

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka / Käynnissäpito

Tuomas Sinisalo

MAAKAASUKÄYTTÖISEN STIRLING-PERUSTAISEN MIKRO-CHP-LAITTEISTON
SOVELTUVUUS SUOMALAISISSA PIENTALOUKSISSA

Opinnäytetyö 2011

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

SINISALO, TUOMAS

Maakaasukäyttöisen Stirling perustaisen mikro-CHP-laitteiston soveltuvuus suomalaisissa pientalouksissa

Opinnäytetyö

22 sivua + 5 liitesivua

Työn ohjaaja

Osaamisalapäällikkö, Markku Huhtinen

Toimeksiantaja

Kotkan Energia Oy

Maaliskuu 2011

Avainsanat

mikro, CHP, Stirling, kannattavuus

Tämä opinnäytetyö on laadittu Kotkan Energia Oy:lle. Työssä on tarkasteltu stirling perustaisen maakaasukäyttöisen mikro-CHP-laitteiston soveltuvuutta suomalaiseen kotitalouteen. Tavoitteena oli selvittää, minkälaisia säästöjä voidaan saavuttaa tuottamalla kotitaloussähköä lämmityksen yhteydessä ja onko mikro-CHP-laitteen hankinta kannattavaa Suomen oloissa.

Tarkastelu aloitettiin muodostamalla kuva kotitalouksien energian kulutuksesta ja sen jakaantumisesta. Selvitettiin lämmitystarpeen kuukausittainen jakautuminen vuoden ajalle lämmitystarvelukujen avulla. Tarkasteluun valittiin Baxi Ecogen mikro-CHP-laitteisto. Verrattiin saatuja lämmöntarve ja sähköenergiankulutusarvoja stirlingmoottorin tuottamiin arvoihin. Tarkastelu suoritettiin kuukauden tarkkuudella.

Kyseisen stirling perusteisen mikro-CHP:n pieni sähköhyötysuhde rajoittaa siitä saatavan mahdollisimman suuren säästön saamisen suuriin lämpöenergiatarpeen omaaviin talouksiin. Mikro-CHP on hyvä tapa säästää energiakuluissa ja pienentää hiilidioksidipäästöjä, mutta pienissä talouksissa takaisinmaksuaika pitenee. Kuukauden tarkkuudella tarkastelu ei anna todenmukaista kuvaa, mutta selvittää potentiaalisia säästöjä. Mikro-CHP-laitteiston hankinta voi olla kannattavaa, kunhan ensin kartoitetaan talouden energiankulutuksen jakautuminen tarkasti ja optimoidaan laitteisto sen mukaisesti.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

SINISALO, TUOMAS

Viability of natural gas fueled Stirling based micro-CHP generation in domestic use in Finland

Bachelor's Thesis

22 pages + 5 pages of appendices

Supervisor

Markku Huhtinen, Manager of department

Commissioned by

Kotkan Energia Oy

March 2011

Keywords

micro, CHP, Stirling, viability

This thesis is a research of feasibility of natural gas fueled Stirling based micro-CHP generation in domestic use in Finland. The main objective was to find out what kind of possible savings could be achieved by domestic cogeneration and whether it is feasible to acquire a micro-CHP unit.

The first step was to acquire a general view on domestic households' energy consumption and define the monthly distribution of heat demand in a period of one year. The distribution was defined with the help of heat demand figures. The Baxi Ecogen micro-CHP unit was selected to be the subject of research. Monthly heat and electricity demands were compared to the Ecogen's outputs.

The low efficiency of electricity production limits the gaining of the largest possible savings to households with large heat demands, in households with low heat demands, the time to gain back the money spent for purchasing micro-CHP unit will be significantly increased. Cogeneration is a good way to restrain carbon dioxide emissions and save in energy consumption. Further research of the subject is recommended; viewing consumption and production of energy in monthly periods does not give an accurate picture of unit's viability, but it does show the potential of the technology.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	5
2	STIRLING-MOOTTORI	6
	2.1 Historiaa	6
	2.2 Toimintaperiaate ja rakenne	6
	2.3 Stirling-sykli	8
	2.4 Polttoaine	9
3	KOTITALOUKSIEN ENERGIANKULUTUS	9
	3.1 Energiankulutuksen jakaantuminen	9
	3.2 Lämmitystarpeen määrittäminen kuukausitasolla	10
4	BAXI GROUP	12
5	SOVELTUVUUS SUOMEN OLOIHIN	13
6	TAKAISINMAKSUAIKA	17
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	20
	LÄHTEET	22
	LIITTEET	
	Liite 1. Esimerkkitalous 1	
	Liite 2. Esimerkkitalous 2	
	Liite 3. Esimerkkitalous 3	
	Liite 4. Lämmitystarveluvut	
	Liite 5. Ecogen	

1 JOHDANTO

Kotkan Energia Oy on 1993 perustettu, kokonaan Kotkan kaupungin omistama energiayhtiö, jonka liiketoiminta jakautuu energiantuotantoon ja kaukolämpöpalveluihin. Kotkan Energia Oy:n päätuotteita ovat sähkö, kaukolämpö, teollisuushöyry sekä maakaasun myynti teollisuudelle. Tuotantolaitoksia ovat päätuotantolaitoksena toimiva Hovinsaaren voimalaitos, hyötyvoimalaitos, jossa saadaan hyödynnettyä kotitalousjätteet energiantuotannossa, tuulisähkövoimalaitokset Mussalossa sekä Heinsuolla toimiva biokaasulaitos. Ympäristöystävällisyys on yksi Kotkan Energia Oy:n perusarvoista.

CHP tarkoittaa yhdistettyä lämmön ja sähkön tuotantoa. Mikro-CHP viittaa laitteiston kokoluokkaan, joka on alle 10 kW. Mikro-CHP-laitteistot ovat yleisiä Englannissa, Euroopassa ja Yhdysvalloissa. Suomeen tämä tekniikka ei ole vielä juurtunut, mutta useat tutkimukset kartoittavat mikro-CHP-tekniikan mahdollisuuksia Suomessa.

Työn tavoitteena oli tarkastella maakaasukäyttöisen stirling-perustaisen mikro-CHP-laitteiston kannattavuutta suomalaisissa pientalouksissa ja Suomen oloissa kuukauden tarkkuudella. Tarkastelua varten on selvitetty kotitalouksien energiankulutusta, sen jakaantumista sekä stirling moottorin suoritusarvoja.

Vertaamalla energiankulutusta ja tuotettua lämpö- ja sähköenergiaa kartoitetaan laitteiston soveltuvuutta suomalaisiin pientalouksiin. Tämän työn tavoitteena oli selvittää, minkälaisiin talouksiin ratkaisu soveltuu sekä millaisia säästöjä ja takaisinmaksuaika voidaan saavuttaa.

2 STIRLING-MOOTTORI

2.1 Historiaa

Robert Stirling loi perustan kuumailmakoneiden kehitykselle patentoidessaan ensimmäisen versionsa vuonna 1816. Moottori kehitettiin erityisesti sen aikaisten höyrykattiloiden ja moottoreiden korvaajaksi, koska niiden turvallisuus oli varsin keho ja ne olivat vaaraksi moottorien käyttäjille ja sivullisille. Stirling-moottoreita on käytetty muun muassa sähköntuotantoon, autoissa ja sukellusveneissä. Otto-moottorien kehitys ajoi kuitenkin ohi ja stirling-moottori jäi bensiini- ja dieselkäyttöisten moottorien varjoon. (Darlington 2005, 13-15.)

