

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Toni Kortelainen

Energiantuotannon ratkaisut Penttilän Puu Oy:n höyläämön  
sivuvirrasta

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2017



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Toukokuu 2017**  
**Ympäristötekniikan**  
**koulutusohjelma**  
Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
Puh. (013) 260 600

**Tekijä**  
Toni Kortelainen

**Nimeke**  
Energiantuotannon ratkaisut Penttilän Puu Oy:n höyläämön sivuvirrasta

**Toimeksiantaja**  
Karelia-amk ja Poveria biomassasta -hanke (6124)

**Tiivistelmä**

Tässä teknistaloudellisessa opinnäytetyössä selvitettiin Penttilän Puu Oy:n Joensuun höyläämölle taloudellisesti kannattavin energiantuotantoratkaisu. Käyttöikänsä päähän tulleen nykyisen ruuvisyötteisen arinakattilan tilalle on harkittu pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotantoa (pien-CHP), mikäli sellainen osoittautuu kannattavaksi. Muussa tapauksessa arinakattila vaihdetaan uuteen biokattilaan lähivuosina.

Opinnäytetyön teknisessä osiossa esitellään korvaavat lämmitysvaihtoehdot sekä puu-pohjaisille biopolttoaineille soveltuvat pien-CHP-tekniikat. Tutkimuksen toteuttamisessa hyödynnettiin kirjallisia lähteitä sekä verkosta löytyviä virallisia aihepiirin julkaisuja. Lisäksi höyläämöltä sivutuotepuuna muodostuvan kutterinlastun kosteus määritettiin otetuista näytteistä uunikuivausmenetelmän avulla. Kohdeyrityksestä sekä teknologisista vaihtoehdoista kerättiin tietoa asiantuntijahaastatteluiden avulla.

Taloudellista osiota varten kattila- ja pien-CHP-valmistajille lähetettiin tarjouspyynnöt kohteeseen sopivista laitteistoista. Taloudellinen tarkastelu suoritettiin kolmen skenaarion avulla, joista ensimmäinen oli kattilan uusiminen. Toiseksi vaihtoehdoksi valittiin pien-CHP-laitos, joka pystyy vastaamaan Joensuun höyläämön lämmön- ja sähkötehontarpeisiin. Viimeinen vaihtoehto oli suurempi pien-CHP-laitos, joka tuottaa nettolaskutuksen avulla sähkön myös Hammaslahden höyläämölle.

Taloudellisen tarkastelun ja herkkyyksianalyysien perusteella pien-CHP-ratkaisut osoittautuivat kannattamattomiksi. Toimenpidesuosituksena on biokattilan ja -polttimen hankkiminen. Jatkotutkimuksen aiheeksi suositellaan pelletöinnin kannattavuuden selvittämistä.

**Kieli**

suomi

Sivuja 94

Liitteet 6

**Asiasanat**

höyläys, kutterinlastu, lämmityskattilat, CHP, energiantuotanto



**THESIS**  
**May 2017**  
**Degree Programme in**  
**Environmental Technology**  
Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
Tel. +35813 260 600

Author  
Toni Kortelainen

Title  
Energy Production Solutions from By-products of Penttilän Puu Oy Planing Mill

Commissioned by  
KUAS and Poveria biomassasta Project (6124)

**Abstract**

In this techno-economic thesis, most profitable energy production solutions were researched for the Penttilän Puu Oy's planing mill in Joensuu. Combined heat and power (CHP) has been considered by the company to substitute the current grate boiler which will be replaced within a few years. If not profitable, the current grate boiler will be replaced with a new bio boiler.

Substitutive boiler options and small-scale CHP technologies have been presented in the technical part of this thesis. Literature and official publications from the web were utilized in making of this report. Moisture content in cutter shavings which is formed as a by-product from planing, was determined from taken samples by oven drying. Expert interviews were used as a mean to gather information about the target company and technological options.

Requests for a quotation were sent to the Finnish boiler and small-scale CHP manufacturers about suitable setups for the target company in economical part of this thesis. Economical examination was executed through three scenarios, first being replacement of the current grate boiler with a new bio boiler. Second option was CHP plant which generates heat and electricity for the planing mill in Joensuu. Last option was bigger CHP plant which generates electricity also for the other planing mill of the company in Hammaslahti.

CHP plants proved to be unprofitable through the economical research and sensitivity analysis. Action proposal for the future is to substitute the grate boiler with a new bio boiler and bio torch. Profitability of a pellet mill (press) is recommended as a follow-up research.

Language

Pages 94

Finnish

Appendices 6

Keywords

planing, cutter shavings, heating boilers, CHP, energy production

## Sisältö

1	Johdanto .....	9
1.1	Taustaa .....	9
1.2	Penttilän Puu Oy .....	10
2	Tietoperusta .....	11
2.1	Keskeiset käsitteet .....	11
2.2	Lämmitysjärjestelmät .....	12
2.2.1	Biolämmityskattilat .....	12
2.2.2	Stokeri- ja biopolttimet .....	15
2.3	Pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotanto (pien-CHP) ....	16
2.3.1	Polttomoottorit ja kaasuturbiinit .....	18
2.3.2	Höyryturbiinit ja muut höyryvoimalaitteet .....	24
2.3.3	Muut välittäjäaineisiin pohjautuvat tekniikat .....	28
2.3.4	Polttokennot .....	32
2.4	Kutterinlastun polttoaineominaisuudet ja käyttömahdollisuudet .....	35
2.5	Taloudelliset laskelmat .....	38
2.5.1	Annuiteettimenetelmä .....	38
2.5.2	Koroton takaisinmaksuaika .....	39
2.5.3	Korollinen takaisinmaksuaika .....	40
3	Tutkimusongelmat ja aiheen rajaus .....	41
3.1	Tutkimusongelmat .....	41
3.2	Tutkimusmenetelmät .....	44
3.3	Aiheen rajaus .....	44
4	Tutkimuksen toteutus .....	47
4.1	Lähtötilanne .....	47
4.1.1	Lämmitys- ja varalämmitysjärjestelmät .....	47
4.1.2	Tontti ja tilat .....	48
4.1.3	Sivuvirran määrä ja ominaisuudet .....	49
4.1.4	Lämmönkulutus .....	55
4.1.5	Sähkönkulutus .....	55
4.2	Korvaavat biokattilat .....	58
4.2.1	Luvat, tuet ja verotus .....	59
4.2.2	Kustannusrakenne .....	60
4.3	Korvaavat CHP-tekniikat .....	62
4.3.1	Luvat, tuet ja verotus .....	62
4.3.2	Kustannusrakenne .....	64
4.3.3	Sähköverkkoon liittyminen ja sähkön myynti .....	65
5	Taloudelliset laskelmat .....	67
5.1	Laskelmien lähtötiedot .....	67
5.2	Vaihtoehto A. Biokattila, biopolttin ja ohjauskeskus .....	68
5.3	Vaihtoehto B. 600 kW:n kaasutukseen perustuva CHP-laitos .....	71
5.4	Vaihtoehto C. 1 MW:n kaasutukseen perustuva CHP-laitos .....	75
6	Tulokset ja niiden tarkastelu .....	80
6.1	Herkkyyshanalyysi .....	80
6.2	Johtopäätökset .....	83
7	Päätäntö .....	87

7.1	Toimenpidesuosituksset .....	87
7.2	Jatkotutkimusaiheet .....	88
	Lähteet .....	89

## Kuvat

- Kuva 1. Pystykonvektio-rakenteisen biolämmityskattilan halkileikkaus.
- Kuva 2. Biolämpölaitoksen komponentit.
- Kuva 3. Stokeripolton periaate.
- Kuva 4. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon periaate.
- Kuva 5. Yhteis- ja erillistuotannon erot.
- Kuva 6. Nelitahtisen dieselmoottorin halkileikkaus ja tärkeimmät osat.
- Kuva 7. Volterin 140 kW:n pien-CHP-voimalan 40 kW<sub>e</sub>:n kaasumoottori Karelia-amk:n Sirkkalan Energiapuistossa.
- Kuva 8. Kaasutintyyppit.
- Kuva 9. Kaasuturbiinilla toimivan pien-CHP-voimalan toimintaperiaate lämmöntalteenotolla, ns. kombi-prosessi.
- Kuva 10. Mikroturbiinilla toimivan pien-CHP-voimalan toimintaperiaate.
- Kuva 11. Rankine-kiertoprosessin toimintaperiaate.
- Kuva 12. Clausius-Rankine-kiertoprosessin toimintaperiaate.
- Kuva 13. Vastapaineturbiini (vas.) ja lauhdeturbiini väliotolla.
- Kuva 14. Vastapainehöyryturbiinilla toimivan kaukolämpövoimalaitoksen toimintaperiaate.
- Kuva 15. ORC-kierron periaate CHP-laitoksessa.
- Kuva 16. Stirling-moottorin Alfa- ja Beta-kokoonpanojen toimintaperiaate.
- Kuva 17. Stirling-moottorin Gamma-kokoonpanon toimintaperiaate.
- Kuva 18. Stirling-moottorilla toimivan CHP-laitoksen toimintaperiaate.
- Kuva 19. Fosforihappopolttokennon (PAFC) toimintaperiaate.
- Kuva 20. Alkali- (AFC) ja sulakarbonaattipolttokennon (MCFC) toimintaperiaate.
- Kuva 21. Protoninvaihto- (PEMFC) ja kiinteäoksidipolttokennon (SOFC) toimintaperiaate.
- Kuva 22. Esimerkki yhdistetyn järjestelmän (polttokenno-kaasuturbiini) toimintaperiaatteesta.
- Kuva 23. Esimerkki paikallisten polttoaineiden käytöstä modernissa CHP-laitoksessa.
- Kuva 24. Kutterinlastua Penttilän Puu Oy:n välivarastossa.
- Kuva 25. Lähikuva kutterinlastun rakenteesta Penttilän Puu Oy:n välivarastolla.
- Kuva 26. Käpykankaan teollisuusalueen lämpökartta.
- Kuva 27. Penttilän Puu Oy:n kattilahuone ja sen päällä oleva polttoainesäiliö.
- Kuva 28. Penttilän Puu Oy:n nykyinen lämmityskattila ja syöttöruuvi.
- Kuva 29. Ortokuva Penttilän Puu Oy:n rajatusta tontista.
- Kuva 30. Näytteenottopisteet välivaraston kutterinlastukasasta.
- Kuva 31. Polttoainenäytteet näytenumeroa vastaavissa astioissa.
- Kuva 32. Polttoainenäytteet Kottermann 2716 -kuivausuunissa.
- Kuva 33. Sähkön osto- ja myyntihinnan rakenne sekä mittakaava pientuotannon hyödyistä.
- Kuva 34. Arvio verkkoon liitetyn piensähkötuotannon markkinakehityksestä Suomessa sekä CHP-tuotannon osuudesta.

Kuva 35. Penttilän Puu Oy:n höyläämörakennus. Taustalla Lakan Betoni Oy.

#### Kuviot

- Kuvio 1. Joensuun höyläämön sähkönkulutuksen keskiarvo arkipäivisin maalisi- ja joulukuussa 2016.
- Kuvio 2. Hammaslahden höyläämön sähkönkulutuksen keskiarvo arkipäivisin maalisi- ja joulukuussa 2016.
- Kuvio 3. Sähköhinnan keskiarvo arkipäivisin.
- Kuvio 4. Vaihtoehto A. Biokattilan ja varalämmityskattilan (POK) lämmitystekot kuukausittain.
- Kuvio 5. 600 kW:n CHP-laitoksen sähköntuotanto ja ylijäämäsähkön määrä, kun laitos on mitoitettu lämpötarpeen mukaan.
- Kuvio 6. 1 MW:n CHP-laitoksen sähköntuotanto ja ylijäämäsähkön määrä, kun laitos on mitoitettu lämpötarpeen mukaan.

#### Taulukot

- Taulukko 1. Kutterinlastun ominaisuuksia kuorettomalle havupuulle.
- Taulukko 2. Joensuun höyläämöllä muodostuvan kutterinlastun määrä ja käyttö vuosittain.
- Taulukko 3. Joensuun höyläämön kutterinlastun laskennallisia ominaisuuksia Alakangas ym. 2016 pohjalta.
- Taulukko 4. Joensuun höyläämöllä muodostuvan sivuvirran sisältämä energian määrä vuodessa.
- Taulukko 5. Höyläämöiden keskiarvokulutukset sekä energian hinta maalisi- ja joulukuun 2016 sähkönkulutusprofiilien pohjalta.
- Taulukko 6. Kartoitetut kotimaiset biokattilavalmistajat ja laitteistot.
- Taulukko 7. Uusiutuvan energian tukimallit Suomessa.
- Taulukko 8. Biokattiloiden lämmöntuotannon kustannuksia.
- Taulukko 9. Kotimaisilta biokattilavalmistajilta saatujen tarjousten pohjalta viitteellisiä arvoja 500 kW:n biokattilajärjestelmille (alv. 0 %).
- Taulukko 10. Kartoitetut kotimaiset pien-CHP-valmistajat ja laitteistot.
- Taulukko 11. Puupolttoainevoimaloiden tuotantotukien taso ja saamisen edellytykset.
- Taulukko 12. CHP-laitteistojen kustannustaso.
- Taulukko 13. Taloudellisen tarkastelun yhteiset lähtöarvot kaikille investointivaihtoehdoille.
- Taulukko 14. Vaihtoehdon A polttoainekustannukset.
- Taulukko 15. Vaihtoehdon A lämmöntuotantokustannukset.
- Taulukko 16. Vaihtoehdon B perustiedot.
- Taulukko 17. Vaihtoehdon B polttoainekustannukset ja sähköntuotanto.
- Taulukko 18. Vaihtoehdon B kannattavuus.
- Taulukko 19. Vaihtoehdon C perustiedot.
- Taulukko 20. Vaihtoehdon C polttoainekustannukset ja sähköntuotanto.
- Taulukko 21. Vaihtoehdon C kannattavuus.
- Taulukko 22. Kutterinlastun myyntihinnan vaikutus CHP-laitosten kannattavuuteen.
- Taulukko 23. CHP-laitosten käyttö- ja kunnossapitokustannusten vaikutus CHP-laitosten kannattavuuteen.
- Taulukko 24. Korkokannan vaikutus CHP-laitosten kannattavuuteen

Taulukko 25. Uuden teknologian investointituen vaikutus CHP-laitosten kannattavuuteen.

Liitteet

Liite 1	Periaatepiirustus Laatukattila Oy:n LAKA Y -kattilasta
Liite 2	Mittakuva Veljekset Ala-Talkkari Oy:n VETO 500 -kattilasta
Liite 3	Pien-CHP-teknologiat ja niiden keskeiset tekniset ominaisuudet
Liite 4	Eri polttoaineiden soveltuvuus pien-CHP-tekniikoille
Liite 5	Gasek Oy:n konsepti pien-CHP-laitoksesta
Liite 6	Kutterinlastunäytteiden uunikuivauksen tulokset 22.2.2017

### Lyhenteet ja symbolit

CHP	yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto (Combined Heat and Power)
HAT	kuumailmaturbiini (Hot Air Turbine)
ORC	orgaaninen Rankine-kiertoprosessi (Organic Rankine Cycle)
PAFC	fosforihappopolttokenno (Phosphoric Acid Fuel Cell)
AFC	alkalipolttokenno (Alkaline Fuel Cell)
MCFC	sulakarbonaattipolttokenno (Molten Carbonate Fuel Cell)
PEMFC	protoninvaihtopolttokenno (Proton Exchange Membrane/ Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
SOFC	kiinteäoksidipolttokenno (Solid Oxide Fuel Cell)
TRL	teknologian valmiuden taso (Technology Readiness Level, 0-9)
POK	kevyt polttoöljy (lämmitysöljy)
HKA	huipunkäyttöaika

a	vuosi
°C	celsiusaste
m <sup>3</sup>	kuutiometri
i-m <sup>3</sup>	irtokuutiometri
mm	millimetri
ha	hehtaari
kg	kilogramma
t	tonni
kW	kilowatti
kWh	kilowattitunti
kW <sub>e</sub>	kilowatti, sähköteho
kW <sub>th</sub>	kilowatti, lämpöteho
MWh	megawattitunti
MJ	megajoule

d	kuiva-aines, kuivana (dry)
ar	saapumistilassa (as received)
p-%	painoprosentti, massaprosentti
toe	öljyekvivalenttonni (Tonnes of Oil Equivalent)
A	tuhkapitoisuus [p-%]
BD	irtotiheys saapumistilassa [kg/m <sup>3</sup> ]
E	energiatiheys [MWh/m <sup>3</sup> ]
E <sub>ar</sub>	energiatiheys saapumistilassa [MWh/m <sup>3</sup> ]
F	hienoaineksen määrä (< 3,15 mm) [p-%]
M <sub>ar</sub>	kokonaiskosteus saapumistilassa [p-%]
Q	tehollinen lämpöarvo vakiopaineessa [kWh/kg, MWh/t]
q <sub>p,net,d</sub>	tehollinen lämpöarvo vakiopaineessa kuiva-aineessa [MJ/kg]
q <sub>V,gr,d</sub>	kalorimetrinen lämpöarvo vakioilavuudessa, kuiva-aineessa [MJ/kg]



# 1 Johdanto

## 1.1 Taustaa

Opinnäytetyön tavoitteena on kartoittaa Penttilän Puu Oy:n Joensuun höyläämölle taloudellisesti kannattavimmat energiantuotannon ratkaisut. Tärkeimpänä tehtävänä on selvittää mahdollisuudet pienen kokoluokan yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon siirtymisestä, sekä sen kannattavuudesta. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto saattaisi osittain ratkaista myös toisen tutkimustehtävän eli höyläämön sivuvirtana muodostuvan kutterinlastun tehokkaamman hyödyntämisen.

Pyrkimyksenä on tuottaa luotettava tutkimustulos, jota voidaan hyödyntää lämmitysjärjestelmän uusimisessa, sekä Poveria biomassasta -hankkeelle tehtävän ”Sähkön ja lämmön yhteistuotannon teknologioiden vaihtoehdot pienen kokoluokan puuteollisuudessa” -teknologiaselvityksen pohjana. Opinnäytetyö on teknis-taloudellinen selvitys, jonka tietoperusta pohjautuu uusiutuvan energian teoksiin ja virallisiin julkaisuihin sekä laitevalmistajilta saatuihin tietoihin.

Opinnäytetyö on ajankohtainen ensinnäkin kohdeyrityksen kannalta, sillä nykyinen lämmitysjärjestelmä tullaan uusimaan lähivuosien aikana. Toiseksi kutterin höyläysrejektinä muodostuvaa kutterinlastua käytetään yleisesti seospoltossa esimerkiksi hakkeen seassa, mutta pien-CHP-tekniikan pääpolttoaineeksi sen soveltuvuutta on toistaiseksi tutkittu vähän.

Opinnäytetyön toimeksiantajina toimivat Karelia-ammattikorkeakoulu ja Poveria biomassasta -hanke (hanke nro 6124). Yhteistyökumppanina toimii kohdeyritys Penttilän Puu Oy ja opinnäytetyön ohjaavana opettajana Juha Kilpeläinen.

## 1.2 Penttilän Puu Oy

Penttilän Puu Oy on joensuulainen perheyritys, jolla on höyläämöt Joensuussa sekä Hammaslahdella. Joensuun höyläämö on ollut toiminnassa yrityksen perustamisvuodesta 1994 lähtien ja Hammaslahden höyläämö vuodesta 2013 alkaen. Yrityksen päätoimiala käsittää puun sahauksen, höyläyksen ja kyllästyksen. Yritys on nykyään yksi merkittävistä runkotavaran tekijöistä Suomessa. Penttilän Puu Oy:n vuoden 2015 liikevaihto oli 6,54 miljoonaa euroa (Suomen Asiakastieto Oy 2016). Vakituksia työntekijöitä yrityksessä on 13 ja kesäkuukausina kausityöntekijät mukaan luettuna 20.

Joensuun höyläämöllä työskennellään kahdessa vuorossa ja Hammaslahden höyläämöllä yhdessä. Energiankulutuksen painopiste Joensuussa sijoittuu kello 6.00–22.00 ja Hammaslahdessa 7.00–15.30 väliselle ajalle. Muina aikoina sähkö- ja lämpöenergiaa kuluu pääasiassa ympäri vuorokauden päällä olevien kuivureiden toimintaan.

Sähkönkulutus molemmilla höyläämöillä on ympäri vuoden tasaista. Sähkönkulutus sekä Joensuun, että Hammaslahden toimipisteillä on keskimäärin 50 000 kWh/kk, eli yhteensä 1 200 MWh vuodessa. Työvuorojen aikaisen toimintatehon mukaan määräytyvä sähkötehotarve on noin 110 kW<sub>e</sub> kummassakin toimipisteessä. Nykyisin sähkö tulee Joensuun höyläämölle kiinteällä sopimuksella PKS:ltä ja sähkönsiirrosta vastaa Caruna Espoo.

Lämpö ja kuivausilma Joensuun höyläämöille tuotetaan höyläämön sivuvirtana muodostuvaa kutterinlastua polttamalla. Joensuussa kutterinlastua muodostuu vuosittain 37 000 i-m<sup>3</sup> eli noin 3 750 tonnia. Tästä määrästä 1 750 t kuluu Joensuun höyläämöllä lämpöenergian tuottamiseen ja loput 2 000 t menee myyntiin. Lämmöntarve jakautuu tilojen lämmityksen sekä puutavaran kuivaamisen välillä. Kutterinlastua poltetaan ruuvisyötteisellä Kattilahitsaus Oy:n TULI 500 kW-arinakattilalla. Nimensä mukaisesti lämmityskattilan nimellisteho on 500 kilowattia. Kylmimpinä talvikuukausina lämmöntuotantoa tehostetaan polttamalla öljyä erillisessä 250 kW:n öljykattilassa. Öljyn kulutus on 1 000 litraa vuodessa.

## 2 Tietoperusta

### 2.1 Keskeiset käsitteet

**Energiatiheys.** Lämpöarvo tilavuutta kohti (ks. lämpöarvo) [E, MWh/m<sup>3</sup>] (Alakangas ym. 2016, 13).

**Huipunkäyttöaika** on tuntimäärä, joka laitoksen tulee toimia nimellistehollaan vuosituoton saavuttamiseksi. Maksimiarvo on vuodessa oleva tuntien määrä (8 760 h) (Tampereen teknillinen yliopisto 2013).

**Investointikustannukset**, eli hankintamenot sisältävät kaikki kustannukset, joita syntyy ennen investoinnin käyttöönottoa (esim. laitteet, tontti ja rakenteet) [€/kW] (Pulkinen 2005, 212).

**Irtotiheys.** Biopolttoaineen tilavuuspaino kuormatilavuutta kohti [BD, kg/m<sup>3</sup>] (Alakangas ym. 2016, 10).

**Jäännösarvo** on investoinnin arvo investointiajanjakson lopussa (Karjalainen 2005 b, 99).

**Korkokanta** ilmoittaa, kuinka monta prosenttia yhden vuoden (korkojakson) korko on pääomasta (Karjalainen 2005 b, 61).

**Käyttö- ja kunnossapitokustannus.** Laitteen huolto-, vakuutus-, korjaus- ja hallinnointikustannukset [€/MWh] (Pappinen 2017).

**Lämpöarvo** on täydellisessä palamisessa kehittyvän lämmön määrä polttoaineen massaa kohti [Q, MJ/kg] (Alakangas ym. 2016, 13).

**Nimellisteho.** Valmistajan ilmoittama laitoksen maksimiteho optimiolosuhteissa.

**Rakennussuhde.** CHP-laitoksen sähköntuotanto suhteessa lämmöntuotantoon (0,1–0,5) (Aaltonen & Ukkonen 2008, 5).

**Tehollinen lämpöarvo** eli alempi lämpöarvo. Lämpömäärä joka syntyy poltettaessa yksi massayksikkö polttoainetta, kun palamisen yhteydessä kehittyvä vesi höyrystyy ja jäähtyy takaisin alkulämpötilaan pysyen höyryn muodossa [ $q_{\text{net, dry}}$ , MJ/kg] (Alakangas ym. 2016, 18).

**Tuotantokustannus** sisältää kaikki kiinteät kustannukset (kuten laitteet ja rakennukset) sekä muuttuvat kustannukset (esim. käyttö- ja kunnossapitokustannukset, polttoaineen hinnan sekä ostosähkön hinnan) [€/MWh] (Pulkinen 2005, 212).

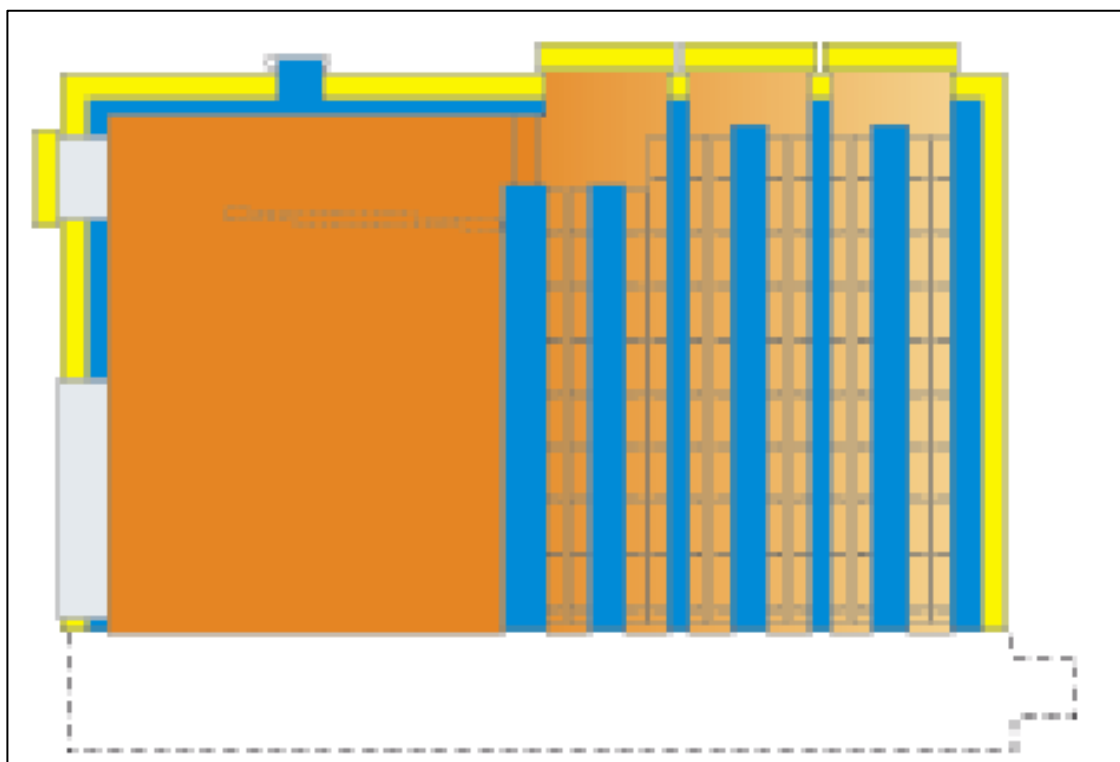
## 2.2 Lämmitysjärjestelmät

### 2.2.1 Biolämmityskattilat

Biolämmityskattila on kiinteälle biomassalle soveltuva lämmityskattila (Tuomi 2013, 2). Kiinteillä biopolttoaineilla toimivissa kattiloissa käytetään kolmea polttotapaa: arinapolttua, kaasutuspolttoa sekä leijupolttoa. Arinapoltto on näistä yleisin polttotapa alle 10 MW<sub>th</sub>:n kattiloissa (Pesola ym. 2010, 26). Pienemmät arinakattilat voidaan jakaa yläpalo- ja alapalokattiloihin. Yläpalokattiloissa polttoainepanos syötetään kerralla tulipesään. Tästä johtuen palamisolosuhteet vaihtelevat jatkuvasti ja päästöt ovat muihin kattilatyyppeihin verrattuna suuremmat. Alapalokattiloissa polttoaineen lisääminen on jatkuvaa, jolloin palamisolosuhteet eivät muutu ja päästöt pysyvät pienempinä. Polttoaineen syötössä voidaan käyttää stokeria. Stokeri annostelee polttoainetta ja säätelee palamista automaattisesti. (Vartiainen ym. 2002, 15.)

Yksinkertaistettuna biolämmityskattilan sisärakenne käsittää tulipesän jossa palaminen tapahtuu, konvektio-osan sekä vesitilan. Konvektio-osa on tulipesän jatke, jolla kasvatetaan lämmön talteenottoon tarkoitettua pinta-alaa (kuva 1).

Konvektio-osan seinämän takana on vesitila, jossa olevaan veteen lämpöä sidotaan. Kattiloissa käytetään yleensä pysty- tai vaakakonvektiota. (Harju 2010,12.)



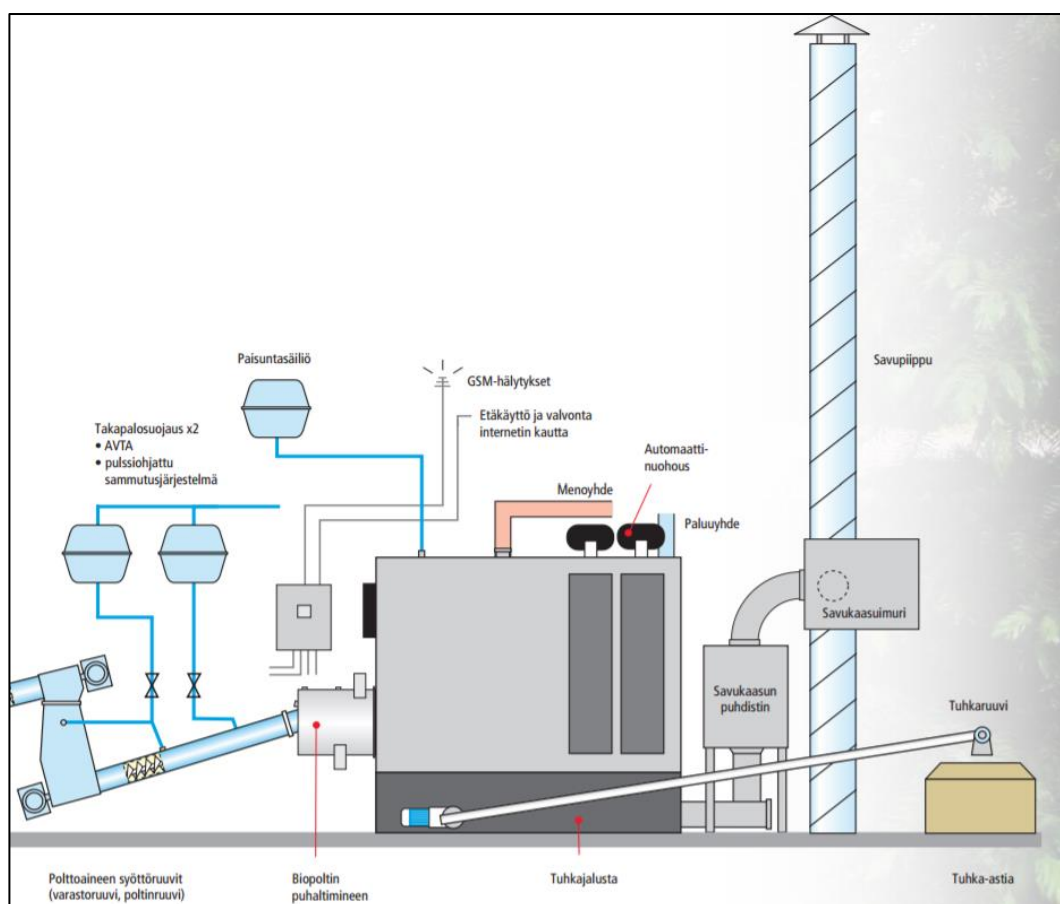
Kuva 1. Pystykonvektio-rakenteisen biolämmityskattilan halkileikkaus (Kuva: Arterm Oy 2016).

Biolämmityskattiloita voidaan kutsua keskuslämmityskattiloiksi, kun tuotettu lämpöenergia siirretään veden avulla samassa kiinteistössä tai muuhun tontilla sijaitsevaan kohteeseen käytettäväksi. Keskuslämmityskattiloiden teho vaihtelee 15–500 kilowatin välillä kohteesta riippuen. Omakotitalossa lämmitystehon tarve on keskimäärin 15–25 kW, maataloilla 25–150 kW ja suuremmissa kiinteistöissä 200–400 kW. (Motiva 2016.) Kattilasta ja lisälaitteista, kuten kuljettimesta ja savupiipusta, muodostuvaa kokonaisuutta voidaan kutsua myös lämpökeskukseksi (kuva 2). Rajanveto keskuslämmityskattilan ja lämpökeskuksen välillä on häilyvä, sillä lähteestä riippuen lämpökeskukseksi voidaan kutsua joko yli 500 tai yli 1 000 kW:n kokonaisuutta.

Alle 1 000 kW:n lämpökeskukset voidaan kytkeä lämmönjakelujärjestelmään joko suorasti tai epäsuorasti. Kun kattilalaitos on pieni tai lämmitysjärjestelmässä on vain yksi lämmönkuluttaja, käytetään suoraa kytkentää. Tällöin kattilalaitoksessa,

verkostossa ja kiinteistön pattereissa kiertää sama vesi. Suuremmissa verkostoissa käytetään lähes poikkeuksetta epäsuoraa kytkentää. Siinä eri kiinteistöt on erotettu verkostoista lämmönsiirtimien välityksellä. Tästä syystä epäsuoran kytkennän hallittavuus ja käyttövarmuus ovat parempia. (Puhakka ym. 2001, 29–30.)

