

Joonas Malmberg

**SELVITYS PIENEN JA KESKISUUREN LÄMPÖ-
LAITOKSEN SÄHKÖNTUOTANTOMAHDOLLI-
SUUKSISTA**

Opinnäytetyö

KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Tammikuu 2012



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Tekniikka ja liiketalous, Kokkola	Aika Tammikuu 2012	Tekijä/tekijät Joonas Malmberg
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikka		
Työn nimi Selvitys pien- ja keskisuuren lämpölaitoksen sähköntuotantomahdollisuuksista		
Työn ohjaaja TkT Martti Härkönen	Sivumäärä 61	
Työelämäohjaaja TkT Martti Härkönen		
<p>Työssä tutkittiin, kuinka pienen kokoluokan hakevoimalalla tuotettua lämpöenergiaa voitaisiin käyttää myös sähköntuotantoon, ja jäljelle jäävä lämpöenergia syötettäisiin kaukolämpöverkkoon. Opinnäytetyössä selviteltiin jo olemassa oleviin hakelämpölaitoksiin liitettävissä olevia sähköntuotantomenetelmiä. Työhön otettiin myös tämän hetken kehityksessä lupaavimpia aiheita, jotka eivät välttämättä käy suoraan hakekattilaan liitettynä, vaan vaatisivat kokonaan toisenlaisen prosessin. Opinnäytetyö tehtiin lisäselvityksenä Forest-Power-projektin alaprojektiin nimeltään: Energiaosuuskuntien lämpölaitosten nykytila ja päästöt.</p> <p>Ensin työssä kartoitettiin millaisia sähköntuotantomenetelmiä on olemassa pienen kokoluokan sähkötehoille. Niitä löytyi melko hyvä valikoima kuten esimerkiksi stirlingmoottori ja ORC-prosessi, mutta tietoa jouduttiin etsimään hyvin monista eri lähteistä. Lisäksi yksittäisiin sähköntuotantomenetelmiin keskittyneistä tutkimuksista oli tehty diplomitöitä sekä opinnäytetöitä.</p> <p>Kolmesta kehityksen lupaavimmista menetelmistä tehtiin energiatase laskelmat. ORC-prosessin hyötysuhde oli 10 % jota käytetään hyvin yleisesti teollisuuden hukkalämmön talteenottoon lämpötila-alueella 100-300 °C. Stirling-moottori taas toimii lämpötilaerolla jonka hyötysuhde saatiin laskelmissa 27 %.</p> <p>Hajautettu energiantuotanto on tänäpäivänä uudessa nosteessa ja vuosikymmenen kuluttua markkinoilla on varmasti tarjolla kompakteja energiantuotantoyksiköitä pienessä kokoluokassa.</p>		
Asiasanat Lämpölaitos, CHP, Hajautettu energiantuotanto		

ABSTRACT

CENTRAL OSTROBOTHNIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	Date January 2012	Author Joonas Malmberg
Degree programme Mechanical and Production Engineering		
Name of thesis Power generation opportunities in small- and medium-sized heating plant		
Instructor Martti Härkönen		Pages 61
Supervisor Martti Härkönen		
<p>The aim of this thesis project was to examine how thermal energy produced in a small-scale power plant could also be used for electricity generation while only feeding the remaining thermal energy into the district heating network. The thesis explored the power generation methods of existing thermal plants. The work was also included the development of the most promising topics such as the ORC process that do not necessarily follow directly from the boiler connected to the application, but would require an entirely different process. The thesis was part of a sub-project belonging to the ForestPower project which dealt with heating plants and their emissions. The thesis was an assignment included in the ForestPower project, sub-project titled: Energy Cooperatives heating plants, and the current state of emissions.</p> <p>This project first identified power generation methods that exist for small-scale electric power. A fairly good selection was found such as the Stirling engine and the ORC process, but the information had to be sought in a very wide variety of sources. In addition theses and dissertations studies were found that were dedicated to individual methods of power generation.</p> <p>Three methods were concluded to be the most promising developments in the energy balance calculations. Their ORC process efficiency was 10%, which is very commonly used for industrial waste heat recovery in the temperature range 100-300 ° C. On the other hand, using a Stirling engine running by the temperature difference ratio was 27 % in the calculations.</p> <p>Distributed energy is today in a new upswing, and in a decade, after the market is established, there will probably be available compact power units in a small scale.</p>		
Key words The heating plant, the CHP, Distributed energy		

ESIPUHE

Haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa Martti Härköstä opastuksesta ja ohjauksesta tämän työn aikana.

Erityisesti haluan kiittää rakasta vaimoani Maria, tuesta ja ymmärryksestä sekä kärsivällisyydestä että on jaksanut lasten kanssa tämän pitkän ajanjakson opinnäytetyötä tehdessä.

Kokkolassa 4. tammikuuta 2012

Joonas Malmberg

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
ESIPUHE
SISÄLLYS

ESIPUHE

1. JOHDANTO	1
2. ENERGIANTUOTANTO SUOMESSA	3
2.1 Sähköntuotanto.....	4
2.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto	5
2.3 Syöttötariffit.....	5
2.4 Verotus	7
3. PIENET SÄHKÖNTUOTANTOMENETELMÄT	7
3.1 ORC - Prosessi	8
3.1.1 Toimintaperiaate	9
3.1.2 Käyttökohteet.....	12
3.1.3 Kannattavuus	12
3.2 Stirling - moottori.....	13
3.2.1 Toimintaperiaate	15
3.2.2 Tulevaisuuden näkymät	16
3.3 Mikroturbiini.....	17
3.3.1 Toimintaperiaate	18
3.3.2 Kannattavuus.....	19
3.4 Kuumailmaturbiini	19
3.5 Höyrymoottori	20
3.5.1 Toimintaperiaate	21
3.5.2 Käyttökohteet.....	21
3.6 Kaasutusprosessi	22
3.6.1 Kaasutettava polttoaine	23
3.6.2 Polttotekniikka.....	25
3.6.3 Polttokaasun käyttökohteet	25
3.7 Kaasumoottori	26
3.7.1 Toimintaperiaate	26
3.7.2 Käyttökohteet.....	27
3.8 Polttokenno	28
3.8.1 Toimintaperiaate	28
3.8.2 Polttokennotyyppit.....	32
3.8.3 Polttokennot tulevaisuudessa.....	34
4. CHP-LAITOS ESIMERKIT.....	35
4.1 Esimerkki 1.....	35
4.2 Esimerkki 2	41
4.3 Esimerkki 3	44
4.4 Muut vaihtoehdot	49
4.6 Valmistajia	50

5. YHTEENVETO	51
LÄHTEET	53

1. JOHDANTO

Opinnäytetyö sisältyy yhteispohjoismaiseen ForestPower-projektiin, jonka aihe on Biomassan tehostettu hyödyntäminen. Projektissa on tavoitteena edistää EU:n ilmastotavoitteiden toteuttamista Keski-Pohjanmaan, Västerbottenin, Västernorrlandin ja Norlandin alueille tutkimuksen keinoin. Korvaamalla fossiilisia polttoaineita, sekä edistämällä työllisyyttä ja yritystoimintaa, voidaan kaikilla alueilla edelleen tehostaa puuvarojen käyttöä.

Projektissa on tutkittavana metsäbiomassojen käyttö, korjuu ja laatu, edelleen etsitään energiaosuuskunnille ja metsäkoneurakoitsijoille uusia yritystoimintamalleja, pyritään parantamaan energiaosuuskuntien lämpölaitosten tehokkuutta ja polttoaineiden laatua sekä vähentämään päästöjä ja lisäksi ohjeistamaan polttoon liittyviä käytäntöjä. Lisäksi pyritään lisäämään yleistä tietoutta alueen metsäenergiavaroista.

Tässä työssä selvitettiin sähkön ja lämmön yhteistuotantomahdollisuuksia nykyisin vain lämpöä tuottavien hakelämpövoimaloiden yhteydessä. Selvitys rajoittuu pieniin ja keskisuuriin lämpölaitoksiin, jolloin kysymyksessä ei ole höyrykattilaprosessilla tuotettua lämpöenergiaa. Pienillä ja keskisuurilla lämmöntuotantolaitoksilla tarkoitetaan pienempiä kuin päästökaupan piiriin kuuluvia eli alle 20 MW laitoksia. Työssä keskityttiin vain sähköntuottamiseen eli ei oteta kantaa lämmöntalteenottotapoihin.

Sähkön pien- ja keskisuurituotanto on kokoluokkana aika laaja kokonaisuus. Tehoalue ulottuu 0,1 MW aina 20 MW asti. Työ rajattiin vain sähköntuotantomenetelmiin hakelämpövoimalan lämmöntuotannon yhteydessä. Sähköntuotanto tapahtuu sähkögeneraattoreilla, mutta näiden tarkastelu jätettiin työn ulkopuolelle.

Hajautettu energiantuotanto on viime aikoina alkanut saamaan enemmän kannatusta myös Suomessa. Lämmön- ja sähköntuotanto siellä, missä sitä tarvitaan, on energiatehokasta. On myös alettu ajattelemaan myrskyjen aiheuttamilta sähkökatkoilta välttymistä ja pelkäämään sähköhinnan tulevaisuutta. Omavaraisuus houkuttelee varmasti monia, mutta kuitenkin se vaatii laitteiden kunnossapitoa ja rahaa.

Suomessa on myös herätty jakamaan syöttötariffeja sähkötuottajille, mutta ei kuitenkaan riittävästi. Vastapäivitetty sähkönsyöttötariffi jäi hieman laihaksi, koska siinä sähkötuotannon minimirajat jäivät kovin ylös, jolloin sähkö kannattaa tuottaa vain omaan käyttöön.

2. ENERGIANTUOTANTO SUOMESSA

Öljyn tuotantohuippu tullaan saavuttamaan lähivuosina tai monien asiantuntijoiden mukaan on jo saavutettu. Näin ollen öljyn hinta tulee nousemaan ja kiinnostus vaihtoehtoihin energiantuotantotapoihin tulee nousemaan. Suurin kiinnostus on biopolttoaineissa. Suomessa biopolttoaineiden käyttö energiantuotannossa on kannattavaa, koska biopolttoaineiden saatavuus on hyvä asukkaiden lukumäärään suhteutettuna. Asuntonsa lämmitti vuonna 2006 öljyllä noin 14 % suomalaisista. Öljyn hinnan nousu pakottaa ihmiset miettimään vaihtoehtoista lämmitysmuotoa. Myös kasvava huoli ympäristöstä sekä tiukkenevat päästörajoitukset saavat ihmiset ajattelemaan biopolttoaineilla tuotettua energiaa. Myös sähkönhinnan nousu johtuu öljynhinnan noususta ja päästöoikeuksien kallistumisesta. EU:n tavoite vuoteen 2020 mennessä on nostaa uusiutuvan energian osuus 20 %:iin loppukäytöstä. Tällä hetkellä osuus on vain noin kolmasosa tavoitteesta. Kasvihuonekaasujen vähentäminen 20 %:lla vuoden 1990 tasosta kuuluu myös EU:n tavoitteisiin. (Paavola, 2008)

Sekä ulkomaisia että kotimaisia energialähteitä käytetään energiantuotantoon Suomessa. Ulkomailta maahantuotuja fossiilisia polttoaineita ovat öljy, hiili ja maakaasu. Lisäksi tuontipolttoaineita tai tuontienergiaa ovat ydinvoiman tuotannossa käytettävä uraani, sekä sähkön nettotuonti. Vesivoima, polttopuu ja -turve, sekä teollisuuden prosesseissa sivutuotteina syntyvät polttoaineet ovat kotimaisia primäärienergiälähteitä. (Koponen, 2010)

Biomassa on selkeästi merkittävin energialähde EU:n uusiutuvan energian lisäystavoitteiden saavuttamisessa. Uusiutuvan energian ja polttoaineiden suhteellinen kilpailukyky uusiutumattomiin tulee parantumaan, koska ilmasto- ja energiapolitiikan tavoitteet luovat entistä voimakkaampaa taloudellista ohjausta tukien ja/tai verojen kautta. Biomassan käytön voidaan osoittaa olevan kestävä ja se vähentää kasvihuonepäästöjä, jotka ovat yleensä lähtökohtana julkiselle tuelle. Siksi voidaan olettaa, että energian ja polttoaineiden tuotannossa turpeen käyttö ei tule saamaan niin runsasta tukea kuin uusiutuva biomassa. Tyypillisesti uudet energia- ja polttoainetuotteet ovat perinteisiä, biopohjaisia polttoaineita pidemmälle jalostettuja kiinteitä tai nestemäisiä tuotteita. Kun hyödynnetään aikaisemmin käyttämättömiä jakeita ja uusia prosesseja, voi erityisesti syntyä myös perinteisessä energiantuotannossa uutta liiketoimintaa. Hyödyntämättömistä jätteistä tehtävä biokaasu ja bioetanolin sekä uusilla ja tehokkaammilla prosesseilla tehtävä sähkö-, lämpö- ja kylmäenergia ovat hyvänä esimerkkinä. (Penttinen, 2010)

Kaukolämmitys on Suomen yleisin lämmitysmuoto, vuonna 2006 sen osuus oli 48,3 %. Sähkön ja lämmön kuljetus pitkiä matkoja ei ole kannattavaa, mutta kaukolämpö on sitä edullisempaa mitä tiheämmin rakennettu alue on ja mitä isompia rakennukset ovat. Siksi vain 6 % omakotitaloista on kaukolämmön piirissä. Pientaloissa on yleisimmin sähkölämmitys 50 % ja muun muassa öljylämmitys 25 %.

Energiatehokkainta on tuottaa lämpö siellä, missä sitä tarvitaan. Käyttäjää, kuten omakotitaloa, maatilaa, pienteollisuutta tai kasvihuonetta, lähellä sijaitsevia laitoksia kutsutaan mikrovoimaloiksi. Hajautettu energiantuotanto on alkanut saamaan kannatusta ja sähköntuottaminen lähellä loppukäyttäjää voi näin tehdä loppukäyttäjistä omavaraisemman. Etenkin ukkosmyrskyn aikana sähkönjakelun kanssa on ongelmia.

Suomessa on käytössä paljon suuria sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksia. Suomessa yhteistuotannolla tuotetaan 30 % sähköstä ja 70 % kaukolämmöstä, mutta pieniä yksityisten käytössä olevia sähkön- ja lämmön yhteistuotantolaitoksia ei oikeastaan ole. Esimerkiksi Japanissa on yli 50 000 mikrolaitteistoa käytössä. Suuret kaukolämpölaitokset ovat aika yleisiä, mutta noin puolet suomalaisista kiinteistöistä on kaukolämpöverkon ulkopuolella. Öljyn, maakaasun ja sähkön kallistuminen saa kaukolämpöverkon ulkopuolella asuvat yritteliäimmät ihmiset kokeilemaan monenlaisia ratkaisuja, sillä sähkön ja lämmön pientuotanto voi olla kannattava sijoitus. On myös mahdollisuus siirtyä energiayrittäjäksi, jos sähköä tuotetaan enemmän kuin kulutetaan. (Paavola, 2008)

2.1 Sähköntuotanto

Kansainvälisesti vertaillen Suomen sähkön kulutus on suhteellisen suurta. Useimmissa Euroopan maissa sähkön kulutus on vain noin puolet Suomen kulutuksesta. Suomen energiaintensiivinen teollisuus on pääasiallinen syy suureen sähkön kulutukseen. Teollisuuden osuus Suomen sähkön kulutuksesta on noin puolet. Suomen sähköstä tuotetaan noin 55 % erillisenä sähköntuotantona.

Vuonna 2009 vaikutti taloudellinen tilanne sähkönkäytön vähentymiseen 7,4 % edellisvuoteen verrattuna. Sähköä käytettiin tuona vuonna 80,8 terawattituntia. Erilaisissa sähkövoimalaitoksissa voidaan tuottaa sähköä monista energialähteistä. Vesivoima, ydinvoima, tuulivoima ja aurinkolämpö ovat muun muassa erilaisia sähkönlähteitä. Sähköä tuotetaan suoraan auringonvalosta tai kemiallisten ja magneettisten ilmiöiden avulla. Sähkögeneraattori on yleisin tuotantotapa sähkölle. Aurinkokennojen avulla aurinkoenergiaa muutetaan sähköksi. Kasvava sähköntarve ja kasvihuonepäästöjen

rajoittaminen on Suomessa mahdollista sovittaa yhteen, kun fossiilisten polttoaineiden ja vesivoiman lisäksi sähköntuotannossa käytetään ydinvoimaa. (Koponen, 2010)

Sähköntuottaminen on vapaata kaikille Suomessa. Yleiseen sähköverkkoon voi liittää tuotantolaitoksia ja avoimilla sähkömarkkinoilla voi myydä sähköä. Viranomaisten asettamat vaatimukset, kuten ympäristövaatimukset ja tekniset vaatimukset tuotantolaitoksille, tulee laitoksen kuitenkin täyttää.

Sähkönverkon käytön kannalta pienvoimalat voidaan jaotella kahteen ryhmään:

Voimalat, joita ei ole liitetty yleiseen sähköverkkoon tai jotka toimivat vaihtoehtona yleiselle sähköverkolle.

Voimalat, joiden tuotanto voidaan siirtää osin tai kokonaan sähköverkkoon. Eli ovat sähköjakeluverkon kanssa rinnan. Sähköntuottajan tuotantolaitos voi olla kytketty suoraan tai kiinteistön sisäisen verkon kautta jakeluverkkoon. (Motiva, 2006)

2.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto

Polttoaineen energiasisältö saadaan käytettyä mahdollisimman tarkkaan hyödyksi kun sähkö tuotetaan lämmön kanssa yhteistuotantona. Lähes kolmannes sähköstä tuotetaan tällä tavalla ja polttoaineesta saadaan jopa 90 % hyödyksi. Polttoaineesta säästetään lähes neljännes, kun erikseen tuotettua sähköä tai lämpöä verrataan yhteistuotantoon. Yhteistuotanto on ympäristöpäästöjen kannalta ja taloudellisesti järkevää. (Koponen, 2010)

2.3 Syöttötariffit

Sähkönhinnan noustessa kiinnostaa omavarainen sähköntuotanto. Varsinkin jos laitos voidaan kytkeä valtakunnan verkkoon ja verkkoon syötetylle sähkölle on olemassa syöttötariffi, se voi tulla kilpailukykyiseksi. Muun muassa Saksan ja Itävallan korkeisiin syöttötariffeihin (TAULUKKO 1) pääsääntöisesti perustuu biomassaa tai biokaasua hyödyntävien pien-CHP-laitosten yleistyminen Keski-Euroopassa. (Haavisto, 2010)

TAULUKKO 1. EU- alueen syöttötariffeja (Haavisto, 2010)

EU:n syöttötariffit 2006 ^[13]							
Maa	Tuuli	PV	Vesi	Biomassa	Biokaasu	Geo	Huom.
Espanja	0,086-0,103	0,476	0,083	0,083		0,097	15-25 v.
Alankomaat	0,127d	0,147	0,1	0,12 – 0,147	0,071-0,147		10 v.
Irlanti	0,058		0,072	0,072	0,072	0,07	15 v.
Italia		0,49					20 v.
Itävalta	0,078	0,47-0,6	0,038	0,24	0,10-0,16	0,073	13 v.
Kreikka	0,073-0,085a	0,4-0,5	0,073-0,085	0,073-0,085	0,073-0,085	0,073-0,085	12 v.
Kypros	0,095	0,21-0,40	0,065	0,065	0,065		15 v.
Liettua	0,064		0,058	0,058	0,058		10 v.
Luxemburg	0,079-0,103	0,28-0,56	0,079-0,103	0,104-0,128	0,104-0,128		10 v.
Portugali	0,074	0,31-0,45	0,075	0,11	0,102		15 v.
Ranska	0,082c	0,3-0,55	0,055-0,076	0,049-0,061	0,09	0,12	15-20 v.
Saksa	0,084b	0,41-0,57	0,067	0,038	0,06-0,21	0,072-0,15	20 v.
Slovenia	0,06	0,375	0,061	0,068-0,07	0,05-0,121	0,059	10 v.
Slovakia	0,074	0,212	0,061	0,072	0,066	0,093	
Tanska	0,072	0,08		0,08	0,08	0,069	20 v.
Tsekki	0,085	0,455	0,081	0,079-0,1	0,077-0,1	0,155	15 v.
Unkari	0,094	0,094	0,094	0,094	0,094	0,094	
Viro	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	7-15 v.

