsittiin vaihtoehtoa jätteiden hyödyntämiseen paikallisesti polttamalla ja tuottamalla samalla energiaa. Kehitteillä oleva uusi konsepti voi tulevaisuudessa toimia yhtenä osana sekä jätteiden että biomassan hyödyntäjänä niin Suomessa kuin ulkomailla. Uusi pien-CHP –laitoskonsepti voi muuttaa taajamien energiainfrastruktuuria varmemmaksi ja omavaraisemmaksi.

Tässä työssä keskityttiin etsimään soveltuvaa teknologiaa pien-CHP –laitoksen toteuttamiseksi Suomessa siten, että sillä voitaisiin polttaa paikallista jätettä ja tuottaa samalla sekä sähköä että lämpöä. Teknologian selvityksellä saatiin selville laitoksen tekninen suorituskyky potentiaali, eli esimerkiksi paljonko jätettä pystytään polttamaan ja kuinka paljon energiaa saataisiin talteen. Teknisten lähtötieto-oletusten avulla luotiin taulukkolaskentamalli, jolla eri asiakkaiden tilanteita voitaisiin arvioida.

Teknologian kartoittaminen sisälsi tarjouskyselyjen tekemistä yrityksiin. Tarjouskyselyistä saatiin pääkomponenttien hintoja markkinoilta. Niiden avulla arvioitiin laitoksen investointikustannus budjetoimalla päälaitteet ja muut laitteet. Budjetin pohjalta tehtiin investointilaskelma teknisen laskelman pohjalta. Niiden avulla laskettiin edelleen kannattavuuden tunnuslukuja eri asiakastapauksille. Lopuksi tehtiin herkkyystarkastelu muuttamalla viittä eri lähtöarvoa: investointikustannus, investoinnin pitoaika, korko, lämmön myyntihinta ja jätteen porttimaksu.

Näyttää siltä, että markkinoilta on saatavissa vain keskisuuria yli 10 MW tai suuria yli 50 MW kokoluokkaa vastaavia jätteenpoltoon ja höyryntuotantoon soveltuvia arinakattiloita. Pienen kokoluokan arinapolttolaitteita oli haastavaa löytää, ja löydettiinkin vain yksi tässä tapauksessa, joka sopii yhdyskuntajätteelle. Koska siihen oli integroitu lämmöntalteenotto kuumavesisovelluksena, ei siitä olisi ollut höyryn tuotantoon. Muutamalla valmistajilla oli arinakattiloita, jotka sopivat jollekin yhdelle jätejakeelle ja rinnakkaispoltoon biomassalla. Oli myös haastavaa löytää lämmöntalteenottokattiloita, joilla voitaisiin tuottaa tulistettua höyryä. Markkinoilta löydettiin useita toimittajia pien-CHP –laitoksen seuraaville päälaitteille: höyryturbiini, multisykloni, letkusuodatin ja jätteenpoltoon soveltuva savukaasujen jatkuvatoiminen mittausjärjestelmä

Tekniikka ei ollut esteenä löytää sähköntuotantoon soveltuvaa pienen kokoluokan höyryturbiinia. Myös savukaasujen kuiva puhdistusmenetelmä on saatavilla 1 MW:n kokoluokassa, mikä on kriittisin edellytys toiminnalle niin Suomessa kuin muualla Euroopan Unionin maissa, jossa päästöraja-arvot on alitettava jätteiden poltossa.

Tässä työssä päädyttiin siihen, että pienen kokoluokan jätteenpolttolaitos olisi rakennettavissa yhteistuotantoon alle 1 M € budjetilla, joka oli yksi työn tavoitteista. Todellisuudessa eri osakokonaisuuksien hintoja voidaan vielä kilpailuttaa ja saada siten investointikustannusta edullisemmaksi. Talouden tunnuslukujen laskennan perustapauksessa (taulukko 19) päästiin kaikkien paitsi yhden esimerkkiasiakkaan tapauksessa alle 4 vuoden takaisinmaksuaikaan, kun tavoite oli 6 vuotta. Vain tapauksessa, jossa laskettiin teollisuusasiakkaan takaisinmaksuaika vuotuisilla käyttötunneilla 6500 h / a ja polttoaineteholla 909 kW, nousi investoinnin takaisinmaksuaika 7 vuoteen.

Uusi voimalaitoskonsepti avaa teknologiavientimahdollisuuksia ulkomaille, jos pilot-laitos saadaan onnistuneesti rakennettua, ja niin tekniikka kuin taloudelliset perusteetkin varmistettua. Potentiaalisia asiakkaita on tässä työssä etsitty kirjallisuudesta ja arvioitu esimerkkiasiakkaiden tapauksissa. Työtä varten luotu laskentamenetelmä antaa mahdollisuuksia perustella potentiaalisille asiakkaille, miten he voisivat saada lisäarvoa pien-CHP –laitoksella.

Herkkyystarkastelu osoitti, ettei jätteen porttimaksun muutoksella ollut kovin suurta vaikutusta investoinnin kannattavuuden tunnuslukuihin. Paljon suurempi vaikutus oli kaukolämmön myyntihinnalla. Se näkyi takaisinmaksuajan pienenä muutoksena yhdyskunta- ja teollisuusasiakkaalla. Maatalousasiakkaan tapauksessa lämmön myyntihinnan vaihteluilla ei ole ollut tässä tarkastelussa merkitystä pääosin siksi, että kaikki lämpö meni omaan käyttöön. Kaukolämmön myyntihinnan antamasta tulosta pitää huomioida, että se sisälsi verot ja muut maksut, jotka lämmön myyjän pitää maksaa edelleen verotajalle. Näin ollen omistaja ei saa täyttä hyötyä tässä käytetystä kaukolämmön myyntihinnasta. Tämä voi osaltaan vaikuttaa liian optimistisesti kassavirtaan ja sitä kautta kannattavuuden tunnuslukuihin. Jatkossa voitaisiin tutkia paremmin lämmön myyntihinnan vaikutusta, kun tiedetään tarkalleen lämmön myynnistä saatava tulo.

Herkkyystarkastelussa tutkittiin lainan pitoajan ja koron vaikutuksia. Tulosten mukaan lainan pitoaika ei vaikuttanut merkittävästi sijoituksen kannattavuuteen eri asiakasryhmillä. Eräs poikkeus tähän oli teollisuusasiakkaan tapaus, jossa lainan pitoaika oli 8 vuotta. Siinä pien-CHP –laitoksen nettonykyarvo meni negatiiviseksi ja sitä myöten kannattamattomaksi. Kaikissa muissa herkkyystarkasteluissa taloudelliset tunnusluvut kestivät muuttujien vaihtelut niin, että kaikki vaihtoehdot pysyivät kannattavina. Toisaalta takaisinmaksuajat saattoivat muutamissa ääritapauksessa lähentyä 10 vuotta. Krolla ei ollut merkittäviä vaikutuksia minkään esimerkkiasiakkaan kannattavuuden tunnuslukuihin.

Yhteenvedona voidaan sanoa, että uuden konseptin toteuttaminen pienen kokoluokan CHP -laitoksessa on mahdollinen Suomen olosuhteissa, kunhan otetaan huomioon, että laitoksen investointikustannus pysyy kohtuullisena. Uuden konseptin toteuttaminen on mahdollista, koska

1. jätteenpolton massapoltto Suomessa tarjoaa myös ”niche”-markkinoinnin mahdollisuuden käsitellä jätteitä hajautetusti ja paikallisesti polttamalla
2. sekä EU:n että Suomen lainsäädäntö antaa mahdollisuuden jätteiden energiatuotantoon myös pienessä kokoluokassa
3. uuden konseptin toteuttamiseksi löytyy markkinoilta koettua tekniikkaa kohtuulliseen hintaan
4. investointi- ja kannattavuuslaskenta osoittaa, että erilaisilla asiakasryhmillä on selkeästi mahdollisuus lisäarvon tuottamiseksi.

Tähän voidaan lisätä vielä, että uusi konsepti on tuotteena mahdollinen, kunhan konseptisuunnittelu, referenssilaitoksen toteuttaminen ja uuden tuotteen markkinoille saattaminen toteutetaan kunnolla, harkitusti ja riskejä halliten.