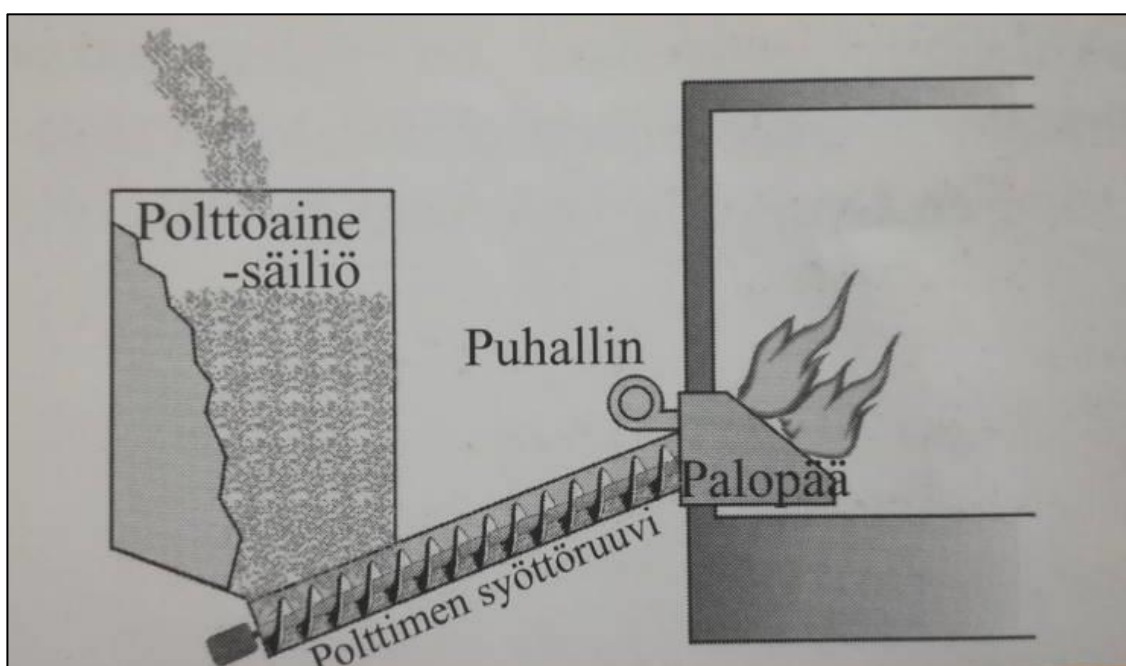
Biolämmityskattiloiden nimellisteho on yleensä 10–10 000 kW<sub>th</sub>, vaikka yli 10 000 kW<sub>th</sub>:n kattiloita käytetään esimerkiksi teollisuudessa. Biolämmityskattiloiden hyötysuhde on 70–90 % ja huipunkäyttöaika 1000–4000 tuntia (Vartiainen ym. 2002, 16). Investointikustannuksiltaan biolämmityskattiloiden hinta vaihtelee pienessä kokoluokassa 50–100 €/kW<sub>th</sub>:n välillä. Kattilan lisäksi investointikustannuksiin lisätään polttoaineen syöttöjärjestelmän kustannukset, jotka ovat luokkaa 100–150 €/kW<sub>th</sub>. (Pesola ym. 2010, 27.)



Kuva 2. Biolämpökeskuksen komponentit (Kuva: Arterm Oy 2016).

## 2.2.2 Stokeri- ja biopolttimet

Erillisestä polttoainesäiliöstä, ruuvi siirtimestä ja polttinosasta muodostuvaa kokonaisuutta kutsutaan stokeriksi. Stokeri on toisin sanoen ruuvisyötteinen arinapoltin. Stokeripoltin on suunniteltu erityisesti pelletille ja hakkeelle, ja sitä käytetään laajasti eri teholuokissa. Polttimen rakenne voi vaihdella polttoaineesta riippuen. Hakkeella käytetään usein pientä kiinteää arinaa ja pelletillä alta syötettävää kuppia. Yleensä polttinosa on irrottavissa kattilasta puhdistamisen helpottamiseksi. (Motiva 2014a.)



Kuva 3. Stokeripolton periaate. (Kuva: Puhakka ym. 2001).

Stokeripolttimet ovat jo nykyisin kohtuullisen hyvin toimivia alle 100 kW:n teholuokassa. Tästä suuremmassa kokoluokassa stokeripolttimet eivät ole vielä vakiintunutta tekniikkaa. Yksittäisen stokeriyksikön suurin teho on käytännössä luokkaa 500 kW. Stokeripolttimilla kyetään kuitenkin toteuttamaan megawattiluokan lämpökeskus käyttämällä useita yksiköitä. Tämä mahdollistaa laajan tehonsäätöalueen, sillä osa polttimista voidaan sammuttaa pienen tehontarpeen aikana. (Helynen & Oravainen 2002, 17.)

Tuotantotilojen ja tuotantoprosessien vaatiman lämmön sivuvirroillaan tuottavat mekaanisen puunjalostuksen yritykset käyttävät yleensä alasyöttöisiä stokerikatiloita. Stokeripolton on selkeästi havaittu vaikeutuvan polttoaineen kosteuspitoisuuden ylittäessä 40 p-%. Kosteuden haihduttaminen vaatii polttoaineelta pidemmän viipymäajan palopäässä, mikä hidastaa syttymisrintaman etenemistä. (Helynen & Oravainen 2002, 17.)

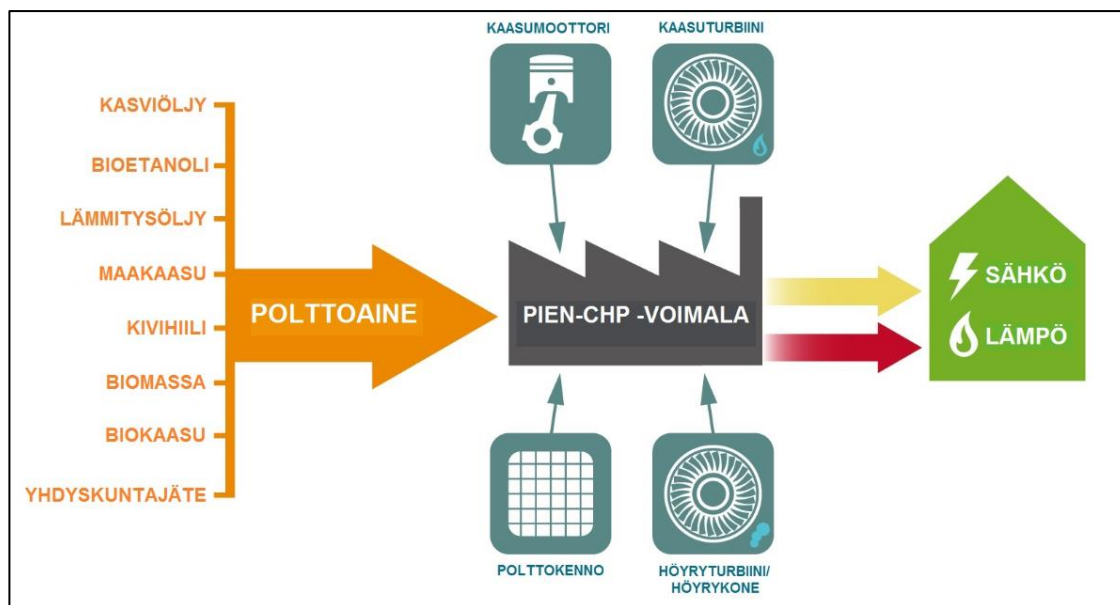
Biopolttimet voidaan rinnastaa toimintaperiaatteeltaan stokeripolttimiin, sillä lämmityskattilaan asennettuna kummatkin on suunniteltu tuottamaan lämpöä kiinteistä biopolttoaineista. Stokeripolttimen tapaan myös biopolttin toimii automaattisesti kattilatermostaatin ohjaamana. Poltin ja ilmanpuhallin käynnistyvät, ja kuljetinruuvi aloittaa polttoaineen syötön palopäähän, kun lämmitettävän veden lämpötila laskee alle ennalta säädetyn arvon. Kun vesi saavuttaa tavoitelämpötilan, laite kytkeytyy ylläpitotilaan. (Säätötuli Oy.)

### **2.3 Pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotanto (pien-CHP)**

Erinäisiin polttoprosesseihin pohjautuvat tekniikat muodostavat merkittävän osan hajautetun energiantuotannon kokonaispotentialista. Polttoprosesseihin pohjautuvilla tekniikoilla tuotetaan lämpöä, joka valjastetaan generaattoreiden avulla sähköenergiaksi. Tätä kutsutaan sähkön ja lämmön yhteistuotannoksi (CHP) (kuva 4). (Vihanninjoki 2015, 15.)

Yhteistuotantolaitosten kokoluokat vaihtelevat muutamista kilowateista satoihin megawatteihin. CHP-laitokset jaetaan koon perusteella kolmeen luokkaan: mikro-CHP, pien-CHP ja suuren kokoluokan CHP-laitokset. (Laurila & Lauhanen 2011, 12.) Jako ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteinen. Etenkin mikro- ja pien-CHP-laitokset voivat mennä helposti sekaisin. Mikro-CHP-laitosten nimellistehon ylärajana voidaan pitää 50 kW. (Hintikka 2004, 2.)

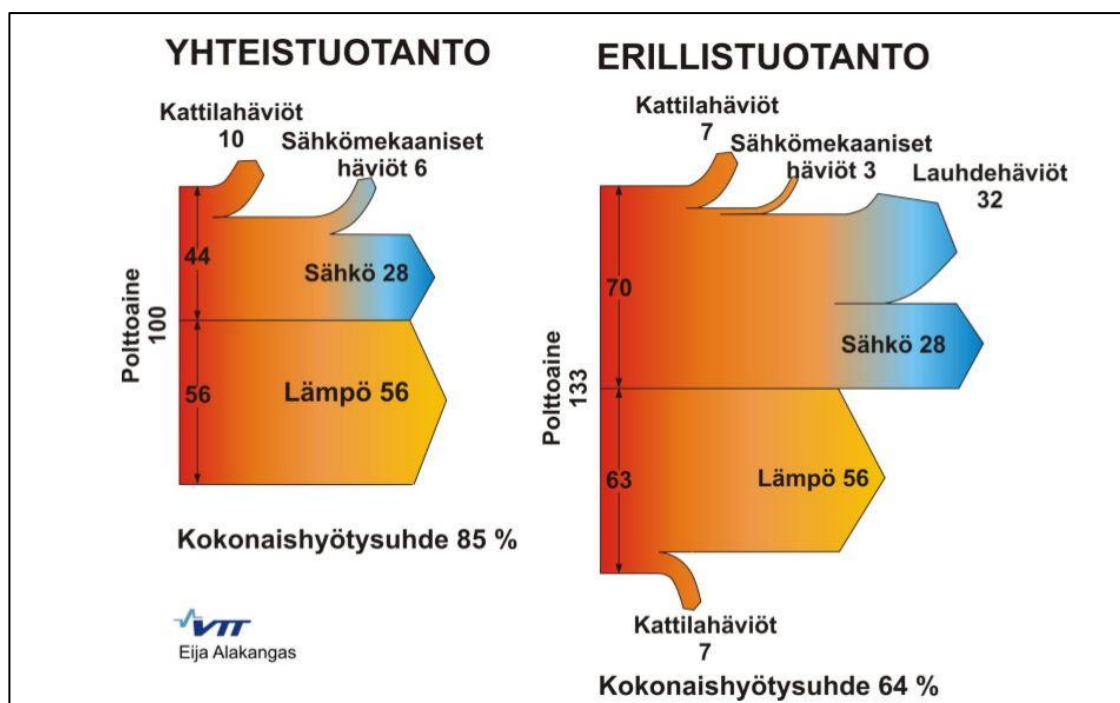




Kuva 4. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon periaate (Kuva: Northern Utilities).

Motivan määritelmän mukaan pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotannolla (pien-CHP) tarkoitetaan pienvoimalaa, jonka sähköntuotantoteho on 1–2 MW<sub>e</sub> ja lämpöteho 3–5 MW<sub>th</sub> (Motiva 2014b). Poikkeaviakin näkemyksiä pien-CHP-laitosten kokoluokan määritelmästä on. Haaviston (2010, 2) Puupolttoaineisiin perustuvat pien-CHP-tekniikat –raportin mukaan pienen kokoluokan CHP-tekniikkoihin luokitellaan sellaiset sähkön ja lämmön yhteistuotantojärjestelmät, joiden sähköteho on alle 1 000 kW<sub>e</sub>. Myös Oulun rakennusvalvonnan ohjekortin (2016, 2) mukaan pien-CHP:n sähköteho vaihtelee välillä 10–1 000 kW<sub>e</sub>. Näiden tietojen pohjalta tässä työssä pien-CHP -laitoksista puhuttaessa viitataan voimaloihin, joiden sähköteho on 10–1 000 kW<sub>e</sub>.

Kokonaishyötysuhteeltaan pien-CHP-laitokset ovat yleensä 80–95 % luokkaa. Sähkön tuotannon hyötysuhde vaihtelee 10–40 % välillä voimalan kokoluokasta ja tekniikasta riippuen. (Haavisto 2010, 2.) Pien-CHP-tekniikoiden vertailu on nähtävissä liitteessä 3 ja polttoaineiden soveltuvuus liitteessä 4.



Kuva 5. Yhteis- ja erillistuotannon erot (Kuva: Flyktman 2013).

Pien-CHP tuotetaan pääosin neljällä eri perustekniikalla (Motiva 2014b):

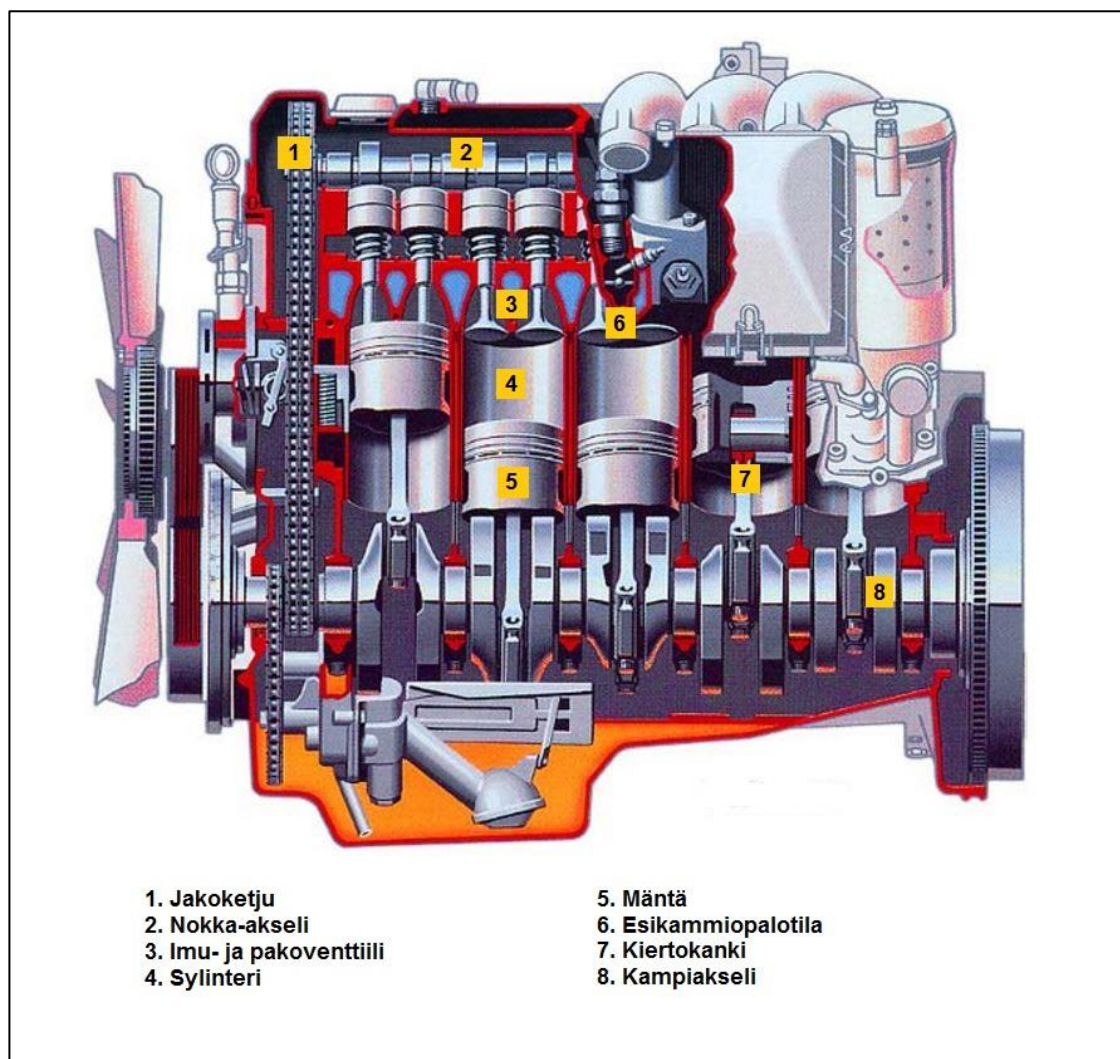
- Polttomoottorit ja kaasuturbiinit
- Höyryturbiinit ja muut höyryvoimalaitteet
- Muut välittäjäaineisiin pohjautuvat tekniikat
- Polttokennot.

### 2.3.1 Polttomoottorit ja kaasuturbiinit

Tähän kategoriaan sisältyvät polttomoottorit (kaasu- ja dieselmoottorit), kaasuturbiinit, mikroturbiinit, sekä kuumailmaturbiinit (HAT). Kappaleessa käydään läpi myös biomassan kaasutuksen periaate, jolla voidaan valmistaa puupohjaisista raaka-aineista kaasumaista polttoainetta kaasumoottoreille ja -turbiineille.

Polttomoottoreiden ja kaasuturbiinien toiminta perustuu sisäiseen palamiseen. **Polttomoottorissa** kaasumaisen tai nestemäisen polttoaineen ja ilman muodostama seos syötetään sylinteriin. Sylinterissä sytytetty seos palaa räjähdysmäisesti, mistä aiheutuva palotilan paine työntää mäntää kohti kampiakselia. Mäntän liike työntää kiertokankea, joka aikaansaa kampiakselin pyörimisliikkeen.

Kampiakselin pyörimisen liike-energia siirretään sähkögeneraattoriin (kuva 6). Polttomoottoria kutsutaan polttoaineesta riippuen myös diesel- tai kaasumoottoriksi. (Takalo 2013, 4–5.) Polttomoottorit ovat ns. avoimia prosesseja, joissa työaine eli ilman ja polttoaineen seos vaihtuu jatkuvasti (Hirvonen 2016).



Kuva 6. Nelitahtisen dieselmoottorin halkileikkaus ja tärkeimmät osat (Kuva: Rockwell).

Kokoluokaltaan kaasumoottorit ovat muutamista kilowateista ylöspäin. Kaasumoottorit ovat olleet pien-CHP-laitoksissa kaupallisesti hallitsevassa asemassa. (Pesola ym. 2010, 28.) Syynä tähän on todennäköisesti se, että polttomoottorit edustavat edullisinta pien-CHP-tekniikkaa (Haavisto 2010, 3). Kaasumoottoreissa polttoaineena voidaan käyttää maakaasua, nestekaasua (Liquid Petro-

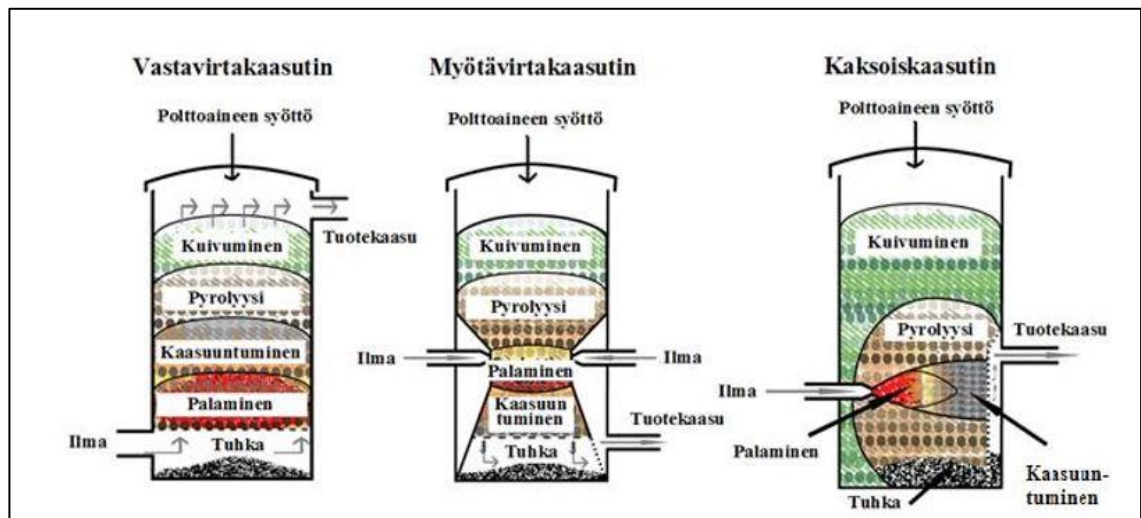
leum Gas tai LPG) tai biokaasua. Myös puun kaasutusta kaasumottoireiden polttoaineen tuotannossa ollaan kokeilemassa pienessä kokoluokassa (kuva 7). (Pesola ym. 2010, 28.)



Kuva 7. Volterin 140 kW:n pien-CHP-voimalan 40 kW<sub>e</sub>:n kaasumoottori Karelia-amk:n Sirkkalan Energiapuistossa (Kuva: Toni Kortelainen 2017).

Polttomoottoreiden etuna on monipuolisen polttoainevalikoiman lisäksi korkea sähköhyötysuhde sekä laaja tehoalue. Siksi ne soveltuvatkin parhaiten tasaisen sähkön ja lämmön tarpeen kohteisiin, kuten hotelleihin, kylpylöihin tai sahoille ja muuhun pk-teollisuuteen. Pienemmässä kokoluokassa ongelmana on suhteellisen suuri huollon tarve sekä melu. (Vartiainen ym. 2002, 18.)

Kaasutus on termokemiallinen prosessi, jossa hiiltä sisältävää materiaalia, kuten puuta, muutetaan kaasuksi tai kemikaaleiksi. Kaasutusprosessin neljä päävaihetta ovat kuivuminen, pyrolyysi, puuhiilen kaasutus ja palaminen. Pien-CHP-laitoksissa käytetään yleensä kiintopetikaasuttimia, jotka voidaan jakaa vasta- ja myötävirtakaasuttimiin, sekä niiden risteytykseen, kaksoiskaasuttimiin (kuva 8). Vastavirtakaasuttimen lämpöteho vaihtelee välillä 1–10 MW<sub>th</sub> ja myötävirtakaasuttimen 10 kW<sub>th</sub>:n ja 1 MW<sub>th</sub>:n välillä. (Europaeus 2014, 10, 14.)



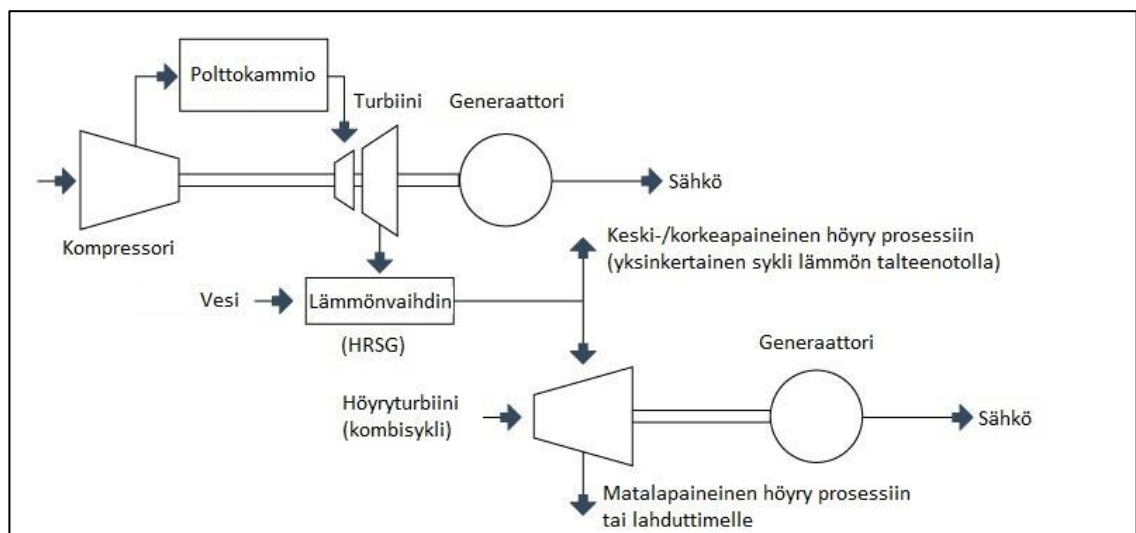
Kuva 8. Kaasutintyytit (Kuva: Europaeus 2014).

Biomassan kaasutuksen suurin etu suoraan polttoon nähden on hiukkaspäästöjen sekä muiden päästöjen minimointi, mikä samalla ehkäisee lämmönvaihtimen likaantumiseriskiä. Päästöjen vähenemisen lisäksi kaasutustekniikka mahdollistaa pien-CHP-laitoksen edullisemmän hinnan. (Haavisto 2010, 3.) Tuotekaasun laadulliset ongelmat ja siitä aiheutuvat kustannukset ovat pääsyy kaasutusteknologian hyödyntämisen vähäisyydelle sekä hitaalle kehitykselle. Erityisesti tuhkan ja tervan muodostuminen aiheuttaa käyttö- ja kunnossapitokustannuksia sekä vaatii investoinnin kalliisiin puhdistuslaitteistoihin. (Europaeus 2014, 48.)

**Kaasuturbiinissa** kaasumainen tai nestemäinen polttoaine syötetään korkealla paineella polttokammioon. Tämän jälkeen ahdin puristaa ilmaa polttokammioon polttoaineen sekaan. Sytytetty seos palaa korkeassa paineessa ja palamisesta syntyvä laajeneva palamiskaasu työntää turbiinisiipiä. Akselille kytkettyjen turbiinisiipien synnyttämä pyörimisliike siirretään akselia pitkin sähkögeneraattorille. Kaasuturbiinin jälkeen palamiskaasut ohjataan lämmön talteenottokattilaan,

jossa palamiskaasuihin sitoutunut lämpö otetaan talteen ja hyödynnetään veden höyryttämisessä (kuva 9). (Takalo 2013, 5.)

Osassa prosessia työaineena on puhdas ilma, osassa palamiskaasu. Kaasuturbiinivoimalan työaineita voidaan kuitenkin pitää ideaalikaasuina (Wiksén 1996, 81). Kaasuturbiiniprosessi voi olla sekä avoin (esim. maakaasu), että suljettu (mm. HAT-prosessi). Avoimen prosessin polttoaineeksi soveltuvat suhteellisen puhtaat kaasumaiset polttoaineet, kuten puu- ja biokaasu. Suljetussa prosessissa polttoaineiden skaala on laajempi (liite 4). (Hirvonen 2016.)



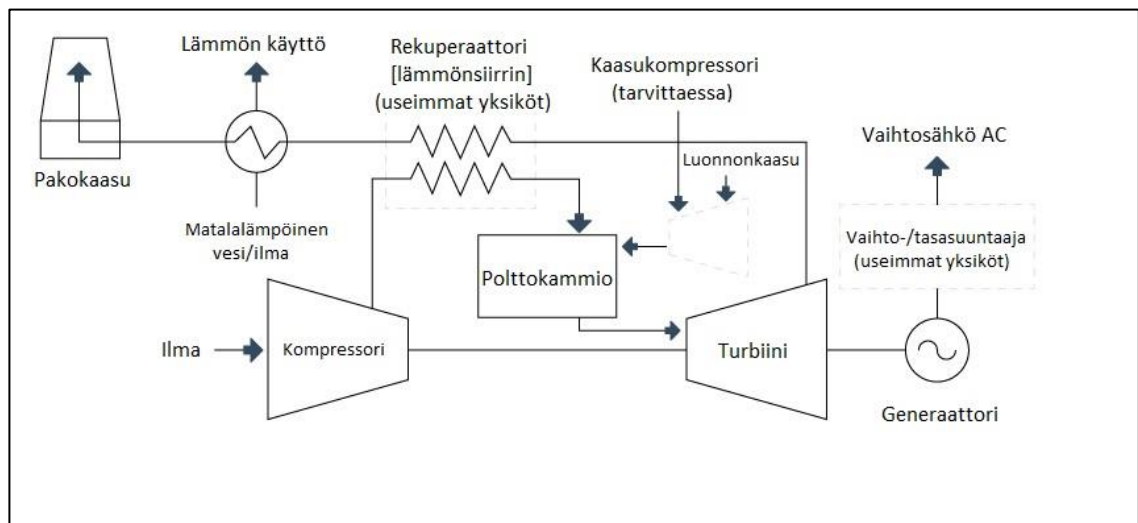
Kuva 9. Kaasuturbiinilla toimivan pien-CHP-voimalan toimintaperiaate lämmön talteenotolla, ns. kombi-prosessi (Kuva: Energy Solutions Center 2016).

Kaasuturbiinien suurin heikkous on tuotannon säädeltävyys. Teollisuudessa käytettävät kaasuturbiinit ovat usein yksiakselisia. Koska yksiakseliset kaasuturbiinit pyörivät vakionopeudella, niiden hyötysuhde alkaa jyrkästi laskea, jos niitä käytetään osakuormalla. Osakuormalla käytettäessä virtauksien suunnat muuttuvat epäedullisiksi turbiinin siipiin nähden, mikä aiheuttaa systeräviötä. (Perttula 2000, 122.)

**Mikroturbiineilla** tarkoitetaan yleensä kaasuturbiineja, joiden teho on 25–250 kW<sub>e</sub>. Myös mikroturbiinit ovat tavallisesti yksiakselisia. Akseliin on laakeroitu generaattori, kompressori ja turbiini joko ilma- tai öljylaakereilla (kuva 10). Muiden

kaasuturbiineiden tapaan mikroturbiineissa syöttöilma paineistetaan kompressorilla ennen polttokammioon syöttämistä. Samassa yhteydessä kuumaa palamiskaasua on mahdollista hyödyntää lämmönsiirtimellä hyötysuhteen parantamiseksi. (Vartiainen ym. 2002, 19.)

Mikroturbiinit ovat tekniikaltaan yksinkertaisia ja niiden sähkön tuotannon hyötysuhde on hyvä. Lisäksi mikroturbiinien hiljainen toiminta ei edellytä hyvää äänieristystä, toisin kuin polttomoottoreihin pohjautuvat tekniikat. Mikroturbiinien laajempaa käyttöä rajoittaa tekniikan korkeat investointikustannukset, jotka ovat pien-CHP mittakaavassa toistaiseksi kaksi kertaa polttomoottorijärjestelmiä suuremmat. (Haavisto 2010, 3.)



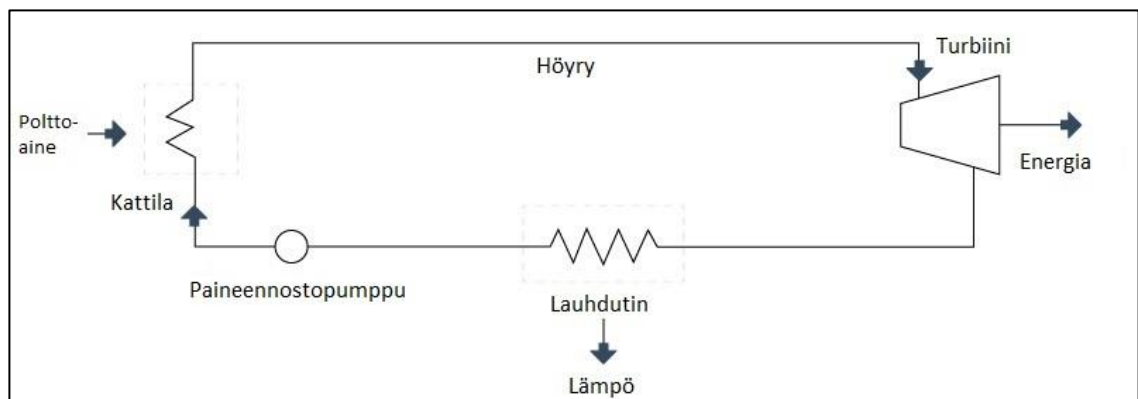
Kuva 10. Mikroturbiinilla toimivan pien-CHP-voimalan toimintaperiaate (Kuva: Energy Solutions Center 2016).

**Kuumailmaturbiini (HAT)** on yksi uusimmista vaihtoehdoista kokonaisteholtaan 2–3 MW:n pien-CHP-laitoksille. Tekniikka pohjautuu suuriin, hiiltä polttaviin CAT-Cycle voimaloihin (Coal-fired Air Turbine). Biomassalle sopivaksi muunnettuja voimaloita kutsutaan nimellä HAT (Hot Air Turbine). Kuumailmaturbiinin toimintaperiaate on sama kuin höyryturbiinilla ja ORC-tekniikalla. Edellä mainituista tekniikoista poiketen kuumailmaturbiinissa turbiinille johdetaan höyryn sijasta kuumaa ilmaa. Biomassan kaasutuksen jälkeen lämpöenergia siirtyy palokaasuista paineistettuun kuumaan ilmaan lämmönvaihtimen kautta. Tämän jälkeen 800–950 °C ilma johdetaan kuumailmaturbiinille. (Granö 2010, 4.)

Koska turbiinille johdettava ilma kuumennetaan lämmönvaihtimessa, se ei joudu kosketuksiin palamiskaasujen tai kaasun sisältämien epäpuhtauksien, kuten tuhkan, kanssa. Tästä syystä palamiskaasujen epäpuhtauksista aiheutuvat ongelmat voidaan välttää kuumailmaturbiinia käytettäessä. Kuumailmaturbiini on tekniikkana suhteellisen tuore, joten järjestelmien käyttövarmuus on edelleen heikko. Järjestelmien toimittajia on kuitenkin jo muutamia, vaikka tekniikka on edelleen kehitysvaiheessa. (Bäckman 2014, 24.)

