

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Eki Kaulamo

PIEN-CHP-TUOTANNON KANNATTAVUUS KASVIHUONEYMPÄRISTÖSSÄ

Työn tarkastajat:

Tapio Ranta

TIIVISTELMÄ

Eki Kaulamo

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

PIEN-CHP-TUOTANNON KANNATTAVUUS KASVIHUONEYMPÄRISTÖSSÄ

Diplomityö

2020

70 sivua, 19 kuvaa ja 21 taulukkoa

Tarkastajat: Professori, Tapio Ranta

Hakusanat: Hajautettu energiantuotanto, Uusiutuva energia, CHP, ORC

Nykyään päivittäin saa lukea uutisia hiilijalanjäljestä ja kestävydestä energian tuotannossa ja kulutuksessa. Nämä samat asiat ovat esillä myös kasvihuoneiden ekologisuutta ja energiatehokkuutta suunniteltaessa. Suomessa kasvihuoneet tarvitsevat paljon energiaa sekä kasvihuoneiden lämmittämiseen että valaistuksen tuottamiseen. Perinteisesti lämpöä on tuotettu paikallisesti fossiilisilla polttoaineilla ja sähkö on ostettu valtakunnanverkosta. Suuntaus on nyt menossa ekologisempaan suuntaan, fossiilisista polttoaineista ollaan luopumassa ja tilalle ovat tulossa biopolttoaineet.

Tässä työssä selvitetään Famifarm Oy:n energiankulutusta ja vaihtoehtoja energian tuottamiseksi paikallisesti biopolttoaineilla. Famifarmilla on tällä hetkellä käytössä kiinteän polttoaineen kattila, jossa poltetaan turvetta ja haketta. Kattilan kapasiteetti on kuitenkin hieman liian pieni nykyiseen tuotantotarpeeseen, ja sen käyttöikä alkaa lähentyä loppua. Vaihtoehtoiseksi ratkaisuksi selvitetään CHP-tuotannon mahdollisuutta. Tässä työssä tutkitaan biopolttoainetta käyttävän höyrykattilan ja höyryturbiinin sekä ORC-turbiini soveltuvuutta Famifarmille. Työssä selvitetään tekniikoiden soveltuvuus Famifarmin kasvihuoneen kokoluokkaan, sekä niiden ekonominen kannattavuus. Tuloksista nähdään, että CHP-tekniikat soveltuvat myös kasvihuoneympäristöön.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology

School of Energy Systems

Energy Technology

Eki Kaulamo

Feasibility of small-scale combined heat and power production in connection with a greenhouse

Master's Thesis

2020

70 pages, 19 figures and 21 tables

Examiners: Professor, D. (Tech.) Tapio Ranta

Keywords: Distributed energy production, Renewable energy, CHP, ORC, Microturbine

Today, you can read daily about carbon footprint and sustainability in energy production and consumption. These are the same issues when it comes to sustainability and energy efficiency in greenhouses. In Finland, greenhouses need a lot of energy both to heat the greenhouses and to produce lighting. Traditionally, heat has been generated locally with fossil fuels and electricity has been purchased from the national grid. The trend is now moving towards a greener direction and fossil fuels are being abandoned and replaced with biofuels. This work investigates Famifarm Oy's energy consumption and alternatives for producing energy locally with biofuels. Famifarm currently has a solid fuel boiler that burns peat and wood chips. However, the capacity of the boiler is slightly too low for the current production need and the service life is starting to reach its end. Alternatively, the possibility of CHP production will be explored. This work investigates the suitability of a biofuel steam boiler and turbine or an ORC module for Famifarm. The thesis examines the applicability of the technologies to the size range of Famifarm and the economic profitability. The results show that CHP techniques are also applicable to the greenhouse environment.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|-----------|
| 1 JOHDANTO | 7 |
| 1.1 Tutkielman taustaa | 7 |
| 1.2 Tutkimusongelma, tavoitteet ja rajaukset | 7 |
| 1.3 Tutkimusmetodologia | 8 |
| 1.4 Tutkimuksen rakenne | 8 |
| 2 LÄMMÖN JA SÄHKÖN TARVE KASVIHUONEISSA | 9 |
| 2.1 Kasvihuoneet Suomessa | 9 |
| 2.2 Case: Famifarm..... | 9 |
| 2.3 Lämmön kulutus ja pysyvyys | 10 |
| 2.4 Sähkön kulutus ja pysyvyys..... | 17 |
| 2.5 Energian kulutuksien suhde | 20 |
| 3 PIENEN KOKOLUOKAN CHP-TUOTANNON VAIHTOEHDOT..... | 21 |
| 3.1 Höyryturbiini | 22 |
| 3.2 ORC..... | 24 |
| 3.3 Stirlingmoottorit | 25 |
| 3.4 Biokaasu | 26 |
| 4 MARKKINATILANNE | 28 |
| 4.1 Polttoaineet..... | 29 |
| 4.1.1 Turve | 31 |
| 4.1.2 Biomassa (metsähake ja murske) | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 5 ENERGIANTUOTANNON TUET | 34 |
| 5.1 Investointituet | 34 |
| 5.2 Syöttötariffit | 38 |
| 5.3 Verotus | 39 |
| | |
| 6 TARKASTELUUN VALITUT TUOTANTOVAIHTOEHDOT ORC JA HÖYRYTURBIINI | 41 |
| 6.1 Aineiston ja muuttujien kuvaus | 43 |
| 6.2 Aineiston keruu | 46 |
| | |
| 7 INVESTOINNIN KANNATTAVUUS | 47 |
| 7.1 Tarkastelun lähtötilanne | 47 |
| 7.2 Investointi laskelmat | 47 |
| 7.2.1 Kumulatiivinen nykyarvomenetelmä | 49 |
| 7.2.2 Annuiteettimenetelmä..... | 50 |
| 7.2.3 Sisäisen korkokannan menetelmä | 51 |
| 7.2.4 Nykyarvomenetelmä..... | 51 |
| 7.2.5 Korollinen takaisinmaksuaika | 52 |
| 7.3 Tulokset | 54 |
| 7.4 Herkkyystarkastelu | 56 |
| | |
| 8 TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI | 63 |
| | |
| 9 YHTEENVETO | 67 |

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | |
|--------|--|
| a | Vuosi |
| CHP | Combined heat and power |
| ESCO | European Skills, Competences, Qualifications and Occupations |
| i | Laskentakorkokanta |
| I | Investointikustannus |
| JA_n | Investoinnin jäännösarvo |
| KPA | Kiinteä polttoaine |
| MMM | Maa- ja metsätalousministeriö |
| Mwh | Megawattitunti |
| MW | Megawatti |
| m^2 | Neliometri |
| m^3 | Kuutiometri |
| n | Investoinnin pitoaika |
| ORC | Organic Rankine Cycle |
| RES | Renewable Energy Source |
| r | Sisäinen korkokanta |
| TEM | Työ- ja elinkeinoministeriö |
| q | Investoinnin juoksevasti syntyvät suoritukset vuodessa |

1 JOHDANTO

1.1 Tutkielman taustaa

Diplomityön aiheena on tutkia CHP-tuotannon (Combined Heat and Power) kannattavuutta kasvihuoneympäristössä. Kasvihuoneet ovat merkittäviä energiankuluttajia, ja suuri osa lopputuotteen hinnasta muodostuu käytettävän energian määrästä. Perinteisesti 2000-luvulle asti osa lämmöstä on tuotettu öljyllä ja maakaasulla, mutta se ei ole enää nykypäivää. Kasvihuoneyritykset ovat aloittaneet vaihtoehtoihin uusiutuviin energian lähteisiin investoimisen. Tarvittava lämpöteho voi olla suurempi kuin 5 MW (megawattia), jolloin myös CHP-tuotannon aloittamisesta tulee mielenkiintoista. Tarvittava sähköteho voi olla suuruusluokkaa 20–100 % lämpötehosta riippuen prosessista ja käytettävistä järjestelmistä. Tässä tutkimuksessa selvitetään höyryturbiinin ja ORC-prosessin (Organic Rankine Cycle) sopivuudet kasvihuoneille sekä verrataan niitä toisiinsa. Lisäksi määritetään sellainen kasvihuoneen kokoluokka, jossa investoinnit ovat kannattavia, sekä selvitetään lämmön ja sähkön kulutuksen suhteet vuodenaikojen mukaan.

Pien-CHP-tuotannon kannattavuutta on tutkittu eri ympäristöissä, mutta kasvihuoneille tehtyjä tutkimuksia on vähän tai ei ollenkaan. Erityispiirteenä kasvihuoneissa on korkea lämmitys- ja sähköenergian tarve ympäri vuoden, joten se poikkeaa näin ollen normaaleista kaukolämpökohteista.

1.2 Tutkimusongelma, tavoitteet ja rajaukset

Tutkimus suoritetaan case-tutkimuksena Famifarmin kasvihuoneille Järvikylään Joroisiin. Tällä hetkellä Famifarm tuottaa lämpöä turpeella, hakkeella ja öljyllä. Periaatteessa kaikki sähkö ostetaan ulkopuolelta, pois lukien pienet aurinkopaneelit.

Tutkimuksessa selvitetään onko CHP-tuotanto kannattavaa kasvihuoneympäristössä. Tavoitteena on päästä eroon fossiilisista polttoaineista ja lähemmäksi energiaomavaraisuutta. Jotta investoinnin kannattavuutta päästään arvioimaan, määritetään pysyvyyssäyrät sekä lämmön että sähkön kulutukselle. Tarkasteltavaksi aikajaksoksi on valittu viisi vuotta, jolta ajalta tarkastellaan energian kulutusta. Tätä kautta pystytään

määrittämään laitoksen ja eri laitostekniikoiden hyötysuhteet CHP-tuotannolle eri viikoille koko vuoden ajan.

1.3 Tutkimusmetodologia

Tutkimuksessa analysoidaan sähkö- ja lämpöenergiankulutus mittauksien mukaan vuosilta 2014–2018. Tuloksia analysoidaan aikasarja-analyysillä. Lisäksi tarkastellaan lämpötilaeron vaikutusta sähkönkulutukseen ja lämmönkulutukseen sekä näiden riippuvuutta lineaarisella regressianalyysillä.

Aikasarja-analyysin aineisto kerätään kasvihuoneen automaatiojärjestelmästä. Otanta on vuosilta 2014–2018, ja mittaustarkkuutena käytetään viittä minuuttia. Näistä mittaustuloksista data jaetaan vuosittain ryhmiin, jolloin päästään vertailemaan eri vuosia keskenään ja katsomaan, miten paljon poikkeamia eri vuosissa on ja keskittyvätkö nämä mahdollisesti esiintyvät poikkeavuudet tiettyihin vuodenaikoihin tai vuorokaudenaikoihin. Toinen tärkeä tieto, jota tarkastellaan, on kulutuserot eri vuorokaudenaikoina. Yöaikaan ei ole auringonvaloa saatavilla, joten oletuksena on, että kulutus kasvaa huomattavasti pimeään vuorokaudenaikaan. Toisaalta kasvihuoneissa ei suoriteta tuuletuksia yöaikaan, mikä näyttelee myös omaa osaansa energiankulutuksessa.

Valittujen muuttujien riippuvuutta toisistaan tarkastellaan regressianalyysillä. Tässä tutkimuksessa valittuja muuttujia ovat eri energiankulutusmuodot, eli sähkö ja lämpö. Näitä verrataan olosuhteita kuvaaviin muuttujiin, joita ovat lämpötila ja vuodenaika.

Tämän jälkeen suoritetaan caselle kvalitatiivinen analyysi, ja sekä investoinnin kannattavuuslaskenta että herkkyystarkastelu.

1.4 Tutkimuksen rakenne

Tähän projektiin kuuluu kirjallisuustutkimusta ja taustatietojen selvitystä. Kulutus määritetään historiallisista mittaustuloksista viiden vuoden ajalta. Tutkimus ja aineiston keruu on aloitettu joulukuussa 2018, ja ajatus projektin etenemisestä ja tavoitteista on selventynyt ja lopulliset tavoitteet on määritelty tammikuussa 2019.

2 LÄMMÖN JA SÄHKÖN TARVE KASVIHUONEISSA

2.1 Kasvihuoneet Suomessa

Kaupallisesti toimivia kasvihuoneyrityksiä Suomessa on noin tuhatkunta. Tyypillinen suomalainen kasvihuoneyritys on noin 3000 m² (neliömetri) suuruinen, ja sitä hoitaa yrittäjän oma perhe. Suurimmat yritykset työllistävät kymmeniä, parhaimmillaan jopa satoja henkilöitä. Suurissakin yrityksissä taustalla on yksi tai useampia itse työhön osallistuvia yrittäjäperheitä. Viljeltyä kasvihuonepinta-alaa oli vuonna 2017 yhteensä 388 hehtaaria. Vihannekset ovat suurin kasvihuoneissa viljelty kasviryhmä. Tämän jälkeen tulevat koristekasvit, ruukkuvihannekset ja taimet. Pinta-alan jakautumista kasviryhmittäin on esitetty taulukossa 1 (Kauppapuutarhaliitto).

Taulukko 1. Kasvihuonetuotannon jakautuminen kasviryhmittäin (Luke, tilastotietokanta).

| | YHTEENSÄ | Vihannekset 1) | Ruukkuvihannekset 1) | Koristekasvit | Taimet ja pistokkaat 2) | Marjat |
|-----------------------------------|----------|----------------|----------------------|---------------|-------------------------|--------|
| 2017 | | | | | | |
| Pinta-ala (1 000 m ²) | 3 888 | 2 171 | 322 | 1 210 | 145 | 41 |

Kasvihuoneviljelijöiden määrä on vähentynyt viime vuosikymmenien aikaan. Samalla tuotannon tehokkuus on kasvanut. Viljelykautta on pidennetty ja ympärivuotista tuotantoa lisätty kysynnän kasvun myötä. Valotuksen käyttö tehostaa tuotantoa ja kasvuvalotusta käytettäessä valaisimien energia lämmittää kasvihuonetta ja vähentää lämmityksen tarvetta.

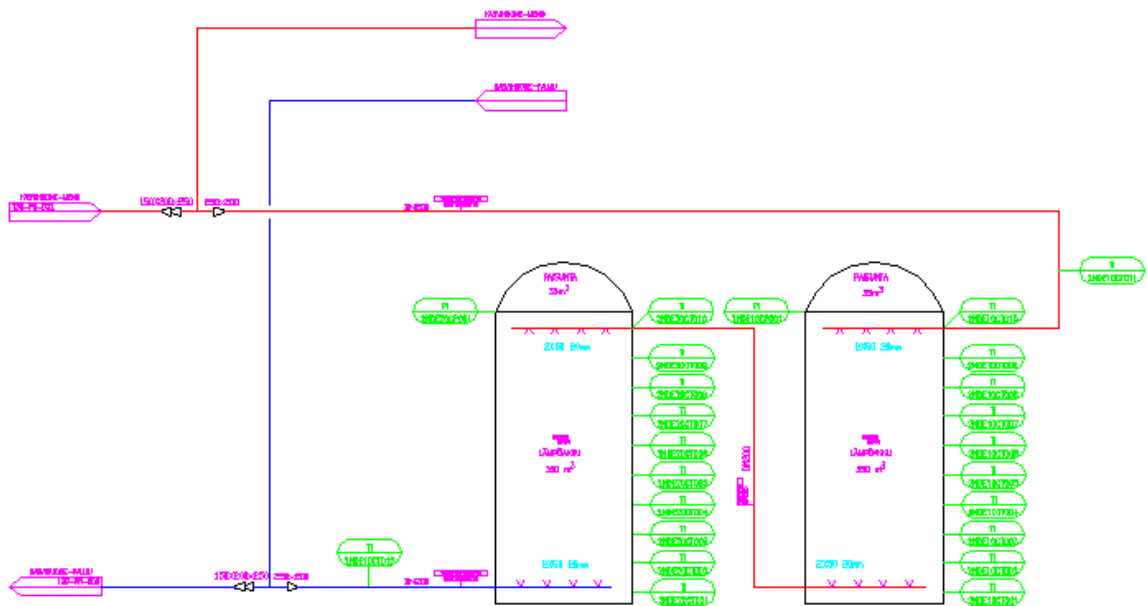
2.2 Case: Famifarm

Famifarm Oy on vuonna 1987 perustettu kasvihuoneyritys. Yrityksen perustajana toimi Karl Grotenfelt, joka on vuodesta 1647 samalla suvulle kuuluneen Järvikylän kartanon 10. isäntä. Ensimmäinen kasvihuone rakennettiin navetan vintille, minkä jälkeen toiminta on laajentunut järjestelmällisesti. Nykyään Järvikylä-tuotemerkillä myytävät salaattit ja yrtit ovat saatavilla ympäri vuoden lähes joka puolella Suomea. Kasvihuonepinta-alaa Famifarmilla on noin 40 600 m², ja päätuotteina kasvihuoneilla ovat yrtit ja salaattit.

2.3 Lämmön kulutus ja pysyvyys

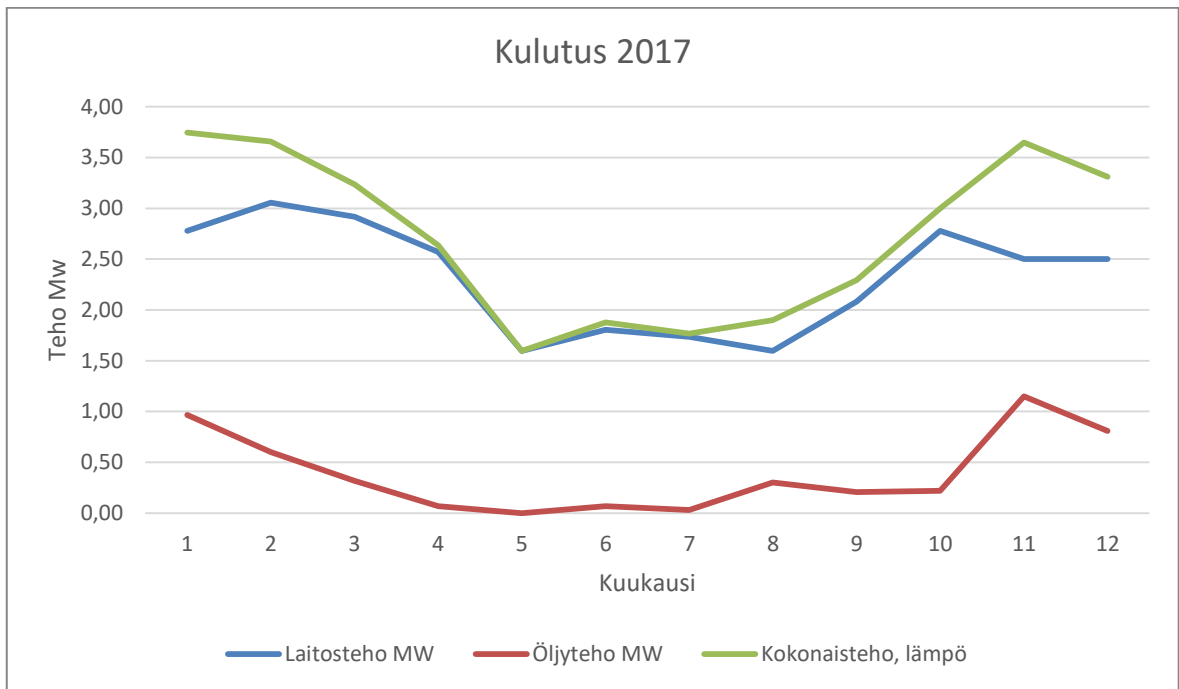
Famifarm on panostanut aktiivisesti energiantuotannon kehitykseen. Vuonna 2007 Famifarm investoi 3 MW kiinteään polttoaineen kattilaan. Alkuvuosina kattilan pääasiallinen polttoaine oli turve, mutta nykypäivänä on siirrytty lähes täysin hakkeeseen.

