



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU
KAJAANIN YLIOPISTOKESKUS

Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteis- tuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto

Small scale cogeneration – equipments and implementation

Timo Karjalainen

Cemis-Oulu

2012

Motiva



Summary

Introduction

According to IEA (the International Energy Agency) global electricity consumption might be even double over the coming 20 years. At the same time, the fossil resources used for energy production are limited.

New ways should be found to produce electricity from renewable energy sources. Small scale distributed CHP production adds general power production capacity and increases the reliability of the electricity distribution.

Another concern is emissions because the share of fossils in energy production is still very high. We have to be innovative when decreasing emissions, for example through the development of solutions that allow us to use much more renewable natural resources. Some states are running down nuclear power and that's why new modern innovative ways to produce electricity must be implemented.

Big power plants must react in future very quickly according to the demand. This is a challenge for power production systems nowadays. Distributed energy production is moderating this problem. This is particularly important since the world is using more and more renewable energy resource as wind and solar energy. Such energy sources typically have strongly variable electricity generation capacities, and when the wind drops something has to replace the lost capacity fast.

Fast-reacting combustion engine plants are solution that will allow the use of renewable energy resources, while reducing emissions and enabling energy resources to be utilized more efficiency.

For local energy safety distributed power production is very important. Breaks in electricity delivery in the common grid may last several hours, which may cause the serious problem to those, who needs electricity without interruption. Consumers of this kind are for example farms, which have to feed and water animals and because the need for washing water high. Also in mechanical wood processing and district heating companies have possibilities to co-operate and make successful business together. In this paper, the small scale CHP production is presented from the point of view of utilization of forest biomass.

In Kainuu, we have a lot of forest biomass for energy. In 2010, the share of wood energy in total energy consumption was 27 %. Wood energy was used in district heating plants and different size heating plants. It is also typical for the region that detached houses, farms and other buildings use wood biomass in heating. Although the share of wood energy is so high, it is possible to double the use of forest energy or produce high quality fuels for the future.

The objective of this best practice is to promote the small scale combined heat and power production by clearing up the most advanced and practical ways to produce electricity in the small scale by utilizing forest biomass. Small scale CHP supports the aims of Kainuu bioenergy program by adding the distributed power production.

Results

In this paper, the manufactures of small scale CHP plants based on the utilization of forest biomass has been cleared up. The manufactures are being presented in following table.

Concerning the utilization of forest biomass the most advanced processes are:

- Gasification
- Stirling -process
- Organic Rankine Cycle –process (ORC)

The manufactures of small scale CHP devices and processes

Company	Fuels	Process
Gasek Oy (FIN)	Wood, chips, pellet, bio wastes	Gasification → Engine
Talbotts Biomass Energy (GBR)	Wood chips, biomass	Microturbine
Stirling.dk (DAN)	Wood chips, biomass, biogas	Stirling
Tri-O-Gen (NRL)	Wood chips, e.g. (heat)	ORC
Volter Oy (FIN)	Wood chips, biomass	Gasification → engine
Energiprojekt AB (SWE)	Wood chips, biomass	Steam engine
Ekogen Oy (FIN)	Wood chips, pellet, peat	Microturbine
Ormat (USA)	Wood chips, e.g. (heat)	ORC
Alfagy Ltd (GBR)	Wood chips, biomass	Gasification → engine
Schmitt Enertec (GER)	Wood chips, wood wastes, gases	Gasification → engine
Polytechnik Group (AUT)	Wood chips, e.g. (heat)	Steam turbine/ ORC
Maxxtec AG (GER)	Wood chips, e.g. (heat)	ORC
Entimos Oy (FIN)	Biomass, wood chips e.g.	Gasification → engine
Turboden (ITA)	Wood chips e.g. (heat)	ORC
Kohlbach Group (AUT)	Wood chips e.g. (heat)	ORC
GET (GER)	Wood chips e.g. (heat)	ORC
Spanner	Wood chips	Gasification
Burkhardt (GER)	Wood chips	Gasification

The short description of the main processes:

- Gasification
 - Gasification is a thermal conversion technology where a solid fuel (in this framework forest biomass) is converted into a combustible gas in temperature of 850 ...1000 C. The gas can be used as fuel in the combustion engine when generating electricity.
- Stirling
 - The Stirling cycle uses an external heat source, which could be anything from gasoline to solar energy to the heat produced forest biomass. This external heat source drives the stirling engine. The Stirling engine operates by using the cyclic compression and expansion of gas (air or helium) at different temperature levels so that the variety of pressure in cylinders can be converted to mechanical work.
- ORC - process
 - The ORC process (Organic Rankine Process) is a thermodynamic process. Utilizing the liquid-vapor phase change of organic circulating medium, lower temperature sources such as biomass combustion, industrial waste heat, geothermal or solar energy can be generated to mechanical energy. Mechanical energy is able to be converted to electricity.

It is important that the quality of wood fuel used in small scale CHP plant is suitable (particle size, humidity). The quality of fuel is case-specific and depends on the technology used in the CHP plant. The quality of fuel has an impact on the operating costs especially in fully automatically CHP plants.

The requirement for profitable small scale CHP -production is that there is a need for the heat and electricity throughout the year. The most important thing is that there is a need for generated heat or it can be sold to customers nearby. The electricity, which cannot be used itself, can be sold to the common grid. The feed tariff system is used widely in Europe, which makes it economically possible to produce power in small-scale.

The best cases for small-scale combined heat and power production are industrial processes, which have a year-round demand for heat and electricity. In many cases, the partnership between industry and the local district heating company has proved fruitful where the extra heat is able to be feed to the district heating network. The possibility of partnership concerning small scale heat and power is highly dependent on the local possibilities and need.

Good possibilities for small scale cogeneration are in mechanical wood industry companies, which have high heat demand for drying of wood and on the other hand the wood processing machines need a lot of electricity.

There are good scopes for action concerning cogeneration in farms and green gardens which operates also in winter time in Finland. The consumption of energy in Finnish farms is annually approximately 12 000 GWh. This is consisted machine fuel (33 %) heating fuel (27 %) fuel for grain drying (18 %) and electricity (22 %). A great deal of this energy can be produced by the farms itself.

Also ecovillages can produce the electricity and heat as Kempele Ecovillage in Finland does. Kempele Ecovillage comprises 10 detached houses with its own CHP-plant using Volter technology. The village has completely been detached from the national grid and it produces energy in a sustainable way from renewable energy sources.

About of the small scale CHP -potential in Kainuu region

The number of farms is 321 farms in Kainuu region. In 33 farms the number of dairy cows is more than 50 and we can estimate that in these farms the consumption of energy is so high that it is economically sensible to invest in CHP -production. The trend is that farms are in future bigger and they will be more or less energy-self-sufficient farms.

There are four large around the year operative green gardens in Kainuu. These gardens need a lot heat and electricity and they are so interested in CHP production. There is still a problem concerning the produced heat energy in summertime.

There are also six district heating plants which don't produce electricity in the Kainuu region. The efficiency of these units would be between 0.5 MW_e – 1 MW_e.

In addition to this we have in the region some big energy consumers, which have a possibility to invest in CHP production.

Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotanto tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto

Small scale cogeneration – equipment's and implementation

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Tuotantoprosessit.....	1
3	Puun kaasutuksen kehitystyö	9
4	Eri teknologioiden ominaisuuksia.....	10
5	Markkinoilla olevia pien CHP -laitteita	10
6	Käytännön esimerkit Suomessa.....	13
7	CHP -kohteen arviointi.....	15
8	Hajautetun sähköntuotannon mahdollisuudet ja potentiaali	16
9	Johtopäätökset	20

1 Johdanto

Sähkön tuotanto nykyistä vallalla olevaa teknologiaa pienemmässä mittakaavassa on alkanut kiinnostaa yhä enenevästi sähkön hinnan nousun myötä. Tähän trendiin on vaikuttanut myös sähkön tukimuotojen (investointituet, syöttötariffi) käyttömahdollisuus. Myös uusiutuvan energian käytön edistämiseen tähtäävät kansainväliset ja kansalliset sopimukset tavoitteineen ovat vaikuttaneet myönteisesti yleiseen mielipiteeseen hajautetun sähköntuotannon edistämiseksi. Teollisuudessa, tutkimuslaitoksissa on entistä ponnekkaammin alettu kehittää erilaisia teknologioita pienimuotoiseen sähköntuotantoon. Laitteet kehittyvät nopeasti eri tahoilla ja esiin on noussut tarve tehdä selvitys tämänhetkisestä teknologian tilanteesta.

Tässä katsauksessa kartoitetaan pienimuotoisen lämmön ja sähköntuotannon (pien CHP) nykytilannetta ja markkinoilla olevia laitteita. Lisäksi selvitetään mahdollisia käyttökohteita ja potentiaalia Suomessa ja lähemmin Case -alueella, Kainuussa.

Pienimuotoiselle lämmön ja sähkön yhteistuotannolle on useita eri määritelmiä, jotka pohjautuvat usein voimalan nimellis- tai maksimitehoon /1/. Usein käytetään myös liittymäverkon mukaista rajausta. Pientuotannosta voidaan käyttää myös nimitystä hajautettu sähkön tuotanto. Nimityksen taustalla on pienvoimaloiden sijainti käyttökohteiden läheisyydessä. Yleisesti pienimuotoisen sähköntuotannon ylärajana voitaneen käyttää 2 MVA. Motivan julkaiseman oppaan mukaan /1/ mikrotuotannon (mCHP) ylärajana on eräässä standardissa käytetty 11 kVA.

Tässä selvityksessä käydään lyhyesti läpi eri teknologioita keskittyen prosesseihin, joissa voidaan hyödyntää biomassoja, eteenkin metsien biomassoja, pienimuotoisessa sähkön ja lämmön tuotannossa. Tältä osin selvitys perustuu tehtyihin tutkimuksiin ja selvityksiin. Esiin on nostettu myös muutamia käytännön esimerkkejä pienimuotoisesta lämmön ja sähkön tuotannosta.

2 Tuotantoprosessit

Pienimuotoinen sähkön ja lämmön yhteistuotanto voi perustua moniin erilaisiin teknologioihin ja polttoaineratkaisuihin. Vaihtoehtoina ovat mm. kaasu- ja dieselmoottorit, mikroturbiinit, höyryturbiinit ja -koneet sekä Stirling -moottorit.

Kaasu- ja dieselmoottorivoimalat

Kaasu- ja dieselmoottorivoimalat koostuvat mäntämoottorista ja siihen liitetystä generaattorista. Vaihteluväli on pienimmistä alle 200 kW:n moottoreista aina 10 MW:n moottoreihin saakka. Kaasumoottorit ovat käytetyimpiä jatkuvatoimisessa yhteistuotannossa, ja dieselmoottoreita käytetään lähinnä varavoimasovelluksissa /1/.