### 2.3.2 Höryturbiinit ja muut höryvoimalaitteet

**Höryturbiinin** eli Rankine-kiertoprosessin toimintaperiaate on samantapainen kuin kaasuturbiinissa, mutta siitä poiketen palaminen ja lämmön talteenotto tapahtuvat hörypiirin ulkopuolella. Ensin vesi paineistetaan paineennosto- eli syöttövesipumpulla ja höyrystetään kattilassa esimerkiksi kiinteitä biopolttoaineita polttamalla. Tämän jälkeen höyry johdetaan höryturbiiniin, missä laajeneva höyry pyörittää turbiinisiipiä. Höryturbiinissa syntyvä pyörimisliike siirretään akselin välityksellä sähkögeneraattoriin. Höyry jatkaa matkaa lämmönvaihtimelle, missä lämpö otetaan talteen ja siirretään joko verkkoon tai varaajaan (kuva 11). (Takalo 2013, 6–7.) Höryturbiinit ja muut höryvoimalaitteet ovat suljettuja prosesseja, joissa työaineena toimiva vesi kiertää jatkuvasti laitteiston sisällä (Hirvonen 2016).

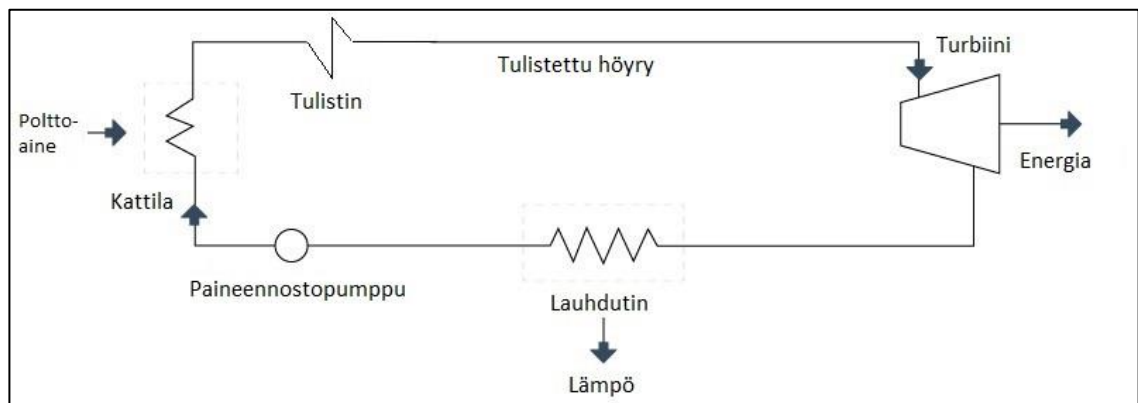


Kuva 11. Rankine-kiertoprosessin toimintaperiaate (Kuva: Energy Solutions Center 2016).



Rankine-kiertoprosessin heikkous on höyryn kosteus turbiinissa paisunnan loppupäässä. Höyryn kosteus lopputilassa saa olla maksimissaan 12 %, muuten muodostuvat vesipisarat alkavat kuluttaa turbiinisiipiä. Riittävän alhainen kosteus saavutetaan tulistamalla kattilassa syntynyt höyry ennen turbiinille johtamista. Tulistusta hyödyntävää höyryprosessia kutsutaan Clausius-Rankine-kiertoprosessiksi (kuva 12) ja se on höyryvoimalaitosten perusprosessi. (Wikstén 1996, 57.)

Clausius-Rankine-kiertoprosessissa kiehumispistettä korkeampaan lämpötilaan tulistettu höyry johdetaan vastapaineturbiiniin, jossa sen paine alenee halutulle tasolle lämmönvaihtimen määräämän lämpötila perusteella (Takalo 2013, 6–7).

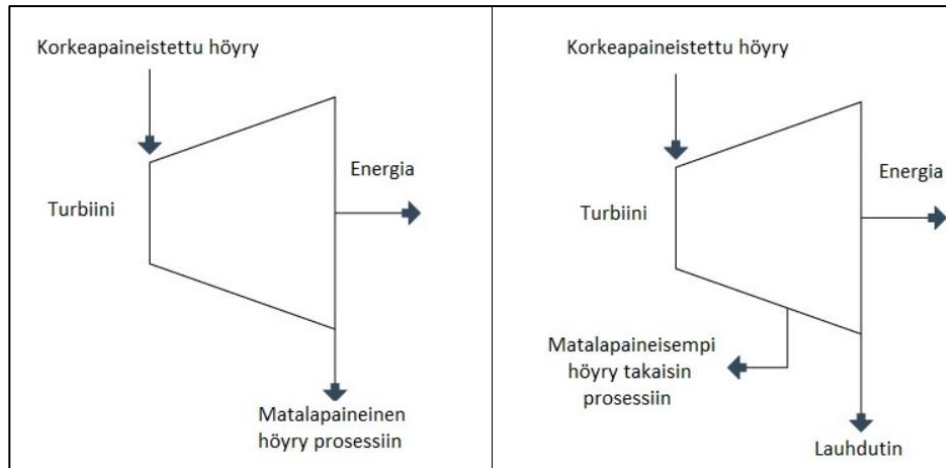


Kuva 12. Clausius-Rankine-kiertoprosessin toimintaperiaate (Kuva: Energy Solutions Center 2016).

Sekä Rankine- että Clausius-Rankine-kiertoprosesseihin perustuvissa CHP-tekniikoissa yleisimmät turbiinivaihtoehdot ovat vastapaineturbiini ja lauhdeturbiini (kuva 13). Vastapaineturbiini-tekniikkaan pohjautuvia voimalaitoksia kutsutaan yleensä myös kaukolämpölaitoksiksi. Vastapaineturbiini tuottaa sähkö- ja lämpöenergiaa, ja sen kokonaishyötysuhde on yli kaksi kertaa lauhdeturbiinia parempi (jopa 85 %), mutta sähköntuotannon hyötysuhde huomattavasti alhaisempi. (Perttula 2000, 183; Tjeder 2009, 11.)

Vastapaineturbiinin etuna on lämmön- ja sähköntuotannon suhteiden säädeltävyys. Mikäli sähkön tarve on alhainen ja lämmön tarve suuri, voidaan turbiinista väliottohöyryn määrää lisätä ja osa höyrystä ohjata kattilasta suoraan turbiinin ohi

lämmönvaihtimille. Vastapaineturbiinit ovatkin yleisesti käytössä kaukolämpölaitoksissa sekä teollisuudessa, koska lämmön ja sähkön yhteistuotanto on huomattavasti yksinomaista sähköenergian tuotantoa kustannustehokkaampaa. (Perttula 2000, 183; Tjeder 2009, 11.)



Kuva 13. Vastapaineturbiini (vas.) ja lauhdeturbiini väliotolla (Kuva: Energy Solutions Center 2016).

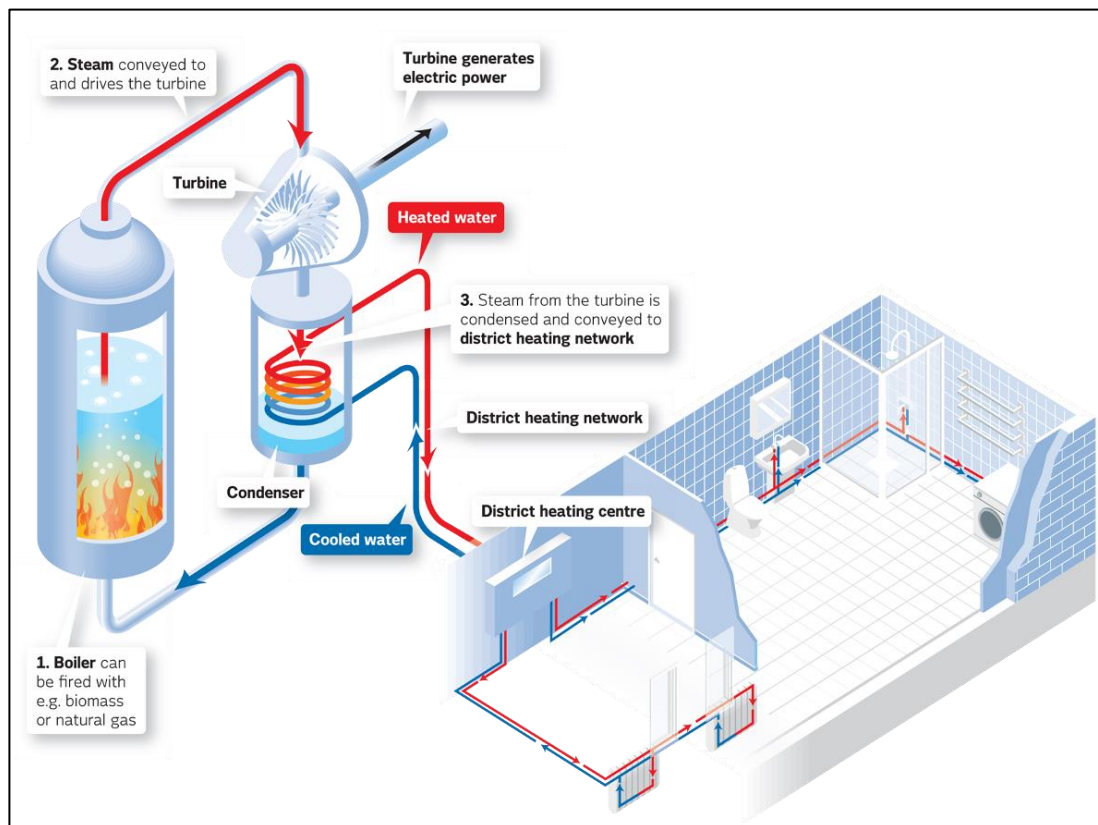
Lauhdeturbiineilla tuotetaan pelkästään sähköä mahdollisimman korkealla hyötysuhteella, ja lauhdeturbiini valitaankin usein silloin kun lämmöntarve vaihtelee voimakkaasti tai on tehontarpeeseen nähden pientä. Lauhduttimen paine pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, jotta höyryturbiinin paisunnasta tulisi mahdollisimman suurta. Turbiinissa voi olla useita väliottoja veden esilämmitystä varten ja laitoksen omakäyttötehon (esim. syöttövesipumppu) tyydyttämiseksi. (Perttula 2000, 183; Tjeder 2009, 11.)

Höyryturbiiniprosessia ei hyödynnetä toistaiseksi pien-CHP tuotannossa, sillä se on kannattavaa ainoastaan suurten voimalaitosten kokoluokassa (kuva 14) (Takalo 2013, 6–7).

**Höyrykoneissa** höyryntuotanto tapahtuu höyryturbiinien tapaan erillisessä kattilassa. Höyrykoneet voivat toimia männän mekaaniseen liikkeeseen perustuen. Yleisempänä tekniikkana kuitenkin käytetään vastapaineturbiinia, jolloin voidaan puhua vastapainevoimalaitoksesta. (Pöyry Energy Oy 2006, 10.)

Höyrykoneet soveltuvat hajautetun energiantuotannon mittakaavassa parhaiten lämpöteholtaan useiden megawattien kohteisiin (Pesola ym. 2010, 28). Höyrykoneet ovat kuitenkin höyryturbiinia taloudellisempi vaihtoehto alle 1 MW<sub>e</sub>:n laitoksissa. Tämä johtuu höyryturbiinien alhaisesta hyötysuhteesta etenkin osakuorilla. (Pöyry Energy Oy 2006, 10.) Toisaalta mikään perinteinen vesihöyrytekniikka ei ole kustannustehokas alle 1 MW<sub>e</sub>:n kokoluokassa. (Purhonen 2010, 11.)

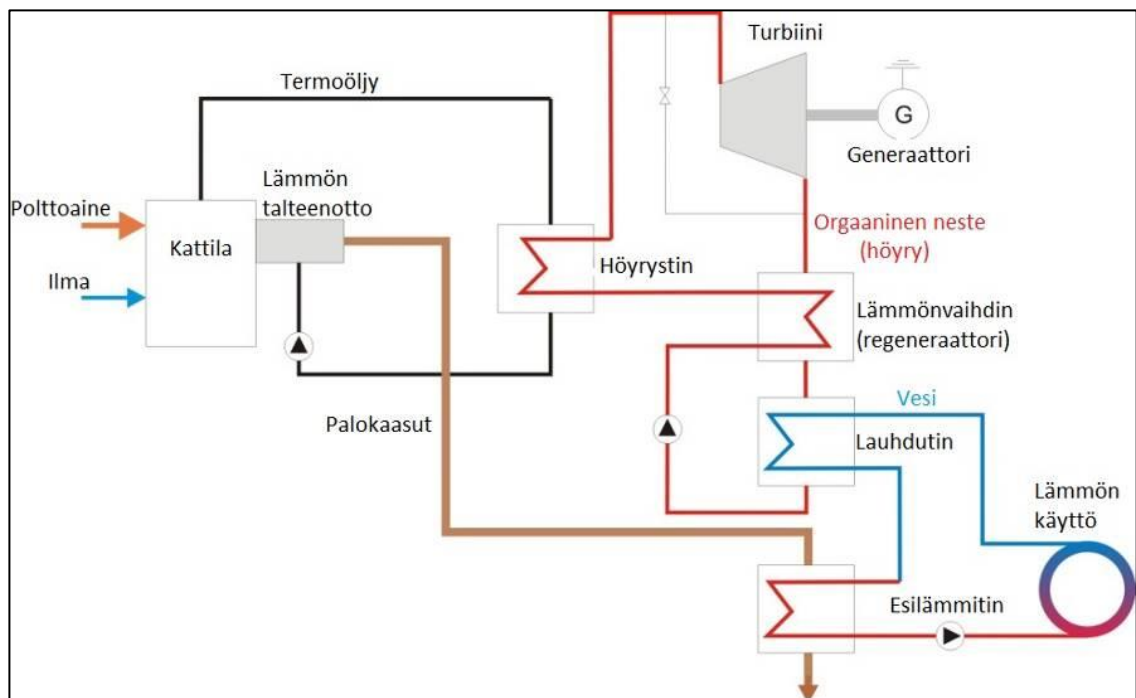
Kaikkien höyryprosessien polttoaineeksi sopii periaatteessa mikä tahansa biopohjainen tai fossiilinen polttoaine (liite 4). Yleisimpiä ovat kuitenkin kiinteät polttoaineet, kuten biomassa, kierrätyspolttoaineet, turve ja hiili. (Pöyry Energy Oy 2006, 10.)



Kuva 14. Vastapainehöyryturbiinilla toimivan kaukolämpövoimalaitoksen toimintaperiaate (Kuva: Vattenfall 2014).

### 2.3.3 Muut välittäjäaineisiin pohjautuvat tekniikat

Välittäjäainetekniikka voidaan jakaa ORC-prosessiin ja Stirling-moottoreihin. Välittäjäainetekniikkaan perustuvien prosessien toimintaperiaate pohjautuu Clausius-Rankine-prosessiin. Perinteisistä höyryturbiiniprosesseista poiketen **ORC-prosessissa** (The Organic Rankine Cycle) työaineena veden sijasta toimii alhaisemman kiehumispisteen omaava orgaaninen aine, kuten tolueeni, isobutaani tai isopentaani (kuva 15). (Hirvonen 2016.) Orgaanisen työaineen kemiallisista ominaisuuksista johtuen ORC-prosessin avulla kyetään tuottamaan sähköenergiaa huomattavasti perinteistä höyryturbiiniprosessia alhaisemmissa lämpötiloissa (350–400 °C). Tästä syystä ORC-tekniikka soveltuu erityisesti hukkalämmönlähteiden hyödyntämiseen tai osana kaasu- ja höyryturbiiniprosesseja. (Takalo 2013, 8.)



Kuva 15. ORC-kierron periaate CHP-laitoksessa (Kuva: AEE INTEC).

Toinen ORC-tekniikan etu on kompaktius. Omaan moduulinaan valmistettava ORC-yksikkö on höyryturbiinia pienempi. Yksikkö liitetään kattilaan sekä kaukolämpö- ja sähköverkkoon vasta kohteessa. (Granö 2008, 3) Säädeltävyydeltään ORC-tekniikka vastaa Clausius-Rankine-prosessia. Vastapaineturbiinin tapaan

ORC-laitoksen kuorma on säädettävissä täyttämään lämmöntarve tai maksimoimaan sähköntuotanto. Jälkimmäisen vaihtoehdon etuna on vuosittaisten käyttötuntien kasvu täydellä kuormalla. (Purhonen 2010, 12.)

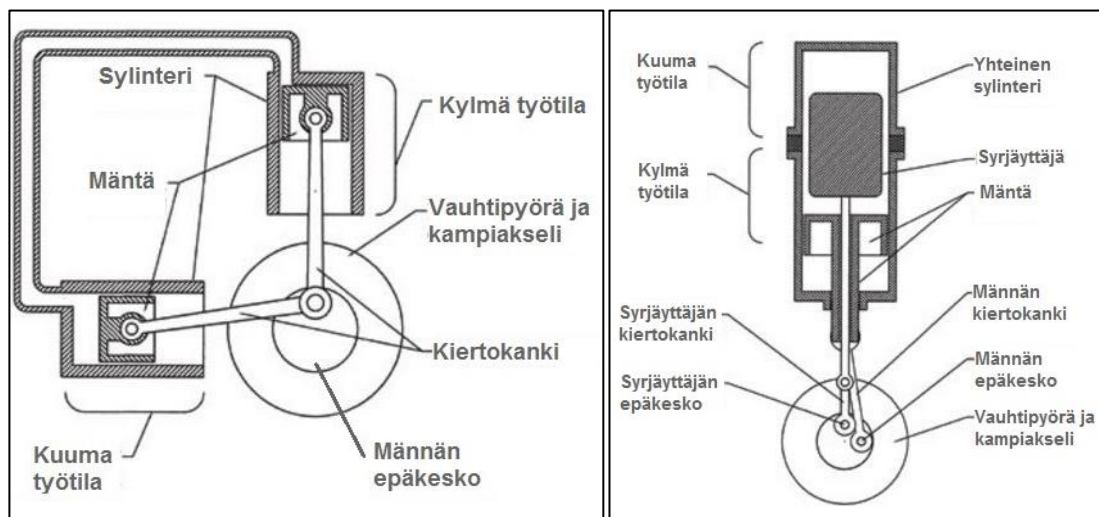
Tiedot ORC-tekniikan sähköntuotannon hyötysuhteesta verrattuna perinteisiin höyryprosesseihin vaihtelevat. Granön mukaan (2008, 3) pien-CHP kokoluokassa ORC-tekniikalla saavutetaan sähköntuotannossa höyryturbiinia korkeampi hyötysuhde, sähköntuotannon osuuden tyypillisesti ollessa 16–20 %, ja lämmöntuotannon osuuden 80–84 %. Purhonen (2010, 10) lainaa energiatekniikan kandidaatintyössään Quoilinin ja Lemortin Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems -julkaisua (2009), jonka mukaan sähköntuotannon hyötysuhde taas olisi tyypillisesti perinteisiä höyryprosesseja matalampi.

Joka tapauksessa sähköntuotannon hyötysuhde jää ORC-tekniikalla suhteellisen matalaksi, minkä takia ylimääräisen lämmön hyödyntäminen on välttämätöntä kokonaishyötysuhteen kasvattamiseksi. Lämpö on kannattavaa siirtää kaukolämpöverkkoon tai hyödyntää puuteollisuudessa raaka-aineen kuivauksessa tai muissa teollisissa prosesseissa. Muussa tapauksessa ylimääräinen lämpö joudutaan johtamaan lauhduttimen kautta vesistöön tai jäähdyttämään. (Purhonen 2010, 12.)

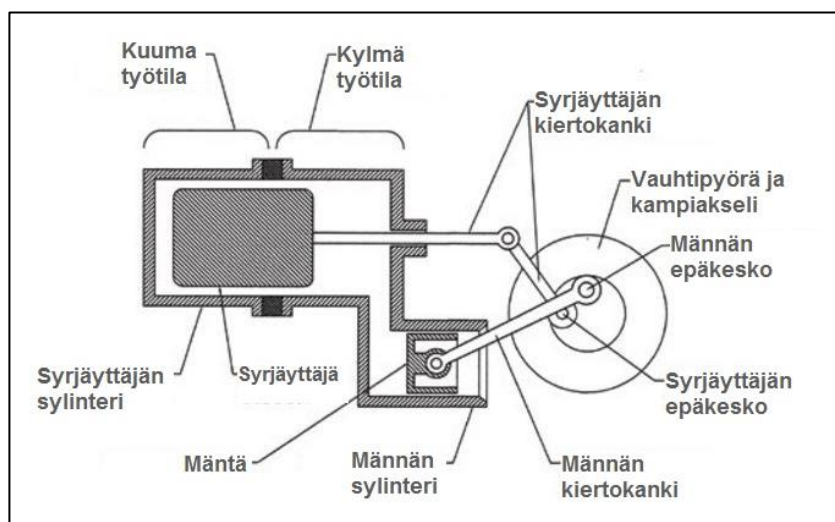
Euroopassa ORC-laitoksia on lähes 300 kappaletta. Suomeen rakennettiin vuonna 2013 ensimmäinen, ja vuonna 2014 niitä oli jo kolme. (Toholammin Energia Oy 2014.) Suurin syy uusien ORC-laitosten rakentamiseen on biomassan polttoainekäytön merkittävä lisääntyminen viime vuosikymmeninä. ORC-tekniikka on yksi taloudellisesti kannattavimmista tekniikoista alle 1 MW<sub>e</sub>:n biomassan polttoon suunnitelluissa laitoksissa. (Purhonen 2010, 10.) Toisaalta erään laitetoimittajan mukaan ORC-tekniikka ei ole kilpailukykyinen alle 300 kW<sub>e</sub>:n kokoluokassa (Haavisto 2010, 3).

ORC-prosessin yleisimpiä ongelmia ovat korroosio- ja suodatus-ongelmat sekä likaantuminen (Heikkilä & Kiuru 2014).

**Stirling-moottori** on lämpövoimakone, johon lämpö tuodaan ulkopuolisesta lämpöprosessista. Lämmöntuotantomenetelmällä ei ole merkitystä, sillä moottorin sisällä käytettävä työkaasu (ilma tai helium) ei osallistu palamiseen. Stirling-moottorissa on ns. kylmä ja kuuma työtila, joiden välillä moottorissa kaikkien työvaiheiden ajan pysyvä työkaasu liikkuu vuorotellen jäähtyen ja lämmiten. Työkaasun lämpölaajeneminen yhdessä moottorin tiivyyden kanssa aiheuttaa paineen jaksottaista vaihtelua. Männän ja sylinterin avulla paineen vaihtelu muutetaan mekaaniseksi energiaksi, joka pyörittää sähkögeneraattoria. Stirling-moottorit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään rakenteensa perusteella; Alfa-, Beta- ja Gamma-kokoonpanoihin (kuvat 16 & 17). (Takalo 2013, 8–9; Foster 2011.)



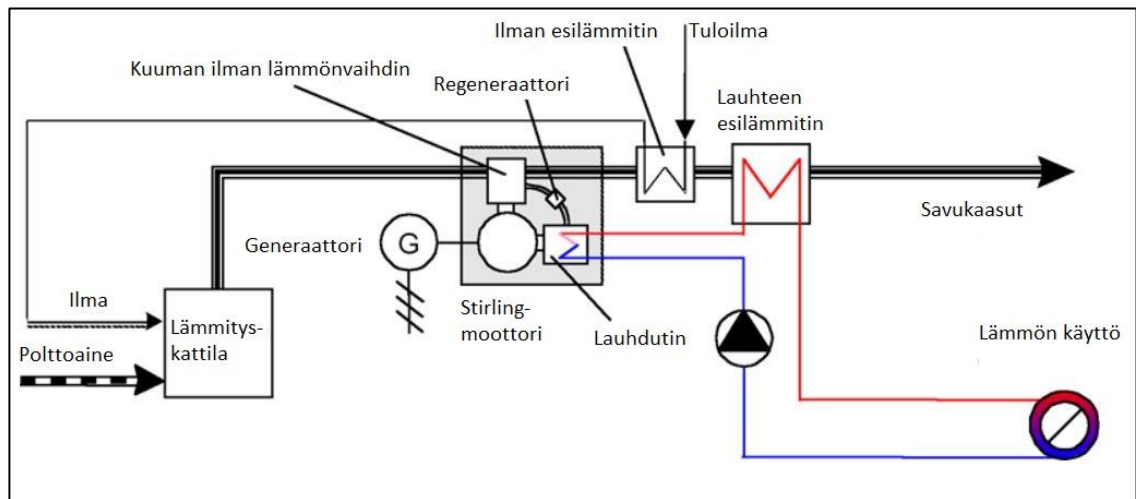
Kuva 16. Stirling-moottorin Alfa- (vas.) ja Beta-kokoonpanojen toimintaperiaate (Kuva: Foster 2011).



Kuva 17. Stirling-moottorin Gamma-kokoonpanon toimintaperiaate (Kuva: Foster 2011).

Stirling-moottoreilla on höyrykoneita korkeampi hyötysuhde ja samankokoisia otto- ja dieselmoottoreita alemmat päästöt sekä melutaso. Moottoreiden helppokäyttöisyys perustuu ulkoiseen palamiseen, mikä pidentää huoltoväliä ja mahdollistaa lähes minkä tahansa polttoaineen hyödyntämisen lämmönlähteenä. (Karjalainen 2012, 3; Vartiainen ym. 2002, 20–21.) Lisäksi Stirling-moottorit ovat mekaanisesti varmatoimintaisia, eikä moottorissa tarvita välttämättä öljyä (Hintikka 2004, 7).

Pitkä huoltoväli on erityisesti pienemmässä kokoluokassa huomattava etu. Osittain matalien huoltokustannusten ansiosta Stirling-moottorit ovat kilpailukykyisiä otto- ja dieselmoottoreiden kanssa alle 30 kW:n kokoluokassa. (Vartiainen ym. 2002, 20–21.) Tekniikkansa puolesta ne soveltuvat aina 75 kW<sub>e</sub>:n CHP-laitoksiin saakka, mutta toistaiseksi investointikustannukset nousevat verrattaen korkeiksi. (Haavisto 2010, 3.)



Kuva 18. Stirling-moottorilla toimivan CHP-laitoksen toimintaperiaate (Kuva: BIOS Bioenergiesysteme GmbH 2016).

Stirling-moottoreiden polttomoottoreita korkeampi hinta johtuu pienistä valmistuseristä eikä järjestelmän teknisestä haastavuudesta (Hintikka 2004, 7). Erityisesti biomassaa polttoaineena käyttävien järjestelmien ongelmana on ollut lämmönvaihdinpintojen likaantuminen ja siitä johtuvat ongelmat. Heliumia työaineena käytettäessä ongelmaksi on muodostunut männän tiivisteiden toiminta. (Takalo 2013, 9.) Lämmönvaihdinten likaantumisen syynä on yleensä huono polttoaine tai epätäydellinen palaminen (Hintikka 2004, 7). Likaantumista vauhdittavat myös

korkeat lämpötilat, jotka ovat edellytys sähkön tuotannon hyötysuhteen nostamiseksi riittävälle tasolle (Haavisto 2010, 3).

### 2.3.4 Polttokennot

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, jonka polttoaineena käytetään yleisimmin esimerkiksi maakaasusta reformoimalla tuotettua vetyä. Sähkö ja lämpö tuotetaan suoraan ilman palamista polttoaineen ja hapettimen kemiallisesta energiasta. (Karjalainen 2012, 7.)

Polttokennon rakenne käsittää kaksi elektrodia (katodi ja anodi), jotka erotetaan toisistaan elektrolyytillä. Toiselle elektrodille syötetään polttoainetta, kuten vetyä, ja toiselle hapettimena toimivaa happea tai ilmaa. Elektronit vapautuvat polttoaineen hapettuessa anodilla ja jatkavat siitä matkaansa virtapiirin kautta katodille, jossa ne reagoivat hapettimen kanssa. Ulkoisen virtapiirin kautta kulkiessaan elektronit synnyttävät sähkövirran. (Vartiainen ym. 2002, 22.)

Elektrolyytti on varauksen (ionit) kuljettaja, joka kuljettaa ionit elektrodilta toiselle. Polttokennoissa syntyvä reaktio on riippuvainen polttoaineesta ja elektrolyytin tyypistä. Elektrolyytin ionijohtavuudesta (positiivinen vai negatiivinen) riippuen reaktiotuotteet voivat syntyä joko katodilla tai anodilla. Elektrolyytin perusteella polttokennot voidaan jakaa happamiin ja alkalisiin. (Halinen 2007.)

Esimerkki protoninvaihtopolttokennon toiminnasta (kuva 21):

- Vety reagoi anodilla:  $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
- Protonit, elektronit ja happi reagoivat katodilla, jolloin syntyy vettä ja lämpöä:  $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
- Kokonaisuudessaan kennoreaktio:  $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ .

Halinen kuvaa VTT:n Polttokennot -julkaisussaan (2007) polttokennojen rakennetta tarkemmin seuraavasti:

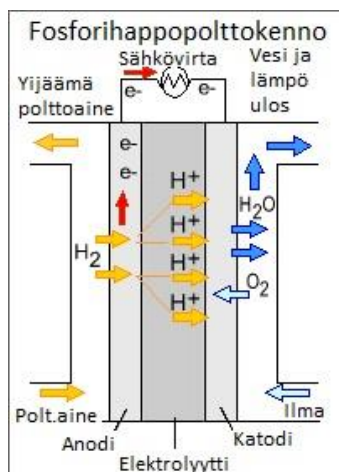
Kennostot koostuvat polttokennosta (elektrodit ja elektrolyytti), bipolaari/interconnect -levyistä sekä tiivisteistä. Elektrodien rakenteen on oltava riittävän huokoinen, jotta reaktantit ja reaktiotuotteet pääsevät



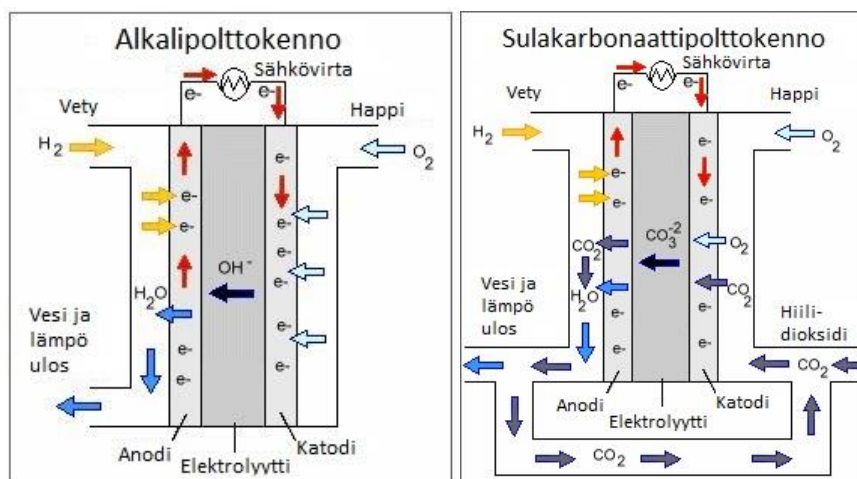
liikkumaan vapaasti. Elektrolyytin on oltava hyvä ionijohde, hyvä sähköinen eriste, kaasutiivis ja kemiallisesti stabiili. Bipolaarilevyt jakavat kaasuvirtaukset tasaisesti kennon pinnalle ja kuljettavat reaktiotuotteet pois kennosta. Tämän lisäksi ne estävät polttoaineen ja hapettimen sekoittumisen sekä kytkevät kennot sähköisesti yhteen. Tiivisteeet erottavat elektrodit ilmakehästä ja toisistaan. (Halinen 2007.)

Tärkeimmät polttokennotyypit ovat (Teräsvirta 2016.):

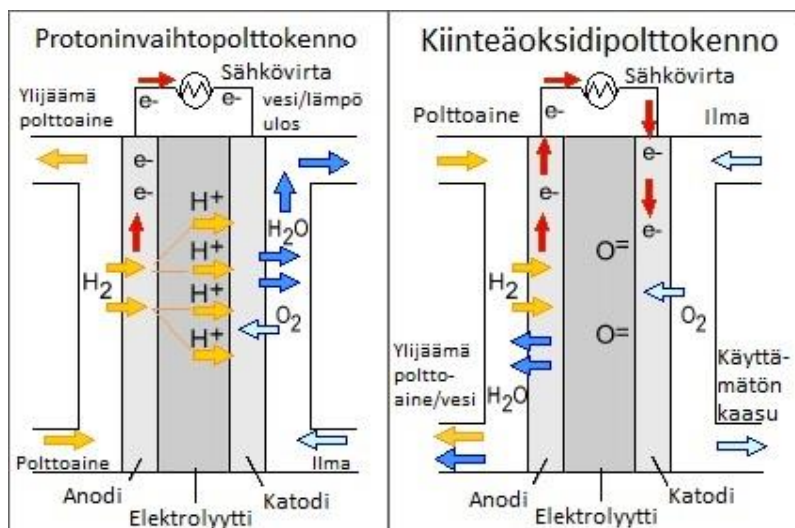
- Fosforipolttokenno (PAFC)
- Protoninvaihtopolttokenno (PEMFC)
- Alkalipolttokenno (AFC)
- Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC)
- Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC).



Kuva 19. Fosforihappopolttokennon (PAFC) toimintaperiaate (Kuva: Fuel Cell Markets).