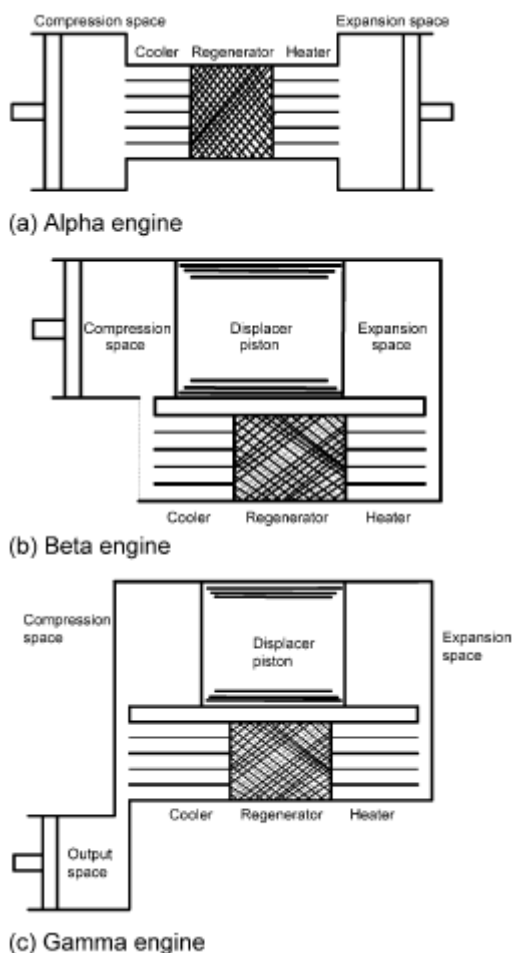
2.2 Toimintaperiaate ja rakenne

Stirling-moottori on lämpövoimakone, jossa voima saadaan männistä. Toiminta kuitenkin poikkeaa suuresti polttomoottoreista. Moottorin sylinterit ovat kaasutiiviitä, eikä niiden sisällä polteta mitään. Polttoainetta polttamalla saatu energia tuodaan systeemiin ulkopuolelta. Stirling-moottorin polttoaineena voidaan täten käyttää useita eri energianlähteitä. (Aaltonen 2008, 14; Darlington, 29.)

Toiminta perustuu lämpötilaeroihin, jotka saavutetaan kuumentamalla ja jäähdyttämällä moottorin sylintereissä olevaa työkaasua. Työkaasuna käytetään tyypillisesti paineistettua heliumia tai typpeä. Kuumentaminen ja jäähdyttäminen luovat taas paine-eron systeemin sisälle, mikä antaa voiman männille. (Lommi 2006 ,47.)

Moottorin tärkeimmät osat ovat: syrjäytysmäntä, työmäntä, niiden sylinterit sekä regeneraattori. Regeneraattori on ikään kuin energiavarasto, johon työkaasu luovuttaa ja josta se absorboi energiaa. Stirling-moottorit jaetaan kolmeen eri luokkaan: alfa, beta ja gamma (kts. kuva 1). Suurin ero luokkien välillä on komponenttien sijoittelulla. Alfa- ja beetamallissa voimaa välitetään mekaanisesti, kokoonpanoissa on tyypillisesti käytetty kampikoneistoa ja vauhtipyöriä. Gammamalli puolestaan perustuu puhtaasti paine-erojen vaikutuksiin. Moottorin toiminta perustuu lämpötilaeroihin, jotka saavutetaan mallista riippuen kuumentamalla syrjäytys-sylinterin toista päätä ja jäähdyttämällä toista (beta- ja gammamallit) tai kuumentamalla sylinteriä ja jäähdyttämällä toista (alfamalli). Sylinterit ovat yhteydessä toisiinsa esimerkiksi runkoon koneistettujen kanavien tai yhdysputken välityksellä, mahdollistaen kaasun virtauksen sylinteris-

tä toiseen. Beeta- ja gammamallissa syrjäytymäntä on sovitukseltaan väljä sylinteriinsä nähden, jolloin työkaasu pääsee virtaamaan sen ohi. Beetamallissa syrjäytys- ja työmäntä ovat samassa sylinterissä, gammamallissa on kaksi erillistä sylinteriä, jotka on yhdistetty toisiinsa. Syrjäytymännän tarkoituksena on määrittää, kuumennetaanko työkaasua vai jäähdytetäänkö sitä. Mäntä syrjäyttää tilavuutensa verran kaasua sylinterin päästä toiseen. Liikkuessaan sylinterissä se aiheuttaa myös turbulenssia työkaasun virtaukseen parantaen sekoittumista ja täten myös hyötysuhdetta. Työkaasun kuumennuessa ja jäähtyessä se luo paine-eron systeemin sisälle, mikä pakottaa työmännän liikkeelle. Työmännän on oltava siis kaasutiivis sylinteriinsä. Alphamallissa molemmat männät ovat kaasutiiviitä sylintereihinsä ja niillä on 90 asteen vaihe-ero toisiinsa nähden. (Lommi 2006, 47; Darlington 2005, 17-19.)



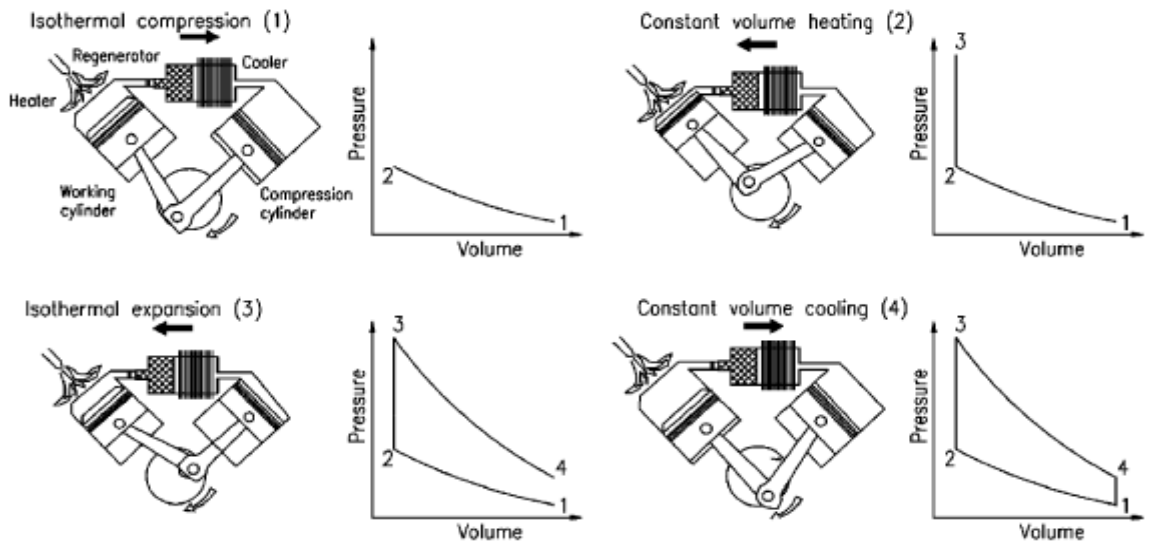
Kuva 1. Stirling-moottorityypit. (Onovwiona ym. 2004, 36)

Stirling-moottorin vahvuuksia ovat hiljainen käyntiääni, tasainen käynti, luotettavuus, pitkät huoltovälit sekä vaihtoehtoisten polttoaineiden runsas valikoima. Vahvuutena on myös suuri hyötysuhde osakuormalla. Käyntinopeuden säätely on hidasta, mikä sulkee stirling-moottorin pois ajoneuvokäytöstä sellaisenaan. Moottorin käynnistys ja

pysäytys on myös hidasta, koska moottorin täytyy kuumeta ennen käynnistymistään, ja vaikka polttoaineen syöttö katkaistaan, jatkaa moottori käyntiään kunnes lämpötila putoaa tarpeeksi alhaiseksi. Stirling-moottorit soveltuvat kuitenkin hyvin pieniin chp-laitoksiin (alle 200kW). (Aaltonen 2008, 15.)