Höyryturbiinit ja -koneet

Höyryturbiineissa paineistettu höyry kulkee turbiinin läpi siipien läpi, jotka pyörittävät generaattoria. Kattilan ja höyrykoneen yhdistelmään perustuvassa CHP -voimalassa polttoaineesta vapautuvalla lämpöenergialla tuotetaan höyrykattilassa höyryä, joka johdetaan sähkögeneraattoria pyörittävään höyrykoneeseen. Höyrykoneessa korkeapaineista höyryä käytetään liikuttamaan sylinterissä mäntää, joka voidaan kampiakselin avulla yhdistää generaattoriin tuottamaan sähköä. Höyrykone on höyryturbiinia taloudellisempi vaihtoehto alle 1 MW_e laitoksissa, koska höyryturbiinien hyötysuhde on alhainen eteenkin osakuormilla. Yli MW_e laitoksissa höyrykoneen asemasta käytetään höyryturbiinia /1/.

Höyryturbiinien hyötysuhde on pienessä kokoluokassa huono. Eräissä tutkimuksissa /2/ on maininta, että höyryturbiinille hyvin pienessä 30 kW:n kokoluokassa sähköntuotannon hyötysuhde höyrykoneella on vain 6-8 %. Turbiinin hyötysuhde uusimmissa suurissa voimaloissa voi olla jopa yli 40 prosenttia, mutta pienemmissä jäädään normaalisti 15 - 35 prosenttiin /3/.

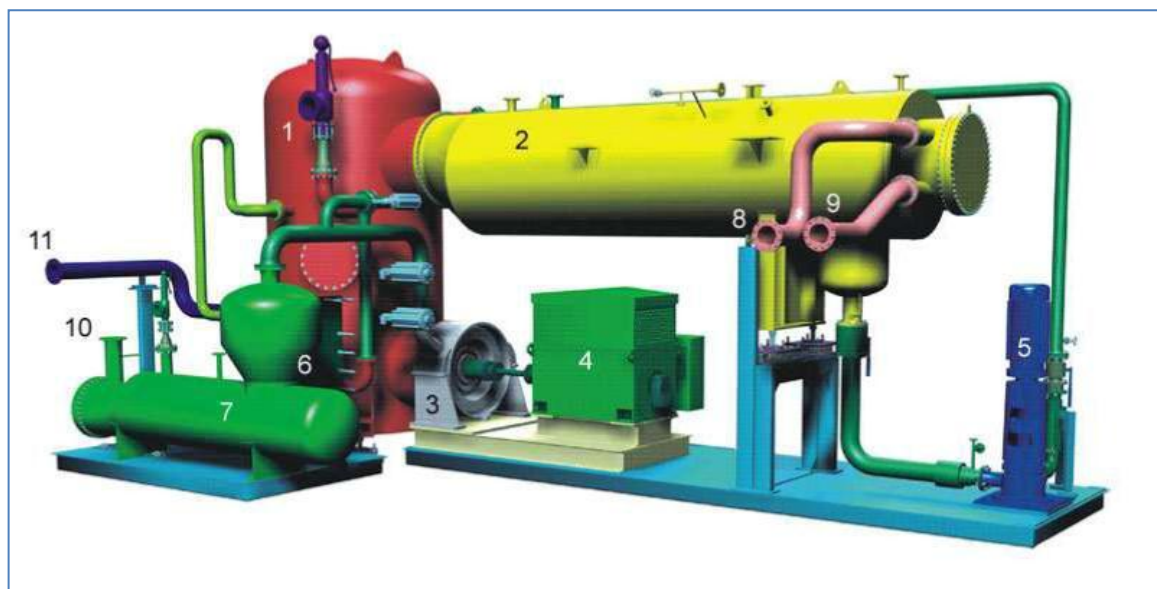
Koska höyryturbiineissa ja -koneissa höyryntuotanto tapahtuu erillisessä kattilassa, soveltuu polttoaineeksi mikä tahansa kiinteä, nestemäinen tai kaasumainen fossiilinen tai biopolttoaine. Näin ollen metsäenergia soveltuu mainiosti höyryturbiinien ja -koneiden energialähteeksi.

ORC (Organic Rankine Cycle)

ORC -prosessissa kuuman kaasun lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi samantyyppisessä höyryturbiinissa kuin höyryprosessissakin. ORC -prosessissa kiertoaineena veden sijasta on sopiva orgaaninen neste. Kiertoaineena voidaan käyttää esimerkiksi öljyä, kuten Toholammin tapauksessa (ks. sivu 13). Koska orgaanisen nesteen suhteellinen latenttilämpö on paljon pienempi kuin vedellä, voidaan yhden painetasen ORC -prosessilla saavuttaa vähintään sama hyötysuhde kuin vesihöyryprosessilla.

Orgaanisen lämmönsiirtoaineen ansiosta ORC- prosessi toimii alhaisemmassa lämpötilassa kuin höyryyn perustuvat prosessit, ja soveltuu siten paremmin käytettäväksi pienessä kokoluokassa. ORC -prosessin sähkön tuotannon hyötysuhde on tyypillisesti noin 15 - 20 prosenttia (lämpöä 60 - 70 prosenttia), ja se on siten höyryprosesseja tehokkaampi pienessä mittakaavassa /4/. ORC -prosessin vahvuuksia ovat tekniikan yksinkertaisuus, mahdollisuus kattavaan automatisointiin sekä vähäinen ylläpidon tarve. Lisäksi sähköhyötysuhde heikkenee höyryprosesseja loivemmin osakuormalla ajettaessa, ja prosessi voi hyödyntää myös matalampia lämpötiloja.

ORC-tekniikkaa pidetään taloudellisesti erityisen lupaavana tekniikkana biomassapohjaiseen CHP -tuotantoon kokoluokassa 200 - 1500 kW_e. Sopivia käyttökohteita tässä kokoluokassa ovat mm. erilaiset teolliset kohteet (esimerkiksi elintarviketeollisuus) sekä kaukolämpö.



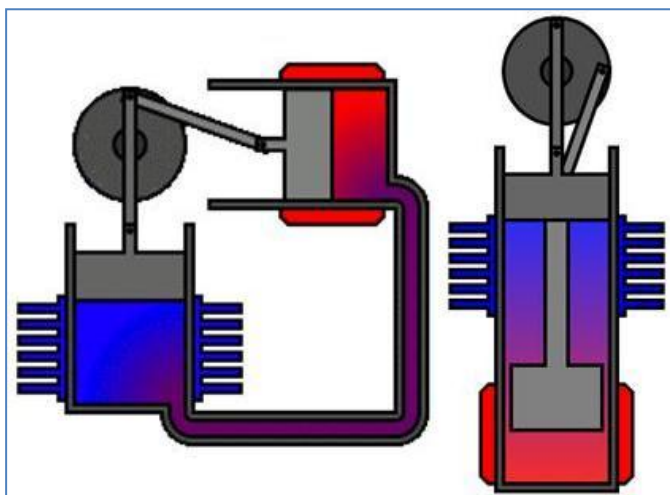
Kuva 1. Lientzin 1000 kW_e:n ORC-laitteisto /5, 10/. (Regeneraattori, 2) Lauhdutin, 3) Turbiini, 4) Generaattori, 5) Kiertopumppu, 6) Palamisilman esilämmitin, 7) Höyrystin, 8) Kuuman veden lähtö, 9) Kuuman veden paluu, 10) Lämmönsiirtoöljyn tulo, 11) Lämmönsiirtoöljyn lähtö

Stirling -moottorit

Stirling -moottori on lämpömoottori, joka toimii ilman tai muiden kaasujen syklisen puristuksen ja laajenemisen avulla eri lämpötiloissa siten, että lämpöenergia muunnetaan mekaaniseksi työksi. Stirling -moottori on tunnettu korkeasta hyötysuhteesta verrattuna höyrykoneisiin. Sillä on myös hiljainen käyntiäänä ja se on helppokäyttöinen, koska se voi käyttää lähes mitä tahansa polttoainetta lämmönlähteenä. Myös sen yhteensopivuus vaihtoehtoisten ja uusiutuvien energialähteiden kanssa vähentää merkittävästi riippuvuutta fossiilisista polttoaineista sekä CO₂-päästöjä /6/. Stirling -moottorissa lämpö, jota syntyy palamisessa, siirtyy työkaasuun korkeassa lämpötilassa (yleensä 700–750 °C) ja ylimääräistä lämpöä, jota ei ole muunnettu työksi siirtyy osaksi jäähdytysvettä 40–85 °C.

Stirling -moottori saa voimansa lämpötilaerosta kylmän ja kuuman pään välillä. Stirling -syklit jaetaan alfa-, beta- ja gamma-tyyppeihin riippuen sylintereiden ja lämmönvaihtimien geometrisestä sijoittelusta. Stirling -moottorin tehoa voidaan kasvattaa paineistamalla työaineena toimiva kaasu (esimerkiksi ilma, vety tai helium). Lisäksi hyötysuhdetta voidaan kasvattaa regeneraattorilla, joka absorboi itseensä osan kylmään päähän virtaavan kuuman kaasun lämpöenergiasta, ja luovuttaa sen takaisin kylmälle kaasulle kaasun virratessa jälleen kuumaan päähän. Stirling -moottorille tulevan jäähdytysveden lämpötilalla on myös ratkaiseva merkitys saavutettavan sähkötehon kannalta.

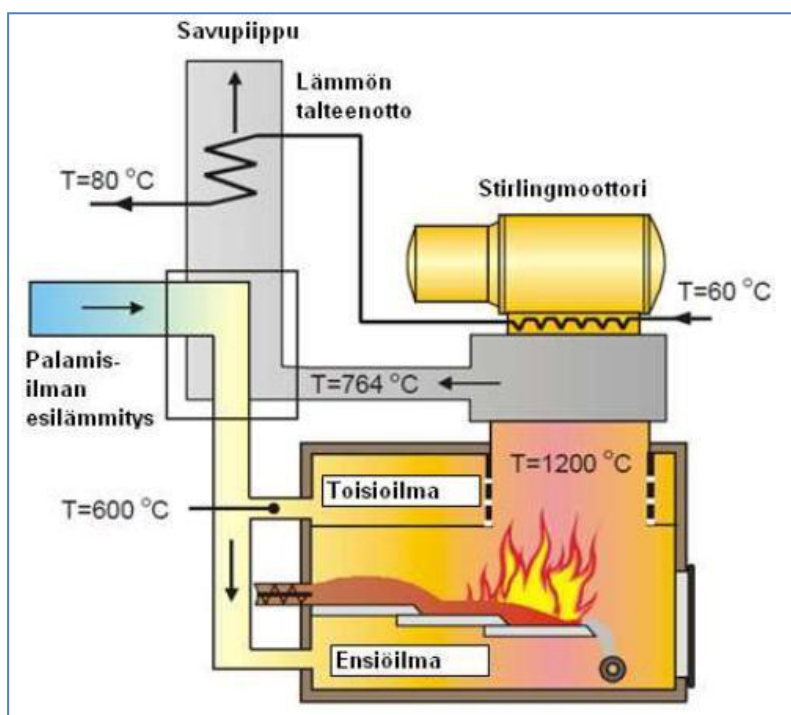
Stirling -moottoreita on lähinnä talokohtaisissa sovelluksissa. Kokoluokka on pieni, 2 – 20 kW. Stirling -moottori eroaa diesel-moottorista siinä, että sen sylinteri on suljettu ja palaminen tapahtuu sylintereiden ulkopuolella. Polttoaineina voidaan käyttää laajasti erilaisia polttoaineita /1/.