Lämmön riittävyys ja sen oikea-aikainen saatavuus ovat kasvihuoneille tärkeitä, jotta kasvuolosuhteet pysyvät optimaalisina. KPA-kattilan (kiinteä polttoaine) hitautta kompensoimaan on rakennettu lämpöakkujärjestelmä, joka tasaa kulutuksen piikit ja takaa tasaisen lämmönjakelun kasvihuoneille (kuva 1). Kattilaa ajetaan tasaisella kuormalla ja energia jaetaan vedellä täytettyihin lämpöakkuihin ja kasvihuoneisiin. Kun lämpöakut ovat täynnä, kattilan tehoa säädetään kasvihuoneiden lämpötarpeen mukaan. Kun lämmöntarve kasvaa nopeasti, otetaan tarvittava energia lämpöakuista ja kattilantehon noustessa aloitetaan akkujen lataaminen uudelleen. Lämmityspiirin vesivirtoja ohjataan pumpuilla, ensiöpumput pumpaavat vettä akkuihin ja kasvihuoneille. Toisiopumput vastaavat kasvihuoneiden vedenkierrosta. Näiden samassa piirissä olevien pumppujen tehon säädöllä määrätään, onko veden virtaus akkuihin vai sieltä pois, eli varataanko akkuja vai käytetäänkö varausta. Akuissa on metrin välein lämpötila-anturit, jotka näyttävät akkujen varausasteen. Lämpöakkujen tilavuus on $2 \times 350 \text{ m}^3$, ja niihin varastoitava energiamäärä on 65 MWh.



Kuva 1. PI-Kaavio lämpöakkujen kytkennästä.

Kun lämpöakkujen ja kiinteän polttoaineen laitoksen teho ei riitä, tarvittava huipputeho tuotetaan apukattiloiden avulla käyttäen kevyttä polttoöljyä. Famifarmilla on käytössä kolme öljykattilaa, joita kaksi on 2 MW:n ja yksi 1 MW:n, eli yhteensä öljytehoa 5MW. Nykyinen kiinteän polttoaineen kattila on jäämässä hieman pieneksi, ja öljyn käytön osuus lämmöntuotannossa on haluttua isompi. Öljykattiloiden käyttö on esitetty taulukossa 1. Taulukkoon on koottu öljypolttimien käyttötiedot vuosilta 2014–2018. Polttimien käyntitiedot on otettu ajanjaksolta 5 minuutin sykleissä. Tämä on tarkkuus, joka oli saatavissa Privan automaatiojärjestelmästä. Öljyteho on ollut keskiarvoltaan 337 kWh. Tämä vastaa 13,9 % ajanjakson energiankulutuksesta. Öljyn osuutta energian tuottamiseen halutaan pienentää. Ratkaisuksi tähän on suunnittelussa isompi kiinteän polttoaineen laitos. Kuvassa 2 on esitetty lämmönkulutus Famifarmilla vuonna 2017.



Kuva 2. Lämpöenergian kulutus Famifarmilla 2017.

Kiinteän polttoaineen kattilan tuotantotiedot kerättiin Privan automaatiojärjestelmästä viiden vuoden ajalta, 2014–2018. Tarkkuutena tässä käytettiin tuntia. Tämä tarkkuus riittää hyvin johtuen kiinteän polttoaineen kattilan hitaasta reagoinnista tehontarpeen muutoksiin. Taulukossa 2 on esitetty mittauksien tulokset. Taulukosta näemme, että suurimmat kuormat ovat olleet talvikuukausina, kuitenkin niin, että jo lokakuusta alkaen lämpölaitoksella on ajettu yli 2,5 MW teholla. Korkeimmat tehot ovat olleet joulukuussa, jolloin on saavutettu 2,75 MW:n keskiteho. Pienimmillään tuotanto on ollut heinäkuussa, jolloin keskiarvo teho on ollut 1,24 MW.

Taulukko 2. Kiinteän polttoaineen lämpölaitoksen tuotanto 2014–2018.

| | Tuotanto | | | | | | Teho |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | Vuosi 2014 [kWh] | Vuosi 2015 [kWh] | Vuosi 2016 [kWh] | Vuosi 2017 [kWh] | Vuosi 2018 [kWh] | Keskiarvo [kWh] | keskiarvo [kW] |
| Tammikuu | 1796546 | 1878729 | 2034839 | 2052804 | 2187266 | 1996868 | 2684 |
| Helmikuu | 1278867 | 1499247 | 1923861 | 2007638 | 1886092 | 1723883 | 2565 |
| Maaliskuu | 1363348 | 1495415 | 1972357 | 2064072 | 1931935 | 1777418 | 2389 |
| Huhtikuu | 1108973 | 1181433 | 1820625 | 1984500 | 1412714 | 1501960 | 2086 |
| Toukokuu | 935597 | 978886 | 1291011 | 1556528 | 1093231 | 1199679 | 1612 |
| Kesäkuu | 726346 | 959867 | 1268087 | 1216499 | 1034702 | 1045723 | 1452 |
| Heinäkuu | 583735 | 870043 | 1014919 | 1247664 | 906114 | 925281 | 1244 |
| Elokuu | 727955 | 678350 | 1463196 | 1211339 | 1030118 | 1022192 | 1420 |
| Syyskuu | 1088222 | 997127 | 1536090 | 1476984 | 1502888 | 1321181 | 1776 |
| Lokakuu | 1617737 | 926807 | 2050375 | 1833863 | 1828767 | 1810018 | 2514 |
| Marraskuu | 1545414 | 1370838 | 2089603 | 1714440 | 2123028 | 1895989 | 2548 |
| Joulukuu | 1821822 | 1985638 | 1860373 | 1752329 | 2269162 | 1982167 | 2753 |
| summa: | 14594562 | 14822379 | 20325334 | 20118661 | 19206016 | 18202359 | 2078 |

Öljykattiloisen tuotantotiedot kerättiin Privan automaatio järjestelmästä viiden vuoden ajalta 2014–2018. Tarkkuutena tässä käytettiin 5 minuuttia. Öljykattiloiden kohdalla tiheämpi mittaustaajuus on tarpeellinen johtuen kattiloiden ajotavasta. Öljykattiloilla hoidetaan nopeat lämmöntarpeet, ja ne käynnistyvät aina tarvittaessa. Suurimpana erona ajotavassa kiinteän polttoaineen kattilaan on käynnistyksen ja sammutuksen nopeus. Taulukossa 3 on esitetty mittauksien tulokset. Taulukosta näemme, että suurimmat kuormat ovat olleet talvikuukausina saavuttaen huippunsa tammikuussa.

Taulukko 3. Öljykattiloiden käyttö lämmöntuottamiseen (Priva automaatiodata).

| Öljykattiloiden 1,2 ja 3 käyttö | Tuotanto [kWh] | Teho [kW] |
|---------------------------------|----------------|------------|
| Tammikuu keskiarvo | 612107 | 823 |
| 2015 | 608758 | 818 |
| 2016 | 650757 | 875 |
| 2017 | 735507 | 989 |
| 2018 | 453405 | 609 |
| Helmikuu keskiarvo | 465865 | 693 |
| 2015 | 290629 | 432 |
| 2016 | 236663 | 352 |
| 2017 | 413826 | 616 |
| 2018 | 922341 | 1373 |
| Maaliskuu keskiarvo | 371469 | 499 |
| 2015 | 240541 | 323 |
| 2016 | 220689 | 297 |
| 2017 | 247595 | 333 |
| 2018 | 777051 | 1044 |
| Huhtikuu keskiarvo | 171440 | 238 |
| 2015 | 220330 | 306 |
| 2016 | 63961 | 89 |
| 2017 | 42919 | 60 |
| 2018 | 358549 | 498 |
| Toukokuu keskiarvo | 74878 | 101 |
| 2015 | 210500 | 283 |
| 2016 | 0 | 0 |
| 2017 | 15030 | 20 |
| 2018 | 73981 | 99 |
| Kesäkuu keskiarvo | 55419 | 77 |
| 2015 | 158550 | 220 |
| 2016 | 9185 | 13 |
| 2017 | 53774 | 75 |
| 2018 | 167 | 0 |
| Heinäkuu keskiarvo | 136646 | 184 |
| 2015 | 189650 | 255 |
| 2016 | 338398 | 455 |
| 2017 | 18537 | 25 |
| 2018 | 0 | 0 |
| Elokuu keskiarvo | 165715 | 58 |
| 2015 | 458284 | 637 |
| 2016 | 10187 | 14 |
| 2017 | 193386 | 269 |
| 2018 | 1002 | 1 |
| Syyskuu keskiarvo | 112908 | 152 |
| 2015 | 201800 | 271 |
| 2016 | 89512 | 120 |
| 2017 | 160320 | 215 |
| 2018 | 0 | 0 |
| Lokakuu keskiarvo | 113945 | 158 |
| 2015 | 117425 | 163 |
| 2016 | 200233 | 278 |
| 2017 | 138121 | 192 |
| 2018 | 0 | 0 |
| Marraskuu keskiarvo | 265334 | 357 |
| 2015 | 26553 | 36 |
| 2016 | 590061 | 793 |
| 2017 | 386438 | 519 |
| 2018 | 58283 | 78 |
| Joulukuu keskiarvo | 410544 | 570 |
| 2015 | 203667 | 283 |
| 2016 | 916299 | 1273 |
| 2017 | 454407 | 631 |
| 2018 | 67802 | 94 |
| Vuosikulutus keskiarvo | 2956268 | 337 |

Taulukossa 4. tarkastellaan lämpöenergian kokonaiskulutusta summaamalla sekä kiinteän polttoaineen laitoksen energiantuotanto että öljykattiloilla tuotettu energia. Tällöin huomataan, että öljykattiloiden teho on merkittävä osa lämmöntuotantoa.

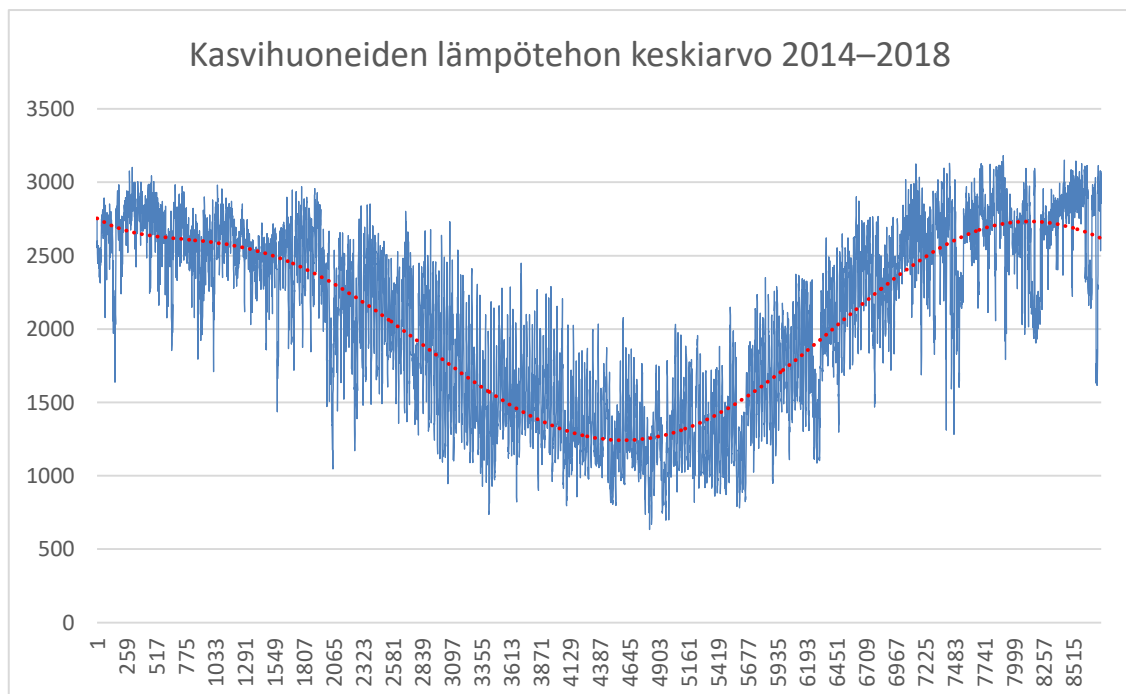
Taulukko 4. Kokonaislämpöenergian tehon tarve kuukausittain.

| | Lämpölaitoksen teho [kW] | Öljykattiloiden teho [kW] | Lämpöteho yhteensä [kW] |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Tammikuu | 2684 | 823 | 3507 |
| Helmi | 2565 | 693 | 3258 |
| Maaliskuu | 2389 | 499 | 2888 |
| Huhtikuu | 2086 | 238 | 2324 |
| Toukokuu | 1612 | 101 | 1713 |
| Kesäkuu | 1452 | 77 | 1529 |
| Heinäkuu | 1244 | 184 | 1428 |
| Elokuu | 1420 | 58 | 1478 |
| Syyskuu | 1776 | 152 | 1928 |
| Lokakuu | 2514 | 158 | 2672 |
| Marraskuu | 2548 | 357 | 2905 |
| Joulukuu | 2753 | 570 | 3323 |
| Keskiarvo: | 2078 | 337 | 2415 |

Lämmitysteholtaan suurin kuukausi on tammikuu, jolloin lämpöenergiaa tuotetaan keskimäärin 3,51 MW teholla. Pienimmillään kokonaislämmön tarve on heinäkuussa, jolloin lämpöenergiaa tuotetaan 1,43 MW teholla. CHP-tuotannossa sähköntuottamiseksi tarvitaan jäähdytystehoa. Famifarmin tapauksessa sähköntuotannon määrän ja jäähdytystehon määrää siis kokonaislämpöenergian tarve. Tätä lämpöenergian tarvetta

verrataan turbiinin ja ORC-moduulin hyötysuhteisiin kullakin teholla kuukausittain, ja edelleen tuloksena saadaan tuotettavan sähkön määrä.

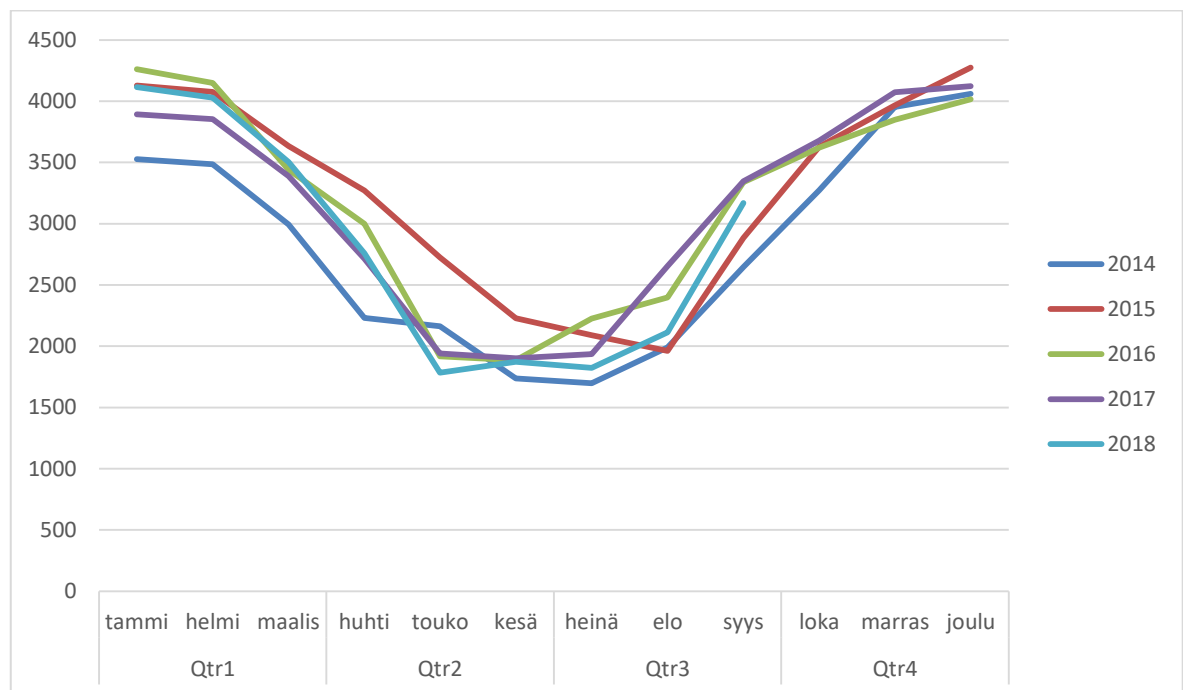
Kiinteän polttoaineen kattilalla pyritään tuottamaan mahdollisimman paljon käytettävästä lämmöstä. Öljyä käytetään vain kun ei ole muita vaihtoehtoja. Kiinteän polttoaineen kattilan huipputeho on riippuvainen myös käytettävästä polttoaineesta ja sen laadusta. Taulukossa 4 on esitetty kiinteän polttoaineen kattilalla tuotettu energia vuosina 2014–2018. Kun tarkastellaan viiden vuoden lämpöenergian kiinteän polttoaineen tuotantoa, nähdään, että tuotannon tarve liikkuu välillä 3,6–1,4 MW huipputehon tarpeen ollessa 4 MW. Viiden vuoden lämpötehon keskiarvot on esitetty kuvassa 3. Näiden tehojen perusteella määritetään luvussa 7. mahdollinen sähköntuotannon määrä ilman apujäähdytystä. Lämpötehon keskiarvo viiden vuoden tutkimusjaksolla on ollut 2577 kW minimitehon ollessa 1500 kW ja maksimitehon ollessa 3700 kW. Merkittävää CHP-tuotannon kannalta on suhteellisen iso lämpökuorma myös kesäaikaan, mikä mahdollistaa ympärivuotisen CHP-tuotannon ilman tarvetta apujäähdytykseen.



Kuva 3. Viiden vuoden lämpötehon keskiarvo 2014–2018.

2.4 Sähkön kulutus ja pysyvyys

Famifarmilla suurin sähkönkuluttaja on kasvihuoneiden valaistus. Muita merkittäviä sähkönkuluttajia ovat lämmitykseen käytettävät laitokset, joita Famifarmilla on kaksi. Näiden laitosten omakäytösähkö ja lämmönsiirtämiseen käytettävän veden pumppaaminen ovat merkittäviä energian kulutuskohteita. Lisäksi kasvihuoneiden ilmanvaihto vie myös merkittävän osan sähköstä. Loppu menee normaaliin kiinteistön sähkönkulutukseen. Valaistuksen tarve vaihtelee vuodenaikojen ja kelin mukaan, mutta on kuitenkin merkittävää läpi vuoden. Kuvassa 4 on esitetty sähkönkulutusta viiden vuoden ajalta kuukausikeskiarvoilla. Kuvasta ja mittaustilastoista voidaan todeta, että normaalituotannon aikaan sähkötehon kuukausikeskiarvo ei putoa alle 1,5 MW. Pimeään vuodenaikaan sähkönkulutus kestää tasaisempana läpi vuorokauden. Kesällä, kun valoa on tarjolla huomattavasti enemmän ja pitempään päiväsaikaan mutta yöllä on kuitenkin pimeää, kasvaa sähkön tarpeen vaihteluväli huomattavasti vuorokauden aikana.