Syöttötariffijärjestelmään voidaan hyväksyä puupolttoainevoimala, tuulivoimala tai biokaasuvoimala, jonka voimalaitoksen sähköntuotantoon kiinteästi sisältyvät tekniset järjestelmät eivät ole saaneet valtiontukea sekä ovat uusia eivätkä sisällä käytettyjä osia. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2010)

Mekaanisella käsittelyllä yhdyskuntien ja yritysten polttokelpoista, kuivista, kiinteistä ja syntypaikoilla lajitelluista jätteistä valmistettua polttoainetta kutsutaan kierrätyspolttoliikenneeksi. Sähköntuotannon tuki kierrätyspolttoliikennellä on 2,5 euroa / MWh.

Metsästä hakkuun yhteydessä syntyvistä puutähteistä, kuten latvuksista, oksista, kannoista ja juurakoista syntyvää polttohaketta, joka valmistetaan terminaalissa, tehtaassa tai metsässä, kutsutaan metsähakkeeksi. Sähköntuotannon tuki metsähakkeella tuotettuna on 6,9 euroa / MWh. (Suomen tulli, 2008)

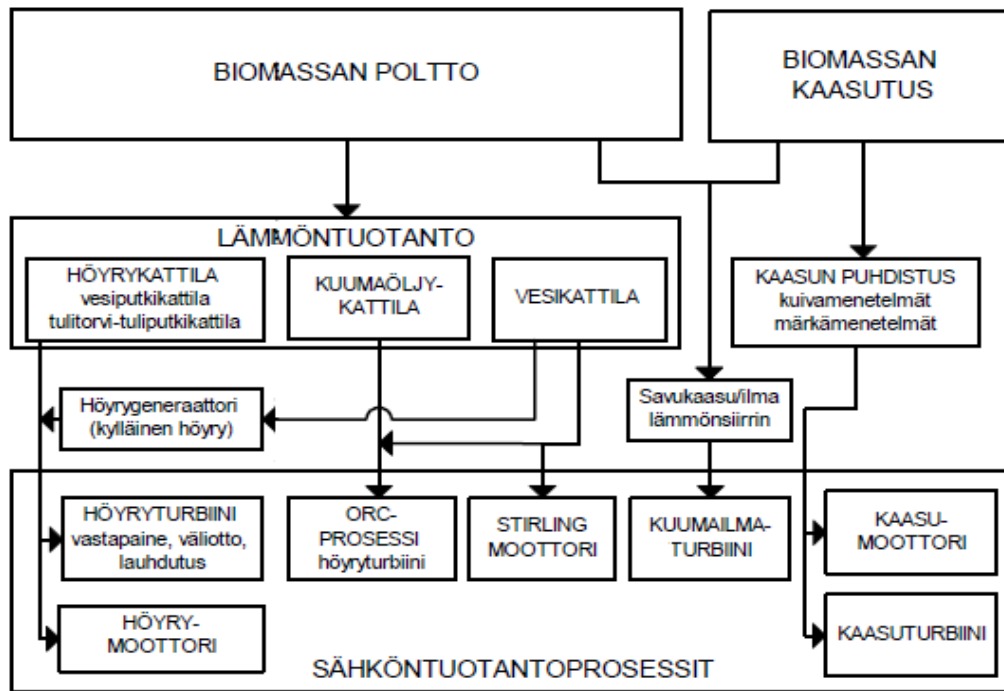
Työ- ja elinkeinoministeriön internet-sivuilla todetaan, että generaattoreiden yhteenlasketun nimellistehon olisi oltava vähintään 100kVA biokaasu-, metsähake ja puupolttoainevoimaloissa. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2010)

2.4 Verotus

Sähköntuotantoon käytetyt polttoaineet ovat verottomia ja lämmöntuotantoon käytetyt on verollisia. Tämä on energiaverolainsäädännön keskeisin periaate. Sähkön ja lämmönyhteistuotannosta on säädetty laskentaohje, mikä osa polttoaineesta katsotaan kuluneen lämmöntuotannossa ja mikä osa sähköntuotannossa. Alle 2 MVA tehoisessa generaattorissa tuotetusta sähköstä, mitä ei siirretä yleiseen sähköverkkoon, ei tarvitse maksaa sähköveroja, kuten valmisteveroja ja huoltovarmuusmaksuja. Jos tuotettua sähköä siirretään yleiseen sähköverkkoon sekä otetaan omaan käyttöön, tulee valmiste- ja huoltovarmuusmaksu maksaa oman käytön osuudesta. Kokonaisuudessaan yleiseen sähköverkkoon siirretystä sähköstä ei tarvitse maksaa veroa, sillä sen tekevät sähkön käyttäjät. (Motiva, 2006)

3. PIENET SÄHKÖNTUOTANTOMENETELMÄT

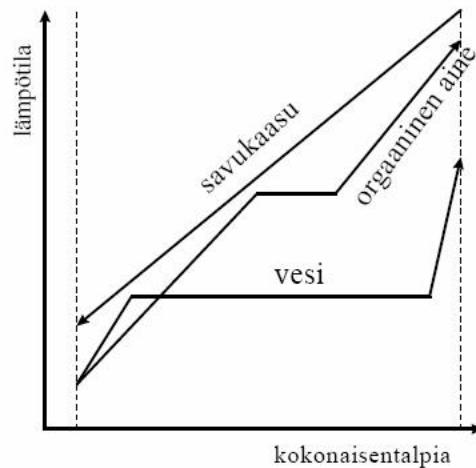
Sähköntuotantoa voidaan tänä päivänä tuottaa monella tavalla (KUVIO 1). Työhön valittiin tarkasteltavaksi ORC-prosessi, stirling-moottori, kaasumoottori, kaasuturbiini, mikroturbiini ja höyryturbiini. Lisäksi työhön haluttiin selvitys kaasutuksesta ja siihen liittyvästä kaasumoottorista sekä poltto-kennoista, vaikka ne eivät sovikaan liitettäväksi haketta polttavaan voimalaan.



KUVIO 1. Energiantuotannon ryhmittely (Virkkula, 2010)

3.1 ORC - Prosessi

ORC-prosessi on Rankine-kiertoprosessi, jossa orgaaninen hiiliyhdistettä sisältävä neste toimii veden asemasta kiertoaineena. Orgaanisissa kiertoaineissa höyrystymiseen sitoutuu pienempi määrä energiaa, koska sen höyrystymislämpö on pienempi kuin vedellä. Siten sillä voidaan päästä lähemmäksi savukaasunlämpötilaa (KUVIO 2). Tämä mahdollistaa hyvien yksivaiheisten turbiinien käytön pienissä CHP-voimaloissa, kun ominaisentalpian pudotus on pienempi kuin vedellä. Turbiinissa ei esiinny pisaroita, koska orgaaninen kiertoaine on kokoajan tulistettuna. (Aaltonen, Ukkonen, 2008)

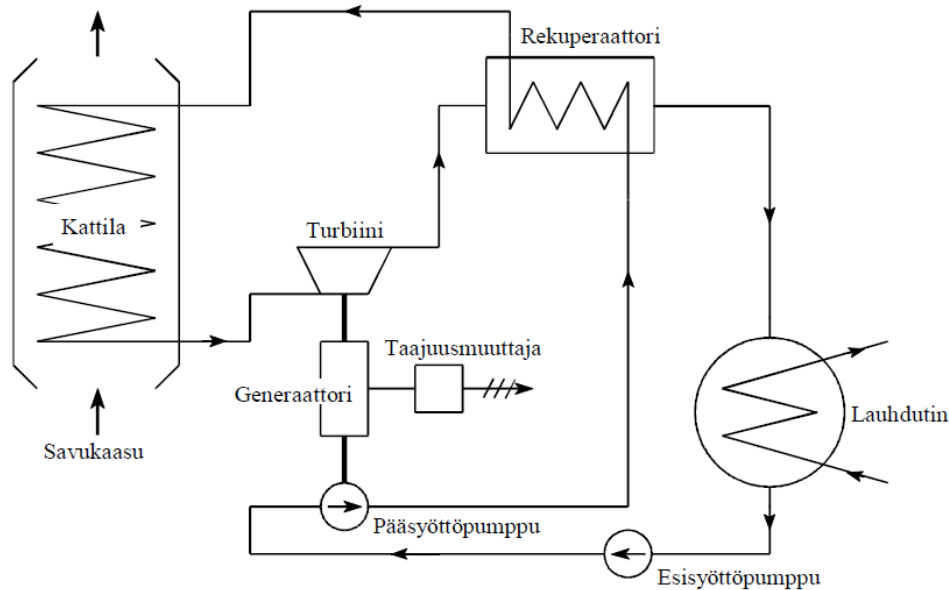


KUVIO 2. Veden ja orgaanisen aineen T,h –piirros. (Reunanen, 2000)

Veden höyrystymislämpö on hyvin suuri verrattuna orgaanisen aineen höyrystymislämpöön, kun käytetään tavanomaista lämpötilatasoa ja verrattain alhaista painetasoa. Vesihöyryprosessilla on kuvassa pitkä vaakasuora osa, jolloin höyryn loppulämpötila jää huomattavasti lämmönlähteen lämpötilaa pienemmäksi. Jotta painetaso voidaan valita lähelle kriittistä painetta, täytyy valita sovelluskohteeseen sopiva orgaaninen kiertoaine. Tällöin kiertoaineen höyrystymislämpö jää suhteellisen alhaiseksi. Tuorehöyryn lämpötila saadaan korkeaksi alhaisesta höyrystymislämmöstä johtuen ja lämpötila on lähempänä lämmönlähteen lämpötilaa. ORC-prosessissa voidaan käyttää orgaanisena kiertoaineena esimerkiksi tolueenia, isobutaania, isopentaania tai erilaisia silikoniöljyjä. (Purhonen, 2010)

3.1.1 Toimintaperiaate

Suurnopeustekniikassa turbiinin kierrosnopeudet ovat luokkaa 20 000–30 000 kierrosta minuutissa. KUVIO 3:n mukaan syöttöpumppu ja generaattori on kytketty ilman vaihteistoja suoraan turbiinin akseliin. Generaattorin tuottama sähkövirta on suurtaajuuksista, joten se kytketään verkkoon taajuusmuuttajan avulla. Suurnopeustekniikkaa ei ole otettu vielä yleisesti käyttöön sen kehitysvaiheen takia.



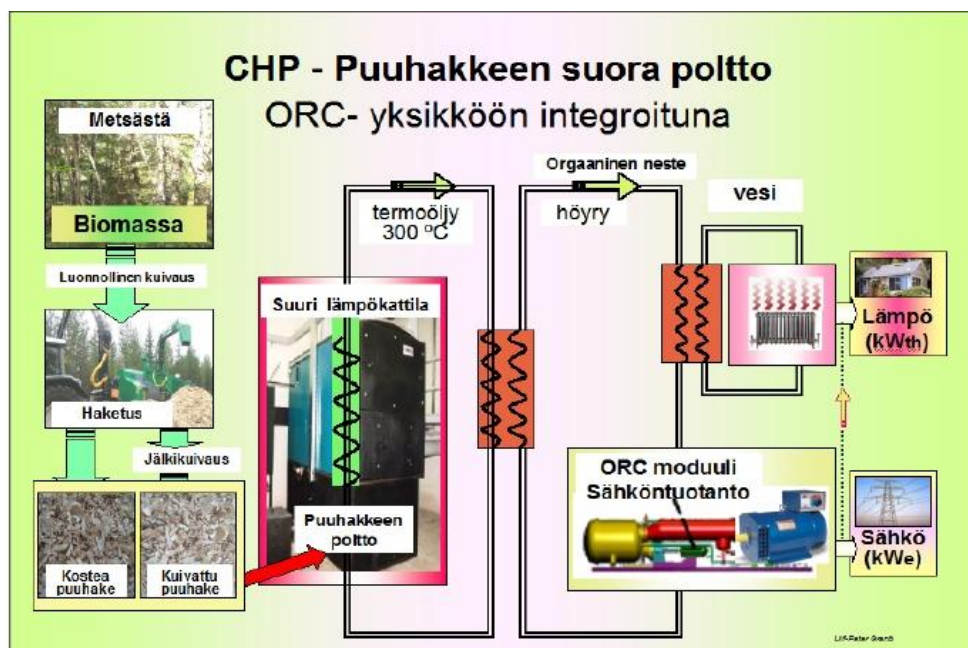
KUVIO 3. Suurnopeustekniikka ORC- prosessilla (Reunanen, 2000)

ORC-prosessilla on se etu, että sitä voidaan käyttää monella erilaisella kattilatyypillä tai muun prosessin jätelämmöllä eli se ei sitoudu mihinkään polttotekniseen ratkaisuun. Sähköntuotantoyksikkö voidaan sijoittaa lämpökeskuksen ulkopuolelle erilliseksi kontiksi.

Hyvin merkittävässä asemassa on ORC-prosessin kiertoaineen valinta. Kiertoaineen termodynaamiset ominaisuudet, kuten höyrystymislämpö prosessin käyttöpaineessa, määrää prosessin toiminta-alueen. Terminen pysyvyys on tärkeää mahdollistaen pitkän käyttöajan, sillä orgaanisilla aineilla on tapana hajota korkeissa lämpötiloissa. Orgaanisen aineen hajoamista ja ominaisuuksien muutoksia saattaa aiheuttaa ulkoisen aineen, kuten veden, öljyn ja/tai hapen pääseminen järjestelmään. Kiertoaineen valinnassa tulee käyttöturvallisuuden kannalta ottaa huomioon orgaanisen aineen myrkyllisyys ja paloturvallisuus. Käytettäviä kiertoaineita ORC-laitoksissa ovat klooratut ja halogenoidut hiilivedyt eli CFC-yhdisteet eli kylmäaineet sekä silikoniöljyt. Kasvihuoneilmiöön vaikuttavien tekijöiden takia CFC-yhdisteiden käyttöä pyritään rajoittamaan. N-pentaani, silikoniöljyt ja tolueni ovatkin yleisimmin käytettyjä kiertoaineita. N-pentaani on puhdas hiilivety. Se on erittäin vaarallinen etenkin vesieliöille ja se esiintyy huoneenlämmössä nesteinä. Ihmisille se voi aiheuttaa keuhkovaurioita, huimausta, ihoärsytystä ja tajuttomuutta. Silikoniöljyt sisältävät hiiltä, vetyä sekä piitä. Niistä suurin osa ovat haihtuvia ja ne hajoavat ilmakehässä. Silikoniöljyt ovat myös haitallisia ihmisille ja vesieliöille sekä osa niistä on palavia. Toluenin pääseminen ympäristöön pitää

estää, vaikka sillä ei ole havaittu merkittäviä ympäristöhaittoja. Tolueeni on ihmisille suurina pitoisuuksina huumaavasti vaikuttava aine.

Kiertoaine ei kuitenkaan kulje suoraan kattilan kautta tähän saakka toteutetuissa ORC-voimaloissa, vaan kattilan ja kiertoaineen välissä on erillinen suljettu termoöljypiiri (KUVIO 4). Lämpöteho siirretään sen avulla kattilasta orgaaniseen kiertoaineeseen ORC-voimalaitoksissa. Termoöljypiiri voidaan toteuttaa paineistettuna tai paineistamattomana. Se tasoittaa lämpötilan vaihteluita ja myös suojaa kiertoainetta korkeimmilta lämpötiloilta. Öljypiirillä voidaan saavuttaa jopa 400 asteen lämpötila paineistettuna ja paineistamattomana noin 340 astetta. Faasimuutosta eli öljyn höyrystymistä voidaan myös käyttää hyväksi paineistetussa piirissä. Lämmönsiirtoöljyt joudutaan vaihtamaan tiettyin väliajoin, koska korkeissa lämpötiloissa öljyn rakenne heikkenee ja se menettää hyviä ominaisuuksiaan.



KUVIO 4. Termoöljypiiri ORC – prosessissa. (Granö, 2010)

Suljetun piirin ansiosta kiertoaineen menetystä ei tapahdu, siksi ORC-prosessin käyttökustannukset ovat alhaisia. Se ei myöskään tarvitse jatkuvaa valvontaa ilmanpaineessa toimivan kattilan ja korkean automaatiomäärän ansiosta, joten se vähentää kustannuksia. Etenkin pieniin ja keskiuuriin, sähköteholtaan 200 –2000 kW, yhteistuotantolaitoksiin ORC-prosessi sopii hyvin. (Aaltonen, Ukkonen, 2008)

3.1.2 Käyttökohteet

ORC-prosessia voidaan käyttää siellä missä on ylimääräistä hukkalämpöä tarjolla. Useiden teollisuusprosessien sekundääri- ja hukkalämpövirrat, polttomoottorit ja kaasuturbiinit ovat tyypillisiä kohteita. Myös biokaasun, kaatopaikkakaasun ja biomassan energiasisällön muutossa sähköksi, voidaan käyttää ORC- prosessia.

Viimeisten vuosikymmenten aikana biomassan käyttö on lisääntynyt merkittävästi. Nykyiset ORC-laitokset, jotka käyttävät biomassaa polttoaineenaan, on rakennettu sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. ORC-tekniikka on lähestulkoon ainut taloudellisesti kannattava tekniikka biomassan polttoon alle 1MWe sähkötehoissa ja se on suurin syy uusien ORC-laitosten rakentamiseen.

Lukuisissa maa- ja metsätaloudellisissa prosesseissa on laajasti saatavilla biomassaa. Kahdesta syystä biomassan käyttö on parasta paikallisesti: energiatiheys on biomassalla pieni ja se taas lisää kuljetuskustannuksia sekä sähkön ja lämmöntarve on yleensä paikallista. Siellä missä sähköverkkoa ei ole, tai sähkön jakelu on epävarmaa, on biomassa-ORC erityisen soveltuva ratkaisu johtuen lämmöntarpeen paikallisuudesta. Perinteinen vesihöyryprosessi ei ole enää kustannustehokas, sillä paikallinen tuotanto johtaa usein pieniin laitossyksiköihin, yleensä alle 1 MWe laitoiksiin.

