

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Sanna Pasanen

ENERGIANTUOTANTOVAIHTOEHTOJEN VERTAILU, JOUSENPUISTON UUSI ASUINALUE

Työn tarkastajat: Professori TkT Esa Vakkilainen

TkT Mika Luoranen

Työn ohjaajat: myyntipäällikkö ins. Kalevi Hyvärinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Sanna Pasanen

Energiantuotantovaihtoehtojen vertailu, Jousenpuiston uusi asuinalue

Diplomityö

2011

93 sivua, 24 kuvaa, 22 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Tutkijaopettaja, TkT Mika Luoranen

Hakusanat: alueellinen lämmöntuotanto, uusiutuva energia, matalaenergiarakennus, biolämpökattila, maalämpöpumppu, CHP, kaukolämpö

Tämän diplomityön tavoitteena oli vertailla paikallisia energiantuotantovaihtoehtoja erityisesti lämmöntuotantoon painottuen. Tarkastelu sovitettiin uuden matalaenergiaraken- tamista vastaavan kerrostaloasuinalueen tarpeisiin. Näkökulmana olivat sekä taloudelli- suus että hiilidioksidipäästöt. Yksityiskohtaisemman tarkastelun kohteena olivat maa- lämpö, alueellinen biolämpölaitos sekä alueellinen pien-CHP-laitos. Perusvaihtoehtona tutkittiin kaukolämpöä. Kaikkiin vaihtoehtoihin kuului myös kapasiteetiltaan rajoitettu jäähdytys. Tulosten mukaan kokonaistaloudellisin vaihtoehto oli maalämpö yhdistettynä kaukolämpöön. Tässä vaihtoehdossa peruslämpö tuotetaan maalämmöllä, mutta huippu- lämpöön sekä käyttöveden lämmitykseen käytetään kaukolämpöä. Ratkaisulla saadaan aikaan myös päästövähennyksiä kaukolämpöön verrattuna. Tulosten mukaan pienimmät päästöt olivat pien-CHP-biovoimalaitoksella. Toisaalta nykyisillä sähkön myyntihin- noilla pienimuotoinen yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto ei pysty kilpailemaan kus- tannusrakenteensa puolesta muiden tutkittujen vaihtoehtojen kanssa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Energy Technology

Sanna Pasanen

Comparing energy production options for a new district

Master's Thesis

2011

93 pages, 24 figures, 22 tables and 1 appendices

Examiners: Professor D.Sc. (Tech) Esa Vakkilainen
D.Sc. (Tech.) Mika Luoranen

Keywords: distributed heat production, renewable energy, low energy building, biomass boiler, geothermal heat pump, CHP, district heating

The purpose of this Master's Thesis was to compare different distributed heat production systems based on renewable energy resources. Geothermal heat, biomass boilers as well as combined heat and power generation of small scale were studied. District heating was defined as a base option. The alternatives were planned to cover the heating demand of the case study area, which consist of low energy apartment buildings. The alternatives were assessed concerning economic feasibility and carbon dioxide emissions. According to the results the most feasible alternative was geothermal heat option. In this option the base load of the heat is produced with geothermal pumps. The peak load of heat as well as the heating of domestic hot water is covered by district heating. This option also has lower carbon dioxide emissions than the district heating alternative. Biomass based small scale CHP had the lowest carbon dioxide emissions. It was found, however, that small scale CHP is not yet feasible compared with the other assessed options. The situation could change if the price of electricity continues to rise faster than the prices of biomass fuels.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu YIT Building Systemsin toimeksiannosta 1.5.2011–30.11.2011 välisenä aikana. Työskentelypaikkana oli Lappeenrannan YIT:n toimipiste. Työn ohjaajina ovat toimineet Lappeenrannan teknillisen yliopiston professori Esa Vakkilainen sekä tutkijaopettaja Mika Luoranen. YIT:n puolesta työtä on ohjannut myyntipäällikkö Kalevi Hyvärinen.

Ensinnäkin haluan kiittää Kalevi Hyväristä mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta aiheesta sekä asiantuntevasta ohjauksesta. Lisäksi kiitokset kuuluvat työni tarkastajille professori Esa Vakkilaiselle ja tutkijaopettaja Mika Luoraselle kommenteista ja keskusteluista. Työskentelypaikan eli Lappeenrannan YIT-keskuksen työporukkaa haluan kiittää mukavasta ja rennosta työskentelyilmapiiristä.

Erityiskiitos kuuluu kuitenkin vanhemmilleni ja veljelleni, jotka ovat jaksaneet kannustaa minua ja uskoa minuun niin aiemmissa opinnoissani kuin diplomi-insinöörin opinnoissanikin.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	2
MÄÄRITELMÄT	3
1 JOHDANTO	6
2 RAKENNUSTEN JA ASUINALUEIDEN ENERGIANKULUTUS	7
2.1 Lämpöenergian tarve	8
2.2 Mitoituslämpöteho	9
2.3 Rakenteiden ja tekniikan vaikutus lämpöenergiantarpeeseen	10
2.4 Jäähdytysenergian tarve.....	13
2.5 Sähköenergian tarve	14
2.6 Rakennusten kokonaisenergiankulutus ja kiristyvät energiatehokkuusmääräykset...	15
2.7 Asuinalueen energiankulutukseen liittyvät CO ₂ -päästöt.....	17
3 UUDEN ASUINALUEEN ENERGIATUOTANTOVAIHTOEHDOT	18
3.1 Kaukolämpö.....	18
3.2 Sähkölämmitys.....	22
3.3 Aurinkoenergia	23
3.3.1 Passiivinen aurinkolämpö	23
3.3.2 Aktiivinen aurinkolämpö	24
3.3.3 Aurinkojäähdytys	27
3.3.4. Aurinkopaneelit.....	27
3.3.5. Aurinkoenergian taloudellisuus	29
3.4 Tuulivoima.....	30
3.5 Lämpöpumput	32
3.5.1 Maalämpöpumput.....	34
3.5.2 Vesistölämpöpumput	38
3.5.2 Ilmalämpöpumput	39
3.6 Biomassalämpökattilat	40
3.7 Termisen energian varastointi.....	44
3.8 Jäteveden lämmöntalteenotto.....	45
3.9 Pienimuotoinen CHP.....	46
3.9.1 Pientuotannon liittäminen sähköverkkoon	47

3.9.2 Polttomoottorivoimalat.....	49
3.9.3 Polttokennot.....	52
3.9.4 Höyryturbiinit ja -koneet.....	52
4 LÄMMÖNJAKO.....	54
4.1 Patterilämmitys ja yhdistelmälämmitys.....	54
4.2 Lattialämmitys.....	55
4.3 Ilmanvaihtolämmitys.....	55
4.4 Matalalämpötilaverkot.....	56
5 TAPAUSKOHTAINEN TARKASTELU -JOUSENPUISTO.....	58
5.1 Tietoa alueesta.....	58
5.2 Alueen rakennusten energiankulutus.....	60
5.3 Alueen rakennusten lämmitystehon tarve.....	63
6 ENERGIANTUOTANTOVAIHTOEHTOJEN VERTAILU KOHTEESEEN MITOITETTUNA.....	67
6.1. Kaukolämpö.....	68
6.2 Alueellinen biokattila.....	69
6.3 Alueellinen CHP-voimalaitos.....	71
6.4 Maalämpö ja vapaajäähdytys.....	72
7 KUSTANNUKSET.....	75
7.1 Kaukolämmön kustannukset.....	76
7.2 Aluelämpölaitoksen kustannukset.....	76
7.3 Alueellisen CHP-laitoksen kustannukset.....	77
7.4 Maalämpövaihtoehdon kustannukset.....	77
7.5 Vaihtoehtojen kustannusvertailu.....	78
8 CO ₂ -PÄÄSTÖVERTAILU.....	79
9 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	83
LÄHTEET.....	85
LIITTEET	

SYMBOLILUETTELO

Φ	Lämmitysteho / Lämpövirta	[W]
Q	Energiantarve	[Wh]
t	Aika	[h]
G	Lämpötilariippuva tehon osa-alue	[W/°C]
η	Hyötysuhde	[-]
n_{50}	Ilmanvuotoluku	[1/h]
P_e	Mitoitusteho	[W]
C_p	Tuuliturbiinin tehokerroin mitoitustuulennopeudella	[-]
ρ	Tiheys	[kg/m ³]
A	Pinta-ala	[m ²]
w	Nopeus	[m/s]
ε_L	Lämpöpumpun lämpökerroin	[-]
q_m	Massavirta	[kg/s]
h	Ominaisentalpia	[kJ/kg]
c_p	Ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa	[kJ/kgK]
V	Tilavuus	[m ³]
T	Lämpötila	[°C] [K]

MÄÄRITELMÄT

Aluelämpöverkko	Alueellinen lämpöverkko, jossa paikallisesti tuotettu lämpöteho siirretään käyttäjille.
Aurinkokeräin	Aurinkolämpöjärjestelmän osa, jolla osa auringon säteilystä muunnetaan lämpövirraksi
Aurinkopaneeli	Aurinkosähköjärjestelmän osa, joka koostuu aurinkokennoista, lasilevystä ja alumiinikehyksestä. Aurinkokennossa osa auringon säteilystä muunnetaan sähkövirraksi
Biolämmityskontti	Lämpölaitoksen tarvitsema tekniikka ja varusteet ovat valmiiksi asennettuna. Sijoituskohteessa tehdään vesi- ja lämmitysputkien liitostyöt ja sähkökytkennät.
Bruttoala	Rakennuksen kaikkien tilojen ulkoseinien ulkopintojen rajaama kerrostasojen pinta-alojen summa. Yksikkö brm ²
Kerrosala	Rakennuksen bruttopinta-ala eli ulkoseinät mukaan lukien. Luvussa on huomioitu vain käyttötarkoituksen mukainen pinta-ala. Yksikkö kem ²
CHP	Yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto
CO ₂ -päästökerroin	Tietyn energiamuodon aiheuttama ilmakehään emittoituva CO ₂ -määrä suhteutettuna tuotetun tai hankitun energian määrään
E-luku	Rakennuksen vuotuinen ostoenergia lämmitettävää nettoalaa kohden painotettuna käytetyn energiantuotantomuodon kertoimella, fossiilisilla polttoaineilla tuotetulle energialle kerroin on 1. Mikäli käytetään eri energiamuotoja, E-luku saadaan lasquemalla eri energiantuotantomuotojen painotetut arvot yhteen