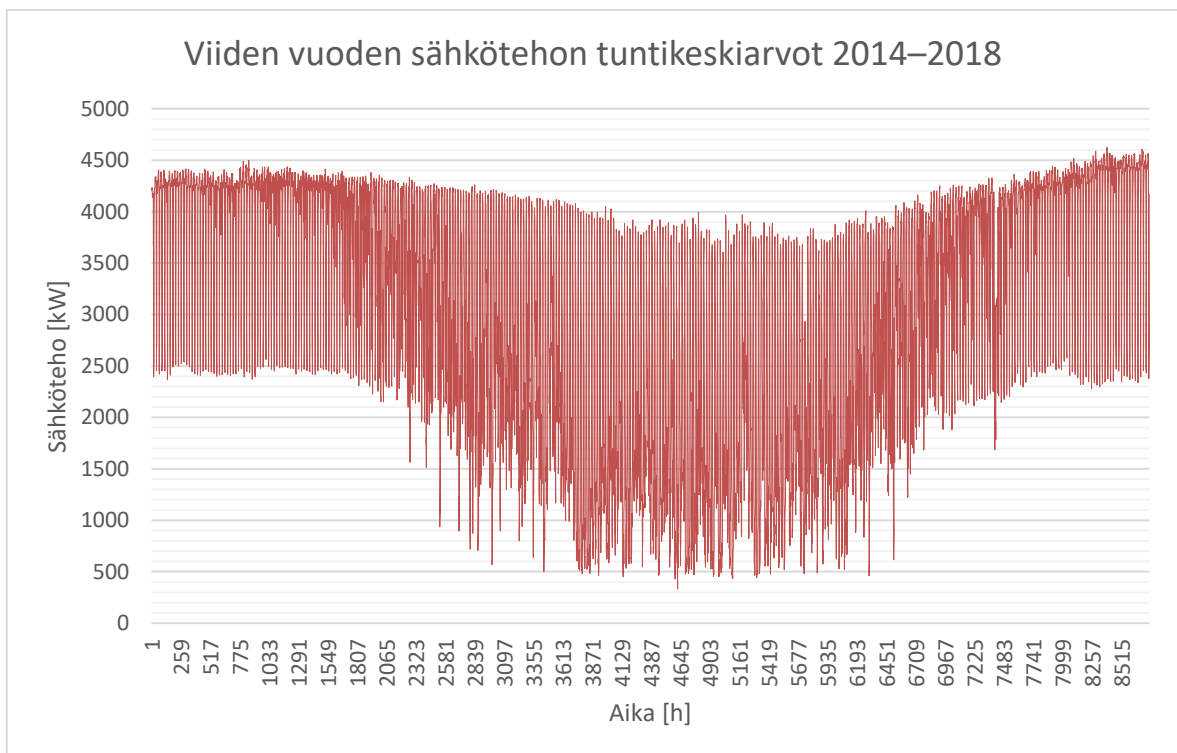


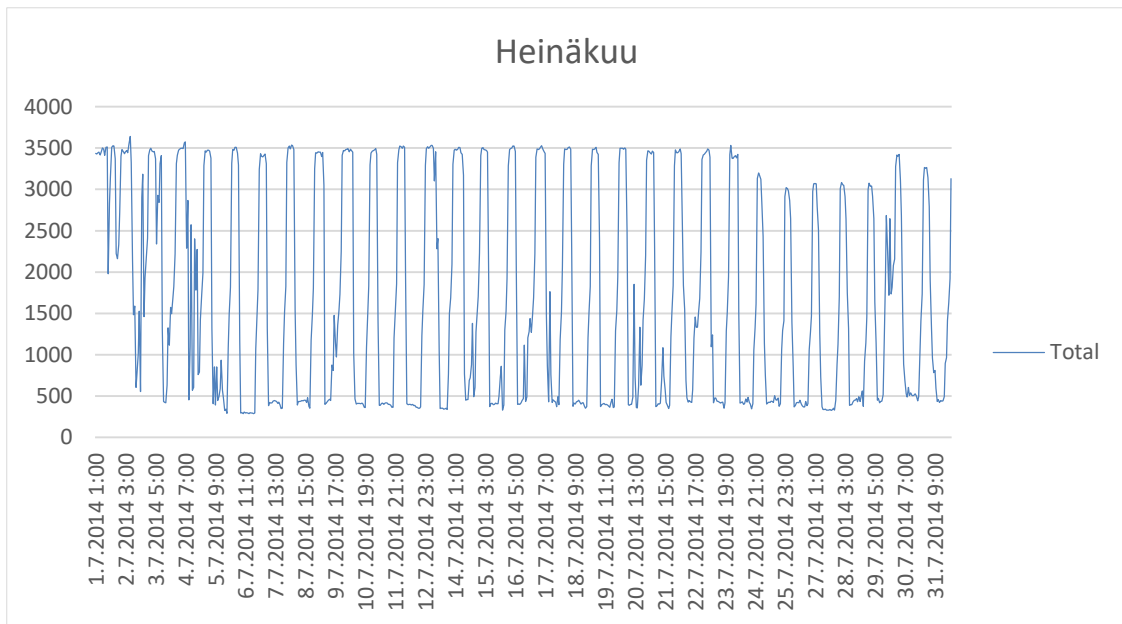
Kuva 4. Famifarmin sähkönkulutus vuosittain.

Taulukosta 5 selviää, että viiden vuoden mittausjaksolla sähkönkulutus on toistuvasti pienimmillään heinäkuussa. Syynä tähän on korkea valon määrä ja lämpötila. Suomen ilmatieteen laitoksen tilastoista selviää, että eniten aurinkoisia päiviä on mittausjaksolla ollut heinäkuussa. Tämä on esitetty kuvassa 6.

Kun heinäkuun tehontarve otetaan tarkempaan analyysiin, huomataan, että sähkötehon tarve muuttuu vuorokaudenajan ja samalla luonnonvalon määrän mukaan. Tämä on esitetty kuvassa 6. Muutokset vuorokauden energiantarpeessa ovat suurimmillaan heinäkuussa ja pienimmillään tammikuussa. Heinäkuun vuorokausimuutos on suurimmillaan 90 % maksimista, kun taas tammikuussa pysytään 50 % maksimitehosta. Toisaalta myös lämmönkulutus on pienimmillään heinäkuussa, eli CHP-sähkön tuottamiseen tarvittava lauhdeteho on myös pienimmillään.

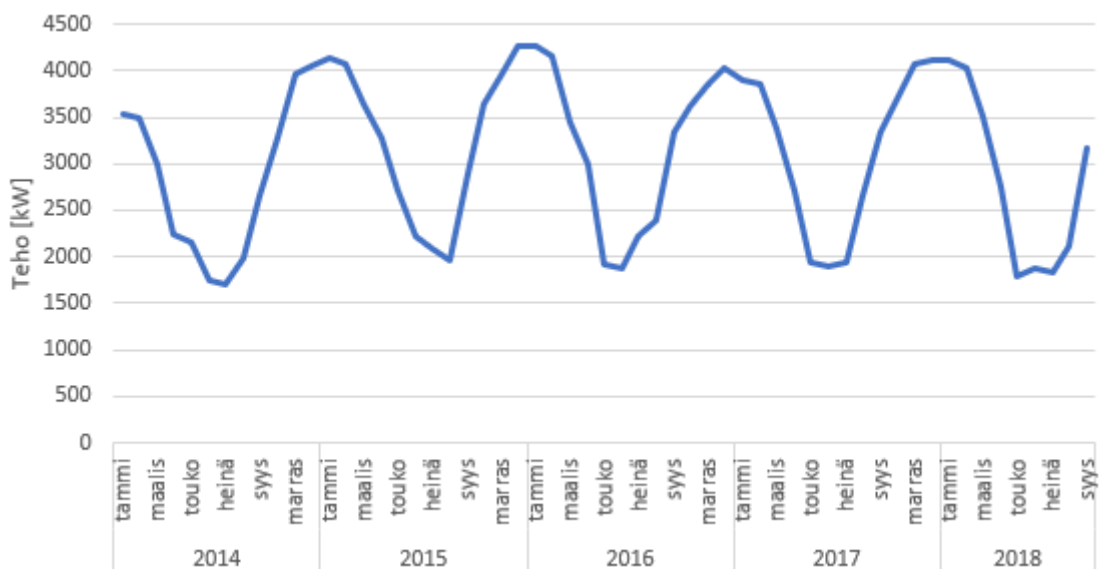
Taulukko 5. Viiden vuoden sähkötehon keskiarvot.





Kuva 6. Sähkötehon tarve heinäkuussa.

Tämän tilaston perusteella voidaan määrittää omakäyttösähkön määrä vuorokaudenaikojen mukaan. CHP-tuotannossa sähkön ja lämmön tuotanto ovat suoraan verrannollisia toisiinsa, jos apujäähdytystä ei käytetä. Kuvasta 6 nähdään, että omakäyttöteho putoaa heinäkuussa yöaikaan tasolle 500 kW, mikä on siis pienin mahdollinen omakäyttöteho. Taulukossa 5 on esitetty jokaisen kuukauden omakäyttötehot tunneittain. Tämän taulukon perusteella voimme myöhemmin laskea investoinnin kannattavuutta, johon palataan luvussa 7.



Kuva 7. Famifarmin sähkötehon tarve vuosittain.

2.5 Energian kulutuksien suhde

Energian kulutuksien suhde on hyvin oleellinen suure mietittäessä CHP-tuotantoa. Oma käyttösähkön tuottaminen on hyvin kustannustehokasta. Itse tuotetusta sähköstä omaan käyttöön ei tarvitse maksaa siirtomaksuja. Myös sähköverosta vapautuminen on mahdollista tietyin edellytyksin.

Sähkön tuotannon jälkeen jäljelle jäänyt lämpö tulee hyötykäyttää lämmityskohteeseen. Jos lämmölle ei ole käyttökohdetta, joudutaan käyttämään apujäähdytystä lauhteen jäähdytykseen. Apujäähdytystä käytettäessä romahtaa tuotannon hyötysuhde hyvin nopeasti, ja tuotannosta tulee kannattamatonta. Kasvihuoneympäristössä on todennäköistä, että omakäyttö sähköteho on suurimman osan vuodesta enemmän kuin pien-CHP-tekniikalla voidaan tuottaa. Eli suurin osa tuotetusta sähköstä voidaan käyttää itse ja sähkön lopputarve turvataan ostosähköllä. Ekonomisesti parempi ratkaisu olisi, jos sähköä ei tarvitsisi ostaa, eli jos lämmön ja sähkön kulutussuhde muuttuisi enemmän lämmitysvoittoiseksi. Tämä suuntaus on tulevaisuudessa mahdollinen tai jopa todennäköinen, kun kasvihuoneen valaistukseen tällä hetkellä pääteknikkana käytettäviä kaasupurkausvaloja aletaan enenevässä määrin korvaamaan nykyaikaisella led-tekniikalla. Led-tekniikan etuna on hyvin pieni sähkönkulutus verrattuna perinteisiin valoihin ja näin ollen pieni lämmöntuonti valaistuun tilaan. Kun valaistuksen mukanaan tuoma lämpöenergia vähenee, täytyy tämä korvata lämmitysverkoston tehoa kasvattamalla. Tämä tilanne taas on todella hyvä CHP-tuotannon kannalta. Sähköä voidaan tuottaa enemmän, ja lauhdutuskapasiteettia on enemmän tarjolla kasvaneen lämmitystarpeen vuoksi. Optimitalanne olisi, että kasvihuoneen lämmön ja sähkön kulutuksien suhde olisi sama kun tuotantolaitoksen rakennusaste. Rakennusasteella tarkoitetaan CHP-tuotannossa sähkön ja lämmöntuotannon suhdetta. Korkea rakennusaste tarkoittaa korkeaa sähköntuotantomäärää suhteessa lämpötehoon. Mitä korkeampi rakennusaste, sitä korkeampi on myös investoinnin hinta. Pienen kokoluokan CHP-laitoksissa rakennusaste jää pieneksi johtuen pienien turbiinien heikosta hyötysuhteesta.

3 PIENEN KOKOLUOKAN CHP-TUOTANNON VAIHTOEHDOT

Kaikki energian tuottamisen teknologiat voidaan jollain sovelluksella valjastaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Oli kyseessä sitten höyrykone, polttomoottori tai kaasuturbiini, syntyy sähkön tuotannosta hukkalämpöä. Eri CHP-tuotannon vaihtoehdot on esitetty taulukossa 6. Tuntuu järkevältä, että tämä hukkalämpö hyödynnettäisiin aina, ja näin parannettaisiin hyötysuhdetta. Tämä ei kuitenkaan suoraan ole mahdollista, vaan sopiva tekniikka jokaiseen sovellukseen täytyy etsiä erikseen. Kaikkiin sovelluksiin sopivaa tekniikkaa ei ole, tai se ei ole ekonomisesti kannattavaa. Kun sähköä tuotetaan polttamalla fossiilista polttoainetta tai biomassaa, aina syntyy hukkalämpöä, jonka hyödyntäminen on mahdollista. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon määritelmä on, että sähkön tuotannosta yli jäänyt lämpö hyötykäytetään.

Taulukko 6. CHP-tuotantotekniikat (Knowles 2011).

| CHP power generation technology | Power range (applied to CHP) | Power efficiency range (%) | CHP efficiency (peak) (%) |
|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| CCGT* | 20 MW to 600 MW | 30–55 | 85 |
| Gas turbine | 2 MW to 500 MW | 20–45 | 80 |
| Steam turbine | 500 kW to 100 MW | 15–40 | 75 |
| Reciprocating engine | 5 kW to 10 MW | 25–40 | 95 |
| Micro-turbine** | 30 kW to 250 kW | 25–30 | 75 |
| Fuel cell | 5 kW to 1 MW | 30–40 | 75 |
| Stirling engine | 1 kW to 50 kW | 10–25 | 80 |

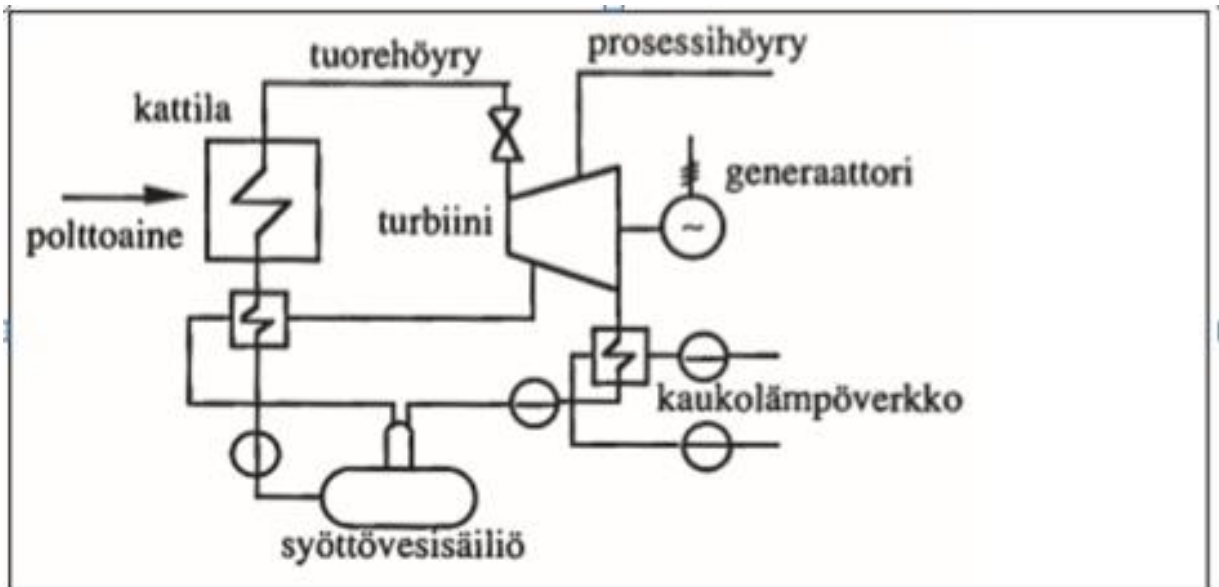
* Combined cycle gas and steam turbines

** Micro-turbines are small, radial flow gas turbines

Käyttökohteeseen sopivan CHP-tekniikan valinnassa tärkeää on tietää tarvittavan lämmön ja sähkön suhde sekä määrä. Lisäksi tarvittavan lämmön laatu ja lämpötila vaikuttavat merkittävästi. Tämä tarkoittaa siis sitä, tarvitaanko lämmönkäyttökohteessa kuumaa höyryä vai onko kysymyksessä lämmitysverkosto, jossa pärjätään kuumalla vedellä. (Knowles 2011)

3.1 Höyryturbiini

Höyryturbiinin toiminta perustuu Rankine-kiertoon, jossa höyrykattilalaitoksessa tuotetaan höyryä polttamalla kattilassa polttoainetta ja keräämällä siitä vapautunut energia väliaineeseen, yleisemmin veteen. Vesi höyrystyy kattilassa, minkä jälkeen sitä tulistetaan ja johdetaan turbiiniin. Turbiinissa höyry paisuu ja energia siirtyy akselin pyörittämiseen, joka kytkeytyy suoraan tai vaihteiston kautta generaattoriin, joka tuottaa sähköä. Kun tuotetaan lauhdesähköä höyryturbiinilla, saavutetaan tyypillisesti 30–40 % hyötysuhde. Kuvassa 7 on esitetty vastapaineturbiinin peruskytkentä CHP-käytössä. (Al-Shemmeri 2011)



Kuva 7. Vastapaineturbiinin peruskytkentä CHP-käytössä (Aura & Tonteri 1993).

Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa höyrykattilalla päästään noin 80–90 % hyötysuhteeseen. Tämä onkin yleisin tuotantotyyppi Suomessa. CHP-höyryvoimalaitoksilla tuotetaan 25 000 GWh, joka vastaa 64 % Suomen kaukolämmöstä ja 22 000 GWh sähköä, joka vastaa 25 % sähköstä. CHP-tuotanto on Suomessa erityisen kannattavaa laajan kaukolämpöverkon vuoksi. Sähkön ja kaukolämmön tuotanto Suomessa vuonna 2018 on esitetty taulukossa 7.