3.1.3 Kannattavuus

Perinteiseen vesihöyryprosessiin verrattuna ORC-prosessilla on biomassan poltossa etuja. Kattila lämmittää vain termoöljypiiriä 300 asteen lämpötilaan matalammalla paineella ja matalammalla lämpötilalla. Vesihöyrykattilassa taas pitää välttyä pisaroilta turbiinin siivistössä paisunnan loppuvaiheessa, tulistamalla vesihöyry korkeampaan lämpötilaan. Investointikustannukset nousevat ORC-prosessissa käytettävään kuumaöljykattilaan verrattuna, koska vesihöyrykattilassa noin 60–70 bar paine ja lämpörasitukset monimutkaistavat höyrykattilan rakennetta. ORC:llä on pienemmät investointi- ja käyttökustannukset kuin vesihöyryllä, koska siinä on alempi käyttöpaine. ORC:llä on yleensä hieman matalampi sähköntuotannon hyötysuhde kuin perinteisellä vesihöyryprosessilla. Laitoksen kokonaisyötysuhteen kasvattamiseksi on siis välttämätöntä ylimääräisen lämmön käyttö. ORC:ssä savukaasujen poistuminen korkeammassa lämpötilassa on toinen huonopuoli vesihöyryprosessiin verrattuna. Vesihöyryprosessissa syöttöveden lämpötila kattilaan tullessa on noin 100 astetta kun termoöljy tulee kattilaan yleensä yli 120–250 asteen lämpötiloissa. Savukaasut poistuvat sitä korkeammassa lämpötilassa, mitä korkeampi on kattilaan tulevan termoöljyn lämpötila. Savu-

kaasujen korkeampi lämpötila tietää kattilahiötysuhteen laskua. Kun lisätään lämmönsiirrin esilämmittämään orgaanista kiertoainetta tai lisäämällä polttoilman esilämmitin, tätä häviötä voidaan pienentää. (Purhonen, 2010)

Eri puolille maailmaa on rakennettu tuhansia kappaleita ORC-laitoksia. Vuonna 2004 kuitenkin vain 13 oli biomassalla toimivia ORC-laitoksia (TAULUKKO 2). Nämä kaikki voimalaitokset sijaitsevat Saksassa, Italiassa Itävallassa ja Sveitsissä. Sähköteho laitoksilla on 0,3-1,5 MW. (Aaltonen, Ukkonen, 2008)

TAULUKKO 2. Vuonna 2004 biomassalla toimivat ORC-laitokset. (Aaltonen, Ukkonen, 2008)

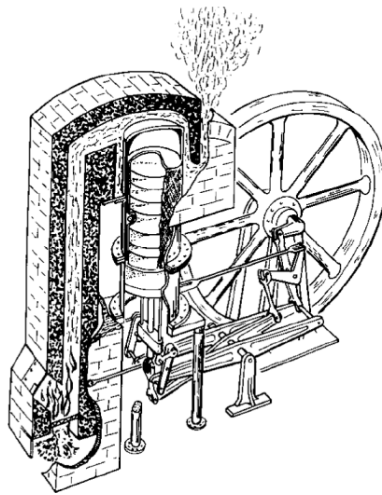
Paikkakunta/laitos	Maa	Valmis- tusvuosi	Teho [MW _e]	Lämmön- käyttö	Kierto- aine	Toimittaja
1 Biere, Waffelplatz	Sveitsi	1998	0,3	Kaukolämpö	Piiöljy	Turboden
2 Admont, STIA Holzindustrie GmbH	Itävalta	1999	0,4	Sahatavaran- kuivaus	Piiöljy	Turboden
3 Friedland	Saksa	2001	0,5	Kaukolämpö	Piiöljy	GET
4 Crissier, Cridad SA	Sveitsi	2002	0,5	Kaukolämpö	Piiöljy	Turboden
5 Lienz, Stadtwärme Lienz	Itävalta	2002	1,0	Kaukolämpö	Piiöljy	Turboden
6 Fussach, Hubert Häusle GesmbH & CO	Itävalta	2002	1,0	Absorptio- jäähdytin	Piiöljy	Turboden
7 Wurzbach	Saksa	2002	0,4	-	Piiöljy	GET
8 Tirano, T.V.V.V.SPA	Italia	2003	1,1	Kaukolämpö	Piiöljy	Turboden
9 Dobbiaco, Fehrheizwerk Toblach S.C.A.R.L.	Italia	2003	1,5	Kaukolämpö	Piiöljy	Turboden Turboden
10 Neckarsulm, Stadtwerke Neckarsulm	Saksa	2003	1,1	Kaukolämpö	Piiöljy	Turboden
11 Sauerlach	Saksa	2004	0,5	Kaukolämpö	Piiöljy	Turboden
12 Plössberg Erdenwerk Gregor Ziegler GmbH	Saksa	2004	1,1	Kaukolämpö	Piiöljy	Turboden
13 Thal Aue, Theurl Saegewerk KG	Itävalta	2004	1,1	Sahatavaran- kuivaus	Piiöljy	Turboden

3.2 Stirling - moottori

Skotlantilainen Robert Stirling keksi nimeään kantavan moottorin vuonna 1816, eli ennen polttomoottoria. Stirling-moottorilla on teoriassa mahdollisuus saavuttaa suurempi hyötysuhde kuin millään lämpömoottorilla. Mutta kuitenkin vähäisestä kehitystyöstä ja prosessikaasun epätäydellisyy-

destä sekä materiaalirajoituksista johtuen, se ei ole vielä saavuttanut kovin hyvää hyötysuhdetta. (Paavola, 2008)

Ensimmäisessä kuumailmamootorissa (KUVIO 5), joka tuotti 1,5 kW tehon, oli halkaisijaltaan 60 cm pystysuorasyylinteri. Koneen kuumapään sylinteri paloi loppuun jo kahdessa vuodessa. Stirling-moottori jäi muiden voimanlähteiden varjoon sylintereiden kulumisen ja tiiveysongelmien takia. (Niskanen, Jarva, 2011)



KUVIO 5. Iki vanha kuumailmamoottori (Niskanen, Jarva, 2011)

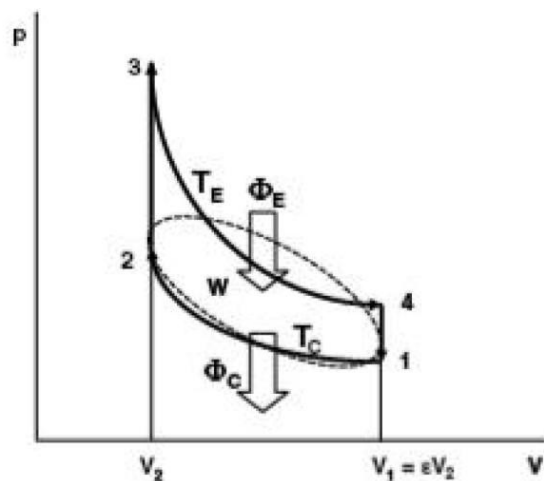
Stirling-moottori antaa paljon vapauksia sen pyörittämiseen, koska se käy pelkällä lämmöllä. Sitä on pyöritetty myös auringonvalosta kerätyllä lämmöllä ja siitä on saatu hyviä tuloksia. Stirling-moottorilla on hiljainen käyntiääni ja sillä on pitkät öljynvaihtovälit. Huonoja puolia on korkea hinta sekä likaantuvat pinnat lämmönvaihtimissa, jos käytetään huonoa polttoainetta ja palaminen on epätäydellistä. Stirling-moottorissa ei ole vaikeaa tekniikkaa, vaan korkea hinta johtuu pienistä valmistuseristä. Päästöt tulevat täysin riippumaan polttoaineesta tai -tavasta. (Hintikka, 2004)

Työkaasu on tehokkaissa nykyaikaisissa Stirling-moottoreissa paineistettu. Kiertoprosessissa kuumennettavan kaasun määrä ja kaasun siirtämä työ on paineistuksen ansiosta suurempi. Tästä seuraa, että koneesta saadaan suurempi mekaaninen teho ulos. (Niskanen, Jarva, 2011)

3.2.1 Toimintaperiaate

Stirling-moottori on lämpövoimakone, jonka sisällä ei tapahdu palamista, vaan tarvittava lämpö tuotetaan ulkopuolelta. Lämmöntuotantomenetelmällä ei kuitenkaan ole merkitystä Stirling-moottorin toimintaan. Moottorin sisällä käytetään työkaasua, joka ei osallistu palamiseen, eikä se myöskään poistu sylinteristä koko prosessin aikana. (Aaltonen, Ukkonen, 2010)

Kun moottorin kuumapäätä lämmitetään, kaasu alkaa laajeta ja työntää sylinterin mäntää kohti ääriasentoa. Stirling-prosessissa (KUVIO 6) tuotettu työ saadaan tässä vaiheessa ja se on nimetty työvaiheeksi. Männän liikkeessa ääriasentoon, laajentuminen jatkuu kylmäpuolella. Vauhtipyörään saadun momentin ansiosta se alkaa painaa kuumapuolen mäntää takaisinpäin ja näin se työntää lisää kaasua kylmäpuolelle. Näin kaasu työntää kylmäpuolen mäntää kohti ääriasentoa ja samalla kaasu jäähtyy sekä paine laskee. Nyt vauhtipyörän momentti auttaa vuorostaan kylmäpuolen mäntää takaisinpäin ja mäntä työntää kaasun kuumalle puolelle. Kaasun vähäisen paineen takia tämä siirto kylmältä kuumalle puolelle vie vähemmän energiaa kuin kuumalta kylmälle. Tästä saatu erotus saadaan hyötykäyttöön ja vauhtipyörälle mekaanista työtä. Näin prosessi alkaa uudelleen alusta. Vauhtipyörään kytketään sähkögeneraattori, joka tuottaa sähköä. (Paavola, 2008)



KUVIO 6. Stirling – moottorin kiertoprosessi. (Niskanen, Jarva, 2011)

Moottorin hyötysuhdetta voidaan parantaa regeneraattorilla. Osa lämpöenergiasta, kuumalta puolelta kylmälle puolelle siirtyvästä työkaasusta, siirtyy regeneraattorin massaansa. Tässä kaasun tilavuus pienenee samalla. Kaasun virratessa toiseen suuntaan, kylmältä kuumalle puolelle, regeneraattori

esilämmittää varautuneella lämmöllään työkaasua ennen varsinaista kuumennusta. (Niskanen, Jarva, 2011)

Moottorissa tarvitaan käytännössä yli 1000 asteen lämpötila, jotta saataisiin suuri sähköteho. Sitä suurempi mekaaninen työ ja saatu hyötysuhde saavutetaan, mitä suurempi on kuumen ja kylmän puolen lämpötilaero. (Paavola)

Alfa, Beeta ja Gamma ovat kolme erilaista Stirling-moottorityyppiä. Alfatyypin moottorissa on useita sylintereitä eri lämpötiloissa. Kaasun liikuttelemista varten näiden männät yhdistetään. Kaasua vuorotellen kylmään ja kuumaan päähän saman sylinterin sisällä siirtelevä syrjäyttäjämäntä, on Beeta- ja Gammatyyppin moottoreissa. (Koponen, 2010)

Eräs Stirling-moottorin isoterminen laskentamenetelmä on Schmidtin teoria. Se on Stirling-moottoria kehitettäessä hyvin yksinkertainen ja käytännöllinen menetelmä. Se on isotermiseen ideaalikaasun laajenemiseen ja puristukseen perustuva teoria. pV-diagrammin avulla voidaan laskea Stirling-moottorin kierto ja tilavuus geometrian perusteella. Paine lasketaan käyttämällä ideaalikaasun tilayhtälöä, kun tilavuus, massa ja lämpötila ovat tiedossa. (Niskanen, Jarva, 2011)

3.2.2 Tulevaisuuden näkymät

Työkaasuna kannattaisi käyttää ainetta, joka laajenee mahdollisimman paljon pienestä lämpötilaerosta. Tällöin Stirling voisi toimia vaikkapa maalämmöllä tai lämmityskattilan hukkalämmöllä. Erittäin hyviä tähän tarkoitukseen olisivat esimerkiksi kylmälaitteista tutut freonit, mutta ne eivät ole ympäristöystävällisiä. Joka tapauksessa Stirlingin työkaasu on suljetussa kierrossa prosessin aikana, mutta vikatilanteessa aine voisi karata. (Hintikka, 2004)

Lämmityskattilan tulipesään tai savukaasun poistokanavaan kiinnitetään yleensä suoraan Stirling-moottorin lämpöpaneeli (KUVIO 7).Niiden kehitys on viime vuosien aikana kasvanut kokoluokkaan 9–75 kWe. Tämän kokoluokan Stirling-moottori on tarkoitettu lähinnä 100–800 kW lämmityskattiloille. 9 kWe Stirling on pienin ja se on yksisylinterinen moottori. Kahdeksansylinterisessä Stirling-moottorissa on 75 kWe yksikkö.



KUVIO 7. 35 kWe stirling-moottori, lämpöpaneeli sylinterikannen päällä. (Granö, 2010)

Stirling-moottorit on nykyisin kehitetty antamaan täydentävän määrän sähkövirtaa pienissä CHP-laitoksissa. Noin 10 % voidaan ottaa ulos sähkön muodossa kattilan lämpötehosta (KUVIO 8). Stirling Denmark on ollut hyvin aktiivinen yhtiö tuotekehityksessä. (Granö, 2010)



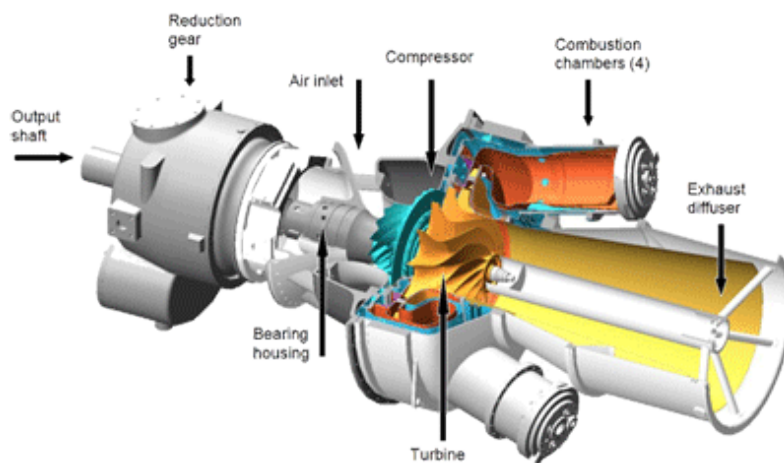
KUVIO 8. Lämmityskattila päälle asennettuna stirling- moottori (Granö, 2010)

3.3 Mikroturbiini

Mikroturbiini kuuluu polttomoottoreihin. Samassa akselissa ovat kiinni generaattori, ahdin ja turbiini. Palotilaan johdettavan polttoaineen lisäksi ahdin ahtaa sinne myös paineistettua ilmaa ja näin turbiini pyörii seoksen palamisesta aiheutuvilla palokaasuilla. Polttoaineena voidaan käyttää joko nestemäisiä tai kaasumaisia aineita. (Lamminmäki, 2009)

3.3.1 Toimintaperiaate

Palokaasujen hyödyntämiseen sähköntuotannossa on kehitetty mikroturbiini. Tosin jo ennen toista maailmansotaa palokaasuja on hyödynnetty häikäpöntön avulla, mutta palokaasuissa mukana olevan tervan ja pienhiukkasten takia niihin on liittynyt paljon ongelmia. Mikroturbiinissa ilmaa ahdetaan palamisilman esilämmittimen kautta polttokammioon. Palokammiossa tapahtuvan räjähdysmäisen palamisen ansiosta turbiinin siivet alkavat liikkua (KUVIO 9). (Vieras, 2009)



KUVIO 9. Mikroturbiinin rakenne (Granö, 2010)

Mikroturbiineja eli pieniä kaasuturbiineja löytyy kokoluokkaan 25–250 kW. Sähköä syntyy, kun turbiinin kanssa samalle akselille on kytketty vaihtovirtageneraattori. Lämpöenergian tuottamisessa voidaan hyödyntää savukaasuihin jäävää lämpöä. Jotta saavutettaisiin korkea sähköteho, polttoilman esilämmittämiseen käytetään usein rekuperaattoria, jossa kuumilla savukaasuilla esilämmittää polttokammioon menevää palamisilmaa.

Mikroturbiinien polttoaineina voidaan käyttää sekä kaasumaisia että nestemäisiä aineita. Yleisimmin käytetty polttoaine on tällä hetkellä maakaasu. Mikroturbiineissa eniten tutkimuksen ja kehityksen alla on biomassaan perustuvista polttoaineista saatavan biokaasun käyttö. Sähköntuotannon hyötysuhde on mikroturbiineilla alhaisempi kuin polttomoottori/generaattori-yhdistelmällä saavutettava hyötysuhde. Toisaalta mikroturbiinien päästöt ovat moottoreita alhaisemmat. (Sinkko, 2009)

Painesuhde saattaa olla jopa 30:1 uusimmissa kompressoreissa ja vanhemmissa 15:1. Paineistettu ilma johdetaan polttokammioon kompressorin jälkeen polttoaineen sekaan. Kaasun maksimilämpö-

tila voi olla jopa 1300 °C. Prosessin hyötysuhde on likimain suoraan verrannollinen palokaasujen maksimilämpötilaan. Turbiinin lämpökestävyys ja jäähdytysjärjestelmä määrää savukaasun maksimilämpötilan. Polttoaineen eroosiota ja korroosiota aiheuttavat ainesosat, kuten natrium-, kalium-, kalsium- tai rikkiyhdisteet sekä suurikokoiset partikkelit, tulee huomioida polttokammiossa käytettävää polttoainetta valittaessa, sillä likaiset savukaasut voivat aiheuttaa vahinkoa turbiinin siivistöille. (Aaltonen, Ukkonen, 2008)

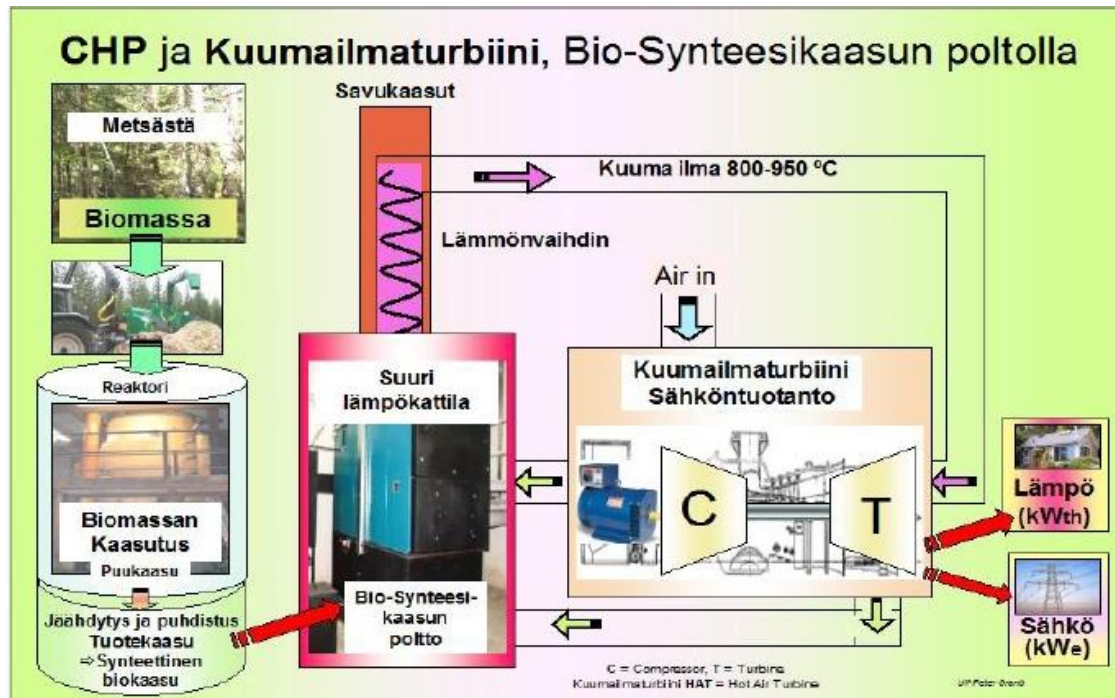
3.3.2 Kannattavuus

Alkuinvestointina mikroturbiini on kallis laite, mutta huoltoa tarvitaan vähän. Taloudellisesti kannattavampaa on mikroturbiini isommassa kuin pienemmässä kokoluokassa. Mikroturbiinilla saadaan tuotettua suuritaajuuksista sähköä ja päästään isoihin kierroslukuihin. Mikroturbiini soveltuu erinomaisesti toimimaan jatkuvatoimisena ja se sopeutuu hyvin polttoaineen syötön nopeuden vaihteluihin. Mikroturbiini maksoi vuonna 2004, Capstonen valmistamana ja Greenviromentin maahan tuomana, noin 100 000 €. Sähköä tällä saadaan tuotettua 30 kW ja lämpöä 60 kW. (Lamminmäki, 2009)

3.4 Kuumailmaturbiini

Hiiltä polttavia kuumailmaturbiineja on mukautettu sopiviksi biomassalle. Tästä tekniikasta käytetään nimitystä HAT (Hot Air Turbine). Pienemmissä yksiköissä, joissa biomassaa kaasutetaan ja poltetaan tehokkaasti, lämpöä siirretään savukaasuista lämmönvaihtimeen. Lämpö siirtyy lämmönvaihtimen kautta kuumaan korkeapaineiseen ilmaan, joka ohjataan kuumailmaturbiiniin (KUVIO 10). Kuuman ilman lämpötila on 800–950 °C.