Kuva 2. Kuvassa vasemmalla alfa- ja oikealla beta tyyppin stirling -moottorin periaate /6/.

Taulukko 1. Stirling -moottorin tyypillisiä ominaisuuksia /3/.

Sähköhyötysuhde (%)	15 - 35
Lämpöhyötysuhde (%)	50 - 60
Kokonaishyötysuhde (%)	75 - 85
Lämmöntuotto, °C	60 – 80
Huoltoväli (h)	4 000 – 6 000
Elinikä (h)	50 000 – 60 000
Kierrosnopeus (rpm)	1500 - 1800



Kuva 3. Stirling -perusteisen CHP -laitteiston periaatepiirros /7/.

Mikroturbiinit

Mikroturbiinit ovat 25 - 250 kW:n kaasuturbiineja, joissa polttoaine palaa polttokammiossa, josta kaasu johdetaan suoraan kaasuturbiiniin. Syöttöilma paineistetaan kompressorissa ennen polttokammioon syöttämistä. Mikroturbiineissa on yleensä yksi akseli, johon generaattori, kompressor ja turbiini on laakeroitu. Pyörimisnopeudet ovat suuria, mistä johtuen generaattoreiden vaihtovirta on korkeataajuisia. Mikroturbiinilaitoksen tuottama vaihtovirta on muutettava verkkotaajuiseksi taajuusmuuttajalla /1/.

Osa poistuvan pakokaasun lämpöenergiasta voidaan varastoida rekuperaattoriin, josta energia vapautuu seuraavassa vaiheessa sisään tulevan kaasun esilämmittämiseen sähkön tuotannon hyötysuhdetta parantaen. Turbiinista purkautuvan pakokaasun lämpötila on tyypillisesti 450 - 550 °C, joten sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi höyryn tuottamiseen.

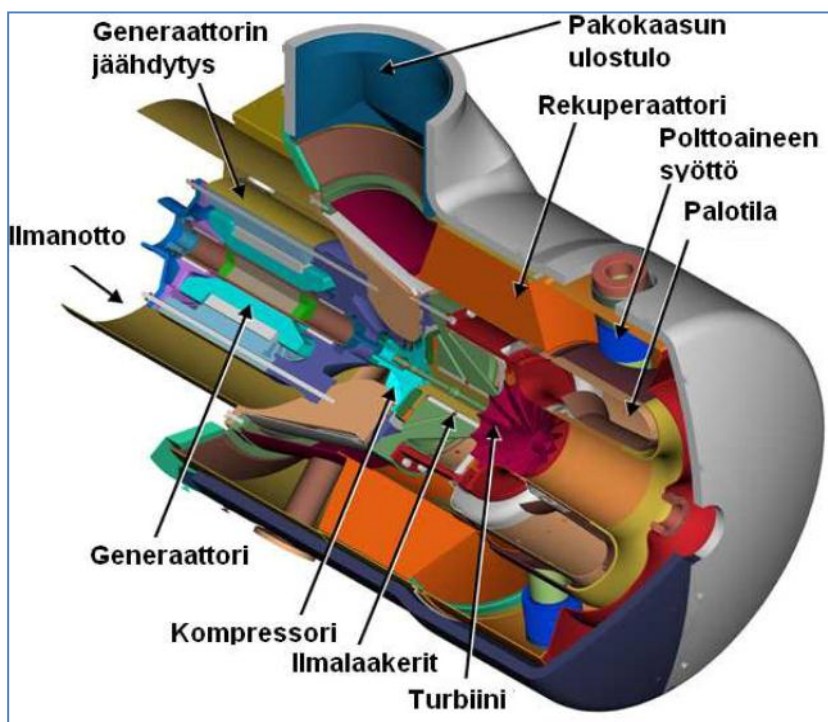
Kaasuturbiinien sähköhyötysuhde riippuu voimakkaasti turbiinin tehosta ja kuormituksesta. Alle yhden megawatin mikroturbiinien sähköhyötysuhde jää ilman rekuperaattoria yleensä 25 prosentin alapuolelle, mutta yli kolmen megawatin kaasuturbiinin sähköhyötysuhde voi ylittää 30 prosenttia. CHP -käytössä kokonaishyötysuhde on tavallisesti 75 - 85 prosenttia.

Mikroturbiinivoimaloissa voidaan käyttää hyvin laajasti eri polttoaineita kaasumaisista ja nestemäisistä polttoaineista erilaisiin biomassoihin. Tällä hetkellä yleisin polttoaine on maakaasu, mutta myös biokaasun käyttö on yleistymässä. Kaasuturbiinit soveltuvat parhaiten kohteisiin, joissa tarvitaan korkeaa lämpötilaa tai höyryä. Hotellit, kylpylät ja etenkin ympärivuotista viljelyä harjoittavat kasvihuoneet, joissa on suuri sähkön ja lämpöenergian tarve, voivat olla sopivia käyttökohteita pienen CHP:n näkökulmasta. Pakokaasun kuuman lämpötilan johdosta teollisuuskohteet kuten panimot ja elintarviketeollisuus ovat myös mikroturbiinille hyvin sopivia. Muita soveltuvia kohteita ovat sähköä tarvitsevat kohteet, jotka toimivat kaukolämpöverkon yhteydessä, jolloin ylijäämälämpö voidaan syöttää kaukolämpöverkkoon.

Taulukko 2. Mikroturbiinien tyypillisiä teknisiä ominaisuuksia /3/.

Yksikköteho (kW)	25 - 250
Sähköhyötysuhde (%)	15 - 35
Lämpöhyötysuhde (%)	50 - 60
Kokonaishyötysuhde (%)	75 - 85
Lämmöntuotto (°C)	85 – 100, höyry
Peruskorjausväli (h)	20 000 – 30 000
Elinikä (h)	50 000 – 75 000

*) Turbiinista lähtevän kaasun lämpötila 450 – 600 °C



Kuva 4. Capstonen 30 kW:n mikroturbiinin rakenne.

Polttomoottorit

Polttomoottoreita on käytetty pitkään sähköntuotannossa, ja niitä on saatavilla muutaman kilowatin aggregaateista aina megawattiluokan moottoreihin. Moottorivoimalaitoksille on tyypillistä korkea hyötysuhde, laaja tehoalue sekä suhteellisen monipuolinen polttoainevalikoima. Muita etuja ovat lyhyt rakennusaika sekä modulaarinen rakenne. Toisaalta polttomoottorit ovat usein meluisia, ja vaativat moniin muihin tekniikoihin verrattuna paljon huoltoa /3/.

Pienet, alle 200 kW_e:n moottorit perustuvat usein autojen dieselmoottoreihin. Kaikkein pienimpiä moottoreita lukuun ottamatta lähes kaikki alle 1 MW_e:n moottorit ovat tehon kasvattamiseksi turboahdettuja. Kaasu- ja dieselmoottorien sähköhyötysuhde on koosta riippuen tyypillisesti 30 - 45 prosenttia ja kokonaishyötysuhde 75 - 90 prosenttia.

Taulukko 3. Kaasu- ja dieselmoottoreiden tyypillisiä ominaisuuksia eri moottoritehoilla /3/.

	< 200 kW	200 – 2000 kW	2 – 10 MW
Sähköhyötysuhde (%)	30 - 38	35 - 40	40 - 45
Lämpöhyötysuhde (%)	45 - 50	45 - 50	45 - 50
Kokonaishyötysuhde (%)	73 - 85	80 - 90	85 - 90
Lämmöntuotto (°C)	85 - 100	85 - 100 (höyry)	85 - 100 (höyry)
Peruskorjausväli (h)	15 000 – 20 000	20 000 - 30 000	30 000-40 000
Käytettävyys (%)	96	94	96
Kierrosnopeus (1/min)	1 000 – 3 000	1 000 – 1 800	600 – 1 000

*) Pakokaasujen lämpötila dieselmoottoreissa 300 - 400 °C, kaasumoottoreissa 400 - 500 °C

**) Peruskorjauksessa vaihdetaan männät, sylinterit yms.; huoltoväli (öljynvaihto) on n. 2000 - 5000 h.

Tehon lisäksi polttomoottorit voidaan lajitella polttoaineen perusteella kaasu-, diesel- ja kaksoispolttoainemoottoreihin. Suuremmat CHP -käytössä olevat polttomoottorit ovat yleensä kaasukäyttöisiä mäntämoottoreita. Useat käytössä olevista polttomoottoreista on mahdollista muuntaa käyttämään myös biopolttoainetta tai puukaasua. Dieselmoottoreita käytetään varavoiman tuottajina, ja kaksoispolttoainemoottorit ovat teknisesti hyvin lähellä perinteisiä dieselmoottoreita. Kaksoispolttoainemoottoreissa dieselpolttoaineen sekaan suihkutetaan kaasua yleensä imuilman mukana /3/.



Kuva 5. GE Jenbacherin 350 kW_e:n 8-sylinterinen kaasumoottori. (<http://www.ge-energy.com>)

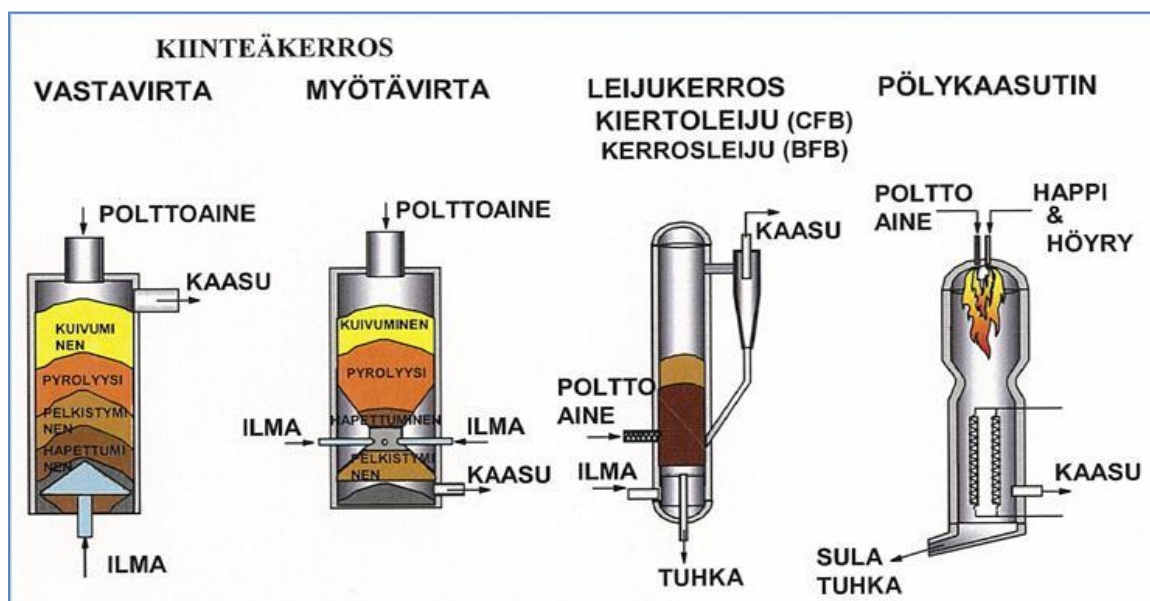
Kaasumoottorit soveltuvat parhaiten kohteisiin, joissa sähkön ja lämmön tarve on melko tasainen, ja joissa vaaditaan hyvää sähköntuotannon hyötysuhdetta. Sopivia kohteita ovat täten hotellit, kylpylät, sairaalat, koulurakennukset, kasvihuoneet, konepajat, sahat sekä kaukolämpökohteet.