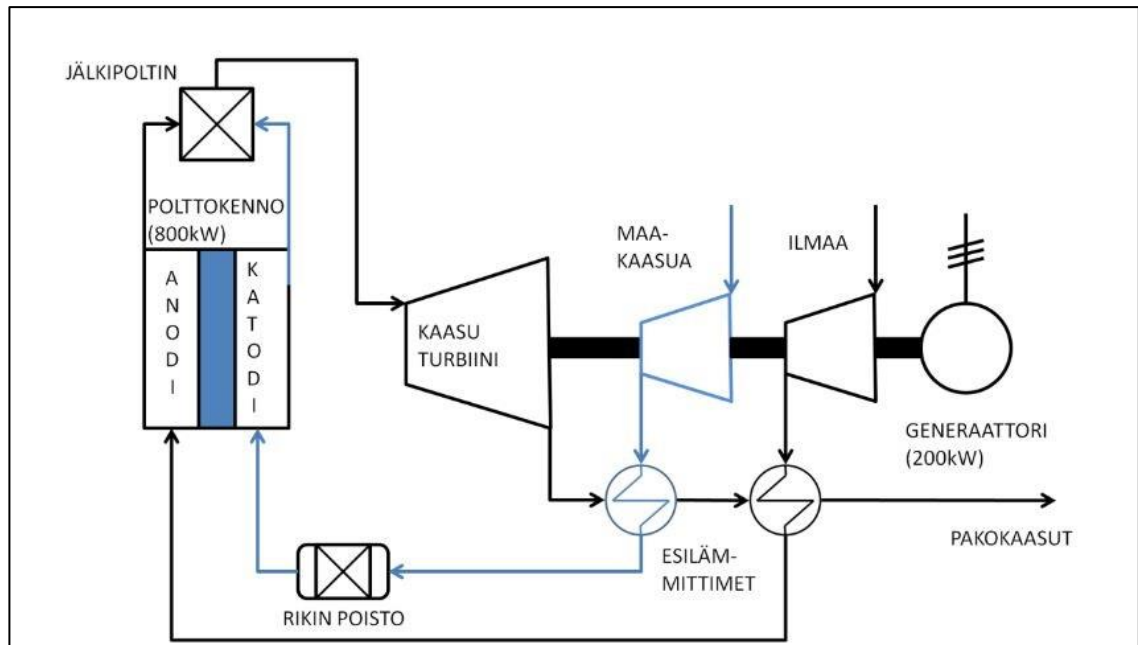
Kuva 20. Alkali- (AFC) ja sulakarbonaattipolttokennon (MCFC) toimintaperiaate (Kuva: Forbes 2013).



Kuva 21. Protoninvaihto- (PEMFC) ja kiinteäoksidipolttokennon (SOFC) toimintaperiaate (Kuva: Forbes 2013).

Polttokennojen kokoluokka vaihtelee hyvin pienistä ratkaisuista useaan megawattiin. Bioenergiaan pohjautuvassa tuotannossa niitä ei toistaiseksi hyödynnetä merkittävästi, mutta erityissovelluksissa ne ovat jo nyt kilpailukykyistä tekniikka. (Pesola, ym. 2010, 29.) Erityisesti puupohjaiseen bioenergiaan perustuvien polttokennojen kehitys on nopeaa. Puukaasua voidaan jo nyt käyttää polttokennotekniikkaan perustuvissa pien-CHP-laitoksissa. Puukaasu tosin vaatii puhdistuksen ennen polttokennosprosessia. (Granö 2008, 6.)

Polttokennoilla on korkea sähköntuotannon hyötysuhde myös osakuormalla sekä hyvä kokonaishyötysuhde pienessäkin kokoluokassa. Suuren mittakaavan voimalaitoksissa mahdollisuutena on hybridiratkaisu, jolloin kaasuturbiiniin yhdistetyn polttokennon sähköntuotannon hyötysuhteeksi voidaan saada yli 65 % (kuva 22). Lisäksi liikkuvien osien puuttuminen mahdollistavat hiljaisen toiminnan sekä pitkän käyttöiän. Päästönä polttokennosta muodostuu vetykäytössä vain vesihöyryä. (Granö 2008, 6; Halinen 2007.)



Kuva 22. Esimerkki yhdistetyn järjestelmän (polttokenno-kaasuturbiini) toimintaperiaatteesta (Kuva: Teräsvirta 2016.)

Polttokennoissa ongelmaksi muodostuvat materiaalirajoitusten lisäksi monimutkainen järjestelmä sekä vedyn kuljetus ja varastointi (Halinen 2007). Myös polttokennojen hinnat ovat toistaiseksi noin 3–5 -kertaisia kaasumootoreihin verrattuna (alimmillaan ~1 000 €/kW) (Granö 2008, 6).

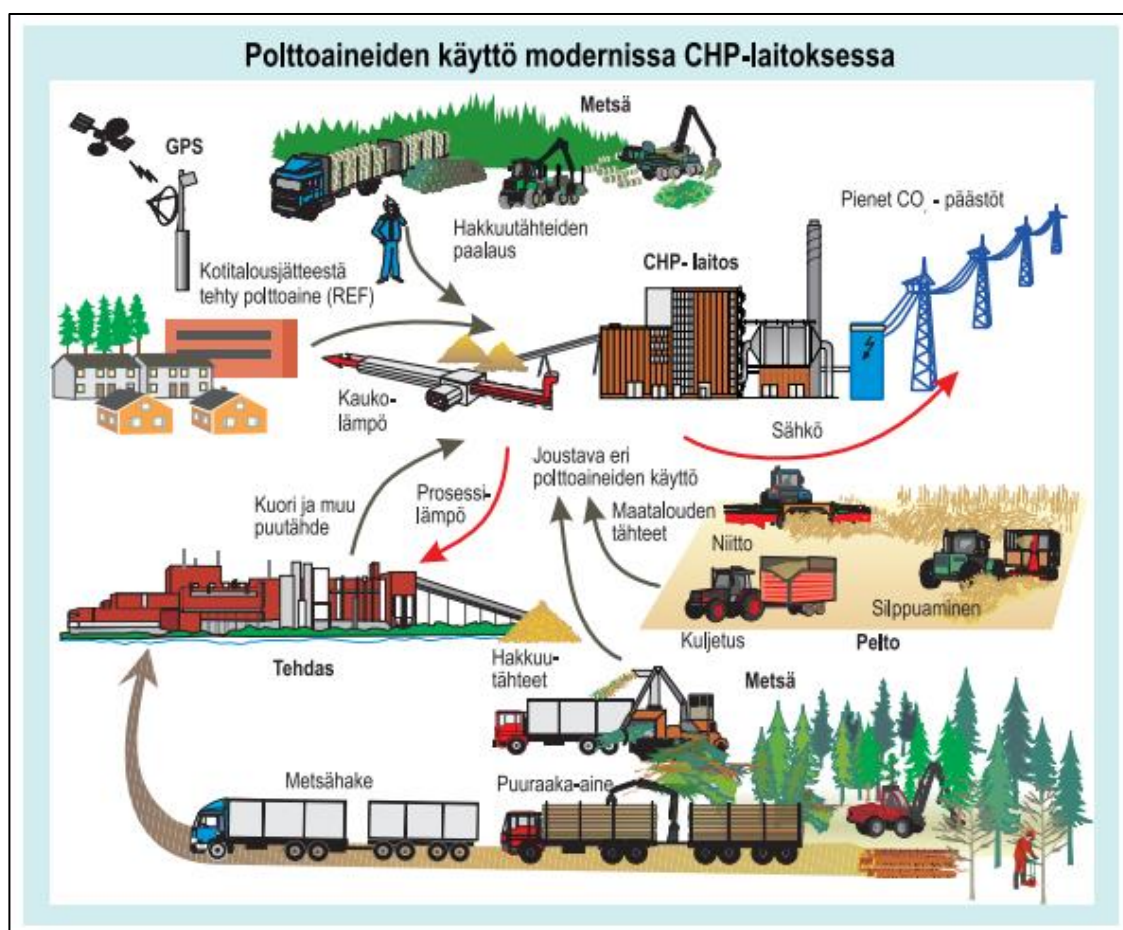
Polttokennot tulevat olemaan keskeinen osa tulevaisuuden energiaratkaisuja esimerkiksi liikenteessä ja hajautetussa energiantuotannossa. Syynä tähän ovat useiden energialähteitä hyödyntäminen sekä mahdollisuus monipuolisesti uudistaa jo olemassa olevia ratkaisuja. Lisäksi polttokennot ovat energiatehokkaita ja ympäristöystävällisiä, sekä ne luovat uutta liiketoimintaa. (Teknologiateollisuus 2017.)

#### 2.4 Kutterinlastun polttoaineominaisuudet ja käyttömahdollisuudet

Kutterinlastu on kuivan puutavaran koneellisesta höyläyksestä syntyvää puulasua ja -tähdettä. Se kuuluu tilastokeskuksen luokkaan 3124; kutterinlastut, hiontapöly ym. Kutterinlastusta voidaan käyttää myös nimitystä kutterinpuru. Kutterinlastua ei yleensä voida polttaa sellaisenaan sen kuivuudesta ja keveydestä johtuen, vaan se sekoitetaan raskaampien ja kosteampien polttoaineiden joukkoon.

Tällaisessa seospoltossa puhutaan priimaamisesta, jolla tarkoitetaan polttoaineen laadun parantamista. Lämpökeskuksissa ja metsäteollisuudessa kutterinlastua käytetään sahanpurun tavoin. (Alakangas ym. 2016, 85.)

Alhaisen kosteuden ja tuhkapitoisuuden ansiosta kutterinlastu soveltuu erinomaisesti puristeiden, kuten pellettien ja brikettien raaka-aineeksi. Kutterinlastua voidaan hyödyntää joissakin kohteissa korvaavana polttoaineena raskasöljykattiloiden poltinmodifikaation jälkeen. (Koskitukki.)



Kuva 23. Esimerkki paikallisten polttoaineiden käytöstä modernissa CHP-laitoksessa (Kuva: Hirvonen, R. (toim.) 2002).

Kutterinlastu on myös suosittu maatalouden kuivike, vaikka puuperäisten polttoaineiden kasvava käyttö saattaa nostaa hinnat korkeiksi. Kutterinlastu on kohtalaisen hyvä kuivike ja se imee kosteutta 2,0–2,5 kertaa oman painonsa verran. Puuperäisten kuivikkeiden ongelmana pidetään niissä lisääntyviä kolibakteereita sekä erityisesti virtsatie- ja haavainfektioita aiheuttavia Klebsiella Pneumoniae -sauvabakteereita. (Maatilan Pellervo, 2002.)



Kuva 24. Kutterinlastua Penttilän Puu Oy:n välivarastossa (Kuva: Toni Kortelainen 2016).

Erinäisten rautakauppojen ja verkkomyymälöiden (mm. DomusClassica 2017 & Tamminiemi) ja tarjonnan perusteella kutterinlastua käytetään edelleen puutalojen purueristyksessä sahanpurun ohella. Kutterinlastu vaikuttaa hintatietojen perusteella olevan eristyskäytössä edullinen vaihtoehto verrattuna useisiin eristysvilloihin. Eristyskäytössä kutterinlastun heikkoutena vaikuttaa olevan huonompi eristävyyskyky ja suhteessa suurempi tilantarve villoihin verrattuna, kasaan painuminen, hankala käsiteltävyys sekä paloturvallisuus.

Taulukko 1. Kutterinlastun ominaisuuksia kuorettomalle havupuulle (Alakangas ym. 2016; Metla; Koskitukki; Knuuttila (toim.) 2003).

Ominaisuus	Symboli	Yksikkö	Kutterinlastu
Kokonaiskosteus saapumistilassa	$M_{ar}$	[%]	5–15 (ilmakuiva 15–20)
Tehollinen lämpöarvo	Q	[MJ/kg]	15,0–17,0
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	$q_{p,net,d}$	[MJ/kg]	18,5–20,0
Irtotiheys	BD	[kg/m <sup>3</sup> ]	150–300
Kuivatuoretiheys		[kg/m <sup>3</sup> ]	380–480
Kostean polttoaineen tiheys		[kg/i-m <sup>3</sup> ]	80–120
Energiatiheys saapumistilassa	$E_{ar}$	[MWh/i-m <sup>3</sup> ]	0,5 (0,7–0,9)
Toimitettu energiamäärä saapumistilassa	W	[MWh/t]	> 3,0
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa	$A_d$	[p-%]	0,4–1,0
Tiiviys		[m <sup>3</sup> /i-m <sup>3</sup> ]	0,3
Öljytonnin ekvivalentti	toe	[toe]	0,043

## 2.5 Taloudelliset laskelmat

Tämän opinnäytetyön taloudellisessa tarkastelussa käytetään kannattavuuden määrittämiseksi annuiteettimenetelmää 15 vuoden investoinnin pitoajalla ja 7 %:n laskentakorkokannalla. Lisäksi selvitetään kunkin potentiaalisen ratkaisun koroton ja korollinen takaisinmaksuaika. Laskelmien valmistuttua laitevaihtoehtoja vertaillaan rinnakkain herkkyyssanalyysien avulla. Laskelmat ja vertailu suoritetaan Microsoftin Excel 2016 -taulukkolaskentaohjelmalla.

### 2.5.1 Annuiteettimenetelmä

Annuiteettimenetelmä on investointilaskentamenetelmä, jolla hankinnan kannattavuutta tarkastellaan vuositasolla. Kustannukset muutetaan koronkorkolaskun avulla yhtä suuriksi vuosikustannuksiksi ja bruttotuotot muutetaan samalla periaatteella yhtä suuriksi vuosituloiksi, eli annuiteeteiksi. (Pulkkinen 2005, 219.) Myös hankintamenot ja jäännösarvo muutetaan annuiteeteiksi. Hankintamenojen annuiteetti lisätään muihin vuosikustannuksiin, jolloin saadaan menoannuiteetti (MA). Lisäämällä mahdollinen jäännösarvon annuiteetti muihin vuosituloihin, saadaan tuloannuiteetti (TA). (Karjalainen 2005 a, 107.)

Annuiteettimenetelmä on suosittu verrattaessa investointien vuosikustannuksia keskenään, ja se sopii erityisen hyvin tapauksiin, joissa vaihtoehtojen investointiajanjaksot ovat eri pituiset. Annuiteettimenetelmän käyttö on suositeltavaa silloin, kun investointi uusitaan investointiajanjakson jälkeen (kone- ja laitehankinnat). Annuiteettimenetelmää käytettäessä voidaan hyödyntää Excelin MAKSU-funktiota, joka jakaa hankintamenot annuiteeteiksi. (Pulkkinen 2005, 221, 223, 227.)

Kertomalla hankintamenot annuiteettitekijällä ( $C_{n/p}$ ), saadaan selville investointikustannusten annuiteetti (Pulkkinen 2005, 219.):

$$k_1 = H * \frac{(1+i)^{n*i}}{(1+i)^n - 1} \quad (2.5.1a)$$

jossa

$k_1$	=	investointikustannusten annuiteetti (€)
$H$	=	hankintamenot (€)
$i$	=	laskentakorko (%)
$n$	=	jaksot (v).

Jäännösarvon jakaminen annuiteeteiksi saadaan jakamalla jäännösarvo jaksolisten suoritusten prolongaatiotekijällä ( $S_{n/p}$ ) (Pulkinen 2005, 219):

$$k_2 = \frac{J}{\frac{(1+i)^n - 1}{i}} \quad (2.5.1b)$$

jossa

$k_2$	=	jäännösarvon annuiteetti (€)
$J$	=	jäännösarvo (€)
$i$	=	laskentakorko (%)
$n$	=	jaksot (v).

## 2.5.2 Koroton takaisinmaksuaika

Investoinnin takaisinmaksuajalla ( $n^*$ ) selvitetään, kuinka monessa vuodessa investoinnin synnyttämä tulojen lisäys tai menojen säästö maksaa hankintamenot ( $H$ ) takaisin. Korottoman takaisinmaksuajan tapauksessa jäännösarvo ja laskentakorkokanta jätetään huomioimatta. Vuotuisten nettotulojen ollessa vakiot ( $S$ ) on koroton takaisinmaksuaika (Aalto University Wiki 2009):

$$n^* = \frac{H}{S} \quad (2.5.2)$$

jossa

$n^*$	=	koroton takaisinmaksuaika (v)
$H$	=	hankintamenot (€)
$S$	=	vuosittaiset nettotulot (€).

### 2.5.3 Korollinen takaisinmaksuaika

Korollisen takaisinmaksuajan laskennassa otetaan huomioon jäännösarvo sekä laskentakorkokanta. Koska korkokannan johdosta vuotuiset nettotulot (nykyarvot) eivät ole vakioita, takaisinmaksuaika saadaan selville (Kuitunen 2014, 20):

$$\sum_{t=1}^{n^*} \frac{S_t}{(1+i)^t} - H = 0 \quad (2.5.3a)$$

tai

$$n^* = \frac{H}{\frac{S}{(1+i)^t}} \quad (2.5.3b)$$

joissa

$n^*$	=	korollinen takaisinmaksuaika (v)
$t$	=	aika (v)
$i$	=	laskentakorko (%)
$H$	=	hankintamenot (€)
$S$	=	vuosittaiset nettotulot (€).



## 3 Tutkimusongelmat ja aiheen rajaus

### 3.1 Tutkimusongelmat

Opinnäytetyön tutkimusongelmat voidaan jakaa neljään ryhmään. Ensimmäinen merkittävä ongelma on polttoaineen laatu ja sen ominaisuudet. Kutterinlastu on hienojakoista ja kevyttä, joten sen polttoainekäytössä polttotekniikalla ongelmaksi muodostuvat palon rajaaminen palotilaan, kuljettaminen polttimelle, itse palaminen, ylimääräisen kutterinlastun varastoiminen sekä kuljettaminen kuorma-autolla.

Kutterinlastun energiatiheys ( $E_{ar}$ ) on niin pieni, että polttoon perustuvissa pien-CHP-ratkaisuissa kutterinlastulla ei välttämättä saavuteta riittävän korkeaa lämpötilaa. Myös kattiloiden arinapolttimelle polttoaineen kuljettaminen painovoimaisesti tai mekaanisesti voi olla ongelmallista. Rakenteensa johdosta lastua saattaa kulkeutua polttimelle epätasaisesti tai liian vähäinen määrä halutun lämpötilan saavuttamiseksi. Riskinä on myös osittain huokoisesta rakenteesta aiheutuva takatulen vaara. (Pappinen 2016.)

Vähäisen energiatheyden lisäksi polttoaineen irtotiheys (BD) voi aiheuttaa ongelmia (kuva 25). Penttilän Puu Oy:llä ylimääräistä kutterinlastua säilötään avoimessa välivarastossa, mikä voi aiheuttaa tuulisella kelillä polttoaineen leviämistä tontille. Myös ylimääräisen kutterinlastun myyntiin kuljettaminen kuorma-auton laivalla on tehotonta ja kallista verrattuna kiinteämpiin polttoaineisiin. Välivarastoinnista ja ylimääräisen kutterinlastun tehottomasta kuljettamisesta olisi mahdollista päästä eroon pelletöinnillä tai CHP-järjestelmällä, joka käyttää höyläämön koko sivuvirran energiantuotantoon.

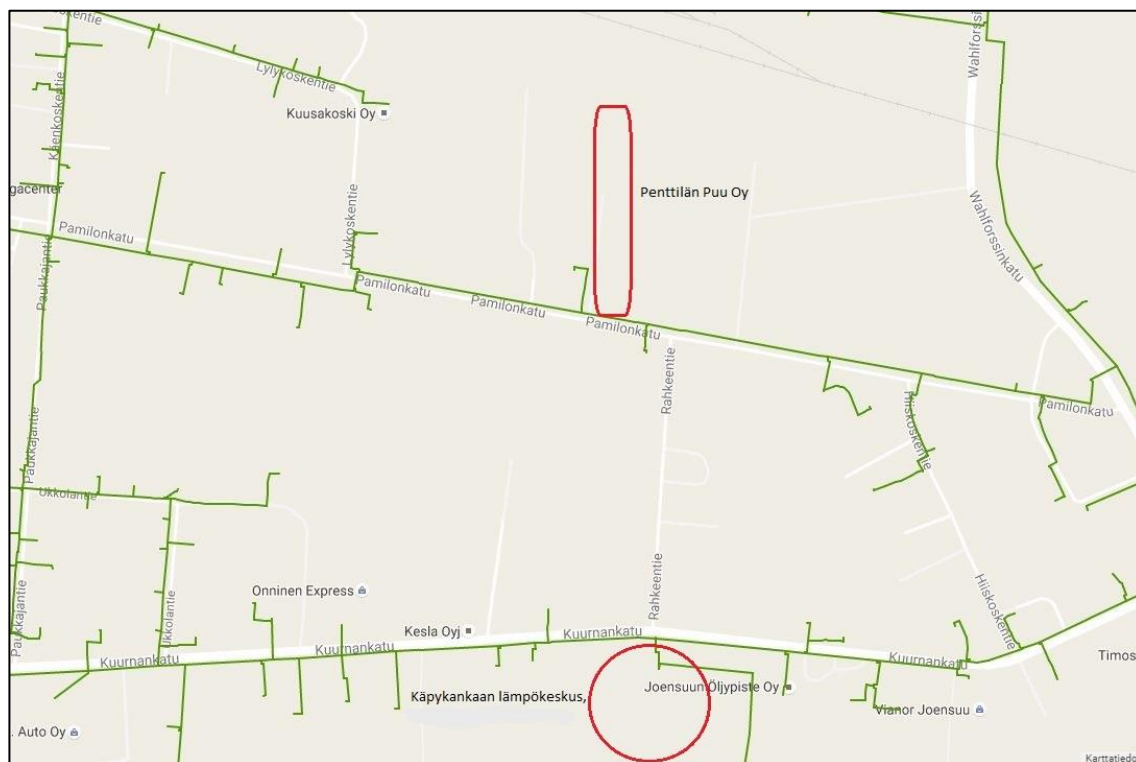


Kuva 25. Lähikuva kutterinlastun rakenteesta Penttilän Puu Oy:n välivarastolla (Kuva: Eetu Pietarinen 2017).

Toinen suuri ongelma on tontin pieni koko sekä kattilahuoneen ahtaus. Penttilän Puu Oy:n käytössä on 1,2 ha:n tontti, joka on nykyiselläänkin ahdas. Tontin lisäksi rajoitteita asettaa kattilahuoneen pieni koko, joka pakottaa harkitsemaan CHP-laitosten osalta konttiratkaisua. Lisää tietoa tontista luvussa 4.1.2.

Kolmanneksi ongelmaksi muodostuu lämmön käyttö kesäkuukausina sekä mahdollinen lämmön ja sähkön myynti CHP-ratkaisuissa. Mahdollisuudet lämmön myymiselle lämpöverkkoon ovat olemattomat. Salpakankaan teollisuusalueella sijaitsevan Penttilän Puu Oy:n lähistöllä sijaitsee kaukolämpöverkon lämpölaite. Lämpökartan (kuva 26) perusteella lämpöverkko kattaa koko teollisuusalueen. Penttilän Puu Oy:n kattilahuoneessa on liitosmahdollisuus viereisen tontin konevuokraamon lämmöntarpeen kattamiseksi. Yhteys katkaistiin aikoinaan, koska Penttilän Puu Oy ei voinut vastata lämmön kysyntään. Nykyään konevuokraamo on lämpöverkon asiakas, joten lämmön myymisen mahdollisuudet yritykselle ovat vähäiset. Vaihtoehtona lämmönmyynnille on tarjota lämpöä toiselle naapurille,

betonialan yritykselle. Oletusarvona kuitenkin on, että tämän yrityksen tarpeet ovat korkealämpötilaisemmassa prosessilämmössä.



Kuva 26. Käpykankaan teollisuusalueen lämpökartta (Kuva: Fortum 2017).

Neljäntenä ongelmana on pien-CHP-laitteiston käyttövarmuus verrattuna perinteiseen biolämmityskattilaan. Pien-CHP mittakaavassa joillakin tekniikoilla suoritetaan edelleen koeajoja. Esimerkiksi Karelia-ammattikorkeakoulun Sirkkalan Energiapuisto-hankkeessa on törmätty sähköntuotannollisiin ongelmiin saarekekäytössä. Sirkkalan Energiapuistossa on käytössä Volter Oy:n 140 kW kaasutiinikaasumoottori kokonaisuus. Generaattorin sähköntuotannossa oli syksyllä 2016 ongelmia, mistä aiheutui valtakunnan verkkoon myytäväksi liian heikkolaatuisen sähkön tuotanto. Valtakunnanverkkoon syötetty sähkö jouduttiin käsittelemään sähköverkon haltijan toimesta. Käsitteily kustansi enemmän, kuin mitä sähköstä pientuottajalle maksettu korvaus oli, joten sähkön myyminen verkkoon oli laitteistovian takia tappiollista. (Kokkonen 2016.)

## 3.2 Tutkimusmenetelmät

Tämän opinnäytetyön merkittävin tutkimusmenetelmä on tiedonhankinta kirjallisista lähteistä. Suurin osa ajantasaisista pien-CHP-tekniikkaan liittyvistä lähteistä löytyy vain verkkojulkaisuina teknologioiden jatkuvasta kehityksestä johtuen. Painettua kirjallisuutta on hyödynnetty pääasiassa pien-CHP-tekniikoiden perustana toimivien, vakiintuneiden prosessien kohdalla. Näistä esimerkkinä lämpövoimaprocessit sekä perinteinen energiatekniikka.

Penttilän Puu Oy:n yrityskohtaiset tiedot on hankittu haastatteluilla vierailun yhteydessä, puhelimitse ja sähköpostilla. Vierailujen yhteydessä muistiinpanojen lisäksi aineistoa on kerätty valokuvaamalla. Samoja menetelmiä on hyödynnetty potentiaalisten laitevalmistajien ja maahantuojien kanssa. Kaikille opinnäytetyössä esiteltäville yrityksille on lähetetty sähköpostilla yhteydenottopyyntö, jossa on lyhyesti esitelty lähtötilanne ja laitteiston tarve. Yhden yrityksen kohdalla sähköpostiviesti korvattiin yrityksen verkkosivulta löytyvällä yhteydenottopyyntö-lomakkeella. Sähköpostin saaneista yrityksistä kolme vastasi yhteydenottopyyntöön. Loppuihin yrityksiin otettiin uudestaan yhteys soittamalla noin kuukausi sähköpostiviestin lähettämisen jälkeen.

Muita tiedonkeruu menetelmiä olivat asiantuntija haastattelut, vierailu yhden laitevalmistajan konepajalla, Karelia-ammattikorkeakoulun ympäristötekniikan BIYNS13-vuosiryhmän kanssa suoritettu vierailu Sirkkalan Energiapuistoon sekä Karelia-amk:n Sirkkalan laboratoriossa suoritettu polttoaineanalyysi. Opinnäytetyö on kirjoitettu puhtaaksi Microsoft Word tekstinkäsittelyohjelmalla. Taloudelliset laskelmat sekä kuvaajat on tehty Microsoft Excel-taulukkolaskentaohjelmalla.

## 3.3 Aiheen rajaus

Tietoperustan teknologiatarkastelussa on käyty läpi kaikki yleisimmät puupolttoaineille soveltuvat pien-CHP-tekniikat, mutta taloudellinen tarkastelu on suoritettu kotimaisten laitevalmistajien tarjoamien laitteiden pohjalta. Laitevaihtoehtoja ovat

rajanneet kokoluokka, puupohjainen polttoaine ja sen rakenne, sekä teknologian valmiusaste (TRL).

Penttilän Puu Oy:n tontin ahtaus ja kattilahuoneen rajallinen koko rajaa suurimman osan vaihtoehdoista pois. Yksikään pien-CHP ratkaisu ei mahdu kattilahuoneeseen, johon kohdeyritys uuden laitteiston toivoo sijoitettavan (kuva 27). Useimmat pien-CHP-tekniikat on mahdollista saada myös konttiratkaisuna, mutta tilan puute tontilla estää myös konttiratkaisun. Tästä huolimatta pien-CHP-tekniikoita ei ole rajattu taloudellisten tarkastelujen ulkopuolelle.



Kuva 27. Penttilän Puu Oy:n kattilahuone ja sen päällä oleva polttoainesäiliö (Kuva: Toni Kortelainen 2017).

Lämmönmyynti on rajattu kokonaan taloudellisen tarkastelun ulkopuolelle. Teoreettiset mahdollisuudet lämmön myymiselle esimerkiksi Lakan Betoni Oy:lle on olemassa, mutta opinnäytetyön tekovaiheessa asia on vielä avoinna. Tuotetun ylimääräisen sähkön myyminen on rajattu koskemaan verkkoon myyntiä.

Taloudellinen tarkastelu suoritetaan tarjousten pohjalta parhaiten Penttilän Puu Oy:n tarpeita vastaavien laitteistojen välillä. Vertailu on jaettu kolmeen kategoriaan. A vaihtoehto on nykyisen lämmityskattilan korvaaminen uudella 500 kW:n biokattilalla ja -polttimella. Vaihtoehto B on nykyisen lämmityskattilan korvaaminen pien-CHP-laitoksella. Laitteistoksi valitaan tarjousten joukosta CHP-laitos, jonka sähkö- ja kokonaisteho vastaa parhaiten Penttilän Puu Oy:n Joensuun höylälämmön tarpeita. Vaihtoehto C on suurempi CHP-laitos, jolla pystytään tuottamaan sähkö sekä Joensuun että Hammaslahden höylälämmöiden tarpeisiin. Vaihtoehdon C edellytyksenä on sähkön nettolaskutus.

## 4 Tutkimuksen toteutus

### 4.1 Lähtötilanne

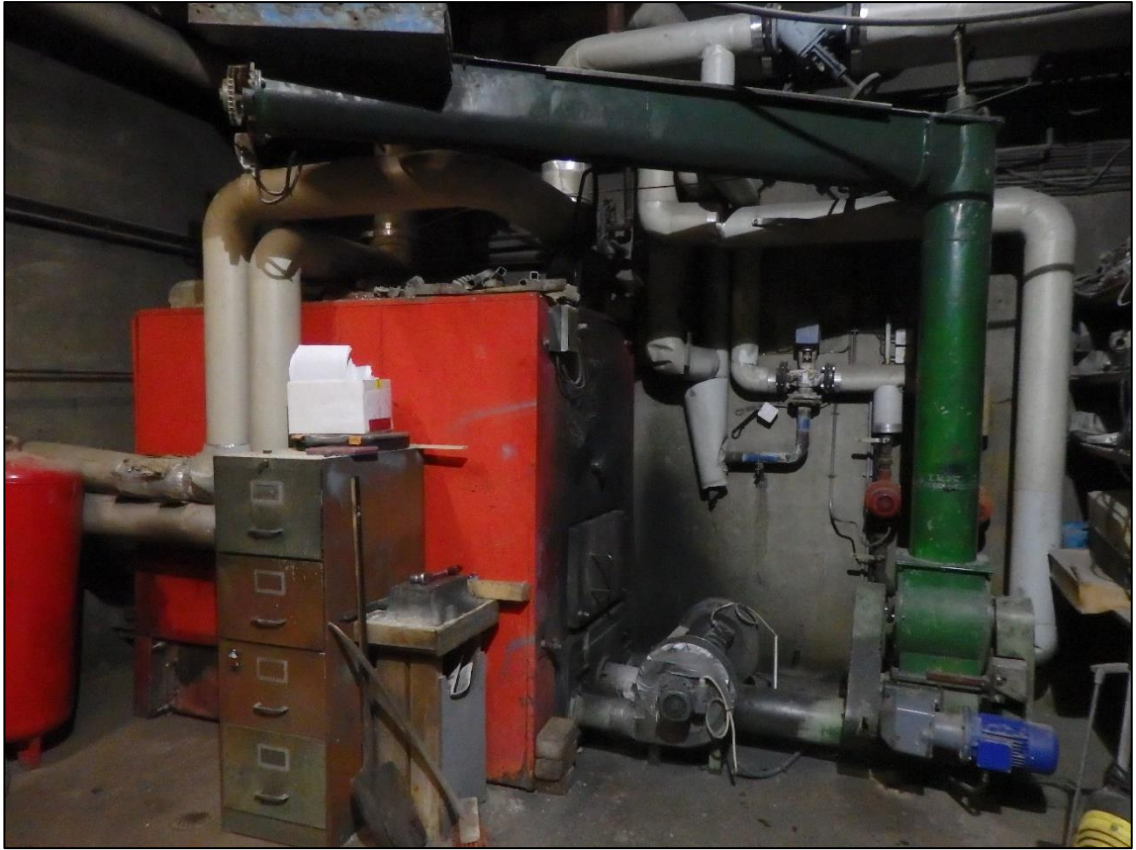
#### 4.1.1 Lämmitys- ja varalämmitysjärjestelmät

Penttilän Puu Oy:n nykyinen järjestelmä on automaattisella ruuvisyötöllä varustettu Kattilahitsaus Oy:n TULI 500 kW (tyyppinumero 1324) -arinakattila (kuva 28). Polttoaineen syöttö tapahtuu syöttöruuvilla, joka kuljettaa polttoaineen kattilan keskustaana jatkuvana virtana ns. päätösyöttönä. Kattilan keskiosassa polttoaine palaa arinalla. Kattilassa on puhaltimet primääri- ja sekundääri-ilmalle. Lämmityskattila ja syöttöruuvi ovat olleet toiminnassa valmistusvuodesta 1981 alkaen. Keskimäärin vastaavien lämmityskattiloiden käyttöikä on Pesolan (Pesola ym. 2010, 26.) mukaan 20–30 vuotta vähäisemmälläkin rasiuksella. Kattilan iän ja mittausdatan puutteen vuoksi hyötysuhteen ja todellisen tuotetun lämpötehon määrää on hankala arvioida.

Nykyinen keskuslämmityskattila tuottaa lämpöä ja kuivausilmaa Joensuun höyläämöllä vuoden jokaisena tuntina. Kattilan sisäinen paine on 0,5 baaria. Kattilalla lämmitettävä vesi kuumenee maksimissaan 100 °C:n lämpötilaan ja kuivausilma maksimissaan 70 °C:een. Lämmityskattilan verkostokytkennät on toteutettu suoralla kytkennällä, eli sama vesi kiertää kiinteistön pattereissa, verkostossa sekä lämmityskattilassa.