Kiinnostus kuumailmaturbiinin käyttöön on kasvanut biomassan kaasutustekniikan parantumisen myötä. Puukaasun poltossa syntyy suhteellisen puhtaita savukaasuja kehittyneellä tekniikalla. Kuumailmaturbiinin savukaasuputkessa olevassa lämmönvaihtimessa tämä myös vähentää kerrostumisongelmaa. Lämmönsiirto on tehokkaampaa ja huollontarve vähenee kun likakerrostumia on vähän. (Granö, 2010)



KUVIO 10. Periaatekuva kuumailmaturbiinista CHP-yksikössä(Granö, 2010)

Kuumailmaturbiinissa lämpö tuodaan savukaasuista savukaasu/ilmalämmönsiirtimen välityksellä kaasuturbiiniprosessiin. Turbiinissa kiertää siis vain savukaasuilla lämmitetty puhdas ilma. (Heinimö, Malinen, 2002)

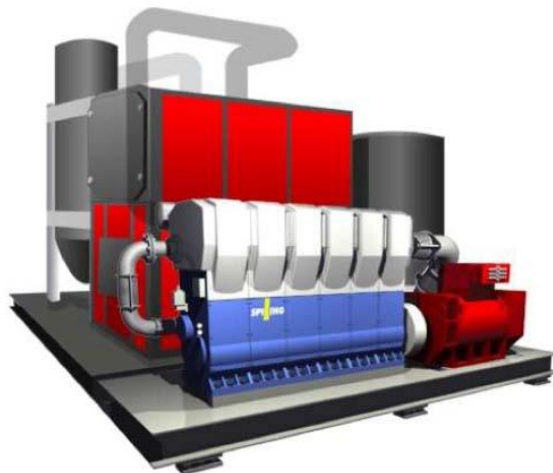
3.5 Höyrymoottori

Yleisimmin käytettyjä CHP-energian tuotantomuotoja ovat höyryturbiinit ja -moottorit. Yleisesti höyrymoottori on useimmissa tapauksissa kustannustehokkaampi kuin höyryturbiini, jos suunnitellaan sähköteholtaan 1-2 MW_e voimalaitosta. Messuilla on esitelty myös pienempiä teollisuuskäyttöön soveltuvia höyryturbiineja, aina 100 kW_e ylöspäin. Polttoaineen energiasta suurin osa pitäisi voida käyttää korkea- ja matalapaineisena höyrynä sekä lämpönä kaukolämpöverkkoon, sillä sähköntuotannon hyötysuhde on vain 5-20 %. Energiantuotannossa tämä ratkaisumalli suosii juuri hajautettua mallia. Höyryturbiinia käytettäessä, prosessi itsessään on vastaava, höyrymoottori vain korvataan turbiinilla. Höyryn laajetessa se tuottaa mekaanista energiaa ja jäljelle jäänyt lämpö otetaan talteen moottorin jälkeen.

3.5.1 Toimintaperiaate

Höyrymoottoriin (KUVIO 11) on yhdistetty prosessissa kaasutin tai polttoprosessi. Höyry syntyy kun polttoprosessissa syntyneet kaasut johdetaan kattilan läpi. Lämpöenergialla syntynyt höyry johdetaan kattilasta höyrymoottoriin. Korkeapaineisen höyryn laajetessa moottorissa se tuottaa mekaanista energiaa ja jäljelle jäänyt lämpö otetaan talteen moottorin jälkeen. (Virkkula, 2010)

Höyryn paisuessa turbiinissa, höyryn sisältämästä lämpöenergiasta osa muuttuu mekaaniseksi energiaksi. Tästä johtuen höyryn paine ja lämpötila laskevat. Turbiinit voidaan höyryn virtaussuunnan mukaan jakaa aksiaali- ja radiaaliturbiineihin. Aksiaaliturbiinissa höyry virtaa turbiinin akselin suuntaisesti ja radiaaliturbiinissa vastaavasti akselin säteen suuntaisesti. Yleisemmin käytetään aksiaaliturbiinia.



KUVIO 11. höyrymoottori (Virkkula, 2010)

3.5.2 Käyttökohteet

Pienet höyryturbiinit ovat kooltaan $0,2 \text{ MW}_e$. Ne ovat lähinnä vesipumppujen varavoimakoneita. Turbiineille tuleva höyrynpaine on alle 3 MW_e kokoluokassa noin 30–40 bar ja höyryn lämpötila alle $400 \text{ }^\circ\text{C}$. On myös mahdollista käyttää suurempia paineita ja lämpötiloja. Myös kylläiselle höyrylle valmistetaan turbiineja.

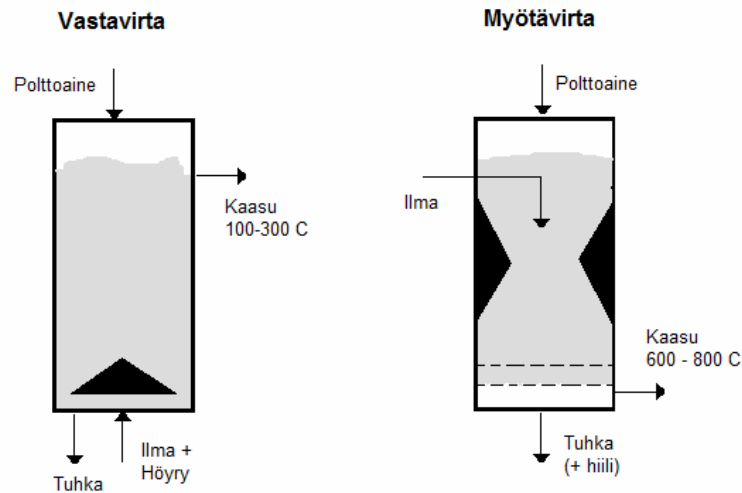
Kaupallisesti Euroopassa on toteutettu kiinteää biopolttoainetta käyttäviä alle 5 MW_e teholtaan olevia pienvoimalaitoksia noin 60 kappaletta. Ylivoimaisesti eniten toteutuksia on tehty Saksassa 42 ja Suomessakin niitä on 2 kappaletta. Höyryturbiinilla sähköä tuotetaan 33 laitoksella ja höyrykoneella 19 laitoksella. Höyrykone on alle 1 MW_e kokoluokassa yleisin ratkaisu ja tätä suuremmissa laitoksissa höyryturbiini. (Heinimö, Malinen, 2002)

3.6 Kaasutusprosessi

Biomassa voidaan muuttaa biologisesti, kemiallisesti tai termokemiallisesti energian tuotantoon sopivaan muotoon. Termokemiallinen tapa tarkoittaa termistä käsittelyä eli biomassan polttamista. Tämän seurauksena syntyy lämpöä, hiilidioksidia ja vettä. (Sinkko, 2009)

Kun kaasuttavan aineen happi reagoi polttoaineen kanssa, silloin puhutaan palamisesta. Yleisimmin kaasuttavana aineena toimii vesihöyry, happi tai ilma. Korkeassa lämpötilassa syntyy kaasuseos, jonka palavia osia ovat metaani, vety ja hiilidioksidi. Palamisreaktio jaetaan kolmeen osaan: polttoaineen kuivuminen, haihtuvien aineiden poistuminen ja kaasureaktiot.

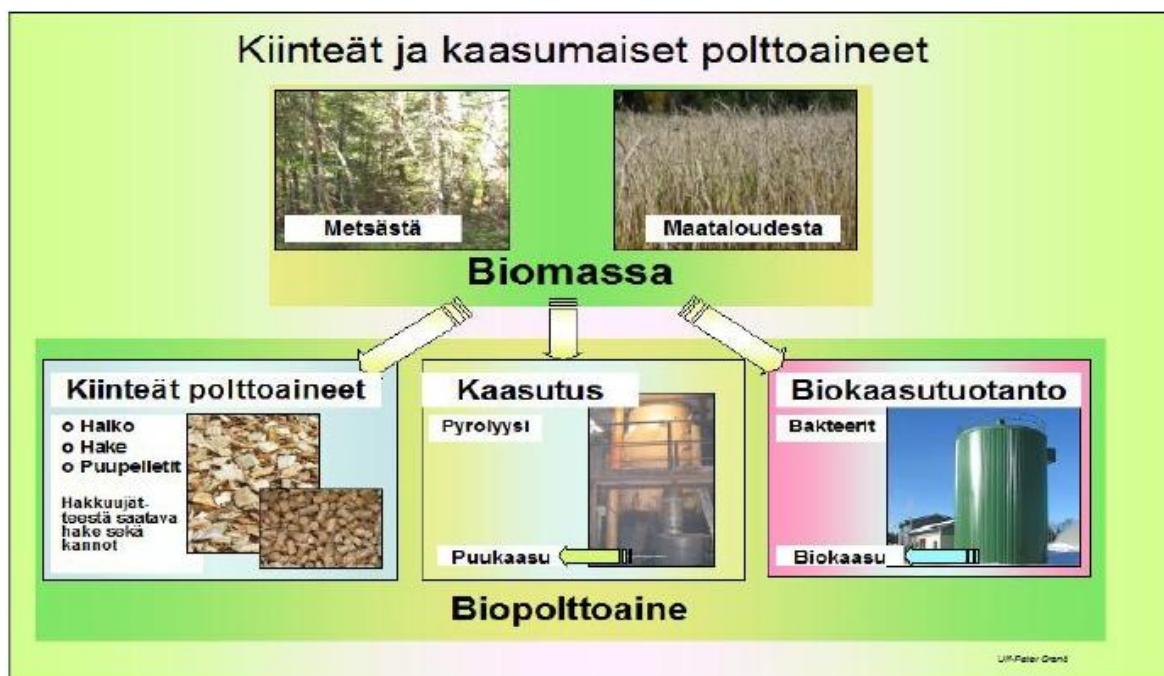
Kiinteä polttoaine voidaan kaasuttaa allotermisellä tai autotermisellä tavalla, riippuen lämmöntuontitavasta. Allotermisessä reaktiossa energia tuodaan prosessin ulkopuolelta. Autotermisessä tapauksessa kaasureaktion jälkeen tuotu happi reagoi osan kaasutettavan aineen kanssa vapauttaen lämpöä. Kaasutus voidaan toteuttaa paineistettuna tai normaali-ilmanpaineessa. Paineistetun prosessin rakenne on monimutkainen, mutta sen etuna on pieni koko. Kiinteäkerroskaasutin, joka voi toimia joko vasta- tai myötävirtaperiaatteella (KUVIO 12), on käytetyin kaasutusprosessi pienissä voimaloissa. Vastavirtakaasuttimessa polttoaine tulee kaasuttimeen ylhäältä ja kaasuttava aine alhaalta. Myötävirtakaasuttimessa molemmat syötetään ylhäältä reaktoriin. (Aaltonen, Ukkonen, 2008)



KUVIO 12. Vasta- sekä myötävirtakaasutin (Aaltonen, Ukkonen, 2008).

3.6.1 Kaasutettava polttoaine

Halot, puuhake, puupelletit sekä hakkuujätteestä ja kannoista peräisin oleva puuhake ovat kiinteitä metsästä saatavia biopolttoaineita (KUVIO 13). Kaasumaisia biopolttoaineita voidaan saada anaerobisella bakteeriprosessilla tai kaasutuksella kuumennuksen kautta (KUVIO 14).

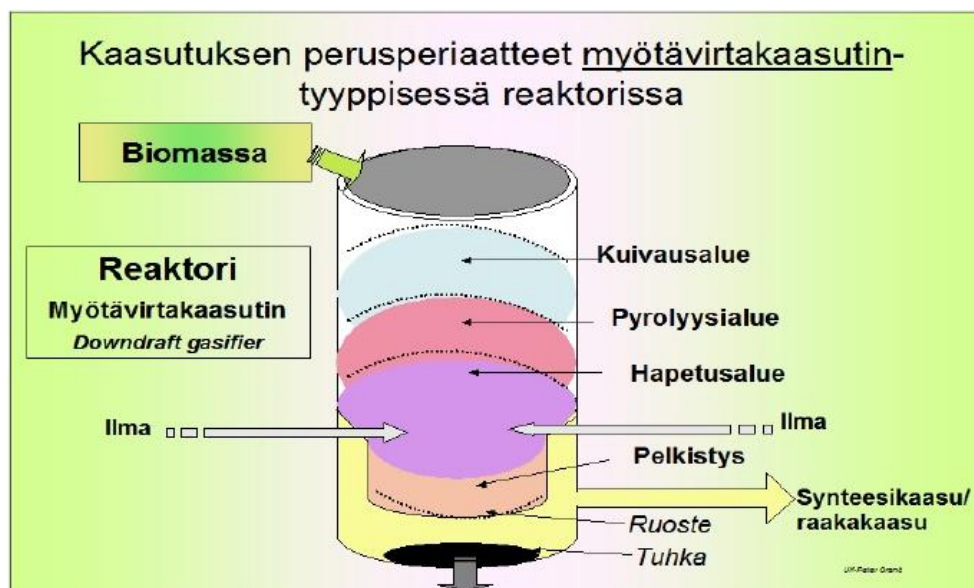


KUVIO 13. biomassan käyttövaihtoehdot (Granö, 2010)



KUVIO 14. biomassan kaasutuksen mahdollisuudet (Granö, 2010)

Arvokasta tuotekaasua voidaan saada biomassan kaasutuksella, jota kutsutaan puuperäistä raaka-ainetta kaasutettaessa puukaasuksi tai yleisesti synteetikaasuksi. Synteetikaasun synnyttämiseksi, pyrolyysiprosessin ohjaukseen, käytetään kaasutinta tai niin sanottua reaktoria (KUVIO 15). Synteetikaasun muodostumisen jälkeen se käy läpi jäähdytyksen ja ensimmäisen puhdistuksen. (Granö, 2010)



KUVIO 15. Myötävirtakaasutin tyyppinen reaktori (Granö, 2010)

3.6.2 Polttotekniikka

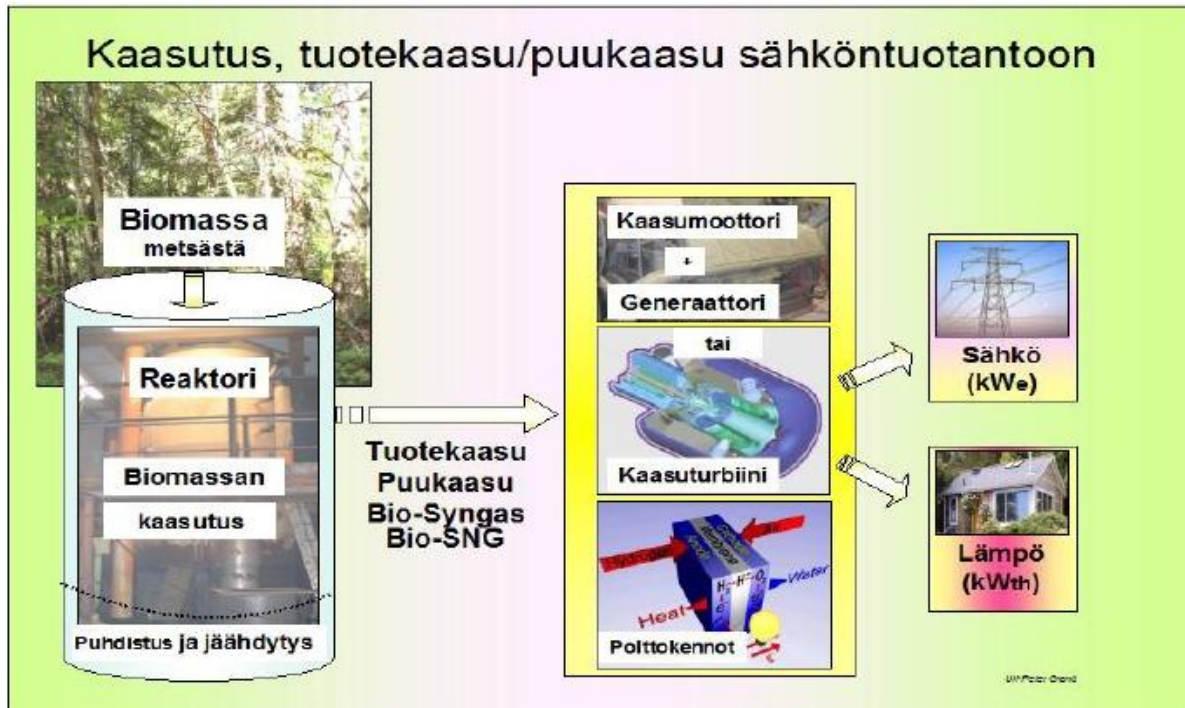
Arinapoltto on perinteinen polttotekniikka. Suuren mittakaavan laitoksissa käytetään leijukerros-polttoa. Termiseen käsittelyyn kuuluu polton lisäksi myös kaasutus. Optimaalinen kaasun tuotto toteutetaan ali-ilmalla ja korkealla lämpötilalla. Ilmaa, hiilidioksidia ja vesihöyryä käyttämällä voidaan pyrolyysin jälkeen jäänyt kiinteä jäännöshiili muuttaa kaasuksi. Tuotekaasun polttokelpoisia osia voi olla 40 % tilavuudesta, ja ne ovat suurimmaksi osaksi hiilimonoksidia, vetyä ja metaania. Loput kaasusta on esimerkiksi typpeä ja hiilidioksidia.