2.3 Stirling-sykli

Stirling sykliä voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin alfa, beeta ja gamma, periaatteen ollessa kuitenkin kaikissa sama. Kuvassa 2 on esitetty Stirlingin sykli ja moottorin toiminta syklin eri pisteissä. Aluksi työkaasu on sylinterin kylmässä päässä, kaasun tilavuus on suuri ja paine on matala (piste 1). Työkaasu puristetaan työmännällä. Lämpötila pysyy vakiona paineen noustessa (piste 1-2). Työkaasu siirtyy regeneraattorin läpi syrjäytymännän avulla absorboiden lämpöenergiaa siitä. Työkaasu on nyt sylinterin kuumassa päässä, paine ja lämpötila kasvavat huippuunsa (piste 2-3). Työmännästä tulee liikettä paineen vaikutuksesta. Paine alkaa laskea, ja työkaasun tilavuus kasvaa. Työkaasu siirtyy regeneraattorin läpi sylinterin kylmään päähän (piste 3-4). Syrjäytymännästä on nyt sylinterin kuumassa päässä, jolloin työkaasu on kylmässä päässä. Kaasun tilavuus pysyy vakiona lämpötilan ja paineen laskiessa (piste 4-1). Työmännästä palaa takaisin paineen vaikutuksesta, ja sykli alkaa alusta. (Kuosa ym. 2006, 2.)



Kuva 2. Stirling-sykli ja moottorin (alfa) toiminta syklin eri pisteissä (Corria ym. 2004, 3)

2.4 Polttoaine

Stirling-moottorin erikoisuutena on, että energia tuodaan siihen moottorin ulkopuolelta. Polttoaineena voidaan siis käyttää mitä tahansa, jolla toimintaprosessin kannalta tärkeä lämpötilaero saadaan luotua, esimerkiksi öljyä, kaasua tai vaikka aurinkovoimaa. Biopolttoaineilla toimivaa CHP-tekniikkaa kehitetään jatkuvasti. Lämmönvaihtimien karstoittuminen on kriittisin kysymys biopolttoaineita käytettäessä. Karstoittumista voidaan kompensoida lämmönvaihtimien mitoituksella. Kaasukäyttöiset mikro-CHP-järjestelmät ovatkin yleisempiä. (Lommi 2006, 5.)

3 KOTITALOUKSIEN ENERGIANKULUTUS

Tässä työssä selvitetään maakaasukäyttöisen stirling mikro-chp-laitoksen soveltuvuutta kotitalouksien käyttöön Suomessa. Kulutuksen jakaantumista tarkasteltaessa pois luetaan suoralla sähkölämmityksellä varustetut taloudet.

3.1 Energiankulutuksen jakaantuminen

Kotitalouksien energiankulutus koostuu tilojen lämmityksestä, käyttöveden lämmityksestä sekä sähköenergian kulutuksesta. Energiankulutus voidaan jakaa seuraavasti: tilojen lämmitys 40–60 %, käyttöveden lämmitys 10–30 % ja kotitalous-sähkö 20–30 %. (Hoffman ym. 2004, 60-62)

Juhani Heljon artikkelissa vuoden 2010 määräysten mukainen lämmitystarve pientalouksissa on 70 kWh/m² vuodessa. Lämpimän käyttöveden kulutus on 40–80 litraa henkeä kohden vuorokaudessa. Käyttöveden lämmittämiseen kuluu energiaa 600–1500 kWh/hlö vuodessa. Kotitalous-sähkön kulutus vuodessa on nelihenkisessä perheessä 6000–8000 kWh.

Taulukossa 1 on esitetty Energiateollisuus ry:n, Motiva Oy:n ja työ- ja elinkeinoministeriön laatimasta sähkönkäyttöraportista kotitaloussähkön kulutuksen lukemia. Taulukossa P tarkoittaa prosenttipistettä, millaista sähkönkulutus on. P25 on säästeliästä sähkönkulutusta ja P50 keskimääräinen kulutus. Talouden koko 1-6 henkilöä.

Taulukko 1. Kotitaloussähkön kulutus (Motiva oy:n sähkökäyttöraportti).

Ei sähkölämmitteiset omakotitalot							
	Talouden koko	1	2	3	4	5	6
P5		1700	2700	3500	4500	5500	6500
P10		2200	3200	4100	5100	6100	7100
P15		2700	3700	4700	5700	6700	7700
P20		3100	4100	5200	6200	7200	8200
P25		3500	4500	5600	6600	7600	8600
P30		3800	4800	5900	6900	7900	8900
P35		4100	5100	6200	7200	8200	9200
P40		4400	5400	6500	7500	8500	9500
P45		4700	5700	6800	7800	8800	9800
P50		5000	6000	7000	8000	9000	10000
P55		5500	6500	7500	8500	9500	10500
P60		6000	7000	8000	9000	10000	11000
P65		6600	7700	8800	9900	11000	12000
P70		7200	8400	9600	10800	12000	13000
P75		7800	9100	10400	11700	13000	14000
P80		8400	9800	11200	12600	14000	15000
P85		9000	10500	12000	13500	15000	16000
P90		9600	11200	12800	14400	16000	17000
P95		10200	11900	13600	15300	17000	18000

3.2 Lämmitystarpeen määrittäminen kuukausitasolla

Kotitalouksien lämpimänkäyttöveden sekä kotitaloussähkön kulutuslukemia voidaan pitää kuukausitasolla suhteellisen muuttumattomina. Lämmitykseen tarvittava energia taas jakautuu epätasaisesti kulutuksen ollessa suurempi syys- ja talvikuukausina.

Lämmitystarpeen määrittämisessä käytetään paikkakuntaakohtaisia lämmitystarvelukuja. Niiden käyttö perustuu lämmityksen energiankulutuksen ja sisä- ja ulkolämpötilojen erotuksen verrannollisuuteen. Lämmitystarveluku kuukaudelle saadaan laskemalla yhteen kuukauden päivittäisten sisä- ja ulkolämpötilojen keskiarvojen erotus (kts. liite 1). Liitteeseen 1 on laskettu myös keskiarvot sekä prosenttiosuudet kokonaiskulutuksesta. Kuukausittaisiksi keskiarvojen prosenttiosuuksiksi saatiin taulukon 2 mukaisesti:

Taulukko 2. Lämmitystarpeen prosentuaalinen kuukausijakauma.