Energiantarve	Koostuu tilojen lämmitystarpeesta (vaipan johtumishäviö, vuotoilma ja ilmanvaihto), käyttöveden lämmitystarpeesta, sähköenergiantarpeesta ja jäähdytystarpeesta
Energiankulutus	Koostuu järjestelmien siirtämästä lämpöenergias- ta, sähköenergiasta ja jäähdytysenergiasta sekä jär- jestelmien häviöistä. Kulutus siis tarkoittaa ener- gian syöttöä teknisiin järjestelmiin tyydyttämään energiantarvetta.
Hake	Koneellisesti hakettua puuta, jonka raaka- aineena voi olla latvusmassa, sahapinnat tai muu puumassa. Mahdollistaa puulämmityksen automa- tisoinnin lämpökeskuksissa.
Hyödynjakomenetelmä	Yhdistetyn lämmön ja sähköntuotannon hyöty jae- taan kummallekin hyödykkeelle vaihtoehtoisten energianhankintakustannusten suhteessa
Energiamenetelmä	Yhdistetyn lämmön ja sähköntuotannon hyöty jae- taan tuotettujen energiamäärien suhteessa
Ilmanvuotoluku, n_{50}	Kertoo, kuinka monta kertaa rakennuksen ilmati- lavuus vaihtuu tunnissa vuotoreittien kautta 50 Pa:n paine-erolla
Lämmönläpäisykerroin	Lämpövirran tiheys metrin paksuisen tasa-aineisen ainekerroksen läpi yhden Kelvinin lämpötilaerolla
Matalaenergiatalo	Rakennuksen tilojen ostoenergian ominaiskulutus ja nettoenergian ominaistarve ovat välillä 26–50 kWh/m ² ,a
Passiivitalo	Rakennuksen tilojen ostoenergian ominaiskulutus ja nettoenergian ominaistarve ovat alle 25 kWh/m ² ,a

Pelletti	Sahanpurusta, kutterin lastusta ja hiontäpölystä puristettu, halkaisijaltaan 8–12 mm:n ja pituudeltaan 10–30 mm:n kokoinen sylinterinmuotoinen polttoaine
Ostoenergia	Energia, joka ostetaan rakennukseen sähköverkosta, kaukolämpöverkosta, kaukojäähdytysverkosta tai polttoaineena
Rakennusaste	Voimalaitoksen sähkötehon suhde lämpötehoon
U-arvo	Keskimääräinen lämmönjohtavuus esimerkiksi eristeellä
Uusiutuva omavaraisenergia	Kiinteistöön kuuluvalla laitteistolla paikallisista uusiutuvista energialähteistä tuotettu uusiutuva energia, lukuun ottamatta uusiutuvia polttoaineita. Uusiutuvaksi omavaraisenergiaksi luetaan esimerkiksi aurinkokeräimillä ja maalämpöpumpulla tuotettu lämpöenergia.

1 JOHDANTO

Suomen pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian tavoitteiden toteutuminen edellyttää merkittäviä toimia päästöjen vähentämiseksi ei-päästökauppasektorilla. Rakennusten energiankäyttöä tulee tehostaa ja uusiutuvan energian osuutta lisätä. Asuin- ja palvelurakennusten lämmitys vie merkittävän osan kokonaisenergian kulutuksesta valtakunnallisesti, joten tähän osa-alueeseen kohdistuvilla uudistuksilla voidaan saada merkittäviä päästövähennyksiä aikaan.

Uutta, vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä tuottavaa teknologiaa alueellisessa lämmöntuotannossa on olemassa ja tekniikan kehittyessä myös sen kustannustehokkuus on parantunut. Onkin olemassa tarve saada tietoa alueellisten lämmöntuotantovaihtoehtojen taloudellisuudesta ja teknisestä soveltuvuudesta verrattuna tavanomaiseen kaukolämmitysvaihtoehtoon.

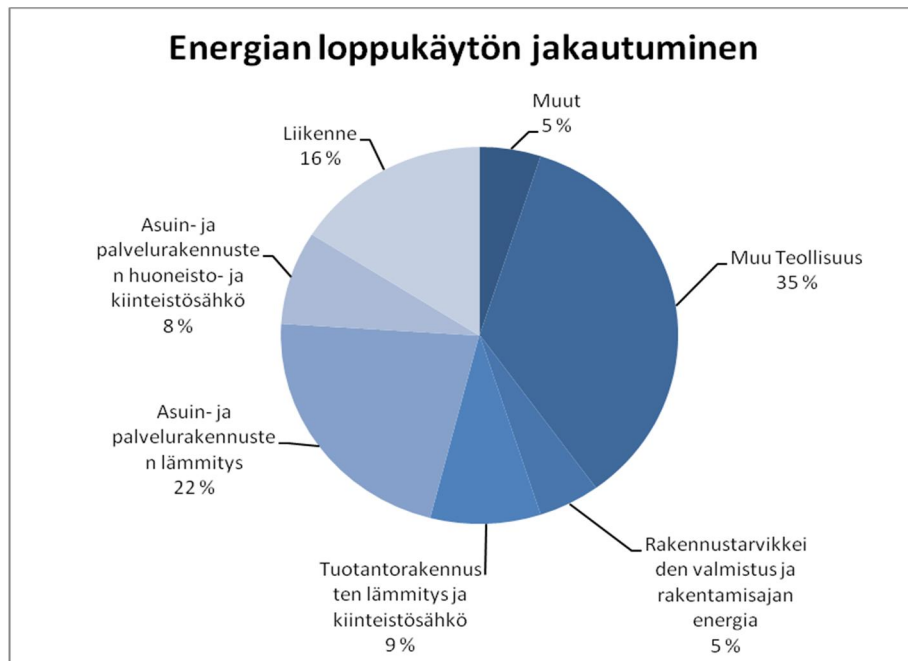
Tämän työn tavoitteena on kartoittaa Espooseen länsimetron varrelle sijoittuvan Jousenpuiston uuden asuinalueen energiantuotantovaihtoehtoja erityisesti paikalliseen lämmöntuotantoon perustuen. Vertailuvaihtoehtona tutkitaan kaukolämmitystä. Lisäksi yleisesti käsitellään myös alueen ja sen rakennusten energiatehokkuutta. Selvitys ajoittuu alueen asemakaavan muutosprosessin kanssa samaan ajankohtaan. Lähtökohtana on toteutusvaihtoehtojen ja niiden kustannustehokkuuden selvittämisen lisäksi kartoittaa mahdolliset kaavamuutostarpeet. Työssä tarkastellaan myös eri vaihtoehtojen hiilidioksidipäästöjä.

Työ aloitetaan asumisen energiankäytön selvittämisellä. Tässä osiossa käsitellään asuinalueiden ja rakennusten lämpö-, sähkö ja jäähdytysenergian tarvetta sekä lämpötehon mitoitusta. Toisessa osiossa esitellään yleisellä tasolla vaihtoehtoisia tapoja asuinalueen energian tuottamiseen. Toteuttamiskelpoisimmat energiantuotantovaihtoehdot mitoitetaan Jousenpuiston asuinalueen tarpeisiin. Lopuksi käsitellään mitoitettujen vaihtoehtojen kustannustehokkuutta ja päästöjä.

2 RAKENNUSTEN JA ASUINALUEIDEN ENERGIANKULUTUS

Suomessa käytettävästä loppuenergiasta asuin- ja palvelurakennusten lämmitykseen kuuluu hieman yli viidennes. Kiinteistö- ja kotitaloussähköön kuuluu lisäksi vajaa kymmenesosa loppuenergiasta (Kuva 1). Siten rakennusten energiatehokkuuden parantamisella on merkittäviä vaikutuksia energiankulutukseen ja sitä kautta kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen.

Valtakunnallisesti energiatehokkuutta pyritään edistämään Valtioneuvoston periaatepäätöksen 4.2.2010 linjauksilla yleisistä toimenpiteistä. Toimenpideohjelmaan sisältyy muun muassa vaihtoehtoisten energia- ja yhdyskuntatekniikan ratkaisujen edistäminen sekä uudisrakentamisen energiamääräysten kiristäminen vaiheittain (Valtioneuvosto 2010).



Kuva 1. Energian loppukäytön jakautuminen Suomessa (Heljo et al. 2005, 33).

Rakennusten kokonaisenergiatarve koostuu tilojen lämmityksestä, ilmanvaihdon lämmityksestä, käyttöveden lämmityksestä, sähköenergiatarpeesta ja jäähdytystarpeesta. Energiatarpeen kattamiseen käytetään lämpöenergiaa, sähköenergiaa ja jäähdytysenergiaa. Myös rakennuksen sisäiset ja ulkoiset lämpökuormat vaikuttavat lämpöenergian ja jäähdytysenergian tarpeeseen. (Ympäristöministeriö 2007, 10.)

Keskimääräisten asuinkerrostalojen osalta vaipan lämpöhäviöiden aiheuttama lämmitystarve sekä kotitalous- ja kiinteistösähkö muodostavat kumpikin noin kolmanneksen kokonaisenergiatarpeesta. Lisäksi ilmanvaihdon vaatima lämmitysenergia on noin neljänneksen kokonaisenergiasta. Käyttöveden lämmitystarve on suhteellisesti pienin osa-alue, mutta muiden osa-alueiden tehostuessa se voi kasvaa tulevaisuudessa nykyistä merkityksellisemmäksi. (Heljo et al. 2005, 39.)

2.1 Lämpöenergian tarve

Rakennusta tulee lämmittää, jotta katetaan rakenteiden lämpöhäviöt. Lisäksi ilmanvaihdon tuloilman lämmitys ja käyttöveden lämmitys vaativat lämpövirtaa. Lämpöhäviöitä syntyy lämpövirran johtumisesta lämpimämmästä tilasta kylmempään ulkoseinien, yläpohjan, alapohjan, ikkunoiden ja ovien läpi. Lisäksi rakenteiden epätiiviyden vuoksi ilmaa virtaa vuotoilmana sisään ja ulos rakennuksesta paine-eroista johtuen. Asunnon optimisisälämpötila on tavanomaisissa oloissa noin 21 °C. (Ympäristöministeriö 2007; Seppänen & Seppänen 1997, 14.) Kaavan muodossa energiatarpeen jakautuminen voidaan esittää seuraavasti:

$$Q = Q_j + Q_i + Q_{vl} + Q_{lkv} - Q_s \quad (1)$$

jossa

Q_j = rakenteiden läpi johtuva energia [kWh]

Q_i = ilmanvaihdon lämmityksen energia [kWh]

Q_{vl} = vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia [kWh]

Q_{lkv} = käyttöveden lämmitysenergia [kWh]

Q_s = sisäisistä lämmönlähteistä ja auringon säteilystä hyödynnettävissä oleva energia [kWh]

Lämmön tarve koostuu periaatteessa kahdesta osatekijästä: tehosta ja energiasta. Tehoa tarvitaan, jotta lämmönkäyttäjä saa kullakin hetkellä tarvitsemansa sisäilman ja käyttöveden lämpötilan. Energiaa puolestaan kuluu, kun tehoa ylläpidetään kulutustarpeen mukaan tietyinä ajanjaksona. (Koskelainen 2006.)