Lämmityskattilan kokoluokka ei edellytä järjestelmän aktiivista valvontaa, vaan seuranta tapahtuu etähallintaohjelmiston avulla matkapuhelimella. Mahdolliset viikahälytykset tulevat matkapuhelimeen tekstiviestinä tai internetin välityksellä tietokoneelle.

Hälytyksiä voi tulla polttoaineen syötöstä, savukaasun lämpötilasta ja menovedestä. Lisänä voi olla vesivuoto-, tulipalo-, polttoainemäärä- tai kiertovesipumpun hälytys. Hälytykset voidaan porrastaa vakavuutensa perusteella. (Puhakka ym. 2001, 37.)



Kuva 28. Penttilän Puu Oy:n nykyinen lämmityskattila ja polttoaineen syöttöruuvi (Kuva: Eetu Pietarinen 2017).

Höyläämörakennuksessa muodostuva kutterinlastu kuljetetaan paineilmatoimintaisilla siirtimillä polttoainesiihloon sekä avoimeen välivarastoon. Erillisen kattila-huoneen yläpuolella sijaitsevaan polttoainesiihloon ohjataan omaan käyttöön tarvittava määrä kutterinlastua ja välivarastoon loput, eli myyntiin menevä määrä. Siilon pohja on yhteydessä kuljetinruuviin, joka kuljettaa polttoon menevän kutterinlastun kattilan palotilaan. Kattilassa palaa arviolta 47 i-m<sup>3</sup> kutterinlastua päivittäin. Myyntiin menevä välivarastoon siirrettävä kutterinlastun määrä on noin 54 i-m<sup>3</sup>, eli rekkalastillinen päivässä.

#### 4.1.2 Tontti ja tilat

Penttilän Puu Oy sijaitsee 3,0 hehtaarin tontilla, josta 1,2 ha on Penttilän Puu Oy:n käytössä. Tontti on melko pieni liiketoiminnan mittakaavaan suhteutettuna. Tontille ei mahdu uusia rakennuksia ilman nykyisten rakennusten purkamista tai



rekareittien muokkaamista. Tontin lisäksi rajoitteita asettaa nykyinen kattilahuone, jonka mitat ovat 5 x 5 m ja korkeus 3,7 m (huoneen päällä sijaitseva polttoainesäiliön kohdalta 2,7 m). Yrityksellä ei ole kiinnostusta infrastruktuurin pysyvään muokkaamiseen tai kattilahuoneen laajentamiseen. Tontilla sijaitsevat rakennukset käsittävät toimistotilat, kattilahuoneen, höyläämön, kuivaushuoneen, höylätavaran avokatoksen, kutterinlastun välivaraston sekä raaka-aineen varastoinnin.



Kuva 29. Ortokuva Penttilän Puu Oy:n rajatusta tontista (Kuva: Paikkatietokuna 2016).

#### 4.1.3 Sivuvirran määrä ja ominaisuudet

Joensuun höyläämöllä raaka-aineena toimii pelkästään kuusi. Sivuvirtana muodostuu 37 000 i-m<sup>3</sup> (3 750 t) kutterinlastua vuodessa, josta omaan käyttöön kuluu arviolta noin 46 % (taulukko 2).

Taulukko 2. Joensuun höyläämöllä muodostuvan kutterinlastun määrä ja käyttö vuosittain.

<b>Kutterinlastu</b>		<b>Yksikkö</b>
Määrä vuodessa	37 000	i-m <sup>3</sup>
	11 100	m <sup>3</sup>
	3 750	t
Omaan käyttöön	17 267	i-m <sup>3</sup>
	1 750	t
Myyntiin	19 733	i-m <sup>3</sup>
	2 000	t

Sivuvirran energiatiheyden ( $E_{ar}$ ) selvittäminen aloitettiin ottamalla 10 näytettä Joensuun höyläämön välivarastossa olevasta kutterinlastukasasta. Näytteiden avulla voidaan määrittää kutterinlastun kosteus ( $M_{ar}$ ) uunikuivausmenetelmällä. Näytteenotossa noudatettiin VTT:n Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia -julkaisun (Alakangas ym. 2016, 43) ohjeita manuaalisesta näytteenotosta pienestä polttoainekasasta. Näytteenotossa avusti Karelia-amk:n BIYNS13-vuosiryhmän opiskelija Eetu Pietarinen. Näytteenotto suoritettiin 21.2.2017.

Näytteet otettiin kasasta kolmesta eri korkeudesta puolen metrin syvyydestä (kuva 30). Näytteiden ottamista vältettiin kasan pohjalta sekä huipulta, sillä hienojakoisempi aines saattaa kerääntyä pohjalle jättäen karkeimman materiaalin huipulle. Näytteitä ei myöskään otettu kasan pinnalta. Kasan pintakerros altistuu herkemmin sääolosuhteille, kuten kosteudelle, jolloin pinnasta otettu näyte saattaa vääristää testitulosta.



Kuva 30. Näytteenottopisteet välivaraston kutterinlastukasasta (Kuva: Toni Kortelainen 2017).

Näytteet otettiin puhtaalla lapiolla, jolla ne laitettiin numeroituihin 2 litran Minigrip-pusseihin. Jokainen näyte oli noin 1,5 litraa. Näytteenoton jälkeen näytteet kuljettiin välittömästi Karelia-ammattikorkeakoulun Sirkkalan laboratorioon. Laboratoriossa näytteiden mukaan numeroidut näyteastiat punnittiin ensin tyhjänä. Tämän jälkeen astiat täytettiin astian numeroa vastaavalla näytteellä ja punnittiin uudelleen (kuva 31). Vähentämällä astian paino yhteispainosta saatiin selville

näytteen tuorepaino. Punnitseminen suoritettiin Precisa XB 3200C -digitaalivaakaalla. Näytteiden käsittelyä sekä kosteuden määrittämistä valvoi ja ohjasi Karelia-ammattikorkeakoulun projektiasiantuntija Simo Paukkunen.



Kuva 31. Polttoainenäytteet näyttenumeroa vastaavissa astioissa (Kuva: Toni Kortelainen 2017).

Punnitut näytteet laitettiin Kottermann 2716 -kuivausuuniin. Näytteitä pidettiin +100 °C:ssa 20 tuntia (kuva 32). Tämän jälkeen näytteet otettiin uunista yksi kerrallaan ja punnittiin uudelleen. Polttoaineen kuiva-aineen määrä saatiin selville vähentämällä tyhjän astian paino uunista otetun näytteen kokonaispainosta. Vertaamalla tuoreiden näytteiden painoa uunissa kuivattuihin näytteisiin, saatiin selville polttoaineen kosteusprosentti. Kymmenen näytteen kosteusprosenttien keskiarvoksi saatiin 11,21 p-% (liite 6).

Näytteiden ollessa uunissa suoritettiin neljä pika-analyysiä Precisa XM 50 -kosteusmittausvaakaalla. Tuloksia voi käyttää vertailuarvona uunissa kuivattujen näytteiden kosteudelle. Pika-analyysin tulokset myös liitteessä 6.



Kuva 32. Polttoainenäytteet Kottermann 2716 -kuivausuunissa (Kuva: Toni Kortelainen 2017).

Määritetyn kosteusprosentin avulla pystytään selvittämään polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa ( $Q$ ) seuraavalla kaavalla:

$$Q = q_{p,net,d} \times \left( \frac{100 - M_{ar}}{100} \right) - 0,02443 \times M_{ar} \quad (4.1.3a)$$

jossa

$q_{p,net,d}$  = tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa  
(puupolttoaineilla 19,00 MJ/kg)

$M_{ar}$  = kosteus saapumistilassa (uunikuivausmenetelmällä  
määritetty 11,21 p-%)

0,02443 = höyrystymisen entalpiain korjauskerroin vedelle +25  
°C lämpötilassa.

Energiatiheyden ( $E_{ar}$ ) selvittämiseksi tarvitaan tehollisen lämpöarvon saapumistilassa ( $Q$ ) lisäksi irtotiheys ( $BD_{ar}$ ). Irtotiheys on selvitetty Penttilän Puu Oy:ltä saatujen tietojen perusteella. Vuosittainen sivuvirran määrä kiloina (3 750 000

kg) jaetaan sivuvirran irtokuutio määrällä (37 000 i-m<sup>3</sup>). Tämän jälkeen energiatiheys voidaan selvittää:

$$E_{ar} = Q \times BD_{ar} \quad (4.1.3b)$$

jossa

$$Q = \text{tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (16,60 MJ/kg)}$$

$$BD_{ar} = \text{irtotiheys (101,35 kg/i-m}^3\text{)}.$$

Penttilän Puu Oy:n Joensuun höyläämön sivuvirran energiatiheys on 1682 MJ/i-m<sup>3</sup>, eli 0,47 MWh/i-m<sup>3</sup> (taulukko 3).

Taulukko 3. Joensuun höyläämön kutterinlastun laskennallisia ominaisuuksia Alakangas ym. 2016 pohjalta.

Ominaisuus	Symboli	Yksikkö	Kutterinlastu
Kokonaiskosteus saapumistilassa	M <sub>ar</sub>	[p-%]	11,21
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	Q	[MJ/kg]	16,60
		[kWh/kg]	4,61
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	q <sub>p,net,d</sub>	[MJ/kg]	19,00
Irtotiheys saapumistilassa	BD <sub>ar</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	101,35
Energiatiheys saapumistilassa	E <sub>ar</sub>	[MJ/i-m <sup>3</sup> ]	1 682,05
		[kWh/i-m <sup>3</sup> ]	467,24
		[MWh/i-m <sup>3</sup> ]	0,47
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa	A <sub>d</sub>	[p-%]	0,4–1,0
Tiiviys		[m <sup>3</sup> /i-m <sup>3</sup> ]	0,3
Öljytonnin ekvivalentti	toe	[toe]	0,043
Myyntihinta		[€/i-m <sup>3</sup> ]	9,00

Kertomalla energiatiheys (E<sub>ar</sub>) sivuvirran määrällä, saadaan selville vuosittain muodostuvan sivuvirran sisältämä energian määrä (taulukko 4).

Taulukko 4. Joensuun höyläämöllä muodostuvan sivuvirran sisältämä energian määrä vuodessa.

			Osuus [%]
Koko sivuvirta	17 287,75	MWh	100 %
Omaan käyttöön	8 067,77	MWh	47 %
Myyntiin	9 219,98	MWh	53 %

Itsekuormatun kutterinlastun hinta Penttilän Puu Oy:ltä on 8–10 €/i-m<sup>3</sup>. Tällöin myyntiin menevän kutterinlastun tuotto on vuosittain noin 160 000–200 000 €.

Kutterinlastun lämpöarvo on tarkoitus selvittää pommikalorimetrin avulla opinnäytetyön valmistumisen jälkeen, heti kun tarvittavat osat laitteeseen ovat saapuneet Karelia-amk:n laboratorioon.

#### 4.1.4 Lämmönkulutus

Määritetyn kosteuden ja VTT:n Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia -julkaisun (Alakangas ym. 2016) tietojen pohjalta polttoainetta kulutetaan noin 8 068 MWh<sub>th</sub>:n edestä Joensuun höyläämöllä vuosittain. Varalämmitysjärjestelmänä käytettävä öljykattila kuluttaa 1 000 litraa öljyä vuodessa, eli sen energiasältö on noin 10 MWh<sub>th</sub> vuodessa.

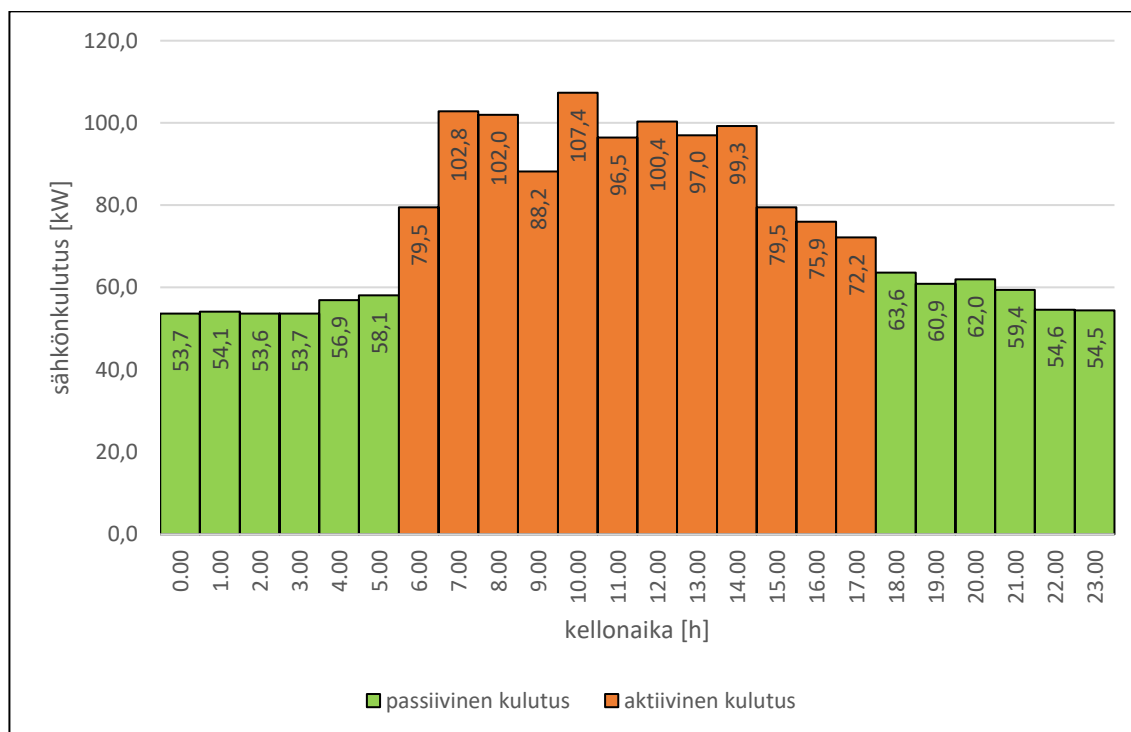
Lämmityskattilan ja öljykattilan yhdessä muodostaman lämmöntuotannon perusteella Penttilän Puu Oy:n lämmönkulutus on 8 078 MWh<sub>th</sub> vuodessa. Todellinen lämmönkulutus on huomattavasti alhaisempi, sillä nykyisten kattiloiden hyötysuhteet eivät ole tiedossa. Myös kutterinlastun todellinen tehollinen lämpöarvo voi poiketa hivenen VTT:n ilmoittamasta keskiarvosta. Penttilän Puu Oy:n ilmoittaman polttoaineen kulutusmäärän perusteella nykyisen arinakattilan hyötysuhteeksi muodostuu vain 53,7 %, vaikka lämpöä tuotettaisiin kattilan nimellisteholla ympäri vuoden (8 760 h/a).

Laskelmissa lämmön tarpeena käytetään kuitenkin 4 400 MWh<sub>th</sub> vuodessa, mikä on hieman nykyisen kattilan nimellisteholla ja 8 760 tunnin huipunkäyttöajalla tuotettua lämpö määrää suurempi arvo. Tämä perustuu Penttilän Puu Oy:n toimitusjohtajan arvioon siitä, että mahdollinen uusi kattila voisi olla nykyistä suurempi.

#### 4.1.5 Sähkönkulutus

Joensuun ja Hammaslahden höyläämöiden sähkönkulutuksen keskiarvo on laskettu vuoden 2016 maaliskuun ja joulukuun sähkönkulutusprofiileiden perusteella. Kummastakin kulutusprofiilista valittiin yhteensä 15 arkipäivää, joiden poh-

jalta on selvitetty tuntikohtaiset keskiarvot. Joensuun osalta keskkulutus on laskettu arkipäivien kello 6.00 ja 18.00 väliseltä ajalta. Joensuun höyläämöllä työskennellään kahdessa vuorossa ja sähkönkulutuksen piikki osuu aamu ja ilta kuuden välille. Vuorokauden muina tunteina ja viikonloppuisin pohjakuormasta vastaa toimistolaitteet sekä kuivurit (kuvio 1).



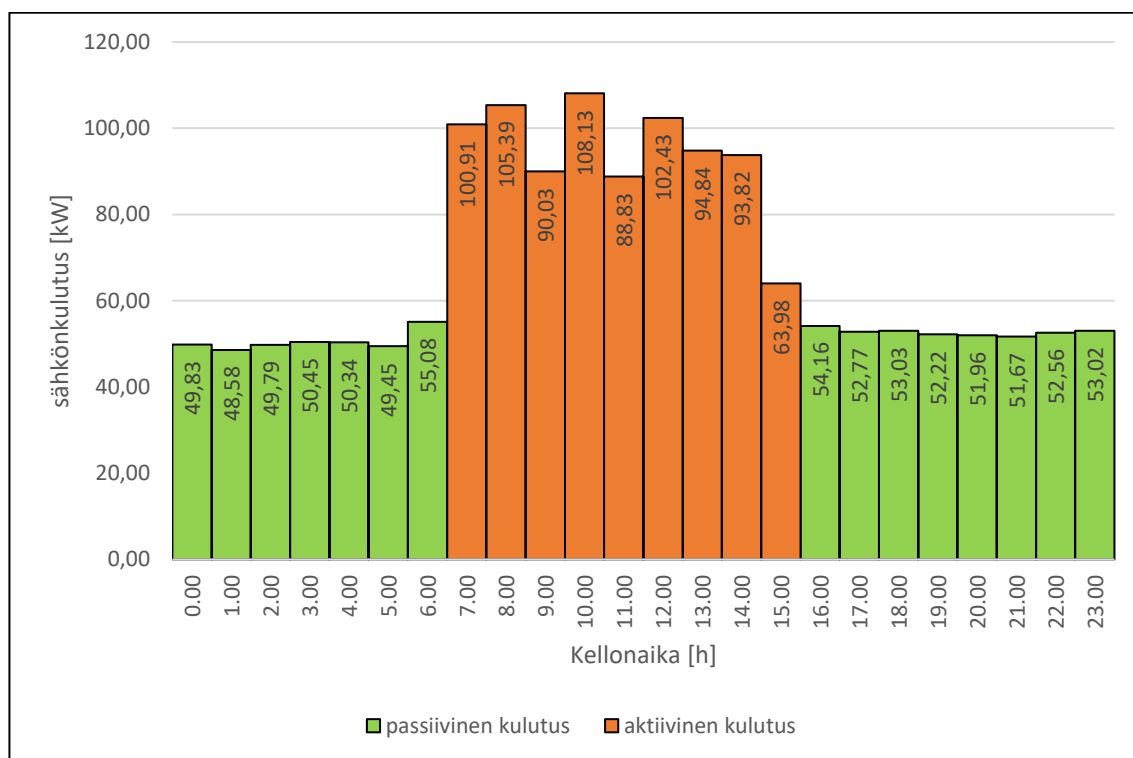
Kuvio 1. Joensuun höyläämön sähkönkulutuksen keskiarvo arkipäivisin maalisi- ja joulukuussa 2016.

Hammasslahden sähkönkulutuksen keskiarvo selvitetään taloudellisen vertailun vaihtoehtoa C varten. Hammasslahden höyläämöllä työskennellään yhdessä vuorossa, jolloin sähkönkulutuksen piikki sattuu arkipäivisin kello 7.00 ja 15.30 väliselle ajalle. Muina ajankohtina pohjakuorma on lähes Joensuun höyläämötä vastaava (kuvio 2).

Joensuun höyläämön sähkötehon tarpeen keskiarvo aktiivisen käytön aikana on noin 92 kW. Tuntikohtaisten keskiarvojen maksimikulutus oli 107,4 kW ja minimikulutus 72,2 kW (taulukko 5). Hammasslahden sähkönkulutus on Joensuun höyläämötä hivenen matalampi. Maksimikulutus on Joensuun höyläämötä korkeampi, mutta minimikulutus huomattavasti matalampi. Energian hinta on laskettu maalisi- ja joulukuun sähkönkulutusprofiilien keskiarvoista. Höyläämöiden energian hinta



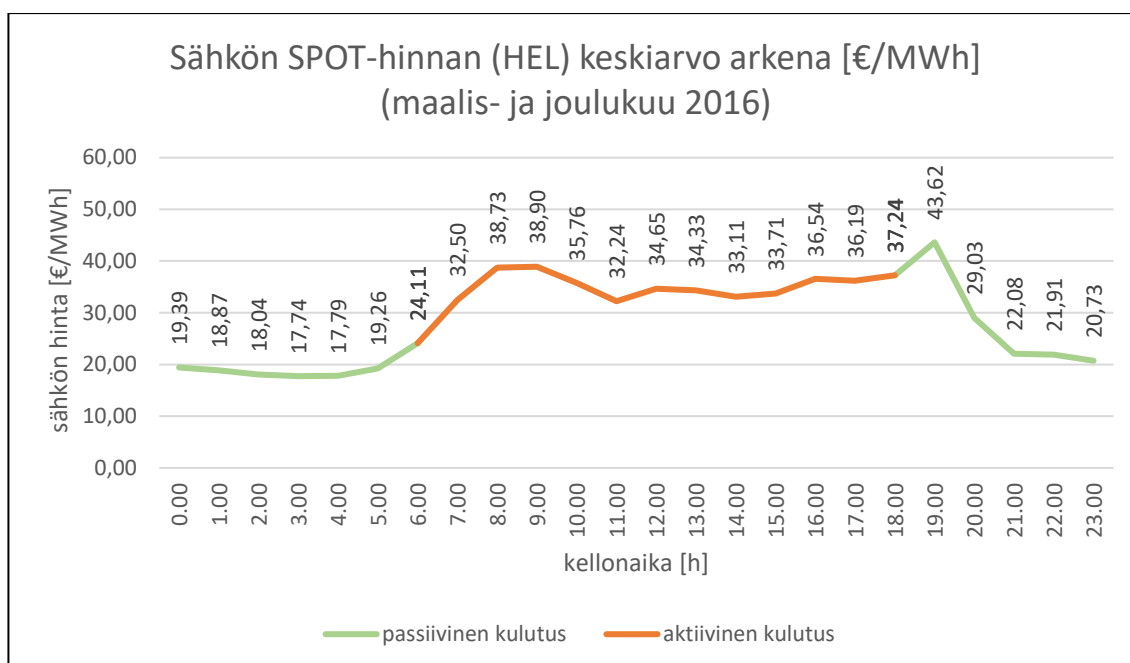
muodostuu SYS-kiinnityksistä, aluehintaeron kiinnityksistä, profiilin hinnasta ja marginaaleista.



Kuvio 2. Hammaslahden höyläämön sähkönkulutuksen keskiarvo arkipäivisin maalisi- ja joulukuussa 2016.

Taulukko 5. Höyläämöiden keskiarvokulutukset sekä energian hinta maalisi- ja joulukuun 2016 sähkönkulutusprofiilien pohjalta.

	Joensuu	Hammaslahti
Aktiivinen kulutus	06.00–18.00	07.00–15.00
Keskiarvokulutus [kW]	91,72	84,20
Maksimikulutus [kW]	107,38	108,13
Minimikulutus [kW]	72,19	63,98
Passiivinen kulutus	18.00–06.00	15.00–07.00
Keskiarvokulutus [kW]	57,09	51,66
Maksimikulutus [kW]	63,59	55,08
Minimikulutus [kW]	53,64	48,58
Keskiarvokulutus 24 h [kW]	74,44	67,64
Energian hinnan keskiarvo [€/MWh]	46,81	47,02



Kuvio 3. Sähkön hinnan keskiarvo arkipäivisin. Oranssi alue kuvaa Joensuun höyläämön aktiivisen kulutuksen aikaa.

## 4.2 Korvaavat biokattilat

Opinnäytetyön biokattilavalmistajat valikoituivat kotimaisuuden lisäksi tunnettujen ja referenssien perusteella. Valmistajat ovat Arterm Oy, Ala-Talkkari Oy, Laatikattila Oy ja HT Enerco Oy. Lisäksi kattilaa tiedusteltiin Konepaja M. Pappinen Oy:ltä, jonka ratkaisu sisältää pellettikoneen. Edellä mainituista yrityksistä neljältä saatiin tarjous (taulukko 6).

Taulukko 6. Kartoitetut kotimaiset biokattilavalmistajat ja laitteistot.

Valmistaja	Malli
Konepaja M. Pappinen Oy	HylicBoiler 500 kW-tulitorvi-tuliputkikattila
Arterm Oy	Arterm Bio 500-biokattila
Ala-Talkkari Oy	Veto 500-stokerikattila
Laatikattila Oy	LAKA PS-500-4J-kattila
HT Enerco Oy	Tulimax STK 500-lämminvesikattila

Biolämmityskattiloiden osalta teknisiä tietoja sekä hankintakustannusten suuruutta tiedusteltiin 500 kW<sub>th</sub> biokattiloista. Osa hinnoista sisälsi vain kattilan ilman asennusta ja osa kattilan lisäksi lisävarusteet, polttimen, purkaimen, savukaasupesurin, automaation ja asennuksen.

#### 4.2.1 Luvat, tuet ja verotus

##### **Luvat:**

Kiinteästi paikalleen rakennettu rakennus edellyttää aina kunnan rakennusviranomaisen myöntämää rakennuslupaa. Rakennusluvan edellytyksenä on, että hanke täyttää säännösten ja määräysten asettamat tekniset, ympäristölliset ja oikeudelliset vaatimukset. Joissain tapauksissa laitostoiminnan aloittaminen edellyttää Turvallisuus- ja kemikaaliviraston (TUKES) hyväksyntää. (Motiva 2014c.)

##### **Tuet:**

Ilmasto- ja ympäristömyönteisiin investointihankkeisiin on mahdollista saada energiatukea. Energiatuen tavoitteena on edistää uuden teknologian käyttöönottoa parantamalla investoinnin taloudellista kannattavuutta sekä pienentämällä käyttöönoton taloudellisia riskejä. Energiatuen edellytyksenä on, että hanke

- edistää uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä,
- edistää energiansäästöä tai energiantuotannon tai käytön tehostamista
- vähentää energian tuotannon tai käytön ympäristöhaittoja.

Pääasiassa tukihakemukset käsitellään Teknologian ja innovaatioiden tutkimuskeskuksessa (TEKES). Uuden teknologian ja investoinneiltaan yli 5 miljoonan euron hankkeet käsittelee työ- ja elinkeinoministeriön (TEM) energiaosasto. (Työ- ja elinkeinoministeriö.)

Energiatuen tukimuotona on investointituki. Energiatuki puupohjaista polttoainetta käyttävälle lämpökeskushankkeelle (tavanomainen teknologia) on 10–15 %. Uutta teknologiaa sisältävälle hankkeelle voidaan tapauskohtaisesti myöntää korotettua tukea (20–40 %). (Tekes 2017.) Lämpöteholtaan alle 10 MW:n lämmöntuotantohankkeille ei kuitenkaan myönnetä tukea, jos investoinnin seurauksena siirrytään kaukolämmöstä erilliseen lämmöntuotantoon. (Motiva 2017.)

Taulukko 7. Uusiutuvan energian tukimallit Suomessa (Liukko 2016).

	<b>Investointituki</b>	<b>Tuotantotuki</b>
Tuki kohdistetaan Kuka maksaa?	Investointikust. Valtion budjetti	€/MWh Valtion budjetti/ sähkön käyttäjät
Riski tuottajalle Tuen määräytyminen	Määrä- ja markkinariski Tapauskohmainen	Määräriski (markkinariski) Takuuhinta
Tukimuoto	Energiatuki	Syöttötariffi (+lämpöpreemio)

**Verotus:**

Polttoainevero sisältää energiasisältöveron ja hiilidioksidiveron sekä erikseen perittävän huoltovarmuusmaksun. Energialainsäädännössä on säädetty sähkön tuotantoon käytettävien polttoaineiden olevan verottomia ja lämmön tuotantoon käytettävien verollisia. (Motiva 2012, 14.)

Omasta tuotannosta muodostuvat puupohjaiset polttoaineet eivät kuitenkaan ole lämmöntuotannossa polttoaineverotuksen alaisia. Lämmöntuotannon polttoainevero koskee kevyttä (POK) ja raskasta (POR) polttoöljyä, maakaasua, kivihiiltä sekä turvetta. (Flyktman 2013, 21.) Mikäli kattilassa tai varalämmitysjärjestelmässä käytetään muita veronalaisia polttoaineita, maksetaan niistä polttoaineveeroa (Pesola ym. 2010, 27).

**4.2.2 Kustannusrakenne**

Kattiloiden investointikustannukset ovat pienessä kokoluokassa 50–100 €/kW ja suuremmassa kokoluokassa alle 50 €/kW. Polttoaineen syöttöjärjestelmän kustannukset vaihtelevat 100–150 €/kW. Taulukossa 8 esitetyt käyttö- ja kunnossapitokustannukset aiheutuvat mm. kattiloiden puhdistuksesta, tuhkanpoistosta sekä nuohouksesta. (Vartiainen ym. 2002, 16.) Kun nuohoaminen on säännöllistä ja veden aiheuttaman kalkkiintumisen ehkäisy aktiivista, säilyy kattiloiden hyötysuhde korkeampana pidempään ja kattilan käyttöikä kasvaa (Piippo 2017). Eniten biomassalla tuotetun lämmön hintaan vaikuttaa polttoaineen hinta (Vartiainen ym. 2002, 16).

Taulukko 8. Biokattiloiden lämmöntuotannon kustannuksia (Vartiainen ym. 2002, 16).

<b>Kustannustyyppi</b>		
Investointi	100–200	€/kW <sub>th</sub>
Polttoaine	7–30	€/MWh
Käyttö- ja kunnossapito	1–2	€/MWh
Tuotanto	10–50	€/MWh
(HKA: 1 000–3 500 h, käyttöikä: 20 v.)		

Tätä selvitystä varten neljältä kotimaiselta valmistajalta saatujen tarjousten kokonaisinvestointikustannukset vaihtelivat kattilan mukana tulevien lisävarusteiden määrästä riippuen. Oheisessa taulukossa 9 nähtävissä keskiarvohintoja kattiloille tarjotun paketin sisällöstä ja lisävarusteiden määrästä riippuen. Kaikki tarjoukset ja hinnat ovat alv. 0 %.

Taulukko 9. Kotimaisilta biokattilavalmistajilta saatujen tarjousten pohjalta viitteellisiä arvoja 500 kW:n biokattilajärjestelmille (alv. 0 %).

<b>Tekniikka</b>	<b>Investointi [€/kW<sub>th</sub>]</b>
Biokattila	46–56
Biokattila + poltin	< 100
Biokattila + jousipurkain + savukaasunpuhdistaja	130
kattila + poltin + poltinruuvi + ohjauskeskus	140

Tarjousten pohjalta saadut arvot näyttävät täsmäävän Vartiaisen ym. (2002) esittämiin arvioihin biokattiloiden kustannuksista. 500 kW:n kattiloiden investointikustannus on 50 €/kW<sub>th</sub> luokkaa. Kattilan lisävarusteiden (esim. tuhkaruuvit ja tuhkaastia) lisäksi poltin, ohjauskeskus, syöttöruuvi, purkaimet ja muut lisälaitteet nostavat investointikustannukset 100–200 €/kW<sub>th</sub>:in. 500 kW:n lämmitysjärjestelmän tapauksessa kokonaisinvestointikustannukset ovat 50 000–100 000 euroa, josta kattilan osuus on tyypillisesti 25 000–30 000 euroa.

Käyttö- ja kunnossapitokustannuksiksi valmistajat arvioivat alle yhtä euroa tuotettua MWh:a kohden. Tuotantokustannuksista ei ollut arviota. Tuotantokustannuksiin sisältyvät kustannukset, joita lämmöntuotannosta aiheutuu, kuten kuljetimiin, ohjauslaitteistoon ja purkaimiin kuluvan energian kustannukset, sekä polttoaineen hinta.

### 4.3 Korvaavat CHP-tekniikat

Korvaavien pien-CHP-tekniikoiden kartoitus alkoi perehtymällä aiempiin aihepiiriin julkaisuihin. Aiemmissä julkaisuissa esiintyneistä yrityksistä Ekogen Oy ja Savonia Power Oy ovat lopettaneet liiketoimintansa. Enerec Oy ei vastauksensa perusteella valmista enää kohteeseen sopivia CHP-laitteistoja, mutta jatkaa liiketoimintaansa muiden laitteistojen parissa. Pien-CHP-laitteistoja edelleen valmistavia kotimaisia yrityksiä ovat ainakin Volter Oy, Entimos Oy, Enerkon Oy sekä Gasek Oy. Edellä mainituista yrityksistä kolmelta saatiin vastaus, joista Enerkon Oy:n ja Gasek Oy:n laitteistot soveltuvat kutterinlastun kaasutukseen (taulukko 10). Volter Oy:n järjestelmä toimii toistaiseksi vain puuhakkeella (Haapakoski 2017).

Taulukko 10. Kartoitetut kotimaiset pien-CHP-valmistajat ja laitteistot.

Valmistaja	Tekniikka
Enerkon Oy	Kaasureaktori + kaasumoottori
Volter Oy	Kaasureaktori + kaasumoottori
Gasek Oy	Kaasureaktori + kaasumoottori

#### 4.3.1 Luvat, tuet ja verotus

##### Luvat:

CHP-laitoksen rakentaminen edellyttää viranomaisen luvan. Koosta riippuen hankkeesta tulee ilmoittaa Energiamarkkinavirastolle, tullille ja Fingridille. Yleisimmät alle 2 MW<sub>e</sub>:n voimalaitoksen rakentamiseen vaaditut luvat ovat rakennuslupa, vesilupa ja toimenpidelupa. Lupamenettelyissä on kuntakohtaisia eroja, minkä takia paras tietolähde lupakysymyksissä on kunnan rakennusviranomaisen. Lämpöteholtaan alle 5 MW<sub>th</sub>:n voimalaitokset eivät tarvitse ympäristölupaa. (Takalo 2013, 20.)