## Lähdeluettelo

- A.P. Bioenergietechnik GmbH. 2016. References. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: <https://www.oeko-therm.net/en/download/references>.
- Aaltonen, J. & Ukkonen, J. 2008. Pienet alle 4 MW yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto mahdollisuudet. [Verkkojulkaisu]. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Lappeenranta, Suomi. 35 s. [Viitattu 2.1.2017]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200806161564>.
- Aalto-yliopisto. 2011. Teollisuuden energiatekniikka, Peruskaavat ja –käsitteet. Espoo, Suomi: Aalto-yliopisto, Energiatalous ja voimalaitostekniikka. 36 s.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo, Suomi: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Otamedia Oy. 172 s. VTT Tiedotteita 2045. ISBN 951-38-5740-9 (sähköinen) ISBN 951-38-5699-2 (painettu).
- Ariterm Oy. 2017. Biolämmitysjärjestelmät. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: <http://www.ariterm.fi/lammitysratkaisut/kiinteisto/kiinteistot/>.
- BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH. 2017a. Engineering. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 9.1.2017]. Saatavissa: <http://www.bios-bioenergy.at/en/working-field/engineering.html>.
- Bosch Industriekessel GmbH. 2012. Efficiency on a large scale, Steam boilers. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: [http://www.hansapower.fi/images/pdf/br\\_steamboilers\\_en.pdf](http://www.hansapower.fi/images/pdf/br_steamboilers_en.pdf).
- Carvalho, L. & Lundgren, J. & Wopienka, E. & Öhman, M. 2008. Challenges in Small-Scale Combustion of Agricultural Biomass Fuels. [Verkkojulkaisu]. Vol. 9(1-3): S. 127-142. [Viitattu 11.1.2017]. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.v9.i1-3.100.
- CEWEP (Confederation of European Waste-to-Energy Plants. 2017. Energy Efficiency & Climate Protection. [Verkkojulkaisu]. Viitattu 4.1.2017. Saatavissa: <http://www.cewep.eu/information/energyclimate/index.html>.
- EEA (Euroopan Ympäristökeskus). 2016. Jäte: ongelma vai resurssi?. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 4.1.2017]. Saatavissa: <http://www.eea.europa.eu/fi/ymparisto-signaalit/signaalit-2014/artikkelit/jate-ongelma-vai-resurssi>.
- Energiateollisuus ry. 2016a. Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. [Verkkojulkaisu]. Verkostosuositus YA9:13. [Viitattu 3.1.2017]. Saatavissa: [http://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon\\_liittaminen\\_sahkonjakeluverkkoon\\_YA9\\_13\\_verkostosuositus\\_paivitetty\\_20160427.pdf](http://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon_liittaminen_sahkonjakeluverkkoon_YA9_13_verkostosuositus_paivitetty_20160427.pdf).
- Energiateollisuus ry. 2016b. Kaukolämpötilasto 2015. ET-Kaukolämpökansio7/1. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: [http://energia.fi/files/1184/Kaukolampotilasto\\_2015.pdf](http://energia.fi/files/1184/Kaukolampotilasto_2015.pdf). ISSN 0786-4809.

Enggcyclopedia. 2012. Boilers circulation systems: natural circulation and forced circulation. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <http://www.enggcyclopedia.com/2012/01/boilers-circulation-systems-natural-circulation-forced-circulation/>

Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership Program. 2008. Technology Characterization: Steam Turbines. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <https://www.scribd.com/document/231631576/catalog-chptech-steam-turbines-pdf>.

EUVL (Euroopan unionin virallinen lehti). 2006. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/32/EY, annettu 5 päivänä huhtikuuta 2006, energian loppukäytön tehokkuudesta ja energiapalveluista sekä neuvoston direktiivin 93/76/ETY kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti. [Verkkajulkaisu]. OJ:L:2006:114:0064:0085:FI:PDF. S. 64-85. [Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0064:0085:FI:PDF>.

EUVL (Euroopan unionin virallinen lehti). 2008. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY, annettu 19 päivänä marraskuuta 2008, jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti. [Verkkajulkaisu]. OJ:L:312:0003:0030:fi:PDF. S. 3-30. [Viitattu 4.1.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:fi:PDF>.

EUVL (Euroopan unionin virallinen lehti). 2010. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU, annettu 24 päivänä marraskuuta 2010, teollisuuden päästöistä. Euroopan unionin virallinen lehti. [Verkkajulkaisu]. OJ:L:2010:334:0017:0119:fi:PDF. S. 17-119. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:fi:PDF>.

EUVL (Euroopan unionin virallinen lehti). 2012. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU, annettu 25 päivänä lokakuuta 2012, energiatehokkuudesta, direktiivien 2009/125/EY ja 2010/30/EU muuttamisesta sekä direktiivien 2004/8/EY ja 2006/32/EY kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti. [Verkkajulkaisu]. OJ:L:2012:315:0001:0056:FI:PDF. S. 1-56. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:FI:PDF>.

EUVL (Euroopan unionin virallinen lehti). 2014. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/68/EU, annettu 15 päivänä toukokuuta 2014, painelaitteiden asettamista saataville markkinoilla koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti. [Verkkajulkaisu]. OJ:L:2014:189:TOC. S. 164-259. [Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=fi>.

Finlex. 1999a. 891/1999 Asetus kattilalaitosten käytön valvojien pätevyyskirjoista. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1999/19990891>.

- Finlex. 1999b. 953/1999 Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaiteturvallisuu-  
desta. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa:  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1999/19990953>.
- Finlex. 2009a. 65/2009 Valtioneuvoston asetus sähkömarkkinoista. [Verkkajulkaisu].  
[Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090065>.
- Finlex. 2009b. 66/2009 Valtioneuvoston asetus sähköntoimituksen selvityksestä ja mit-  
tauksesta. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa:  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090066>.
- Finlex. 2010. 1126/2010 Jäteverolaki. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa:  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20101126>.
- Finlex. 2011a. 646/2011 Jätelaki. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa:  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>.
- Finlex. 2011b. 647/2011 Laki ympäristönsuojelulain muuttamisesta. [Verkkajulkaisu].  
[Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110647>.
- Finlex. 2012. 179/2012 Valtioneuvoston asetus jätteistä. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu  
5.1.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120179>.
- Finlex. 2013a. 151/2013 Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta. [Verkkajulkaisu].  
[Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130151>.
- Finlex. 2013b. 588/2013 Sähkömarkkinalaki. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2017].  
Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>.
- Finlex. 2013c. 750/2013 Valtioneuvoston asetus polttoaineteholtaan alle 50 megawatin  
energiatuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu  
8.1.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130750>.
- Finlex. 2014a. 527/2014 Ympäristönsuojelulaki. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.1.2017].  
Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140527>.
- Finlex. 2014b. 713/2014 Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta. [Verkkajulkai-  
su]. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140713>.
- Finlex. 2014c. 1429/2014 Energiatehokkuuslaki. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2017].  
Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141429>
- Finlex. 2016a. 1135/2016 Sähköturvallisuuslaki. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2017].  
Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>.
- Finlex. 2016b. 273/2016 Työ- ja elinkeinoministeriön asetus sähkökaupassa ja sähkön-  
toimitusten selvityksessä noudatettavasta tiedonvaihdosta. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu  
8.1.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20160273>.

Finlex. 2016c. 1144/2016 Painelaitelaki. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161144>

Fogelholm, C-J. 1994. Energiatalous ja ympäristönsuojelu. Espoo, Suomi: Teknillinen korkeakoulu. Hakapaino Oy. 189 s. Raportti 61. ISBN 951-22-2015-6.

Griffiths, A.J. & Syred, N. & Fick W. 2000. A review of biomass and associated work at Cardiff relating to small scale heat and power systems. IFRF-Combustion Journal – 1999 - 2000. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=90392E2FE66467540C54C76A4AD80EAE?doi=10.1.1.608.1274&rep=rep1&type=pdf>. ISSN 1562-479X.

GSTC (Gasification & Syngas Technologies Council). 2017. Plasma Gasification. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: <http://www.gasification-syngas.org/technology/plasma-gasification/>.

G-Team a.s. 2013. Steam turbine – TR 100. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <http://www.steamturbo.com/steam-turbines/tr-100-6.html>.

Haavisto, T. 2010. Puupolttoaineisiin perustuvat pien- CHP tekniikat. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: [http://www.karelia.fi/biostuli/materiaalit/Pien-CHP-katsaus\\_raportti\\_v11.pdf](http://www.karelia.fi/biostuli/materiaalit/Pien-CHP-katsaus_raportti_v11.pdf).

Huhtinen, M. & Kettunen, A. & Nurminen, P & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uusittu painos. Suomi, Helsinki: Opetushallitus, Oy Edita Ab. ISBN 951-37-3360-2.

JLY (Jätelaitosyhdistys ry). 2016a. Jätteenpolton ja energiahyödyntämisen kehitysvaiheita. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.12.2016]. Saatavissa: <http://www.jly.fi/energia11.php?treeviewid=tree3&nodeid=11>.

JLY (Jätelaitosyhdistys ry). 2016b. Jäte energiaksi. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.1.2017]. Saatavissa: <http://www.jly.fi/energia1.php?treeviewid=tree3&nodeid=1>.

Karjalainen, T. 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto. Oulu, Suomi: Oulun yliopisto. Motiva Oy. 30 s.

Kiertokapula Oy. 2017. Hinnasto 2017. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 13.1.2017]. Saatavissa: [http://www.kiertokapula.fi/wp-content/uploads/2016/12/Hinnasto\\_2017.pdf](http://www.kiertokapula.fi/wp-content/uploads/2016/12/Hinnasto_2017.pdf).

Koskelainen, L. & Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön Käsikirja. Helsinki, Suomi: Energiateollisuus ry. Kirjapaino Libris Oy. 566 s. ISBN 952-5615-08-1.

KPA Unicon Oy. 2014. Bioenergiaratkaisut. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <http://www.kpaunicon.com/Tiedostot/mediabank/esitteet/KPA%20Unicon%20-%20Bioenergiaratkaisut%20FIN%20LR.pdf>.