Kilpailukykyisimmät kaasutusprosessit pienen kokoluokan (15 MW) lämpölaitoksissa perustuvat kiinteäkerroskaasutukseen. Pienimmät kaasutuspolttolaitokset toimivat vastavirtaperiaatteella. Reaktorissa on kuivumis-, pyrolyysi-, kaasutus- ja polttovyöhykkeet, joiden läpi polttoaine valuu hitaasti. Tuhkan sulamisesta ei muodostu ongelmaa, koska kaasutusreaktiossa ei ylitetä 1000 °C lämpötilaa. Tuhka otetaan reaktorin pohjalta. Polttoaineen partikkelikoko on muutamia senttimetrejä eli siihen soveltuu vain hyvin tasalaatuinen polttoaine. Kaasujen on päästävä virtaamaan polttoainekerroksen läpi. Hienoainesta sisältäville keveille polttoaineille, kuten sahanpurulle, metsätähdemurskeelle ja kierrätyspolttoaineelle soveltuvan uudentyyppisen Novel-kiinteäkerroskaasuttimen on kehittänyt Condens Oy ja VTT Energia. Se perustuu pakkotoimiseen polttoainesyöttöön, vastavirtaperiaatteella toimivaan kaasuttimen alaosaan ja sen yläpuolisessa tilassa tapahtuvaan kaasun krakkaukseen. (Sinkko, 2009)

3.6.3 Polttokaasun käyttökohteet

Käyttökelpoisen tuotekaasun aikaansaaminen on pääasiallisena mielenkiintona biokaasun kaasutuksessa. Tuotekaasu voidaan käyttää polttoon tai jatkojalostukseen suoraan. Puukaasun käyttö sähköntuotantoon on kehittynyt nopeasti. Tekniikka metsästä saatavien bioenergiaraaka-aineiden tehokkaaseen hyödyntämiseen on jo ensisijaisesti olemassa. Pienemmissä CHP-laitoksissa puukaasua voidaan käyttää polttoaineena muun muassa (KUVIO 16).

- Mäntämoottorissa/kaasumoottorissa, koko noin 50 kWe–200 kWe
- Kaasuturbiinissa, koko usein yli 500 kWe
- Mikroturbiinissa, koko noin 30–250 kWe
- Polttokennoissa, koko noin 20–320 kWe (Granö, 2010)



KUVIO 16. Vaihtoehtoja puukaasun käytölle. (Granö, 2010)

3.7 Kaasumoottori

Kokonaishyötysuhteeksi voidaan saada jopa 85 %, tuottaessa sekä sähköä että lämpöä. Syöttämällä kaasutuskaasua kaasumoottoriin saadaan paras sähköntuotannonhyötysuhde, tällöin moottorin hyötysuhde saattaa olla parhaimmillaan jopa 46 %. Kaatopaikkakaasut ja biokaasureaktorin tuottamat metaanikaasut soveltuvat myös kaasumoottorin polttoaineeksi. Polttoaineelle asetetaan suuret puhtausvaatimukset, sillä suuri virtausnopeus ja korkea lämpötila saattavat muuten laskea kaasumoottorin käyttöikä.

3.7.1 Toimintaperiaate

Kaasumoottorit (KUVIO 17) voidaan luokitella diesel- tai ottomoottoreiksi eli ne toimivat joko kipinä- tai puristus-sytytteisesti. Kaasuseos sytytetään sytytystulpan avulla kipinäsytytteisessä moottorissa. Puristus-sytytteinen moottori vaatii hieman nestemäistä polttoainetta sytyttämään kaasuseoksen, joka ruiskutetaan sylinteriin tai esikammioon. Kaasut voidaan johtaa kaasumoottoriin kompressorin imupuolelle tai paineistettuna imukanavaan imuventtiilin läheisyyteen. Kolmas vaihtoehto on syöttää paineistettu kaasu sylinteriin vasta puristuksen loppuvaiheessa. Tämä on myös dieselmoottorin

torin polttoaineen syöttötapa. Kaasumoottorissa on olemassa kaasutusvaara, jos kaasu sekoitetaan palamisilmaan ennen sylinteriin joutumista. (Aaltonen, Ukkonen, 2008)



KUVIO 17 Kaasumoottori (Aaltonen, Ukkonen, 2008)

Moottorin antama mekaaninen teho muutetaan generaattorin avulla sähköksi diesel- ja kaasumoottorisysteemissä. Lämmitystarkoitukseen voidaan hyödyntää noin 70 % pakokaasujen lämmöstä. Diesel- ja kaasumoottoireissa voidaan käyttää biomassaan perustuvia polttoaineita, joita ovat biokaasu, biomassan kaasutuskaasu ja bioöljy. Kaasutus on tehokkain tapa tuottaa energiaa biomassasta ja käyttää tämä kaasumoottorissa. Biomassan kaasutus edustaa uutta kehityssuuntaa ja sen käyttö on vielä kehitysasteella. Biokaasu on puhdistettava anaerobisen hajotuksen seurauksena. Se tarkoittaa muun muassa rikin- ja vedenpoistoa, ennen diesel- tai kaasumoottoriin syöttöä. Biokaasun käyttö vaatii vielä kehitystyötä, mutta se on energiatehokas tapa tuottaa sähköä ja lämpöä.

3.7.2 Käyttökohteet

CHP-laitoksissa käytetään paljon polttomoottoreita, koska niiden rakennusaika on lyhyt ja investointikustannukset ovat pienet. Lisäksi muun muassa käynnistys ja sammutus onnistuvat nopeasti, ne toimivat tehokkaasti myös vajaalla kuormalla, niiden ylläpito on helppoa sekä useamman polttoaineen käyttö on yleensä mahdollista. Eli toimintaparametrit ovat joustavia. (Sinkko, 2009)

3.8 Polttokenno

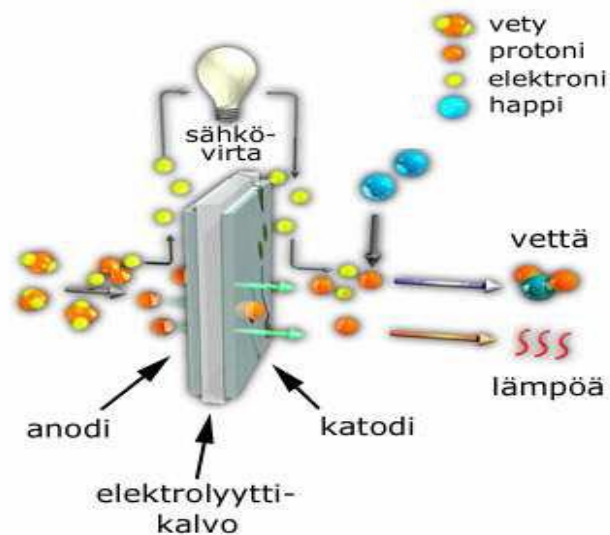
Puhdistetuille bio- ja puukaasuille polttokennojen kehitys jatkuu voimakkaana. Vuosien aikana on ollut maakaasua käyttäviin CHP-laitoksiin soveltuvia polttokennoja käytössä. Niitä on ollut käytössä pääasiassa sairaaloissa sekä hotelleissa. Pienemmän tilavuuden saamiseen per kW sekä pienemmän painon saavuttamiseen liittyen polttokennot (KUVIO 18) kehittyvät nykyisin nopeasti. (Granö, 2010)



KUVIO 18. Topsoe fuel Cell A/S Tanskassa valmistaa SOFC – tyyppisiä polttokennoja. Teho on noin 1 kW. (Granö, 2010)

3.8.1 Toimintaperiaate

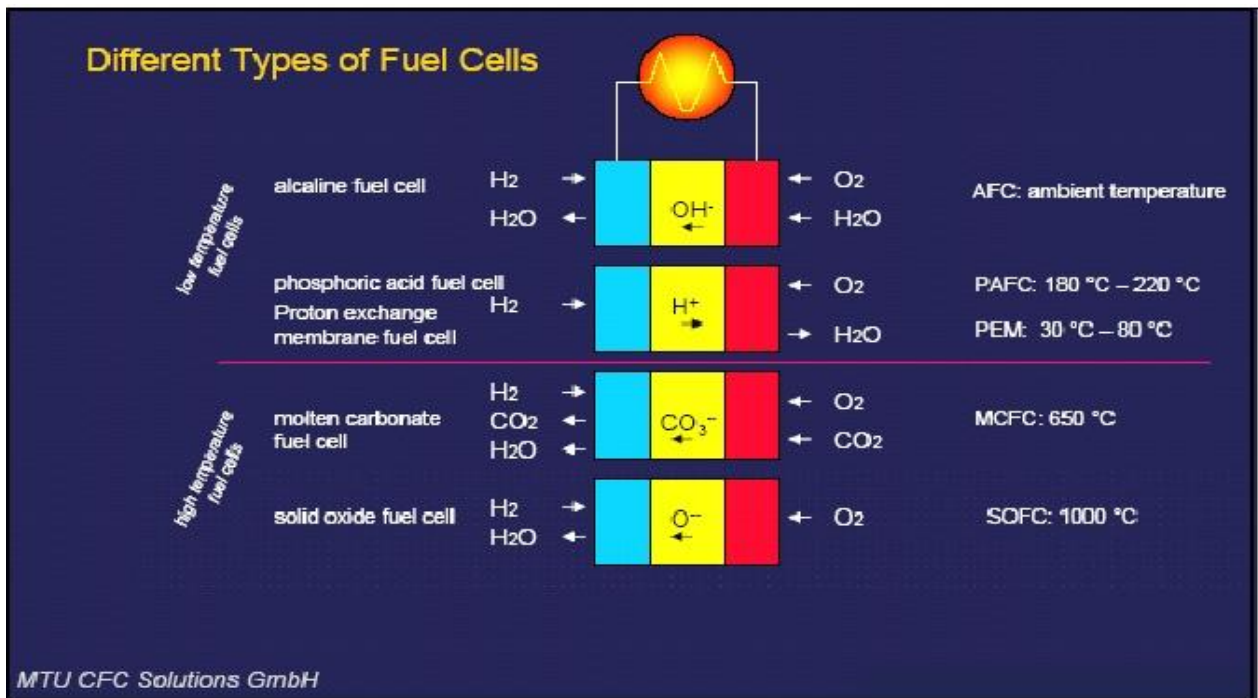
Polttokenno on elektrokemiallinen laite ja se tuottaa polttoaineesta sekä ilman hapesta sähköä, lämpöä ja vettä. Vesi on ainoa päästö, jos polttoaineena käytetään vetyä. Polttokenno muuttaa vedyn ja hapen elektrokemiallisen reaktion kautta kemiallista energiaa sähköenergiaksi eli toimii periaatteessa kuin paristo. Niin pitkään kuin polttoainetta on saatavilla, se tuottaa energiaa eli polttokennoa ei tarvitse ladata toisin kuin paristoa. Polttokenno toimii niin, että anodille syötetään puhdas vetykaasu, tällöin elektronit irtautuvat vetyatomeista jolloin niistä tulee positiivisesti varautuneita vetyioneja. Positiivisesti varautuneet ionit liikkuvat katodille elektrolyytin läpi. Samaan aikaan syntyy sähkövirtaa, kun negatiivisesti varautuneet elektronit siirtyvät katodille ulkoista reittiä pitkin. Elektronit yhdistyvät ioneihin katodilla ja yhdistyessään ilman hapen kanssa tuottavat vettä sekä toisena sivutuotteena lämpöä (KUVIO 19). Teho yksittäisellä polttokennolla on joitakin kymmeniä tai satoja watteja, ja ne tuottavat tasavirtaa vajaan voltin jännitteellä. Kokoamalla kennoja sarjaan tai rinnan toimiviksi moduuleiksi, jotka käsittävät tuhansia kennoja, saadaan suurempia tehoja aikaiseksi.



KUVIO 19. polttokennon toimintaperiaate (Sinkko, 2009)

Biokaasu tulee puhdistaa ennen polttokennoon johtamista. Rikkivety, halogenoidut hiilivedyt, siloksaanit ja merkaptaanit muodostavat ongelman polttokennojen käytölle. Rikkivedyn pitoisuus riippuu mädätettävästä materiaalista ja sitä on aina biokaasussa. Rikkivedyn poistolle kaksi yleisistä tapaa on rautakloridin lisäys reaktorilietteeseen ja ilman tai hapen lisääminen suoraan reaktorissa syntyvään kaasuun. Rikkivedyn poistokeinoja ovat myös rautaoksidin tai rautaoksidipellettien lisääminen, fysikaalinen adsorbointi märkämenetelmän avulla sekä adsorbointi aktiivihiilen tai natriumhydroksidin avulla. Siloksaaneja eli orgaanisia piiyhdisteitä esiintyy myös ajoittain biokaasussa ja absorboimalla ne nestemäisen väliaineeseen niitä voidaan poistaa. (Sinkko, 2009)

Polttokennoilla varustetuissa CHP-laitoksissa voidaan jo nyt (puhdistuksen jälkeen) käyttää metsästä saadusta bioenergiaraaka-aineista valmistettua puukaasua. Maa-, bio- tai puukaasulle on joidenkin vuosien ajan saksalainen yhtiö MTU – CFC (KUVIO 20) valmistanut polttokennoja sähköntuotantoon. Puhdistetun bio- ja puukaasun käyttämiseksi polttoaineena pienemmissä polttokennoilla varustetuissa CHP-yksiköissä, on suunnittelu täysin mahdollista aloittaa. Kaasumoottoriin nähden, polttokennojen hinta on edelleen noin 3–5 kertainen. (Granö, 2010)



KUVIO 20. Parhaiten sähköntuotantoon bio- ja puukaasulla soveltuvat luultavasti MCFC sekä SOFC. Saksalainen MTU – yhtiö käyttää MCFC – polttokennoja CHP – yksiköissään. (Granö, 2010)

Polttokennojen päätyypit ovat polymeeripolttokenno PEMFC (lämpötila 60–80 °C) ja kiinteäoksidipolttokenno (800–1000 °C), mutta muitakin on olemassa. Matalan lämpötilan PEMFC (polymer proton exchange membrane fuel cell) -kennoihin näyttää olevan suurin osa valmistajista kuitenkin keskittyneen, sillä niitä on edullista ja kohtalaisen helppoa valmistaa. Lisäksi sovelluskohteita kannettavista tietokoneista autoihin on PEMFC-kennoille helppo löytää.

Valmistajia CHP-tuotantoon sopivien korkean lämpötilan SOFC-polttokennoihin (solid oxide fuel cell) on, mutta kiinnostusta pienempään kokoluokkaan on vain harvalla. Paremmin matalamman lämpötilan kennot sopisivat pienempään käyttöön, sillä mikro-CHP-käytössä kuumien kennotyyppien tuottama lämpö saattaa jäädä hyödyntämättä. Huonoakin polttoainetta kuumat kennot tosin kestävät paremmin ja polttoaine reformoituu korkeassa lämpötilassa ilman erillistä laitetta, mutta kennojen käyttövalmiiksi lämpeneminen on hidasta. Matalan lämpötilan kennot tarvitsevat polttoaineksi joko puhdasta vetyä tai erillisen reformaattorin, mutta toisaalta ne käynnistyvät nopeasti ja ne pystyvät vastaamaan nopeammin kuorman muutoksiin.

Polttokenno käy useille polttoaineille. On olemassa myös bensiinillä käyvä japanilainen kenno (Cosmo oil), mutta yleisimmin käytetään vetyä, metanolia ja maakaasua. Ainoa polttoaine, joka käy polttokennolle suoraan, on vety. Reformoimalla polttoaineiden rakennetta, saadaan polttokenno toimimaan muillakin polttoaineilla. Korkeamman lämpötilan kennot kykenevät itse reformoimaan polttoainetta, mutta matalan lämpötilan kennot tarvitsevat erillisen laitteen. Varsinkin matalan lämpötilan kennoissa polttoaineen puhtaus on erittäin tärkeää. Erityisesti rikki epäpuhtautena on hankala, sillä se tukkii kennot suurina pitoisuuksina. Yleisesti otettuna kuumat kennot ovat parempia siemään epäpuhtauksia.

Muuta tekniikkaa huomattavasti korkeampi hyötysuhde (38–58 %) on yhteistä kaikille polttokennoille. Näin ollen kokonaishyötysuhde on myös korkea (70–95 %). (Hintikka, 2004)

Polttokennojen luokittelu voidaan tehdä esimerkiksi käytetyn elektrolyyttimateriaalin ja siitä riippuvan lämpötilan mukaan. Yleisimpien polttokennotyyppien eroja, hyötysuhteita ja sovellusmahdollisuuksia on esitetty taulukossa 3. Korkean lämpötilan polttokennot toimivat myös hiilimonoksidilla ja jopa metaanilla, mutta matalan lämpötilan kennot toimivat vain vety polttoaineenaan. Muihin energiantuotantoteknologioihin verrattuna polttokennojen avulla on mahdollista saavuttaa huomattavasti pienemmät ympäristöpäästöt ja korkeampi sähköntuotannon hyötysuhde. Lisäksi kennojen kokoa voidaan säädellä helposti moduulirakenteen avulla sekä niiden toiminta on lähes äänetöntä.

TAULUKKO 3. Polttokennotyyppien vertailu (Sinkko, 2009)

	PEMFC	AFC	MCFC	SOFC
Elektrolyytti	Ioninvaihtomembraani	Kaliumhydroksidi	Alkalikarbonaattien seos	Kiinteä keraamioksid
Polttoaine	Vety	Vety	Vety, hiilimonoksidi, metaani, ammoniakki	Vety, hiilimonoksidi, metaani, ammoniakki
Toimintalämpötila [°C]	60 - 90	50 - 200	630 - 650	600 - 1 000
Sovellukset	Liikenne, kannettavat laitteet, sähköntuotanto, CHP	Liikenne, avaruussovellukset	Keskitetty ja hajautettu sähköntuotanto, CHP	Keskitetty ja hajautettu sähköntuotanto, CHP
Sähköhyötysuhde [%]	30 - 35	50	45 - 55	42 - 47
Edut	Matala lämpötila, nopea käynnistys	Katodireaktio nopeampi alkalielektrolyytillä, korkea toiminta-aste	Korkean lämpötilan tuomat edut (mm. tehokkuus, monet polttoaineet soveltuvat)	Korkean lämpötilan tuomat edut (ks. MCFC)
Haitat	Vaatii kalliin katalyytin, herkkä polttoaineen epäpuhtauksille	Tarvitsee kalliit CO ₂ -poistolaitteet polttoaineelle ja ilmalle	Korroosio, kennokomponenttien hajoaminen	Kennokomponenttien hajoaminen

3.8.2 Polttokennotyyppit

Yleisin polttokennotyyppi on polymeerielektrolyyttimembraanipolttokenno (Polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC) ja sitä teknologiaa käyttää yli 70 % polttokennoista. Se tuottaa korkean energiatihedden ja on kooltaan pienempi ja kevyempi kuin muut polttokennotyyppit. Elektrolyytinä se käyttää kiinteää polymeeriä ja huokoisia hiielektrodeja, joissa on platinakatalyytit. Toimi-

akseen PEMFC tarvitsee ainoastaan vetyä, ilman happea ja vettä kalvojen kostuttamiseen. Vedyn tuottamiseen tarvitaan reformointilaitteistoja, jos polttoaineena käytetään metaania tai metanolia.

Samaan perheeseen PEMFC:n kanssa kuuluu suorametanolipolttokenno (Direct methanol fuel cell, DMFC). Toimiakseen puhdas metanoli sekoitetaan vesihöyryyn ja se syötetään suoraan anodille. Polttoaineen varastointiongelmia ei ole, koska energiatiheys on metanolilla korkeampi kuin vedyllä. Nestemäinen metanoli on myös helppo kuljettaa ja toimittaa yleiseen käyttöön. Muihin polttokennoihin verrattuna DMFC-teknologia on uutta ja sen kehitystyö on useita vuosia muita jäljessä.