Kuukausi	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu
Prosentti	16	14,6	13,3	9,4	4,7	1	0,3	1,2	4,6	8,5	11,8	14,6

Otetaan esimerkiksi neljän henkilön perhe, joka asuu 150 m²:n omakotitalossa. Perheen energiankulutukseksi saadaan seuraavaa: neljä henkilöä kuluttaa lämmintä käytövä 50 litraa/henkilö/pv. Energian tarve vuodessa lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$Q := \frac{\rho \cdot c_p \cdot V \cdot (t_2 - t_1)}{3600} \cdot h \cdot 365$$

Q = lämmöntarve

ρ = veden tiheys (1 000 kg/m³)

V = vedenkulutus (m³)

c_p = veden ominaislämpökapasiteetti (4,2 kJ/kg°C)

t_2 = lämmitetyn veden lämpötila, tyypillisesti 55 °C

t_1 = lämmitettävän veden lämpötila, tyypillisesti 5 °C

h = henkilömäärä

3 600 = kJ -> kWh

365 päivää vuodessa

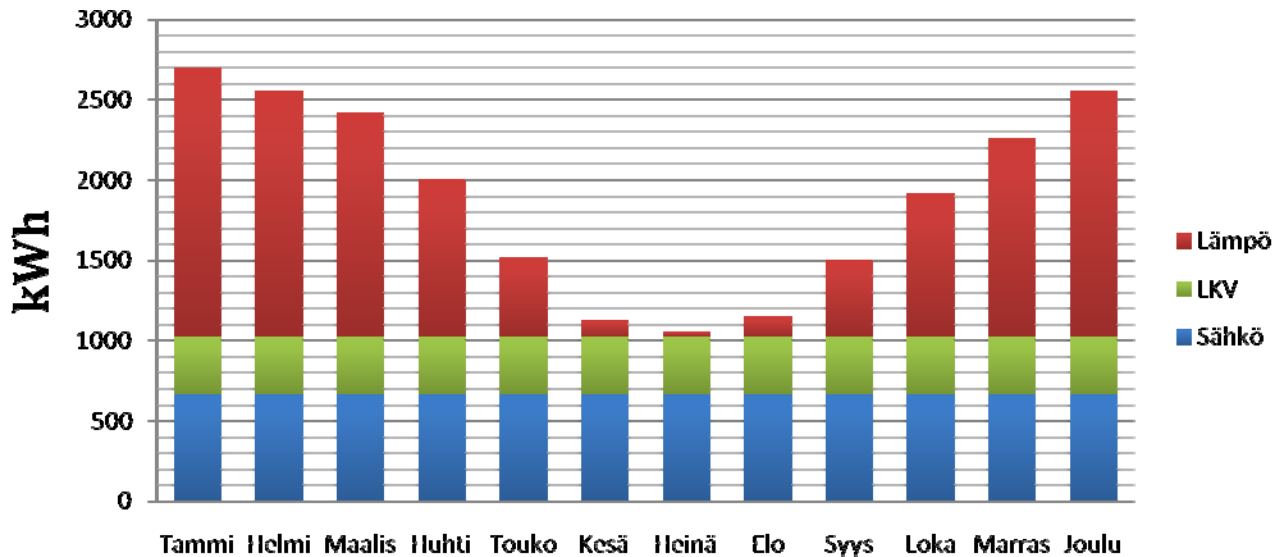
$$Q := \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \cdot 0,050 \text{m}^3 \cdot 50\text{C}}{3600\text{s}} \cdot 4 \cdot 365 = 4,258 \times 10^3 \text{ kW}$$

Sähkönkulutukseksi saadaan taulukon mukaan nelihenkisessä perheessä keskimääräisellä kulutustasolla (4, P50) 8 000 kWh vuodessa. Kuukausitasolla kulutuksen oletetaan olevan tasaista. Kulutus kuukaudessa on siis. 8 000 kWh / 12 kk = 666 kWh/kk.

Lämmitystarve vuodessa on esimerkkitapauksessa. 70 kW/m² / 12 kk * 150m² = 10 500 kWh/12kk. Kuukausitarve saadaan lämmitystarvelukujen kuukausittaisilla prosenttiosuuksien ja vuosikulutuksen tulolla taulukon 3 ja kuvan 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Esimerkkitapauksen lämmöntarpeen kuukausittainen jakautuminen.

Kuukausi	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu
Prosentti	16	14,6	13,3	9,4	4,7	1	0,3	1,2	4,6	8,5	11,8	14,6
Jakautuma	1 680	1 533	1 397	987	494	105	32	126	483	893	1 239	1 533



Kuva 3. Esimerkkikotitalouden energiankulutuksen kuukausittainen jakauma.

4 BAXI GROUP

Baxi Group on Euroopan johtavia lämmityskonserneja, markkinajohtaja Englannissa sekä Espanjassa. Konserni harjoittaa toimintaa myös Italiassa, Ranskassa ja Saksassa. Maakaasun saatavuus ja talouksien maksukyvyyn kasvu Itä- ja Keski-Euroopassa, Venäjällä, Turkissa sekä Kiinassa ajavat kasvua eteenpäin, ja Baxi Group onkin johtavia toimittajia alueella. (www.baxi.com).

Baxi Group valmistaa lämmityskattiloita niin maakaasulle, nestekaasulle kuin öljylle ja sähkölle. Yritys valmistaa myös mikro-CHP-tekniikkaa ja onkin luokan johtava valmistaja. Aurinkopaneelit, keräimet, ilma- ja maalämpöpumput, pienet biokattilat (pelletti) sekä lämminvesivaraajat kuuluvat Baxi Groupin tuotevalikoimaan. (www.baxi.com).

Ratkaisuina kotitalouksien lämmön- ja sähköntarpeeseen on Baxi Groupilla kolme vaihtoehtoa. Dachs tarjoaa energiaa pientalouksiin sekä pari- tai rivitalotalouksiin. Dachs on polttomoottoriperustainen mikro-CHP ratkaisu, tuottaen 5,5 kW sähköä sekä 12,5 kW lämpötehoa 90 - 98 %:n kokonaishyötysuhteella. Lisäpolttimella varustettuna lämpöteho saadaan kasvatettua 35 kW. (www.baxi.com).

Gamma 1.0 on maa- tai biokaasukäyttöinen polttokennoperustainen mikro-CHP-ratkaisu. Yksiköstä saadaan 1,0 kW sähkötehoa ja 1,7 kW lämpötehoa. Integroidulla apukattilalla saadaan lämpötehoa 3,5 kW - 20 kW. Sähköhyötysuhteeksi saadaan

32 %, kokonaishyötysuhteen ollessa > 96 %.(www.baxi.com). Laitteisto ei ole vielä markkinoilla, mutta se on testausvaiheessa ja tuloksia saataneen pian. Hyvän rakennussuhteen ja tuotettavan lämpöenergian pienen määrän perusteella laitteisto sopisi erittäin hyvin pieniin kotitalouksiin, ja varsinkin passiivitaloihin ja matalaenergiatalouksiin.

Ecogen on kotitalouskäyttöön suunniteltu maakaasukäyttöinen stirlingperustainen mikro-CHP ratkaisu. Stirling-moottori on mäntätyypiltään vapaa (free piston). Tässä työssä tarkastellaan tämän mikro-CHP-ratkaisun soveltuvuutta suomalaisiin pientalouksiin. Ecogen tuottaa 0,4 kW -1,0 kW sähköä riippuen polttimen toiminnasta. Polttimen toimintaa ohjaa lämmöntarve. Polttimen minimiteho on 3 kW ja maksimi 6 kW. Lämmöntarpeen ollessa suurempi saadaan lisäpolttimelta lämmitystehoa 4 kW - 18 kW lisää. Sähköntuotanto on sidottu polttimen toimintaan, jolloin etenkin korkea veden paluulämpötila (> 65 °C) vähentää sähköntuotantoa merkittävästi. Lämmitysjärjestelmä tuleekin mitoittaa tarkasti. Sähköhyötysuhde on 16,666 % ja kokonaishyötysuhde 92 %.