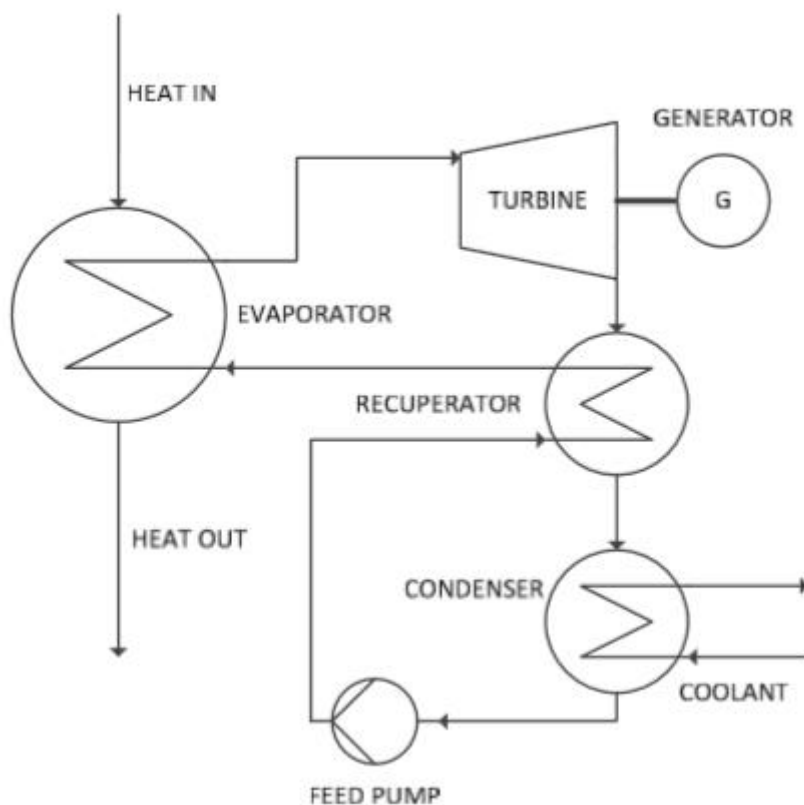
Taulukko 7. Sähkön ja kaukolämmöntuotanto Suomessa 2018 (Suomen virallinen tilasto SVT).

| | Sähkö, GWh | Kaukolämpö, GWh | Teollisuuslämpö, Gwh | Käytetyt polttoaineet, TJ ₁₎ |
|---------------------------------|---------------|--------------------|-------------------------|--|
| Sähkön erillistuotanto | | | | |
| - Vesivoima | 13 137 | .. | .. | .. |
| - Tuulivoima | 5 839 | .. | .. | .. |
| - Aurinkovoima | 90 | .. | .. | .. |
| - Ydinvoima | 21 881 | .. | .. | .. |
| - Lauhdevoima ²⁾ | 4 748 | .. | .. | 50 510 |
| - Yhteensä | 45 695 | .. | .. | 50 510 |
| Sähkön ja lämmön yhteistuotanto | 21 836 | 24 709 | 43 539 | 402 261 |
| Lämmön erillistuotanto | .. | 13 800 | 11 665 | 92 033 |
| Tuotanto yhteensä | 67 532 | 38 509 | 55 204 | 544 804 |
| Sähkön nettotuonti | 19 936 | .. | .. | .. |
| Yhteensä | 87 467 | 38 509 | 55 204 | 544 804 |

3.2 ORC

Orgaaninen Rankine-kierto (ORC) on Rankine-prosessi, jossa työaineena on orgaaninen fluidi veden sijaan, jota on käytetty perinteisissä höyryvoimalaitoksissa. ORC voimaloita käytetään usein yhteistuotannossa (CHP). Turbiinilla tuotetaan sähköä, jonka jälkeen jäljelle jäänyt lämpöenergia otetaan lauhduttimen kautta teolliseen prosessiin tai lämmitykseen. Vaihtoehtoisesti lauhduttamalla työaine matalammassa lämpötilassa voidaan prosessia käyttää myös pelkän lauhdesähkön tuottamiseen. Lauhdesähkön tuotannossa ylijäämälämpö jäädytetään ulkoilmaan tai veteen. (Uusitalo et al. 2016)

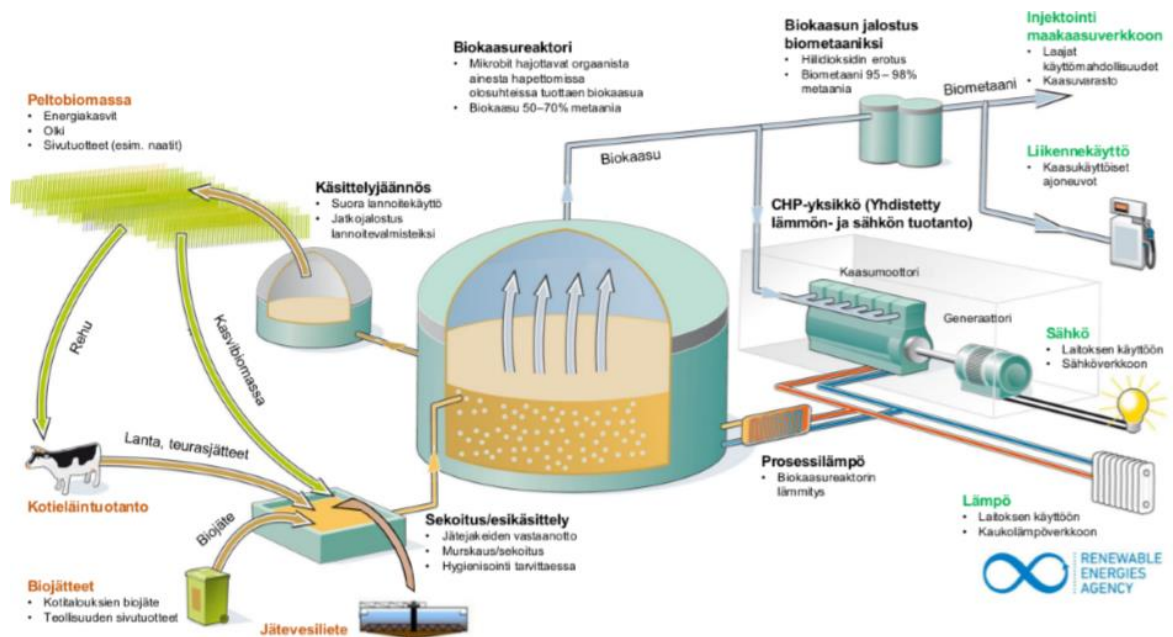
ORC-prosessissa väliaineena toimiva fluidi kiertää suljetussa kierrossa. Fluidi faasi muuttuu kierrossa nesteestä höyryksi. Kuvassa 8 on esitetty prosessikaavio ja pääkomponentit. ORC-prosessi voidaan jakaa kuuteen päävaiheeseen: 1. paineen nosto syöttöpumpuissa; 2. Fluidin esilämmitys rekuperaattorissa; 3. Esilämmitys, höyrystys ja tulistus höyrystimessä; 4. Fluidin paisunta turbiinissa; 5. Tulistuksen poisto rekuperaattorissa sekä 6. Höyryn lauhdutus nesteeksi lauhduttimessa. (Uusitalo et al. 2016)



Kuva 8. ORC-prosessikaavio ja pääkomponentit (Uusitalo et al. 2016).

3.4 Biokaasu

Biokaasulla on pitkä historia, mutta tästä huolimatta biokaasu on alkanut yleistymään ja kaupallistumaan vasta 2000-luvulla. Biokaasu on nähty vaihtoehtona fossiilisille energianlähteille, ja yleinen suuntaus ja poliittiset linjaukset ovat tällä vuosituhanella olleet pois fossiilisista polttoaineista. Suomi on sitoutunut tuottamaan 28 % primäärienergiasta vuoteen 2020 mennessä uusiutuvilla energianlähteillä. Lisäksi tavoitteena on raskaassa liikenteessä käytettävien kotimaisten biopolttoaineiden osuuden kasvattaminen vuoteen 2050 mennessä 70 prosenttiin ja henkilöautoliikenteen saattaminen täysin riippumattomaksi öljystä. Biokaasu on yksi vaihtoehto uusiutuvan energian tuottamiseen ja näiden tavoitteiden saavuttamiseen. Biokaasun metaanipitoisuus ennen jalostusta on noin 50–70 %. Biokaasu sopii suoraan useimpiin polttosovelluksiin ja jatkokäyttökohteisiin. Liikennekäyttöön biokaasu tulee jalostaa biometaaniksi vastaamaan laatuvaatimuksiltaan ja puhtaudeltaan maakaasua, tällöin metaanipitoisuus nousee jo 95–98 prosenttiin. Kuvassa 10 on esitetty biokaasuprosessi osana ravinnekiertoa. Kuvasta nähdään eri käyttökohteet ja jalostusasteet. (Kymäläinen et al. 2015)



Kuva 10. Biokaasuprosessi osana ravinnekiertoa (Kymäläinen et al. 2015).

Biokaasun raaka-aineiksi soveltuvat erilaiset biomassat. Tyypillisiä biomassoja, joita käytetään biokaasun tuotannossa, ovat muun muassa maatalouden jätteet ja sivutuotteet, yhdyskuntajätteet sekä teollisuuden jätteet ja sivutuotteet. Vaatimuksena biokaasun raaka-aineelle on helppo hajoavuus. Tällaisia raaka-aineita ovat paljon hiilihydraatteja, rasvoja ja proteiineja sisältävät aineet, jotka hajoavat nopeasti tuottaen hapettomissa olosuhteissa biokaasua. Puu ei ole hyvin soveltuva raaka-aine biokaasulle johtuen sen vaikeasti hajoavasta rakenteesta. Raaka-aineesta saatava tuotto ja syntyneen biokaasun metaanipitoisuus riippuu käytettävän raaka-aineen koostumuksesta.

4 MARKKINATILANNE

Vielä 2000-luvun alussa kasvihuoneissa yleisin energianlähde oli öljy tai maakaasu. Viime vuosikymmenellä kiinteän polttoaineen kattilat alkoivat yleistyä käyttäen pääasiallisena polttoaineena turvetta ja haketta, kuten nähdään taulukosta 9. Kehitys on jatkunut edelleen tällä vuosikymmenellä, kuitenkin niin, että turve on jäämässä pois muiden fossiilisten kanssa, ja hake ja muu biomassa ovat muodostumassa pääpolttoaineeksi, mikä voidaan todeta taulukosta 8. Suomalaisten kasvihuoneiden öljynkäyttö on laskenut vuosina 2006–2017 peräti 80 % . (Luke / Kauppapuutarhaliitto)

Taulukko 8. Kasvihuoneyritysten energiankulutus 2014 (Luke, tilastotietokanta).

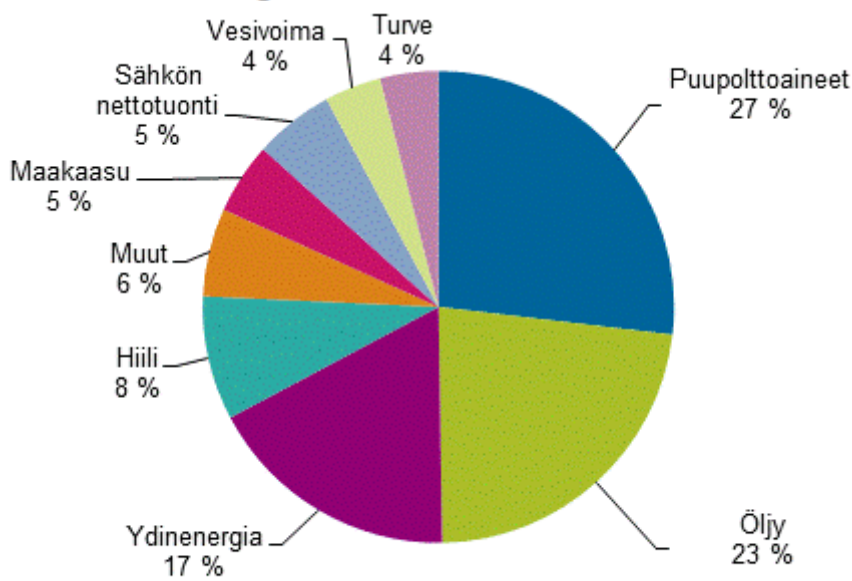
| | Yrityksiä (kpl) | Kulutusmäärä (GWh) |
|----------------------------------|-----------------|--------------------|
| 2014 | | |
| Sähkö (GWh) | 340 | 547 |
| Raskas polttoöljy (kg) | 151 | 92 |
| Kevyt polttoöljy (l) | 466 | 78 |
| Kivihiili ja antrasiitti 1) (kg) | 2 | .. |
| Maakaasu (m3) | 18 | 40 |
| Nestekaasu (kg) | 38 | 46 |
| Jyrsinturve (irto-m3) | 7 | 41 |
| Palaturve (m3) | 89 | 185 |
| Turvepelletti (kg) | 24 | 18 |
| Ostettu lämpöenergia (GWh) | 53 | 146 |
| Muu puupolttoaine (irto-m3) | 21 | 35 |
| Puupelletti ja -briketti (kg) | 47 | 25 |
| Metsähake (irto-m3) | 196 | 281 |
| Peltoenergia (irto-m3) | 36 | 53 |

Taulukko 9. Kasvihuoneyritysten energiankulutus 2006 (Luke, tilastotietokanta).

| | Yrityksiä (kpl) | Kulutusmäärä (GWh) |
|----------------------------------|-----------------|--------------------|
| 2006 | | |
| Sähkö (GWh) | 412 | 444 |
| Raskas polttoöljy (kg) | 367 | 528 |
| Kevyt polttoöljy (l) | 723 | 171 |
| Kivihiili ja antrasiitti 1) (kg) | 5 | 44 |
| Maakaasu (m3) | 30 | 137 |
| Nestekaasu (kg) | 93 | 60 |
| Jyrsinturve (irto-m3) | 2 | .. |
| Palaturve (m3) | 53 | 107 |
| Turvelletti (kg) | 8 | 5 |
| Ostettu lämpöenergia (GWh) | 49 | 110 |
| Muu puupolttoaine (irto-m3) | 21 | 14 |
| Puupelletti ja -briketti (kg) | 49 | 43 |
| Metsähake (irto-m3) | 85 | 101 |
| Peltoenergia (irto-m3) | 23 | .. |

4.1 Polttoaineet

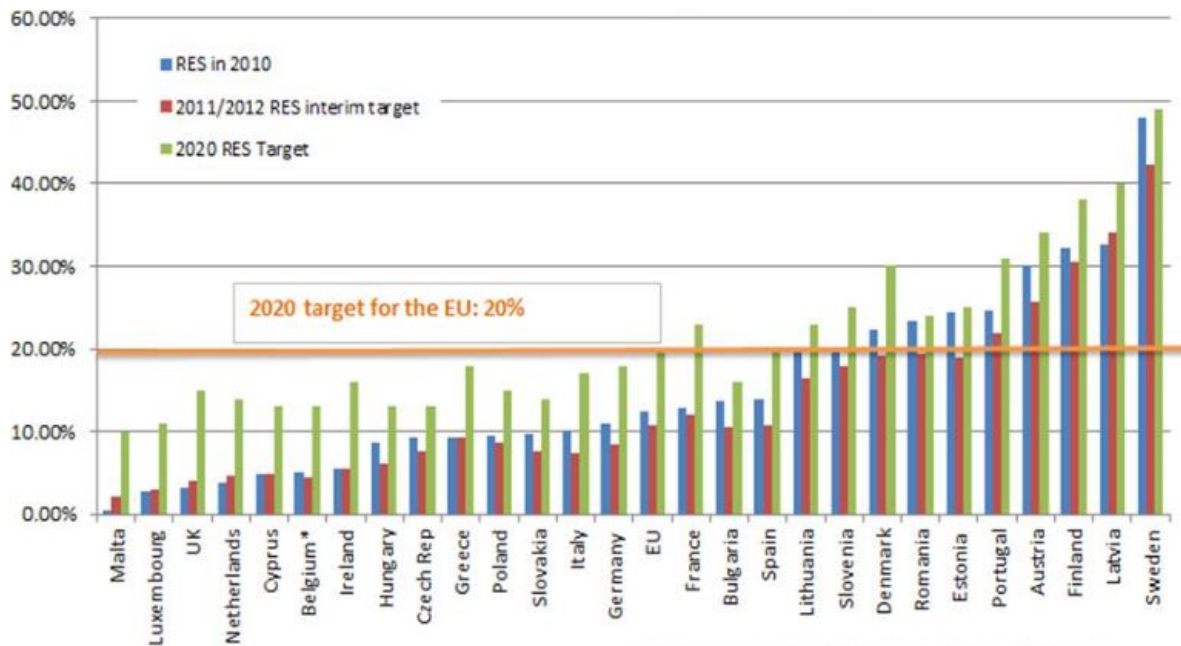
Suuri osa koko Suomen primäärienergiasta tuotetaan bioenergialla. Suomen primäärienergian tuotanto ja siihen käytetty polttoaineet vuonna 2018 on esitetty kuvassa 11. Puu on bioenergian lähteistä suurin 27 % osuudella kokonaisenergian kulutuksesta. Ominaista Suomen energiasysteemille on, että teollisuus kuluttaa noin puolet kaikesta primäärienergiasta sekä laajasti käytössä oleva yhdistetty sähkön ja lämmön yhteistuotanto että korkea kiinteän biomassan käyttöosuus energiantuotannosta. (Karhunen et al. 2013)



Kuva 11. Primäärienergian tuotanto Suomessa (SVT 2018).

Suomi on sitoutunut EU:n asettaman Renewable Energy Source (RES) -direktiivin mukaan vähentämään fossiilisia polttoaineita vuoteen 2020 mennessä niin, että 38 % energiasta tuotetaan uusiutuvilla energian lähteillä. (Taulukko10 RES). Muissa Euroopan maissa tämä sama tavoiteraja on 20 %. Tavoitteiden eroavaisuudet johtuvat lähtötilanteesta vuonna 2005, jolloin Suomessa uusiutuvia energianlähteitä oli jo käytössä enemmän kuin muissa Euroopan maissa. Tässä tutkimuksessa rajataan käytettävä polttoaine 100 % uusiutuvaan metsähakkeeseen. Metsähaketta on hyvin saatavilla Etelä-Savossa, ja se on ekologinen ja nykyaikainen polttoaine energiantuotantoon.

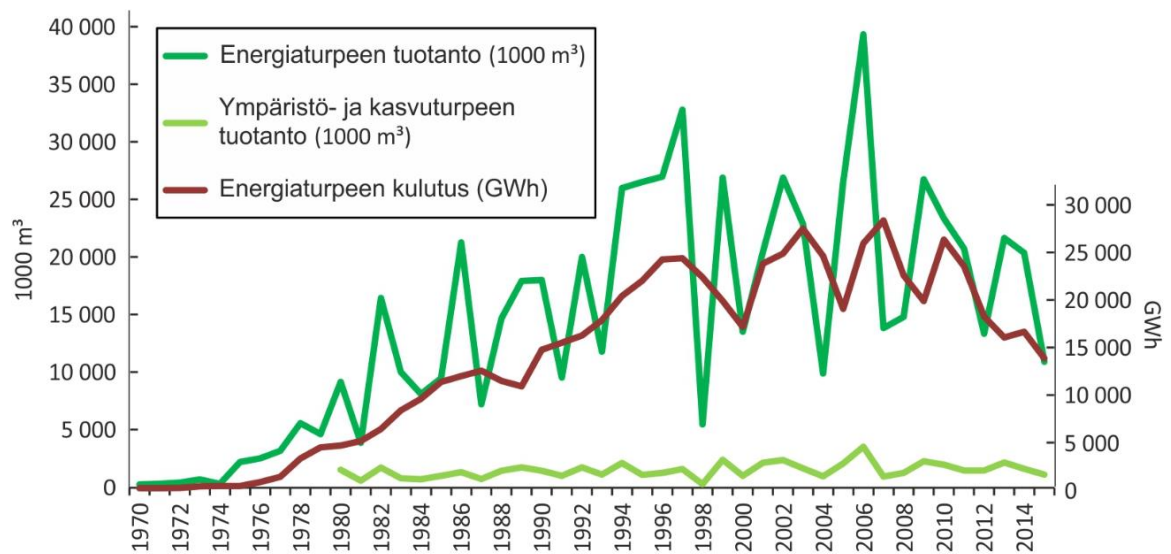
Taulukko 10. RES-direktiivin asettamat tavoitteet (Eurostat 2012).



Vuodesta 2021 alkaen aletaan soveltaa Renewable Energy 2 (REDII) -direktiiviä, joka ei suoraan aseta tiukennusta uusiutuvien prosenttiosuuden, mutta rajoittaa kasvihuonekaasujen päästöjä edelleen. Kehitys jatkuu niin, että vuoteen 2030 mennessä kivihielestä ja öljystä luovutaan kokonaan. Näköpiirissä on, että vuoteen 2050 mennessä energiantuotannon tulisi olla kokonaan uusiutuvaa ja hiilidioksidipäästötöntä.

4.1.1 Turve

Turve on ollut pääpolttoaine Famifarmilla niin kuin monilla suomalaisilla voimalaitoksilla vielä 2000-luvun ensimmäisellä vuosikymmenellä. Nyt kuitenkin turpeesta ollaan laajamittaisesti luopumassa. Turpeen muodostuminen on geologinen prosessi. Turve syntyy tuhansien vuosien kuluessa suokasvien epätäydellisen hajoamisen seurauksena. Turpeeksi luokitellaan maa-aines, jossa orgaanisen massa osuus vähintään 75 % kuiva-aineesta. Turve luokitellaan Suomessa hitaasti uusiutuvaksi biomassaksi, ja se on ollut tärkeä kotimainen polttoaine, jonka käyttöä on tuettu. Kansainvälisesti turve luokitellaan fossiiliseksi polttoaineeksi, ja tämän seurauksena sen käyttöä pyritään rajoittamaan, ja suunta on pitkällä aikavälillä turpeettomaan energian tuotantoon. Kuvassa 12 on esitetty turpeen tuotanto ja energiaturpeen kulutus. Kuvasta näemme, kuinka kulutus on lähtenyt voimakkaaseen laskuun 2010-luvulla. (GTK, Turve 2019)



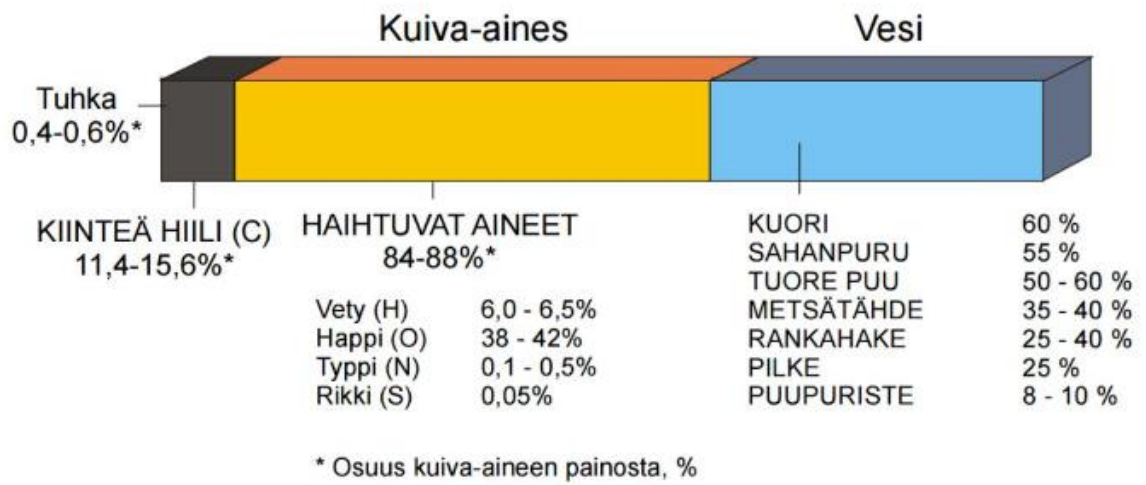
Kuva 12. Turpeen tuotanto ja energiaturpeen kulutus Suomessa (Tilastokeskus, 2019).