Alkalipolttokenno (alkaline fuel cell, AFC) käyttää elektrolyytinä vedessä olevaa kaliumhydroksidia. Katalyytteinä voidaan käyttää ei-jalometalleja anodilla ja katodilla, jotka ovat hyvin tehokkaita ja joilla on korkea toiminta-aste. Hiilidioksidi ja hiilimonoksidi myrkyttävät AFC:n toiminnan helposti, mikä on niiden pääasiallinen haittapuoli. Kennon toimintaan voi vaikuttaa jopa pieni määrä hiilidioksidia, jolloin kennossa toimivat vety ja happi on pakko puhdistaa.

Sulakarbonaattipolttokenno (Molten carbonate fuel cell, MCFC) ei tarvitse kalliita jalometallikatalyyttejä käyttölämpötilansa ansiosta, sillä se toimii 600–700 celsiusasteessa. Riittävän aktiivisia elektrodimateriaaleja ovat nikkeli ja nikkelioksidi. Etuna korkeassa käyttölämpötilassa on myös se, että jos reformointikatalyytti on läsnä, reformointi voidaan tehdä itse kennossa. Tällöin kennorakenne mutkistuu ja huoltokustannukset nousevat, mutta teho on parempi kuin ulkoisen reformoinnin tapauksessa. Polttoaineena voidaan käyttää vedyn ohella suoraan myös hiilimonoksidia. Hiilestä ja biokaasusta peräisin olevan, hiilidioksidia sisältävän, kaasutuskaasun kanssa MCFC pystyy toimimaan myös tehokkaasti. MCFC:n ongelmia ovat, että elektrolyytti on erittäin syövyttävää ja liikkuu, rikinsietokyky reformointikatalyytissä on heikko sekä kennon mekaaninen stabiilisuus heikenee korkean lämpötilan vuoksi ja elinikä laskee. MCFC:ta kannattaa käyttää jatkuvatoimisissa sovelluksissa koska se tarvitsee paljon aikaa saavuttaakseen toimintalämpötilan.

Kiinteäoksidipolttokennon (Solid oxide fuel cell, SOFC) toimintalämpötila on 900–1000 celsiusastetta ja siinä on elektrolyytinä kiinteä metallioksidi. Elektrolyytin keraaminen kiinteä rakenne helpottaa korroosio- ja käsittelyongelmia, joita esimerkiksi MCFC:llä on. Kennoissa tapahtuvat reaktiot ovat nopeita ja polttoaineena voidaan käyttää suoraan hiilimonoksidia. Myös tässä kennossa polttoaine voidaan reformoida kennossa sisäisesti korkean toimintalämpötilan takia ja jätelämpö hyödyntää kuten MCFC:ssä. Materiaalien valinta-, valmistus- ja lämpölaajenemisongelmat ovat kennon korkeasta lämpötilasta aiheutuvat haitat. Kennon toimintaa heikentää myös elektrolyytin korkea

ominaisvastus. Uusia elektrolyyttimateriaaleja kehitellään perinteisten zirkoniumiin perustuvien kiinteäoksidikemien lisäksi, kuten perinteisiä kenoja alhaisemmassa lämpötilassa toimivia cerium- gadolinium- elektrolyyttejä. Tällöin voitaisiin käyttää halvempia teräsrakenteita keraamirakenteiden sijaan, mutta haittana on kennoreaktioiden hidastuminen. Kehittämällä uusia materiaaleja ja ohuempia elektrolyyttejä, voidaan yrittää ratkaista ongelmaa.

Vasta kehitysasteella olevaa uutta polttokennotekniikkaa edustaa mikrobiologinen polttokenno. Siitä voi tulla tärkeä bioenergian tuotantomuoto, koska sähköä voidaan tuottaa sen avulla monista orgaanisista jätteistä ja biomassasta. Toiminta perustuu bakteerien avulla, orgaanisten ja epäorgaanisten aineiden hapettamiseen mikrobiologisessa polttokennossa. Bakteerit käyttävät omaan aineenvaihduntaansa elektroneja, joita se itse tuottaa, mutta elektronit voidaan saada ohjattua anodille hapettomissa oloissa. Sen jälkeen ne johdetaan katodille hapekkaassa ympäristössä. Sähkövirta syntyy elektronien liikkeessä anodilta katodille. Lopuksi syntyy vettä, kun elektronit, protonit ja happi yhdistyvät. Tällä hetkellä vielä liian alhainen energiatiheys on mikrobiologisten polttokennojen laajan hyötykäytön ongelma. Polttokenno, joka tuottaa elektroneja sedimentin orgaanisesta aineksestä, on tällä hetkellä ainoa kannattava käyttömuoto.

3.8.3 Polttokennot tulevaisuudessa

Polttokennoala tarjoaa hyvät liiketoimintamahdollisuudet suomalaiselle teollisuudelle ja erittäin laajan markkinapotentiaalin. Kiinnostus onkin lisääntynyt suomalaisessa teollisuudessa viime vuosina huomattavasti polttokennoteknologian hyödyntämiseen yrityksen omista tuotteista. Polttokennoalan toimialaryhmä, jonka on edistää polttokennoalan yritystoimintaa ja lisätä alan yhteistyötä, perustettiin vuonna 2006 Teknologiateollisuus ry:n toimesta. Polttokennohybridi, jossa korkealämpötilakemno yhdistetään esimerkiksi polttomoottoriin, kaasuturbiiniin tai toiseen polttokennoon, on tavoitteena kehittää tulevaisuudessa. Voitaisiin saavuttaa yli 70 % sähköhyötysuhde tällaisella voimalaitoksella. Matalassa paineessa toimivaan kaasuturbiiniin, kompressoriin, polttokammioon tai lämmönvaihtimeen yhdistetään tavanomainen sulakarbonaattipolttokenno tai kiinteäoksidipolttokenno, polttokennon ja turbiinin muodostamassa hybridivoimalassa. Laitoksen tasapainottaminen on kaasuturbiinin pääasiallinen tehtävä. Myös matalanlämpötilan kemnoa yhdistämällä se kiinteäoksidipolttokennoon, voidaan käyttää laitoksen tasapainottamiseen joissakin hajautetun sähköntuotannon sovelluksissa.

Tällä hetkellä polttokennojen kehitystyössä on keskitytty enimmäkseen 1-5 kW:n systeemien kehittämiseen. Mutta kuitenkin VTT:n koordinoimassa eurooppalaisessa tutkimusprojektissa on tarkoituksena kehittää suuremman kokoluokan, eli megawattiluokan, SOFC-laitoksia, joiden avulla voidaan suuremmassa mittakaavassa tuottaa sähköä ja lämpöä. Yhdistämällä saadaan suurempia laitoksia, jotka tulevat koostumaan 50 – 250 kW moduuleista. Sähkön ja lämmön tuotantoon soveltuva paineistamaton laitos sekä ainoastaan sähköä tuottava paineistettu laitos, josta voidaan muodostaa polttokennohybridi yhdistämällä siihen mikroturbiini, ovat projektissa kehitystyön kohteina (Sinkko, 2009).

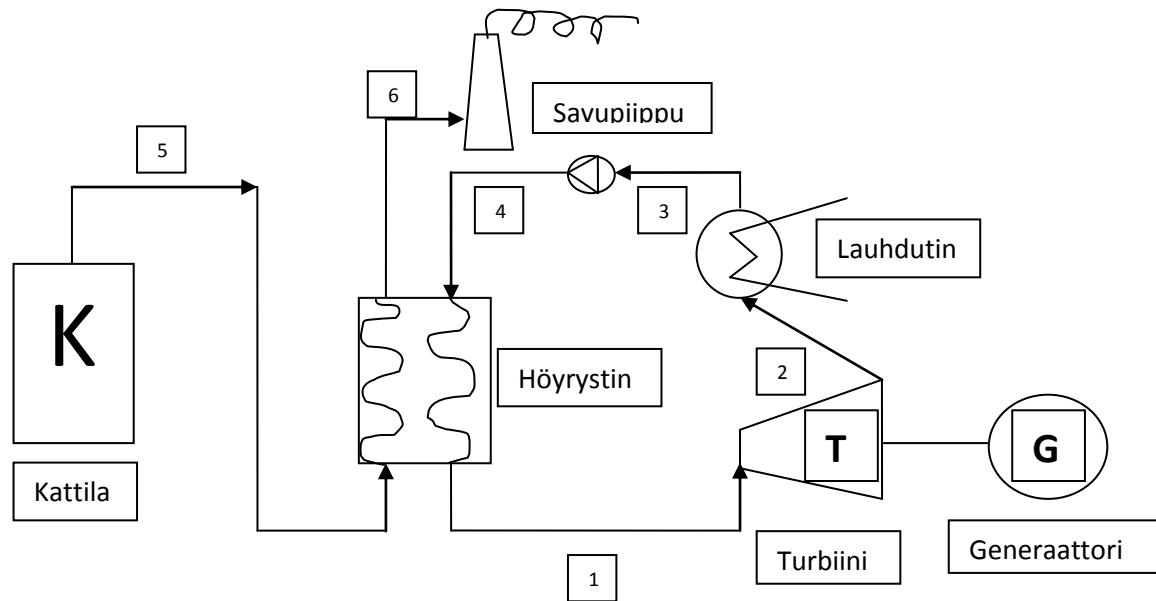
4. CHP-LAITOS ESIMERKIT

Työn laskentaesimerkeiksi valittiin tämän hetken mielenkiintoisimpia kehityskohteita. Lähtökohtaisesti lämpöenergia saadaan 2 MW hakekattilasta. Laskennoissa käytetyt yhtälöt ovat otettu Tekniikan taulukkokirjasta (Valtanen, 2009). Kyseiset esimerkit ovat:

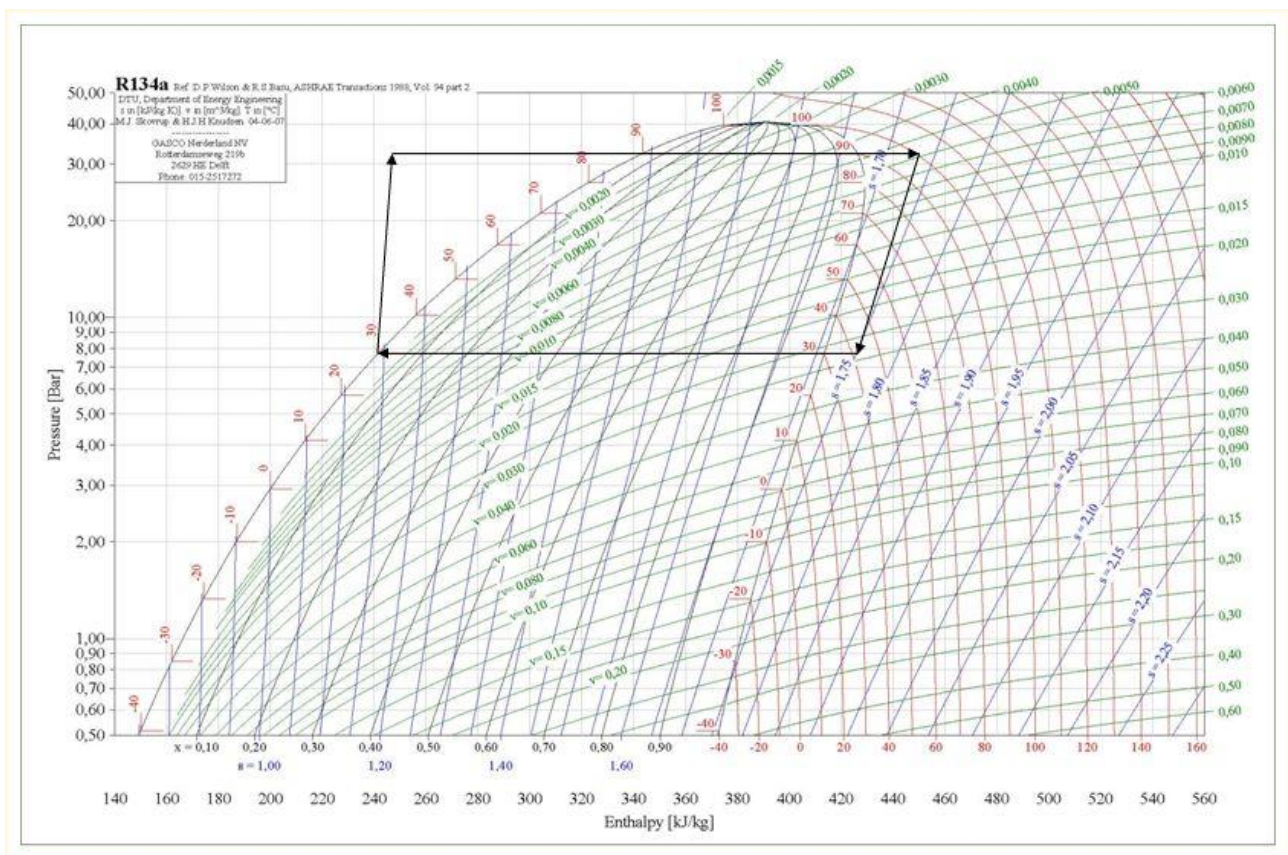
- ORC-prosessi
- Stirling-moottori
- Kuumailmaturbiini

4.1 Esimerkki 1

Ensimmäisessä ORC-prosessin esimerkkilaskelmassa laskettiin tietyn kiertoaineen prosessihyötysuhdetta. Laskemiseen valittiin kiertoaineeksi R134a (KUVIO 22) joka on myös tuttu kylmälaitetekniikasta. Oletuksena on, että prosessilla otetaan talteen hakekattilasta poistuvien savukaasujen noin 130-150 °C hukkalämpöä, jolla kiertoaine R134a höyrytetään ja tulistetaan lämpötilaan 100 °C ORC-prosessin höyrytimessä. Jäähdytykseen käytetään 15 °C vettä, jolla saadaan R134a nesteytymään lauhduttimessa 30 °C lämpötilassa. Laskelmissa ei ole otettu mukaan painehäviöitä putkistoissa ja lauhduttimessa. Lauhduttimessa ei tapahdu alijäähtymistä. Karkea prosessikaavio on esitetty kuviossa 21.



KUVIO 21. Periaatekuva ORC-laitteiston liittämistä hakelämpölaitokseen hyödyntämään savukaasujen hukkalämpöä.



Kuvio 22. ORC-prosessi logp-h-piirroksessa kiertoaaineelle R134a (Gasco 2009).

Piste 1 on höyrystimen ja turbiinin välissä. Kiertoaine on tulistunutta ja sen lämpötila on 100 °C ja paine on 32,5 bar (vastaa höyrystymislämpötilaa 90 °C). Entalpia luetaan pisteestä 1 kohtisuoraan alas entalpia-asteikolta, joka on tässä kohtaa 449 kJ/kg.

$$T_1 = 100 \text{ °C}, p_1 = 32,5 \text{ bar}$$

$$h_1 = 449 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Pisteen 2 eli turbiinin jälkeen, paine on 7,7 bar ja entalpia isentrooppisen eli häviöttömän paisumisen jälkeen on $h_{2s} = 420 \text{ kJ/kg}$. Tämä saadaan kulkemalla pisteestä 1 viistosti alaspäin vakioentropia viivojen mukaan aina paineeseen 7,7 bar saakka. Pisteen 2 todellinen entalpia h_2 lasketaan turbiinin isentrooppisen hyötysuhteen ($\eta_t = 0,80$) avulla.

$$p_2 = 7,7 \text{ bar}, h_{2s} = 420 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = h_1 - \eta_t \times (h_1 - h_{2s}) = 449 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 0,80 \times (449 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 420 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) = 426 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Paisunnan loppulämpötila pisteessä 2 on tulistuskäyrien mukaan luettuna noin 41 °C.

Pisteen 3 entalpia lauhduttimen jälkeen saadaan luettua suoraan asteikolta ja se on $h_3 = 241 \text{ kJ/kg}$. Pisteen 4 entalpia h_4 syöttöpumpun jälkeen lasketaan ottaen huomioon syöttöpumpun hyötysuhde (oletettu $\eta_p = 0,70$).

$$h_3 = 241 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_3 = 0,000842 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{ (ominaistilavuus)}$$

$$\Delta p = p_4 - p_3 = 32,5 \text{ bar} - 7,7 \text{ bar} = 3250 \text{ kPa} - 770 \text{ kPa} = 2480 \text{ kPa}$$

$$h_4 = h_3 + \frac{v_3 \times \Delta p}{\eta_p} = 241 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{0,000842 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times 2480 \text{ kPa}}{0,70} = 244 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Pisteessä 4 lämpötila nousee arvoon 32 °C.

Savukaasuista ORC-kiertoaineeseen R134a siirtyvä lämpöteho saadaan laskettua savukaasujen massavirran ja ominaislämmön sekä höyrystimessä tapahtuvan savukaasujen lämpötilan laskun avulla. Lämpötilat oletetaan tässä esimerkissä niin, että ennen höyrystintä savukaasujen lämpötila on 140 °C ja höyrystimen jälkeen 60 °C. Savukaasujen massavirta olkoon 1,0 kg/s ja ominaislämpö on 1,15 kJ/kgK. Savukaasujen massavirta 1,0 kg/s vastaa noin 1500–1600 kW kattilatehoa, joten kyseessä on nimellisteholtaan 2 MW hakekattilan talviaikainen käyttö.

$$m_5 = 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$C = 1,15 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\Delta T = 140^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C} = 80^\circ\text{C}$$

$$\phi_h = m_5 \times C \times \Delta T = 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,15 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (140^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}) = 92,0 \text{ kW}$$

Turbiinin tehoa laskettaessa pitää ensin selvittää ORC-kiertoaineen massavirta. Se saadaan höyrystimen tehon avulla.

$$m_1 = \frac{\phi_h}{(h_1 - h_4)} = \frac{92,0 \text{ kW}}{\left(449 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 244 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)} = 0,449 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Turbiinin tehoksi saadaan

$$P_t = m_1 \times (h_1 - h_2) = 0,449 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \left(449 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 426 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = 10,3 \text{ kW}$$

Jos generaattorin hyötysuhteeksi oletetaan 95 %, niin sähkötehoa saadaan

$$P_g = P_t \times \eta_g = 10,3 \text{ kW} \times 0,95 = 9,8 \text{ kW}$$

Sähköntuotannossa syntyisi energiaa vuositasolla (jos sähköntuotantoa 4000 h/a): $E = P_g \times t = 9,8 \text{ kW} \times 4000 \text{ h} = 39200 \text{ kWh} = 39,2 \text{ MWh}$. Tuotetun sähkön arvoksi tulee: $39,2 \text{ MWh} \times 120 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 4704 \text{ €}$, mikäli sähkön hintana käytetään arvoa 120 €/MWh.

Lauhduttimen tehoksi tulee

$$\phi_L = m_2 \times (h_2 - h_3) = 0,449 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \left(426 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 241 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 83,1 \text{ kW}$$

Lauhduttimen jäähdytysveden sisältämää lämpöenergiaa ei voida käyttää hyödyksi, koska sen lämpötilataso jää liian alhaiseksi.

Syöttöpumpun tehon tarpeeksi tulee

$$P_p = m_3 \times (h_4 - h_3) = 0,449 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \left(244 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 241 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 1,3 \text{ kW}$$

Prosessihyötysuhde lasketaan niin, että turbiinin akselitehosta vähennetään ensin syöttöpumpun teho sekä saatu tulos jaetaan höyrystimen teholla.

$$\eta_{pr} = \frac{P_t - P_p}{\phi_h} = \frac{m \times (h_1 - h_2) - m \times (h_4 - h_3)}{m \times (h_1 - h_4)} = \frac{\left(449 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 426 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) - \left(244 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 241 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{\left(449 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 244 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}$$

$$= 0,098 = 9,8 \%$$

Sähköntuotannon hyötysuhteeksi saadaan

$$\eta_g = \frac{P_g}{\phi_h} = 0,107 = 10,7 \%$$

Toisessa esimerkkilaskelmassa selvitettiin minkä suuruinen teho pitäisi hakekattilasta käyttää 100 kW sähkötehon tuottamiseen kuumaöljyyn perustuvalla ORC-laitteistolla, jos sen sähköntuotannon hyötysuhde olisi 17 %.