Energiantarve on tehontarpeen aikaintegraali tarkasteltavalta jaksolta T (Koskelainen 2006):

$$Q = \int_0^t \Phi dt = \int_0^t G(T_s - T_u) dt + Q_{lkv} \quad (2)$$

jossa

Q = energiantarve [kWh]

Φ = lämmitysteho [kW]

t = ajanjakso [h]

T_s = sisälämpötila

T_u = ulkolämpötila

G = lämpötilariippuva tehon osa-alue [kW/°C]

Q_{lkv} = käyttöveden osuus energiantarpeesta [kWh]

2.2 Mitoituslämpöteho

Lämmitysjärjestelmän valintaa ja mitoittamista varten rakennukselle ja asuinalueelle on määritettävä mitoituslämmitysteho. Tehon tarve perustuu lämpöhäviöiden laskemiseen, jotka aiheutuvat rakennusvaipan johtumistehosta, ilmapuodoista ja ilmanvaihdon tuuloilman lämmittämisestä. Lisäksi tehoon on laskettava keskimääräinen käyttöveden lämmitystarve. Kun rakennuksen mitoitus-tehoa lasketaan, valitaan mitoitusulkolämpötila rakennuksen sijaintipaikkakunnan mukaan. Jousenpuiston asuinalue sijaitsee Espoossa, joten mitoituslämpötilana käytetään tässä tapauksessa -26 °C (Seppänen & Seppänen 1997, 43.)

Uudisrakennuksen lämmityksen ja ilmastoinnin vaatima teho lasketaan Suomen rakennusmääräyskokoelman määräysten ja ohjeiden (D5 2007) mukaan. Rakennuksen lämmitystehon tarve mitoitusulkolämpötilalla on

$$\Phi = \frac{\Phi_h}{\eta_h} + \frac{\Phi_{ti}}{\eta_{ti}} + \frac{\Phi_{lkv}}{\eta_{lkv}} \quad (3)$$

jossa

Φ = rakennuksen lämmitystehontarve [W]

Φ_h = huonetilan lämmitystehontarve [W]

Φ_{ti} = ilmanvaihdon tuloilman jälkilämmityspatterin tarvitsema teho [W]

Φ_{lkv} = käyttöveden lämmitystehontarve, keskimääräinen [W]

η_h = huonelämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusoloissa [-]

η_{ti} = ilmanvaihdon tuloilman jälkilämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusoloissa [-]

η_{lkv} = käyttöveden lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusoloissa [-]

2.3 Rakenteiden ja tekniikan vaikutus lämpöenergiantarpeeseen

Rakennuksen ja rakenteiden hyvä lämpötekniinen toimivuus tarkoittaa, että rakennuksen energiatehokkuus on hyvä ja sen rakenteet ovat sekä kestävyys- että terveellisyyden ja turvallisuuden kannalta oikeita. Lisäksi sisäilman laatu tulee pystyä pitämään hyvänä. Energiatehokas rakentaminen perustuu ensisijaisesti seuraaviin avaintekijöihin:

- rakennuksen vaipan tiiviyteen
- ulkovaipan lämmöneristävyyteen ja kylmäsiltojen poistamiseen
- tarkasti ohjattuun ja tehokkaalla lämmönlähteellä varustettuun koneelliseen tulo- ja poistoilmajärjestelmään. (RIL 2009.)

Energiatehokkuuden kannalta rakennuksen ja sen rakenteiden lämpötekniiseen toimintaan sekä energiantarpeeseen liittyviä tärkeimpiä ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1.

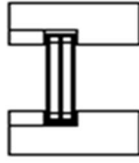

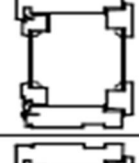
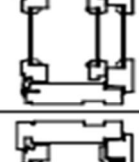
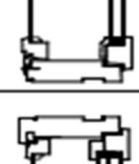
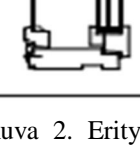
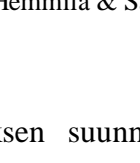
Taulukko 1. Kerrostalojen energiatehokkuuteen vaikuttavia ominaisuuksia (RIL 2009).

Ominaisuus	Ominaisuuden määrittävät tekijät	Yksikkö	Normitalon 2010 likimääräiset yleisarvot (RakMK C3)	Matalaenergiatalojen likimääräiset yleisarvot
Lämmöneristys	Keskimääräinen lämmönläpäisykerroin, U-arvo	W/m ² K	Rakenteet: 0,09–0,17 Ikkunat: 1,0	Rakenteet: 0,08–0,14 Ikkunat: 0,6–0,8
Lämpökapasiteetti	Lämpökapasiteetti/lattiapinta-ala	kJ/ m ² K		100–500
Sisäisen energiankäytön hyväksikäyttösuhde	$E_{hyöty}/E_{sis}$	-		0,6–0,7
Lineaariset kylmäsilat	Lisäkonduktanssi/pituus	W/mK		0,6–0,8
Ulkovaipan tiiveys	Ilmanvuotoluku paineoko- keessa, n_{50}	1/h	< 2,0	< 0,6–0,8
Poistoilman lämmöntalteenoton hyötysuhde	Vuosihyötysuhde	%	> 45	65–80
Ilmanvaihdon sähkökulutus	Ominaissähköteho	kW/m ³ ,s	< 2,5	< 1,5–2,0

Seinämien lämmönläpäisykertoimiin voidaan rakennusvaiheessa vaikuttaa eristyksen lämmönjohtavuudella ja sen paksuudella. Myös tuulensuoja ulkoseinässä parantaa rakenteen lämmöneristyskykyä vähentämällä lämmöneristyskerroksessa tapahtuvaa ilman liikettä. (RIL 2009, 152.)

Kylmäsilat vaikuttavat seinämän kokonaislämmönläpäisykertoimeen. Kylmäsiltojen suhteellinen vaikutus rakenteen lämpöhäviöön kasvaa, kun rakennuksen peruslämmöneristystä parannetaan. Perinteisellä runkorakennetekniikalla rakennettavissa rankataloissa ulkonurkat ja ikkunoiden pieliin sijoitettavat runkorakenteet ovat usein merkittäviä kylmäsiltojen aiheuttajia. Matalaenergiarakennuksissa perustukset eristetään usein myös alaosista ja alapinnasta kylmäsiltojen poistamiseksi. (Seppänen & Seppänen 1997, 66; RIL 2009, 150.)

Ikkunoiden kokonaispinta-ala on asuinrakennuksissa 10–15 % ulkoseinien alasta. Lämpövuoto voi olla kuitenkin samaa luokkaa kuin ulkoseinissä ikkunoiden suurempien lämmönläpäisykertoimien vuoksi (Holopainen et al. 2007, 28.) Kuvassa 2 on esitetty joidenkin ikkunatyyppeiden eri lasitekniologioiden avulla saavutettavia lämmönläpäisykertoimien vaihteluvälejä.

Ikkunan tyyppi	Lasiosa	Täytekaasu	1.2m*1.2m ikkunan U-arvo (W/m ² K)	Lasin keskiosan U-arvo (W/m ² K)
	3 * kirkas	ilma	1,80–1,90	1,80–2,10
	2 * kirkas + 1 * selektiivi	ilma	1,20–1,40	1,30–1,50
		argon	0,95–1,25	1,10–1,40
		krypton	1,10–0,85	1,00–1,20
	1 * kirkas + 2 * selektiivi	ilma	0,90–1,20	1,00–1,35
		argon	0,65–0,90	0,85–1,20
		krypton	0,50–0,75	0,70–1,05
	2 * kirkas	-	2,4–2,9	2,7–2,8
	2 * kirkas	-	2,3–2,8	2,8–2,9
	3 * kirkas	-	1,65–1,80	1,70–1,80
	3 * kirkas	ilma	1,70–1,90	1,80–1,95
	2 * kirkas +	ilma	1,30–1,55	1,10–1,50
	1 * selektiivi	argon	1,15–1,40	0,95–1,35
		krypton	1,10–1,35	0,85–1,10
	4 * kirkas	ilma	1,25–1,45	1,30–1,40
	3 * kirkas +	ilma	1,10–1,30	0,90–1,25
	1 * selektiivi	argon	1,00–1,25	0,75–1,10
		krypton	0,90–1,15	0,70–0,95
	2 * kirkas +	ilma	0,90–1,20	0,70–1,05
	2 * selektiivi	argon	0,75–1,00	0,55–0,90
	krypton	0,70–0,90	0,45–0,75	

Kuva 2. Erityyppisten ikkunoiden ja lasin keskiosan lämmönläpäisykertoimia (Hemmilä & Saarni 2002).

Rakennuksen suunnitteluvaiheessa lämpöhäviöihin voidaan periaatteessa vaikuttaa myös pienentämällä ulkoilmaa vasten olevien rakenteiden pinta-alaa, mikä saattaa olla merkittävä tekijä erityisesti pientalorakentamisessa. Myös sisä- ja ulkoilman välinen

lämpötilaero vaikuttaa lämpöhäviöihin, joten huonetilojen sisäisellä ryhmityksellä on merkitystä. Korkeampaa lämpötilaa vaativat huoneet tulisi sijoittaa keskelle rakennusta. (Seppänen & Seppänen 1997, 66.)

Ilmatiiviys on yksi matalaenergiatalon tärkeimmistä ominaisuuksista. Rakennuksen lämpöviihtyvyyden ja energiatehokkuuden kannalta riittävä ilmanvuotoluku n_{50} on 0,8-1,0 1/h. Ilma- ja höyrysulun tulee muodostaa yhtenäinen aukoton pinta ulkovaipaan. Ilmavuotoja esiintyy useimmiten ikkunoiden, ulko-ovien ja ulkovaipan liitoksissa, joten energiatehokkaassa rakennuksessa nämä liitokset tulee tiivistää huolellisesti. (RIL 2009, 152.)

2.4 Jäähdytysenergian tarve

Tässä kappaleessa käsitellään jäähdytysenergian tarvetta erityisesti matalaenergiarakentamisen kannalta. Ilmaston muuttumisen myötä kesäiset hellejaksot saattavat pidentyä, mikä vaikuttaa jäähdytyksen tarpeeseen.

Matalaenergiarakennuksissa viilennystä vaativa kausi pitenee sisäisen lämpökuorman takia. Suomen ilmasto-oloissa yölämpötila laskee lähes aina hellepäivinäkin noin 15 asteeseen tai sen alle. Tällöin viilennystarve merkitsee lähinnä lämpötilojen tasaustarvetta vuorokauden aikana, joten yötuuletus on tehokas keino viilentää rakennusta ja rakenteita siten, että sisälämpötila on läpi vuorokauden lähellä vuorokauden keskilämpötilaa.

Yötuuletuksella viilentäminen on sitä tehokkaampaa mitä suurempi on rakennuksen termien massa lämpöeristeen sisäpuolella. Yötuuletus voidaan toteuttaa hellekausien aikaisella yöllisellä tehostetulla ilmanvaihdolla tai vaihtoehtoisesti tehokkaalla läpivirtausikkunatuuletuksella. Myös passiiviset lämpötilanhallintakeinot, kuten aurinkosuojat ja sälekaihtimet, tulee ottaa huomioon. (RIL 2009, 105.)

Tiloihin puhallettavaa tuloilmaa voidaan myös jäähdyttää erilaisilla ratkaisuilla, kuten ilmastointilaitteeseen asennettavalla vesikiertoisella jäähdytyspatterilla tai päätelaitekohtaisilla jäähdytyspalkeilla. Kylmän tuotto voidaan toteuttaa esimerkiksi maalämmön vapaajäähdytyksellä, kompressorikäyttöisellä vedenjäähdyttimellä tai kaukojäähdytyksenä. (RIL 2009, 139.)