- Lampinen, J. M. & Assad, H. E. M. & Kotiaho, V. & Saari, K. & Wikstén R. 2010. Teknillinen termodynamiikka. Espoo, Suomi: Teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos, Sovelletun termodynamiikan laboratorio. Edita Prima Oy. 231 s. Raportti 158. ISBN 978-952-248-235-8.
- Lampinen, J. M. 1997. Termodynamiikan perusteet. Kolmas korjattu painos. Helsinki, Suomi: Otatieto. Yliopistokustannus Oy. 182 s. ISBN 951-672-324-1.
- Lampinen, J.M. & Seppälä, A. 2010. Kemiallinen termodynamiikka energiatekniikassa. Espoo, Suomi: Teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan laitos, Sovelletun termodynamiikan laboratorio. 228 s. Raportti 159. ISBN 978-951-22-9212-7.
- Lehto, I. 2009. Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähköjakeluverkkoon. [Verkkajulkaisu]. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Sähkötekniikan laitos. Espoo, Suomi. 101 s. [Viitattu 2.1.2017]. Saatavissa: <https://aalto.doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3116/urn100081.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Makkonen, P. 2015. Jätteenpolttokattilan päästöjen minimointi. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.1.2017].
- Martin GmbH. 2016. Combustion system. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 10.1.2017]. Saatavissa: <http://www.martingmbh.de/en/combustion-system.html>.
- Motiva Oy. 2010. Selvitys hajautetusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 9.1.2017]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/7938/Selvitys\\_hajautetusta\\_ja\\_paikallisesta\\_energiantuotannosta\\_erilaisilla\\_asuinalueilla\\_Loppuraportti.pdf](http://www.motiva.fi/files/7938/Selvitys_hajautetusta_ja_paikallisesta_energiantuotannosta_erilaisilla_asuinalueilla_Loppuraportti.pdf).
- Motiva Oy. 2012. Opas sähkön pientuottajalle. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 2.1.2017]. Saatavissa: [www.motiva.fi/julkaisut/opas\\_sahkon\\_pientuottajalle.2193.shtml](http://www.motiva.fi/julkaisut/opas_sahkon_pientuottajalle.2193.shtml).
- Motiva Oy. 2016a. Pientuotantoa koskeva lainsäädäntö ja velvollisuudet. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2016]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/sahkon\\_pientuotanto/yritys\\_50\\_kv\\_a\\_2\\_mva/lainsaadanto\\_ja\\_velvollisuudet](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/sahkon_pientuotanto/yritys_50_kv_a_2_mva/lainsaadanto_ja_velvollisuudet).
- Motiva Oy. 2016b. Suunnittelu ja asennustyöt. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 9.1.2016]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/sahkon\\_pientuotanto/yritys\\_50\\_kv\\_a\\_2\\_mva/suunnittelu\\_ja\\_asennustyot](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/sahkon_pientuotanto/yritys_50_kv_a_2_mva/suunnittelu_ja_asennustyot).
- Mroueh, U-M. & Ajanko-Laurikko, S. & Arnold, M. & Laiho, A. & Wihersaari, M. & Savolainen, I. & Dahlbo, H. & Korhonen, M-R. 2007. Uusien jätteenkäsittelykonseptien mahdollisuudet kasvihuonepäästöjen vähentämisessä. Espoo, Suomi: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Edita Prima Oy. 170 s. VTT Tiedottaita 2402. ISBN 978-951-38-6960-1 (sähköinen) ISBN 978-951-38-6959-5 (painettu)

Myllymaa, T. & Moliis, K. & Tohka, A. & Isoaho, S. & Zevenhoven, M & Ollikainen, M & Dahlbo, H. 2008. Jätteiden kierrätyksen ja polton ympäristövaikutukset ja kustannukset – jätehuollon vaihtoehtojen tarkastelu alueellisesta näkökulmasta. Helsinki, Suomi: Suomen ympäristökeskus (SYKE), Tutkimusosasto. Kirjapaino Oy. 192 s. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 39|2008. ISBN 978-952-11-3235-3.

Novox Oy. 2017. Konseptisuunnittelu. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 9.1.2017]. Saatavissa: <http://www.novox.fi/fi/palvelut/ruokohelppi-loreem-ipsum>.

Pirhonen, L. 2014. Hiukkaspäästöjen vähentämisen kustannusvaikutukset. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.2.2016]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/ajankohtaista/tapahtumat/motiva\\_ja\\_bioenergia\\_ry\\_jarjestavat\\_la\\_mpyyrittajapaivat\\_2014.568.html](http://www.motiva.fi/ajankohtaista/tapahtumat/motiva_ja_bioenergia_ry_jarjestavat_la_mpyyrittajapaivat_2014.568.html).

Pirilä, P & Mankki, P. 2003. Energiatalous, kannattavuuslaskenta. Espoo, Suomi: Helsinki University of Technology. Department of Energy Technology, Laboratory of Energy Engineering and Environmental Protection. 65 s.

Pirkanmaan jätehuolto. 2017. Jätteenkäsittelymaksut Koukkujärven ja Tarastenjärven jätteenkäsittelykeskuksissa 1.1.2017 alkaen.. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 13.1.2017]. Saatavissa: [http://pjhoy.fi/inet/pjoy/flow.nsf/documents/A139232C3ED6902FC22577D1003FBFB/B/\\$file/Kasittelymaksut2017.pdf](http://pjhoy.fi/inet/pjoy/flow.nsf/documents/A139232C3ED6902FC22577D1003FBFB/B/$file/Kasittelymaksut2017.pdf).

Poikonen, P, Keikko, T, Koskelainen, L, Laurila, L, Pyrhönen, J, Repo, S, Turunen, P & Valkealahti, S. 2005. Hajautetun sähköntuotannon teknologian ja tekniikoiden nykytila sekä tulevaisuuden kehitysnäkymät. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkövoimatekniikan laitos, Tutkimusraportti, vol. 1/2005.

Päijät-Hämeen Jätehuolto Oy. 2016. Päijät-Hämeen jätetaksa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 13.1.2017]. Saatavissa: [https://www.phj.fi/images/P%C3%A4ij%C3%A4t-H%C3%A4meen\\_j%C3%A4tetaksa\\_1\\_7\\_2016\\_alkaen.pdf](https://www.phj.fi/images/P%C3%A4ij%C3%A4t-H%C3%A4meen_j%C3%A4tetaksa_1_7_2016_alkaen.pdf).

Pöyry. 2015. Jätteiden energiahöydyntäminen Suomessa, Loppuraportti. Pöyry Management Consulting Oy. Energiateollisuus ry. 39 s.

Raiko, R. & Saastamoinen, J. & Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2 painos. Helsinki, Suomi: International Flame Research Foundation –Suomen kansallinen osasto. Teknillistieteelliset akatemit. 750 s. ISBN 951-666-604-3

Saarinen, R. & Leikoski, M. 2009. Selvitys jätteenpolton luvista,. Helsinki, Suomi: Suomen ympäristökeskus (SYKE). SYKE. 41 s. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 8/2009. ISBN 978-952-11-3439-5.

Satabio Oy. 2017a. KSM Multistoker XXL mallit. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <http://satabio.fi/tuotteet/ksmmultistoker/ksmmultistokerxxlkattilat>.

Satabio Oy. 2017b. Kontit. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: <http://satabio.fi/tuotteet/ksmmultistoker/kontit>.

Savolainen, M & Karvosenoja, N. & Kupiainen, K & Paunu, V-V. & Sippula, O. & Jokiniemi, J. 2009. Hajautetun energiantuotannon vaikutus väestön altistumiseen pienhiukkasille. Helsinki, Suomi: Suomen ympäristökeskus (SYKE). Edita Prima Oy. 33 s. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 30|2009. ISBN 978-952-11-3681-8.

Scandic Container Oy. 2015a. Konttisanastoa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: <http://scandiccontainer.fi/konttisanastoa/>.

Scandic Container Oy. 2015b. Millaista konttia etsit?. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: <http://scandiccontainer.fi/kontit/>.

Schmid energy solutions. 2017. Full of energy – large systems from 160 kW. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa: [http://www.schmid-ag.ch/files/attachments/utsk\\_utsp\\_utsr\\_utsw\\_anlagen\\_ab160\\_eng.pdf](http://www.schmid-ag.ch/files/attachments/utsk_utsp_utsr_utsw_anlagen_ab160_eng.pdf).

SFS-EN 15357. 2011. Kiinteät kierrätyspolttoaineet. Terminologia, määritelmät ja kuvaukset. [ Verkkajulkaisu]. Helsinki, Suomen standardoimisliitto SFS Ry. 42 s. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <https://online-sfs-fi.libproxy.aalto.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/175928.html.stx>

SFS-EN 15359. 2012. Kiinteät kierrätyspolttoaineet. Vaatimukset ja luokat. [ Verkkajulkaisu]. Helsinki, Suomen standardoimisliitto SFS Ry. 42 s. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <https://online-sfs-fi.libproxy.aalto.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/178496.html.stx>

SFS-EN ISO 17225-1. 2014. Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja –luokat. Osa 1: Yleiset vaatimukset. [ Verkkajulkaisu]. Helsinki, Suomen standardoimisliitto SFS Ry. 117 s. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <https://online-sfs-fi.libproxy.aalto.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/1/307054.html.stx>

Siemens Turbomachinery Equipment GmbH. 2011. Siemens steam turbine SST-040 (MINI steam turbine) for the power range 75 up to 300 kWel. [Verkkodokumentti]. 14 s. [Viitattu 11.1.2017].