Polttokennot

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, jonka avulla polttoaineen ja hapettimen kemiallinen energia voidaan muuntaa suoraan sähköksi ja lämmöksi ilman palamista. Polttokennossa toiselle elektrodille syötetään polttoainetta, ja toiselle elektrodille hapetinta (happi tai ilma). Polttokennoiniin pohjautuva pienimuotoinen sähkön ja lämmön tuotanto on vielä varhaisessa kehitysvaiheessa, joten tähän teknologiaan ei tässä yhteydessä paneuduta.

Kaasutusprosessi

Voidaan todeta, että kaasutus ja syntyneen kaasun poltto moottorissa on yksi parhaista teknologioista tehdä sähköä pienessä kokoluokassa. Tällöin puhutaan kokoluokasta 10 kW_e aina 1000 kW_e:n sähkötehoon saakka. Energialähteenä voivat tällöin olla metsähake, mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteet tai mahdollisesti muut biomassat. Kuvassa 6 on esitetty eri kaasutusprosesseja.



Kuva 6. Puun kaasutusteknologiat /8/.

Puunkaasutuksessa valtaosa tekniikoista perustuu myötävirtakaasutukseen. Myötävirtakaasutuksessa polttoaine ja hapetuskaasut menevät samaan suuntaan. Myötävirtakaasutuksessa kaasua johdetaan pyrolysoituvan puun joukkoon, jolloin puusta vapautuvat haihtuvat aineet osittain hapettuvat. Näin syntyneet reaktiotuotteet pakotetaan vielä kulkemaan reaktorin kurkun läpi, jolloin palamisvyöhykkeen läpäisseet tervat krakkaantuvat kuumassa hiilipedissä. Hiilen kaasureaktiot jäädyttävät kaasun lämpötilan noin 800 °C:een, jolloin syntyy vain vähän tervaa sisältävä kaasua. Kaasua voidaan edelleen jäädyttää ja suodattaa sekä johtaa ahtaamattomalle kaasumoottorille polttoaineeksi.

Menetelmän suurimpia puutteita on, että se soveltuu vain hyvälaatuiselle lähes tuhkattomalle ja palamaiselle polttoaineelle sekä heikko hiilikonversio tuhkaa sisältävillä polttoaineilla (tuhkaa pitää määrääjain poistaa). Tavanomaisilla polttoaineilla esiintyy usein holvaantumista, jonka aikana tervoja kulkeutuu tuotekaasuun. Yksi menetelmän haasteista on prosessissa syntyvän tervapitoista kondenssiveden syntyminen.

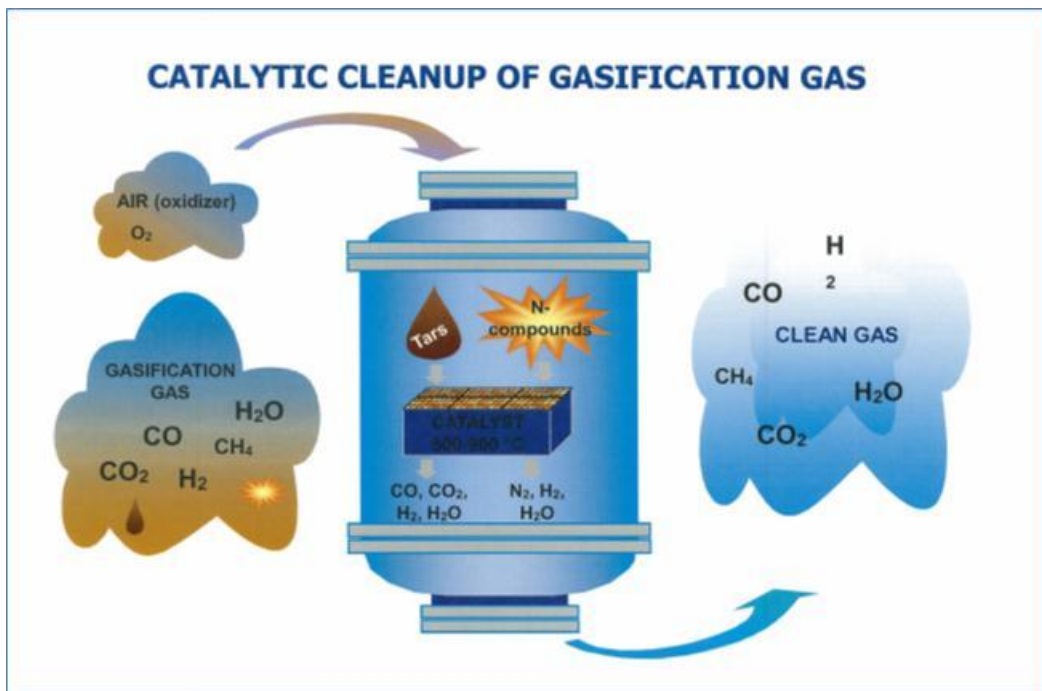
Viime vuosikymmeninä kaasutusta on kehitetty myös vastavirtakaasutuksena, jossa siis polttoaine ja hapetuskaasu menevät vastakkain suuntiin. Haasteena tässä menetelmässä on erittäin epäpuhtas kaasua, joka koostuu pääasiassa tervayhdisteistä. Tämä aiheuttaa kaasun kuljetusputkistojen tukkeutumista. Toisaalta vastavirta kontaktilla päästään parempaan hiilikonversioon eli polttoaine saadaan kaasutettua täydellisemmin.

VTT:n mukaan eräät leijukerroskaasutukseen perustuvat teknologiat näyttäisivät poistavan tervongelman, mutta ne ovat sellaisenaan liian kalliita ja monimutkaisia pienen kokoluokan laitoksiin.

Jyväskylän yliopiston tutkimuksen mukaan /9/ puun kaasutukseen myötävirtakaasuttimissa liittyy tiettyjä ongelmia. Myötävirtakaasutuksessa pyrolyysialueella syntyvät kaasut menevät paloalueen ja jäännöshiilen läpi, jolloin on mahdollista, että kaasut kuumentuvat paloalueen lämpötilaan. Käytännössä alueelle voi jäädä myös kylmiä alueita, joihin hapetuskaasu ei pääse vaikuttamaan ja lämpöä ei synny riittävästi. Tällöin osa polttoaineesta voi jäädä kaasuntumatta, synnyttäen tervoja, jotka tukkivat kaasun pesun tai moottorin. Näyttää siltä, että kaasutuskaasuun jäävien tervojen määrä ei saa ylittää 100 mg/m³:n tasoa kaasumoottorin sisäännotossa.

Kaasuttimen paloalueen ylikuumeneminen taas voi johtaa typpioksidien syntymiseen, tuhkan laavaantumiseen ja jopa kaasuttimen rakenteiden sulamiseen. Nämä vaikutukset ovat polttoaineen ja sen tuhkan ominaisuuksista jonkin verran riippuvaisia – ongelmia esiintyy vähiten suhteellisen puhtailla puuperäisillä polttoaineilla. Ko. ominaisuudet saavat aikaan sen, ettei häkäpöntön kapasiteetti ole kovasti skaalattavissa ylöspäin. Kaupallistumassa olevissa tekniikoissa kaasuttimenkäyttöongelmia ei ole ollut johtuen käytetyistä puuperäisistä polttoaineista.

VTT on tutkinut kaasun katalyyttistä puhdistusta (kuva 7).



Kuva 7. Kaasun katalyyttinen puhdistus /10/.

3 Puun kaasutuksen kehitystyö

Myös Suomessa on ollut useita puun kaasutuksen kehityshankkeita. Kehitystyö on johtanut siihen, että viime vuosina on syntynyt useita yrityksiä, joilla on tarjottavana pieniä kaasutusmoottorilaitoksia. Niissä hyödynnetään uudenaikaista säätö- ja automaatiotekniikkaa ja laitokset on toteutettu siistin ja kompaktin näköisinä.

Pien CHP -tutkimusta harjoittavat Suomessa ainakin VTT, Jyväskylän yliopisto, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Aalto-yliopisto ja Centria ammattikorkeakoulu. Teknologian kehittämiskeskus Tekesin vuosina 2003 – 2007 toteuttaman DENSY (Distributed energy systems) -ohjelmassa edistettiin hajautettujen energiateknologioiden osaamista Suomessa. VTT on Espoossa tutkinut jo pitkään Esa Kurkelan tutkimusryhmässä kaasutusta ja eri CHP -vaihtoehtoja. Kokkolan yliopistokeskus Chydenius on tehnyt myös pien CHP -tutkimusta professori Ulla Lassin johdolla.

Kaasutuksen kehitystyö muualla

Kaasutusteknologiaa on kehitetty mm. USA:ssa, Tanskassa, Itävallassa, Saksassa, Sveitsissä ja Iso-Britanniassa. Kehitystyössä on lähinnä keskitytty ratkaisemaan kaasun puhdistusongelmaa pienen kokoluokan kaasuttimissa.

4 Eri teknologioiden ominaisuuksia

Pienten CHP -laitteistojen kustannustehokkuutta pitäisi pystyä parantamaan tekniikkaa ja tuotantoprosesseja kehittämällä, jotta sähkön ja lämmön yhteistuotanto olisi taloudellisesti kannattavaa myös pienessä mittakaavassa. Pienimuotoisen CHP -tuotannon kannattavuuden kannalta haastavinta näyttäisi olevan kehittää prosessi, jolla sähkö/lämpö -suhde olisi mahdollisimman suuri kohtuullisilla investointikustannuksilla. Pienten CHP -laitosten tehoa säädetään yleensä lämmön tarpeen mukaan, jolloin laitteistoja joudutaan usein ajamaan osakuormalla. Kannattavuuden säilyttämiseksi sähkön tuotannon hyötysuhde (sähköteho/polttoainetehe) ei kuitenkaan saisi laskea kohtuuttomasti ajettaessa laitteistoa osateholla. Taulukossa 4 on esitelty nykyisiä pienimuotoiseen CHP -tuotantoon soveltuvia tekniikoita sekä niiden teknisiä ominaisuuksia.

Taulukko 4. Pienimuotoiseen CHP -tuotantoon soveltuvien tekniikoiden ominaisuuksia /11/.