4.1.2 Biomassa (metsähake ja murske)

Turpeen korvaajaksi Famifarmilla on valittu biomassa ja tarkemmin metsähake. Biomassa syntyy yhteyttämisen kautta. Yhteyttämisen kasvien vihreät osat valmistavat ilmakehän hiilidioksidista ja maaperän vedestä auringon energialla sokereita. Nämä sokerit kasvin solut taas pystyvät jatkojalostamaan yhdisteiksi, jotka koostuvat hiilestä, hapesta ja vedystä. Kasvaessaan kasvit ja metsät siis sitovat itseensä ilmakehän hiilidioksidia toimien näin hiilinieluna. Puun tai kasvin kuollessa biomassa hajoaa hapetusreaktiossa, jolloin hiilen ja vedyn sidokset murtuvat ja energiaa vapautuu.

Kun biomassa tai puuta poltetaan lämpölaitoksessa, tämä vapautuva energia voidaan ottaa talteen ja se voidaan hyötykäyttää lämmön ja sähkön tuottamiseen. Puun koostumus on esitetty kuvassa 13. (Alakangas et al. 2016)

Hake on puurungoista, korjuutähteistä, kannoista tai muusta puuaineksesta hakettamalla tehtyä polttoainetta. Haketus voidaan suorittaa joko korjuupaikalla mobiilihakettimella tai keskitetysti terminaalissa tai käyttökohteessa. Metsähakkeelle on määritelty palakoko, ja se on sen suhteen tasalaatuista. Metsämurska, eli murskaamalla tehty hake ei ole laadultaan yhtä tasaista. (Hakkila 1992)



Kuva 13. Puun koostumus (Alakangas 2000).

5 ENERGIANTUOTANNON TUET

5.1 Investointituet

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) myöntää energiatuotantoon investointitukia. Tukia voidaan myöntää hankkeille, jotka edistävät uusiutuvan energiantuotantoa tai käyttöä, edistävät energiatehokkuutta tai tekevät muutoin energiajärjestelmän vähähiilisemmäksi. Uusiutuvan energian käyttöön liittyviä tuettavia kohteita ovat muun muassa liikenteen biopolttoaineiden tuotantohankkeet, pienet sähkön- ja lämmöntuotantolaitokset ja uutta teknologiaa sisältävät pilottihankkeet. Energiatehokkuuteen liittyviä tuettavia investointihankkeita ovat muun muassa tavanomaisen teknologian hankkeet, jotka liittyvät energiatehokkuussopimusjärjestelmään, ESCO-hankkeet ja uuden teknologian demonstraatiohankkeet. (TEM 2019)

TEM on määrittänyt lisäksi reunaehdoja tuettaville hankkeille ja organisaatioille. Niiden mukaan energiatukea voidaan myöntää, jos:

1. hanketta tai hankkeeseen sisältyvää uutta teknologiaa ei toteutettaisi ilman tukea; ja
2. ennen tuen myöntämistä koskevaa päätöstä:
 - o investointihankkeessa ei ole tehty sellaista sitovaa investointipäätöstä, päälaitetilausta tai päätöstä rakentamistyön aloittamisesta tai muuta sitoumusta, jonka jälkeen hankkeen peruuttaminen ei enää ilman merkittävää taloudellista menetystä ole mahdollista;
 - o selvityshankkeessa ei ole tehty sellaista sitovaa tilausta tai muuta sitoumusta, jonka jälkeen hankkeen peruuttaminen ei enää ilman merkittävää taloudellista menetystä ole mahdollista.

Energiatukea voidaan myöntää yrityksille, kunnilla ja muille yhteisöille. Tukea ei kuitenkaan myönnetä:

- organisaatioille, joiden toiminta rahoitetaan valtion talousarviosta;
- valtion talousarviosta annetussa laissa (423/1988) tarkoitettuun taloushallinto-organisaatioon kuuluville virastoille, laitoksille ja muille toimielimille;

- valtionosuutta saaville perustamishankkeille;
- asunto-osakeyhtiöille, asuinkiinteistöille tai maataloille taikka niiden yhteyteen toteutettaville hankkeille, lukuun ottamatta sellaisia maatalan yhteydessä toteutettavia hankkeita, jossa tuotettava energia käytetään maatalouden tuotantotoiminnan ulkopuolella;
- Euroopan unionin valtiontukisääntelyssä tarkoitetuille vaikeuksissa oleville yrityksille.

Työ- ja elinkeinoministeriön ehdoista huomataan, että maatilat on rajattu pois tuen piiristä kun tuotettu energia käytetään maatilalla, eikä sitä myydä ulkopuolelle. Tällaisissa tapauksissa tuki tulee hakea Maa- ja metsätalousministeriöstä.

Maa- ja metsätalousministeriö (MMM) myöntää tukia maatilojen investointihankkeille mukaan lukien energiantuotannon investoinnit. Tukien tavoitteena on, että hallituksen energia- ja ilmastostrategian mukaan tähdätään maataloustuotantoon, jossa fossiiliset polttoaineet vaihtuvat lopullisesti uusiutuviin energianlähteisiin. Näin maatalous on omalla panoksellaan mukana ilmastonmuutoksen torjunnassa. Tukikelpoinen hyväksyttävä kustannus on enintään MMM:n asetuksen (262/2019) mukainen tai laaditun kustannusarvion summan mukainen, mikäli tämä on alhaisempi kuin asetuksen mukainen hyväksyttävä yksikkökustannus. Hyväksytyt yksikkökustannukset on esitetty taulukossa 11. MMM:n yksikkökustannukset on optimoitu pienempiin, alle 1 MW:n tuotantolaitoksiin. Tätä suuremmissa laitoksissa mennään todennäköisesti kustannusarvion tai kilpailutettujen tarjousten mukaan. (MMM)

Taulukko 11. Maatilojen investointituen suuruus (Valtioneuvoston asetus 271/2016).

| Tukikohde | Korkotukilainan määrä hyväksyttävistä kustannuksista, prosenttia | Korkotuen määrä hyväksyttävistä kustannuksista, prosenttia | Avustuksen määrä hyväksyttävistä kustannuksista, prosenttia | | Korotus |
|--|--|--|---|----------------------|---------|
| | | | AB-tukialue | Muu kuin AB-tukialue | |
| Lypsy- ja naudakarjatalous (3 §) | 60 | 10 | 40 | 35 | 1 ja 5 |
| Sikatalous (4 §) | 65 | 10 | 30 | 30 | 1 ja 5 |
| Lihasiipikarjatalous (5 §) | 65 | 10 | 20 | 20 | 1 ja 5 |
| Lammas- ja vuohitalous (6 §) | 60 | 10 | 40 | 35 | 1 ja 5 |
| Hevostalous (7 §) | 65 | 10 | 30 | 30 | 5 |
| Mehiläistalous (8 §) | - | - | 25 | 25 | 5 |
| Turkistalous (9 §) | 65 | 10 | - | - | 5 |
| Kasvihuonetuotanto (10 §) | 65 | 10 | 30 | 30 | 1 ja 5 |
| Kuivaamo (11 §) | 65 | 10 | 25 | 25 | 2 ja 5 |
| Salaojitus (12 §) | - | - | 35 | 35 | 3 ja 5 |
| Sadonkorjuukone yhteiskäyttöön (13 §) | - | - | 10 | 10 | 5 |
| Tuotantovarasto (14 §) | 65 | 10 | 30 | 30 | 5 |
| Konevarasto (15 §) | - | - | 20 | 20 | 5 |
| Energiantuotanto (16 §) | - | - | 40 | 40 | 5 |
| Maataloustuotteiden myyntikunnostus (17 §) | - | - | 30 | 30 | 5 |
| Työympäristöä, tuotantohygieniaa, eläinten hyvinvointia tai ympäristön tilaa edistävät investoinnit (18 §) | - | - | | | 4 ja 5 |
| 1 mom. 1 ja 2 kohta | | | 30 | 30 | |
| 1 mom. 3 ja 4 kohta | | | 35 | 35 | |

1 Avustuksen määrää korotetaan 10 prosenttiyksiköllä, jos hakija täyttää nuoren viljelijän aloitustuen myöntämisen edellytykset ja hakijan tilanpidon aloittamisesta ei ole tukea haettaessa kulunut viittä vuotta enempää.

2 Avustuksen määrää korotetaan 5 prosenttiyksiköllä, jos kuivaamoa käytetään kahden tai useamman maatilan viljan tai heinän kuivaamiseen.

3 Avustuksen määrää korotetaan 5 prosenttiyksiköllä säätösalaojituksessa.

4 Avustuksen määrää korotetaan 5 prosenttiyksiköllä, jos kyse on lietalan sijoituslevitystä edistävän laitteen hankinnasta, joka toteutetaan Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelmassa 2014–2020 tarkoitetulla ympäristökorvauksen peltojen talviaikaisen kasvipeitteisyyden kohdentamisalueella tai laite tulee kahden tai useamman maatilan käyttöön millä tahansa alueella.

5 Avustuksen määrää korotetaan 20 prosenttiyksiköllä, jos investointi toteutetaan Eurooppalaisen innovaatiokumppanuuden (EIP) yhteydessä.

Taulukossa 12 on esitetty tuen prosenttiosuus hyväksyttävistä kustannuksista, kun arvioinnin pohjana käytetään kustannusarviota tai kilpailutettuja tarjouksia. Taulukosta nähdään, että energiantuotannolle hyväksyttävä tuki on sekä AB-tukialueella että muualla 40 %. Lisäksi tähän on mahdollista anoa vielä 20 % korotus. Korotus on mahdollista, jos investointi toteutetaan Eurooppalaisen innovaatiokumppanuuden (European Innovation Partnership, EIP) yhteydessä. EIP:n tavoitteena on kehittää maatalouden kestävyttä ja tuottavuutta uusien innovaatioiden ja ratkaisujen avulla. Innovaatiokumppanuus yhdistää tutkijat ja maanviljelijät sekä eri maat keskenään verkostoksi. Innovaatiokumppanuudessa uudet innovaatiot jaetaan EIP:n palvelupisteiden, työpajojen ja seminaarien kautta toimijoille koko Euroopan alueella, ja näin uudesta innovaatiosta saavutettava hyöty saadaan jaettua kaikille alan toimijoille. (Valtioneuvoston asetus 271/2016)

Taulukko 12. CHP-tuotantolaitoksen investointituet (MMM).

| Sähkön- ja lämmöntuotantolaitos / puuta hyödyntävä | Yksikkö | Euro (alv. 0%) | Täsmennykset |
|--|---------|----------------|---|
| | | | Sisältää välttämättömät laitteistot ja rakennelmat sekä teknisen tilan, siilon ja syöttöjärjestelmän. Laitoksen kokonaishyötysuhde vähintään 70 %. |
| <100 kW laitos | kW th | 1 200 | Nimellislämpötehon mukaan |
| | kWe | 4000 | Nimellissähkötehon mukaan |
| ≥100 kW laitos | kW th | 750 | 100 kW ylittävältä osalta, nimellislämpötehon mukaan |
| | kWe | 3500 | 100 kW ylittävältä osalta, nimellissähkötehon mukaan |

Tuen määrä on tarkasteltavissa taulukoista 11 ja 12. Investointitukea on mahdollista saada 40 % kokonaisinvestoinnista tai lämmön osalta 1200 €/kW th kun teho on <100kW ja sen ylittävältä osalta 750 €/kW th, ja sähkön osalta 4000 €/kWe kun teho on <100kW ja sen ylittävältä osalta 3500 €/kWe. Tuen myöntää Maa- ja metsätalousministeriö. Tätä

tukiprosenttia tai -määrää käytetään luvussa 7. Investoinnin kannattavuustarkastelussa otetaan huomioon tuen suuruus niiltä osin, kuin investointi on tuen piirissä.

5.2 Syöttötariffit

Valtioneuvoston asetuksella on säädetty tuotantotuki uusiutuvilla energianlähteillä tuotetulle sähkölle. Lain tarkoituksena on edistää uusiutuvien energianlähteiden käyttöä sähköntuotannossa sekä parantaa energiaomavaraisuutta ja tehdä uusiutuvan sähkön tuottamisesta taloudellisesti kannattavaa. Asetus koskee tuulivoimaloita, jotka otettu käyttöön ennen 1.11.2017, biokaasuvoimaloita ja metsähake- tai puupolttoainetta käyttäviä voimaloita. (L30.12.2010/1397.)

Metsähakkeella tuotetun sähkön tuotantotuki perustuu syöttötariffijärjestelmään. Tariffissa hakkeen hintaa verrataan turpeen hintaan. Turpeen hinta on riippuvainen päästöoikeuden hinnasta, ja toteutunut hinta tarkistetaan 3 kuukauden välein, jolloin määritetään syöttötariffin määrä. Metsähakevoimalan syöttötariffin laskenta on esitetty yhtälössä (1).

$$35,65 - 1,827 * a - 1,359 * b, \quad (1)$$

jossa

a = turpeen vero

b = päästöoikeuden kolmen kuukauden keskiarvohinta

Syöttötariffia maksetaan hakevoimalassa tuotetusta sähköstä, joka syötetään verkkoon. Famifarmin tapauksessa omien kasvihuoneiden tehon tarve on pienimmillään heinäkuussa 500kW ja suurimmillaan tammikuussa 4000kw. Tämä tarkoittaa, että tässä työssä tarkasteltavan CHP-tuotannon määrä ilman apujäähdytystä jää läpi vuoden pienemmäksi, eli laitos ei tule syöttämään energiaa verkkoon. Jos sähköä tuotettaisiin apujäähdytyksellä, kesäkuukausina voisi tulla tilanne, jolloin energian tuotanto olisi suurempaa kuin kulutus, ja tällöin tariffi tulisi kyseeseen. Tässä tilanteessa se ei kuitenkaan tule kyseeseen, koska tällöin CHP-tuotannon hyötysuhde huononee ja tuotetun energian hinta nousee kannattamattomaksi. Omaan käyttöön tuotettuun sähköön tukea ei ole saatavilla. (L30.12.2010/1396.)

5.3 Verotus

Sähköverovelvollisia ovat pääsääntöisesti sähköntuottajat ja verkonhaltijat.

Verovelvollisen on rekisteröidyttävä kirjallisesti verohallinnolle ennen voimalaitoksen käyttöönottoa. Voimalaitoksella verohallinto tarkoittaa tässä yhteydessä laitosta, jonka nimellisteho on yli 100 kVA. Pienemmät, nimellisteholtaan alle 100 kVA laitoksen on automaattisesti vapautettu kaikista sähköverotuksen velvollisuuksista. Tämän rajan alla olevien laitoksien ei tarvitse antaa sähköntuotannostaan veroilmoitusta eikä rekisteröityä verovelvolliseksi.

Sähköverovelvollisuudesta vapautuminen on mahdollista tietyin edellytyksin. Tällöin verosta vapautuneet tuottajat saavat käyttää tuotetun sähkön tai luovuttaa toiselle käytettäväksi verottomasti. Jos sähköä kuitenkin siirretään sähköverkon kautta, verottomuus ei siirry mukana, vaan siirtävä verkonhaltija kantaa siitä sähköveron.

Suuremmat, nimellisteholtaan yli 100 kVA:n laitokset, jotka kuitenkin tuottavat vuodessa alle 800 000 kWh sähköä, ovat myös vapautettuja sähköverosta. Nämä laitokset joutuvat kuitenkin rekisteröitymään ja antamaan sähköveroilmoituksen kerran vuodessa.

Ilmoituksella valvotaan tuotettua sähkönmäärää ja vuosituotantorajaa. Mikäli vuosituotantoraja ylittyy, joutuu tuottaja kantamaan verot kokonaisuudessaan.

Sähköntuottajien jakautuminen eri kategorioihin sähköverovelvollisuuden mukaan on esitetty taulukossa 13. Famifarmin tapauksessa laitoksen nimellisteho ylittää 100 kVa, eli laitoksen kategoria tulee määräytymään vuosituotannon mukaan. Tätä tarkastellaan tarkemmin luvussa 7. Investoinnin kannattavuus. (Verotusohje 2016)

Taulukko 13. Sähköverovelvollisuuden kolme kategoriaa (Verotusohje 2016).

| |
|---|
| <p>1. Mikrovoimalaitokset, nimellisteholtaan enintään 100 kVA, jotka jäävät kokonaan verotuksen ulkopuolelle.</p> |
| <p>2. Pienvoimalaitokset, nimellisteholtaan yli 100 kVA, mutta vuosituotanto enintään 800 000 kWh, jotka rekisteröityvät sähkön pientuottajiksi ja antavat koko vuodelta yhden veroilmoituksen tuottamastaan sähkön määrästä.</p> |
| <p>3. Sähköntuottaja, voimalaitos, jonka nimellisteho on yli 100 kVA ja vuosituotanto yli 800 000 kWh. Antaa normaalin veroilmoituksen (verolliset ja verottomat toimitukset) kuukausittain riippumatta siitä, syöttääkö sähköä sähköverkkoon vai ei.</p> |

Sähkövero on kaksiportainen:

1-luokkaan kuuluvat esimerkiksi kotitaloudet ja kaikki toiminta, joka ei kuulu 2-luokkaan.

1-luokan sähkövero on 2,253 senttiä kilowattitunnilta.

2-luokkaan kuuluvat valmistava teollisuus, kaivostoiminta, louhinta ja ammattimainen

kasvihuoneviljely. 2-luokan sähkövero 0,703 senttiä kilowattitunnilta.

6 TARKASTELUUN VALITUT TUOTANTOVAIHTOEHDOT ORC JA HÖYRYTURBIINI

Tuotantovaihtoehdot ORC ja höyryturbiini valittiin tarkasteluun, koska ne sopivat tässä casessa olevaan tehon tarpeeseen kaikkein parhaiten. Lämpötehon tarve on 4 MW ja sähkötehon omakäyttötarve on kuukaudesta riippuen 0,5–3,5 MW välillä. Muita valintakriteerejä olivat valittavan tekniikan luotettavuus ja todistettu toimivuus vastaavanlaisissa sovelluksissa. Höyryturbiini on valituista tekniikoista koetelluin ja näin ollen varma. ORC on tullut kaupalliseen käyttöön vasta 2000-luvulla, mutta tällä vuosikymmenellä ORC-laitoksia on rakennettu jo satoja. ORC:n etuna höyryturbiiniin on huomattavasti parempi hyötysuhde pienissä alle 1 MW tehoissa edelleen osakuormalle.