Jos sähköteho on 100 kW, niin sähköntuotannon hyötysuhteella 17 % olisi laitteiston höyrystimen tehon oltava $100 \text{ kW} / 0,17 = 588,2 \text{ kW}$. Jos generaattorin hyötysuhde olisi 95 %, niin turbiinin akselitehon olisi oltava $100 \text{ kW} / 0,95 = 105,2 \text{ kW}$, joten lauhduttimelle jäisi $588,2 - 105,2 = 483,0 \text{ kW}$. Tämä teho olisi käytettävissä kaukolämmön tuotantoon.

Kuumaöljypiirin ja savukaasujen välinen hyötysuhde olkoon 80 %. Näin savukaasuista on otettava lämpötehoa kuumaöljyn lämmittämiseen $588,2 \text{ kW} / 0,80 = 733,2 \text{ kW}$.

Polttoaineen palaessa sen lämpöenergiaa oletetaan saavan noin 85 % hyötykäyttöön, joten se otetaan huomioon vastaavalla tavalla laskuissa eli polttoainetehoa tarvitaan kattilassa $733,2 \text{ kW} / 0,85 = 865,0 \text{ kW}$. Kattilassa pitää siis polttaa 865 kW edestä haketta, jotta saataisiin 100 kW sähkötehoa. Tällä polttoaineteholla saadaan lauhduttimesta lisäksi 483,0 kW ulos lämpönä. Prosessin kokonaishyötysuhteeksi tulisi

$$\eta_{\text{kok}} = \frac{P_{\phi_g} + \phi_{\phi_1}}{\phi_{\phi_{pa}}} = \frac{100 \text{ kW} + 483,0 \text{ kW}}{865,0 \text{ kW}} = 0,673 = 67,3 \%$$

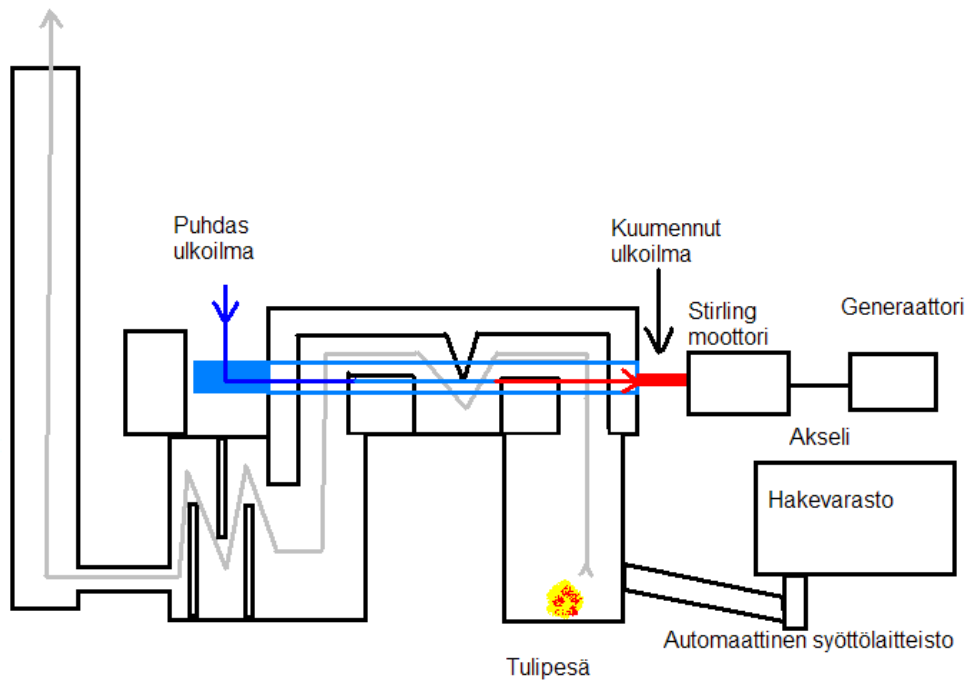
ja sähköntuotannon kokonaishyötysuhteeksi

$$\eta_{g\text{kok}} = \frac{P_{\phi_g}}{\phi_{\phi_{pa}}} = \frac{100 \text{ kW}}{865,0 \text{ kW}} = 0,115 = 11,5 \%$$

Sähköntuotanto savukaasuista ORC-prosessilla tuottaa reilun 10 % hyötysuhteella sähköä. Turbiinin tuottoon vaikuttava tekijä on kylmäaineen ominaisuus sitoa lämpöä ja näin siihen voidaan johdattaa kuumempia savukaasuja. Kiertoaineita on tarjolla monenlaisia ja jokaisella on oma lämmönkestävyytensä.

4.2 Esimerkki 2

Hakekattilasta savukaasut johdetaan ulkoilman lämmityskanaviin esimerkissä 2. Ulkoilmakanavien ympärillä savukaasut kulkevat omilla kanavissaan. Näin Stirling-moottorin läpi menee kuumennettu ulkoilma, joka lämpiää savukaasujen lämpöenergialla (KUVIO 23). (Vieras, 2009)

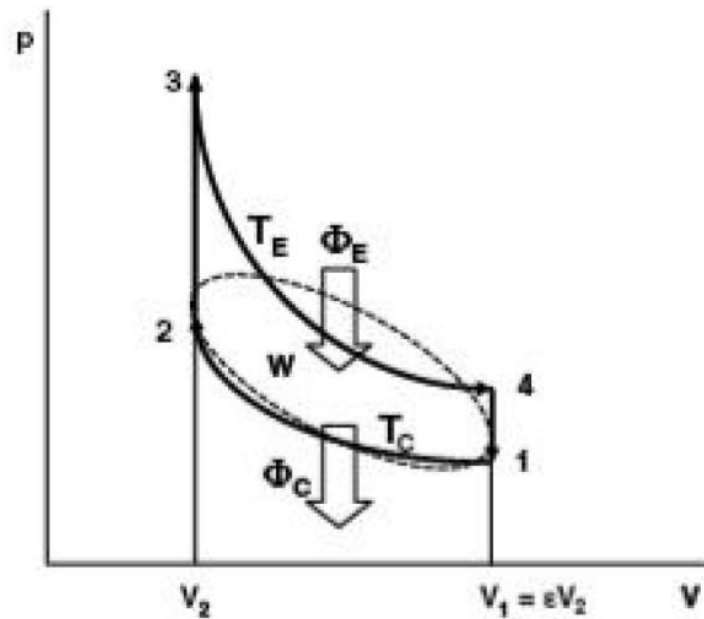


KUVIO 23. Stirling-moottori kytkettynä hakekattilaan (Vieras, 2009)

Stirlingprosessin (LIITE 2) laskentaesimerkkiin valittiin SOLO stirling 161-moottori ja prosessikaasuksi valittiin helium. Kylmämpää jäähtyy jäähdytysveden avulla 130 °C:een. Moottorin tekniset tiedot:

Kokonaistilavuus	160 cm ³
Prosessikaasun maksimipaine	150 bar
Prosessikaasun maksimilämpötila	740 °C
Puristussuhde oletetaan	2

Ensin lasketaan prosessikaasun massa. Massa lasketaan jonkun prosessivaiheen paineen, moolimassan ja tilavuuden tulolla jaettuna yleisen kaasuvakion ja lämpötilan tulolla. Laskettu massa on laskettu prosessin pisteessä 3 (KUVIO 24).



KUVIO 24. Stirling-prosessin p,V –piirros (Niskanen, Jarva, 2011).

$$p_3 = 150 \text{ bar} = 15 \text{ MPa}$$

$$M = 4,0026 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$V_3 = V_2 = 160 \text{ cm}^3 \times 0,5 = 80 \text{ cm}^3 = 80 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$R_u = 8,314472 \frac{\text{J}}{\text{mol} \times \text{K}}$$

$$T_3 = 740 \text{ }^\circ\text{C} = 1013 \text{ K}$$

$$m = \frac{p_3 \times M \times V_3}{R_u \times T_3} = \frac{15 \times 10^6 \text{ Pa} \times 4,0026 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times 80 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{8,314472 \frac{\text{J}}{\text{mol} \times \text{K}} \times 1013 \text{ K}} = 5,70 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Seuraavaksi lasketaan tuntemattomana olevat paineet p_4 , p_2 , p_1

$$V_4 = V_1 = 160 \text{ cm}^3 = 160 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$c_p = 5,193 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$$

Paine pisteessä 4 saadaan isotermisellä tilayhtälöllä.

$$p_4 = p_3 \times \frac{V_3}{V_4} = 15 \times 10^6 \text{Pa} \times \frac{80 \times 10^{-6} \text{m}^3}{160 \times 10^{-6} \text{m}^3} = 7,5 \times 10^6 \text{Pa} = 75 \text{ bar}$$

Paine pisteessä 2 saadaan isokoorisella tilayhtälöllä.

$$p_2 = p_3 \times \frac{T_2}{T_3} = 15 \times 10^6 \text{Pa} \times \frac{403 \text{ K}}{1013 \text{ K}} = 5,96 \times 10^6 \text{Pa} = 59,6 \text{ bar}$$

Paine pisteessä 1 saadaan isotermisellä tilayhtälöllä.

$$p_1 = p_2 \times \frac{V_2}{V_1} = 5,96 \times 10^6 \text{Pa} \times \frac{80 \times 10^{-6} \text{m}^3}{160 \times 10^{-6} \text{m}^3} = 2,98 \times 10^6 \text{Pa} = 29,8 \text{ bar}$$

Stirling-moottoriin käytetty energia saadaan isobaarisella tilayhtälöllä.

$$Q_{23} = m \times c_p \times (T_3 - T_2) = 5,70 \times 10^{-4} \text{kg} \times 5,193 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{K}} \times (1013 \text{K} - 403 \text{K}) = 1806 \text{ J}$$

Moottorin tarvitsema työ saadaan isotermisellä kaasun tekemän työn tilayhtälöllä.

$$W_{12} = p_1 \times V_1 \times \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = 2,98 \times 10^6 \text{Pa} \times 160 \times 10^{-6} \text{m}^3 \times \ln\left(\frac{160 \times 10^{-6} \text{m}^3}{80 \times 10^{-6} \text{m}^3}\right) = 330,9 \text{ J}$$

Moottorin antama työ tulee pisteistä 3 ja 4 vastaavalla tavalla. Vastaus on negatiivinen joka tarkoittaa että työ saadaan hyödyksi.

$$W_{23} = p_3 \times V_3 \times \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right) = 15 \times 10^6 \text{Pa} \times 80 \times 10^{-6} \text{m}^3 \times \ln\left(\frac{80 \times 10^{-6} \text{m}^3}{160 \times 10^{-6} \text{m}^3}\right) = -831,78 \text{ J}$$

Nettotyö saadaan W_{23} itseisarvon ja W_{12} erotuksesta.

$$W_{\text{netto}} = |W_{23}| - W_{12} = 831,78 \text{ J} - 330,9 \text{ J} = 500,87 \text{ J}$$

Prosessin mekaaninen hyötysuhde tulee W_{netto} ja Q_{23} jakolaskusta.

$$\eta_{\text{mek}} = \frac{W_{\text{netto}}}{Q_{23}} = \frac{500,87 \text{ J}}{1806 \text{ J}} = 0,277$$

Stirling-moottorista saadaan helium-työkaasulla noin 30 % hyötysuhteella mekaanista tehoa. Suuressa kokoluokassa (mm. höyryturbiini) hyötysuhteet ovat luokkaa 30–40 %. Kehitystä voitaisiin tehdä muun muassa stirling-moottorin lämmönvaihdin kruunun lämmönsiirto pinta-alaa suurentamalla jotta lämpöenergiaa siirtyisi enemmän työkaasuun ja hyötysuhde paranisi.

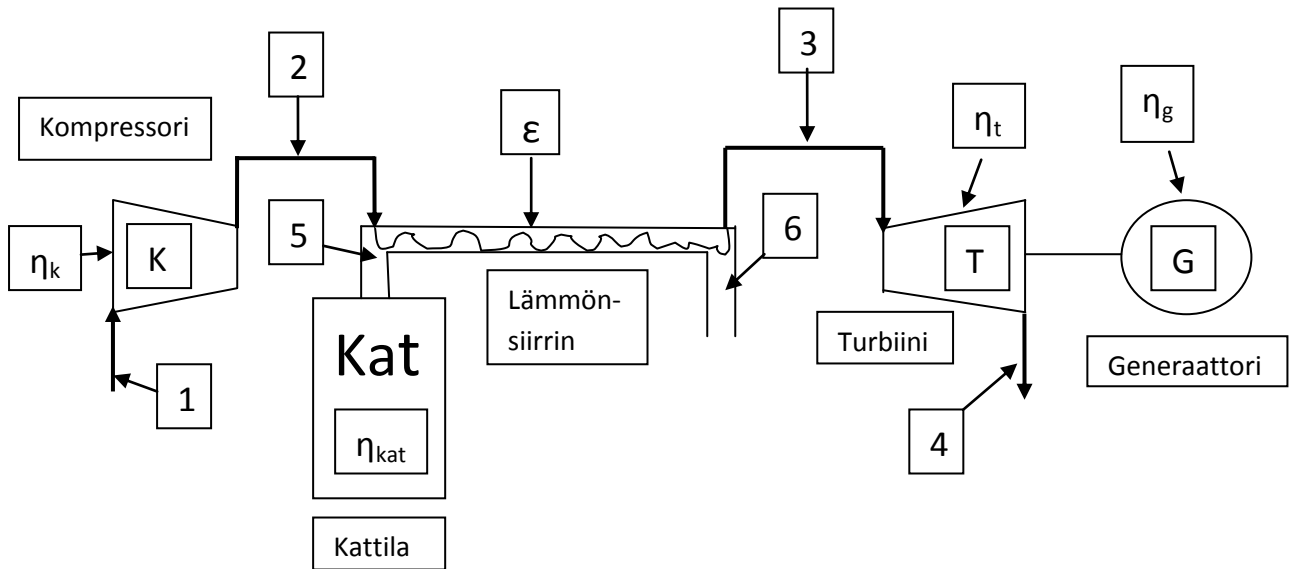
Stirling-moottorin investointi on vielä suhteellisen kallista (TAULUKKO 4). Sen hinta tulee varmasti laskemaan kun sitä kehitetään ja sitä valmistetaan monelle eri kokoluokalle. Käyttö- ja kunnossapito on kuitenkin kustannuksiltaan vähäistä koska moottorin huoltovälit ovat pitkiä.

TAULUKKO 4. Stirling – moottorin kustannustaso (Virkkula, 2010)

Investointikustannukset (€/kW)	1350-3400
Käyttö ja kunnossapito (€/MWh)	7-23
Tuotanto kustannukset 8000 h/v (€/MWh)	35-62
Tuotanto kustannukset 4000 h/v (€/MWh)	55-130

4.3 Esimerkki 3

Esimerkissä 3 on esitetty sähkön tuottaminen kuumailmaturbiinilla. Käytännössä kuumailmaturbiinille tarvittava energia otetaan hakekattilan savukaasuista lämmönsiirtimellä. Lämmönsiirtimessä savukaasut kuumentavat kompressorilta tulevaa paineistettua ilmaa mahdollisimman korkeaan lämpötilaan. Karkea prosessikaavio on esitetty kuviossa 25.

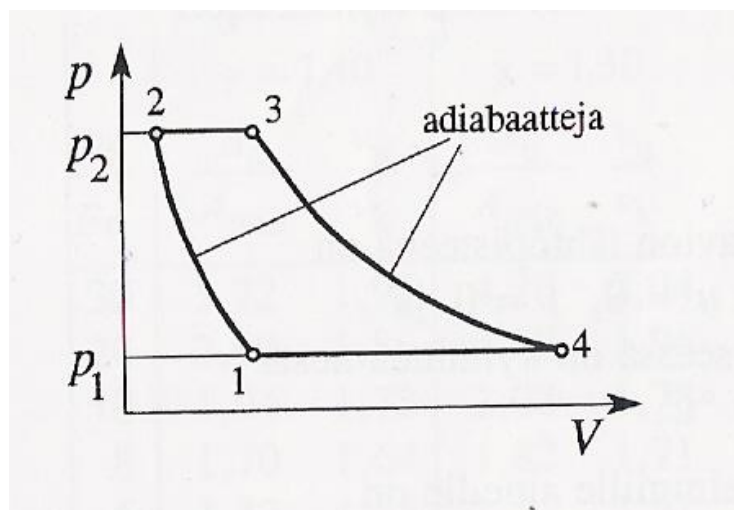


KUVIO 25. Periaatekuva kuumailmaturbiinin kytkennästä hakekattilan yhteyteen.

Prosessin (KUVIO 26) pisteessä 1 normaali-ilmanpaineessa oleva $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ilma imetään turbiiniin.

$$p_1 = 1,013 \text{ bar}$$

$$T_1 = 0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273 \text{ K}$$



KUVIO 26. Joule-prosessin p,V -piirros (Tekniikan kaavaasto, 2005).

Paineeksi p_2 on tässä valittu 13 bar, jolloin saadaan laskettua pisteen 2 isentrooppisen puristuksen jälkeinen lämpötila T_{2s} . Adiapaattivakio savukaasuille on $k = 1,392$.

$$p_2 = 13 \text{ bar}$$

$$T_{2s} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \times T_1 = \left(\frac{13 \text{ bar}}{1,013 \text{ bar}}\right)^{\frac{1,392-1}{1,392}} \times 273 \text{ K} = 560,1 \text{ K} = 287,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tämän jälkeen voidaan laskea todellisen lämpötila kompressorin jälkeen kun kompressorin hyötysuhde on $\eta_k = 0,80$.