SVT (Suomen virallinen tilasto). 2015. Polttoaineluokitus 2015. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.1.2016]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/meta/luokitukset/polttoaineet/001-2015/koko\\_luokitus.html](http://www.stat.fi/meta/luokitukset/polttoaineet/001-2015/koko_luokitus.html).

SVT (Suomen virallinen tilasto). 2016a. Jätetilasto. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/jate/2015/jate\\_2015\\_2016-12-20\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/jate/2015/jate_2015_2016-12-20_tie_001_fi.html). ISSN 1798-3339 (sähköinen)

SVT (Suomen virallinen tilasto). 2016b. Lämmitysenergian kuluttajahintoja syyskuussa 2016. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa:

[http://www.stat.fi/til/ehi/2016/03/ehi\\_2016\\_03\\_2016-12-08\\_tau\\_003\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2016/03/ehi_2016_03_2016-12-08_tau_003_fi.html). ISSN 1799-7984 (sähköinen)

SVT (Suomen virallinen tilasto). 2016c. Pohjoismaisen sähköpörssin spot-hintoja hinta-alueittain. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 27.5.2017]. Saatavissa:

[http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ene\\_\\_ehi/101\\_ehi\\_tau\\_111\\_fi.px/table/tableViewLayout1/?rxid=ce1e988f-6d37-4d20-85a7-4921a5a6984e](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehi/101_ehi_tau_111_fi.px/table/tableViewLayout1/?rxid=ce1e988f-6d37-4d20-85a7-4921a5a6984e).

SVT (Suomen virallinen tilasto). 2016d. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin, snt/kWh (Hinnat sisältävät sähköenergian, siirtomaksun ja verot.). [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 12.1.2017]. Saatavissa:

[http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ene\\_\\_ehi/050\\_ehi\\_tau\\_105\\_fi.px/table/tableViewLayout1/?rxid=ce1e988f-6d37-4d20-85a7-4921a5a6984e](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehi/050_ehi_tau_105_fi.px/table/tableViewLayout1/?rxid=ce1e988f-6d37-4d20-85a7-4921a5a6984e).

SYKE (Suomen ympäristökeskus). 2015. Valtakunnallisen jätesuunnitelman seuranta.

[Verkkojulkaisu]. [Viitattu 4.1.2017]. Saatavissa: [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus\\_ja\\_tuotanto/Jatteet\\_ja\\_jatehuolto/Jatesuunnittelu/Valtakunnallisen\\_jatesuunnitelman\\_seuranta](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Jatteet_ja_jatehuolto/Jatesuunnittelu/Valtakunnallisen_jatesuunnitelman_seuranta).

Taishan Group Co., LTD. 2017. Noviter-NST steam boiler. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <http://www.taishangroup.com/eweb/Products.asp?Id=235>.

Tekes. 2009. FINE – Pienhiukkaset Teknologia, ympäristö ja terveys 2002 – 2005 Lopuraportti. Helsinki, Suomi: Tekes. Libris Oy. 256 s. Teknologiaohjelmaraportti 9/2006. ISBN 952-457-231-1.

TEM (Työ- ja elinkeinoministeriö). 2014. Energia- ja ilmastotiekartta 2050, Parlamentarisen energia- ja ilmastokomitean mietintö 16. päivänä lokakuuta 2014. Valtioneuvosto. Edita Publishing Oy. 75 s. ISBN 978-952-227-882-1 (sähköinen) ISBN 978-952-227-881-4 (painettu).

TEM (Työ- ja elinkeinoministeriö). 2016. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. 68 s.

Tiusanen, A. 2015. Pricing for Ferroplan Preliminary. [ex10.online.fi/Joonas.anttila@ferroplan.fi](mailto:ex10.online.fi/Joonas.anttila@ferroplan.fi). [sähköposti]. Orimattila. Leancom Oy. 18.2.2015. [Viitattu 17.5.2017].

TKK (Teknillinen Korkeakoulu). 2002. Investointien taloudelliset kriteerit. Espoo, Suomi: Teknillinen korkeakoulu, Energiatalous ja voimalaitostekniikka, Ene-59.081 Teollisuuden energiajärjestelmät. 6 s.

TKK (Teknillinen Korkeakoulu). 2009. Luentokalvot ENE-47.5120/2, #2. Fuels. Espoo, Suomi: Helsinki University of Technology. Department of Energy Technology, Laboratory of Energy Engineering and Environmental Protection. 25 s.

Tukes (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto). 2016a. Tietoa meistä. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Tietoa-meista/>.



Tukes (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto). 2016b. Tietoa meistä. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Painelaitteet/Painelaitteet---saadokset-ja-direktiivit/>.

Turunen, P. 2004. Pienten biopolttoainevoimalaitosten markkinaselvitys. [ Verkkajulkaisu]. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Lappeenranta, Suomi. 116 s. [Viitattu 2.1.2017]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20043270>.

US Department of Energy Midwest CHP Technical Assistance Partnerships. 2004. Industrial (Steam). [Verkkajulkaisu]. S. 26 – 46. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: [http://www.midwestchptap.org/archive/pdfs/060216\\_industrial\\_steam.pdf](http://www.midwestchptap.org/archive/pdfs/060216_industrial_steam.pdf).

Vartiainen, E. & Luoma, P. & Hiltunen, J. & Vanhanen, J. 2002. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO<sub>2</sub>-päästöt. Helsinki, Suomi: Gaia Group Oy. Oy Edita Ab. 90 s. ISBN 952-91-4465-2.

Vesanto, P. 2006. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä, Jätteenpolton BREF 2006. Helsinki, Suomi: Suomen Ympäristökeskus. Edita Prima Oy, Helsinki 2006. 104 s. Suomen ympäristö 27|2006. ISBN 952-11-2309-5 (sähköinen) ISBN 952-11-2308-7 (painettu).

Wikstén, R. 1993. Lämpövoimaprozessit. Espoo, Suomi: Teknillinen korkeakoulu, Sovelletun termodynamiikan laitos. Luentomoniste 77. 164 s. ISBN 951-22-1904-2.

VTT Energia. 1999. Energia Suomessa. 2 painos. Helsinki, Suomi: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Edita Prima Oy. 368 s. ISBN 951-37-2745-9.

VTT Prosessit. 2004. Energia Suomessa. 3 uudistettu painos. Helsinki, Suomi: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Edita Prima Oy. 396 s. ISBN 951-37-4256-3.

Ympäristöhallinto. 2016a. Ympäristölupa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi\\_luvat\\_ja\\_ymparistovaikutusten\\_arviointi/Luvat\\_ilmoitukset\\_ja\\_rekisterointi/Ymparistolupa](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa).

Ympäristöhallinto. 2016b. Kuka luvan myöntää?. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.1.2017]. Saatavissa: [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi\\_luvat\\_ja\\_ymparistovaikutusten\\_arviointi/Luvat\\_ilmoitukset\\_ja\\_rekisterointi/Ymparistolupa/Kuka\\_luvan\\_myontaa](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa/Kuka_luvan_myontaa).

Ympäristöministeriö. 2012. Ajankohtaista jätelain uudistuksesta. Faktalehdet. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.1.2017]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BD44928EA-92D5-4426-903C-5C4972CA2E39%7D/24315>.

## Liiteluettelo

### Liite 1. Ilmaan joutuvien päästöjen raja-arvot jätteenpol- tossa

Seuraavien pilaavien aineiden (mg/Nm<sup>3</sup>) päästöjen raja-arvojen vuorokausikeskiarvot

Hiukkasten kokonaismäärä	10
Kaasumaiset ja höyrymäiset orgaaniset aineet orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC)	10
Kloorivety (HCl)	10
Fluorivety (HF)	1
Rikkidioksidi (SO <sub>2</sub> )	50
Typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO <sub>2</sub> ) NO <sub>2</sub> :na sellaisten jo käytössä olevien jätteenpolttolaitosta, joiden nimelliskapasiteetti on yli 6 tonnia/tunti, ja uusien jätteenpolttolaitosten osalta	200
Typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO <sub>2</sub> ) NO <sub>2</sub> :na sellaisten jo käytössä olevien polttolaitosten osalta, joiden nimelliskapasiteetti on enintään 6 tonnia/tunti	400

Ilmaan joutuvien päästöjen raja-arvoja katsotaan noudatettavan, jos yksikään vuorokausikeskiarvo ei ylitä näitä päästöjen raja-arvoja.

Ilmaan joutuvien jätteenpolttolaitoksen päästöjen hiukkasten kokonaispitoisuus ei saa missään olosuhteissa ylittää arvoa 150 mg/m<sup>3</sup> puolen tunnin keskiarvona ilmaistuna. Ilmaan joutuvien 1.2 kohdassa ja 1.5 kohdan b luetelmakohdassa vahvistettuja orgaanisen hiilen päästöjen ja CO-päästöjen raja-arvoja ei saa ylittää.