2.5 Sähköenergian tarve

Rakennuksen laitteiden sähköenergiankulutukseen kuuluu valaistussähkö, ilmanvaihtojärjestelmän sähkö ja muu laitesähkö (Kaava 4). Siihen ei kuitenkaan oteta mukaan tilojen lämmityksen tai jäähdytyksen sähkönkulutusta. (Ympäristöministeriö 2007.)

$$W_{\text{laitesähkö}} = W_{\text{valaistus}} + W_{\text{ilmanvaihto}} + W_{\text{muut laitteet}} \quad (4)$$

jossa

$W_{\text{laitesähkö}}$ = rakennuksen laitteiden sähköenergian kulutus [kWh]

$W_{\text{valaistus}}$ = valaistuksen sähköenergian kulutus [kWh]

$W_{\text{ilmanvaihto}}$ = ilmanvaihdon sähköenergian kulutus [kWh]

$W_{\text{muut laitteet}}$ = muiden laitteiden sähköenergian kulutus [kWh]

Ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutus koostuu puhallinsähköstä ja apulaitteiden sähkönkulutuksesta. Näitä ovat muun muassa pumput, taajuusmuuttajat ja säätölaitteet. Tuloilman lämmitystä ei lasketa ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutukseen vaan edellä kuvattuun lämmitysjärjestelmän energiankulutukseen. (RIL 2009, 25.)

Asuinrakennusten käyttämä sähkö voidaan edelleen jaotella kotitaloussähköön ja kiinteistösähköön. Kotitaloussähköön kuuluu huoneistossa käytetty sähköenergia kuten valaistuksen ja kodinkone- sekä elektroniikkalaitteiden sähkön kulutus. Kiinteistösähköön puolestaan luetaan kiinteistön huoltoon kuluva sähkö, kuten ilmastoinnin ja ulkovalaistuksen sähkö.

Kotitaloussähköstä suurin osa kuluu valaistukseen. Kylmlaitteet kuluttivat vielä 1990-luvun alussa suurimman osan kotitaloussähköstä, mutta laitteiden kehittyminen ja ener-

giamerkinnot ovat pienentäneet osuutta siten, että kylmälaitteet ovat tällä hetkellä toiseksi suurin kotitaloussähkön kuluttajaryhmä. Viihde- ja tietotekniikkalaitteiden yhteenlaskettu osuus on puolestaan noussut lähes kylmälaitteiden tasolle. Näiden laitteiden sähkönkulutus tulee todennäköisesti edelleen nousemaan tulevaisuudessa.

Kotitaloussähkön kulutus tulee ennusteiden mukaan todennäköisesti nousemaan hieman vuoden 2006 tasosta vuoteen 2015, jonka jälkeen se kääntyisi laskuun. Mikäli laitteiden energiatehokkuus taas kehittyy parhaimman käyttökelpoisen tekniikan-skenaarion mukaan, olisi vuonna 2015 kotitaloussähkön kulutus neljänneksen pienempi vuoteen 2006 verrattuna. (Adato 2008.)

2.6 Rakennusten kokonaisenergiankulutus ja kiristyvät energiatehokkuusmääräykset

Rakennuksen energiantarve katetaan siis syöttämällä järjestelmiin lämpöenergiaa, sähköenergiaa ja jäähdytysenergiaa. Kokonaisenergiankulutus sisältää myös järjestelmien häviöt ja siihen sisältyy:

- lämmitysjärjestelmien energiankulutus
- ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutus
- jäähdytysjärjestelmän energiankulutus
- kiinteistösähkön kulutus
- kotitaloussähkön kulutus

Rakennusten energiatehokkuudesta säädetään Suomen rakentamismääräyskokoelmassa. Vuoden 2010 rakentamismääräyskokoelmaan asti energiatehokkuuden arviointi on perustunut vaatimukselle, ettei suunnittelukohde ylitä minimivaatimusten perusteella laskettuja vertailulämpöhäviöitä. Vertailulämpöhäviön laskennassa otetaan huomioon vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon yhteenlaskettu lämpöhäviö. (Ympäristöministeriö 2008.)

Vuonna 2012 voimaan tulevalla rakentamismääräyskokoelman rakennemuutoksella tarkastelun pääpaino siirtyy päästöpohjaiseen primäärienergiaohjaukseen. Uuden D3 osan

mukaan rakennukselle on laskettava niin sanottu E-luku, joka tarkoittaa eri energiamuotojen kertoimilla (Taulukko 2) painotettua rakennuksen vuotuista ostoenergiankulutusta. E-luku ei saa ylittää erikseen määriteltyjä eri talotyyppien maksimiarvoja. Asuinkerrostalon maksimiarvo on 130 kWh/m²,a. (Ympäristöministeriö 2011a.)

Taulukko 2. Rakennuksen E-luvun laskennassa käytettävät tuotantomuotoon perustuvat kertoimet (Ympäristöministeriö 2011a).

Energiamuoto	Kerroin
Sähkö	1,7
Kaukolämpö	0,7
Kaukojäähdytys	0,4
Fossiiliset polttoaineet	1,0
Rakennuksessa käytettävät uusiutuvat polttoaineet	0,5

Rakennuksiin suunniteltavaa energiantuotantovaihtoehtoa ohjataan näin uusiutuvien energiamuotojen suuntaan. Sähkön käyttämisestä lämmitysmuotona vastaavasti rokoteetaan. Uusiutuva omavaraisenergia vähentää ostoenergian tarvetta, joten sille ei käytetä taulukon 2 lukuja. Sen sijaan esimerkiksi alueen yhteiselle biopolttoainekattilalle taulukkoa 2 puolestaan sovelletaan. (Ympäristöministeriö 2011a.)

E-luku ei kuitenkaan ole ainut energiatehokkuutta ohjaava normi, vaan määräyksissä määritellään edelleen myös vertailuarvot, joiden perusteella lasketaan vertailulämpöhäviö. Rakennuksen lämpöhäviö saa olla enintään tämän vertailulämpöhäviön suuruinen, kuten vuoden 2010 määräyksissäkin. Eri talotyypeille määritellyt maksimi-E-luvut on kuitenkin asetettu niin, että vuoden 2012 normit ohjaavat käytännössä noin 20 % energiatehokkaampaan rakentamiseen kuin vuoden 2010 normit. Tulevaisuudessa uudisrakentamisen energiamääräyksiä tullaan edelleen kiristämään vaiheittain. (Ympäristöministeriö 2011 b; Valtioneuvosto 2010, 4.)

Jousenpuiston alueen asuinkerrostalot tullaan rakentamaan YIT:n matalaenergiakonseptilla, joka on käytännössä noin 30 % nykyistä normitasoa 2010 energiatehokkaampi. Vuoden 2012 normeihin verrattuna kokonaisenergiankulutus on noin 15 % pienempi. Käytännössä matalaenergiarakentaminen toteutetaan muun muassa kappaleessa 2.3 esitetyillä keinovalikoimilla.

2.7 Asuinalueen energiankulutukseen liittyvät CO₂ -päästöt

Lämmön ja sähkön tuotanto aiheuttaa CO₂-päästöjä. Sähköenergian tuotannon päästökerroin määritellään ostosähkön keskimääräisten polttoaineiden perusteella. Yleensä asuinkerrostaloalue on kytketty kaukolämpöverkkoon, jolloin lämmitysenergia tuotetaan keskitetysti kaukolämpövoimalaitoksella tai aluelämmityskattilalla. Tällöin asunnon lämmityksen ominaishiilidioksidipäästö voidaan määrittää joko alueellisen tiedon perusteella tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää koko Suomen kattavaa keskiarvotietoa.

Päästökerroin riippuu käytetyistä polttoaineista sekä hyötysuhteista. Eri polttoaineiden päästökertoimia on esitetty kaukolämmöntuotannon yhteydessä taulukossa 3. Yhteistuotannossa päästöt on jaettava lämmön ja sähkön kesken esimerkiksi energiamenetelmällä tai hyödynjakomenetelmällä.

Koko Suomea koskeva kaukolämmön yhteistuotannon keskimääräinen CO₂-päästökerroin energiamenetelmällä laskettuna vuosien 2007–2009 keskiarvona on 273 kgCO_{2ekv}/MWh (Tilastokeskus 2011a). Espoon alueelle siirrettävä kaukolämpö tuotetaan Suomenojan voimalaitoksessa, jonka päästökerroin vuodelle 2010 oli 270 kgCO_{2ekv}/MWh (Ahonen 2011). Keskimääräisen Suomessa ostettavan sähkön päästökerroin energiamenetelmällä laskettuna vuosien 2007–2009 keskiarvona on 202 kgCO_{2ekv}/MWh (Tilastokeskus 2011a).

3 UUDEN ASUINALUEEN ENERGIA TUOTANTOVAIHTOEHDOT

Seuraavissa kappaleissa on esitelty yleisellä tasolla energiantuotantovaihtoehtoja uuden asuinalueen osalta. Pääosa vaihtoehtoista on pelkästään lämmitysmuotoon perustuvia. Osa on puolestaan pienimuotoiseen sähköntuotantoon perustuvia, kuten tuulivoima. Viimeisenä kohtana on esitelty pienimuotoinen sähkön- ja lämmön yhteistuotanto.

Kaukolämpöverkko voidaan keskitetyssä aluelämpöratkaisussa, kuten biomassakattiloiden tapauksessa, korvata aluelämpöverkolla. Myös maalämmössä alueellinen verkko on mahdollinen, mikäli osateholle mitoitettun ratkaisun loppulämpövirta hoidetaan talo/huoneistokohtaisilla sähkövastuksilla. Lämpölaitos tulisi sijoittaa siten, että rakennettavan aluelämpöverkon pituus jäisi mahdollisimman lyhyeksi. (osin Ojaniemi & Penttinen 2009.)

Lämmitysratkaisuissa lukuun ottamatta sähkölämmitystä ja kaukolämpöratkaisua, on siten otettava huomioon investoinnit aluelämpöverkkoon ja aluelämpökeskukseen. Myös lämmönsiirron lämpöhäviöt on otettava huomioon.

3.1 Kaukolämpö

Yleisin rakennusten lämmöntuotantomuoto Suomessa on kaukolämmitys, joka tarkoittaa rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen tarvittavan lämmön keskitettyä tuotantoa ja julkista jakelua asiakkaille. Yleensä kaukolämmitystoiminta toteutetaan liiketoiminnan muodossa. (Koskelainen 2006.) Lämpö voidaan tuottaa joko lämpökeskuksessa tai lämmön ja sähkön yhteistuotantona (CHP) vastapainevoimalaitoksessa (Kuva 3).



Kuva 3. Kaukolämmöstä suurin osa tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantona voimalaitoksissa (Koskelainen 2006, 37).

Kaukolämmöstä suurin osa tuotettiin vuonna 2009 maakaasulla. Myös kivihiilellä ja turpeella on merkittävä osuus Suomen kaukolämmöntuotannossa (Kuva 4). Tuotantomuoto ja polttoaineet vaikuttavat luonnollisesti kaukolämmöntuotannon CO₂ -ominaispäästöihin (Taulukko 3).