Tekniikka	Polttomoottorit	Mikroturbiinit	Stirling -moottorit	Polttokennot	Höyrykone ja -turbiini	ORC-prosessi
Tyypillinen koko	1 kWe – 1000 kWe	25 kWe – 250 kWe	10 – 150 kWe	1 kWe – 50 MWe	Höyrykoneella >100 V -turbiineilla >500 kWe	150 kWe – 1 MWe
Sähköhyötysuhde	25 – 40 %	25 -30 %	8 – 22 %			
Lämpöhyötysuhde	45 – 50 %	50 - 60 %	50 – 60 %			
Tyypillinen käyttöaika	15 vuotta	15 vuotta	15 vuotta	1 - 15 vuotta	15 vuotta	>20 vuotta
Kehitysaste	Laajasti käytössä	Varhais-kaupallisessa vaiheessa	Pilot -vaiheessa	Kehitysvaiheessa	Laajasti käytössä	Varhais-kaupallisessa vaiheessa
Tärkein tekninen vahvuus pien CHP -käytössä	Korkea sähköhyötysuhde	Pieni huollon tarve	Pieni huollon tarve	Korkea sähköhyötysuhde	Tekniikan todistettu toimivan	Hyvä sähkönhyötysuhde 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

Periaatteessa polttoprosessit voidaan jaotella avoimiin ja suljettuihin prosesseihin. Avoimissa prosesseissa (polttomoottorit, mikroturbiinit) nestemäinen tai kaasumainen polttoaine poltetaan lämpövoimakoneen sylinterissä (polttomoottorit) tai polttokammiossa (mikroturbiinit). Suljetuissa prosesseissa (stirlingmoottori, höyryprosessit ja ORC-prosessi) polttoaine poltetaan erillisessä polttotilassa, ja lämpöenergia tuodaan lämpövoimakoneelle työaineen välityksellä /2/.

Suljetun kierron etuna on juuri lämpövoimakoneen puhtaana pysyminen, koska polttoaineen ja savukaasujen epäpuhtaudet eivät pääse vaikuttamaan itse lämpövoimakoneeseen. Eri lämpövoimakoneiden rakenne vaikuttaa luonnollisesti myös niiden polttoainevaatimuksiin.

5 Markkinoilla olevia pien CHP -laitteita

Mikro CHP -kokoluokka

Mikro CHP -kokoluokalla tarkoitetaan tässä yhteydessä alle 10 kW_e:n laitteita. Laitteet soveltuvat mm. maataloille ja yksittäisiin asuinrakennuksiin. Tyypillisesti hyvä kohde olisi kohde, jossa on verrattain vakaa sähkön ja lämmön tarve. Kaupallisia mikro CHP -tekniikoita on esitetty taulukossa 5.

Taulukossa esitetyillä laitteilla sähköteho on esitetty minimitehona ja yrityksillä voi olla myös suurempitehoisia laitteita.

Taulukko 5. Mikrokokoluokan CHP -laitteita.

Yritys	www-sivu	Polttoaineet	Valmistusmaa	Tekniikka	Sähkö/lämpö kWe / kWth
Sunmachine	http://old.stirlingmaschine.de/index_y.html	Pelletti, aurinkoenergia	Saksa	Stirling	
Disenco	www.disenco.com	Kaasu, puu, öljy, biopolttoaineet	Englanti	Stirling	3/15
Cleanery AG	http://www.cleaneryindustrial.com/	Kaatoaika- kaasu, biokaasu	Ruotsi	Stirling	9/26
KWB	http://www.greaterdemocracy.org/archives/678	Pelletti	Itävalta	Stirling	
Freewatt	www.freewatt.com	Kaasu	USA	Kaasumoottori	1,2/12
Marathon Engines	www.marathonengine.com	Kaasu	USA	Kaasumoottori	4,7/12
Senertec	www.senertec.de	Kaasu	Saksa	Kaasumoottori	5,5/10 - 12
Wolf GmbH	www.wolf-heiztechnik.de	Kaasu	Saksa	Kaasumoottori	35-/55-
Viessmann Werke GmbH & Co. KG	www.viessmann.com	Kaasu	Saksa	Kaasumoottori	20/62

Talokohtaisia mikrovaimaloita, joissa polttoaineena on maakaasu, on ollut markkinoilla jo pitkään. Laitteet perustuvat perinteiseen mäntämoottori- tai mikroturbiinitekniikkaan. Tällaisia sähköntuotantoyksiköitä on ollut markkinoilla etenkin Pohjois-Amerikassa. Useat eri yritykset valmistavat näitä laitteita (taulukko 5). Kaasukäyttöisiä moottoreita ollaan kehittämässä eri tahoilla niin, että myös bio- ja puukaasun käyttö on niissä mahdollista. Kuvassa 8 on puupellettiä polttoaineenaan käyttävä, stirling -prosessiin perustuva CHP -yksikkö.



Kuva 8. Pellettiä polttoaineenaan käyttävää stirling -prosessia generaattoreineen. Laitteistoa on kehitetty mm. Saksassa ja Itävallassa (Kuvassa Stirling Power Module).

Pien CHP -kokoluokka

Taulukossa 6 on esitetty yli 10 kW_e laitteita. Tämä kokoluokka tulee kyseeseen esimerkiksi ekokortteissa, suurkiinteistöissä, teollisuudessa ja täydentämään aluelämmitystä.

Taulukko 6. Kokoluokan yli 10 kW_e laitteita.

Yritys	www-sivu	Polttoaineet	Valmistusmaa	Tekniikka	Sähkö/lämpö kW _e / kW _{th}
Gasek Oy	www.gasek.fi	Hake, pelletti	Suomi	Kaasutus	50/100
Spanner	http://www.holz-kraft.de/de	Hake	Saksa	Kaasutus	30 - 50/70 - 100
Burkhardt	http://www.burkhardt-gmbh.de/	Puu	Saksa		180/220
Talbotts Biomass energy	http://www.biomassgenerators.com/	Hake, pelletti, biomassa	Englanti	Mikro-turbiini	25/80
Stirling.dk	http://www.stirling.dk	Hake	Tanska	Stirling	35 - 140/140 - 560
Tri-O-Gen	http://www.triogen.nl	Jätelämpö, HAKE	Hollanti	ORC	60 - 165/
Vortel Oy	http://www.volter.fi/	Metsähake	Suomi	Kaasutus	30/80
Energiprojekt AB	http://www.energiprojekt.com	Puu, biomassa	Ruotsi	Höyrykone	500/3000
Ekogen Oy	http://www.ekogen.fi	Metsähake, pelletti	Suomi	Mikro-turbiini	100/300
Turboden	http://www.turboden.eu	Metsähake, jätelämpö	Italia	ORC	200/n. 800
Ormat	www.ormat.com	Geoterminen ja aurinko-energia	USA	ORC	250/
Adoratec	www.adoratec.com	Biomassa (Hake)	Saksa	ORC	300
Calnetix (GE energy)	www.geheatrecovery.com	Jätelämpö	USA	ORC	125
GMK	www.gmk.info	Jätelämpö Biomassa	Saksa	ORC	35 - 60/ 500-2000/3000 - 8000
Electraterm	www.electraterm.com	Jätelämpö, aurinkoenergia Jätepuu	USA	ORC	30 - 65/
Infinity turbine	www.infinityturbine.com		USA	ORC	
Freepower	www.freepower.co.uk	Jätelämpö Biomassa	Englanti	ORC	130/
Alfagy Ltd	http://alfagy.com	Biomassa, hake	Englanti	Kaasutus	250/
Schmitt Enertec	http://www.schmitt-enertec.com	Hake, kaasut	Saksa	Kaasutus	250/
Polytechnic	http://www.polytechnik.com	Hake, (Lämpö)	Itävalta	Höyry-turbiini/ORC	200/
Maxxtec AG	http://en.maxxtec.net	Hake, (Lämpö)	Saksa	ORC	300/
Entimos Oy	http://www.entimos.fi	Biomassa, hake	Suomi	Kaasutus	min n. 300/
Kohlbach Group	http://www.kohlbach.at/	Hake. (Lämpö)	Itävalta	ORC	200/
GMK	http://www.gmk.info	Biomassa	Saksa	ORC	500

Sopivaa pienen kokoluokan järjestelmää etsittäessä kannattaa kääntyä asiantuntijan puoleen. Lisäksi kannattaa aina tutustua laitteita kaupittelevan yritysten referensseihin ja niiden toimivuuteen. Alan tuotekehitykseen panostetaan nyt paljon, mikä on tuottanut paljon uusia ja vielä kehitysvaiheessa olevia teknologioita, joilta puuttuu pitempiäaikainen käyttökokemus.

Pienten CHP -laitteistojen kustannustehokkuutta pitäisi pystyä parantamaan tekniikkaa ja tuotantoprosesseja kehittämällä, jotta sähkön ja lämmön yhteistuotanto olisi taloudellisesti kannattavaa. Pienimuotoisen CHP -tuotannon kannattavuuden kannalta tärkeintä ja samalla haastavinta on kehittää prosessi, jolla voidaan tuottaa mahdollisimman paljon sähköä suhteessa tuotettuun lämpöön kohtuullisilla investointikustannuksilla.

Yksi merkille pantava seikka on polttoaineen laatu. Pien CHP -laitoksen teknologia asettaa polttoaineen laadulle (palakoko, kosteus) tiettyjä vaatimuksia, mikä on laitospaikoista. Polttoaineen laatu määrää varsinkin pitkälle automatisoiduissa laitoksissa käyttökustannukset.

6 Käytännön esimerkit Suomessa

Seuraavassa nostetaan esille muutamia esimerkkejä lähtien liikkeelle kokoluokasta, joka voisi soveltua maaseututaajamaan kaukolämpöverkon yhteyteen rakennettuun CHP -järjestelmään.

Case Nivala (polttoaineteho 20 MW)

Nivalaan rakennettu uusi CHP -voimala käyttää noin 35 000 kiintokuutiometriä puuta eri muodoissaan vuodessa, joka vastaa noin 70 % laitoksen polttoainekäytöstä. Metsähakkeen toimituksista vastaa pääasiassa Metsänhoitoyhdistys Kalajokilaakso. Uusi höyrykattilalaitos sijaitsee samalla tontilla nykyisten 7,5 MW ja 5 MW KPA -kattiloiden kanssa. Voimalaitoksen polttoainevaihtoehdot ovat puu, turve sekä peltobiomassat. Hankkeen työllistävä vaikutus on käyttövaiheessa suoraan ja välillisesti noin 15 - 20 henkilöä.

Voimalaitoksen leijukerroskattilalla voidaan tuottaa kaukolämpöä 15 MW_{th} ja sähkötehoa 5 MW_e. Kattila tuottaa tuorehöyryä (500 °C, 60 bar) 6,9 kg/s hyödynnettäväksi sähkön- ja lämmöntuotantoon. Savukaasut puhdistetaan kaksikenttäisellä sähkösuodattimella. Voimalaitos on lisäksi varustettu 3 MW ilmakiertoisella apujäähdyttimellä, joka takaa optimaalisen käytön myös alhaisilla kaukolämpökuormilla sekä mahdollistaa sähkön hintapiikkien tehokkaan hyödyntämisen.