Kohta 1.5b:

Savukaasujen hiilimonoksidipäästöjen (mg / Nm<sup>3</sup>) raja-arvo 100 puolen tunnin keskiarvona.

Kohta 1.2:

Seuraavien pilaavien aineiden (mg/Nm<sup>3</sup>) päästöjen raja-arvojen puolen tunnin keskiarvot

	(100 %) A	(97 %) B
Hiukkasten kokonaismäärä	30	10
Kaasumaiset ja höyrymäiset orgaaniset aineet orgaanisen hiilen kokonaismääränä (TOC)	20	10
Kloorivety (HCl)	60	10
Fluorivety (HF)	4	2
Rikkidioksidi (SO <sub>2</sub> )	200	50
Typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO <sub>2</sub> ) NO <sub>2</sub> :na sellaisten jo käytössä olevien jätteenpolttolaitosta, joiden nimelliskapasiteetti on yli 6 tonnia/tunti, ja uusien jätteenpolttolaitosten osalta	400	200

Seuraavien raskasmetallien päästöjen raja-arvojen (mg/Nm<sup>3</sup>) keskiarvot vähintään 30 minuutin ja enintään kahdeksan tunnin näytteenottoajan kuluessa:

Kadmium ja sen yhdisteet puhtaana kadmiumina (Cd)	Yhteensä: 0,05
Tallium ja sen yhdisteet puhtaana talliumina (Tl)	
Elohopea ja sen yhdisteet puhtaana elohopeana (Hg)	0,05
Antimoni ja sen yhdisteet puhtaana antimonina (Sb)	Yhteensä: 0,5
Arseeni ja sen yhdisteet puhtaana arseenina (As)	
Lyijy ja sen yhdisteet puhtaana lyijynä (Pb)	
Kromi ja sen yhdisteet puhtaana kromina (Cr)	
Koboltti ja sen yhdisteet puhtaana kobolttina (Co)	
Kupari ja sen yhdisteet puhtaana kuparina (Cu)	
Mangaani ja sen yhdisteet puhtaana mangaanina (Mn)	
Nikkeli ja sen yhdisteet puhtaana nikkelinä (Ni)	
Vanadiini ja sen yhdisteet puhtaana vanadiinina (V)	

Nämä keskiarvot koskevat myös kyseisten raskasmetallien ja niiden yhdisteiden kaasumaisia ja höyrymäisiä päästöjä.

## 2 OSA

*Dibentso-p-dioksiinien ja dibentsofuraanien ekvivalenttikertoimet*

Dioksiinien ja furaanien kokonaispitoisuuksien määrittämiseksi seuraavien dibentso-p-dioksiinien ja furaanien massapitoisuudet kerrotaan seuraavilla ekvivalenttikertoimilla ennen yhteenlaskua:

	Toksisuusekvivalenttiker- roin
2,3,7,8 – Tetraklooridibentsodioksiini (TCDD)	1
1,2,3,7,8 – Pentaklooridibentsodioksiini (PeCDD)	0,5
1,2,3,4,7,8 – Heksaklooridibentsodioksiini (HxCDD)	0,1
1, 2,3,6,7,8 – Heksaklooridibentsodioksiini (HxCDD)	0,1
1,2,3,7,8,9 – Heksaklooridibentsodioksiini (HxCDD)	0,1
1,2,3,4,6,7,8 – Heptaklooridibentsodioksiini (HpCDD)	0,01
Oktaklooridibentsodioksiini (OCDD)	0,001
2,3,7,8 – Tetraklooridibentsodioksiini (TCDF)	0,1
2,3,4,7,8 – Pentaklooridibentsofuraani (PeCDF)	0,5
1,2,3,7,8 – Pentaklooridibentsofuraani (PeCDF)	0,05
1,2,3,4,7,8 – Heksaklooridibentsofuraani (HxCDF)	0,1
1,2,3,6,7,8 – Heksaklooridibentsofuraani (HxCDF)	0,1
1,2,3,7,8,9 – Heksaklooridibentsofuraani (HxCDF)	0,1
2,3,4,6,7,8 – Heksaklooridibentsofuraani (HxCDF)	0,1
1,2,3,4,6,7,8 – Heptaklooridibentsofuraani (HpCDF)	0,01
1,2,3,4,7,8,9 – Heptaklooridibentsofuraani (HpCDF)	0,01
Oktaklooridibentsofuraani (OCDF)	0,001

Dioksiinien ja furaanien päästöjen raja-arvojen ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) keskiarvot vähintään kuuden tunnin ja enintään kahdeksan tunnin näytteenottoajan kuluessa: Päästöraja viittaa dioksiinien ja furaanien kokonaispitoisuuteen, joka määritetään 2 osan mukaisesti

Dioksiinit ja furaanit	0,1
------------------------	-----

Savukaasujen hiilimonoksidipäästöjen ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) raja-arvot ovat:

- 50 vuorokausikeskiarvona,
- 100 puolen tunnin keskiarvona,
- 150 10 minuutin keskiarvona.

Toimivaltainen viranomainen voi myöntää poikkeuksia tässä kohdassa vahvistettavien päästöjen raja-arvojen soveltamiseen leijupolttotekniikkaa käyttäville jätteenpolttolaitoksille edellyttäen, että luvassa vahvistettava hiilimonoksidin (CO) päästöjen raja-arvo on enintään  $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  tuntikeskiarvona.

Lähde: (EUVL 2010)

## Liite 2. Arinakattilaan sovellettavia teknisiä laskenta-kaavoja

Arinakattilan teho lasketaan kaavalla (1).

$$\Phi_{ak} = \eta_{ak} \dot{m}_{pa} q_{iw} \quad (1)$$

jossa

$\Phi_{ak}$	on arinakattilasta saatava lämpöteho, [kW]
$\eta_{ak}$	on arinakattilan hyötysuhde, [-]
$\dot{m}_{pa}$	on polttoaineen massavirta arinakattilalle, [kg / s]
$q_{iw}$	on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo, [kJ / kg].

Arinakattilan hyötysuhde on likimain  $\eta_{ak} = 0,85 - 0,87$  (Koskelainen ym. 2006, s. 293, 332).

Polttoainetehto lasketaan kaavalla (2).

$$\Phi_{pa} = \dot{m}_{pa} q_{iw} \left( = \frac{\Phi_{ak}}{\eta_{ak}} \right) \quad (2)$$

jossa

$\Phi_{pa}$	on arinakattilan polttoainetehto, eli arinakattilaan syötettävän polttoaineen teho, [kW]
$\dot{m}_{pa}$	on polttoaineen massavirta arinakattilalle, [kg / s]
$q_{iw}$	on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo, [kJ / kg].
$\Phi_{ak}$	on arinakattilasta saatava lämpöteho, [kW]
$\eta_{ak}$	on arinakattilan hyötysuhde, [-]

Arinakattilasta tuleva savukaasu siirtää lämmönvaihtimilla höyrypiiriin kattilatehon, joka lasketaan kaavalla (3).

$$\Phi'_k = \eta'_k \eta_{ak} \dot{m}_{pa} q_{iw} = \eta'_k \Phi_{ak} \quad (3)$$

jossa

$\Phi'_k$	on höyrykattilan teho, [kW]
$\eta'_k$	on höyrykattilan hyötysuhde, [-]
$\eta_{ak}$	on arinakattilan hyötysuhde, [-]
$\dot{m}_{pa}$	on polttoaineen massavirta arinakattilaan, [kg / s]
$q_{iw}$	on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo, [kJ / kg]
$\Phi_{ak}$	on arinakattilasta saatava lämpöteho, [kW].

Soveltaen: (Koskelainen ym. 2006 s. 293, Lampinen & Seppälä 2010, Lampinen 1997)

## Liite 3. Jätepolttoaineiden ominaisuuksia

Jätelaji	Koostumus										Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, q <sub>i</sub> kJ / kg ka.	Lähde
	Kosteus, x	Keskiarvoja kuiva-aineessa										
		Tuhkaa, kuiva-aineessa	Hiili, C	Vety, H	Typpi, N	Happi, O	Rikki, S	Kloori, Cl	W-%	W-%		
W-%	W-%	W-%	W-%	W-%	W-%	W-%	W-%	W-%	W-%	W-%		
REF III (Syntypistelajiteltu kotitalouden jäte, keskiarvo eri analyyseistä)	28,50	9,50	52,90	7,30	0,71	28,75	0,13	0,71	0,18	0,29	22 900	(Alakangas 2000)
RDF otos1	41,90	7,80	58,90	5,50	1,20	26,05	0,37	0,18	0,29	21 300		
RDF otos2	38,90	9,10	53,70	6,00	1,60	28,94	0,37	0,29	0,86	20 600		
RDF otos3	28,97	14,50	52,06	6,61	1,13	24,70	0,14	0,86	0,32	18 600		
RDF (YTV1)	39,70	12,60	45,60	6,17	0,99	34,12	0,20	0,32	0,52	17 400		
RDF (YTV2)	11,50	14,30	48,70	6,90	0,88	28,50	0,20	0,52	0,28	20 400		
Useita teollisuuden polttojakeita, keskimäärin	18,30	7,64	50,40	6,89	0,39	34,24 (2)	0,16	0,28		20 200		
Yhdyskuntajäte	40,00	18,01 (2)(4)	41,67 (4)	5,00 (4)	0,83 (4)	33,33 (4)	0,33 (4)	0,83 (4)		10 000	(TKK 2009)	
Oilki yleisesti	21,00 (1)	7,21 (2)	46,00	5,90	0,50	40,00	0,08	0,31		17 400	(Alakangas 2000)	
Hevoselanta	73,80	18,00 (4)	46,90 (4)	4,20 (4)	2,30 (4)	26,30 (4)	1,50 (4)	0,80 (2)		16 397 (5)	(Griffiths ym. 2000)	
Hevoson kuivikelanta, olkikuivike 90 %	59,00	14,70	43,60	5,60	1,80	33,58 (2)	0,26	0,46		15 564 (5)	(Carvalho ym. 2008)	
Bioliete (puhdistamoliete)	85,00	14,95 (2)	47,00	5,20	1,60	30,00	1,20	0,05 (3)		17 400	(Alakangas 2000)	

(1) Lähteen vaihteluvälin keskiarvo.