Kuvassa 14 on esitetty Turbodenin standardiyksiköiden parametrit ja hyötysuhteet. Turboden on yksi johtava ORC-moduulien valmistaja, ja heidän laitteitaan on käytössä ympäri Eurooppaa jo satoja yksiköitä. Famifarmin tapaukseen sopii hyvin heidän standardi yksikkönsä TD7CHP(h). Tämä yksikkö kykenee ottamaan lämpövirtaa sisään 3,50 MW ja tuottamaan tästä sähköä 19,0 % nettohyötysuhteella. Jäähdytystehon tarve on tällöin 2,78 MW, mikä sopii hyvin Famifarmin kasvihuoneiden huipputehon sisään. Standardiyksikön jäähdytysveden menolämpötila on 80 °C. Tämä lämpötila on liian matala kasvihuoneille talvikuukausina. Kasvihuoneet tarvitsevat nykyisillä asetuksilla 95 °C asteisen menolämpötilan. Turboden antaa liikkumavaraa menolämpötilassa 120 °C asti, joten tämä ei vaikuta tarkasteluun.

| ORC UNIT | | TD 3 CHP | TD 7 CHP | TD 8 HRS | TD 10 CHP (h) |
|--|----------|-----------|-----------|------------|---------------|
| Operation mode | | CHP | CHP | POWER ONLY | CHP |
| Gross power output (a) | MW | 0.35 | 0.70 | 0.80 | 1.10 |
| Auxiliary power consumption (b) | MW | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.05 |
| Net power output (c) | MW | 0.33 | 0.66 | 0.77 | 1.05 |
| Gross efficiency | % | 16.5% | 20% | 24% | 21% |
| Net efficiency | % | 15.3% | 19% | 23% | 20.1% |
| Thermal oil inlet / outlet temperature (d) | °C | 310 / 250 | 310 / 250 | 310 / 205 | 313 / 253 |
| Thermal power input | MW | 2.15 | 3.50 | 3.33 | 5.25 |
| Cooling water inlet / outlet temperature (e) | °C | 60 / 80 | 60 / 80 | 25 / 35 | 60 / 80 |
| Thermal power to cooling water | MW | 1.75 | 2.78 | 2.53 | 4.13 |
| Ambient air temperature (f) | °C | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 15.0 |
| Estimated yearly biomass consumption (g) | ton/year | 8,094 | 13,176 | 12,549 | 19,765 |

Kuva 14. Turbodenin standardiyksiköt (Turboden 2019).

6.1 Aineiston ja muuttujien kuvaus

Kannattavuuteen vaikuttaa eniten laitoksesta CHP-tuotannossa saatava sähköteho. Sähkötehon määrä riippuu saatavilla olevasta jäähdytyskapasiteetista eli lämmönkulutuksesta. Tässä selvityksessä rajataan pois mahdollinen apujäähdytys. Apujäähdytys tarkoittaa järjestelmää, jossa sähkön tuotannosta tuleva lauhde lauhdetaan apujäähdyttimellä eikä lämpöä hyötykäytetä. Tämä mahdollistaa suuremman sähköntuotannon, mutta samalla kokonaishyötysuhde kärsii.

Lämmönkulutusta tarkastellaan viiden vuoden ajanjaksolta tuntikohtaisesti, jotta päästään mahdollisimman tarkkaan pysyvyysskäyrään. Käyrän avulla saadaan selville kulloinkin tarjolla oleva lämmönkulutus ja edelleen tämän kulutuksen mahdollistamana sähkön tuotantomäärä ja sähköteho. Sähköntuotannon määrä kuukausitasolla on esitetty taulukossa 14. Taulukossa on esitetty tuotettavan sähkönmäärä vertailuun valituilla tekniikoilla höyryturbiini ja ORC-moduuli.

ORC-moduulin sähköntuotantoon on käytetty kuvassa 14 esitettyjä Turboden Standard Unit TD7 -tuotantoarvoja olettaen, että sähköntuotanto laskee lineaarisesti kuorman pudotessa.

Höyryturbiinilla tuotettava sähkönmäärä on laskettu seuraavilla lähtötiedoilla:

Kuormapiste A:

19 bar(a) @ 320 °C

Virtaus: 1,67 kg/s

Sähköteho: 580 kW

Tarvittava jäähdytyskapasiteetti: 4500kW

Kuormapiste B:

19 bar(a) @ 320 °C

Virtaus: 0,6 kg/s

Sähköteho: 100 kW

Tarvittava jäähdytyskapasiteetti: 1400kW

Turbiini-generaattorin tuottama sähköteho näiden kuormapisteiden välistä on laskettu yhtälöllä 2.

$$P, \text{sähkö} = a + (b - c)/(d - c) * (e - a), \quad (2)$$

jossa

a = sähköteho, kuormapiste B

b = lämpöteho

c = lämpöteho minimi, kuormapiste A

d = lämpöteho maksimi, kuormapiste B

e = sähköteho, kuormapiste A

Höyryturbiinin hyötysuhde ominaisteholla on 12,9 %. Kun mennään minimitiehen kuormapisteeseen B hyötysuhde putoaa 7,1 %. Kuormapisteiden välillä hyötysuhde nousee lineaarisesti. (Famifarmin tarjoustietokanta)

Tätä sähkötehoa verrataan edelleen omakäyttökulutukseen tunneittain viiden vuoden keskiarvoilla ja tarkastellaan, onko omakäyttökulutus suurempaa kuin tuotettu sähköteho. Ekonomisesti kannattavinta on tuottaa sähköä omaan käyttöön. Taulukossa 14 on esitetty sähköntuotantotehot vertailtavilla tekniikoilla Famifarmin tapauksessa.

Taulukko 14. Sähkön tuotantotehot kuukausittain eri tekniikoilla.

| Kuukausi | Lämpöteho yhteensä [kW] | Sähköteho höyryturbiini [kW] | Sähköteho ORC [kW] |
|-----------|-------------------------|------------------------------|--------------------|
| Tammikuu | 3507 | 426 | 660 |
| Helmikuu | 3258 | 388 | 660 |
| Maaliskuu | 2888 | 330 | 660 |
| Huhtikuu | 2324 | 243 | 508 |
| Toukokuu | 1713 | 149 | 304 |
| Kesäkuu | 1529 | 120 | 242 |
| Heinäkuu | 1428 | 104 | 208 |
| Elokuu | 1478 | 112 | 225 |
| Syyskuu | 1928 | 182 | 375 |
| Lokakuu | 2672 | 297 | 624 |
| Marraskuu | 2905 | 333 | 660 |
| Joulukuu | 3323 | 398 | 660 |

Näistä mittaustuloksista saadaan laskettua mahdollinen sähkön tuotannon määrä eri tuotantotekniikoille ilman apujäähdytystä. Kannattavuuslaskelmat tehdään olettaen, että apujäähdytystä ei käytetä. Vuosittaiseksi käyttöajaksi valitaan 8000 tuntia, joka on konservatiivinen valinta verrattuna lämpölaitoksen aikaisempien vuosien käyttötunteihin Famifarmilla. Taulukossa 15 on esitetty vuotuisten sähkön tuotantomäärien laskenta. Taulukosta huomataan, että ORC-tekniikalla päästään verrattain korkeaan huipunkäyttöaikaan höyryturbiinin huipunkäyttöajan jäädessä 41 % pienemmäksi.

Taulukko 15. Vuotuiset sähkön tuotannon määrät eri tekniikoilla.

| | Höyryturbiini | ORC-Moduuli |
|-----------------------------|---------------|-------------|
| Vuotuinen keskiarvo teho kW | 278 | 537 |
| Tuotanto 8000h/a [MWh/a] | 2226 | 4297 |
| Turbiini huipunkäyttöaika | 3838 | 6511 |

6.2 Aineiston keruu

Lämmönkulutus- ja tuotantotiedot saadaan kasvihuoneen automaatiojärjestelmästä.

Kokonaislämpötehoon lasketaan summa kiinteän polttoaineen kattilan lämpötehosta sekä kolmesta vara- ja huippuvoimakattilana toimivasta öljykattilasta. Näin saadaan selville koko Famifarmin lämpöteho. Lämpötehoa tarkastellaan tunneittain viiden vuoden ajalta, jolloin saadaan hyvä keskiarvo lämmönkulutukselle. Famifarmilla on käytössä Privan kasvihuoneautomaatio, joka ohjaa kasvihuoneen kaikkia toimintoja. Toimintoihin kuuluu:

1. Valaistus, jota ohjataan saatavilla olevan päivän valon suhteen.
2. Lämmitys, jota ohjataan kasvihuoneen sisälämpötilan, ulkolämpötilan ja optimaalisen kasvulämpötilan funktiona.
3. Ilmastointi, joka pitää huolen kasvihuoneen ilmanlaadusta. Kontrolloitavia suureita ovat ilmankosteus, lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus. Kosteutta säädetään tuuletuksella ja lämpötilalla. Hiilidioksidipitoisuutta säädetään tuuletuksella ja hiilidioksidin syötöllä. Hiilidioksidille on oma syöttöjärjestelmä, joka ottaa tarvittavan hiilidioksidin varastosäiliöistä.

Sähkönkulutustiedot saadaan mittarilukemista tunneittain.

Kerätylle aineistolle tehdään aika-analyysi, jossa tarkastellaan lämpötilaeron vaikutusta sähkönkulutukseen ja lämmönkulutukseen sekä näiden riippuvuutta lineaarisella regressianalyysillä Exceliä apuna käyttäen.

7 INVESTOINNIN KANNATTAVUUS

7.1 Tarkastelun lähtötilanne

Famifarmilla lämmitysenergia tuotetaan tällä hetkellä 3 MW kiinteän polttoaineen kattilalla. Lisäksi huipputehot ja varavoima tuotetaan öljykattiloilla. Kasvaneen lämmöntarpeen vuoksi nykyinen KPA-kattila on jäänyt pieneksi ja öljykattiloilla joudutaan ajamaan enemmän lämpöä kuin on kannattavaa. KPA-kattila on otettu käyttöön vuonna 2007 ja sen käyttöikä lähenee loppuaan. Korvaavina vaihtoehtoina on selvitetty nykyisen kattilan korvaamista uudella, joka sijoitettaisiin vanhaan kattilahuoneeseen, jolloin ja hyödynnettäisiin olemassa olevat apulaitteet ja automaatio. Tämä ratkaisu on investointina edullisin, mutta elinkaaren aikana ei.

7.2 Investointi laskelmat

Tässä työssä selvitetään CHP-investoinnin kannattavuutta verrattuna lämpölaitosinvestointiin. Lämpölaitosinvestoinnin hintaa pidetään vertailuarvona, ja se asetetaan nolnaan euroon. Sähköntuotannon mahdollistavien CHP-tekniikoiden investointikustannuksena käytetään sitä kustannusta, joka lämpölaitoksen hintaan tarvitsee lisätä mahdollistaen kokonaisinvestoinnin. Kannattavuutta arvioidaan tuotetun sähkön määrällä ja siitä saatavalla tuotolla. Kaikki tuotettava sähkö on omakäyttösähköä, eikä verkkoon tai kasvihuoneiden ulkopuolelle myydä mitään. Näin ollen vertailussa käytetään vain yhtä sähkön hintaa. Vertailtavat CHP-tekniikat ovat välttämättömiä. Käytettävyys huononee laitoksen apulaitteiden vanhetessa ja ylläpitokustannukset kasvavat. Myös varavoiman tarve suurenee laitoksen ikääntyessä.

Toisena vaihtoehtona on selvityksessä kokonaan uusi CHP-tuotantolaitos. Laitoksen lämpöteho mitoitetaan niin, että se ottaa huomioon seuraavan 10 vuoden kapasiteetin kasvun tarpeen. Lisäksi laitokseen tehoon vaikuttavat sähköntuotannon hyötysuhde ja laitoksen rakennusaste.

Lisäksi selvitetään CHP-investoinnin kannattavuus verrattuna samaa polttoainetta käyttävään ja saman lämpötehon tuottavaan lämpölaitokseen. Tämä vaihtoehto tulisi

kysymykseen, jos vanha KPA-laitos jätetään varalle eikä olemassa olevia apulaitteita ja infraa hyödynnetä uuden kattilan rakentamisessa.

Tarkasteluun ovat valikoituneet kasvihuoneiden tehontarpeen ja olemassa olevan infran mukaan ORC-prosessi ja höyryturbiini. ORC-prosessilla saavutetaan parempi sähköntuotannon hyötysuhde ja laskennasta selvitetään sen ekonominen vaikutus.

Investoinnin kannattavuutta arvioidaan neljällä menetelmällä, joiksi valittiin sisäinen korkokanta, korollinen takaisinmaksuaika, annuiteettimenetelmä ja kumulatiivinen nykyarvomenetelmä. Seuraavissa luvuissa esitellään eri menetelmät ja käytettävät kaavat.

Investoinnin kannattavuutta arvioidaan seuraavin oletuksin:

| | |
|-----------------------------------|---|
| Korkokanta | 5 % |
| Investoinnin pitoaika | 15 vuotta |
| MMM-investointituki | 40 % koko investoinnista |
| Sähkön ostohinta siirtomaksuineen | 0,0516 €/kWh* |
| Hakkeen ostohinta | 21 €/MWh |
| Kiinteät kulut | Oletetaan, että sähkön tuotanto ei lisää kiinteitä kuluja |

*Famifarmilla on oma 110KV siirtolinja, joka vaikuttaa sähkön kokonaishintaan.

Laitoksen investoinnin kannattavuuteen vaikuttavat laitoksen rakentamisesta tulevien tuottojen lisäksi kustannukset ja kulut. Voimalaitosinvestoinneille on tyypillistä investointien pitkä pitoaika, jolloin pääomakustannusten merkitys investoinnin kannattavuudessa korostuu. Kannattavuuden arviointia varten kustannukset jaetaan kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Kiinteitä kustannuksia ovat sellaiset kustannukset, jotka eivät ole riippuvaisia tuotannon määrästä, kun taas muuttuvia kustannuksia ovat kustannukset, jotka ovat riippuvaisia tuotannon määrästä. Suurin kiinteä kustannus voimalaitoksissa on pääomakustannus ja suurin muuttuva kustannus on polttoaineesta syntyvä kulu. Voimalaitosinvestoinnin kustannusten rakenne on esitetty taulukossa 16. (Vakkilainen et al. 2017)

Taulukko 16. Voimalaitosinvestoinnin kustannusten rakenne.

| | |
|------------------------|------------------|
| Kiinteät kustannukset | Pääomakustannus |
| | Käyttö ja huolto |
| | |
| Muuttuvat kustannukset | Polttoainekulu |
| | Käyttö ja huolto |

Famifarmin tapauksessa kannattavuutta verrataan kiinteän polttoaineen kuumavesikattilaan, joten kustannuksista otetaan huomioon vain kustannukset, joita kuumavesikattilasta ei aiheudu. Näin ollen kiinteistä kustannuksista huomioidaan vain pääomakustannus. Muuttuvista kustannuksista huomioidaan polttoainekustannus ja CHP-tuotannon aiheuttama lisähuollon ja kunnossapidon tarve. Käyttöhenkilökuntaa ei tarvitse lisätä, vaan sama työvoima, jota tarvitaan kuumavesikattilaan, pystyy hoitamaan myös CHP-laitoksen. Muuttuvaksi lisäkustannukseksi CHP-tuotannosta arvioidaan 33 % kokonaiskäyttö- ja huoltokuluista. Kokonaiskustannuksiksi arvioidaan 2,76 €/MWh, jolloin CHP-tuotannon lisäkustannus on 0,91 €/MWh. (Vakkilainen et al. 2017)

7.2.1 Kumulatiivinen nykyarvomenetelmä

Kumulatiivisella nykyarvomenetelmällä arvioidaan investoinnin kumulatiivista nykyarvoa vuotena n. Investoinnin pitoaikana syntyvät tulot ja menot diskontataan tähän ajanhetkeen. Kumulatiivisen nykyarvomenetelmän avulla voidaan piirtää havainnollistavia takaisinmaksupiirroksia

$$NA(n) = -I + \sum_{j=1}^n \frac{Tulot(j) - Menot(j)}{(1+i)^j}, \quad (3)$$

jossa

Na(n) = Kumulatiivinen nykyarvo (laskettuna vuodesta 0 vuoteen n)

i = korko

I = investointi

Tulot(j) = tuotot / vuosi

Menot(j) = menot / vuosi

j = tarkasteltava vuosi

n = tarkasteltava ajanjakso

7.2.2 Annuiteettimenetelmä

Annuiteettimenetelmässä perusinvestointi jaetaan pitoajalle yhtä suuriksi vuosikustannuksiksi eli annuiteeteiksi. Oletuksena on, että pääoma maksetaan takaisin n vuoden kuluessa samansuuruisilla vuosimaksuilla. Perushankintakustannus jaetaan annuiteettitekijän avulla investoinnin pitoajan eri vuosille tasaeriksi. Investointi on kannattava, jos vuotuinen nettotuotto on suurempi kuin perushankintakustannusten annuiteetti. Annuiteettitekijä lasketaan kaavalla 2, ja kaavalla 1.1 verrataan nettotuottoa perushankintakustannusten annuiteettiin.

$$c_{n,i} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}, \quad (4)$$

jossa

n = vuosien määrä, pitoaika

i = laskentakorko

$$S - c_{n,i} * I > 0, \quad (4.1)$$

jossa

S = vuotuinen nettotuotto

I = investointikustannus

7.2.3 Sisäisen korkokannan menetelmä

Sisäisen korkokannan menetelmässä määritetään se korkokanta, jota soveltaen valittuun vertailuajankohtaan diskontatut tulot ja menot ovat yhtä suuret. Eli toisin sanoen sisäisen korkokannan menetelmällä selvitetään se korkokanta, jolla investoinnin nykyarvo on nolla. Sisäinen korkokanta lasketaan kaavalla 2. Mitä suurempi arvo sisäiselle korkokannalle saadaan, sitä kannattavampi investointi on.

$$I - \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} * q = 0, \quad (5)$$

jossa

I = investointikustannus

n = investoinnin pitoaika, a

r = sisäinen korkokanta

q = investoinnin juoksevasti syntyvät suoritukset vuodessa

7.2.4 Nykyarvomenetelmä

Nykyarvomenetelmässä investoinnin pitoaikana syntyvät tulot ja menot diskontataan nykyhetken valitulla korkokannalla laskettuna. Investoinnin kannattavuutta arvioidaan nykyhetken arvolla, jonka täytyy olla suurempi kuin alkuperäinen investointi ollakseen kannattava. Korkeammalla laskentakorolla vaaditaan enemmän tuottoja, jotta investoinnin kannattavuus toteutuu. Menetelmä on esitetty kaavassa 6.

$$NA = I + \frac{q_1}{(1+i)^1} + \frac{q_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{q_n}{(1+i)^n} + \frac{JA_n}{(1+i)^n}, \quad (6)$$

jossa

I = investointikustannus

q = investoinnin juoksevasti syntyvät suoritukset vuodessa

JA_n = investoinnin jäännösarvo

7.2.5 Korollinen takaisinmaksuaika

Korollisen takaisinmaksuajan menetelmällä määritellään kuinka monta vuotta kestää kun investoinnin tuottamat tuotot ovat yhtä suuret kuin investointikustannus. Menetelmä ei ota huomioon, mitä tapahtuu tämän ajan jälkeen. Takaisinmaksuajan menetelmä on käyttökelpoinen, kun arvioidaan investoinnin maksuvalmiutta ja epävarmuutta. Korollisen takaisinmaksuajan laskenta on esitetty kaavassa 7.

$$n = \frac{-\ln\left(\frac{1}{i} - \frac{I}{q}\right) - \ln(i)}{\ln(1+i)}, \quad (7)$$

jossa

I = investointikustannus

q = investoinnin juoksevasti syntyvät suoritukset vuodessa

i = laskentakorkokanta

Kannattavuuslaskelman alkuarvot on esitetty taulukossa 17. Laskennassa on käytetty kunkin sähköntuotantovaihtoehdon aiheuttamaa lisähintaa voimalaitosinvestoinnin yhteydessä.