Case Toholampi (Polttoaineteholuokka 10 MW)

Toholammin Energia on tätä kirjoittaessa investoimassa 8,2 MW:n CHP -laitokseen. Investointiin kuuluu kuumaöljykattila, ORC-voimala ja polttoainerterminaali. Kuumaöljykattilan polttoaineena käytetään haketta, purua, kuorta ja turvetta. Puuperäisen polttoaineen osuuden on arvioitu olevan noin 80 % ja turpeen osuuden 20 %. Puupolttoainetta käytettäisiin vuorokaudessa noin 200 irtokuutiometriä ja jysinturvetta noin 60 irtokuutiota. ORC-voimalan kaukolämpöteho on 5,4 MW_{th} ja sähköteho 1,27 MW_e. Tämän kokoinen voimalaitos sopisi hyvin tyypilliseen maaseutukuntaan.

Vastaavaa CHP -voimalaitosta ei ole aiemmin toteutettu Suomessa. Hankkeessa uutta teknologiaa edustaa leijupetikattilan kuumaöljysovellus, itse ORC-voimala ja polttoainerterminaalin kuivauslaitteisto. Yhteen polttoainertaskuun on asennettu polttoaineen kuivausjärjestelmä. Kuivaa polttoainetta saadaan näin esimerkiksi kunnan sivukylien koulujen käyttöön. Kuumaöljykattilaratkaisu lisää merkittävästi paikallisen uusiutuvan polttoaineen käyttöä ja tuo joustavuutta voimalaitoksen polttoainevalikoimaan.

Toholammille suunnitellun voimalaitoksen kattilatyypissä perinteinen vesikierto on korvattu kuumaöljykerrolla, jonka lämpötila on yli 300 astetta. Kuumaöljyn sisältämä lämpöenergia muunnetaan sähköksi italialaisen Turbodenin valmistamassa sähköntuotantoyksikössä, missä turbiini ja generaattori on liitetty energiatehokkaasti toisiinsa ilman vaihteistoa.

Laitos tuottaa valmistuttuaan sähkön ja kaukolämmön lisäksi prosessienergiaa (höyryä/kuumaa vettä) paikalliseen käyttöön. Laitoksen oheislaitteet, kuten polttoaineen vastaanotto- ja syöttölaitteet, savukaasujen puhdistus sekä tuhkanpoisto edustavat perinteistä laadukasta voimalaitosrakentamista. Laitoksella on tarkoitus tuottaa prosessienergiaa 15 GWh elintarviketeollisuudelle, kaukolämpöä Toholammin taajamaan 26 GWh/a ja sähköä yleiseen verkkoon 6 GWh vuosittain.

Laitoksen rakentamisella ja käytöllä on myös merkittävä aluetaloudellinen merkitys. Laitoksen rakennusaikainen työllisyysvaikutus on noin 18 htv ja pysyviä työpaikkoja voimalan valmistuttua on kolmelle henkilölle. Hankkeen kokonaiskustannusarvio on noin 9 milj. €, johon työ- ja elinkeinoministeriö on myöntänyt merkittävän tuen (33 %). Sähkön syöttötariffijärjestelmään Toholammin energia ei pääse saadun investointituen vuoksi. CHP -laitos valmistuu vuoden 2012 loppupuolella. Laitteiston toimittaja on Vapor Finland, joka on osa virolaista Filter -konsernia, jolla on useita pienen kokoluokan sähkön tuotantoreferenssejä lähinnä Baltian maissa.

Yritysesimerkki Volter Oy (polttoaineteho 150 kW)

Volter Oy:n pien CHP -laitoksen tekniikka perustuu puun kaasutukseen. Teräsrunkoinen ja lämpöeristetty kontti asennetaan asiakkaalle betonialustalle. Polttoaineena on kuiva puuhake. Laitoksen sähköteho on 30 kW_e ja lämpöteho 80 kW_{th}. Polttoaineen syöttö CHP -yksikköön tapahtuu ulkopuoliselta jousipurkainasemalta. Polttoaineen kulutus maksimiteholla on 3,5 i-m³ vuorokaudessa. Kauko-ohjattavan laitoksen liitántävaatimuksena on sähkökaapeli, lämpökanaali, vesijohto, laajakaista ja GSM-liittymä.

Yrityksen tekniikkaa on käytössä Kempeleen ekokorttelissa, jossa oma pienvoimalaitos tuottaa sähkö- ja lämpöenergian kymmenelle omakotitalolle. Ekokortteli on omavarainen ja se on irti valtakunnan sähköverkosta.

Toinen yrityksen referenssi sijaitsee myös Kempeleessä ja pienvoimalaitos toimii sähköverkkoa vasten. Laitos tuottaa sähkö- ja lämpöenergiaa puuhakkeesta suurelle omakotitalolle sekä pienelle konepajalle. Ylijäämä sähkö syötetään Oulun Seudun Sähkön verkkoon.

Kolmas yrityksen referenssilaitos on Oulussa, missä pienvoimala tuottaa sähkö- ja lämpöenergiaa omakotitalolle, vapaa-ajan keskukselle sekä autotalli- ja varastorakennuksille. Ylimääräinen sähkö syötetään yleiseen sähköverkkoon. Kohteeseen on toteutettu älykäs sähköverkko, joka seuraa energian kulutusta ja säätää tuotantolaitoksen tehoa toivotun ajomallin mukaisesti. Yrityksen neljäs laitos valmistuu vuoden 2012 lopussa pohjoiskarjalaiselle maatilalle.

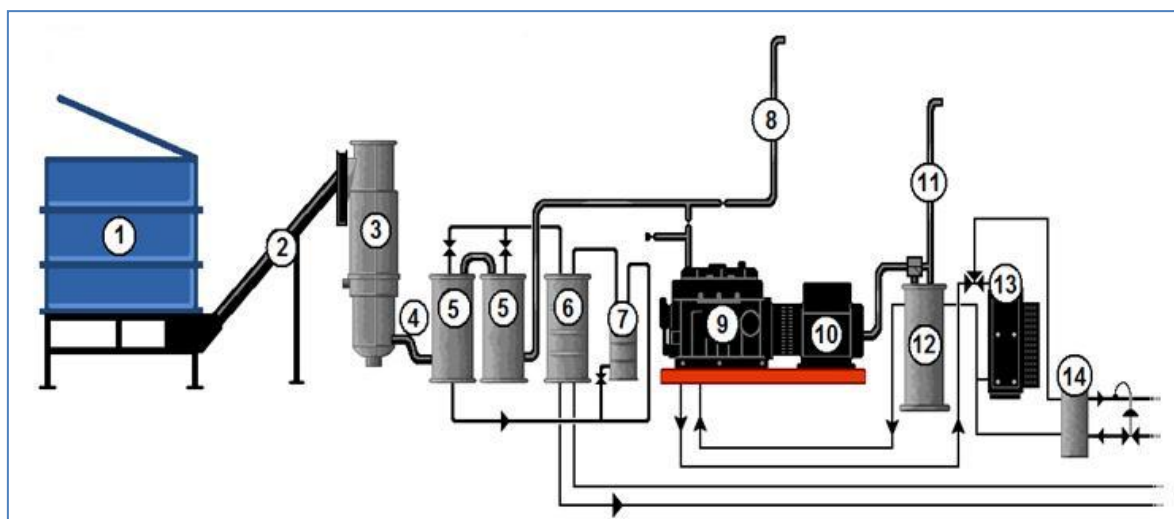
Yritysesimerkki Gasek Oy (polttoaineteho 150 kW)

GASEK Oy valmistaa CHP -voimaloita Reisjärven tehtaalla, ja niitä toimitetaan asiakkaille avaimet käteen -paketteina. Sähkö tuotetaan kaasumoottorilla toimivalla sähkögeneraattorilla tai Stirlingmoottorilla toimivalla lämpövoimakoneella (kuva 9). Voimalakontit ovat täysin automatisoituja, miehittämättömiä voimaloita, jotka tyypillisesti kytketään valtakunnan verkon rinnalle. Gasek Oy:n uuden teknologian yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotantolaitokset hyödyntävät metsähaketta polttoaineena energiantuotannossa. CHP -voimalat perustuvat puunkaasutusteknologiaan, jossa puun sisältämä energia muutetaan kaasuksi pyrolyysireaktiossa. Hake poltetaan korkeassa lämpötilassa kontrolloiden prosessin ilman saantia.

Pien CHP -voimalaitokset tuottavat sähköä 20 - 50 kW_e ja lämpöä 60 - 100 kW_{th}.

Ensimmäinen GASEKin toimittama kaupallinen pien CHP -voimala asennettiin viljatilán hakelaitoksen rinnalle. Sähköteholtaan 50 kW laitoksen on tarkoitus tuottaa sähköä ja lämpöä maatilan rakennusten tarpeisiin. Lisäksi lämpöä on tarkoitus hyödyntää viljankuivauksessa.

Pien CHP -voimalaitokset rakennetaan erillisiin kontteihin, jotka voidaan siirtää liityntävalmiina suoraan kohteeseen. GASEKin voimalat soveltuvat esimerkiksi haja-asutusalueiden, pk-yritysten ja maatilojen sähkön ja lämmön tuotantoon.



Kuva 9. Gasek Oy:n pien CHP -laitteiston periaatekaavio. 1 = Hakesiilo, 2 = Syöttöruuvi, 3 = Reaktori, 4 = Raaka-kaasu, 5 = Vesipesuri, 6 = Vesisäiliö, 7 = Tuhkasäiliö, 8 = Käynnistyskaasu, 9 = Moottori, 10 = Generaattori, 11 = Pakokaasu, 12 = Pakokaasun lämmönvaihdin, 13 = Jäähdytin, 14 = Lämmönvaihdin

7 CHP -kohteen arviointi

Seuraavassa tarkastellaan mahdollisia CHP -kohteita yleisellä tasolla. Kohteiden soveltuvuutta pien CHP -kohteiksi voidaan arvioida esimerkiksi Lappeenrannan teknillisen yliopiston laatiman menetelyohjeen mukaisesti /12/.

Lähtökohtana hyvälle pien CHP -kohteelle on riittävä lämpö- ja sähköenergian tarve tai kysyntä. Mikäli sähkö käytetään samalla kiinteistöllä, ei sähkön siirrosta aiheudu kustannusta. Tuotetulla lämmöllä tulisi olla hyvin kohtuullinen siirtoetäisyys lämpöhäviön minimoimiseksi. Kannattaa selvittää, voisiko tuotetun lämmön syöttää kaukolämpöverkkoon. Mikäli lämpökanaalia joudutaan rakentamaan, tulee tehdä tarvittavat maastokartoitukset ja selvittää mahdollisten lämpölinjojen esteet alustavien lämmönsiirtokustannusten kartoittamiseksi.

Oleellinen osa sähkön ja lämmön tuotantokustannusta on käytettävissä olevien polttoaineiden saatavuus ja hintataso. Saatavuuden osalta kannattaa selvittää paikallisten polttoaineiden kysyntä ja tarjonta. Metsähakkeeseen pohjautuvassa pien CHP -tuotannossa oleellista on selvittää polttoaineen hankintaan käytettävissä olevat yrittäjät ja urakoitsijat sekä heidän kalustonsa. Laitokselle tulee varmistaa riittävän laadukas polttoaine pitkällä tähtäimellä.

Laitoksen hoito vaatii pätevän henkilökunnan niin laitoksen käytön kuin huollonkin osalta.