Sähkömarkkinalain mukaan sähköverkkotoimintaan tarvitaan Energiamarkkinaviraston lupa. Mikäli sähköverkko on laitoksen hallinnassa ja sen avulla hoidetaan kiinteistöryhmän sisäistä sähköjakelua, lupaa sähköverkkotoimintaan ei tarvita.

Sähkön tuotanto ja myynti ei edellytä toimilupaa. Tuotettu sähkö voidaan myös myydä ulkopuoliseen verkkoon. (Takalo 2013, 20.)

### Tuet:

Uusiutuvia polttoaineita käyttävälle CHP-laitokselle ei myönnetä energiatukea. 0,1–8,0 MW:n CHP-laitoksen on mahdollista liittyä syöttötariffijärjestelmään, mikäli se täyttää asetetut ehdot (taulukko 11). Takuuhintaan perustuvan syöttötariffin tarkoituksena on tukea energiantuotantoa, joka ei ilman tukea ole kilpailukykyinen sähköntuotantomarkkinoilla muihin tuotantomuotoihin verrattuna. (Pesola ym. 2014, 18.)

CHP-laitoksessa puupolttoaineilla tuotetun sähkön tavoitehinta on 83,50 €/MWh. Lisätukena maksetaan lämpöpreemiota 20 €/MWh (Pesola ym. 2010, 29). Tavoitehinnan ja lämpöpreemion muodostama kokonaistavoitehinta on 103,50 €/MWh. Kokonaistavoitehinnan ja sähkön 3 kk:n markkinahinnan keskiarvon erotusta maksetaan 12 vuoden ajan. (Takalo 2013, 20–21.)

Taulukko 11. Puupolttoainevoimaloiden tuotantotukien taso ja saamisen edellytykset (Määttä 2016, 25).

<b>Puupolttoainevoimaloiden tuotantotuet</b>	
Tukimuoto	Syöttötariffi (tavoite- & markkinahinnan erotus)
Perustuki	83,5 €/MWh, josta vähennetään markkinahinta
Lisätuki	Lämpöpreemio 20 €/MWh
Lisätuen saamisen ehto	Hyötysuhde 50 % (yli 1 MW 75 %)
Nimellisteho	0,1–8,0 MW
Lämmön hyötykäyttö	Kyllä
Muut ehdot	Hanke ei ole saanut valtiontukea

Nettolaskutus on järjestelmä, jossa sähkön pientuottaja maksaa kuluttamastaan sähköstä nettona. Tässä tapauksessa pientuottajan kuluttamasta sähköenergian määrästä vähennetään pientuottajan verkkoon syöttämä sähkön määrä. Nettolaskutuksen osalta yhtenäistä käytäntöä Suomessa ei vielä ole, mutta sähköyhtiöillä on jo mahdollisuus tarjota sitä asiakkailleen. Järjestelmä vaatii vielä käytännön toteutuksen ja hallinnoinnin suunnittelua, mutta teknisiä esteitä sille ei ole.

Tukimekanismina nettolaskutus olisi investointitukea ja syöttötariffia hallinnollisesti kevyempi, sillä se ei vaadi suoraa rahoitusta valtion budjetista. (Pesola ym. 2014, 19.)

### **Verotus:**

Sähköntuottajat ovat sähköverovelvollisia. Sähköverovelvollisuus sisältää sähkön valmisteveron sekä huoltovarmuusmaksun suorittamisen. Valmisteveroa ja huoltovarmuusmaksua ei tarvitse maksaa sähköstä, jonka sähköntuottaja luovuttaa verkkoon. Veroa maksetaan pelkästään omaan tuotantoon kuluva sähköstä, joka ei ole omakäytösähköä. (Motiva 2012, 14.)

Pientuottajien kohdalla sovelletaan helpotuksia suuriin sähköntuottajiin verrattuna. Pientuottaja ei ole sähköverovelvollinen sähköstä, jonka tuottaa alle 50 kilowatin tehoisessa generaattorissa tai alle 50 kilowatin nimellistehoisessa sähköntuotantokokonaisuudessa. Sähköverovelvollisuus ei myöskään koske alle 2 MW generaattorissa tuotettua sähköä, jota ei siirretä sähköverkkoon. (Motiva 2012, 14.)

Lämmöntuotannon tapaan, omasta tuotannosta muodostuvat puupohjaiset polttoaineet eivät ole polttoaineverotuksen alaisia myöskään lämmön ja sähkön yhteistuotannossa (Flyktman 2013, 21).

### **4.3.2 Kustannusrakenne**

Luotettavaa kuvaa pien-CHP-teknologioiden tuotantokustannuksista on hankala muodostaa, toistaiseksi vähäisten käyttökokemukset johdosta. Tuotantokustannukset vaihtelevat käytettävästä teknologiasta riippuen, mutta teknologiasta riippumatta kustannukset laskevat selvästi laitoksen koon kasvaessa. Investointikustannuksia nostavat toistaiseksi massatuotannon puuttuminen sekä korkeat materiaalikustannukset. Polttoainekustannukset vaikuttavat laitoksen hyötysuh-



teen ohella kokonaiskuluihin eniten. Polttoainekustannukset saattavat muodostaa yli puolet, jopa 80 % CHP-laitoksen käyttöön liittyvistä kuluista (taulukko 12). (Pesola ym. 2014, 13; Takalo 2013, 21.)

Taulukko 12. CHP-laitteistojen kustannustaso (Takalo 2013, 22).

Laitteisto	Investointi- kustannukset	Käyttö- ja kunnossapito	Tuotantokustannukset 8000 h/a	Tuotantokustannukset 4000 h/a
	€/kW	€/MWh	€/MWh	€/MWh
Kaasulaitteisto	550–900	2–7	27–30	27–44
Stirling-moottori	1 350–3 400	7–23	35–62	55–130
Mikroturbiini	880–1 700	3,5–11	35–47	47–74
Höyrymoottori	300–1 000	< 2,7	17–44	27–80

Kolmelta kotimaiselta yritykseltä saadut tarjoukset vaihtelivat investointikustannuksiltaan sähkötehoon suhteutettuna 4 500–6 000 €/kW<sub>e</sub>, tai kokonaistehoon suhteutettuna 1 300–1 500 €/kW. Investointikustannukset ovat korkeammat verrattuna edellä olevaan taulukkoon 12 sekä Pesolan ym. (2014, 14) taulukkoon, jossa kaasutin-kaasumoottori -yhdistelmän investointikustannukseksi arvioidaan 4 000–5 000 €/kW<sub>e</sub> asennettuna.

Valmistajien vastaukset käyttö- ja kunnossapitokustannuksista, sekä tuotantokustannuksista olivat enemmänkin sanallisia kuvailuita kuin konkreettisia lukuja, mistä syystä taloudellisessa tarkastelussa turvaudutaan aiempien aihepiirin julkaisujen viitteellisiin arvoihin. CHP-laitoshankinnoissa otetaan huomioon myös varalämmitysjärjestelmän investointi.

#### 4.3.3 Sähköverkkoon liittyminen ja sähkön myynti

Hajautetussa sähkön pientuotannossa omaan kulutukseen suunnitellut sähkön-tuotantolaitokset voivat myydä tuotannon ylijäämän sähköverkkoon. Paikallinen sähköverkkoyhtiö hoitaa laitoksen verkkoon liittämisen, sekä sähkönsiirron ja -mittaroinnin. Ylijäämäsähkön voi kuitenkin myydä muille kuin paikalliselle sähkö-yhtiölle. Sähköyhtiöt kannattaa kilpailuttaa, sillä korvaus pientuotannon ylijäämäsähköstä vaihtelee, eivätkä kaikki sähköyhtiöt välttämättä edes osta pientuotettua sähköä. (Pikes 2017.)

Korvauksen suuruuden määrä yleensä tunneittain muuttuva spot-markkinahinta. Pientuottajan saamat myyntitulot sisältävät vain sähkön markkinahinnan, eli sähkövero tai sähkönsiirron osuus ei sisälly korvaukseen. Tästä syystä ylituotannon myyntihinta jää huomattavasti verkosta ostettua sähkön hintaa alhaisemmaksi (kuva 33). Osa verkkoyhtiöistä vähentää ylijäämänsä sähkönsiirron ostohinnasta välityspalkkion. Osa taas maksaa samaa hintaa, millä itse myyvät sähköenergiaa asiakkailleen. Ylijäämänsä sähkönsiirron korvaushinta vaihtelee yleensä 30–50 €/MWh välillä verkosta ostetun sähkön maksaessa 110–140 €/MWh. (Pikes 2017.)

Tarkemmat ohjeet saatavissa Energiateollisuuden julkaisemassa ohjeessa Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon (2016).

## 5 Taloudelliset laskelmat

### 5.1 Laskelmien lähtötiedot

Taloudellisen tarkastelun kaikille vaihtoehdoille on joitakin yhteisiä lähtöarvoja, jotka on nähtävissä taulukossa 13. Laitteistojen poistoajaksi on valittu 15 vuotta, vaikka valmistajien mukaan teknisesti biokattiloiden käyttöikä on 20–30 vuotta ja kaasuttimien 20–25 vuotta. Laitteistojen jäännösarvo on 0 euroa, koska Penttilän Puu Oy aikoo käyttää investointinsa sen käyttöiän loppuun saakka.

Verkkosähkön hinta on saatu yrityksen sähkönkulutusprofiilien keskiarvosta ja tyyppikäyttäjän T1 (pienteollisuus) sähkönsiirtomaksujen viimeisen vuoden keskiarvosta (ks. Energiamarkkinavirasto 2017). Lisäksi verkkosähkön kokonaishintaan on lisätty sähköveroluokan 2 (mm. teollisuusyritykset) 1.1.2015 lähtien vakiona pysynyt sähkövero. Verkkosähkön hinnan nousu on arvio, joka perustuu Pöyry Management Consulting Oy:n (2016, 31) raporttiin. Pientuotannon ylijäämänsähkön myyntitulot ovat sidoksissa verkosta ostettavan sähkön hintaan. Laskelmien oletusarvona on, ettei verkkoyhtiö peri välityspalkkiota verkkoon myytävästä sähköstä.

Laskelmissa ei oteta huomioon inflaatiota, joka vaikuttaa investoinnin kiinteisiin summiin, kuten syöttötariffin määrään. Inflaatiolla tarkoitetaan yleisen hintatason nousua ja sen mittarina käytetään kuluttajahintaindeksiä. Inflaatio-odotuksen pitkän ajan keskiarvo on 2,2 prosenttia. (Tilastokeskus 2013.) Koska inflaatiota ei oteta huomioon, käytetään laskelmissa reaalikorkokantaa nimelliskorkokannan sijasta. Lisäksi sähköntuotantovero on rajattu laskelmista pois, kuten myös lämmönmyynti.

CHP-laitteistojen osalta kaasumootorit uusitaan 6–8 vuoden välein, maksimiikänsä ollessa 10 vuotta (Väinämö 2017). Biokattiloiden poltin uusitaan kattilan käyttöiän aikana keskimäärin kerran (Kantalainen 2017). Sekä CHP-laitosten, että biokattilan tapauksessa uusimiset sisältyvät käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin.

Taulukko 13. Taloudellisen tarkastelun yhteiset lähtöarvot kaikille investointi-  
vaihtoehdoille.

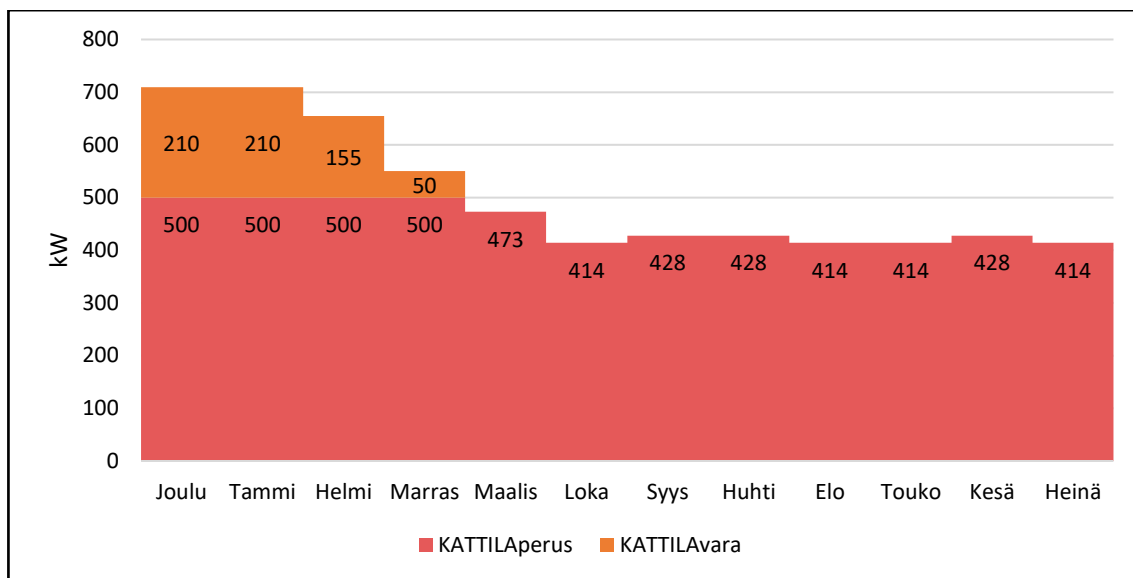
<b>Vaihtoehtojen A, B ja C lähtöarvot</b>		
Poisto aika	15	vuotta
Jäännösarvo	0	€
Laskentakorko	7	%
Sähkönkulutus	1 200	MWh <sub>e</sub> /a
Joensuu	600	MWh <sub>e</sub> /a
Hammaslahti	600	MWh <sub>e</sub> /a
Lämmönkulutus Joensuu	4 400	MWh <sub>th</sub> /a
Verkkosähkön hinta (T1)	83	€/MWh <sub>e</sub>
Verkkosähkön osto- ja myyntihinnan vuosinousu	2	%
Ylijäämänsähkön myyntihinta	33,70	€/MWh <sub>e</sub>
Ylijäämälämmön myyntihinta	0	€/MWh <sub>th</sub>
Kutterinlastun määrä Joensuussa	37 000	i-m <sup>3</sup> /a
Kutterinlastun energiatiheys saapumistilassa	0,47	MWh/ i-m <sup>3</sup>
Kutterinlastun myyntihinta	9	€/ i-m <sup>3</sup>
	19,15	€/MWh
Kevyen polttoöljyn (POK) lämpöarvo	10	kWh/l
Kevyen polttoöljyn hinta	0,95	€/l

## 5.2 Vaihtoehto A. Biokattila, biopoltin ja ohjauskeskus

Vaihtoehto A sisältää 500 kW biokattilan lisävarusteilla, biopolttimen ja ohjauskeskuksen. Tarjottu paketti soveltuu Penttilän Puu Oy:n tarpeisiin kaikista saaduista tarjouksista parhaiten. Paketin veroton hinta on 68 000 euroa, mutta siihen on lisätty arvio asennuskustannuksista ja mahdollisista muutostöistä aiheutuista kustannuksista, jolloin veroton kokonaishinta on 100 000 euroa. Investointiin on saatavissa 10 %:n energiatuki, jolloin lopulliseksi investointikustannukseksi jää 90 000 euroa.

Laitteisto sopii mittojensa puolesta nykyiseen kattilahuoneeseen, ja sen varalämmitysjärjestelmänä voi käyttää nykyistä öljykattilaa. Mitoituksen perusteella öljykattilan lämmön vuosituotannon osuus olisi 10 % (kuvio 4). Kattilavalmistajien arviot biokattiloiden kokonaishyötysuhteista vaihtelivat 90–97 % välillä ja tästä syystä mitoituksen hyötysuhteena on käytetty 94 %. Kattilan maksimilämpötila on 135 °C ja maksimipaine 4 bar.

Kuvion 4 kuukausittainen lämmöntarvevaihtelu perustuu arvioon. Kuvaajan arvosarjat ovat korkeita myös kesäisin verrattuna tyypillisiin laitos- ja kotitalousmitoituksiin. Syynä tähän ovat ympäri vuoden höyläämön raakatavaraa kuivaavat kuivurit.



Kuvio 4. Vaihtoehto A. Biokattilan ja varalämmityskattilan (POK) lämmitystekot kuukausittain.

Vaihtoehdon A osalta ei ole laskettu kannattavuutta, sillä kattilainvestointi on joka tapauksessa tiedossa lähivuosina. Tässä vaihtoehdossa on kuitenkin selvitetty lämmöntuotannosta aiheutuvat tuotantokustannukset. Tuotantokustannuksiin sisältyvät käyttö- ja kunnossapitokustannus sekä biokattilan ja varakattilan yhteenlasketut polttoainekustannukset. Lämmöntuotannosta aiheutuvat tuotantokustannukset luovat yhdessä Joensuun ja Hammaslahden verkkosähkökustannusten kanssa vertailupohjan CHP-laitteistojen kannattavuuden selvittämiseksi.

Taulukko 14. Vaihtoehdon A polttoainekustannukset.

<b>Vaihtoehto A:n laitemitoituksen tulokset</b>		
Huipunkäyttöaika (HKA)	7 896	h
Biokattilan lämmöntuotanto	3 948	MWh <sub>th</sub> /a
Varakattilan lämmöntuotanto	452	MWh <sub>th</sub> /a
Lämmöntuotanto yhteensä	4 400	MWh <sub>th</sub> /a
Polttoaineen kulutus biokattilassa	8 936	i-m <sup>3</sup> /a
	4 000	MWh <sub>th</sub> /a
	80 426	€/a
Polttoaineen kulutus varakattilassa (POK)	48 085	l/a
	481	MWh <sub>th</sub> /a
	45 681	€/a
Polttoainekustannukset yhteensä	126 106	€/a
Polttoaineen osuus tuotantokustannuksista	28,66	€/MWh <sub>th</sub>

Käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat noin 1 €/MWh<sub>th</sub>. Niihin sisältyy muun muassa huolto-, vakuutus- ja korjausmaksut. Kustannusarvio perustuu luvussa 4.2.2 nähtävään taulukkoon 8 sekä erään kattilanvalmistajan arvioon, jonka mukaan käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat alle 1 €/MWh<sub>th</sub>.

Taulukko 15. Vaihtoehdon A lämmöntuotantokustannukset.

<b>Vaihtoehto A:n kokonaistuotantokustannukset</b>		
Käyttö- ja kunnossapitokustannukset	1	€/MWh <sub>th</sub>
	3 948	€/a
Polttoainekustannukset yhteensä	126 106	€/a
Investointikustannusten annuiteetti	9 882	€/a
Tuotantokustannukset yhteensä	139 936	€/a
	31,80	€/MWh <sub>th</sub>

Vaihtoehdolla A tuotetulle lämmölle muodostuu kokonaishinnaksi noin 32 €/MWh<sub>th</sub>. Polttoainekustannukset muodostavat 90 % tuotantokustannuksista. Vertailun vuoksi mainittakoon, että Fortumin Etsi sopivin tuote -palvelun avulla Penttilän Puu Oy:lle saadun kaukolämmön verottomaksi hinnaksi muodostuisi noin 39 €/MWh<sub>th</sub>. Mikäli kaukolämpö oltaisiin vasta nyt korvaamassa kattilalla, vuosittaiseksi säästöksi muodostuisi lähes 32 000 euroa ja koroton takaisinmaksuaika olisi noin kaksi vuotta. Huomioon tulee ottaa, ettei esimerkin kattilainvestointi sisällä ruuvia, kuljettimia, säiliöitä, piippua, rakennuksia tai lämpöputkia.

Kattilan käyttöikä huomioon ottaen lämpölaitosinvestointi olisi kuitenkin erittäin kannattava.

### 5.3 Vaihtoehto B. 600 kW:n kaasutukseen perustuva CHP-laitos

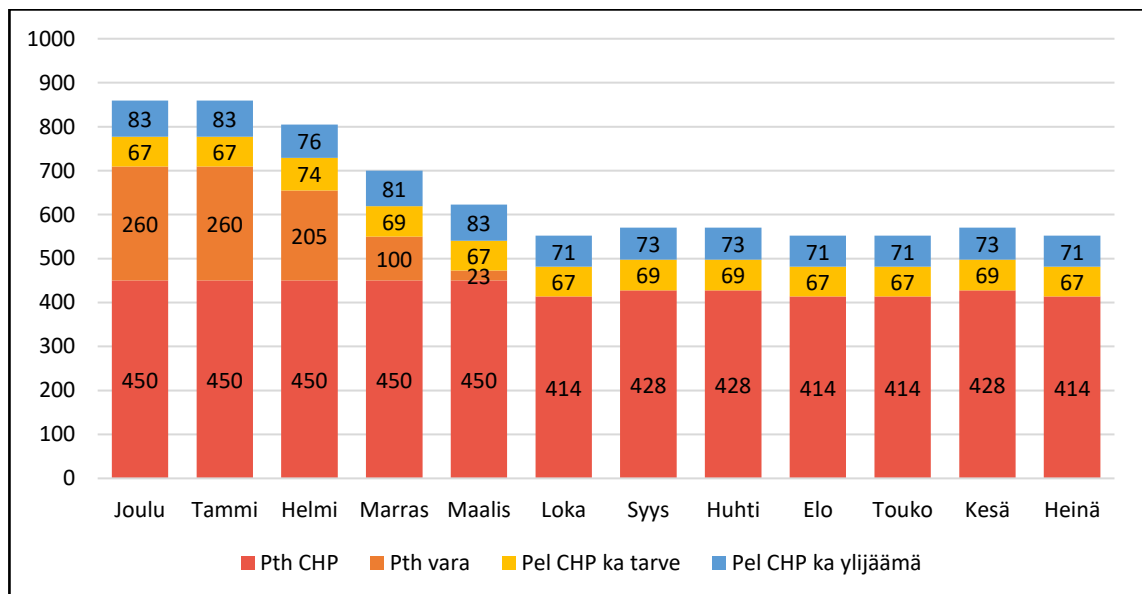
Vaihtoehto B on 600 kW kaasuttimen ja kaasumoottorin toimintaan perustuva CHP-laitos. Laitoksen tekniikka odottaa patenttia, joten kyseessä olisi pilotti-hanke. Laitoksella on tarkoitus tuottaa lämpö ja sähkö Joensuun höyläämön tarpeisiin. Kokonaishyötysuhteena käytetään valmistajien arvioon pohjautuvaa keskiarvoa 90 %. Vaihtoehto B ei mahdu Penttilän Puu Oy:n nykyiseen kattilahuoneeseen, joten se tulisi toteuttaa konttiratkaisuna. Tämä vaatisi ainakin nykyisten kuljettimien, polttoainesäiliön sekä lämpö- ja sähköyhteyksien uudelleen sijoittelua, mikä lisää kustannuksia merkittävästi.

Lisäkustannuksia aiheuttaisi myös itse kontti, joka ei sisälly laitetarjoukseen. Vaihtoehdon B veroton hinta ilman konttia on 800 000 euroa. Tässä laskelmassa rakennus-, purku- ja muutostöille sekä kontti-investoinnille on arvioitu hinnaksi 200 000 euroa. Lisäksi investointikustannusta nostaa vähintään 80 kW:n biopolttoaineille sopiva uusi varakattila, jonka kustannukseksi on arvioitu 25 000 euroa. Yhteensä investointikustannuksia muodostuisi 1 025 000 euroa.

Taulukko 16. Vaihtoehdon B perustiedot.

<b>Vaihtoehto B:n perustiedot</b>		
Kokonaisteho	600	kW <sub>tot</sub>
Sähköteho (P <sub>e</sub> )	150	kW <sub>e</sub>
Lämpöteho (P <sub>th</sub> )	450	kW <sub>th</sub>
Kokonaishyötysuhde	90	%
Reaktorilämpötila	+600	°C
Polttoaineteho (P <sub>PA</sub> )	667	kW
Häviö (P <sub>häviö</sub> )	67	kW
Sähköntuotannon hyötysuhde	23	%
Lämmöntuotannon hyötysuhde	68	%
Rakennussuhde	0,33	
Käyttöikä	25	a
Investointikustannus	1 025 000	€

Vaihtoehto B on mitoitettu lämpökuorman mukaan, vaikka CHP-laitosten ensisijainen tehtävä on sähkötarpeen tyydyttäminen. Mitoitusratkaisu johtuu laitteiston rakennussuhteesta, joka mahdollistaa sähkötehotarpeen tyydyttämisen pienemmilläkin huipunkäyttöajoilla. Lisäksi lämmön tarve on huomattavasti tasaisempaa kuin sähkötehon tarve tunneittain tarkasteltuna. Kuvio 5 on havaittavissa sähköntuotannon riittävän molempien höyläämöiden tarpeisiin sähkönkulutuksen kuukausikeskiarvoilla mitattuna. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että työvuorojen aikainen sähkön ottoteho kummallakin höyläämöllä voi ylittää 130 kW. Lämpökuorman mukaan mitoitettuna vaihtoehdon B sähköntuotantoteho riittää kattamaan Joensuun höyläämön työvuorojen aikaiset sähkönkulutuspiikit.



Kuvio 5. 600 kW:n CHP-laitoksen sähköntuotanto ja ylijäämänsähkömäärä, kun laitos on mitoitettu lämpötarpeen mukaan.

Lämpöteholtaan CHP-laitteisto on kattilavaihtoehtoa 50 kW pienempi. Pienemmästä lämpötehosta johtuen mitoituksessa on otettu huomioon myös varalämmitysjärjestelmän mahdollinen uusiminen nykyisestä 250 kW:n öljylämmityskattilasta pienempään ja taloudellisempaan, vähintään 80 kW:n biokattilaan. Taulukossa 17 on vertailtu varalämmitysjärjestelmien vuosikustannuksia, kun kutterinlastun myyntihinta on 9 euroa. Varalämmityksen osuus lämmöntuotannosta on noin 14 %.



Taulukko 17. Vaihtoehdon B polttoainekustannukset ja sähköntuotanto.

<b>Vaihtoehto B:n laitemitoituksen tulokset</b>		
Huipunkäyttöaika (HKA)	8 415	h/a
CHP lämmöntuotanto	3 787	MWh <sub>th</sub> /a
Varakattilan lämmöntuotanto	613	MWh <sub>th</sub> /a
Lämmöntuotanto yhteensä	4 400	MWh <sub>th</sub> /a
Polttoaineenkulutus CHP	11 936	i-m <sup>3</sup>
	107 427	€/a
Polttoainekustannus vara (POK)	68 133	l/a
	64 727	€/a
Polttoainekustannus vara (uusi biokattila)	1 450	i-m <sup>3</sup>
	13 047	€/a
<hr/>		
Polttoainekustannukset yhteensä		
Vanha polttoöljykattila (POK)	172 154	€/a
	34	€/MWh
Uusi biovarakattila	120 474	€/a
	24	€/MWh
<hr/>		
CHP sähköntuotanto	1 262	MWh <sub>e</sub> /a
josta omaan käyttöön	600	MWh <sub>e</sub> /a
Sähkön pientuotannon säästö	57 400	€/a
josta myyntiin	662	MWh <sub>e</sub> /a
Sähkön myynti	25 731	€/a

Varalämmitysjärjestelmän uusiminen kutterinlastulle sopivaksi toisi vuosittain noin 50 000 euron säästöt polttoainekuluissa. Lisäksi kattilalle löytyisi valmiit tilat ja kytkennät nykyisestä kattilahuoneesta, sillä CHP-laitteistoa ei ole mahdollista sinne sijoittaa. Pienemmän biokattilan investointi CHP-laitteiston hankinnan yhteydessä maksaisi itsensä nopeasti takaisin. Tästä syystä varalämmitysjärjestelmän arvioitu investointi on lisätty vaihtoehdon B kokonaisinvestointikustannuksiin.

Taulukossa 18 nähtävä käyttö- ja kunnossapitokustannus perustuu laitevalmistajalta saatuun arvioon sekä taulukon 12 tietoihin. Hammaslahden höyläämön sähkökustannukset on selvitetty kertomalla sähköntarve verkkosähkön tulevan 15 vuoden keskiarvohinnalla 2 %:n vuosinousulla. Sähköntuotantoverona käytetään laskelmissa 0 euroa, koska energiantuotantoon menevää osuutta on hankala arvioida. Tuotantotuki on tulevan 15 vuoden keskiarvo, kun tukea on mahdollista saada 12 vuotta. Inflaation vaikutusta ei ole otettu huomioon. Myös pientuotetun sähkön myyntivoitto on laskettu tulevan 15 vuoden verkkosähkön keskiarvosta 2

‰:n vuosinuousulla. Hinta sisältää vain verkkosähkön energian hinnan, eikä siitä ole vähennetty verkkoyhtiön mahdollista välityspalkkiota. Sähköntuotannon säästöt muodostuvat Joensuun höyläämön vuosittaisista sähkökuluista ja lämmöntuotannon säästöt vaihtoehdon A tuotantokustannuksista.

Taulukko 18. Vaihtoehdon B kannattavuus.

<b>Tuotantokustannukset</b>		
<b>Kiinteät kustannukset</b>		
Investointikustannus	1 025 000	€
Investointikustannuksen annuiteetti	112 539	€/a
<b>Muuttuvat kustannukset</b>		
Käyttö- ja kunnossapitokustannukset	5	€/MWh
	25 245	€/a
Polttoainekustannukset	120 474	€/a
Hammaslahden höyläämön ostosähkö	57 400	€/a
Sähköntuotantovero	0	€/a
<b>Kustannukset yhteensä</b>	<b>315 659</b>	<b>€/a</b>
<b>Vuosituotot</b>		
Tuotantotuki	55 473	€/a
Pientuotetun sähkön myynti	25 731	€/a
Sähköntuotannon muodostamat säästöt	57 400	€/a
Lämmöntuotannon säästöt	139 936	€/a
<b>Tuotot yhteensä</b>	<b>278 540</b>	<b>€/a</b>
<b>Nettotuotto</b>	<b>-37 119</b>	<b>€/a</b>
Koroton takaisinmaksuaika	13,6	a
Korollinen takaisinmaksuaika	37,5	a

Annuiteettimenetelmällä saadun tuloksen perusteella vaihtoehto B on kannattamaton investointi, joka tuottaa tappiota vuosittain lähes 40 000 euroa. Todellinen tappio voi olla vieläkin suurempi otettaessa huomioon, että laskelman myyntisähkön hintana on käytetty vuorokausihinnan keskiarvoa. Todellisuudessa suurin osa myyntisähköstä syntyy työvuorojen ulkopuolella ilta kymmenen ja aamu kuuden välillä, jolloin sähkön tuntihinta on matalimmillaan. Lisäksi laskelmien oletusarvona on ollut, että sähkölle löytyy ostaja, joka ei ota myyntihinnasta välityspalkkiota. Verkkoyhtiöillä on mahdollisuus, muttei velvollisuutta ostaa pientuotantoa. Myös sähköntuotantovero tuotetun sähkön veronalaisesta osuudesta lisää esitettyjä kustannuksia.

Huomionarvoista on myös tuotantotuen päätyminen 12 vuoden jälkeen. Investointituen päätyminen aiheuttaa tuottojen merkittävää laskua, sillä 15 vuoden tarkasteluajanjaksolla tuotantotuen osuus vuosittaisista tuotoista on vaihtoehtoissa B ja C noin 20 %.

Ainoa tapa vaihtoehdon B kannattavuuden lisäämiseksi on polttoainekustannusten pieneneminen. Mikäli kutterinlastun myyntihinta on merkittävästi alhaisempi kuin yhdeksän euroa, on vaihtoehdosta mahdollista saada kannattava. Kutterinlastun myyntihinnan vaikutukset kannattavuuteen nähtävissä luvun 6.1 herkkyyssanalyysissä.

#### **5.4 Vaihtoehto C. 1 MW:n kaasutukseen perustuva CHP-laitos**

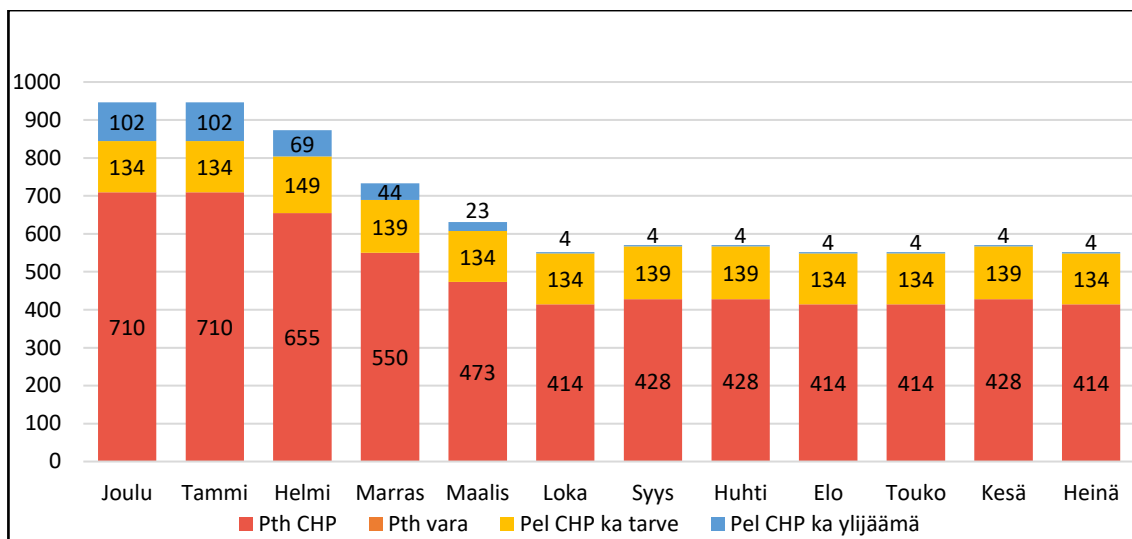
Vaihtoehto C on 1 000 kW:n kaasuttimen ja kaasumoottorin toimintaan perustuva CHP-laitos. Kyseessä on pilottikohde, jota on testattu pelkästään hakkeella. Laitoksella on tarkoitus tuottaa lämpö ja sähkö Joensuun höyläämön tarpeisiin sekä sähkö nettolaskutuksella Hammaslahden höyläämölle. Kokonaishyötysuhteena tämänkin laitteiston kohdalla käytetään 90 %. Vaihtoehto C on huomattavan kookas ja vaatii valmistajan mukaan noin 200 m<sup>2</sup> hallitilaa. Tontille sijoittaminen ja siihen liittyvät purku- ja rakennustyöt aiheuttaisivat merkittäviä lisäkustannuksia, joiden suuruudeksi on tässä laskelmassa arvioitu 300 000 euroa. Lisäkustannuksen huomioiden vaihtoehdon C investointikustannus on 1 800 000 euroa.