(2) Laskettu erotuksena.

(3) Arvo lähteestä (TKK 2009)

(4) Laskettu arvo.

(5) Laskettu arvo liitteen D kaavoilla.

Jätepolttoaineiden ominaisuuksia. Useita lähteitä.

## Liite 4. Polttoaineen lämpöarvojen laskentakaavoja

Polttoaineen kalorimetrinen likimääräinen lämpöarvo  $q_s$  lasketaan kaavalla (1).

$$q_s = 338,2 \times C + 1442,8 \times \left( H - \frac{O}{8} \right) + 94,2 \times S \quad (1)$$

jossa

$q_s$  on polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo, [kJ / kg]  
 $C, H, O$  ja  $S$  ovat niitä vastaavien alkuaineiden (hiili, vety, happi ja rikki) painoprosentit  $w\%$  (eng. weight percentage) tuhkatomassa kuiva-aineessa, [-].

Kaava (1) pätee parhaiten, kun polttoaineen hiilipitoisuus on alle 86  $w\%$ . Polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo voidaan laskea likimääräisesti vaihtoehtoisesti kaavalla (2).

$$q_s = (15,22 \times H + 937) \times \left( \frac{C}{3} + H - \left( \frac{O-S}{8} \right) \right) \quad (2)$$

jossa on samat muuttujat ja yksiköt ja kuin kaavassa (1).

Kaikille polttoaineille voidaan laskea likimääräisesti tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa  $q_i$  kaavalla (3).

$$q_i = q_s - 219,6 \times H \quad (3)$$

jossa

$q_i$  on polttoaineen tehollinen lämpöarvo, [kJ / kg]  
 $q_s$  on polttoaineen kalorimetrinen lämpöarvo, [kJ / kg]  
 $H$  on vedyn osuus massaprosentteina  $w\%$  kuiva-aineesta.

Vielä paremmin todellista arinakattilassa poltettavaa polttoaineen lämpöarvoa vastaa kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo, joka on polttoaineen tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa tai saapumistilassa. Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo lasketaan likimääräisesti kaavalla (4) kaikille polttoaineille.

$$q_{iw} = q_i \times \left( \frac{(100-x)}{100} \right) - 24,43 \times x \quad (4)$$

jossa

$q_{iw}$  on kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo, [kJ / kg]  
 $q_i$  on polttoaineen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, [kJ / kg]  
 $x$  on vesipitoisuus  $w\%$  kosteasta polttoaineesta, [ $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{pa}}$ ]  
 $24,43$  on kerroin, joka tulee veden höyrystyslämmöstä, kun  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  ja  $l_{25} = 2443 \text{ kJ / kg}$

Polttoaineen kosteus, eli vesipitoisuus  $x$  lasketaan kaavalla (5).

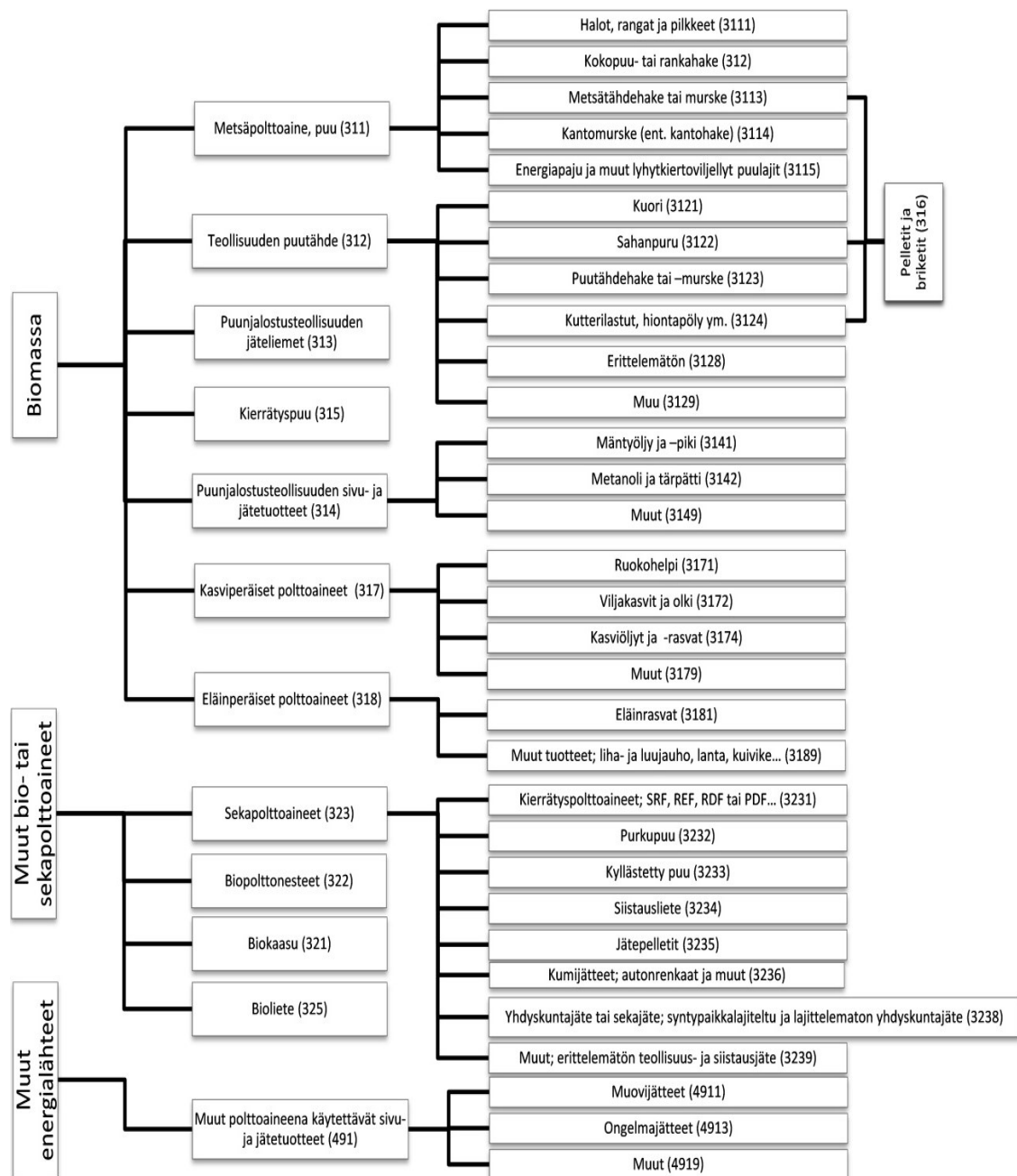
$$x = \frac{m_{\text{vesi}}}{m_{\text{vesi}} + m_{\text{kuiva}}} \quad (5)$$

jossa

$x$  on polttoaineen kosteus, [-]  
 $m_{\text{vesi}}$  on veden massa polttoaineessa, [ $\text{kg}_{\text{vesi}} / \text{kg}_{\text{pa}}$ ]  
 $m_{\text{kuiva}}$  on kuiva-aineiden yhteenlaskettu massa polttoaineessa, [ $\text{kg}_{\text{ka}} / \text{kg}_{\text{pa}}$ ].

Soveltaen: (Koskelainen ym. 2006 s. 262 - 266, Lampinen & Seppälä 2010, Raiko ym. 2002 s. 53, SFS-EN ISO 2014)

## Liite 5. Polttokelpoisia jätteitä Tilastokeskuksen luokituksen mukaan



Polttokelpoisia jätejakeita Tilastokeskuksen luokittamana. (SVT 2015)



## Liite 6. Kaukolämmön tehon laskentakaava

Kaukolämpötuotannon teho voidaan laskea likimääräisesti kaavalla (1).

$$\Phi_{kl} = \eta_{kl} \times \Phi_l = \eta_{kl} \dot{m}_l (h_{h,s} - h_{v,u}) \quad (1)$$

jossa

$\Phi_{kl}$	on kaukolämpöteho, [kW]
$\eta_{kl}$	on kaukolämpövaihtimen hyötysuhde, [-]
$\Phi_l$	on lauhduttimen teho, [kW]
$\dot{m}_l$	on lauhduttimelle tulevan lauhteen massavirta, [kg / s]
$h_{l,h,s}$	on lauhduttimelle tulevan lauhteen entalpia, [kJ / kg]
$h_{l,v,u}$	on lauhduttimelta lähtevän veden entalpia, [kJ / kg].