5 SOVELTUVUUS SUOMEN OLOIHIN

Tarkastellaan ensin Ecogenin suoritusarvoja moottorin maksimiteholla (6 kW) olettaen, että moottori käy 24h / vrk. Tuotoiksi saadaan taulukossa 4 esitetyt lukemat:

Taulukko 4. Tuotantoarvot maksimiteholla.

	Vuorokaudessa	Kuukaudessa	Vuodessa
Lämpöä	144 kWh	4320 kWh	52 560 kWh
Sähköä	24 kWh	720 kWh	8760 kWh

Työssä ei ole käsitelty mitään oikeaa taloutta, vaan esimerkkitalouden kulutuslukemat ovat keskimääräisiä kulutusarvoja. Esimerkkitalouden 1 lämmitystarpeeksi oletetaan 70 kWh/m²/a, joka on vuoden 2010 määräysten mukainen. Esimerkkitalouden koko on 4 henkeä, lämpimänkäyttövedentarve 60 l/henk/vrk = 5 110 kWh vuodessa, lämmitettävä pinta-ala on 150m² = 10 500 kWh vuodessa ja kotitaloussähkönkulutus 8 000 kWh vuodessa. Oletetaan, että tarkoitus olisi olla omavarainen sähkön suhteen. Verrataan kulutuslukumia ecogenin lukemiin vuositasolla. Lämmitystarpeeseen lasketaan tilojen ja käyttöveden lämmittäminen. Seuraavasta taulukosta nähdään selkeästi lämmön ylituotanto.

Taulukko 5. Tuotanto maksimiteholla sekä energian tarve.

	Lämpö	Sähkö
Tuotettu	52 560	8760
Tarve	15 610	8000
	36 950	760

Kotitaloussähkön kulutus saadaan katettua ja vuositasolla jää vielä käyttämättä 760 kWh. Lämpöä menee hukkaan 36 950 kWh, mikä tekee polttoainekustannuksissa $(36\,950) / 0,76 * 6,53$ snt/kWh = 3 174 euroa. Perhe säästäisi sähkönostossa 8 000 kWh * 15 snt/kWh = 1 200 euroa, mutta se ei kata hukkalämmössä menetettyjä euroja.

Seuraavassa on esimerkki vanhemmasta, ei niin eristetyssä talossa (150 kWh/m²/a). Lämmitystarve nousee pinta-alan ollessa 150 m² 22 500 kWh/a:ssa (esimerkkitalous 2) ja pinta-alan ollessa 300 m² 45 000 kWh/a:ssa (esimerkkitalous 3). Kotitalouden lämpimän käyttöveden kulutus on 70 l/henk/vrk ja perheeseen kuuluu 5 henkeä. Sähköä kuluu 8 800 kWh/a. Lämmitystarpeen ero tulee selkeästi esille taulukossa.

Taulukko 6. Esimerkkitalouksien energian tarve.

	Lämpö	Sähkö
Tuotettu	52 560	8760
Tarve 150m²	29 952	8800
Tarve 300m²	52 452	8800

Vuositasolla tarkasteltuna Ecogenillä saavutetaan paras mahdollinen hyöty kun kotitaloudessa on suuri suhteellisen tasainen lämmöntarve, johtuen suuresta pinta-alasta, kehnosta eristyksestä tai vedenkäytöstä. Tämä ei kuitenkaan ole todenmukaista, koska lämmöntarve vaihtelee eri kuukausina, ja esimerkiksi heinäkuussa ei juurikaan ole lämmitystarvetta muuta kuin käyttövedelle. Lisäksi stirling-moottorin maksimisähköntuotanto saavutetaan poltintehon ollessa 6 kW. Sähköntuotanto pienenee kesäksi, ja talvella joudutaan käyttämään lisäpoltinta, joka ei kuitenkaan lisää sähköntuotantoa.

Tarkastellaan toimintaa seuraavaksi kuukauden tarkkuudella, kolmen esimerkkitalouden avulla. Oletetaan, että tärkeimpänä asiana on taata riittävä lämpötila ja lämpimän käyttöveden riittävyys ympärivuoden sekä minimoida hukkaan menevä lämpöenergia. Tuotetaan Ecogenillä tarvittava lämpöenergia mahdollisimman tarkasti joka kuukaudelle poltinta säätämällä. Tarkastellaan, paljonko on tuotettu sähköä. Poltintehon ollessa 6 kW on sähköntuotanto 1 kW. Suhdeluvuksi saadaan $1 / 6 = 0,1666$.

$$n(Q_{kk} + Q_{LKV}) = Q_{stuot}$$

Q_{kk} = Kuukauden lämmitystarve

Q_{LKV} = Lämpimän käyttöveden tarve

n = Ecogenin tuottaman sähköenergian suhde lämmöntuotantoon

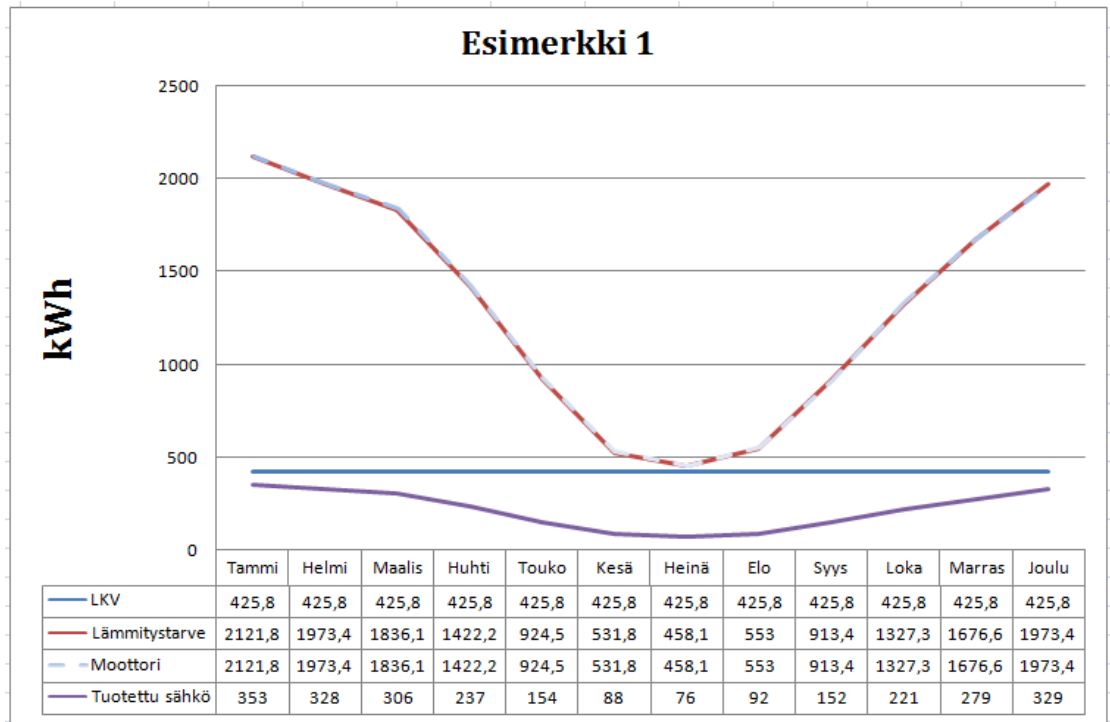
Q_{stuot} = Sähköntuotanto

Kulutusarvot jakautuvat seuraavan taulukon mukaisesti:

Taulukko 7. Esimerkkitalouksien energiankulutus.