Taulukko 17. Kannattavuuslaskelman alkuarvoja.

| | Höyryturbiini | ORC Moduuli |
|--|------------------|--------------------|
| Höyrykattilan aiheuttama lisähinta | 300 000 € | 300 000 € |
| -tulistin | x | x |
| -syöttövesisäiliö | x | x |
| -lauhejärjestelmä | x | x |
| Turbiini & generaattori | 400 000 € | 1 200 000 € |
| Turbiinirakennus (130 m ²) | 117 000 € | 117 000 € |
| Yhteensä: | 817 000 € | 1 617 000 € |
| | | |
| | | |
| Sähköteho [kW] | 580 | 660 |
| CHP Vuosihyötysuhde [%] | 88 % | 88 % |
| Sähköntuotannon investointikustannus [milj. €] | 817 000 € | 1 617 000 € |
| Ominaisinvestointi [€/kW] | 1 408,62 € | 2 450,00 € |
| Polttoaineen hinta [€/MWh] | 20,40 € | 20,40 € |
| Polttoainekustannus [€/MWh] | 23,18 € | 23,18 € |
| Käyttö- ja kunnossapitokustannukset [€/MWh] | 2,76 € | 2,76 € |
| Taloudellinen elinikä [a] | 15 | 15 |
| Reaalikorko [%] | 5 % | 5 % |
| Huipunkäyttöaika [h/a] | 3838 | 6511 |
| Sähkön ostohinta [€/kWh] | 0,0516 | 0,0516 |
| Tuotettu sähkö/a [kWh] | 2 226 000 | 4 297 000 |
| Kustannus, tuotettu sähkö [€/a] | 57 746,49 € | 105 756,03 € |
| Ostohinta [€/a] | 114 861,60 € | 221 725,20 € |
| Saavutettava tuotto [€/a] | 57 115,11 € | 115 969,17 € |

7.3 Tulokset

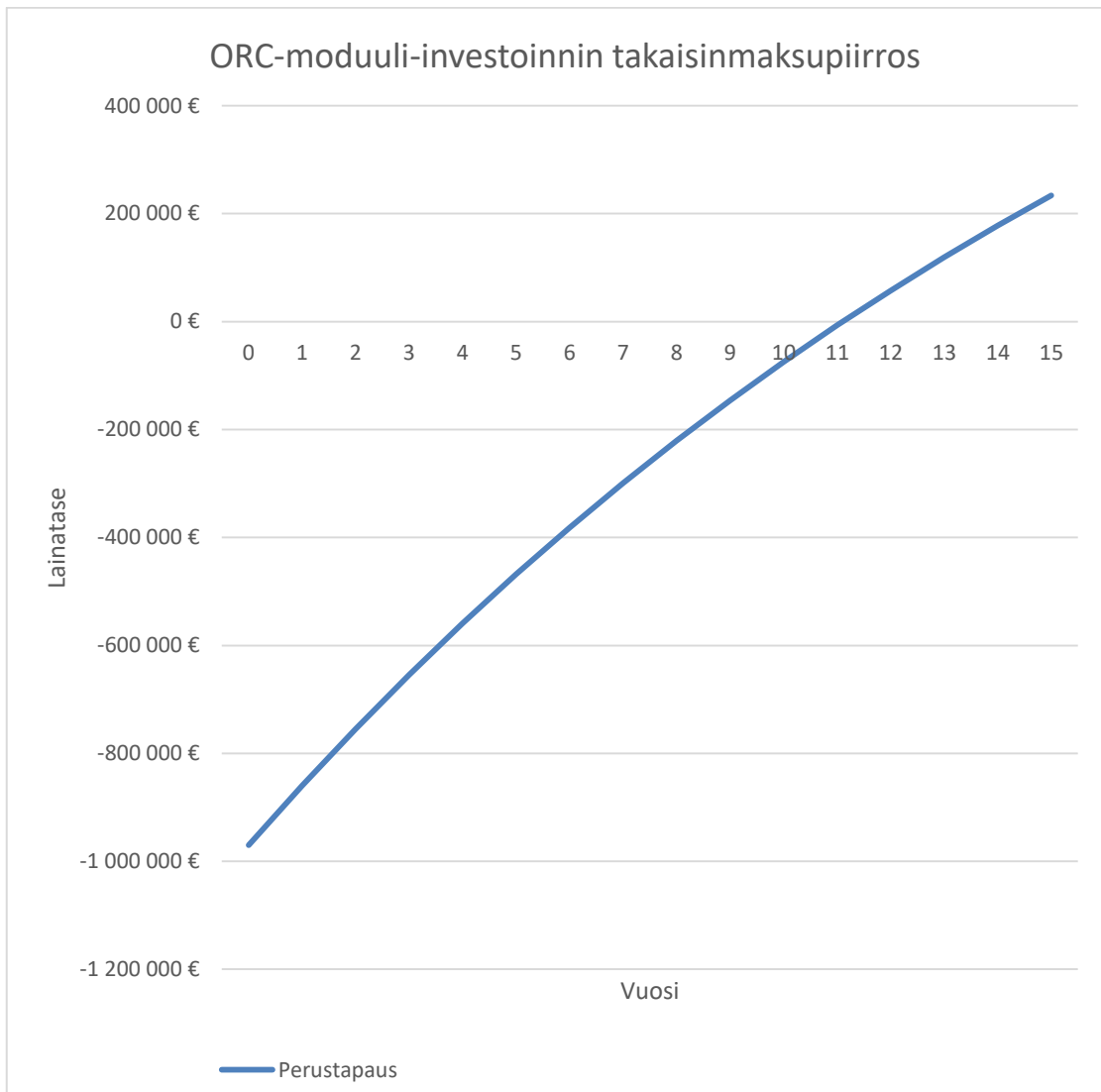
Taulukossa 18 esitetyistä tuloksista huomataan, että sekä höyryturbiini että ORC-moduuli ovat taloudellisesti kannattavia. Kaikilla käytetyillä mittareilla (sisäinen korkokanta, korollinen takaisinmaksuaika, annuiteetti ja nettonykyarvo) mitattuna huomataan, että molemmat vaihtoehdot ovat lähellä toisiaan. Isoimpana erona on ORC-moduulin suurempi investointi ja näin ollen suurempi sitoutuminen omapääoma. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty tulokset takaisinmaksupiirroksissa.

Taulukko 18. Laskennan tulokset.

| | Höyryturbiini | ORC-Moduuli |
|--|------------------|--------------------|
| Kokonaisinvestointi: | 817 000 € | 1 617 000 € |
| Investointituki 40 % | 326 800 € | 646 800 € |
| Sähköntuotannon investointikustannus [milj. €] | 490 200 € | 970 200 € |
| Nettokassavirta/a: | 57 115 € | 115 969 € |
| Sähköteho [kW] | 580 | 660 |
| CHP Vuosihyötysuhde [%] | 88 % | 88 % |
| Ominaisinvestointi [€/kW] | 845,17 € | 980,00 € |
| Polttoaineen hinta [€/MWh] | 20,40 € | 20,40 € |
| Polttoainekustannus [€/MWh] | 23,18 € | 23,18 € |
| Käyttö ja kunnossapitokustannukset [€/MWh] | 2,76 € | 2,76 € |
| Taloudellinen elinikä [a] | 15 | 15 |
| Reaalikorko [%] | 5 % | 5 % |
| Huipunkäyttöaika [h/a] | 3838 | 6511 |
| | | |
| Sisäinen korkokanta | 8,78 % | 8,82 % |
| Korollinen takaisinmaksuaika | 11,49 | 11,10 |
| Annuiteetti | 9 888,12 € | 22 497,88 € |
| Nettonykyarvo | 592 835,34 € | 1 203 720,30 € |
| Suhteellinen nykyarvo PI | 1,21 | 1,24 |



Kuva 14. Höyryturbiini-investoinnin takaisinmaksupiiirros.



Kuva 15. ORC-moduulin takaisinmaksupiirros.

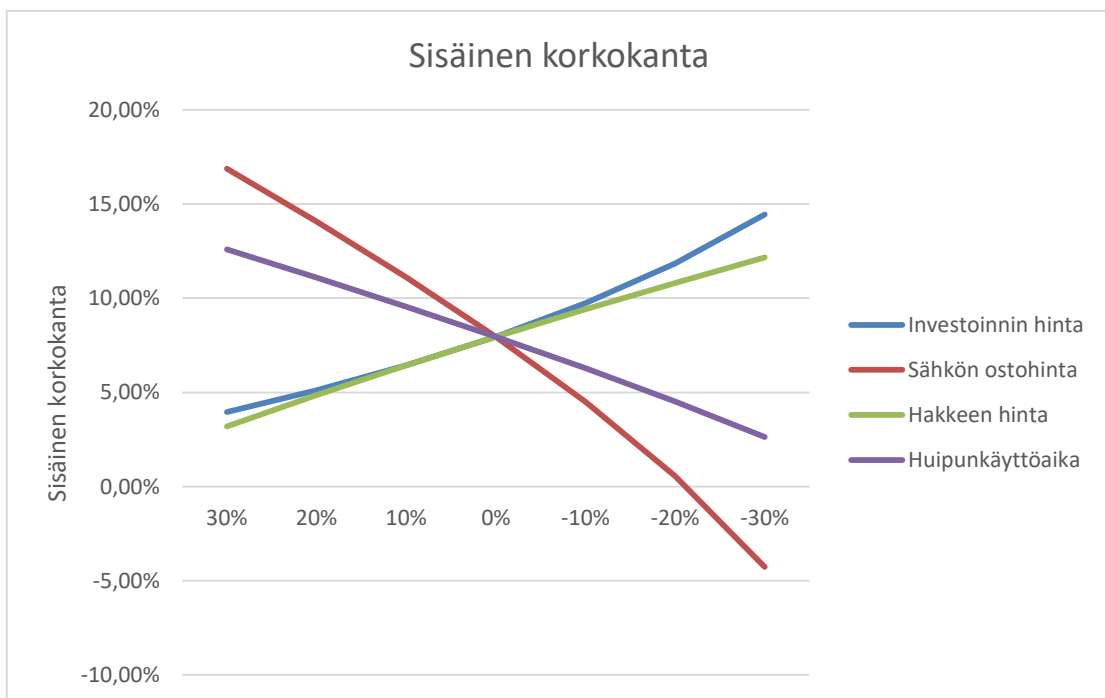
7.4 Herkkyystarkastelu

Herkyystarkastelussa selvitetään parametrien vaikutus investoinnin kannattavuuteen. Tarkastelu on tehty taulukkolaskennalla, ja tulokset on esitetty taulukoissa. Tuloksista huomataan, että investointi reagoi todella herkästi ostosähkön hintaan.

Tässä työssä herkkyystarkastelu on suoritettu kolmiarvoisella laskennalla. Kolmiarvoisessa laskennassa määritetään ensin paras mahdollinen kannattavuusarvio. Tämän jälkeen kannattavuus tekijöille määritetään optimistinen ja pessimistinen arvio tai arviot. Tässä

herkkyystarkastelussa on käytetty sekä optimistisinä että pessimistisinä arvioina kannattavuustekijöille 10 %, 20 % ja 30 % muutoksia.

Herkkyystarkastelussa selvitetään eri parametrien vaikutus investoinnin kannattavuuden. Herkkyystarkastelussa pyritään löytämään epäedullisimmat arviointivirheet ja selvittää näiden vaikutus lopputulokseen. Kun on selvitetty, mille muuttujille laskenta reagoi herkimmin, voidaan näiden avulla investoinnin kannattavuutta arvioida kriittisemmin. Tarkastelu on tehty taulukkolaskennalla ja tulokset on esitetty taulukossa 3 höyryturbiinin osalta ja taulukossa 4 ORC-moduulin osalta. Tuloksista huomataan, että investointi reagoi todella herkästi ostosähkön hintaan. Molemmissa tapauksissa sekä höyryturbiinilla että ORC-moduulilla kannattavuuslaskelmien tulokset ovat toistensa kaltaiset ja molemmat reagoivat herkkyystarkastelussa samalla lailla. Kuvassa 16 on havainnollistettu, kuinka sisäinen korkokanta reagoi eri parametrien muutoksiin. Huomataan, että investointi on reagoi herkimmin sähkön ostohinnan muutoksiin.



Kuva 16. Sisäisen korkokannan muutos eri parametreilla.

Sama ilmiö tulee näkyviin herkkyystarkasteluissa taulukoissa 19 ja 20, joista käy ilmi, että investointi on erityisen herkkä sähkön ostohinnalle ja huipunkäyttöajalle. Näitä muuttujia tulee arvioida kriittisesti tehtäessä investointipäätöstä. Huipunkäyttöaika pienenee, jos kasvihuoneen kokonaistuotantomäärä putoaa, jolloin myös lämmön tarve vähenee ja tämän

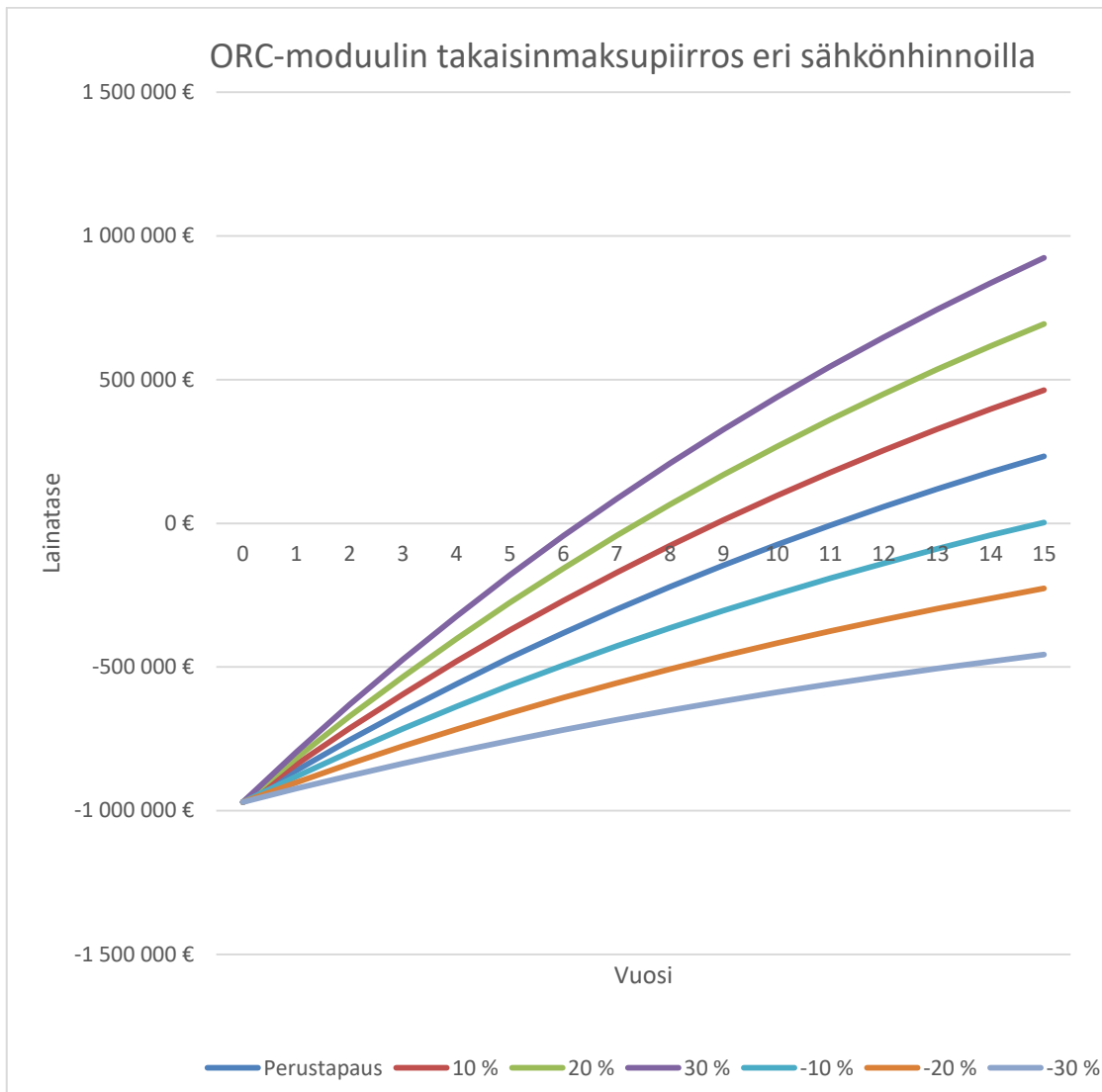
seurauksena sähköntuotanto määrää pienenee. Tuotannon pienenemistä ei ole näköpiirissä. Todennäköisemmin tuotanto tulee kasvamaan ja lämmönkulutus lisääntymään, jolloin sähköntuotantomäärä kasvaa myös. Sähkön ostohintaa tulee arvioida tehtäessä investointipäätöstä. Sähkön ostohinnan pudotessa 10 % investoinnit muuttuvat kannattamattomaksi. Näköpiirissä ei ole sähkönhinnan putoamista nykyisestä tasosta, jota laskentaan on käytetty. Kuvissa 17 ja 18 on esitetty investointien takaisinmaksupiirroksia, jotka havainnollistavat investointien takaisinmaksuaikaa. Molempien tuotantovaihtoehtojen takaisinmaksuajat ovat hyvin lähellä toisiaan. ORC-moduuli alkaa kerryttämään pääomaa 2-kertaisella nopeudella takaisinmaksuajan päätyttyä.