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_k} = 273 \text{ K} + \frac{560 \text{ K} - 273 \text{ K}}{0,80} = 631,8 \text{ K} = 359,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Savukaasujen lämpötilaksi ennen lämmönsiirrintä oletetaan $T_{sk1} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Lämmönsiirtimen toimintaa kuvaava parametri $\theta = T_{sk1} - T_2$.

$$T_{sk1} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta = T_{sk1} - T_2 = 1100^\circ\text{C} - 359,8^\circ\text{C} = 740,2^\circ\text{C}$$

Lämpötila T_3 eli turbiinille menevän kuuman ilman lämpötila riippuu lämmönsiirtimen koosta ja hyvyydestä. Oletetaan lämmönsiirtimen lämpötilahyötysuhteeksi $\varepsilon = 0,75$ ja oletetaan edelleen, että kuumennettavan ilman lämpökapasiteettivirta on pienempi kuin savukaasujen vastaava, jolloin saadaan

$$\varepsilon = 0,75$$

$$T_3 = T_2 + \varepsilon \times \theta = 359,8 \text{ }^\circ\text{C} + 0,75 \times 740,2^\circ\text{C} = 913,9 \text{ }^\circ\text{C} = 1187,9 \text{ K}$$

Turbiinin jälkeisen pisteen 4 isentrooppisen paisumisen lämpötila saadaan laskettua kun tiedetään, että $p_4 = p_1$ sekä $p_3 = p_2$. Adiapaattivakio ilmalle on $k = 1,340$.

$$T_{4s} = \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} + T_3 = \left(\frac{1,013 \text{ bar}}{13 \text{ bar}}\right)^{\frac{1,340-1}{1,340}} + 1186,9 \text{ K} = 621,1 \text{ K} = 348,1^\circ\text{C}$$

Turbiinin hyötysuhteella $\eta_t = 0,80$ saadaan laskettua todellinen lämpötila pisteessä 4.

$$T_4 = T_3 - \eta_t \times (T_3 - T_{4s}) = 913,9^\circ\text{C} - 0,80 \times (913,9^\circ\text{C} - 348,1^\circ\text{C}) = 461,2^\circ\text{C} = 734,2 \text{ K}$$

Tarvittava ilman massavirta m_i saadaan laskettua, kun oletetaan generaattoritehoksi $P_g = 100 \text{ kW}$ ja hyötysuhde on $\eta_g = 0,96$. Ilman ominaislämmöt $C_{12} = 1,014 \text{ kJ/kgK}$ ja $C_{34} = 1,126 \text{ kJ/kgK}$.

$$\begin{aligned} m_i &= \frac{P_g}{\eta_g \times [C_{34} \times (T_3 - T_4) - C_{12} \times (T_2 - T_1)]} \\ &= \frac{100 \text{ kW}}{0,96 \times \left[1,126 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}} \times (1186,9 \text{ K} - 734,2 \text{ K}) - 1,014 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}} \times (631,8 \text{ K} - 273 \text{ K}) \right]} \\ &= 0,714 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Turbiinin teho saadaan nyt laskettua ilman massavirran avulla.

$$P_t = m_i \times C_{34} \times (T_3 - T_4) = 0,714 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,126 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}} \times (1186,9 \text{ K} - 734,2 \text{ K}) = 364,1 \text{ kW}$$

Kompressorin teho lasketaan vastaavalla tavalla.

$$P_k = m_i \times C_{12} \times (T_2 - T_1) = 0,714 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1,014 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}} \times (631,8 \text{ K} - 273 \text{ K}) = 260 \text{ kW}$$

Jotta voidaan laskea savukaasujen lämpötila T_{sk2} lämmönsiirtimen jälkeen, täytyy ensin laskea lämmönsiirtimen toimintaan liittyvä lisäparametri R. Parametri R määritellään ilman ja savukaasujen lämpökapasiteettivirtojen avulla siten, että niistä pienempi jaetaan isommalla. Edellä jo oletettiin, että ilman lämpökapasiteettivirta on pienempi. Savukaasujen massavirraksi oletetaan $m_{sk} = 1,2 \text{ kg/s}$, vastaten noin 1600–1700 kW polttoainetehoa.

$$R = \frac{m_i \times C_i}{m_{sk} \times C_{sk}} = \frac{0,713 \frac{kg}{s} \times 1,114 \frac{kJ}{kg \times K}}{1,2 \frac{kg}{s} \times 1,171 \frac{kJ}{kg \times K}} = 0,565$$

$$T_{sk2} = T_{sk1} - \varepsilon \times R \times \theta = 1100^\circ\text{C} - 0,75 \times 0,565 \times 740,2^\circ\text{C} = 786,3^\circ\text{C}$$

Lämmönsiirtimen teho saadaan savukaasujen tiedoilla.

$$\phi_{LS} = m_{sk} \times C_{sk} \times (T_{sk1} - T_{sk2}) = 1,2 \frac{kg}{s} \times 1,171 \frac{kJ}{kg \times K} \times (1100^\circ\text{C} - 786,3^\circ\text{C}) = 440,8 \text{ kW}$$

Jäähdytetään savukaasut lopuksi lämpötilaan 140°C ja käytetään vapautunut lämpö kaukolämmön tuotantoon.

$$\begin{aligned} \phi_{KL1} &= m_{sk} \times C_{sk} \times (T_{sk2} - T_{jääh}) = 1,2 \frac{kg}{s} \times 1,171 \frac{kJ}{kg \times K} \times (786,3^\circ\text{C} - 140^\circ\text{C}) \\ &= 908,1 \text{ kW} \end{aligned}$$

Myös turbiinista ulos tuleva ilma käytetään hyödyksi kaukolämpöön. Ilma jäähdytetään niin ikään lämpötilaan 140°C .

$$\phi_{KL2} = m_i \times C_i \times (T_4 - T_{jääh}) = 0,713 \frac{kg}{s} \times 1,114 \frac{kJ}{kg \times K} \times (461,2^\circ\text{C} - 140^\circ\text{C}) = 225,1 \text{ kW}$$

Saatu kokonaiskaukolämpöteho on

$$\phi_{KL} = \phi_{KL1} + \phi_{KL2} = 908,1 \text{ kW} + 225,1 \text{ kW} = 1163 \text{ kW}$$

Kattilateho saadaan savukaasuista otetusta kokonaistehosta

$$\phi_{Kattila} = \phi_{KL1} + \phi_{LS} = 908,1 \text{ kW} + 440,8 \text{ kW} = 1348,98 \text{ kW}$$

Kattilan hyötösuhde olkoon 83 %, joten tarvittavaksi polttoainetehoksi tulee

$$\phi_{pa} = \frac{\phi_{Kattila}}{\eta_{kattila}} = \frac{1348,98 \text{ kW}}{0,83} = 1625,3 \text{ kW}$$

Lopuksi lasketaan prosessi-, sähköntuotanto- ja kokonaishyötysuhteet.

$$\eta_{pr} = \frac{P_g}{\phi_{LS}} = \frac{100 \text{ kW}}{440,8 \text{ kW}} = 0,226$$

$$\eta_g = \frac{P_g}{\phi_{pa}} = \frac{100 \text{ kW}}{1625,3 \text{ kW}} = 0,062$$

$$\eta_{kok} = \frac{P_g + \phi_{KL}}{\phi_{pa}} = \frac{100 \text{ kW} + 1163 \text{ kW}}{1625,3 \text{ kW}} = 0,777$$

Kuumailmaturbiinin sähköntuotanto menee varmasti kokonaisuudessaan lämpölaitoksen omaan käyttöön muun muassa kaukolämmön syöttövesipumppujen pyörittämiseen. Näin lämpöenergia joka otetaan savukaasuista, saadaan omaan hyötykäyttöön.

Taulukossa 5 kerrotaan mikroturbiinin investointi, käyttö ja kunnossapito sekä tuotantokustannuksista. Kuumailmaturbiini on lähes identtinen paitsi siinä ei ole polttokammiota.

TAULUKKO 5. Mikroturbiinin kustannustaso (Virkkula, 2010)

Investointikustannukset (€/kW)	880–1700
Käyttö ja kunnossapito (€/MWh)	3.5–11
Tuotanto kustannukset 8000 h/v (€/MWh)	35–47
Tuotanto kustannukset 4000 h/v (€/MWh)	47–74

4.4 Muut vaihtoehdot

Höyryturbiini ja -moottori on investointina suhteellisen halpaa (TAULUKKO 6) koska sitä tekniikkaa on paljon käytössä maailmalla suuremmissa mittakaavassa. Kuitenkin sen sähköntuotannon hyötysuhde ei pärjää muulle pienuokan tekniikalle.

TAULUKKO 6. Höyrymoottorin/turbiinin kustannustaso (Virkkula, 2010)

Investointikustannukset (€/kW)	300-1000
Käyttö ja kunnossapito (€/MWh)	< 2,7
Tuotanto kustannukset 8000 h/v (€/MWh)	17 - 44
Tuotanto kustannukset 4000 h/v (€/MWh)	27 - 80

Kaasutus on tekemässä uutta nousua energiantuotantoon sillä se ei ole kallis investointi (TAULUKKO 7). Kaasutuslaitteistoa on myös asennettu jonkun verran autoihin. Käyttökustannukset ovat minimaaliset eikä tuotantoonkaan tarvitse paljoa rahaa käyttää vuositasolla.

TAULUKKO 7. Kaasutuslaitteiston kustannustaso (Virkkula, 2010)

	Kombilaitos	CHP
Investointikustannukset (€/kW)	550–1200	550–900
Käyttö ja kunnossapito (€/MWh)	2–7	2–7
Tuotanto kustannukset 8000 h/v (€/MWh)	25–37	27–30
Tuotanto kustannukset 4000 h/v (€/MWh)	37–57	27–44

4.6 Valmistajia

Laitteisto valmistajia löytyy pienen kokoluokan CHP-laitoksille ihan hyvin (TAULUKKO 8). Työn esimerkkiratkaisuihin löytyy paljon valmistajia muun muassa ORC-prosessiin. Huomattavaa on miten pienen kokoluokan CHP-laitteiston valmistus on keskittynyt Eurooppaan. Myöskin kaasutus-tekniikalle löytyy paljon valmistajia ja erityisesti meiltä Suomesta. Kaasutustekniikkaan on yleisimmin tarjolla polttomoottori sähköntuotantoon.

TAULUKKO 8. Laitteistovalmistajia 10-1000 kW_e kokoluokassa. (Haavisto, 2010)

Pien-CHP	Polttoaineet	Tekniikka	Valmistusmaa
Gasek Oy	Puu, hake, pelletti, biojätteet	Kaasutus → Polttomoottori	Suomi
Talbotts Biomass Energy	Hake, biomassa	Mikroturbiini	Englanti
Stirling.dk	Hake, biomassa, biokaasu	Stirling	Tanska
Tri-O-Gen	Hake, yms, (lämpö)	ORC	Hollanti
Fortel Components Oy	Hake, biomassa	Kaasutus → Polttomoottori	Suomi
Energiprojekt AB	Hake, biomassa	Höyrymoottori	Ruotsi
Ekogen Oy	Hake, pelletti, turve	Mikroturbiini	Suomi
Ormat	Hake, yms, (lämpö)	ORC	USA
Alfagy Ltd	Hake, biomassa	Kaasutus → Polttomoottori	Englanti
Schmitt Enertec	Hake, sahausjäte, kaasut	Kaasutus → Polttomoottori	Saksa
Polytechnik Group	Hake, yms, (lämpö)	Höyryturbiini / ORC	Itävalta
Maxxtec AG	Hake, yms, (lämpö)	ORC	Saksa
Entimos Oy	Biomassa, hake yms.	Kaasutus → Polttomoottori	Suomi
Turboden	Hake, yms, (lämpö)	ORC	Italia
Kohlbach Group	Hake, yms, (lämpö)	ORC	Itävalta
GET	Hake, yms, (lämpö)	ORC	Saksa
Savonia Power Oy	Hake, sahausjäte, turve	Höyryturbiini	Suomi

5. YHTEENVETO

Työn lähtökohdat olivat erittäin mielenkiintoiset. Tietoa piti hakea sieltä täältä, mutta kirjallisuutta ei ollut joka kertoisi tämän hetken kehityksestä pien-CHP-tekniikoissa. Vaihtoehdot olivat osin vanhoja keksintöjä, mutta ne on kannattanut ottaa kehityksen kohteeksi muun muassa kaasutuksen ja savukaasujen puhdistuslaitteiston kehityksen ansiosta.

Seuraavassa taulukossa 9 on yhteenveto sähkön ja lämmönyhteistuotantoon sopivan teknologian ominaisuuksista.

TAULUKKO 9. Teknologian kannattavuuksia (Konttinen, 2011)

Tekniikka	Poltto­moottorit	Mikroturbiini	Stirlingmoottori	Poltto­kennot	Höyrykone ja -turbiini	ORC-prosessi
Tyypillinen koko	1 kW _e -1000 kW _e	25 kW _e -250 kW _e	10 kW _e -150 kW _e	1 kW _e -50 MWe	Höyrykoneilla >100 kW _e , -turbiineilla >500 kW _e	150 kW _e -1 MWe
Sähköhyötysuhde	25-40 %	25-30 %	8-22 %	38-55 %	6-30 %	10-20 %
Lämpöhyötysuhde	45-50 %	50-60 %	50-60 %	30-45 %	40-70 %	60-70 %
Tyypillinen käyttöikä	15 vuotta	15 vuotta	15 vuotta	1-15 vuotta	15 vuotta	>20 vuotta
Kehitysaste	Laajasti käytössä	Varhais- kaupallisessa vaiheessa	Pilot-vaiheessa	Kehitys- vaiheessa	Laajasti käytössä	Varhais- kaupallisessa vaiheessa
Tärkein tekninen vahvuus pien-CHP-käytössä	Korkea sähköhyötysuhde	Pieni huoltotarve	Pieni huoltotarve	Korkea sähköhyöty- suhde	Tekniikan todistettu toimivuus	Hyvä sähkö- hyötysuhde myös osakuormalla
Suurin tekninen heikkous pien-CHP-käytössä	Verrattain suuri huollon tarve	Polttoaineen oltava kaasumainen tai nestemäinen	Rajallinen sähköhyötysuhde	Lyhyt kestoikä	Sähköhyötysuhde osakuormalla	Rajallinen sähköhyötysuhde

Todennäköisesti näitä vaihtoehtoja olisi jo paljonkin käytössä Suomessa, mutta sähkön takuuhinta ei ole sitä tasoa kuin se on muutamissa Keski-Euroopan maissa. Jotta kaupallisesti teknologia olisi kiinnostava, tarvittaisiin jonkinlainen tuotantotuki nykyisillä sähköhinnoilla.

Hajautettu energiantuotanto on kuitenkin vääjäämättä tulevaisuutta kun kehitys on edellä mainituilla tekniikoilla noussut sille tasolle että investointi kiinnostava ja tuotannollisesti kannattavaa. Se että pyrkiikö omavaraisuuteen eli käyttää sähkön ja lämmön omaan tarkoitukseen eikä käytä valtakunnanverkkoa muuten kuin tarvittaessa vai myykö kaiken tuottamansa, ei ole merkitystä. Sähkön hinta tulee heilumaan tulevaisuudessakin ja jos kaiken käyttämänsä sähkön haluaa ostaa valtakunnanverkosta, voi sähkölle olla aivan eri hinta tulevaisuudessa.

Tulevaisuudessa on todennäköisesti tarjolla kompakteja pien- energiantuotantoyksiköjä omakotitalosta maatilakokoon. Onko sitten kaikilla varaa sellaiseen, se jää nähtäväksi sillä tällaisen yksikön hinta pysyy varmasti uuden henkilöauton hinnoissa.

Kaasutus tulee olemaan varmasti merkittävä polttoaineen jalostus muoto. Kaasutuksen liittyen on löydetty hyviä kaasun puhdistusmenetelmiä jotka ovat vieläpä yksinkertaisia. Tämän saavutuksen ansiosta jo sodan aikana käytetty kaasutustekniikka tekee uutta nousua.

Kaasutus kaasu sopii epä- tai suoraan polttamalla niin moneen sähköntuotanto menetelmään että se tekee siitä niin monikäyttöisen ja järkevän investoinnin jalostukseen.

Pieniin lämpölaitoksiin ja – keskuksiin kannattaisi vakavasti harkita sähköntuotannon mahdollisuutta, vaikkakin se sähköntuotantoon käytetty energia otetaan siitä energiasta mikä nyt käytetään kaukolämpöön. Sähköntuotannolla laitoksen kokonaishyötysuhde kasvaa eli polttoaineesta saatua energiaa menee vähemmän hukkaan.

LÄHTEET

Aaltonen, Ukkonen 2008. Kandidaatintyö. Pienet alle 4 MW yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto mahdollisuudet. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/39675/Pienet%20chp%20laitokset.pdf?sequence=1>

Gasgo 2009. Www-dokumentti. Luettu 12.10.2011

Saatavissa: [www.gasco.nl/documents/logp-h/Log\(p\)-h%20diagram%20R134a.pdf](http://www.gasco.nl/documents/logp-h/Log(p)-h%20diagram%20R134a.pdf)

Granö 2010. Www-dokumentti. Hajautettu energiantuotanto. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: <http://www.scribd.com/doc/49586467/Hajautettu-energiantuotanto-2010-FI-Ulf-Peter-Grano>

Haavisto 2010. Www-dokumentti. Puupolttoaineisiin perustuvat pien-CHP tekniikat. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: http://www.pkamk.fi/biostuli/materiaalit/Pien-CHP-katsaus_raportti_v11.pdf

Heinimö, Malinen 2002. Www-dokumentti. Sähköntuotanto mekaanisessa metsäteollisuudessa. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: www.mamk.fi/showattachment.asp?ID=2917&DocID=2533

Hintikka 2004. Opinnäytetyö. Biomassapohjaiset mikro-CHP-tekniikat. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20523/mikro-chp-raportti_nro8.pdf?sequence=3

Konttinen 2011. Www-dokumentti. Pien CHP:stä voimaa vientiin ja maakuntaan (?).

Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: www.kesto.fi/GetItem.asp?item=file;5392

Koponen 2010. Www-dokumentti. Uusiutuvan energian järjestelmien ja materiaalien yritystarve kartoitus. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16610/Koponen_Taija.pdf?sequence=1

Lamminmäki 2009. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto biomassasta maatilayrityksessä.

Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/20528/AL_CHP.pdf?sequence=3

Motiva 2006. Www-dokumentti. Sähkön pientuotannon liittäminen verkkoon.

Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/232/Sahkon_pientuotannon_liittaminen_verkkoon.pdf

Niskanen, Jarva 2011. Opinnäytetyö. Stirling-moottori puukaasukäytössä. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa:

https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/33120/niskanen_mauri.pdf?sequence=1

Paavola 2008. Diplomityö. Biopolttoaineilla toimiva Stirling-voimalaitos. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/42807/nbnfi-fe200811052050.pdf?sequence=4>

Penttinen 2010. Www-dokumentti. Biomassan kestävä käyttöön uusia liiketoimintamahdollisuuksia Keski-Suomessa. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: http://www.bioclus.eu/en/images/files/Central_Finland/BIOCLUS_WP2_1%20Benet%201112010.pdf

Purhonen 2010. Kandinaatintyö. ORC-prosessin käyttö sähköntuotannossa. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/66734/nbnfi-fe201101071019.pdf?sequence=3>

Reinonen, Honkatukia, Esa, Pitkänen, Lattu, Larjola 2000. Www-dokumentti. ORC-voimalan soveltuvuus hyödyntämään dieselveoimalan hukkalämpöä. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31012/TMP.objres.366.pdf?sequence=1>

Sinkko 2009. Diplomityö. Pienen mittakaavan CHP-laitokset osana hiilineutraalia maaseutuyhteiskuntaa. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/44579/nbnfi-fe200903061225.pdf?sequence=3>

Suomen tullit 2008. Www-dokumentti. Sähköntuotannon tuet ja energiaintensiivisten yritysten veronpalautus. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: http://www.tulli.fi/fi/suomen_tulli/julkaisut_ja_esitteet/asiakasohjeet/valmisteverotus/tiedostot/004.pdf

Tammertekniikka 2005. Tekniikan kaavasto.

Työ- ja elinkeinoministeriö 2010. Www-dokumentti. Hallitukselta esitys uusiutuvan energian syöttötariffeista. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: http://www.tem.fi/index.phtml?101881_m=100414&s=4265

Työ- ja elinkeinoministeriö 2010. Www-dokumentti. Valtioneuvoston asetus uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: http://www.tem.fi/files/28527/syottotariffi_VNA_luonnos.pdf

Valtanen 2009. Tekniikan taulukkokirja

Vieras 2009. Tutkintotyö. Sähkövirtaus korpikuusen kyynelistä. Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: <http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/9331/Vieras.Iikka.pdf?sequence=2>

Virkkula 2010. Www-dokumentti. Tunturikeskuksen bioenergian käyttö Luettu 12.10.2011.

Saatavissa: http://www.lapinbiotie.fi/static/content_files/Loppuraportti_Tunturikeskuksen_Bioenergian_Kaytto.pdf