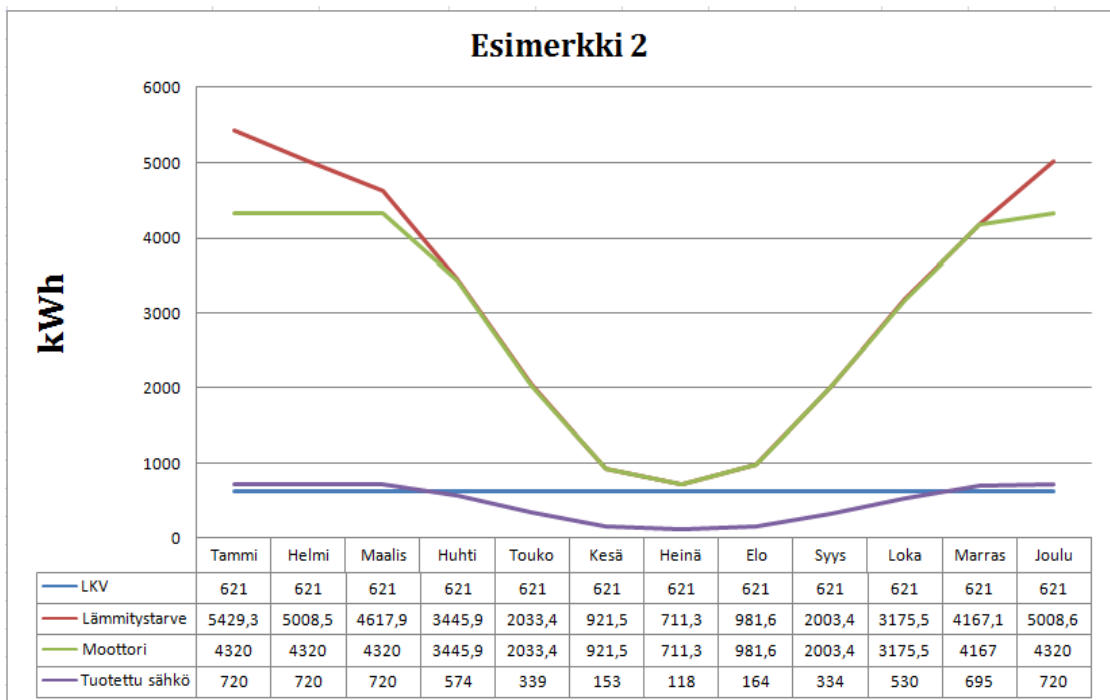
	Pinta-ala	kWh/m ² /a	sähköntarve/a	LKV/a
Esimerkki 1	150	70	8000	5110
Esimerkki 2	150	150	8800	7452
Esimerkki 3	300	150	8640	7542

Esimerkkitalous 1 on sekeästi energiatehokkaampi lämmityksen kannalta kuin esimerkkitaloudet 2 ja 3. Kuvasta 4 nähdään sähköntuotannon riippuvuus lämmöntarpeesta. Säästöt jäävät pieneksi (kts. liite 2). Kuvasta nähdään lisäpolttimen käyttötarve talvikuukausina ja energiantarpeen jakautuminen eri kuukausille. Kuvassa käyrä moottori kuvaa stirling-moottorin tuottamaa lämpötehoa maksimiteholla lämmöntarpeen puitteissa. Lämmitystarve kuvaa lämpimän käyttöveden sekä tilojenlämmitykseen tarvittavien energioiden summaa.



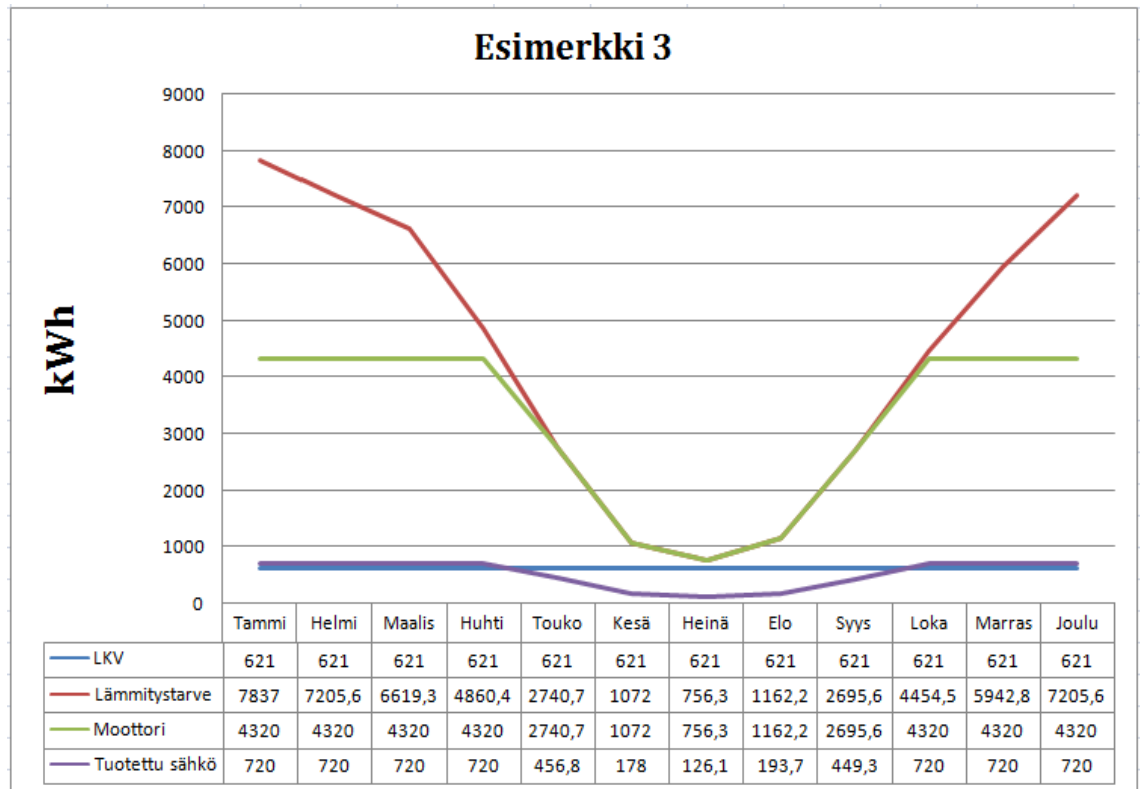
Kuva 4. Esimerkkitalous 1.

Toisen Toisen esimerkkitalouden, kuvassa 5, kohdalla joudutaan talvikuukausina käyttämään lisäpoltinta. Talvikuukausina vastaavasti sähköntuotanto on maksimissaan (kts. liite 3). Säästöä kertyy enemmän verraten ensimmäiseen esimerkkiin.



Kuva 5. Esimerkkitalous 2.

Tarkastellaan kuukausitasolla esimerkkitalouden 3 arvoja. Käyttöveden lämmittämiseen tarvittavan energian ja kotitaloussähkön tarpeen kuukausitasolla oletetaan olevan vakiot. Kotitaloussähkön kulutuksen oletetaan vertailun vuoksi olevan 720 kWh/kk eli 8 640 kWh/a, joka on keskimääräistä kulutusta 5-henkisessä perheessä hieman pienempää. Lisääntynyt lämmitystarve näkyy säästönä kun moottori käy täydellä teholla pitempään ja saadaan tuotettua myös enemmän sähköä (kts. liite 4). Kuvassa 6 nähdään lisääntynyt lisäpolttimen käyttö.