Soveltaen: (Lampinen 1997, Wikstén 1993)

## Liite 7. Höyryvoimaproessin teknisiä laskentakaavoja

Höyrykattilasta höyrypiiriin siirtynyt lämpöteho voidaan laskea likimääräisesti kaavalla (1).

$$\Phi_k = \eta_k \Phi_{pa} = 0,88 \times \Phi_{pa} \quad (1)$$

jossa

$\Phi_k$	on kattilateho (tässä höyrykattila ja arinakattila yhdessä), [kW]
$\eta_k$	on kattilahyötysuhde (tässä höyrykattila ja arinakattila yhdessä), [-]
$\Phi_{pa}$	on polttoaineteho, [kW].

Kattilahyötysuhde on likimain  $\eta_k = 0,88$  (sisältää arinakattilan hyötysuhteen).

Turbiiniin tuotu lämpöenergia lasketaan likimääräisesti kaavalla (2).

$$\Phi_{t,s} = \eta_p \eta_k \Phi_{pa} \quad (2)$$

jossa

$\Phi_{t,s}$	on höyryn teho, turbiiniin sisään, [kW]
$\eta_p$	on putkiston hyötysuhde, [-]
$\eta_k$	on höyrykattilan hyötysuhde (tässä höyrykattila ja arinakattila yhdessä), [-]
$\Phi_{pa}$	on polttoaineteho, [kW].

Putkiston hyötysuhde:  $\eta_p = 0,98$ , jossa alaindeksi p tarkoittaa höyryvoimaproessin putkistosta ja muista laitteista tulevia häviöitä.

Nettosähköteho lasketaan likimääräisesti kaavalla (3).

$$\Phi_{nst} = \eta_{ok} \eta_m \Phi_{t,s} \quad (3)$$

jossa

$\Phi_{nst}$	on nettosähköteho, [kW <sub>e,n</sub> ]
$\eta_{ok}$	on sähköntuotannon nettohyötysuhde omakäyttösähkö vähennettynä, [-]
$\eta_m$	on muuntajahyötysuhde, [-]
$\Phi_{pa}$	on polttoaineteho, [kW].
$\Phi_{t,s}$	on teho turbiiniin sisään, [kW].

Omasähkönkäyttö on likimain  $\eta_{ok} = 0,9$  ja muuntajahyötysuhde  $\eta_m = 0,99$ .

Yhtälöt (4) – (7) ovat esitetty ilman väliottoja, polttoaineen kuivausta ja esilämmityksiä.

Höyryvoimaproessin energiatasetta kuvaa yhtälö (4).

$$\Phi_k = \Phi_l + P_{a,t} + P_p \quad (4)$$

jossa

$\Phi_k$	on kattilateho (höyrypiiriin siirtyvä teho), [kW]
$\Phi_l$	on lauhduttimen teho tai lauhdutustehon tarve, [kW]
$P_{a,t}$	on turbiinin akseliteho, [kW]
$P_p$	on kiertovesipumpun akseliteho, [kW].

Höyrykattilan energiatasetta kuvaa yhtälö (5).

$$\Phi_k = \dot{m}_v (h_{v,s} - h_{h,u}) = \dot{m}_{sk} c_{p,sk} (T_{1,sk} - T_{2,sk}) \quad (5)$$

jossa

$\Phi_k$	on kattilateho, eli savukaasukattilasta saatava teho höyrypiiriin, [kW]
$\dot{m}_v$	on kattilaveden massavirta, [kg / s]
$h_{v,s}$	on kattilaan sisään menevän veden entalpia, [kJ / kg]
$h_{h,u}$	on kattilasta ulostulevan höyryn entalpia, [kJ / kg]
$\dot{m}_{sk}$	on savukaasun massavirta höyrykattilan läpi, [kg / s]
$c_{p,sk}$	on savukaasun ominaislämpökapasiteetti, [kJ / kg °C]
$T_{1,sk}$	on savukaasun lämpötila ennen höyrykattilaa, [°C]
$T_{2,sk}$	on savukaasun lämpötila höyrykattilan jälkeen, [°C].

Höyryturbiinin energiatasetta kuvaa yhtälö (6)

$$P_{a,t} = \dot{m}_{h,s} (h_{t,s} - h_{t,u}) = \Phi_{t,s} - \Phi_{t,u} \quad (6)$$

jossa

$P_{a,t}$	on höyryturbiinin akseliteho, [kW]
$\dot{m}_{h,s}$	on höyryn massavirta turbiiniin sisään, [kg / s]
$h_{t,s}$	on turbiiniin menevän höyryn entalpia, [kJ / kg]
$h_{t,u}$	on turbiinista ulostulevan höyryn entalpia, [kJ / kg]
$\Phi_{t,s}$	on höyryturbiinille menevä teho, [kW]
$\Phi_{t,u}$	on höyryturbiinista tulevan höyryn teho, [kW]

Lauhduttimen energiatasetta kuvaa yhtälö (7).

$$\Phi_l = \dot{m}_{h,l,s} (h_{t,u} - h_{l,v,u}) = \frac{\Phi_{kl}}{\eta_{kl}} \quad (7)$$

jossa

$\Phi_l$	on lauhduttimen teho, [kW]
$\dot{m}_{h,l,s}$	on höyryn massavirta lauhduttimeen, [kg / s]
$h_{l,v,u}$	on lauhduttimesta ulostulevan veden entalpia, [kJ / kg]
$h_{t,u}$	on turbiinista ulostulevan höyryn entalpia, [kJ / kg]
$\Phi_{kl}$	on kaukolämmitysteho, [kW]
$\eta_{kl}$	on kaukolämpövaihtimen hyötysuhde, [-].

Syöttövesipumpun akseliteho lasketaan likimääräisesti kaavalla (8):

$$P_p = \dot{m}_{v,p,s}(h_{p,u} - h_{p,s}) = \dot{V}\Delta p = \frac{\dot{m}_{v,p,s}\Delta p}{\rho_v} \quad (8)$$

jossa

$P_p$	on pumpun akseliteho, [kW]
$\dot{m}_{v,p,s}$	on pumpulle menevän veden massavirta, [kg / s]
$h_{p,u}$	on entalpia pumpun jälkeen, [kJ / kg]
$h_{p,s}$	on entalpia ennen pumppua ( $h_{p,s} = h'_{p,s}(T_{p,s}, p_{p,s})$ ), [kJ / kg]
$\dot{V}$	on tilavuusvirta pumpun yli, [m <sup>3</sup> / s]
$\Delta p$	on paine-ero pumpun yli, [kPa]
$\rho_v$	on veden tiheys ennen pumppua, [kg / m <sup>3</sup> ].

Soveltaen: (Koskelainen ym. 2006 s. 170–171, 293, 332, Lampinen ym. 2010, Lampinen 1997)

## Liite 8. Höyryturbiinin teknisiä laskentakaavoja

Turbiinista ulos saatava akseliteho lasketaan likimääräisesti yhtälöllä (1).

$$\Phi_t = \dot{m}_{h,s}(h_{t,s} - h_{t,u}) \quad (1)$$

jossa

$\Phi_t$	on turbiinin akseliteho, [kW]
$\dot{m}_{h,s}$	on höyryn massavirta turbiiniin sisään, [kg / s]
$h_{t,s}$	on turbiiniin menevän höyryn entalpia, [kJ / kg]
$h_{t,u}$	on turbiinista ulostulevan höyryn entalpia, [kJ / kg]
$\dot{m}_h$	on turbiinille menevän höyryn massavirta, [kg / s]

Höyryturbiinin akseliteho voidaan vaihtoehtoisesti laskea likimääräisesti kaavalla (2), jos sähköntuotannon bruttohyötysuhde tiedetään.

$$\Phi_t = \eta_{pr} \Phi_{t,s} \quad (2)$$

jossa

$\Phi_t$	on höyryturbiinin akseliteho, [kW]
$\eta_{pr}$	on turbiini – generaattoriyhdistelmän bruttohyötysuhde, [-]
$\Phi_{t,s}$	on turbiinin sisään menevä teho, [kW].

Höyryturbiinin isentrooppinen hyötysuhde lasketaan likimääräisesti kaavalla (3).

$$\eta_{is} = \frac{h_{t,s} - h_{t,u}}{h_{t,s} - h_{t,u,is}} \leftrightarrow h_{t,u} = h_{t,s} - \eta_{is}(h_{t,s} - h_{t,u,is}) \quad (3)$$

jossa

$\eta_{is}$	on höyryturbiinin isentrooppinen hyötysuhde, [-]
$h_{t,s}$	on turbiiniin menevän höyryn entalpia, [kJ / kg]
$h_{t,u}$	on turbiinista ulostulevan höyryn entalpia, [kJ / kg]
$h_{t,u,is}$	on entalpia turbiinin jälkeen isentrooppisesta paisunnasta, [kJ / kg]

Tilapisteiden entalpiat voidaan määrittää termodynamiikan taulukoista tai h, s – diagrammista.