Taulukko 19. Vaihtoehdon C perustiedot.

<b>Vaihtoehto C:n perustiedot</b>		
Kokonaisteho	1 000	kW <sub>tot</sub>
Sähköteho ( $P_{el}$ )	250	kW <sub>e</sub>
Lämpöteho ( $P_{th}$ )	750	kW <sub>th</sub>
Kokonaishyötysuhde	90	%
Reaktorilämpötila	+1 200	°C
Polttoainetehto ( $P_{PA}$ )	1 111	kW
Häviö ( $P_{häviö}$ )	111	kW
Sähköntuotannon hyötysuhde	23	%
Lämmöntuotannon hyötysuhde	68	%
Rakennussuhde	0,33	
Käyttöikä	> 20	a
Investointikustannus	1 800 000	€

Myös vaihtoehto C on mitoitettu lämpökuorman mukaan (kuvio 7). Tällöin sähköntuotanto kattaa molempien höyläämöiden sähkön kuukausikohtaisen keskiarvokulutuksen, mutta päällekkäisten työvuorojen käyttöpiikkien aikana osa sähköstä tulisi ostaa verkosta. Työvuorojen aikainen sähkönkulutus ylittäisi ainakin paikoin CHP-laitoksen sähköntuotantokapasiteetin, vaikka laitosta käytettäisiin nimellisteholla. Tällöin muodostuisi huomattavasti ylimääräistä lämpöä keväällä, kesällä ja syksyllä.

Talvella korkean lämmönkulutuksen aikaan yöllä muodostuvan ylimääräisen sähkön määrä olisi myös huomattavaa. Ylimääräiselle lämmölle ja sähkölle olisi hyvä keksiä hyötykäyttökohde, etenkin kun yöaikaan myyntiin siirrettävän sähkön korvaushinta on alhainen eikä tekniikka mahdollista sähköntuotannon ohittamista lämmöntuotannon maksimoimiseksi, kuten esim. höyryturbiineissa.



Kuvio 6. 1 MW:n CHP-laitoksen sähköntuotanto ja ylijäämänsähkön määrä, kun laitos on mitoitettu lämpötarpeen mukaan.

Lämpöteholtaan CHP-laitos on 250 kilowattia vaihtoehto A:n lämmityskattilaa suurempi, minkä takia varalämmitysjärjestelmää ei varsinaisesti tarvita tukemaan lämmöntuotantoa edes talvikuukausina. Varalämmitysjärjestelmänä on kuitenkin hyvä säilyttää nykyinen 250 kW:n öljylämmityskattila, joka on varmatoiminen, eikä vaadi lisäinvestointeja.

Taulukko 20. Vaihtoehdon C polttoainekustannukset ja sähköntuotanto.

Vaihtoehto C:n laitemitoituksen tulokset		
Huipunkäyttöaika (HKA)	5 867	h/a
CHP lämmöntuotanto	4 400	MWh <sub>th</sub> /a
Varakattilan lämmöntuotanto	0	MWh <sub>th</sub> /a
Lämmöntuotanto yhteensä	4 400	MWh <sub>th</sub> /a
Polttoaineenkulutus CHP	13 869	i-m <sup>3</sup>
	124 823	€/a
Polttoainekustannus vara (POK)	0	l/a
	0	€/a
Polttoainekustannukset yhteensä	124 823	€/a
CHP sähköntuotanto	1 467	MWh <sub>e</sub> /a
josta omaan käyttöön	1 200	MWh <sub>e</sub> /a
Sähkön pientuotannon säästö	114 801	€/a
josta myyntiin	267	MWh <sub>e</sub> /a
Sähkön myynti	10 361	€/a

Käyttö- ja kunnossapitokustannuksia aiheuttaa pääasiassa vuosittainen suodatimen ja kaasuttimen huolto, sekä laitteistosta riippuen noin 500 tunnin välein suoritettava öljynvaihto. Aiemmista vaihtoehtoista poiketen, investoinnin annuiteetti muodostaa suurimman kuluerän CHP-laitoksen vuosittaisista tuotantokustannuksista polttoainekustannusten sijaan. Vaihtoehdon C huipunkäyttöaika on huomattavasti vaihtoehtoja A ja B matalampi. Tämä mahdollistaa tuotannon kokonaistehon paremman säädeltävyyden lämpö- ja sähkötehortarpeen mukaan, ilman että vuotuisista tuotantotavoitteista jäätäisiin.

Investoinnin kannattavuutta laskee samat tekijät kuin vaihtoehdon B kohdalla. Lisäksi todellisia tuloja laskee höyläämöiden päällekkäiset sähkönkulutuspiikit, jotka pakottavat ostamaan osan sähköstä verkosta. Verkosta ostettavan sähkön kustannusta ei ole otettu laskuissa huomioon, koska mitoitukset on tehty kuukausikohtaisten keskiarvokulutusten pohjalta. Laskelmien oletusarvona on myös mahdollisuus nettolaskutukseen, jossa verkkoon siirretty pientuotannon sähkömäärä olisi käytettävissä Hammaslahden höyläämöllä ilman siirtomaksuja.

Taulukko 21. Vaihtoehdon C kannattavuus.

<b>Tuotantokustannukset</b>		
<b>Kiinteät kustannukset</b>		
Investointikustannus	1 800 000	€
Investointikustannuksen annuiteetti	197 630	€/a
<b>Muuttuvat kustannukset</b>		
Käyttö- ja kunnossapitokustannukset	5	€/MWh
	29 333	€/a
Polttoainekustannukset	124 823	€/a
Hammaslahden höyläämön ostosähkö	0	€/a
Sähköntuotantovero	0	€/a
<b>Kustannukset yhteensä</b>	<b>351 786</b>	<b>€/a</b>
<b>Vuosituotot</b>		
Tuotantotuki	64 456	€/a
Pientuotetun sähkön myynti	10 361	€/a
Sähköntuotannon muodostamat säästöt	114 800	€/a
Lämmöntuotannon säästöt	139 936	€/a
<b>Tuotot yhteensä</b>	<b>329 553</b>	<b>€/a</b>
<b>Nettotuotto</b>	<b>-22 233</b>	<b>€/a</b>
Koroton takaisinmaksuaika	10,3	a
Korollinen takaisinmaksuaika	28,3	a

Vaihtoehto C on myös kannattamaton investointi. Investoinnin kannattavuuteen vaikuttavat samat tekijät kuin vaihtoehtoon B. Tuloksen perusteella vaihtoehto C vaikuttaa olevan kahdesta CHP-laitoksesta vähemmän kannattamaton, mutta kustannuksissa ei ole otettu huomioon mahdollista siirtomaksua nettolaskutuksessa.

Mikäli kustannuksiin lisätään nettolaskutuksen siirtomaksu Hammaslahden sähkönkulutuksen osuudesta, vuotuiset tuotot olisivat -45 193 euroa ja korollinen takaisinmaksuaika 32,6 vuotta. Siirtomaksun osuutena käytettiin 40 % sähköveroluokkaan 2 kuuluvan verkkosähkön (T1) hinnasta.

## 6 Tulokset ja niiden tarkastelu

### 6.1 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysin tarkoituksena on testata tutkimuksen lopputuloksen varmuutta muuttujien arvoja vaihtamalla. Muuttujina käytetään kutterinlastun myyntihintaa, CHP-laitosten käyttö- ja kunnossapitokustannuksia, korkokantaa sekä uudelle teknologialle myönnettävää investointitukea.

Herkkyysanalyysi kutterinlastun hinnanmuutoksen avulla on erityisen tärkeää, koska kutterinlastun osuus vuosikustannuksista vaihtelee investointivaihtoehdosta riippuen 35–90 %:iin. Lisäksi kutterinlastun myyntihinnan todellisesta keskiarvosta ei ole tarkkaa tietoa. Taloudellisten laskelmien oletusarvona on ollut, että kaikki kutterinlastu saadaan myytyä 9 €/i-m<sup>3</sup> hintaan, mikä ei pidä paikkaansa. Kutterinlastun myyntihinta on 8–10 euroa irtokuutiolta, mutta yrityksen mukaan osa lastusta jää myymättä ja päättyy kaatopaikalle. Kaatopaikalle vieminen muuttaa sen kutterinlastumäärän polttoainehinnan negatiiviseksi, kun otetaan huomioon kuljetuskustannukset ja kaatopaikan perimä maksu. Tämä laskee kokonaisuudessaan polttoaineen hintaa. Koska myyntiin ja kaatopaikalle menevien määrien osuuksista ei ole tarkkaa tietoa, on todellisen polttoaineen hinnan määrittäminen hankalaa.

Taulukko 22 esittelee CHP-laitosten kannattavuuden muutosta suhteessa polttoaineen hintaan. Analyysissä on otettu huomioon myös vaihtoehdon A kustannuksissa biokattilan polttoainekustannusten muutokset. Vaihtoehdon A polttoainekustannukset eivät kuitenkaan putoa missään skenaariossa nolnaan öljylämmityskattilan vuosittaisten polttoainekustannusten takia. Maalattu rivi edustaa taloudellisissa laskelmissa käytettyjä arvoja.



Taulukko 22. Kutterinlastun myyntihinnan vaikutus CHP-laitosten kannattavuuteen.

Kutterinlastun myyntihinta [€/i-m <sup>3</sup> ]	Vaihtoehto B	Vaihtoehto C	Vaihtoehto A (Lämmön tuotantokustannus) [€/MWh]
	Vuosituotot [€/a]		
0	2 930	22 164	13,53
1	-1 520	17 231	15,56
2	-5 970	12 298	17,59
3	-10 420	7 365	19,62
4	-14 870	2 432	21,65
5	-19 319	-2 501	23,68
6	-23 769	-7 434	25,71
7	-28 219	-12 367	27,74
8	-32 669	-17 300	29,77
9	-37 119	-22 233	31,80
10	-41 568	-27 166	33,83

Kun kutterinlastun myyntihinta on nolla euroa, molemmat CHP-laitokset vaikuttavat kannattavilta. Silti vaihtoehdon B korollinen takaisinmaksuaika on 24,5 vuotta ja vaihtoehdon C 22,6 vuotta. Laitteistojen valmistajien mukaan kaasuttimen käyttöikä on 20–25 vuotta, mikä tarkoittaa, ettei kumpikaan vaihtoehto ehtisi välttämättä maksaa hankintahintaansa takaisin.

CHP-laitosten käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin sisältyvät huollot, vakuutukset, kaasumoottorin uusiminen, korjaukset ja hallinnointikustannukset. Herkkyysanalyysi kannattaa suorittaa muuttujan eri arvoilla, sillä arviot pien-CHP-laitosten käyttö- ja kunnossapitokustannusten suuruudesta vaihtelee merkittävästi lähteestä riippuen. Käyttö- ja kunnossapitokustannusten vaikutus nähtävissä taulukossa 23.

Taulukko 23. CHP-laitosten käyttö- ja kunnossapitokustannusten vaikutus CHP-laitosten kannattavuuteen.

Käyttö- ja kunnossapito [€/MWh]	Vaihtoehto B	Vaihtoehto C
	Vuosituotot [€/a]	
3	-27 020	-10 500
4	-32 069	-16 366
5	-37 119	-22 233
6	-42 168	-28 100
7	-47 217	-33 966
8	-52 266	-39 833

Tässä tapauksessa käyttö- ja kunnossapitokustannusten suuruudella ei ole investointivaihtoehtojen kannattavuuden kannalta merkitystä, sillä mikään esitetyistä arvoista ei muuta investointeja kannattavaksi.

Investointilaskelmissa laskentakorkokannalla tarkoitetaan yhden vuoden koron prosenttiosuutta investoinnista. Koska laskelmissa ei oteta inflaatiota huomioon, korkokantana käytetään reaalikorkoa (taulukko 24).

Taulukko 24. Korkokannan vaikutus CHP-laitosten kannattavuuteen.

Korkokanta [%]	Vaihtoehto B	Vaihtoehto C	Vaihtoehto B	Vaihtoehto C
	Vuosituotot [€/a]		Korollinen takaisinmaksu (a)	
3	-12 782	22 275	21,9	16,2
4	-18 555	11 717	25,1	18,7
5	-24 541	771	28,7	21,5
6	-30 731	-10 550	32,8	24,7
7	-37 119	-22 233	37,5	28,3
8	-43 696	-34 263	42,8	32,4

Herkkyysanalyysin perustella vaihtoehdosta C on mahdollista saada kannattava vuosituottojen ja korollisen takaisinmaksuajan valossa, mikäli korkokanta on 3–5 %.

Tekes voi myöntää tukea tutkimus- ja kehittämishankkeisiin sekä uuden teknologian hankkeisiin. Jälkimmäisellä tarkoitetaan teknologioita, joita ei ole aiemmin sovellettu kaupallisessa mittakaavassa kotimaassa. (Tekes 2017.) Vaikka molemmat CHP-laitokset ovat pilottihankkeita, on kaasumoottori Pesolan ym. (2014,

32) mukaan perinteisin CHP-tekniikka. Viimeinen herkkyyssanalyysi on kuitenkin skenaario, jossa molemmille laitoksille myönnetään uuden teknologian korotettua tukea eli 20–40 % investointikustannuksista (taulukko 25).

Taulukko 25. Uuden teknologian investointituen vaikutus CHP-laitosten kannattavuuteen.

Investointituki	Vaihtoehto B	Vaihtoehto C	Vaihtoehto B	Vaihtoehto C
[%]	Vuosituotot [€/a]		Korollinen takaisinmaksu (a)	
20	-14 611	17 293	30,0	22,6
30	-3 357	37 056	26,3	19,8
40	7 897	56 819	22,5	17,0

CHP-laitosinvestoinnit muodostuisivat kannattaviksi, mikäli investoinnit laskettaisiin uuden teknologian piiriin ja siihen liittyvä investointituki olisi korkein mahdollinen.

## 6.2 Johtopäätökset

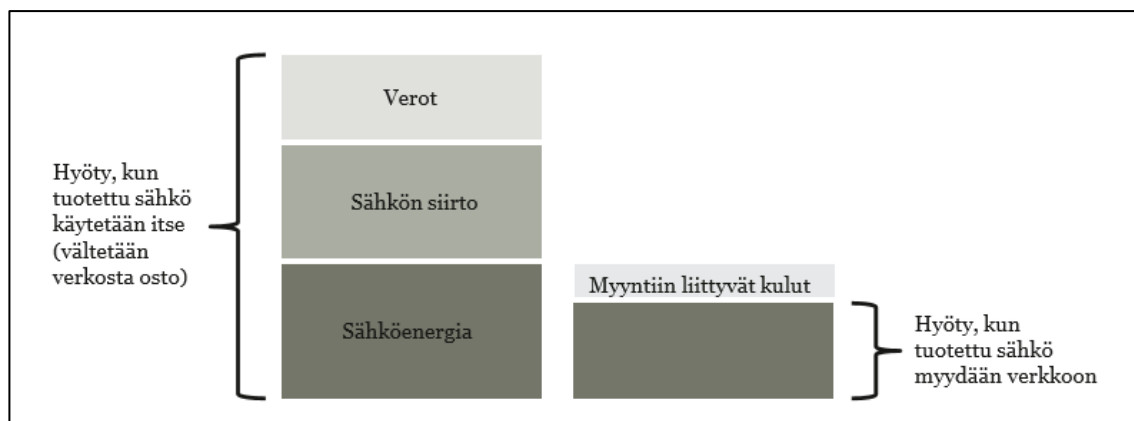
Taloudellisen tarkastelun valossa kumpikaan tarjottu CHP-laitos ei muodostunut kannattavaksi. Herkkyyssanalyysit vahvistivat kannattavuuslaskelmien johtopäätökset oikeansuuntaisiksi. Heikon kannattavuuden merkittävimmät syyt ovat korkeat investointikustannukset sekä suhteellisen edullinen verkkosähkön hinta. CHP-laitokset olisivat mahdollisesti kilpailukykyisiä verrattaessa verkkosähkön ja kaukolämmön hintaan. Myös kohteen sähkönkulutuksen voimakas vaihtelu vuorokauden aikana lisää CHP-tuotannon heikkoa kannattavuutta.

Kannattavimmaksi ratkaisuksi osoittautui uuden biokattilan investointi. Merkittävimmät syyt tähän ovat edullinen polttoaine, kattiloiden korkea käyttöikä, matalat käyttö- ja kunnossapitokustannukset sekä yrityksen tontilta valmiiksi löytyvä yhteensopiva tila ja valmis lämmönjakeluverkko. Uuden kattilan investointi ei aiheuta merkittäviä muutos- ja rakennustyöntarpeita. Tästä syystä muutostöiden osuus investointikustannuksista jää suhteellisen matalaksi verrattuna CHP-laitosten vaatimien muutostöiden osuuteen.

Parhaan kannattavuuden lisäksi biokattiloiden tekniikka on varmatoimisinta ja ylläpidosta sekä huoltotöistä aiheutuvat kustannukset ovat huomattavan matalat verrattuna CHP-laitoksiin. Pelkästään uusi kattila nykyisen syöttöruuvin ympärille on mahdollista hankkia noin 30 000 euron hintaan, mutta vaihtoehdon A sisältämä paketti tarjoaa turvaa ja parempaa säädeltävyyttä nykyiseen ruuvisyöttöseen arinapolttoon verrattuna.

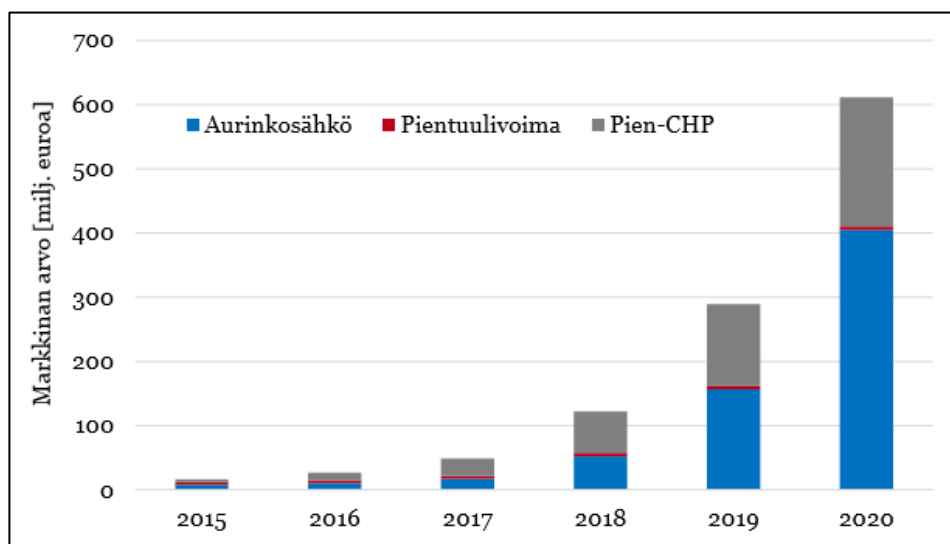
Kaikki tarjotut CHP-laitteistot perustuivat kaasutukseen ja kaasumoottorin toimintaan. Kaasutuslaitteistojen todennäköisiä suosion syitä ovat korkea sähköntuotannon hyötysuhde (25–40 %), muihin CHP-teknologioihin verrattuna maltilliset tuotantokustannukset sekä monipuolinen polttoainevalikoima. Suurimpina ongelmina myös kannattavuuden näkökulmasta on suurehko huollon tarve sekä se, ettei sähköntuotantoa ole mahdollista ohittaa lämmitystehon lisäämiseksi kuten esimerkiksi höyryturbiineissa. Tämä tarkoittaa myös sitä, ettei lämmöntuotanto ole mahdollista sähköntuotannollisten ongelmien sattuessa. Lisähaasteita aiheuttaa kummankin tarjotun CHP-laitteiston pilottivaihe. Laitteita on testattu vain hakkeella, joten kutterinlastun toimivuudesta polttoaineena ja sen mahdollisesti aiheuttamista ongelmista ei ole testituloksia. Pilottihankkeiden mahdolliset toimintaongelmat ja niiden aiheuttamat tuotannon seisaukset kävisivät kalliiksi Penttilän Puu Oy:lle, joka ei ole otollinen pilottikohde höylätavaran tuotantomääriensä takia.

CHP-laitosten ensisijainen tehtävä on sähköntuotanto omaan kulutukseen ja muodostuva lämpö on ns. prosessin sivutuote, joka on mahdollista ohjata hyötykäyttöön. Otollisin kohde CHP-laitokselle olisi tasaisemman sähkönkulutuksen omaavat kohteet, kuten sairaalat ja hotellit. Penttilän Puu Oy:n suuret sähkötehotarpeen muutokset aiheuttavat sähköomavaraisuutta tavoiteltaessa merkittävän hukkasähköntuotannon verkkosähkön edullisimpina vuorokauden tunteina. Kuvassa 33 esitettynä pientuotetun sähkön itse kuluttamisen hyödyt suhteessa sähkön myymiseen.



Kuva 33. Sähkön osto- ja myyntihinnan rakenne sekä mittakaava pientuotannon hyödyistä (Kuva: Pesola 2014, 16).

Pien-CHP-teknologioiden tulevaisuudennäkymistä on ristiriitaista tietoa. Haaviston (2010, 2) mukaan pien-CHP-tuotanto biomassasta on voimakkaasti kasvava toimiala ympäri maailman ja kiinnostus sähkön pientuotantoa kohtaan on kasvussa sähkön hinnan noustessa. Pöyry Management Consulting Oy (2016, 50) taas arvioi tuoreemmassa julkaisussaan CHP-laitosinvestointien kannattavuuden olevan tulevaisuudessa epävarmaa ja useiden energiayhtiöiden pohtivan CHP-tekniikan korvaamista erillisellä lämmöntuotannolla tulevaisuudessa. Syynä tähän on alhainen sähkön hinta, jolla on merkittävä vaikutus pientuotannon kannattavuuteen. Ristiriitaisiin tietoihin saattaa sähkön hinnan vaihtelevan kehityksen lisäksi olla Pesolan ym. (2014, 8) mukaan se, ettei Suomessa ole kattavasti saatavilla tilastotietoa pien-CHP-laitosten kapasiteetista.



Kuva 34. Arvio verkkoon liitetyn piensähkötuotannon markkinakehityksestä Suomessa sekä CHP-tuotannon osuudesta (Pesola ym. 2014, 32).

Energiamarkkinaviraston (2013, 7) julkaisussa mainitaan viimeisen kolmen vuoden aikana pienteollisuuden tyyppikäyttäjäprofiiliin (T1) sähkön kiinteiden maksujen osuuden nousseen yli 31 %, mikä on suhteellisesti toiseksi eniten kaikista viidestä tyyppikäyttäjäprofiilista. Tämän lisäksi sähkön kokonaishinta on kääntynyt takaisin nousuun kesän 2016 hinnanlaskun jälkeen. Sähkön hinnan nousu ei ole näkynyt pienen mittakaavan yhteistuotannon markkinoilla kasvavana kannattavuutena, sillä useimmat opinnäytetyötä varten kartoitetut laitevalmistajat tai maahantuojat ovat viimeisen viiden vuoden aikana päätyneet konkurssiin tai suunnanneet tuotantonsa muihin energiantuotannon ratkaisuihin. Julkisten taloustietojen perusteella myös vaihtoehtojen B ja C tuoreimmat liikevoitot ja tilikauden tulokset vuodelta 2015 ovat selvästi negatiivisia.



Kuva 35. Penttilän Puu Oy:n höyläämörakennus. Taustalla Lakan Betoni Oy (Kuva: Toni Kortelainen 2017).

## 7 Päätäntö

### 7.1 Toimenpidesuosituksset

Luvussa 5 esitettyjen tuloksien ja luvun 6 herkkyyksianalyysien pohjalta voidaan arvioida pien-CHP-laitosinvestointien olevan kannattamattomia. Suositeltavaa on hankkia uusi biokattila, jossa on mukana biopoltin ja ohjauskeskus. Investoinnin kokonaishinnaksi on arvioitu 100 000 euroa, mutta kustannus voi nousta korkeammaksi, mikäli uudet laitteet eivät ole yhteensopivia nykyisen polttoaineen syötön tai muiden liitännöiden kanssa. Biopoltin ei ole välttämätön investointi, mutta se pienentää takatuliriskiä nykyiseen ruuvisyöttöiseen arinapolttoon verrattuna ja nostaa samalla kattilan hyötysuhdetta (Paukkunen 2017). Mukana tuleva ohjauskeskus parantaa säädeltävyyttä ja helpottaa käyttöä. Pelkkiä kattiloita on saatavissa nykyisen syöttöruuvien mittojen mukaan rakennettuna noin 30 000 euron hintaan. Hinta on veroton, eikä sisällä asennuksia.

Kattilan uusiminen kannattaa suorittaa mahdollisimman pian, mikäli arviot kutterinlastun polttoon menevästä määrästä pitävät paikkansa. Arvioidun määrän energiasisältö on yli 8 000 MWh vuodessa, jolloin nykyisen kattilan hyötysuhteeksi ympäri vuoden nimellisteholla ajettaessa saadaan 54 %. Mikäli uuden investoinnin hallintalaitteisto ei sisällä lämmöntuottomittaria, on sellaisen hankkiminen suositeltavaa tulevaisuudessa lämmönkulutuksen seuraamiseksi (Piippo 2017).

Mikäli nykyisen kattilan hyötysuhteen arvio on oikeansuuntainen, on uusi 500 kW:n biokattila hivenen ylimitoitettu. Toisaalta Josek Oy (2016, 19) ennustaa paikalliselle metsä- ja rakennusteollisuudelle sekä muille rakentamisen toimialoille nostetta tulevaisuudessa. Vaikka hintakilpailu on kovaa, odotetaan alueen sahatavaroiden (vast.) viennin nousevan jopa 10 %. Mikäli ennuste pitää paikkansa, saattaa Penttilän Puu Oy:n lämmöntarve nousta kasvavan tuotannon seurauksena.

## 7.2 Jatkotutkimusaiheet

Vaikka Penttilän Puu Oy on ilmaissut haluttomuutensa kutterinlastun puristamisesta pelletiksi osana tuotantoprosessia, se saattaisi olla sopiva jatkotutkimuksen kohde. Yksi syy on tarjottu biokattila- ja poltinpaketti, joka sisältää pelletöintikoneen. Mikäli nykyisen kattilan hyötysuhde on todellisuudessa yhtä matala kuin mihin polttoaineen kulutusarvio viittaa, saattaa omaan käyttöön menevän kutterinlastun osuus laskea yli kolmanneksella kattilainvestoinnin myötä. Siitä seuraa myyntiin menevän osuuden merkittävä kasvu, jolloin myytävästä osuudesta saatava korvaus kannattaa maksimoida. Korkeamman kysynnän ja myyntihinnan lisäksi pelletin kuljettaminen on taloudellisesti järkevämpää. Tässä skenaariossa pelletöinnin kulut ja tuotot on suositeltavaa selvittää ennen kattilainvestointia. Paukkusen (2017) mukaan kutterinlastun kosteus ja hienojakoisuus otettujen näytteiden perusteella voisi mahdollistaa pelletöinnin ilman murskausta.

Esimerkiksi tällaiseen lopputulokseen päädyttiin Lieksan Teollisuuskylä Oy:n kutterilastun pelletöinti -selvityksessä (2014):

Hintavertailun perusteella kutterilastu kannattaisi myydä jalostettuna, puristettuna joko pelleteiksi tai briketeiksi tai paalattuna kivi-  
vikkeeksi, ja minimoida suoraan irtotavarana polttoon myytävä määrä. Kutterilastusta puristettu pelletti on helpompi myydä kuluttajamarkkinoilla kuin sahanpurusta puristettu pelletti. Oleellista hintalisiä ei kuitenkaan saada. (Hiltunen & Klemetti 2014, 2.)

Toisaalta Penttilän Puu Oy on saanut tietoonsa muilta höyläämöiltä, ettei pelletöinnin testaus osana tuotantoprosessia ole osoittautunut kannattavaksi ja tavoiteltu hyöty on jäänyt saamatta. (Asikainen 2016.)



## Lähteet

- Aalto University Wiki. 2009. Investointilaskelmat. <https://wiki.aalto.fi/display/TU22/8.+Investointilaskelmat>. 20.1.2017.
- Aaltonen, J. & Ukkonen, J. 2008. Pienet alle 4 MW yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto mahdollisuudet. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/39675/Pienet%20chp%20laitokset.pdf>. 31.3.2017.
- AEE INTEC. Bioenergy in sugar production. [http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Bioenergy\\_in\\_sugar\\_production](http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Bioenergy_in_sugar_production). 12.1.2017.
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. VTT. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>. 10.1.2016.
- Ariterm Oy. 2016. Biolämpöopas. <http://www.ariterm.fi/app/uploads/2014/02/Biol%C3%A4mp%C3%B6pas.pdf>. 4.1.2017.
- Asikainen, I. 2016. Toimitusjohtaja. Penttilän Puu Oy. Haastattelu. 16.9.2016.
- BIOS Bioenergiesysteme GmbH. 2016. Stirling-engine. <http://www.bios-bioenergy.at/en/electricity-from-biomass/stirling-engine.html>. 11.1.2017.
- Bäckman, A. 2014. Bioenergiaselvitys. Biopohjaisen lämmöntuotannon ja biopohjaisen sähkön ja lämmön yhteistuotannon vaatima tekniikka ja kannattavuus sekä biomassan saatavuus Paraisten kaupungin saaristo-osissa. Käännös. [http://www.parainen.fi/html/dynasty/fi\\_FI/kokous/20153777-10-1.PDF](http://www.parainen.fi/html/dynasty/fi_FI/kokous/20153777-10-1.PDF). 15.3.2017.
- DomusClassica. 2017. Purueriste, sahanpuru 20 kg. <https://www.domusclassica.fi/tuote/purueriste-sahanpuru-20-kg/310-006-12/>. 26.3.2017.
- Energiamarkkinavirasto. 2013. Sähkön siirtohintatariffien kehitys 2000-2013. [https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Sahkon\\_siirtohintatariffienkehitys2013.pdf/49f73b2d-f227-473f-b510-fb77a76f18e4](https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Sahkon_siirtohintatariffienkehitys2013.pdf/49f73b2d-f227-473f-b510-fb77a76f18e4). 6.4.2017.
- Energiamarkkinavirasto. 2017. Sähkön hintatilastot. Sähkön siirron verkonhaltijakohtaiset keskihinnat 2002 lähtien (XLS). <https://www.energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot>. 29.3.2017.
- Energy Solutions Center. 2016. CHP technologies. <http://understandingchp.com/chp-applications-guide/4-chp-technologies/>. 11.1.2016.
- Europaeus, V. 2014. Puubiomassa kaasutukseen perustuva hajautettu energiantuotanto. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <https://www.doria.fi/xmlui/handle/10024/94329>. 6.1.2017.
- Flyktman, M. 2013. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto biomassasta. VTT seminaari: Puuhakkeesta sähköä ja lämpöä – pienen kokoluokan kaasutustekniikan kehitys ja tulevaisuus. VTT. [http://www.vtt.fi/files/news/2013/13062013/06\\_Sahkon\\_ja\\_lammon\\_yhteistuotanto.pdf](http://www.vtt.fi/files/news/2013/13062013/06_Sahkon_ja_lammon_yhteistuotanto.pdf). 8.1.2017.
- Forbes. 2013. 12 hydrogen and fuel cell stocks. <http://www.forbes.com/sites/tomkonrad/2013/12/11/twelve-hydrogen-and-fuel-cell-stocks/#5f334dfd326d>. 19.1.2017.
- Fortum. 2017. Lämpökartta. Google Maps karttatiedot. <http://lampokartta.fortum.com/>. 7.2.2017.
- Foster, P.R. 2011. Innovative Rotary Displacer Stirling Engine: Sustainable Power Generation for Private and Fleet Vehicle Applications. Virginia

- Tech. The Journal of Technology Studies. Electronic Journals. Volume 37, Number 2. <https://scholar.lib.vt.edu/ejournals/JOTS/v37/v37n2/foster.html>. 20.3.2017.
- Fuel Cell Markets. PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cells Portal Page. [http://www.fuelcellmarkets.com/fuel\\_cell\\_markets/phosphoric\\_acid\\_fuel\\_cells\\_pafc/4,1,1,2507.html](http://www.fuelcellmarkets.com/fuel_cell_markets/phosphoric_acid_fuel_cells_pafc/4,1,1,2507.html). 20.1.2016.
- Gasek Oy. 2017. Laitteistotiedustelu. Gasek Oy. [td.kortelainen@gmail.com](mailto:td.kortelainen@gmail.com). 8.2.2017.
- Granö, U.-P. 2008. Pienempiä CHP- yksiköitä. HighBio-Interreg Pohjoinen 2008 – 2011. Projekti info 05. Kokkolan yliopistokeskus Chydenius. <https://www.chydenius.fi/tutkimus/soveltava-kemia/julkaisut-ja-raportit/highbio>. 9.1.2017.
- Granö, U.-P. 2010. CHP vaihtoehtona energiaosuuskunnille. HighBio-Interreg Pohjoinen 2008 – 2011. Projekti info 45. Kokkolan yliopistokeskus Chydenius. <https://www.chydenius.fi/tutkimus/soveltava-kemia/julkaisut-ja-raportit/highbio>. 6.1.2017.
- Haapakoski, J. 2017. Toimitusjohtaja. Volter Oy. Laitteistotiedustelu. [td.kortelainen@gmail.com](mailto:td.kortelainen@gmail.com). 9.2.2017.
- Haavisto, T. 2010. Puupolttoaineisiin perustuvat pien- CHP tekniikat. Raportti V1.1. Selvitys hankkeeseen: ”Bioenergian tuotteistaminen liiketoiminnaksi”. Joensuu. Wattson Tech Oy. [http://www.karelia.fi/biostuli/materiaalit/Pien-CHP-katsaus\\_raportti\\_v11.pdf](http://www.karelia.fi/biostuli/materiaalit/Pien-CHP-katsaus_raportti_v11.pdf). 5.1.2017.
- Halinen, M. 2007. Polttokennot. AS.84-3134 Energiatekniikan automaatio. VTT. <http://automation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/halinen107.pdf>. 20.1.2017.
- Harju, P. 2010. Lämmitystekniikan oppikirja. Kouvola: Penan Tieto-opus.
- Heikkilä, I. & Kiuru, T. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Ylijäämälämpöenergia-analyysit. Yhteenvetoraportti. Motiva. [https://www.motiva.fi/files/8808/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_-\\_ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf](https://www.motiva.fi/files/8808/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_-_ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf). 19.3.2017.
- Helynen, S. & Oravainen, H. 2002. Polttopuun pientuotannon ja –käytön kehitystarpeet. Teknologia katsaus 124/2002. VTT prosessit. Tekes. <https://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/polttopuu.pdf>. 10.1.2017.
- Hiltunen, A. & Klemetti, O. 2014. Kutterilastun pelletöinti -selvitys. Tiivistelmä. Puun käytön laaja-alaistaminen. Proj.nr. A31942. [http://puunkaytto.lieksada.fi/userfile/files/raportit/27\\_6\\_2014/Kutterinlastun\\_pelletointi-selvitys.pdf](http://puunkaytto.lieksada.fi/userfile/files/raportit/27_6_2014/Kutterinlastun_pelletointi-selvitys.pdf). 7.4.2017.
- Hintikka, J. 2004. Biomassapohjaiset mikro-CHP-tekniikat. Bioenergiakeskuksen julkaisusarja (BDC publications) nro 8. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20523/mikro-chp-raportti\\_nro8.pdf?sequence=3](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20523/mikro-chp-raportti_nro8.pdf?sequence=3). 6.1.2017.
- Hirvonen, M. 2016. Tuntiopettaja. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto. Uusiutuva energia; osa A energian tuotanto ja käyttö. Kurssimateriaali. Karelia-amk.
- Hirvonen, R. (toim.). 2002. Suomen energiaviosio 2030. Suomenkielinen tiivistelmä. VTT prosessit. VTT. [http://www.vtt.fi/files/projects/energy\\_book\\_series/ev\\_2030\\_tiivistelma.pdf](http://www.vtt.fi/files/projects/energy_book_series/ev_2030_tiivistelma.pdf). 10.1.2017.
- Josek Oy. 2016. Alueelliset kehitysnäkymät syksy 2016. <http://www.josek.fi/files/file/Alueelliset%20kehitysn%C3%A4kym%C3%A4t%20syksy%202016.pdf>. 31.3.2017.
- Kantalainen, K. 2017. Myyntijohtaja. Ariterm Oy. Puhelinhaastattelu 9.2.2017.