Kuva 6. Esimerkkitalous 3.

Ecogen tarkasteltuna kuukauden tarkkuudella vaikuttaisi soveltuvan parhaiten vanhempiin, suuriin tai kehnosti eristettyihin kohteisiin tai kohteisiin, joissa on suuri lämpimänkäyttöveden kulutus kuten paritaloissa. Moottori tuottaa 6 kW:a kohden 1 kW sähköä sähköhyötysuhteen jäädessä kovin pieneksi.

6 TAKAISINMAKSUAIKA

Laitevalmistaja ei vastannut pyyntöihin laitteen hinnasta tai tarkemmista tiedoista, mutta keskustelupalstojen mukaan Ecogen olisi maksanut 3 700 puntaa eli noin 4 121 euroa, laiteasennuksineen 6 000 puntaa eli 6 682 euroa (valuuttakurssit 3.5 2011). Asennuksessa maksaa kiertovesipumppu, sähkömittarin vaihto ja sähkötyöt. Mittari

vaihdetaan, koska Englannissa on mahdollista, ainakin paikoittain, syöttää ylimääräinen tuotettu sähköenergia verkkoon ja saada siitä korvausta. Tällaisesta johtuvien sähkökötöiden kustannukset voidaan jättää huomioimatta Suomessa. Joitakin kustannuksia varmasti kertyy. Varmaa tietoa asennuskustannuksista ei ole, koska laitetta ei ole asennettu Suomessa. Oletetaan laitteen ja asennuksen yhteishinnaksi 6000 euroa.

Takaisinmaksuaikaa arvioitaessa oletetaan, että kotitalous on jo valmiiksi kytketty maakaasuverkkoon, eikä siis verkkoon kytkeytymisestä tule lisäkustannuksia. Huomioon on otettava myös sähköntuotantoon kuluva maakaasun osuus.

Ecogen tuottaa 6 kW:n lämpöteholla 1 kW:n sähköä kokonaishyötysuhteen ollessa 92 %, jolloin polttoaineteho on 7.6 kW ja 0.6 kW menee hukkaan. Sähköntuotantoon kuuluu 1 kW maakaasua 1 kW:ia sähköä kohden. Maakaasun hinnaksi otetaan Gasum Oy:n 6.53 snt/kWh.

Esimerkkitalouden 1 lämmöntarve jää pieneksi verraten Ecogenin tuotantoon. Tämä näkyy takaisinmaksuajassa. Vuotuisesti säästöksi sähkönostosta kertyi 392 euroa, kun sähkön hinnaksi otetaan 15 snt/kWh. Takaisinmaksuajaksi saadaan, jos ei huomioida mahdollisia korkoja 35,2 vuotta seuraavalla kaavalla:

$$\begin{aligned} \text{Kustannukset} &:= 6000 \\ \text{Säästö} &:= 392 \\ \text{TMA} &:= \frac{\text{Kustannukset}}{\text{Säästö} - \text{Kulutus}} \\ \text{Kulutus} &:= \text{Säästö} - \left(\frac{\text{Säästö}}{0.15} \cdot 0.0653 \right) \\ \text{TMA} &= 35.16 \end{aligned}$$

Esimerkkitalouden 2 lämmitysenergiatarve oli ensimmäistä esimerkkitaloutta huomattavasti suurempi, jolloin saadaan myös enemmän säästöä. Vuotuisesti säästöksi sähkönostosta kertyi 926 euroa (liite 3). Takaisinmaksuajaksi saadaan noin 16 vuotta:

$$\text{Kustannukset} := 6000$$

$$\text{Säästö} := 864$$

$$\text{TMA} := \frac{\text{Kustannukset}}{\text{Säästö} - \text{Kulutus}}$$

$$\text{Kulutus} := \text{Säästö} - \left(\frac{\text{Säästö}}{0.15} \cdot 0.0653 \right)$$

$$\text{TMA} = 15.952$$

Esimerkkitalouden 3 lämmitysenergian tarve oli huomattavasti suurempi kuin esimerkkitalouden 2. Saatava säästö ei kuitenkaan kasva samassa suhteessa, osin koska lisäpolttimella joudutaan tuottamaan enemmän energiaa. Takaisinmaksuajaksi saadaan 14,3 vuotta seuraavalla kaavalla:

$$\text{Kustannukset} := 6000$$

$$\text{Säästö} := 962$$

$$\text{TMA} := \frac{\text{Kustannukset}}{\text{Säästö} - \text{Kulutus}}$$

$$\text{Kulutus} := \text{Säästö} - \left(\frac{\text{Säästö}}{0.15} \cdot 0.0653 \right)$$

$$\text{TMA} = 14.327$$

Säästöä kertyy myös CO₂-päästöissä. Maakaasun ominais-CO₂-päästö on 500 g/kWh. Esimerkkitalous 1 säästää CO₂-päästöissään 2 615 kWh * 500 g/kWh = 1 307,5 kg/a. Esimerkkitalous 2:n tapauksessa säästöjä syntyy 3 221,9 kg/a ja esimerkkitalous 3 tapauksessa 3 321,9 kg/a.

Valmistajan mukaan Ecogen maksaa itsensä takaisin noin 8 vuodessa, hiilidioksidipäästöjä puolestaan saadaan vähennettyä 3 000 kg/a. Parhaimmat tulokset saavutettaneen suuremmissa talouksissa ja suunnitteleamalla lämmitys järjestelmä mahdollisim-

man tarkasti. Kiinteistöön kannattaa tehdä ensin todellisen energiankulutuksen kartoitus kartoittamalla kaikki häviöt. Tarkat ohjeet löytyvät esimerkiksi ympäristöministeriön kautta.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Stirling perustainen mikro-CHP-laitteisto voisi tarkastelun perusteella olla varteenotettava keino vähentää kotitalouden energiamenoja. Kohteen lämmöntarve tulisi olla melko suuri, jotta saavutettaisiin mahdollisimman suuri hyöty ja lyhyt takaisinmaksuaika. Uusissa passiivi- ja matalaenergia rakennuksissa laitteesta saatava hyöty jää varsin pieneksi. Kyseisen laitteiston sähköhyötysuhde on arveluttavan pieni verraten tutkimaani aineistoon. Sähköhyötysuhteen kasvattaminen esimerkiksi 30 %:iin, nostaisi laitteen kannattavuutta suuresti. Aineiston perusteella sähköhyötysuhde tulisi olla luokkaa 20 % - 50 %.

Tarkempia tutkimuksia kannattaisi tehdä vuorokausitasolla, koska lämmön- ja sähköntarve vaihtelee varmasti paljon vuorokauden sisällä. Kulutushuippuja ovat todennäköisesti aamut sekä iltapäivät. Vastaavasti polttin tulisi ohjelmoida siten, että sen toiminta ajoittuisi kulutushuippujen kohdalle. Valmistajan Internet-sivujen mukaan laitteesta löytyy ohjausmahdollisuuksia polttimen käytölle. Sähköntuotanto jää todennäköisesti pienemmäksi tarkasteltaessa toimintaa vuorokausitasolla. Sähköenergian talteenotto tai hyödyntäminen esimerkiksi käyttöveden lämmittämiseen vastuksen avulla hyödyn parantamiseksi tulee tässä tilanteessa varmasti aiheelliseksi, koska lämmön ja sähkön kulutus eivät todennäköisesti kohtaakaan ympäri vuorokauden.