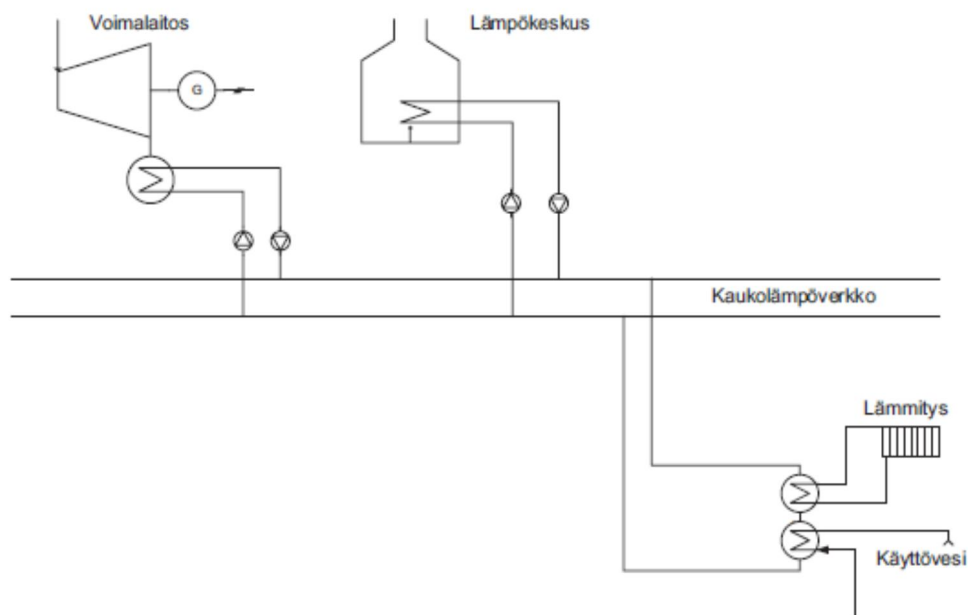
Kuva 4. Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotannossa käytettävien polttoaineiden osuudet (Energiateollisuus ry 2010).

Taulukko 3. Kaukolämmön tuotannossa käytettävien polttoaineiden CO₂ -ominaispäästökertoimia (Tilastokeskus 2011b).

Polttoaine	Ominaispäästökerroin g CO ₂ / MJ
Kivihiili	94,6
Maakaasu	55,04
Raskas polttoöljy	78,8
Kevyt polttoöljy	72,6
Jyrsinturve	105,9
Puupolttoaineet	0*

* IPCC:n määritelmän mukaan

Suomessa käytössä oleva vesikaukolämpöjärjestelmä muodostuu kokonaisuudesta, johon kuuluvat lämpöä tuottavat lämmityslaitokset, lämmön siirtämiseen tarvittava kaukolämpöverkko sekä lämmön vastaanottoon ja jakeluun tarvittavat asiakkaan laitteet. Vettä lämmitetään tuotantolaitosten lämmönsiirtimissä ja jäädytetään asiakkaiden lämmönsiirtimissä. Menoveden painetta korotetaan tuotantolaitosten pumpuilla. (Kuva 5; Koskelainen 2006.)



Kuva 5. Kaksiputkijärjestelmän periaatekuva (Koskelainen 2006).

Kaukolämpöverkon mitoituksen lähtökohtana ovat selvitykset kaukolämpöön liitettävistä alueista, näiden tehontarpeesta ja sen ajallisesta kehitymisestä. Laskentaperusteena käytetään suurinta tarvittavaa yhtäaikaista tuntitehoa, jossa on kuitenkin huomioitu erillisten rakennusten tehontarpeen risteily erityisesti käyttöveden lämmityksen osalta. Myös tuotantolaitosten sijainti, teho ja rakentamisen ajoitus vaikuttavat kaukolämpöverkon suunnitteluun.

Tuotantolaitokset pystyvät vaikuttamaan tehonsiirtokykyyn säätämällä verkon menolämpötilaa. Verkossa kiertävä veden massavirta määräytyy puolestaan aina asiakkaiden omien kaukolämpölaitteiden mukaan. Tuotantolaitoksilta lähtevän veden lämpötila säädetään lähinnä ulkolämpötilan mukaan säätökäyrällä. Kulutushuippuja voidaan siten ennakoida nostamalla hallitusti menolämpötilaa. Paluuveden lämpötila riippuu asiakkaiden kaukolämpölaitteiden jäähdytyskyvystä ja niiden mitoituksesta.

Suurimman osan kaukolämpöyrittysten kustannuksista muodostavat kaukolämpöverkon ja tuotantolaitosten investointien pääomakustannukset eli pääoman poistot ja lainojen korot. Koska investoinnit ovat etupainotteisia, toiminnan alkuvaiheessa rahoitustarve on suurehko. (Koskelainen 2006.)

Asiakkaan näkökulmasta kaukolämmön hinnoittelujärjestelmä koostuu liittymismaksusta, perusmaksusta ja energiamaksusta (Koskelainen 2006). Liittymismaksu veloitetaan asiakkaalta liityttäessä kaukolämpöverkkoon ja se määräytyy liityntätehon perusteella. Myös perusmaksun suuruus riippuu asiakkaan liityntätehosta. Energiamaksu on kulutetun lämpöenergian mukainen (ks. esimerkkihinnasto Taulukko 4).

Taulukko 4. Espoon kaukolämpöhinnasto 1.1.2011 alkaen (Fortum 2011).

Maksumuoto	Hinta
Liittymismaksu €	
P = 9–20 kW	5 900 €
P = 21–150 kW	$(3\,300 + 130 * P)$ €
P = 151–500 kW	$(10\,050 + 85 * P)$ €
P = 501– kW	$(33\,050 + 39 * P)$ €
Perusmaksu €/a	
P = 9–100 kW	$(120,01 + P * 37,11)$ €
P = 101–700 kW	$(1\,444,17 + P * 23,87)$ €
P = 701– kW	$(10\,858,18 + P * 10,42)$ €
Energiamaksu	55,23 €/MWh

3.2 Sähkölämmitys

Sähkölämmitys on pientalojen lämmitysjärjestelmistä yleisin, sen sijaan asuinkerrostalojen ja liikerakennusten lämmitysmuotona sitä käytetään harvemmin (Honkapuro et al. 2009). Sähkölämmityksen tukena käytetään yleisesti muun muassa tulisijoja ja ilmalämpöpumppuja (Sähkölämmitysfoorumi 2011).

Suorassa sähkölämmityksessä lämpöteho tuotetaan huonekohtaisilla sähkölämmittimillä, joita säädetään termostaatilla. Lämmitys voidaan toteuttaa pattereilla, kattolämmityksellä, lattialämmityksenä tai esimerkiksi kuivaimilla. Lattialämmitys voidaan toteuttaa myös varaavan lämmityksenä.

Varaavassa sähkölämmityksessä lämpö tuotetaan yöaikaisella edullisemmalla sähköllä. Lämpöä varataan rakenteisiin ohjaamalla lämpövirtaa niihin. Päiväsaikaan rakenteet luovuttavat lämpöä huoneilmaan. Yleisempi lämmön varausmenetelmä on lämmön varaus lämminvesivaraajaan, josta se voidaan jakaa vesikiertoisesti pattereiden, lattian tai ilman välityksellä. Huippukulutusaikoina lisälämpöteho on tuotettava suoralla sähkölämmityksellä. (Sähkölämmitysfoorumi 2011.) Lämminvesivaraajaa käytetään yleisesti myös lämpimän käyttöveden yöaikaiseen lämmitykseen.

Sähkölämmityksen vuosittaisista kokonaiskustannuksista suurin osa muodostuu sähköenergian kulutuksesta. Investointikustannuksiltaan sähkölämmitys on edullinen muihin lämmitysvaihtoehtoihin verrattuna, joten vuosittaiset poistot ja korot jäävät pieniksi käyttökustannuksiin verrattuna. Toisaalta matalaenergiarakentamiseen sähkölämmitys voi olla hyvä vaihtoehto rakennusten pienemmän lämmitysenergian tarpeen vuoksi.

3.3 Aurinkoenergia

Aurinkoenergian käyttö on Suomessa nykyisellään vähäistä. Tämänhetkinen aurinkopaneelien rakennettu kapasiteetti on vain 5 MW_p ja aurinkolämmön kapasiteetti 15–20 MW_p (Energy Visions 2050, 193). Aurinkoenergian saatavuus ja samalla käytettävyys riippuu lähinnä kohteen leveysasteesta ja sääolosuhteista. Suomessa vuotuinen säteilyenergia vaakasuoralle pinnalle on Helsingissä keskimäärin 940 kWh/m². Pinnan kulmalla on merkitystä saatavaan energiaan auringon korkeusaseman muuttumisen vuoksi. Optimaalisella 45 asteen kallistuskulmalla saadaan säteilyenergiaa esimerkiksi Helsingissä noin 1 160 kWh/m². Aurinkoenergian saatavuuden lisäksi tuotetun energian määrään vaikuttaa järjestelmän hyötysuhde. (Vartiainen et al. 2002; Vartiainen 2000.)

3.3.1 Passiivinen aurinkolämpö

Rakennus kerää auringon säteilyn energiaa ja lämpö varastoituu sen rakenteisiin. Mikäli tätä energiaa pystytään käyttämään sanottavasti hyväksi lämmityksessä, kyseessä on aurinkolämmön passiivinen hyödyntäminen. Oikein sijoitetussa ja hyvin suunnitellussa rakennuksessa noin viidesosa kokonaislämmöntarpeesta voidaan kattaa hyödyntämällä aurinkoenergiaa passiivisesti.

Aurinkoenergian passiivisen hyödyntämisen kannalta rakennuksen paras suuntaus on etelään. Talon rungon materiaalien lämmönvarastointikyky ratkaisee pääasiassa sen, kuinka paljon ikkunoiden kautta taloon tulevasta auringonsäteilystä voidaan ottaa talteen. Kesäinen yllilämpeneminen voidaan estää istuttamalla puita ja pensaita ikkunoiden

eteen tai varjostavalla katonlapeella, joka ei kuitenkaan auringon korkeusaseman muutoksen takia vaikuta talviseen ja keväiseen säteilyenergian hyödyntämiseen. (Erat et al. 2008.)

3.3.2 Aktiivinen aurinkolämpö

Tasokeräimet ovat vielä nykyisin yleisimpiä aurinkolämmön keräintyyppisiä. Niissä säteilyä kerätään tumman keräinelementin avulla, jolloin tumma pinta absorboi siihen tulevasta säteilystä suurimman osan ja kuumenee eli valosäteily muuttuu lämpösäteilyksi. Tasokeräimen toiminta edellyttää keräinelementin hyviä absorbointiominaisuuksia ja hyvää lämmönsiirtokykyä.