Laitoksen mitoitus kannattaa tehdä ammattilaisen toimesta, jolloin huomioidaan olemassa olevat lämpölaitokset ja kattilat. Samalla kannattaa selvittää, voisiko olemassa olevan laitoksen muuttaa CHP -tuotantoon ja mitkä olisivat muutoksen kustannukset. Mitoitusta varten tulee kerätä lämmön ja sähkön kulutustiedot kuukausitasolla.

Myös paikallisesti kannattaa selvittää mahdolliset muut lämmön ja sähkön tarvitsijat, joita voi olla teollisuuden piirissä. Pien CHP -laitoksen kannattavuuden kannalta vakaa sähkön ja lämmön kysyntä on hyvin tärkeää.

Sähköverkkoon liittyminen

Käytännössä sähkön syötöstä verkkoon peritään yli 2 MVA:n laitoksilta liittymismaksu. Tätä pienemmiltä laitoksilta ei saa periä verkon vahvistuskuluja. Kaikilta jakeluverkkoon liittyviltä tuottajilta peritään 0,07 senttiä siirtomaksua kilowattituntia kohden.

Pien CHP:n liittäminen verkkoon vaatii tapauskohtaisesti erilaisia investointeja kytkentöihin ja suojauksiin, mikä suurentaa kokonaisinvestoinnin suuruutta ja takaisinmaksuaikoja. Jo alkuvaiheessa, ennen kuin suunnittelu aloitetaan, kannattaa olla yhteydessä paikalliseen verkkoyhtiöön. Verkkoyhtiöillä on ohjeita ja laitevaatimuksia verkkoon liitettäville laitteille.

Lisätietoja sähköverkkoon liittymisestä löytyy Suomessa mm Motivan sivuilta:

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

Puusähkön syöttötariffi

Useimmissa Euroopan Unionin maissa on ollut puusähkölle syöttötariffijärjestelmä. Myös Suomessa on voimassa laki puuenergialla tuotetun sähkön syöttötariffiksi. Syöttötariffijärjestelmään voidaan hyväksyä tuulivoimalan ja biokaasuvoimalan lisäksi myös metsähakevoimala ja puupolttoainevoimala. Voimalan generaattoreiden yhteenlaskettu nimellisteho pitää olla vähintään 100 kilovolttilampeeria. Polttoaineena tässä yhteydessä tarkoitetaan polttohaketta tai mursketta, joka on valmistettu suoraan metsästä saatavasta puusta tai metsähaketta tai teollisuuden sivutuotepuuta, joka syntyy metsäteollisuuden puunjalostusprosessin sivu- tai jätetuotteena syntyvästä puuaineksesta.

Syöttötariffijärjestelmään hyväksytyssä tuulivoimalassa, biokaasuvoimalassa ja puupolttoainevoimalassa tuotetun sähkön tavoitehintana on 83,50 euroa megawattitunnilta. Tuulivoimalalle maksetaan aluksi korotettua tukea vuoteen 2015 saakka, jonka suuruus on 105,3 €/MWh. Syöttötariffijärjestelmään hyväksytyssä metsähakevoimalassa tuotetusta sähköstä maksetaan päästöoikeuden hinnan mukaan muuttuvaa tuotantotukea enintään 18 euroa megawattitunnilta.

CHP -laitoksen saama investointituki aiheuttaa kuitenkin sen, että laitosta ei ole mahdollista saada syöttötariffijärjestelmän piiriin.

8 Hajautetun sähköntuotannon mahdollisuudet ja potentiaali

Seuraavassa kartoitetaan pien CHP -kohteita Suomessa ja lähemmin esimerkkimaakunnassa Kainuussa pyrkimällä selvittämään eri energiankulutuskohteita seuraavasti:

- Aluelämmityksen lämpökeskukset
- Maatilat ja puutarhat
- Kaukolämpöverkon ulkopuoliset suurkiinteistöt
- Kylpylät, uimahallit ja jäähallit

Aluelämpölaitokset

Energiatieteellisuuden kokoamasta tilastoaineistosta voidaan arvioida Suomessa olevat kaukolämpöverkot, joiden yhteydessä ei ole sähköntuotantoa. Tilastoaineiston mukaan Suomessa on tällaisia kohteita 152 kappaletta. Näissä kaukolämpöverkostoissa olevien kaukolämmön yhteisteholtaan alle 20 MW:n verkkojen määrä on 81 ja alle 10 MW:n verkkojen määrä 55 kiinteästi rakennettujen laitosten osalta. Tilasto ei kuitenkaan ole kattava, sillä siitä puuttuu suuri osa kaukolämpöverkostoista, jotka eivät ole ilmoittaneet tietojaan.

Ongelmana aluelämpölaitosten osalta on tyypillisesti se, että lämmön kysyntä vaihtelee paljon vuodenaikojen mukaan. Lämmölle pitäisi olla verrattain vakiokysyntä ympäri vuoden. Osaltaan energian kysynnän vaihtelevuus aiheuttaa sen, että laitosinvestointi myös sähköntuotantoon ei ole taloudellisesti perusteltua. Taloudellisesti toimiva CHP -laitos vaatii käytännössä lähes ympärivuotisen tasaisen lämpökuorman. Monilla nykyisillä lämpölaitoksilla tasainen energiankysyntävaatimus ei toteudu. Kesäajan lämmön kysyntää tulisikin lisätä innovatiivisin ratkaisuin kuten esimerkiksi hakkeen tai pilkkeen kuivauksen kautta. Toholammilla ratkaisu löytyi elintarviketeollisuuden asiakkaasta, joka tarvitsi prosessienergiaa.

Lähtökohtana tarkastelussa on puupolttoaineen käyttö sähkön tuotannossa. Kainuussa aluelämpölaitoksista pelkästään lämpöä tuotetaan Hyrynsalmella, Ristijärvellä, Sotkamossa Vuokatin laitoksella, Vaalassa, Puolangalla sekä Kajaanissa entisen Vuolijoen laitoksilla (taulukko 7).

Taulukko 7. Kainuun aluelämpölaitokset, joissa ei ole sähkön tuotantoa Kainuussa.

Lämpölaitos	Omistus	Teho MW	Polttoaineen käyttö GWh
Hyrynsalmi	Vesi-Mega Oy	4	16,2
Ristijärvi	Fortum Oyj/Adven Oy	1,5	6,6
Vuokatti	Vapo Oy	7	25,5
Vaala	Vaalan kunta	4	18,2
Paltamo	Vapo Oy	2,5	14,6
Suomussalmi	Suomussalmen kunta	9+4	72
Puolanka	Puolangan kunta	2,5	20
Vuolijoki	Kajaanin lämpö Oy	0,7	1,4
Otanmäki	Kajaanin lämpö Oy	1,8	17

Maatilat

Yksi potentiaalinen pien CHP -kohde olisivat maidontuotantoa harjoittavat maatilat. Näillä tiloilla on lämpimän käyttöveden tarvetta. Lisäksi oma sähköntuotanto lisäisi näiden tilojen sähkönsaantivarmuutta. Taulukossa 8 on esitetty lypsykarjatilojen lukumäärä lypsylehmien määrän mukaan jaoteltuna. Mitä suurempi tila sitä suurempi energiankulutus ja sitä parempi kannattavuus pien CHP -investoinnille. Voidaan karkeasti arvioida, että lehmäkoon ylittäessä 50, kannattaa selvittää myös pien CHP -vaihtoehto.

Suomessa on maa- ja metsätalousministeriön mukaan 1245 maitotilaa, joilla lypsylehmien määrä on suurempi kuin 50 ja Kainuussa vastaavia tiloja on 33. Keskimääräinen tilakoko kasvaa edelleen Suomessa, minkä johdosta myös energian osuus liikelähdön näkökulmasta on entistä merkittävämpi.

Taulukko 8. Maitotilojen kokojakauma Suomessa ELY-keskuksittain (Lähde TIKE).

ELY-keskus	Lypsylehmiä				
	0 - 49	50 - 74	75 - 99	100 -	Yhteensä
	Tiloja, kpl				
Uudenmaan	215	25	8	10	258
Varsinais-Suomen	233	34	12	7	286
Satakunnan	317	24	3	4	348
Hämeen	474	49	9	13	545
Pirkanmaan	517	41	12	17	587
Kaakkois-Suomen	449	42	7	9	507
Etelä-Savon	534	43	7	6	590
Pohjois-Savon	1207	102	22	34	1365
Pohjois-Karjalan	637	45	8	6	696
Keski-Suomen	542	33	8	6	589
Etelä-Pohjanmaan	931	91	24	42	1088
Pohjanmaan	837	111	27	23	998
Pohjois-Pohjanmaan	1303	152	25	22	1502
Kainuun	288	21	3	9	321
Lapin	399	32	4	4	439
Ahvenanmaa - Åland	43	8	-	1	52
Yhteensä	8926	853	179	213	10171

Isoille maatiloille on usein kannattavampaa tuottaa sähköä biokaasutuksen kautta.

Taulukossa 9 on suurempien puutarhojen energiakulutustietoa ja määriä. Kaikkiaan lämmitettävien vähintään 1000 m²:n suuruisten kauppapuutarhojen määrä Suomessa on noin 900. Kuten taulukosta 9 havaitaan, niiden energiankulutus on hyvin huomattava.

Taulukko 9. Pinta-alaltaan vähintään 1000 m²:n ja lämmitettävien kauppapuutarhojen määrä ja energian kulutus Suomessa vuonna 2011 (Lähde TIKE).

Energialähde	Yksikkö	Yrityksiä	Kulutus	Kulutusmäärä/GWh
Sähkö	GWh	293	481	481
Raskas polttoöljy	kg	269	24 265 847	277
Kevyt polttoöljy	l	577	9 881 040	99
Kivihiili ja antrasiitti	kg	3	7 110 820	50
Maakaasu	m ³	19	4 548 568	45
Nestekaasu	kg	48	4 266 268	55
Jyrsinturve	irto-m ³	4	44 160	40
Palaturve	m ³	87	161 855	228
Turvepelletti	kg	33	7 348 820	36
Kaukolämpö	GWh	52	154	154
Puu	irto-m ³	15	18 375	23
Puupelletti	kg	37	2 984 830	14
Polttohake	irto-m ³	144	148 193	133
Peltoenergia	irto	30	262 450	79
Yhteensä	GWh			1 716

Kainuussa on neljä ainakin osittain ympärivuotisessa tuotannossa olevaa ja vihannesviljelyä harjoittavaa puutarhaa. Esimerkiksi Parkinniemen puutarhan viljelypinta-ala on 4700 m² ja energian tarve sekä sähkön että lämmön osalta on noin 3500 MWh/a. Toisen suuren kainuulaisen puutarhan, Kulunnan Puutarhan, energiantarve on samaa suuruusluokkaa.

Kylpylät, uimahallit ja jäähallit

Suomessa on 183 uimahallia tai kylpylää, joiden energian kulutusjakaumaan oikein mitoitettu pien CHP voisi soveltua hyvin /13/. Lämpimän veden kulutus on verrattain vakaa ympäri vuoden.

Kainuussa on kuusi uimahallia tai kylpylää, joiden lämpimän veden kulutus on suuri. Kaikki Kainuun uimahallit ja kylpylät sijaitsevat kaukolämmön piirissä.