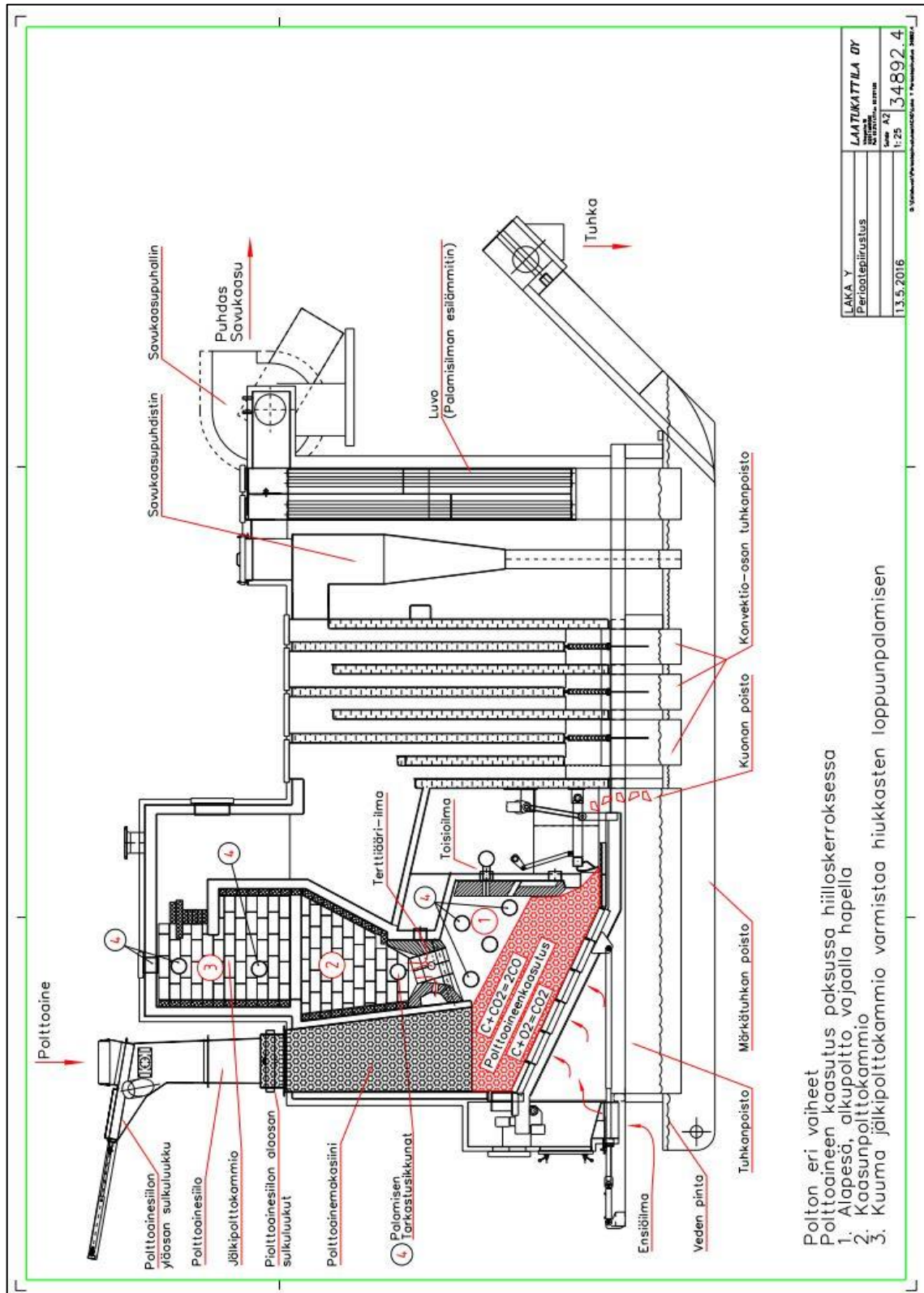
- Karjalainen, L. 2005 a. Optimi. Matematiikkaa talouselämän ammattilaisille. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.
- Karjalainen, L. 2005 b. Liiketalouden matematiikka 2. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.
- Karjalainen, T. 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto. Cemis-Oulu. Kajaanin yliopistokeskus. Oulun yliopisto. <http://www.oulu.fi/sites/default/files/content/files/Pien%20CHP%20raportti.pdf>. 31.3.2017.
- Knuuttila, K. (toim.). 2003. Puuenergia. Jyväskylä: Gummerus.
- Kokkonen, A. 2016. Projektipäällikkö. Karelia-ammattikorkeakoulu. Sirkkalan Energiapuiston esittelykierros 29.9.2016.
- Koskitukki. Kutterinpuru PDF. Koskitukki Oy. <http://www.koskitukki.fi/bioenergia/>. 10.1.2016.
- Kuitunen, K. 2014. Valaisinuudistuksen investoinnin kannattavuuden tutkiminen. Opinnäytetyö. Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma. Mikkelin ammattikorkeakoulu. [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/79763/Opinnaytetyo%20Sahkovoimatekniikka%20Kimmo%20Kuitunen\\_14-06-2014\\_final.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/79763/Opinnaytetyo%20Sahkovoimatekniikka%20Kimmo%20Kuitunen_14-06-2014_final.pdf?sequence=1). 23.3.2017.
- Lampinen, M. 2017. Lämmityskattiloista. LaatuKattila Oy. Td.kortelainen@gmail.com. 7.2.2017.
- Laurila, J. & Lauhanen, R. 2011. Pienen kokoluokan CHP-teknologiasta lisää voimaa Etelä-Pohjanmaan metsäkeskusalueelle. Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisusarja B. Raportteja ja selvityksiä 53. <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/33460/B53.pdf?sequence=1>. 2.3.2017.
- Liukko, A. 2016. Uusiutuvan energian tukimallit valinkauhassa. Uusiutuvan energian ajankohtaispäivä 26.1.2016. Työ- ja elinkeinoministeriö. <https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Anja+Liukko+Ajankohtaisp%C3%A4iv%C3%A4%2026.01.2016.pdf/25d54584-3ef6-4244-a77a-cff56e07db60>. 27.2.2017.
- Maatilan Pellervo. 2002. Kuivikkeet. [http://www.pellervo.fi/maatila/mp10\\_02/kuivikkeet.htm](http://www.pellervo.fi/maatila/mp10_02/kuivikkeet.htm). 10.1.2017.
- Metla. Puupolttoaineiden käyttö energiantuotannossa. Laatuseloste. <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/mtt/laatuseloste/puupoltto.pdf>. 10.1.2016.
- Motiva. 2012. Sähköverkkoon liittyminen. Opas sähkön pientuottajalle. [http://www.motiva.fi/files/5724/Opas\\_sahkon\\_pientuottajalle\\_2012.pdf](http://www.motiva.fi/files/5724/Opas_sahkon_pientuottajalle_2012.pdf). 2.3.2017.
- Motiva. 2014a. Stokeripoltin. [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/puulammitys\\_kiinteistoissa/keskuslammityskattilat/stokeripoltin](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/puulammitys_kiinteistoissa/keskuslammityskattilat/stokeripoltin). 3.1.2017.
- Motiva. 2014b. Pien-CHP. [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/bioenergian\\_tuotantotekniikka/pien-chp](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_tuotantotekniikka/pien-chp). 9.1.2017.
- Motiva. 2014c. Bioenergian tuotantotekniikka. Rakennuslupa. [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/bioenergian\\_tuotantotekniikka/saantely/rakennuslupa](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_tuotantotekniikka/saantely/rakennuslupa). 27.2.2017.
- Motiva. 2016. Keskuslämmityskattilat.

- [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/puulammitys\\_kiinteistoissa/keskuslammituskattilat](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/puulammitys_kiinteistoissa/keskuslammituskattilat). 3.1.2017.
- Motiva. 2017. Investointituet uusiutuvalle energialle. [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/uusiutuva\\_energia\\_suomessa/uusiutuvan\\_energian\\_tuet/investointituet\\_uusiutuvalle\\_energialle](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuvan_energian_tuet/investointituet_uusiutuvalle_energialle). 27.2.2017.
- Määttä, K. 2016. Biokaasu, metsähake ja puupolttoaineet. Eräiden uusiutuvien energialähteiden sääntelystä ja sääntelyn kehittämistarpeista. PTT Työpapereita 180. Pellervon taloustutkimus PTT. <http://www.ptt.fi/media/tp180.pdf>. 28.3.2017.
- Northern Utilities. Combined Heat and Power. <http://northernutilities.co.uk/combined-heat-and-power/>. 15.3.2017.
- Oulun rakennusvalvonta. 2016. Puuta käyttävät CHP-laitteet rakennusten ja rakennusryhmien energialähteenä. Suunnitteluohje 2015. [http://www.tulevaisuudentalot.fi/wp-content/uploads/2014/11/CHP-ohjekortti\\_20160224.pdf](http://www.tulevaisuudentalot.fi/wp-content/uploads/2014/11/CHP-ohjekortti_20160224.pdf). 6.4.2017.
- Paikkatietoikkuna. 2017. Karttaikkuna. <http://www.paikkatietoikkuna.fi/web/fi/kartta>. 7.2.2017.
- Pappinen, M. 2017. Toimitusjohtaja. Konepaja M. Pappinen. Haastattelu 9.1.2017.
- Paukkunen, S. 2017. Projektiasiantuntija. Karelia-ammattikorkeakoulu. Keskustelu 22.2.2017.
- Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. Porvoo: WS Bookwell Oy.
- Pesola, A., Hoviniemi, H., Vehviläinen, I. & Vanhanen, J. 2010. Selvitys hajauteusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla. Loppuraportti. Motiva. [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). 5.1.2017.
- Pesola, A., Vanhanen, J., Hagström, M., Karttunen, V., Larvus, L., Hakala, L. & Vehviläinen, I. 2014. Sähkön pientuotannon kilpailukyvyn ja kokonaistaloudellisten hyötyjen analyysi. Loppuraportti. Gaia Consulting Oy. <http://docplayer.fi/671154-Sahkon-pientuotannon-kilpailukyvyn-ja-kokonaistaloudellisten-hyotyjen-analyysi.html>. 6.1.2017.
- Piippo, A.-E. 2017. Kaukolämpöpäällikkö. Miilun lämpölaite. Outokummun Energia Oy. Keskustelu 17.3.2017.
- Pikes. 2017. Sähkön pientuotannon kannattavuus. Pielisen Karjalan Kehittämiskeskus Oy. <http://www.pikes.fi/sahkon-pientuotannon-kannattavuus>. 29.3.2017.
- Puhakka, A., Alakangas, E., Alanen, V.-M., Airaksinen, L., Soini, R., Siponen, T. & Kainulainen, S. 2001. Hakelämmitysopas. Tulipasilli-opas-sarjan 1. osa. Helsinki, Joensuu: Motiva.
- Pulkinen, P. 2005. Taloutta ja tilastoja. Liiketalouden matematiikka. Helsinki: WSOY.
- Purhonen, M. 2010. ORC-prosessin käyttö sähköntuotannossa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/66734/nbnfi-fe201101071019.pdf?sequence=3>. 19.3.2017.
- Pöyry Energy Oy. 2006. Sähkön pientuotannon liittäminen verkkoon. [http://www.tornionlaaksonsahko.fi/uploads/files/Sahkon\\_pientuotannon\\_liittaminen\\_verkkoon.pdf](http://www.tornionlaaksonsahko.fi/uploads/files/Sahkon_pientuotannon_liittaminen_verkkoon.pdf). 19.3.2017.

- Pöyry Management Consulting Oy. 2016. EU:n 2030 ilmasto- ja energiapolitiikan linjausten toteutusvaihtoehdot ja Suomen omien energia- ja ilmastotavoitteiden toteutuminen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 28/2016. [http://tietokayttoon.fi/documents/10616/2009122/28\\_EU+2030.pdf/c56de1eb-1790-49a3-ac52-762e2d34bbef?version=1.0](http://tietokayttoon.fi/documents/10616/2009122/28_EU+2030.pdf/c56de1eb-1790-49a3-ac52-762e2d34bbef?version=1.0). 26.3.2017.
- Rockwell, K. The efficiency of a sophisticated diesel. <http://www.kenrockwell.com/190d/>. 1.4.2017.
- Suomen Asiakastieto Oy. 2016. Yritysten taloustiedot. <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/penttilan-puu-oy/18148193/taloustiedot>. 3.1.2017.
- Säätötuli Oy. Biopolttimen toiminta. [http://www.saatotuli.fi/tmp\\_saatotuli2010\\_site\\_0.asp?sua=2&lang=1&s=191](http://www.saatotuli.fi/tmp_saatotuli2010_site_0.asp?sua=2&lang=1&s=191). 14.3.2017.
- Takalo, H. 2013. Mikro- ja pien-CHP. Teknologia- ja laitekantaselvitys sekä kannattavuuden tarkastelu tapausesimerkin avulla. Iin Micropolis Oy. [http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/004\\_13-Mikro-ja-pien-CHP-Teknologia-ja-laitekantaselvitys-sek%C3%A4-kannattavuuden-tarkastelu-tapausesimerkin-avulla.pdf](http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/004_13-Mikro-ja-pien-CHP-Teknologia-ja-laitekantaselvitys-sek%C3%A4-kannattavuuden-tarkastelu-tapausesimerkin-avulla.pdf). 20.1.2017.
- Tamminiemi. Sahanpurut ja kutterinpurut. <http://www.tamminiemi.com/purut/>. 26.3.2017.
- Tampereen teknillinen yliopisto. 2013. Luentoesitys 6. SMG-4500 Tuulivoima. <https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4500/2013/luento6.pdf>. 31.3.2017.
- Tekes. 2017. Energiatuki. <https://www.tekes.fi/rahoitus/pk-yritys/energiatuki/>. 27.2.2017.
- Teknologiatoimintakeskus. 2017. Polttokennot. <http://teknologiatoimintakeskus.fi/fi/jasenet/toimialaryhmat/polttokennot>. 20.1.2017.
- Teräsvirta, A. 2016. Voimalaitosmittakaavan polttokennojärjestelmien teknis-taloudellinen vertailu. Prizztech Oy. <http://docplayer.fi/1977708-Voimalaitosmittakaavan-polttokennojärjestelmien-teknis-taloudellinen-vertailu-antti-terasvirta-prizztech-oy.html>. 20.1.2017.
- Tilastokeskus. 2013. Kuluttajien luottamus ennallaan – kuluttaminen ei houkuta. [http://tilastokeskus.fi/til/kbar/2013/03/kbar\\_2013\\_03\\_2013-03-27\\_tie\\_001\\_fi.html?ad=notify](http://tilastokeskus.fi/til/kbar/2013/03/kbar_2013_03_2013-03-27_tie_001_fi.html?ad=notify). 29.3.2017.
- Tjeder, O. 2009. Höyry- ja kaasuturbiinin mallintaminen prosessisimulointiohjelmaan. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/44073/nbnfi-fe200902101168.pdf?sequence=3>. 12.1.2017.
- Toholammin Energia Oy. 2014. ORC-laitos. <http://www.toholamminenergia.fi/lammityskattilat/orc-laitos/>. 19.3.2017.
- Tuomi, S. 2013. Selvitys rakennusten biokattilalämmittäjien energiatehokkuusneuvonnan tuottamiseksi ja neuvonnan vaikutusten arvioimiseksi. Biokattilaneuvonta selvitys. Motiva. [http://www.motiva.fi/files/9249/Selvitys\\_rakennusten\\_biokattilalämmittäjien\\_energiatehokkuusneuvonnan\\_toteuttamiseksi\\_ja\\_neuvonnan\\_vaikutusten\\_arvioimiseksi.pdf](http://www.motiva.fi/files/9249/Selvitys_rakennusten_biokattilalämmittäjien_energiatehokkuusneuvonnan_toteuttamiseksi_ja_neuvonnan_vaikutusten_arvioimiseksi.pdf). 4.1.2017.
- Työ- ja elinkeinoministeriö. Energiatuki. <http://tem.fi/energiatuki>. 27.2.2017.
- Vartiainen, E., Luoma, P., Hiltunen, J. & Vanhanen, J. 2002. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO<sub>2</sub>-päästöt. Gaia Group Oy. Helsinki: Edita. <http://docplayer.fi/1429355-Hajautettu-energiantuotanto-teknologia-polttoaineet-markkinat-ja-co-2-paastot.html>. 5.1.2017.

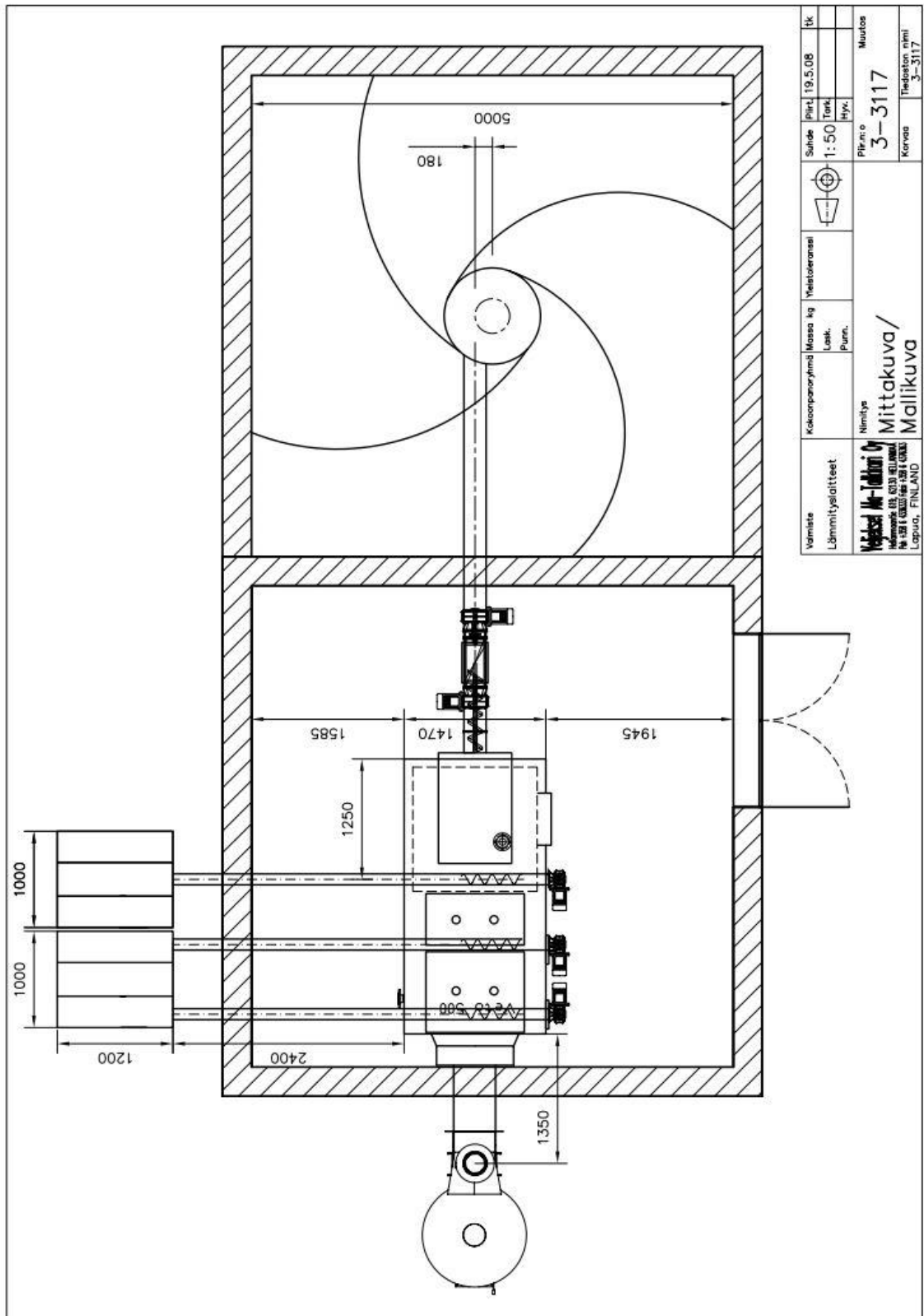
- Vattenfall. 2014. Kaukolämpö – toimintaperiaate. <https://corporate.vattenfall.fi/tietoa-energiasta/energianjakelu/kaukolampo/toimintaperiaate/>. 6.1.2017.
- Vihanninjoki, V. 2015 Hajautettu energiantuotanto Suomessa: nykytila ja tulevaisuus sekä vaikutukset ilmanlaatuun. Suomen Ympäristökeskus SYKE. <http://www.syke.fi/download/noname/%7BDD119785-B537-45DE-AEF0-8360DCAB1BDF%7D/111845>. 6.1.2017.
- Väinämö, K. 2017. Toimitusjohtaja. Gasek Oy. Puhelinhaastattelu 23.2.2017.
- Västinsalo, J. 2017. Tarjous. Veljekset Ala-Talkkari Oy. [td.kortelainen@gmail.com](mailto:td.kortelainen@gmail.com). 28.2.2017.
- Wiksén, R. 1996. Lämpövoimaproessit. 572. Espoo: Otatieto.

## Periaatepiirustus Laatikattila Oy:n LAKA Y -kattilasta



Lähde: Lampinen 2017.

Mittakuva Veljekset Ala-Talkkari Oy:n VETO 500 -kattilasta



Lähde: Västinsalo 2017.



## Pien-CHP-teknologiat ja niiden keskeiset tekniset ominaisuudet

Tekniikka	Kaasu- moottorit	Pienhöyryturbiinit & - koneet	Kaasuturbiinit (mikroturbiinit)	Stirling- moottorit	Polttoennot	ORC- generaattorit
Kehitystaste (TRL)	Laajasti käytössä <sup>(9)</sup>	Laajasti käytössä <sup>(9)</sup>	Esikaupallinen <sup>(7)</sup>	Kehitysvaihe <sup>(4)</sup>	Kehitysvaihe /esikaupallinen <sup>(5)</sup>	Esikaupallinen <sup>(7)</sup>
Kokoluokka [kW <sub>e</sub> ]	10–20 000	100–500 000	1–1000	0,5–75	0,5–2000	50–10 000
Sähköntuotannon hyötysuhde [%]	25–40	15–35 ( $< 3 \text{ MW}_e$ )	n. 15	15–30	30–50	10–20
Yhteistuotannon hyötysuhde [%]	n. 80	75–85 ( $< 3 \text{ MW}_e$ )	n. 85	75–90	75–95	85–90
Arvioitu investointikustannus [€/kW]	550–900	300–1000	550–900	1350–3400	-	-
Käyttö- ja kunnossapito- kustannukset [€/MWh]	2–7	$< 2,7$	2–7	7–23	-	-
Tuotantokustannukset 8000 h/a [€/MWh]	27–30	17–44	27–30	35–62	-	-
Tuotantokustannukset 4000 h/a [€/MWh]	27–44	27–80	24–77	55–130	-	-
Polttoaine	Kaasu	Ei rajoitteita	Kaasu	Ei rajoitteita	Kaasu	Ei rajoitteita
Tyypillinen käyttöikä	15 vuotta	15 vuotta	15 vuotta	15 vuotta	1–15 vuotta	$> 20$ vuotta
Suurin tekninen vahvuus pien-CHP käytössä	Korkea sähkö- hyötysuhde	Tekniikan todistettu toimivan	Pieni huollon tarve	Pieni huollon tarve	Korkea sähkö- hyötysuhde	Hyvä sähkö- hyötysuhde myös osa- kuormalla
Suurin tekninen heikkous pien-CHP käytössä	Verrattain suuri huollon tarve	Sähköhyötysuhde osakuormalla	Polttoaineen ol- tava kaasumai- nen tai nestemäinen	Rajallinen sähkö- hyötysuhde	Lyhyt kestoaika	Rajallinen sähköhyötysuhde

Yhdistetty lähteistä: Pesola ym. 2014, 7, taulukko 1 & Karjalainen 2012, 10, taulukko 4, sekä Takalo 2013, 22, taulukko 4).

## Eri polttoaineiden soveltuvuus pien-CHP-tekniikoille

	Kaasu- ja dieselmoottorit	Mikroturbiinit	Stirling-moottorit	Polttokeuhot	Höyryturbiinit ja -koneet
Hiihi			•		•••
Turve			•		•••
Kierrätyspolttoaineet	•• (kaasutus)	•• (kaasutus)	•	•	•••
Kiinteä biomassa	•• (kaasutus)	•• (kaasutus)	••	•	•••
Dieselöljy	•••	•••	••		•
Bensiini	•	••	••	••	•
Raskas polttoöljy	•••	•	•		•
Orimulsion	••	•	•		•
Metanoli	•	••	••	••	•
Etanoli	•	••	••	••	•
Bioöljyt	••	••	••		•
LPG (nestekaasu)	••	•••	••	••	•
Vety	••	••	••	•••	•
Maakaasu	•••	•••	•••	•••	•
Biokaasut	•••	••	••	••	•

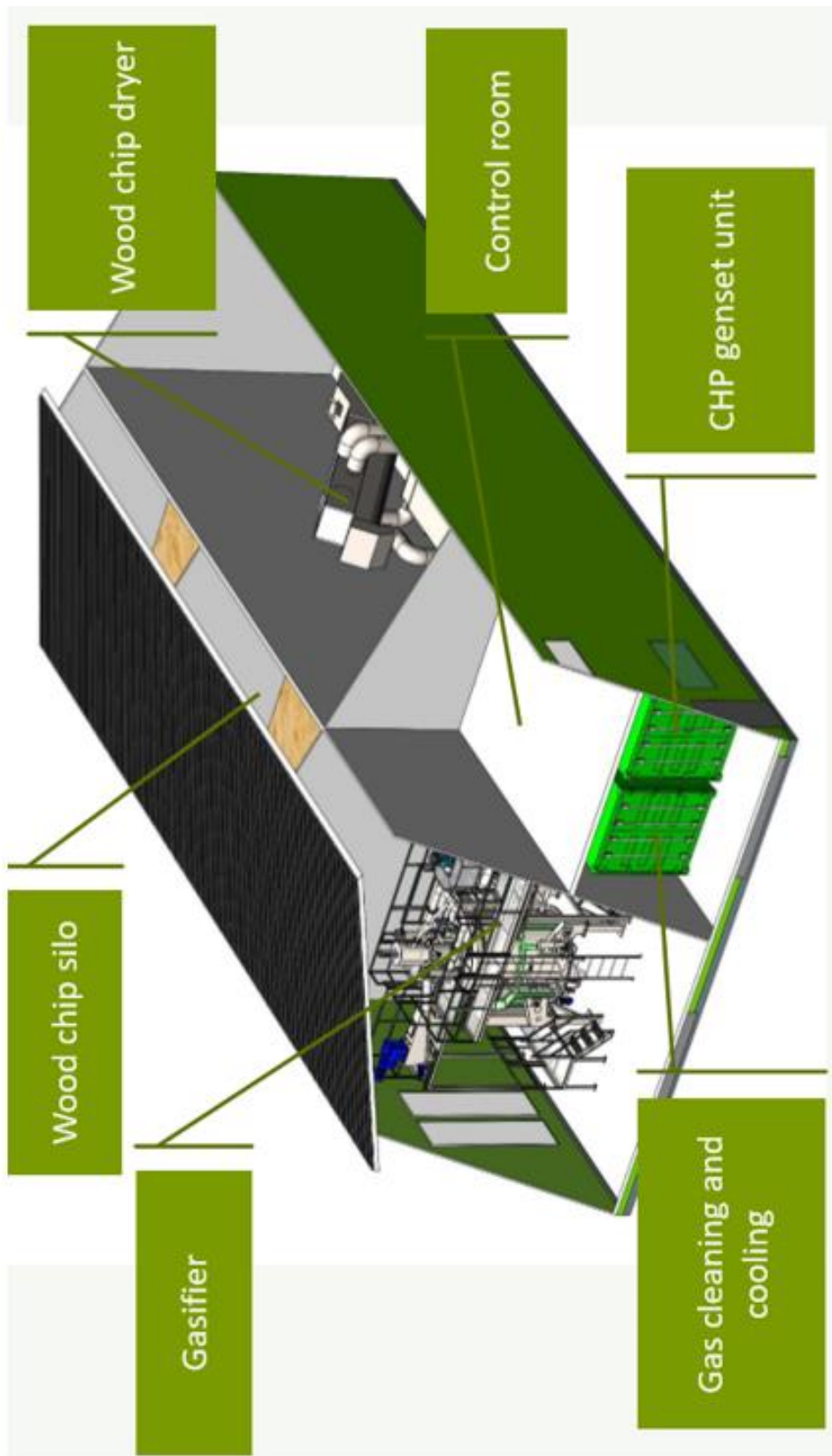
••• = nyt kaupallisesti merkittävä polttoaine CHP-laitteissa

•• = tulevaisuudessa mahdollisesti kaupallisesti merkittävä polttoaine

• = teknisesti mahdollinen, mutta ei todennäköisesti kaupallisesti merkittävä polttoaine

Lähde: Vartiainen ym. 2002, 26, taulukko 21

### Gasek Oy:n konsepti pien-CHP-laitoksesta



Lähde: ~~Gasek Oy~~ Gasek Oy 2017.

## Kutterinlastunäytteiden uunikuivauksen tulokset 22.2.2017

Kosteuden määrittäminen uunikuivauksella 21.2.-22.2.2017 Sirkkala	Astian paino [g]	Tuoreen näytteen paino [g]	Astia + tuore näyte [g]	Kuivan näytteen paino [g]	Astia + kuiva näyte [g]	Kosteus [%]	Vertailuarvo kost.mit.vaaka pika-analyysi [%]
Näyte 1.	9.66	78.09	87.75	69.53	79.19	10.96 %	10.62 %
Näyte 2.	10.03	80.78	90.81	71.9	81.93	10.99 %	9.59 %
Näyte 3.	10.01	80.49	90.50	71.61	81.62	11.03 %	9.75 %
Näyte 4.	9.37	77.08	86.45	68.41	77.78	11.25 %	10.23 %
Näyte 5.	11.01	76.04	87.05	67.68	78.69	10.99 %	
Näyte 6.	8.93	72.89	81.82	64.59	73.52	11.39 %	
Näyte 7.	9.66	87.36	97.02	77.48	87.14	11.31 %	
Näyte 8.	8.85	72.86	81.71	64.84	73.69	11.01 %	
Näyte 9.	9.00	87.73	96.73	77.51	86.51	11.65 %	
Näyte 10.	10.03	79.70	89.73	70.52	80.55	11.52 %	
<b>Yhteensä</b>		<b>793.02</b>					
<b>Keskisarvo</b>				<b>704.07</b>		<b>11.21 %</b>	<b>10.05 %</b>