Taulukko 19. höyryturbiini-investoinnin herkkyystarkastelu.

| Höyryturbiini | | | | | |
|--------------------|-------|------------------------------|---------------------|--------------------|-------------|
| | | Korollinen takaisinmaksuaika | Sisäinen korkokanta | Nykyarvo menetelmä | Annuiteetti |
| Investoinnin hinta | | | | | |
| | 30 % | 16,73 | 3,95 % | -44 425 € | -4 280 € |
| | 20 % | 14,83 | 5,12 % | 4 595 € | 443 € |
| | 10 % | 13,09 | 6,44 % | 53 615 € | 5 165 € |
| Perustapaus | 0 % | 11,49 | 7,96 % | 102 635 € | 9 888 € |
| | -10 % | 10,00 | 9,73 % | 151 655 € | 14 611 € |
| | -20 % | 8,62 | 11,85 % | 200 675 € | 19 334 € |
| | -30 % | 7,32 | 14,45 % | 249 695 € | 24 056 € |
| Sähkön ostohinta | | | | | |
| | 30 % | 6,38 | 16,88 % | 460 303 € | 44 347 € |
| | 20 % | 7,49 | 14,07 % | 341 080 € | 32 860 € |
| | 10 % | 9,06 | 11,11 % | 221 858 € | 21 374 € |
| Perustapaus | 0 % | 11,49 | 7,96 % | 102 635 € | 9 888 € |
| | -10 % | 15,79 | 4,50 % | -16 587 € | -1 598 € |
| | -20 % | 25,94 | 0,55 % | -135 809 € | -13 084 € |
| | -30 % | 30,00 | -4,26 % | -255 032 € | -24 570 € |
| Hakkeen hinta | | | | | |
| | 30 % | 18,21 | 3,19 % | -58 050 € | -5 593 € |
| | 20 % | 15,21 | 4,86 % | -4 488 € | -432 € |
| | 10 % | 13,08 | 6,45 % | 49 073 € | 4 728 € |
| Perustapaus | 0 % | 11,49 | 7,96 % | 102 635 € | 9 888 € |
| | -10 % | 10,25 | 9,41 % | 156 197 € | 15 048 € |
| | -20 % | 9,26 | 10,80 % | 209 759 € | 20 209 € |
| | -30 % | 8,44 | 12,16 % | 263 321 € | 25 369 € |
| Huipunkäyttöaika | | | | | |
| | 30 % | 8,21 | 12,59 % | 280 486 € | 27 023 € |
| | 20 % | 9,07 | 11,10 % | 221 202 € | 21 311 € |
| | 10 % | 10,14 | 9,56 % | 161 919 € | 15 600 € |
| Perustapaus | 0 % | 11,49 | 7,96 % | 102 635 € | 9 888 € |
| | -10 % | 13,28 | 6,28 % | 43 352 € | 4 177 € |
| | -20 % | 15,76 | 4,52 % | -15 932 € | -1 535 € |
| | -30 % | 19,46 | 2,63 % | -75 215 € | -7 246 € |

Taulukko 20. ORC-moduuli-investoinnin herkkyytarkastelu.

| ORC moduuli | | | | | |
|--------------------|-------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------|
| | | Korollinen takaisinmaksuaika | Sisäinen korkokanta | Nykyarvo menetelmä | Annuiteetti |
| Investoinnin hinta | | | | | |
| | 30 % | 16,09 | 3,56 % | -57 540 € | -5 544 € |
| | 20 % | 14,29 | 4,78 % | 39 480 € | 3 804 € |
| | 10 % | 12,63 | 6,16 % | 136 500 € | 13 151 € |
| Perustapaus | 0 | 11,10 | 7,75 % | 233 520 € | 22 498 € |
| | -10 % | 9,68 | 9,60 % | 330 540 € | 31 845 € |
| | -20 % | 8,35 | 11,81 % | 427 560 € | 41 192 € |
| | -30 % | 7,10 | 14,52 % | 524 580 € | 50 539 € |
| Sähkön ostohinta | | | | | |
| | 30 % | 6,33 | 16,63 % | 923 950 € | 89 015 € |
| | 20 % | 7,39 | 13,83 % | 693 807 € | 66 843 € |
| | 10 % | 8,87 | 10,89 % | 463 663 € | 44 670 € |
| Perustapaus | 0 | 11,10 | 7,75 % | 233 520 € | 22 498 € |
| | -10 % | 14,92 | 4,32 % | 3 377 € | 325 € |
| | -20 % | 23,18 | 0,44 % | -226 766 € | -21 847 € |
| | -30 % | 81,19 | -4,21 % | -456 909 € | -44 020 € |
| Hakkeen hinta | | | | | |
| | 30 % | 16,99 | 3,03 % | -76 662 € | -7 386 € |
| | 20 % | 14,42 | 4,68 % | 26 732 € | 2 575 € |
| | 10 % | 12,54 | 6,25 % | 130 126 € | 12 537 € |
| Perustapaus | 0 | 11,10 | 7,75 % | 233 520 € | 22 498 € |
| | -10 % | 9,97 | 9,19 % | 336 914 € | 32 459 € |
| | -20 % | 9,05 | 10,58 % | 440 309 € | 42 420 € |
| | -30 % | 8,29 | 11,93 % | 543 703 € | 52 382 € |
| Huipunkäyttöaika | | | | | |
| | 30 % | 7,96 | 12,58 % | 594 636 € | 57 289 € |
| | 20 % | 8,78 | 11,03 % | 474 264 € | 45 692 € |
| | 10 % | 9,81 | 9,42 % | 353 892 € | 34 095 € |
| Perustapaus | 0 | 11,10 | 7,75 % | 233 520 € | 22 498 € |
| | -10 % | 12,81 | 6,00 % | 113 148 € | 10 901 € |
| | -20 % | 15,17 | 4,15 % | -7 224 € | -696 € |
| | -30 % | 18,66 | 2,18 % | -127 596 € | -12 293 € |



Kuva 17. ORC-moduulin takaisinmaksupiirros eri sähkönostohinnoilla.



Kuva 18. Höyryturbiinin takaisinmaksupiirros eri sähkönostohinnoilla.

8 TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Kasvihuoneiden kuukausittaista lämpöenergian käyttöä tarkasteltaessa huomattiin, että lämpöenergian tarve on merkittävän suuri myös kesäkuukausina. Suurimmat kulutuslukemat viiden vuoden keskiarvoilla mitattuna ovat tammikuussa, jolloin lämpötehon keskiarvo on 3,5 MW. Pienimmillään lämpöenergian kulutus on heinäkuussa kulutuksen ollessa tällöin 1,4 MW. Viiden vuoden tarkastelujaksolla ei lämpöenergian kokonaiskulutuksessa ollut merkittäviä eroja vuosien välillä. Suurin ero oli, että lämpölaitosta on pystytty hyödyntämään paremmin vuosina 2016–2018 ja apukattiloita on tarvinnut käyttää vähemmän. Tutkimusjaksolla 14 % kokonaislämpöenergiasta tuotettiin apukattiloilla. Taulukossa 21 on esitetty lämpöenergian kulutus kuukausittain viiden vuoden ajanjaksolta sekä kiinteän polttoaineen kattilalla että öljykattiloilla. Tätä määrää täytyy pystyä pienentämään tulevaisuudessa. Suurimpana tekijänä apukattiloiden isoon käyttöön on kiinteän polttoaineen kattilan kapasiteetin pienuus.

Taulukko 21. Lämpöenergiantuotanto kuukausittain.

| | Lämpölaitoksen teho [kW] | Öljykattiloiden teho [kW] | Lämpöteho yhteensä [kW] |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Tammikuu | 2684 | 823 | 3507 |
| Helmikuu | 2565 | 693 | 3258 |
| Maaliskuu | 2389 | 499 | 2888 |
| Huhtikuu | 2086 | 238 | 2324 |
| Toukokuu | 1612 | 101 | 1713 |
| Kesäkuu | 1452 | 77 | 1529 |
| Heinäkuu | 1244 | 184 | 1428 |
| Elokuu | 1420 | 58 | 1478 |
| Syyskuu | 1776 | 152 | 1928 |
| Lokakuu | 2514 | 158 | 2672 |
| Marraskuu | 2548 | 357 | 2905 |
| Joulukuu | 2753 | 570 | 3323 |
| Keskiarvo: | 2078 | 337 | 2415 |

Investoinnin kannattavuuslaskelmista taulukosta 18 nähdään, että investointi on kannattava kaikilla käytetyillä mittareilla. Höyryturbiini ja ORC-moduulin ovat kannattavuudeltaan toistensa kaltaiset. ORC-moduulin investointikustannus on 2 kertaa suurempi, ja se sitoo näin ollen enemmän pääomaa.

Herkkyystarkasteluissa taulukoissa 19 ja 20 tulee ilmi, että investointi on erityisen herkkä sähkön ostohinnalle ja huipunkäyttöajalle. Näitä muuttujia tulee arvioida kriittisesti tehtäessä investointipäätöstä. Huipunkäyttöaika pienenee, jos kasvihuoneen kokonaistuotantomäärä putoaa, jolloin myös lämmön tarve vähenee ja tämän seurauksena sähköntuotantomäärä pienenee. Tuotannon pienenemistä ei ole näköpiirissä.

Todennäköisemmin tuotanto tulee kasvamaan ja lämmönkulutus lisääntymään, jolloin sähköntuotantomäärä kasvaa myös. Sähkön ostohintaa tulee arvioida tehtäessä investointipäätöstä. Sähkön ostohinnan pudotessa 10 % investoinnit muuttuvat kannattamattomaksi. Näköpiirissä ei ole sähkön hinnan putoamista nykyisestä tasosta, jota laskentaan on käytetty.

Energiankulutuksien suhde on hyvin oleellinen suure mietittäessä CHP-tuotantoa kasvihuoneympäristössä. Omakäyttösähkön tuottaminen on hyvin kustannustehokasta. Itse tuotetusta sähköstä omaan käyttöön ei tarvitse maksaa siirtomaksuja.

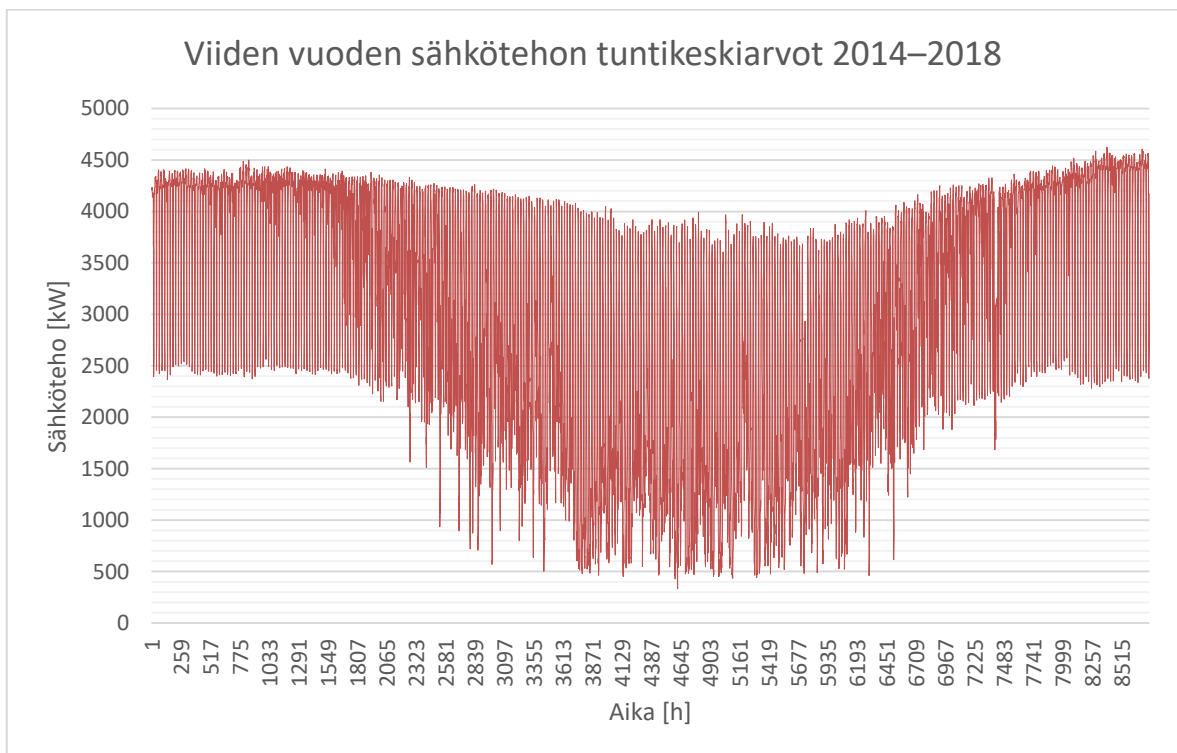
Sähkön tuotannon jälkeen jäljelle jäänyt lämpö tulee hyötykäyttää lämmityskohteeseen. Jos lämmölle ei ole käyttökohdetta ja joudutaan käyttämään apujäähdytystä lauhteen jäähdytykseen, romahtaa tuotannon hyötysuhde hyvin nopeasti ja tuotannosta tulee kannattamatonta. Kasvihuoneympäristössä on todennäköistä, että omakäyttösähkön teho on suurimman osan vuodesta enemmän kuin pien-CHP-tekniikalla voidaan tuottaa. Suurin osa tuotetusta sähköstä voidaan siis käyttää itse ja sähkön lopputarve turvataan ostosähköllä. Ekonomisesti parempi ratkaisu olisi, jos sähköä ei tarvitsisi ostaa, eli lämmön ja sähkön kulutussuhde muuttuisi enemmän lämmitysvoittoiseksi. Tämä suuntaus on tulevaisuudessa mahdollinen tai jopa todennäköinen, kun kasvihuoneen valaistukseen tällä hetkellä pääteknikkana olevia kaasupurkausvaloja aletaan enenevässä määrin korvaamaan led-tekniikalla. Led-tekniikan etuna on hyvin pieni sähkönkulutus verrattuna perinteisiin valoihin ja näin ollen pieni lämmöntuonti valaistuun tilaan. Kun valaistuksen mukanaan tuoma lämpöenergia vähenee, täytyy tämä korvata lämmitysverkoston tehoa kasvattamalla. Tämä tilanne taas on todella hyvä CHP-tuotannon kannalta. Sähköä voidaan tuottaa enemmän, ja lauhdutuskapasiteettia on enemmän tarjolla kasvaneen lämmitystarpeen vuoksi. Optimitilanne olisi, että kasvihuoneen lämmön ja sähkön kulutuksien suhde olisi sama kun tuotantolaitoksen rakennusaste. Rakennusasteella tarkoitetaan CHP-tuotannossa sähkön ja lämmöntuotannon suhdetta. Korkea rakennusaste tarkoittaa korkeaa sähköntuottomäärää suhteessa lämpötehoon. Mitä korkeampi rakennusaste, sitä korkeampi on myös investoinnin hinta. Pienen kokoluokan CHP-laitoksissa rakennusaste jää pieneksi johtuen pienien turbiinien heikosta hyötysuhteesta.

Kuvasta 19 selviää, että sähkönkulutus on pienimmillään viiden vuoden mittausjaksolla toistuvasti heinäkuussa. Syynä tähän on korkea valon määrä ja lämpötila. Suomen ilmatieteen laitoksen tilastoista selviää, että eniten aurinkoisia päiviä on mittausjaksolla ollut heinäkuussa.

Kun heinäkuun tehontarve otetaan tarkempaan analyysiin, huomataan, että sähkötehon tarve muuttuu vuorokaudenajan ja samalla luonnonvalon määrän mukaan. Tämä on esitetty kuvassa 19. Muutokset vuorokauden energiantarpeessa ovat suurimmillaan heinäkuussa ja pienimmillään tammikuussa. Heinäkuun vuorokausimuutos on suurimmillaan 90 %

maksimista, kun taas tammikuussa pysytään 50 % maksimitehosta. Toisaalta myös lämmönkulutus on pienimmillään heinäkuussa, eli CHP-sähkön tuottamiseen tarvittava lauhdeteho on myös pienimmillään.

Yhteenvedona verratessa sähkönkulutusta ja CHP-tuotannon kapasiteettia ajankohdan mukaan huomataan, että pienimmän sähkön kulutuksen aikaan myös lämmönkulutus ja edelleen tuotanto ovat pienimmillään. Toisin sanoen kaikki tuotettu sähkö voidaan käyttää itse, eikä verkkoon tarvitse siirtää sähköä ollenkaan. –



Kuva 19. Sähkötöhen tuntikeskiarvot 2014–2018.

9 YHTEENVETO

Työn tuloksena syntynyt raportti CHP-tuotannon kannattavuudesta kasvihuoneympäristössä tukee jatkossa Famifarmin päätöstä, kun suunnitellaan tulevaisuuden energiantuotantoa. Tuloksista saatiin hyvä käsitys siitä, millä rajaehdoilla CHP-tuotantoa höyryturbiinilla tai ORC-moduulilla kannattaa harkita. Nykytilanteessa investoinnit ovat käytetyillä mittareilla kannattavia, mutta eivät kuitenkaan niin houkuttelevia, että toteutus olisi selvää. Työn tulosten valossa on selvää, että kasvihuoneiden valaistuksen kehitys energiatehokkaampaan suuntaan lisää lämmityksen tarvetta, mikä taas kasvattaa CHP-tuotannosta saatavaa sähkön määrää kasvaneen lauhdutuskapasiteetin takia. Tällaiset muutokset energiankulutuksien suhteissa lämpöenergian ja sähköenergian välillä tekevät CHP-tuotannon entistä kannattavammaksi ja houkuttelevammaksi vaihtoehdoksi yrityksille. Muita merkittäviä muuttuvia tekijöitä tulevaisuuden investointia mietittäessä ovat sähkön markkinahinta ja verotus. Kuinka valtio tukee kasvihuoneita ja sähkönpientuottajia linjapäätöksillään tulevaisuudessa?

LÄHDELUETTELO

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. Espoo: VTT. 172 s. + liitt. 17 s.

Eija Alakangas, Markus Hurskainen, Jaana Laatikainen-Luntama & Jaana Korhonen
Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia
ISBN 978-951-38-8419-2 (URL: <http://www.vtt.fi/julkaisut>)

Energiaverotusohje 2016

https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/56228/energiaverotusohje_201/#2.1-sähköverovelvollisuus

Hakkila, P. 1992 Metsäenergia. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 422. Helsinki: Metla. 51 s.

Heinimö, Jussi & Alakangas, Eija: Market of biomass fuels in Finland – an overview 2009, Lappeenranta University of Technology, Institute of Energy Technology, Research Report 19, December 2011, 40 pages + app 2 p.

Kasvihuoneyritysten energiankulutus, Luke, [viitattu: 8.5.2019].

Saantitapa:http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__02%20Maatalous__04%20Tuotanto__20%20Puutarhatilastot/22_Kasvihuoneyritysten_energiankulutus.px/table/tableViewLayout1/?rxid=001bc7da-70f4-47c4-a6c2-c9100d8b50db

Kauppapuutarhaliitto, tietoa kasvihuonealasta, [viitattu: 3.5.2019]. Saantitapa:

<https://kauppapuutarhaliitto.fi/tietoa-kasvihuonealasta/>

Karhunen Antti, Ranta Tapio, Heinimö Jussi & Alakangas Eija: Market of biomass fuels in Finland – an overview 2013, Lappeenranta University of Technology, LUT Energy, LUT Scientific and Expertise Publications Raportit ja selvitykset – Reports 43, December 2014, 41pages + app 2 p.

Knowles J. 2011 Overview of small and micro combined heat and power (CHP) systems.

Teoksessa: Beith Robert, Small and micro combined heat and power (CHP) systems: advanced design, performance, materials and applications. Cornwall, UK: Woodhead Publishing Limited. S. 206-232. ISBN 978-1-84569-795-2.

Kymäläinen M., Pakarinen O., (2015). Biokaasuteknologia : Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Maritta Kymäläinen O. (Ed.), In: HAMKin e-julkaisu 36/2015, HAMKin julkaisu 17/2015, Hämeen ammattikorkeakoulu. URN:ISBN:978-951-784-771-1

L 30.12.2010/1397, 4 §. Valtioneuvoston asetus uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta.

Julkaisussa: Finlex [verkkotietokanta]. [viitattu 15.4.2019].Saattavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101397>

L 30.12.2010/1396. Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta

Julkaisussa: Finlex [verkkotietokanta]. [viitattu 15.4.2019].Saattavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101396>

Nicolae Badea (ed.) Design for Micro-Combined Cooling, Heating and Power Systems Green Energy and Technology. Springer-Verlag London 2015 10.1007/978-1-4471-6254-4_1

Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkojulkaisu].

ISSN=1799-795X. 2017, Liitekuvio 1. Energian kokonaiskulutus 2017. Helsinki:

Tilastokeskus [viitattu: 8.2.2019].

Saantitapa: http://www.stat.fi/til/ehk/2017/ehk_2017_2018-12-11_kuv_001_fi.html

Suomen säädöskokoelma 846/2018 Maa- ja metsätalousministeriön asetus maatalouden investointien hyväksyttävistä yksikkökustannuksista. [viitattu 12.3.2019] saantitapa:

https://www.edilex.fi/saadokokoelma/20180846.pdf?utm_id=via-lakikanava

Turve raaka-aineena, Geologian tutkimuskeskus GTK, [viitattu: 8.10.2019]. Saantitapa:

<http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/turve/>

T. T. Al-Shemmeri, Staffordshire University, UK . hermodynamics, performance analysis and computational modelling of small and micro combined heat and power (CHP) systems. Teoksessa: Beith Robert, Small and micro combined heat and power (CHP) systems: advanced design, performance, materials and applications. Cornwall, UK: Woodhead Publishing Limited. S. 206–232. ISBN 978-1-84569-795-2.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkajulkaisu].

ISSN=1798-5072. 2018. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 11.1.2020].

Saantitapa: http://www.stat.fi/til/salatuo/2018/salatuo_2018_2019-11-01_tie_001_fi.html

Turboden 2019, [viitattu: 4.4.2019]. Saantitapa:

https://www.turboden.com/upload/blocchi/X11935allegato1-5663X_Datasheet-standard-units.pdf

Uusitalo A. et al. 2016. Greenhouse gas reduction potential by producing electricity from biogas engine waste heat using organic Rankine cycle. Journal of Cleaner Production. Vol 127. S. 399-405. Elsevier.

Vakkilainen, Esa, Kivistö, Aija (2017) ; Sähkön tuotantokustannusvertailu; Lappeenranta University of Technology ; Lappeenrannan teknillinen yliopisto ; Lappeenrannan teknillinen yliopisto, School of Energy Systems, Energiatekniikka / Lappeenranta University of Technology, School of Energy Systems, Energy Technology