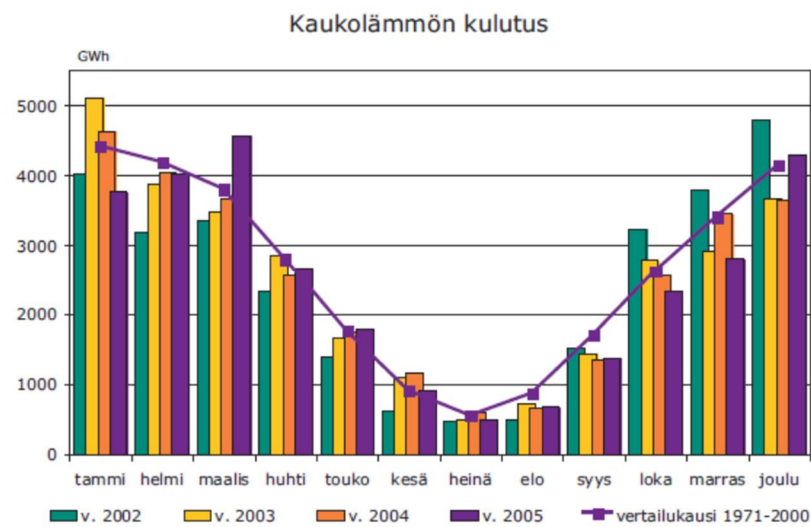
Tyhjiöputkikeräimessä lämmönsiirtoneste kiertää joko U-muotoisessa tyhjiöputkessa mustan absorboivan pinnan alla tai vaihtoehtoisesti keräin sisältää erillisen suljetun ”heat-pipe” -lämpöputken. Heat-pipe:ssa neste höyrystyy suhteellisen alhaisessa lämpötilassa ja kuljettaa latenttilämpöä lämmönsiirtimeen.

Tyhjiöputkikeräin eroaa tasokeräimestä lähinnä siinä, että tyhjiöputken absorptiopinta on putkimaisessa muodossa eikä levyrakenteena kuten tasokeräimessä. Lisäksi lasiputken tyhjiö eristää lämpöä ja estää siten absorboitua lämpöä joutumasta takaisin viileämpään ulkoilmaan. Tämän vuoksi lämmöntuotto tyhjiöputkikeräimissä voi etenkin kylminä vuodenaikoina olla suurempaa kuin tasokeräimissä. Kesäisin suuria eroja lämmöntuotossa ei keräintyyppien välillä ole. (Erat et al. 2008.)

Aurinkokeräimeen tulevan auringonsäteilyn sisältämästä energiasta voidaan hyödyntää vain osa. Järjestelmien hyötysuhde vaihtelee 30–40 %:n välillä siten, että hyötysuhde on parempi, kun lämmönjako tapahtuu matalammassa lämpötilassa. Hyötysuhdetta voidaan parantaa käyttämällä keräimissä selektiivisiä pinnoitteita, jotka absorboivat hyvin auringon säteilyä, mutta heijastavat huonosti. (Vartiainen et al. 2002.)

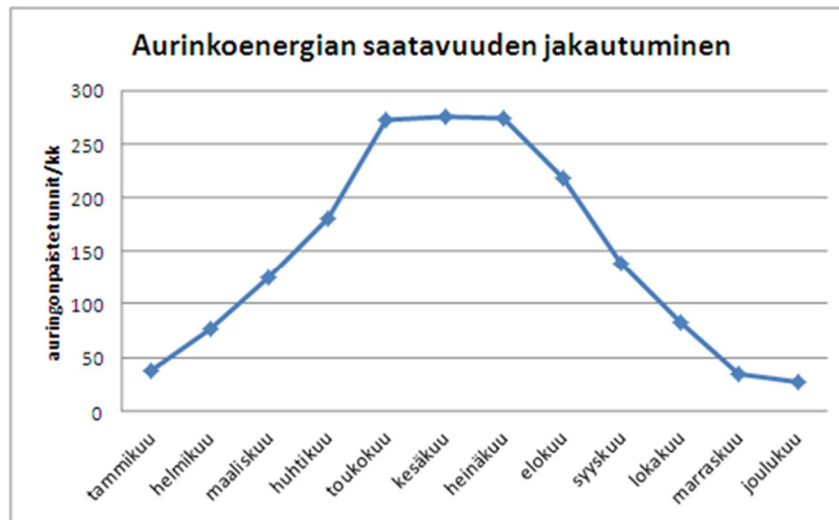
Aurinkolämpöjärjestelmät ja käytettävyys

Rakennusten lämmöntarpeen vuodenaikavaihtelu on Suomen olosuhteissa voimakasta seuraten ulkoilman lämpötilamuutoksia. Esimerkiksi kesällä käyttöveden lämmitysteho on vain noin 10 % lämmitysjärjestelmän huippumitoitustehosta. (Koskelainen 2006.) Kuvassa 6 on esitetty vuoden keskimääräinen lämmitysenergian kulutus kuukausittain.



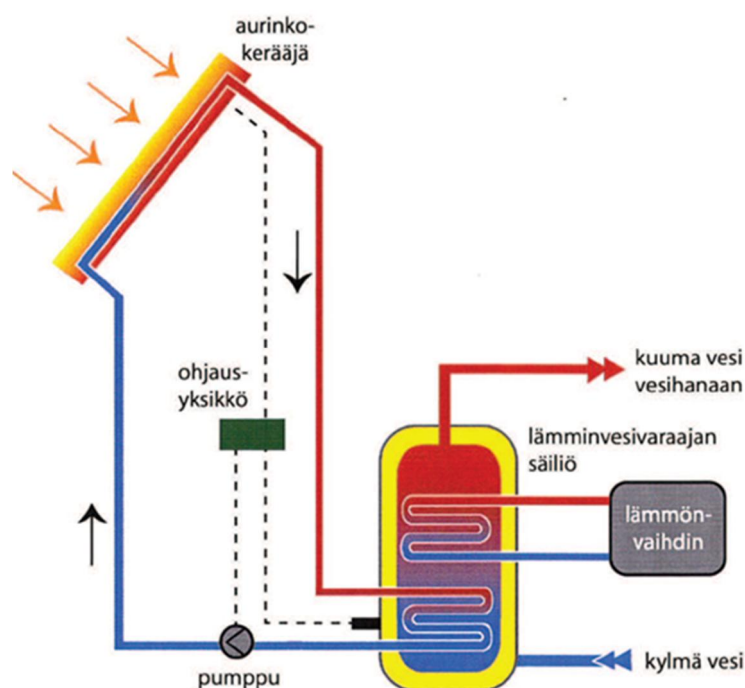
Kuva 6. Kaukolämmön kulutuksen jakautuminen eri kuukausille (Koskelainen 2006, 41).

Kun verrataan kuvassa 6 esitettyä lämmöntarpeen vaihtelua keskimääräisiin auringonpaistetunteihin, huomataan, että säteilyn saatavuus on pienintä silloin kun lämmöntarve on suurimmillaan (Kuva 7). Tämän vuoksi aurinkolämpöjärjestelmä soveltuu parhaiten käyttöveden lämmitykseen. Huonetilalämmitykseen ei aurinkokeräimillä saada merkittäviä energiamääriä (Erat et al. 2008). Aurinkokeräinten suhteellinen hyöty on energiatehokkaissa rakennuksissa suurempi, koska niissä talvikausien tilojen lämmitysenergiankulutus suhteessa ympärivuotiseen käyttöveden lämmitystarpeeseen on pienempi (Ojaniemi & Penttinen 2009).



Kuva 7. Aurinkoenergian saatavuus Suomessa (lähde Ilmatieteenlaitos 2011a).

Aurinkolämpöjärjestelmän perusosat ovat keräimet, pumppuyksikkö, ohjausyksikkö, varaaja, lämmönsiirrin, putkisto sekä varolaitteet (Kuva 8). Ohjausyksikkö käynnistää järjestelmän kiertovesipumpun, kun kerääjät ovat kuumemmat kuin säiliö. Kylmäneste kiertää kerääjien ja säiliön lämmönvaihtimen läpi. Se lämmittää säiliön vettä samaan tapaan kuin keskuslämmityksen lämminvesivaraaja. (Doranova Oy 2011.)



Kuva 8. Aurinkolämpöjärjestelmän periaatekuva (Doranova Oy 2011).

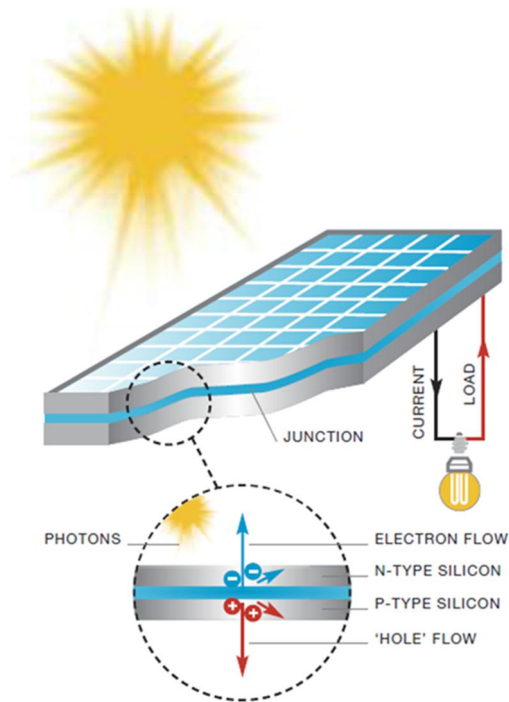
Aurinkolämmön hyödyntämisvaihto riippuu rakennuksen päälämmitysjärjestelmästä. Parhaiten aurinkolämpö soveltuu liitettäväksi vesikiertoiseen lämmönsiirtojärjestelmään. Tällöin käyttöveden lämmityksen lisäksi on mahdollista saada lisälämpötehoa myös tilalämmitykseen. Mikäli rakennukseen valitaan maalämpöpumppu, siihen on mahdollista yhdistää aurinkolämpöjärjestelmä, jolloin järjestelmällä on yhteinen varaaja. Kaukolämmön kanssa aurinkokeräimiä voi hyödyntää siten, että käyttövesi esilämmitetään niiden tuottamalla lämpöteholla. (Erat et al. 2008.)

3.3.3 Aurinkojäähdytys

Kesäaikana auringon säteilyn tiloja lämmittävää vaikutusta voidaan pienentää passiivisilla jäähdytysmenetelmillä. Tilojen ylikämmenemistä voidaan vähentää käyttämällä aurinkosuojalaseja, markiiseja tai säleitä. Aurinkosuojaus toimii parhaiten, jos se asennetaan ikkunan ulkopuolelle tai mahdollisimman lähelle ikkunan ulkopintaa. Säädettävillä kaihtimilla voidaan hyödyntää tarpeen mukaan myös auringon lämmittävä vaikutus keväällä. Sen sijaan auringonsuojalaseilla ja säleillä estetään puolestaan passiivisen aurinkolämmön hyödyntäminen. Toisaalta sälekaihtimet toimivat lämmöneristeenä, etenkin jos ne asennetaan ikkunan sisälle lasien väliin. (Holopainen et al. 2007.)

3.3.4. Aurinkopaneelit

Aurinkosähköilmiö perustuu aurinkokennon (Photovoltaics, PV) puolijohdemateriaalin ja auringonsäteilyn reaktioon, jossa osa säteilytehosta muunnetaan sähkövirraksi metallijohtimiin (Kuva 9). Kenno tuottaa tasavirtaa, joka muunnetaan käyttöä varten invertterillä vaihtovirraksi. Kennon tehon tuotto riippuu I-U-käyrästä, joka kuvaa virran ja jännitteen yhteyden. Virtajänniteominaiskäyrä taas on suoraan verrannollinen auringon intensiteettiin. (Freris & Infield 2008, 38.)