Suomessa on kaikkiaan 188 jäähallia, joista viisi sijaitsee Kainuussa /14/. Jäähalleissa jäädytyslaitteisto tarvitsee sähköä ja toisaalta lämpimän veden kulutus on huomattava.

Suurkiinteistöt ja vastaavat

Pien CHP nousee tarkasteltavaksi myös kaukolämpöverkoston ulkopuolisissa suurimmissa rakennuksissa, jotka voisivat kuluttaa tuotetun sähkön ja lämmön. Kuten taulukosta 10 havaitaan, näiden rakennusten lämpöenergian tuotanto perustuu hyvin pitkälle öljyn käyttöön.

Taulukko 10. Suomen ja Kainuun kaukolämpöverkoston ulkopuoliset suurkiinteistöt, joissa on vesikiertoinen lämmönjakotapa ja pääsiallinen polttoaine sähkö, öljy tai puu (vuosi 2011) Lähde: Tilastokeskus

	Rivi- ja ketju- talot	Asuinkerros- talot	Liike- rakennukset	Hoitoalan rakennukset	Opetus- rakennukset
KOKO SUOMI					
Sähkö	1 358	258	415	123	71
Öljy (sis. kaasu)	16 974	9 305	7 010	2 220	3 152
Puu	245	176	507	118	516
KAINUU					
Sähkö	24	1	13	3	5
Öljy (sis. kaasu)	264	91	145	20	65
Puu	12	4	17	7	44

Kainuussa on kymmeniä aluelämpöverkon ulkopuolisia suurkiinteistöjä, joilla energia tuotetaan omalla lämpökeskuksella. Laitosten käyttämät polttoaineet ovat joko öljy tai erilaiset puupolttoaineet kuten metsähake, puupelletti, sahanpuru, kuori tai turve. Laitosten kattilatehot vaihtelevat 100 kW:sta aina 4 MW:iin (taulukko 11).

Lähtökohtana pien CHP:n soveltuvuuden tarkastelussa on ollut tuotettujen energioiden (lämpö ja sähkö) oma tarve ja tarpeen pysyvyys. Soveltuvimpia kohteita ovat kylpylät, puutarhat ja suurkeittiöt, jotka tarvitsevat energiaa tilojen lämmityksen lisäksi myös lämpimän veden tuottamiseen.

Taulukko 11. Kainuun suurkiinteistöjä.

LAITOS	TEHO MW	POLTTOAINE-KÄYTTÖ MWh	Polttoaine
Vapo Oy Talgo Otanmäen tehdas	4		Pelletti
Vapo Oy Kainuun Opisto	0,5		Pelletti
Vuokatti Hirsitalot Oy	0,52	800	Puru
Akonlahden puutarha	0,4		Hake
Jannpuu Oy	1		Puru
Jääskeläisen puutarha Oy		700	Hake
Vapo Oy Seppälä Kainuun ammattiopisto	0,8	4 950	Hake
Tulikivi Oy Suomussalmen tehdas	0,6	1 000	Hake
Kulunna Puutarha Oy	1,5 + 0,7	2400?	Hake
Kalevala kuntoutuskoti	0,5	1 300	Hake
Kanerva hoitokoti	0,36	1 000	Pelletti
Parkinniemen puutarha	1	3 000	Turve, hake
Vapo Oy Pelson vankila	2,5	3 600	Pelletti
Suomussalmen puulämpö Oy	0,7	3 500	Hake
Ukkohalla			Öljy
Kainuun keskussairaala	2 x 2,1	13 000	Öljy*
Salmijärven sairaala	1,5	3 000	Hake
Paljakka	0,4+0,25		Öljy
Ämmänbetoni, Piiparinen	0,8	2 500	
VB – Betoni, Vaala	0,12	750	Öljy
Metsähallitus Vaala	0,14 ja 0,117	1 350	Öljy
Kontiomäen Shell	0,25	300	Hake

*¹) Myös lisäksi kaukolämpöä

9 Johtopäätökset

Energian hinnan voimakkaiden vaihteluiden ja nousevan trendin johdosta viime vuosina on kiinnostuttu sähkön tuottamisesta aiempaa pienemmässä mittakaavassa. Kasvaneiden ilmastotavoitteiden ja teknologian kehittymisen myötä pienimuotoisen sähköntuotannon kilpailukyky on hiljalleen paranemassa.

Pienimuotoisen sähkön ja lämmön yhteistuotannon kannattavuuden kynnyskysymys on lopputuotteiden (sähkön ja lämmön) vakaa ympärivuotinen kysyntä niin, että laitokselle saadaan mahdollisimman pitkä vuotuinen käyttöaika. Toinen haaste on kehittää prosessia niin, että sähkö/lämpö -suhde on mahdollisimman korkea eli sähköä voidaan tuottaa suhteessa lämpöön nykyistä enemmän.

Nykyisistä sähkön ja lämmöntuotantoteknologioista höyryprosessit, ORC-prosessi, kaasumoottorit, mikroturbiinit ja stirling -tekniikka ovat jo teknisesti toimivia ratkaisuja. Sen sijaan polttokennot vaativat vielä kehittämistä.

Kun puhutaan metsäbiomassaa polttoaineenaan käyttävistä teknologioista, lupaavimpina tekniikoina pienen kokoluokan CHP -tuotantoon pidetään ORC-prosessia ja stirling -tekniikkaa sekä puun kaasutuksen kautta mikroturbiineja ja polttomoottoreita.

Puun kaasutus ja kaasun polttomoottoreissa on ollut käytössä jos pitkään. Prosessi tarvitsee vielä kuitenkin kehitystä ja pitkäaikaiset käyttökokemukset sähköntuotannossa puuttuvat vielä. Näissä laitoksissa kaasutuksen takia sähköntuotannon hyötysuhde polttoainetehosta voidaan saada noin 30 %:n tasolle, kun sähköteho on 20 – 300 kW_e.

Polttomoottoreiden ongelmana on lähinnä kaasun puhdistaminen tervoista. Toisena ongelmana ovat kaasun puhdistuksen yhteydessä syntyvät tervapitoiset jätevedet. Ratkaisevassa asemassa näissä ongelmissa on laitokseen syötetty polttoaine ja sen tasalaatuisuus. Myös Suomessa kehitystä on tapahtunut ja muutamalla suomalaisella yrityksellä löytyy jo referenssilaitoksiakin.

Esiin nostetuissa mahdollisissa pien CHP -kohteissa ongelmana näyttää olevan lämmön kysynnän suuri vaihtelevuus, koska kesän aikana lämmön tarve on pieni. CHP -yksikön tuottamalle lämmölle pitää olla joko tarvetta omassa käytössä tai sille pitää olla asiakas. Laitos voidaan mitoittaa niin, että se syöttää kaukolämpöverkkoa tai toimii suurkeittiön tai muun suuren lämmintä vettä tarvitsevan kohteen yhteydessä. Ylijäämä sähkö voidaan aina syöttää yleiseen sähköverkkoon.

Sopivia käyttökohteita Suomessa ja case -alueella Kainuussa on paljon. Jokainen potentiaalinen kohde on tarkasteltava tapauskohtaisesti. Eräs suomalainen laitevalmistaja potentiaalisimpien kohteidensa sijaitsevan maatilaympäristöissä, joissa oman energian tuotannon lisäksi myös sähkö saannin varmistaminen sähkökatkokkien aikana on merkitsevä.

Suomessa syöttötariffijärjestelmä on uusi ja sen käyttöönotossa on tiettyjä ongelmia. Pienten laitojen osalta verkkoon syötetyn sähkö hyöty hupenee sähkö todentamiseen ja muihin ”hallinnollisiin” tehtäviin.

Lähteet

- /1/ Sähköntuotannon liittäminen verkkoon. Pöyry Energy Oy (Motiva). Helsinki 2006.
- /2/ Van Loo, S. & Koppejan, J. (2002). The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing. Twente University Press, Enschede, Hollanti
- /3/ Vartiainen E., Luoma P. Hiltunen J. Vahanen J., Gaia Group Oy (2002) Hajautettu energiantuotanto: Teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO2-päästöt. ISBN 952-91-4465-2
- /4/ Dong L., Liu H. & Riffat S (2009) Development of Small-Scale and Micro-Scale Biomass-Fuelled CHP Systems – Literature Review. Applied Thermal Engineering. Vol. 29:11-12
- /5/ Obernberger I., Carlsen H. & Biedermann F. (2003). State-of-the-Art and Future Developments Regarding Small-Scale Biomass CHP Systems with a Special Focus on ORC and Stirling Engine Technologies.
- /6/ http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine
- /7/ Kirjavainen M., Sipilä K., Savola T., Salomón M. & Alakangas E. (2004). Small-Scale Biomass CHP Technologies – Situation in Finland, Denmark and Sweden. OPET Report 12. VTT and Finnish District Heating Association.
- /8/ Aho, M (2009). Renewable Energy Production – Bioenergy. Jyväskylän yliopisto. Uusiutuvan energian ohjelma.
- /9/ Pänkäläinen H. & Konttinen J. (2009). Pienimuotoisen CHP –tuotannon teknologiat ja tutkimus. Jyväskylän yliopisto. Uusiutuvan energian ohjelma.
- /10/ Kurkela E. Thermal gasification from power and fuels. VTT Gasification team. Presentation. September 2010.
(http://www.vtt.fi/files/research/ene/bioenergy/gasification/thermal_gasification_for_power_and_fuels.pdf)
- /11/ Pienimuotoisen CHP-tuotannon teknologiat ja tutkimus (Alkuperäinen lähde: Van Loo & Koppejan 2002, 148, 159; Vartiainen et al. 2002, 17-27; Fischer 2003; Obernberger et al. 2003, 3; Granö 2006; 1-2; Granö 2008; 1-6; Greenenvironment 2009)
- /12/ Matti Lehtovaara (toim.). Sähkön ja lämmön tuotanto biopolttoaineilla, alueellinen selvitys –Tutkimusraportti. Technology Business Research Center Lappeenranta. 2011. Lappeenranta
- /13/ Uimahalli- ja kylpylätekniinen yhdistys ry UKTY
- /14/ Suomen jääkiekkoliiton verkkosivut (<http://www.finhockey.fi/>)

Muut lähteet

Projekti-info nro 76. Stirling -moottorin asentaminen puukaasukäyttöön. HighBio -projektitiedote.

Ulla Lassi, Bodil Wikman (toim.). Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineeksi. HighBio -projektijulkaisu. Jyväskylän yliopisto. Kokkolan yliopistokeskus Chydenius. Kokkola 2011.

Kilpeläinen Santtu. Sähköntuotannon kannattavuus pienissä polttoainekattilalaitoksissa. Diplomityö, LTY, energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta 2003.

Jenni Aaltonen & Juuso Ukkonen. Pienet alle 4MW yhdistetty sähkön ja lämmöntuotantomahdollisuudet. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Energiatekniikan kandidaattityö ja seminaari 2008.

Tommi Haavisto. Wattson Tech Oy. Puupolttoaineisiin perustuvat pien- CHP tekniikat. Raportti V1.1. 28.4.2010