Soveltaen: (Lampinen ym. 2010, Koskelainen ym. 2006 s. 293, Lampinen & Seppälä 2010, Lampinen 1997)

## Liite 9. Kustannus- ja kannattavuuslaskennan kaavoja

Yksinkertainen investoinnin takaisinmaksuaika voidaan laskea yhtälöllä (1).

$$t = \frac{H}{q} = \frac{\text{Investointikustannus}}{\text{Liiketoiminnasta saatava vuosittainen tulo}}$$

$$\text{tai } t = \frac{\text{Investointikustannus [€]}}{\text{Vuotuinen energiansäästö [MWh]} \times \text{energian hinta } \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]} \quad (1)$$

jossa

t	on takaisinmaksuaika vuosina, [a]
H	investoinnin kokonaiskustannus, [€]
q	vuotuinen nettotulo tai -säästö, [€] (tulo = energian myynnistä saatavat maksut vuodessa - muuttuva kustannus vuodessa)
MWh	vuotuisen energiansäästön yksikkö
€ / MWh	energian hinnan yksikkö.

Investoinnin takaisinmaksuaika, joka ottaa koron huomioon voidaan laskea yhtälöllä (2).

$$t = \frac{-\ln\left(\frac{1-H}{1-q}\right) - \ln(i)}{\ln(1+i)} = -\frac{\ln\left(1 - \frac{H \times i}{q}\right)}{\ln(1+i)} \quad (2)$$

jossa

t	on takaisinmaksuaika vuosina, [a]
H	investoinnin kokonaiskustannus, [€]
q	vuotuinen tulo tai säästö, [€] (tulo = energian myynnistä saatavat maksut vuodessa - muuttuva kustannus vuodessa)
i	on laskentakorkokanta, [-]

CHP –laitoksen energianhankintakustannukset voidaan muodostaa yhtälön (3) mukaisesti.

$$K_{kok} = \sum_{i=1}^n K_{th,i} + \sum_{j=1}^n K_{e,j} \quad (3)$$

jossa

$K_{kok}$	on energianhankinnan vuosikustannus, [€]
$K_{th,i}$	on lämmönhankinnan osakustannus, [€]
$K_{e,j}$	on sähkönhankinnan osakustannus, [€].

CHP –laitoksen kustannussäästöt tai kassavirta voidaan laskea yhtälöllä (4).

$$S_{kok} = K_{i,CHP} + K_{k\&k,CHP} + K_{h,CHP} + K_{pa,CHP} + K_{ok,CHP} + K_{e,CHP} + T_{th,CHP} + T_{e,CHP} + S_{pm,CHP} \quad (4)$$

jossa

$S_{\text{kok}}$	on kustannussäästö, [€ / a]
$K_{i,\text{CHP}}$	on investoinnin vuosikustannus (annuiteetti), [€ / a]
$K_{k\&k,\text{CHP}}$	on käyttö- ja kunnossapitokustannukset, [€ / a]
$K_{h,\text{CHP}}$	on henkilöstökustannukset, [€ / a]
$K_{\text{pa},\text{CHP}}$	on polttoainekustannukset, [€ / a]
$K_{\text{ok},\text{CHP}}$	on omakäyttökustannukset (yleensä laitoksen omakäyttösähkö), [€ / a]
$K_{e,\text{CHP}}$	on sähkön ostot, [€ / a]
$T_{\text{th},\text{CHP}}$	on lämmön myynnistä saatava tulo, [€ / a]
$T_{e,\text{CHP}}$	on sähkön myynnistä saatava tulo, [€ / a]
$S_{\text{pm},\text{CHP}}$	on säästöt porttimaksuista kaatopaikalle, [€ / a].

Yhtälöön (4) menot merkitään negatiivisilla ja tulot positiivisilla arvoilla.

Investoinnin kokonaisvuosikustannukset annuiteettimenetelmällä lasketaan yhtälöllä (5), joka ottaa automaattisesti mukaan hankintamenon poiston ja koron.

$$K_{vk} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times H + K_{mk} = \frac{i \times H}{1 - (1+i)^{-n}} + K_{mk} = C_{n,i} \times H + K_{mk} = A + K_{mk} \quad (5)$$

jossa

$K_{vk}$	on vuosikustannus yhteensä, [€ / a]
$H$	investoinnin kokonaiskustannus, [€]
$K_{mk}$	jokavuotinen juokseva meno (muuttuvat kustannukset vuodessa)
$C_{n,i}$	on annuiteettitekijä, [-]
$A$	on annuiteetti, eli investoinnin tasasuuri vuosikustannus, [€ / a]
$i$	on laskentakorkokanta, [%]
$n$	on investoinnin pitoaika tai tarkastelujakson pituus vuosina, [a]

Investointi on kannattava, mikäli vuosittaiset tulot  $T_{\text{tot}}$  ovat suuremmat kuin vuosittaiset menot, eli  $T_{\text{to}} > K_{vk}$ .

Nykyarvomenetelmässä jonkin investoinnin suoritusten nykyarvo lasketaan yhtälöllä (6).

$$K = H + \sum_{t=1}^n \frac{q_t}{(1+r)^t} \quad (6)$$

$K$	on investointisuorituksen nykyarvo, [€]
$H$	on investoinnin kokonaiskustannus (hankintameno), [€]
$q_t$	on vuoden $t$ suoritus (voitto tai tappio), [€]
$t$	on vuosi, jonka suoritus on kyseessä, [-]
$r$	on laskentakorkokanta, [-]

Jos vuosittaiset suoritukset ovat yhtä suuria, käytetään yhtälöä (7) jonkin investoinnin suorituksen nykyarvon laskentaan.

$$K = H + q \frac{(1+i)^t - 1}{i(1+i)^t} \quad (7)$$

jossa

K	on investointisuorituksen nykyarvo, [€]
H	on investoinnin kokonaiskustannus (hankintameno), [€]
q	on yhtä suuri suoritus jokaisena vuotena, [€]
t	on viimeisen suorituksen ajanhetki vuosina, [-]
i	on laskentakorkokanta, [-].

Koko projektin nettonykyarvo on vuosittaisten investointisuoritusten nykyarvojen summa (NPV), joka lasketaan yhtälöllä (8).

$$NPV = \sum_{i=1}^n C_i (1+i)^{-t_i} \quad (8)$$

jossa

NPV	on investointisuorituksen nettonykyarvo, [€]
$C_i$	on kulu- tai tulokassavirta (myös CF, eng Cash Flow), [€]
$t_i$	on suorituksen ajanhetki vuosina, [-]
i	on laskentakorkokanta, [-].

Annuiteettimenetelmässä tasoitettun tuotantokustannuksen  $T_{tt}$  määrittämiseksi käytetään yhtälöä (9), josta lasketaan A, johon lisätään muut vuotuiset käyttökustannukset  $K_{mkk}$ . Näiden summa jaetaan energian vuosituotannolla E.

$$T_{tt} = \frac{K_{tt}}{E_t}, \text{ jossa } K_{tt} = A + K_{mkk} = NPV_{n=1} \frac{r}{1-(1+r)^{-n}} + K_{mkk} \quad (9)$$

jossa

	nollahetki on ensimmäisen toimintavuoden alussa, kun investointi on tehty vuonna $n = 0$ ,
$T_{tt}$	on tasoitettu tuotantokustannus, [€ / MWh (/ a)]
$K_{tt}$	on tuotantokustannus yhteensä, [€ / a]
$E_t$	on energian vuosituotanto, [MWh (/ a)]
$K_{mkk}$	on muut muuttuvat kustannukset vuodessa, [€ / a]
A	on annuiteetin suuruus, [€ / a]
NPV	on nettonykyarvo ensimmäisen käyttövuoden alussa, [€]
r	on laskentakorkokanta, [-]
n	on käyttöaika, [a].



Sijoitetun pääoman tuotto prosentti ROI (eng. Return Of Investment) lasketaan eri tavalla erilaisissa tapauksissa, joista tavallisimmat ovat laskenta koko yritykselle kirjanpidosta vuositason ja projektikohtainen laskenta. Yksinkertaisimmillaan ROI lasketaan projektille jakamalla vuotuinen nettotulos sijoitetulla pääomalla yhtälön (10) tapaan. Yksiköt ovat euroissa [€].

$$ROI = \frac{\text{Nettotulos}}{\text{Sijoitettu pääoma}} = \frac{\text{Bruttotulot} - \text{Menot}}{\text{Oma pääoma} + \text{Vieras pääoma}} = \frac{\text{Vuotuinen kassavirta}}{\text{Investointikustannus}} \quad (10)$$

Soveltaen: (TKK 2002, Pirilä & Mankki 2003, Turunen 2004, Aalto-yliopisto 2011)