Kuva 9. Aurinkosähköilmiön periaate (EPIA 2011).

Kun tarpeellinen määrä kennoja kytketään sarjaan, saadaan tarvittava jännite esimerkiksi akun varaamiseen. Yleensä noin 30–36 kennoa kytketään sarjaan, jotta saadaan 12 V:n jännite. Aurinkosähköpaneeli koostuu alumiinikehyksestä, lasilevystä ja kennoista. Kun aurinkosähköpaneeli yhdistetään johtimilla kuormaan, esimerkiksi akkuun, syntyy virtapiiri. Yhteen paneeliin on yleensä kytketty 20–60 W:n nimellisteho ja se on mitoitetaan keskimäärin 35 cm x 105 cm x 3,5 cm. (Erat 2008, 126.) Kytkemällä useampia paneeleja saadaan aikaan haluttu tehotaso, joka on yleensä pientaloissa 1–3 kW ja toimistorakennuksissa yli 10 kW (Vartiainen et al. 2002, 12).

Parhaimmillaan kaupallisten paneelien hyötysuhde voi olla jopa 18 %, tyypillisesti kuitenkin liikutaan kiteisten piipaneelien osalta noin 10–14 %:ssa. Paneelin hyötysuhteen lisäksi aurinkosähköjärjestelmän kokonaishyötysuhteeseen vaikuttavat muiden osien, esimerkiksi invertterin, hyötysuhteet. Lisäksi paneelien hyötysuhde pienenee käyttöönsä kasvaessa. (Erat 2008, 125; Freris & Infield 2008, 37; Vartiainen et al. 2002, 12.)

3.3.5. Aurinkoenergian taloudellisuus

Aurinkoenergiasta saatava taloudellinen hyöty riippuu järjestelmien kapasiteetista, käytettävyydestä ja yksikkökustannuksista. Taulukkoon 5 on koottu aurinkopaneelien ja aurinkokeräinten tyypillisiä teknisiä ominaisuuksia, jotka vaikuttavat kustannustarkasteleihin. Taulukosta on huomioitava, että kyse on yksittäisten paneelien ominaisuuksista. Käytännön sovellukset muodostuvat usein useammista yhteen kytketyistä yksiköistä. Esimerkiksi aurinkojärjestelmän kokonaishyötysuhde on tällöin luonnollisesti pienempi kuin taulukossa 5 esitetty.

Taulukko 5. Aurinkosähköpaneelien ja lämpökeräinten teknisiä yksikköominaisuuksia (Vartiainen 2002; Latva 2011).

Ominaisuus	Aurinkosähkö		Aurinkolämpö
	Kiteinen pii	Amorfinen pii	
Yksikköteho [W]	10–100	4–12	800–1400 (1-2 m ²)
Huipunkäyttöaika [h/a]		900–1100	
Hyötysuhde [%]	10–12	4–7	30–40
Käyttöikä [a]	25	20	25–30

Aurinkopaneelijärjestelmien investointikustannuksista noin puolet koostuu itse aurinkopaneelien kustannuksista. Loput kustannukset kattavat invertterin, tukirakenteet, sähkökaapeloinnin ja asennustyön (PvResources 2009). Suurin osa aurinkolämmön kustannuksista muodostuu keräinten investoinnista. Lisäksi kokonaiskustannuksiin on laskettava lämminvesivaraajan (aurinkokierukalla ja sähkövastuksella) kustannus sekä putkiasennukset (Latva 2011). Taulukossa 6 on esitetty aurinkopaneelijärjestelmän ja lämpökeräinten tyypillisiä investointi- sekä käyttö- ja kunnossapitokustannuksia.

Taulukko 6. Aurinkoenergian kustannustietoja (PvResources 2009; Vartiainen et al. 2002; Latva 2011).

	Investointikustannukset [e/kW _p]	Käyttö- ja kunnossapitokus- tannukset ¹⁾ [c/kWh]	Tuotantokustannus ²⁾ [e/MWh]
Aurinkosähkö		0,2–0,5	
ei sähköverkkoon liittämistä			
0,1–0,5 kW _p	10 000–15 000		700–1 100
1–4 kW _p	15 000–30 000		1 100–2 100
liitetään verkkoon			
1–4 kW _p	3 500–5 000		250–360
10–50 kW _p	3 500–5 000		250–360
50- kW _p	3 500–5 000		250–360
Aurinkolämpö	480–540	0,3–1,0	41–45

¹⁾ Tieto vuodelta 2002

²⁾ Arviossa käytetty huipunkäyttöaika 1000 h, korkokantaa 5 % ja käyttöikä 25 vuotta

3.4 Tuulivoima

Tuulivoima on ilman virtauksen muuttamista tuuliturbiinin avulla sähköenergiaksi. Tuuliturbiiniin kuuluu roottori, konehuone (mm. generaattori ja vaihteisto), masto ja perustukset. Tuulipuistoksi taas kutsutaan aluetta, jossa on useita tuuliturbiineita, jotka on liitetty sähköverkkoon. Nykyiset turbiinit ovat yksikköteholtaan noin 3–5 MW. Modernit turbiinit ovat yleensä vaaka-akselisia ja kolmilapaisia. Uusien voimaloiden napakorkeus on noin 80–100 m ja hetkittäinen kokonaishyötysuhde voi olla parhaimmillaan 45–50 %. (Tuulivoiman tietopaketti 2011.)

Tuulivoimakapasiteettia on Suomessa mahdollista lisätä merkittävästi, sillä tällä hetkellä tuulivoiman osuus maamme sähköenergian tuotannosta on vain 0,3 %. Vuoden 2010 lopulla Suomen tuulivoimaloiden yhteenlaskettu rakennuskapasiteetti oli 197 MW. Ilmasto- ja energiastrategiassa tavoitteeksi on asetettu kapasiteetin nostaminen 2 000 MW:iin vuoteen 2020 mennessä. (Motiva 2011c.)

Tavoitteeseen pääsemiseksi vuoden 2011 alusta voimaan tullut laki uusiutuvan energian syöttötariffista määrittelee uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetulle sähkölle takuuhin-

naksi 83,5 euroa/MWh. Järjestelmä toimii siten, että valtio maksaa sähkön tuottajalle takuuhinnan ja sähkön markkinahinnan välisen erotuksen, mikäli markkinahinta on takuuhintaa alhaisempi. (L 30.12.2010/1396.)

Tuuliturbiinit tuottavat sähkötehoa suhteessa tuulen nopeuteen, mikä voidaan esittää kaavan muodossa seuraavasti:

$$P_e = \eta * C_p * 0,5 * \rho * A_t * w^3 \quad (5)$$

jossa

P_e = mitoitusteho [W]

η = laitteiston hyötysuhde[-]

C_p = tehokerroin mitoitustuulennopeudella[-]

ρ = ilman tiheys [kg/m^3]

A_t = roottorin pyyhkäisyypinta-ala [m^2]

w = mitoitustuulennopeus [m/s]

Nimellistehonsa turbiini tuottaa tyyppin mukaan määritellyillä tuulennopeuksilla esimerkiksi 16–25 m/s. Tätä alhaisemmilla tuulen nopeuksilla turbiini teho laskee, kunnes tietyllä nopeudella roottori pysäytetään. Myös mikäli tuulen nopeus kasvaa yli määritellyn maksimi tuulennopeuden, roottori pysäytetään komponenttien suojaamiseksi. (muunneltu lähteestä Energy visions 2050.)

Tuuliolosuhteet ovat tärkein tuulivoimaloiden sijoittumista ohjaava teknistaloudellinen kriteeri. Vuoden 2009 lopussa valmistui Suomen tuuliatlas -hanke, jossa kartoitettiin maamme tuuliolosuhteita tuulivoimaloiden kannalta. Toinen tärkeä tekijä tuulivoimalan suunnittelussa on sen liittäminen sähköverkkoon. Suurimmat yhteisteholtaan yli 250 MW:n voimat liitetään pääsääntöisesti kantaverkkoon. Tosin Suomessa näin suuria puistoja ei toistaiseksi vielä ole. 100–250 MW:n puistot tulisi liittää joko 400, 220 tai 110 kV:n jännitteiseen sähköverkkoon. Alle 100 MW:n tuulivoimapuistot voidaan pääsääntöisesti liittää 110 kV:n verkkoon. Suoraan jakeluverkkoon voidaan liittää pääsääntöisesti vain pienimmät tuulipuistot. (Tuulivoimaopas 2011.)

Verkon toiminnan kannalta tuulivoimalla tuotettu sähkö lisää muiden voimalaitosten säätötarvetta, koska tuulipuiston sähköntuotanto riippuu tuulisuudesta ja siten vaihtelee voimakkaasti eri ajankohtina. Lisäksi sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainon ennustaminen vaikeutuu tuulivoiman lisääntyessä. Tuuliolosuhteiden ennustamismenetelmät kuitenkin kehittyvät koko ajan. Verkkovaikutuksia voidaan vähentää muun muassa tuulipuistojen sijoittelulla eri tuulialueille sekä verkon joustavuuden parantamisella. (Energy visions 2050.)

Tuulivoima on vahvasti pääomapainotteinen energiantuotantomuoto. Hankkeen investointikustannuksiin vaikuttaa tuuliturbiiniyksikön hinta sekä muut tarvittavan infrastruktuurin kustannukset. Hankekoolla on merkitystä skaalaetujen muodossa. Käyttö- ja kunnossapitokustannukset muodostuvat huoltokustannuksista, hallinnointikustannuksista, vakuutuskustannuksista ja korjauskustannuksista. Ne ovat yleensä noin 2–3 % alkuperäisistä investointikustannuksista. (Tuulivoiman tietopaketti 2011.) Kokonaiskustannustietoja on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Tuulivoiman kustannustietoja (mukailtu lähteestä TEM 2009).