Sähköntuotantoa heikentää myös osakuormalla käyttö. Tämän takia olisi aiheellista kokeellisesti selvittää laitteen toimintaa. Stirling-moottorille tyypillisesti osakuormalla ajo ei suuresti alenna hyötysuhdetta, mutta koska ei ole tiedossa kuinka logiikka ohjaa polttimen toimintaa, jää saatava sähköenergiatuotanto arvailujen varaan. Työssä on polttimen oletettu toimivan aina 6 kW:n teholla päällä ollessaan.

Stirling-perustaista tekniikkaa kehitetään koko ajan, ja se tulee varmasti yleistymään energiansäästöpainneiden kasvaessa. Stirling perusteista tekniikkaa voisi periaatteessa näkyä vielä autoteollisuudessakin stirling-moottorin hyötysuhteen ollessa kaksinkertainen polttomoottoreihin nähden. Kierrosherkkyys ja sen säädeltävyys estävät stir-

ling-moottorin käytön nykyisen polttomoottorin tapaan, mutta se voisi pyörittää generaattoria ja tuottaa siten energiaa sähkömoottoreille.

Moottorin takaisinmaksuaika kasvaa lähemmässä tarkastelussa todennäköisesti pidemmäksi, mutta jos näköpiirissä on lämmitysjärjestelmän uusiminen, kannattaa vaihtoehtoa harkita. Kysymykseen tulee myös, kuinka suuri painoarvo annetaan hukkaenergian hyödyntämiselle ja hiilidioksidipäästöjen pienentämiselle.

LÄHTEET

Aaltonen, J. & Ukkonen, J. 2008. Pienet alle 4 MW yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotomahdollisuudet. Kandinaatintyö ja seminaari. Saatavissa:

www.doria.fi/handle/10024/39675 [viitattu 1.5.2011].

Corria, M., Cobas, V. & Lora, E. 2005. Perspectives of stirling engine use for distributed generation in Brazil. Saatavissa: www.sciencedirect.com [viitattu 4.5.2011].

Darlington, R. & Strong, K. 2005. Stirling and hot air engines. Wiltshire: Crowood.

Heijo, J. 10.6.2010 Artikkelointialojen lämmityksestä. Saatavissa:

www.rakennaoykein.fi [viitattu 10.5.2011].

Hoffman, K., Ohlström, M., Hongisto, M., Ruska, M. & toimituskunta. Edita: Energia Suomessa.

Kuosa, M., Kaikko, J. & Koskelainen, L. 2006. The impact of heat exchanger fouling on the optimum operation and maintenance of the stirling engine. Saatavissa:

www.sciencedirect.com [viitattu 4.5.2011].

Lommi, M., 2006. Stirling-perustaisen mikro-CHP-laitteiston prosessilaskenta ja lämmönvaihtimen mitoitus. Pro gradu –tutkielma. Jyväskylän yliopisto.

Lämmitystarveluvut. 1971-2000. Saatavissa: www.ilmatieteenlaitos.fi [viitattu 6.5.2011].

Onovgiona, H. & Ugurdal, V. 2004. Residential cogeneration systems: review of the current technology. Saatavissa: www.sciencedirect.com [viitattu 10.5.2011].

Stirling-moottorin suoritusarvot ja yrityksen tietoja saatavissa:

www.baxigroup.com/products [viitattu 4.5.2011].

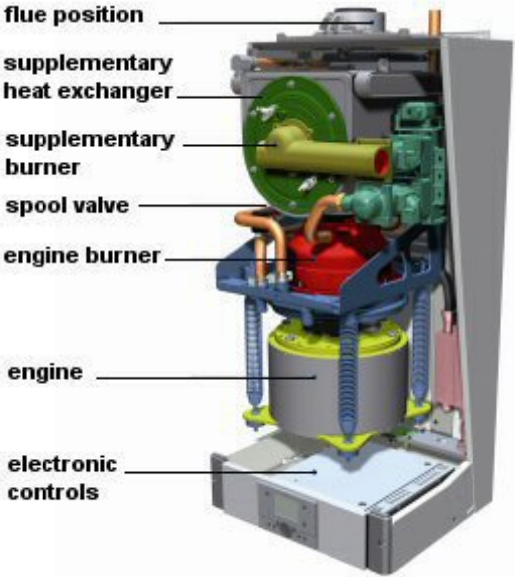
Sähkökäyttöraportti. 9.6.2010. Saatavissa: www.energia.fi [viitattu 2.5.2011].

Vertailupaikkakunta	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Vuosi
Maarianhamina	599	577	559	424	216	36	7	22	160	320	433	543	3 896
Helsinki Kaisaniemi	657	619	574	404	169	12	2	15	144	331	468	594	3 989
Turku	667	629	582	399	170	19	4	23	170	352	488	612	4 115
Helsinki-Vantaa	691	647	593	402	165	18	4	27	185	364	502	631	4 229
Pori	680	639	589	413	189	25	5	29	195	364	500	627	4 255
Tampere-Pirkkala	734	681	614	411	186	29	6	39	211	382	537	672	4 502
Lahti Laune	737	686	615	419	172	25	6	36	215	394	533	674	4 512
Vaasa	732	667	620	445	215	33	9	47	221	397	535	667	4 588
Lappeenranta	771	702	624	425	177	26	6	34	204	404	548	691	4 612
Kuopio	820	748	657	468	213	34	8	43	216	415	579	742	4 943
Jyväskylä	789	727	650	464	217	43	13	63	251	427	576	725	4 945
Joensuu	837	762	670	479	231	43	12	55	237	434	598	759	5 117
Oulu	829	749	674	484	263	49	11	62	243	442	606	758	5 170
Kajaani	867	783	695	502	260	59	21	82	266	460	630	795	5 420
Sodankylä	964	840	759	570	358	113	55	150	330	545	742	911	6 337
Ivalo	947	823	752	575	387	153	76	157	328	545	744	894	6 381
Keskiarvo	770,0625	704,9375	639,1875	455,25	224,25	44,8125	15,3125	55,25	223,5	411	563,6875	705,9375	4 813
Prosentti	16	14,6	13,3	9,4	4,7	1	0,3	1,2	4,6	8,5	11,8	14,6	100

esimerkki 2	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu	Yhteensä
Kuukausi	16	14,6	13,3	9,4	4,7	1	0,3	1,2	4,6	8,5	11,8	14,6	100
Prosentti													
Jakautuma kWh	4792,3	4372,9	3983,6	2815,5	1407,7	299,5	90	359,4	1377,8	2546	3534,3	4373	29952
LKV kWh	621	621	621	621	621	621	621	621	621	621	621	621	7452
Lämmöntarve kWh	5429,3	5008,5	4617,9	3445,9	2033,4	921,5	711,3	981,6	2003,4	3175,5	4167,1	5008,6	37504
Ilman lisäpoltinta kWh	4320	4320	4320	3445,9	2033,4	921,5	711,3	981,6	2003,4	3175,5	4167	4320	34719,6
Tuotettu sähkö kWh	720	720	720	574	339	153	118	164	334	530	695	720	5787
Lisäpolttimella kWh	1109,3	688,5	297,9	0	0	0	0	0	0	0	0	688,6	2784,3
Ostosähkö kWh	13,3	13,3	13,3	159	394	580	615	569	399	203	38	13,3	3010,2
säästö sähköstä €	108	108	108	82	51	23	18	25	50	80	103	108	864



Ecogen (www.baxi.com)



Ecogen (www.baxi.com)