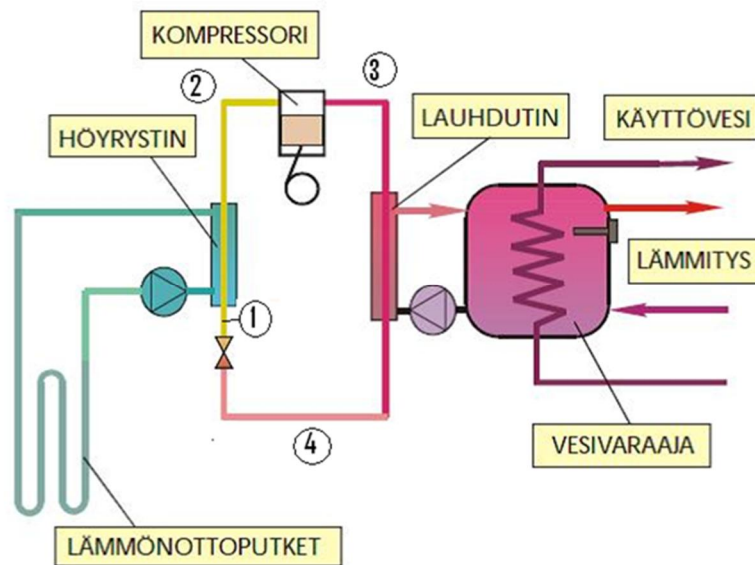
	Maalla	Merellä
Investointikustannukset, e/kW	1 300–1 400	2 500
Huipunkäyttöaika, h/a	2 100–2 400	3 300
Käyttö- ja kunnossapitokustannukset, e/MWh	11–20	15–23
Tuotantokustannus¹⁾, e/MWh	54–73	76–84

¹⁾ Arviossa käytetty korkokantana 5 % ja käyttöikä 20 vuotta

3.5 Lämpöpumput

Lämpöpumppulämmitys on keskuslämmitysjärjestelmä, jonka lämmönlähteenä toimii joko maaperä, ulkoilma tai vesi. Pumppu tarvitsee toimiakseen sähkötehoa, mutta toisaalta vain osan luovuttamastaan lämpötehosta. Laitteiston toiminta perustuu koneessa kiertävän kylmäaineen höyrystymiseen ja lauhtumiseen.

Höyrystimen lämmönsiirtopinnoissa lähteen lämpö otetaan talteen laitteen kylmäaineeseen sen höyrstyessä. Kylmäainehöyry puristetaan kompressorilla korkeampaan paineeseen, jolloin se myös lämpenee. Korkeapaineinen höyry jäähdytetään lauhduttimessa, jolloin se nesteytyy. Vapautuva latenttilämpö siirtyy lauhduttimen lämmönsiirtopintojen kautta lämmitysjärjestelmään. Lopuksi nesteen paine lasketaan paisuntaventtiilissä. (Aittomäki 2001.) Kuvassa 10 on esitetty lämpöpumpun toimintaperiaate maalämmitysjärjestelmässä.



Kuva 10. Maalämpöpumpun toimintaperiaate (lähde: Aittomäki 2001).

Lämpöpumpun kannattavuus perustuu siihen, että se tuottaa lämmitystehoa enemmän kuin kuluttaa sähkötehoa. Pumpun tehokerroin kertoo saadun lämmitystehon suhteen sähkötehoon.

$$\varepsilon_L = \Phi_L / P_K \quad (6)$$

jossa

Φ_L = lämpövirta lauhduttimesta [W]

P_K = kompressorin akseliteho [W]

Kuvan 10 mukaisella numeroinnilla lämpövirta lauhduttimesta on

$$\Phi_L = q_m(h_3 - h_4) \quad (7)$$

Ja kompressorin ottama akseliteho saadaan yhtälöllä

$$\Phi_K = q_m(h_3 - h_2) \quad (8)$$

joissa

q_m = kiertävän kylmäaineen massavirta [kg/s]

h_i = kiertöaineen ominaisentalpia ko. tilassa [J/kg]

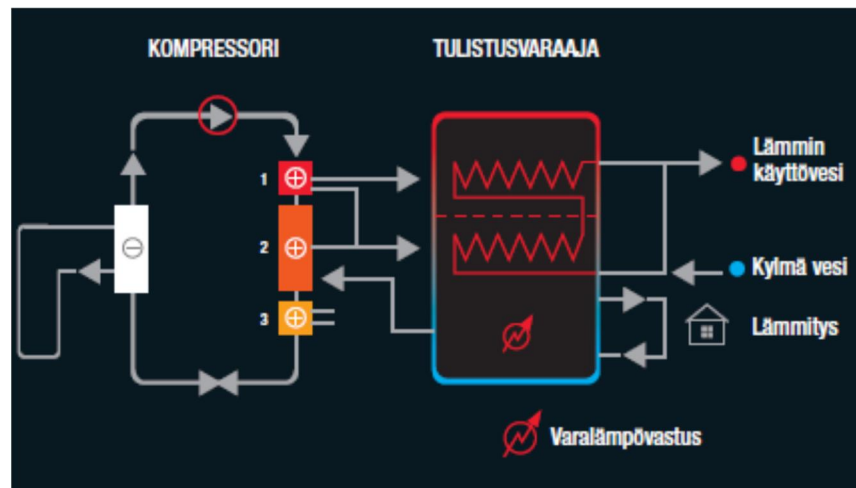
Mitä suurempi tehokerroin on, sitä paremmin laite ottaa esimerkiksi maaperän lämpövarastosta lämmön talteen. Parhaimmat edellytykset lämpöpumpun käytölle on silloin, kun lämmönoton lämpötila on mahdollisimman korkea ja lämmönkäytön lämpötila mahdollisimman matala. Siten lämmönjakotavaksi soveltuvat parhaiten lattialämmitys tai ilmalämmitys. Suomessa vuotuinen keskimääräinen tehokerroin lämpöpumpulle on normaaleissa olosuhteissa noin 3. (Aittomäki 2001.)

3.5.1 Maalämpöpumput

Maalämmön lämmönlähteenä käytetään nykyisin usein kallioporakaivoa, joka sopii myös pienille tonteille. Porakaivon syvyyteen vaikuttavat rakennuksen lämmöntarve ja kaivon vedentuotto. Veden saanto lisää lämmön talteenottoa, mutta ei ole toiminnan kannalta välttämätöntä. Mikäli pohjaveden saanti ei ole mahdollista, kaivo täytetään vedellä. Porakaivon maksimisyvyys on noin 200 m. Asennussyvyudessa maan lämpötila on keskimäärin noin 6–8 °C. Kaivoon asennetaan lämmönkeruuputkia 2–4 kappaletta; osa niistä toimii liuoksen menoputkina ja osa paluuputkina. Kaivon pohjalla on U-kappale ja paino, joka vetää putket suoriksi. Mikäli yksittäinen kaivo ei täytä rakennuksen lämmöntarvetta, porataan tontille useampia kaivoja 10–20 metrin välein ja ne kytetään rinnakkaisiksi putkisilmukoiksi erillisessä ulkoisessa kytkentäkaivossa. (Motiva 2011a; Aittomäki 2001; Juvonen 2009; Suomen lämpöpumppuyhdistys 2011.)

Mikäli tilaa on riittävästi, toinen vaihtoehto lämmön talteenotolle on rakennuskustanuksiltaan edullisempi vaakaputkisto. Putket asennetaan noin metrin syvyyteen vähintään 1,5 metrin välein. Soveltuvien maaperä lämmönkeruuputkistolle on savimaa. Talon rakennuskuutiota kohden tarvitaan 1–2 metriä putkea ja putkimetriä kohden noin 1,5 m² tonttimaata. (Motiva 2011a.) Tämän vuoksi vaakaputkisto ei sovellu kerrostalon lämmönlähteeksi.

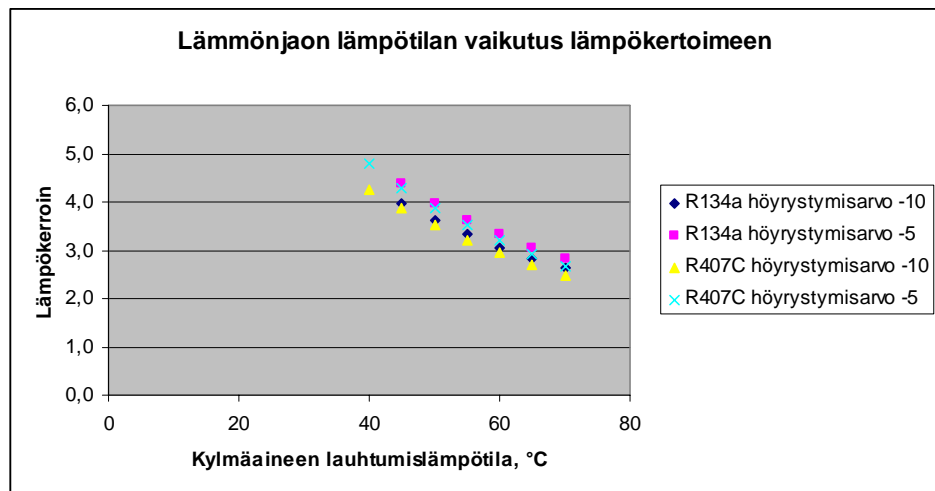
Valmiissa järjestelmässä lämmönkeruuputkissa kiertää suljetussa kierrossa lämmönkeruuliuos, joka koostuu veden ja pakkasnesteen seoksesta. Lämmönkeruupiiristä saatu lämpö höyrystää lämpöpumpussa kiertävän kylmäaineen erillisessä höyrystimessä. Kompressor imee höyrystyneen kylmäaineen ja lisää sen painetta. Samalla kylmäainehöyryn lämpötila kasvaa ja se myös tulistuu. Useissa maalämpöpumppujen lämmönsiirtolaitteissa on ns. tulistuksen poisto, jolla otetaan käyttöveden lämmitysverkkoon hyödyksi tulistuneen kylmäaineen lämpövirta lämpimän käyttöveden loppulämmitysvaiheessa (Kuva 11). Tämän jälkeen kylmäaine johdetaan lauhduttimeen, jossa varsinainen lämmönsiirto lämmönjakeluverkkoon tapahtuu.



Kuva 11. Tulistusvaraajalla varustettu maalämmitysjärjestelmä (Oilonhome 2011).

Maalämpöpumpun lämpökertoimeen vaikuttaa olennaisesti se, mikä lämmönjakotaso lämmönsiirtoverkkoon valitaan. Lämmönsiirtyminen tapahtuu kylmäaineen lauhtumis-

lämpötilassa. Tosin tätä ennen kylmäaineen lämpötila nousee sen tulistessa. Kuvassa 12 on esitetty kahden eri kylmäaineen lämpökertoimia eri lauhtumislämpötiloilla. Kuvasta huomataan, että lauhtumislämpötilan nosto huonontaa merkittävästi lämpökerrointa.



Kuva 12. Maalämpöpumpun kylmäaineiden R134a ja R407C lauhtumislämpötilan vaikutus pumpun lämpökertoimeen höyrystymislämpötiloilla -10 ja -5 (Kompressorin isentrooppihyötysuhde 0,75, painehäviöitä tai moottorin sähkömekaanisia häviöitä ei ole huomioitu).

Maalämpöpumppu voidaan mitoittaa joko osa- tai maksimiteholle. Kun laitteisto mitoitetaan osateholle, tarvitaan huippulämmön tuottamiseen toista lämmitysmuotoa esimerkiksi sähkövastuksia. Usein kuitenkin osateholle mitoittaminen on järkevintä, koska lämmöntarvehuiput esiintyvät vuoden ajalla harvoin. Esimerkiksi 70 % osateholle mitoitettu lämpöpumppu tuottaa kuitenkin reilusti yli 90 % rakennuksen kokonaisenergiatarpeesta. Kylmien vuorokausien lisäteho katetaan sähkövastuksella. Huipputeholle mitoittaminen lisää maalämmön investointikustannuksia, koska tarvitaan sekä suurempitehoinen pumppu että pidemmät lämmönkeruujärjestelmät. (Suomen lämpöpumppuyhdistys ry 2011; Senera Oy 2011.)

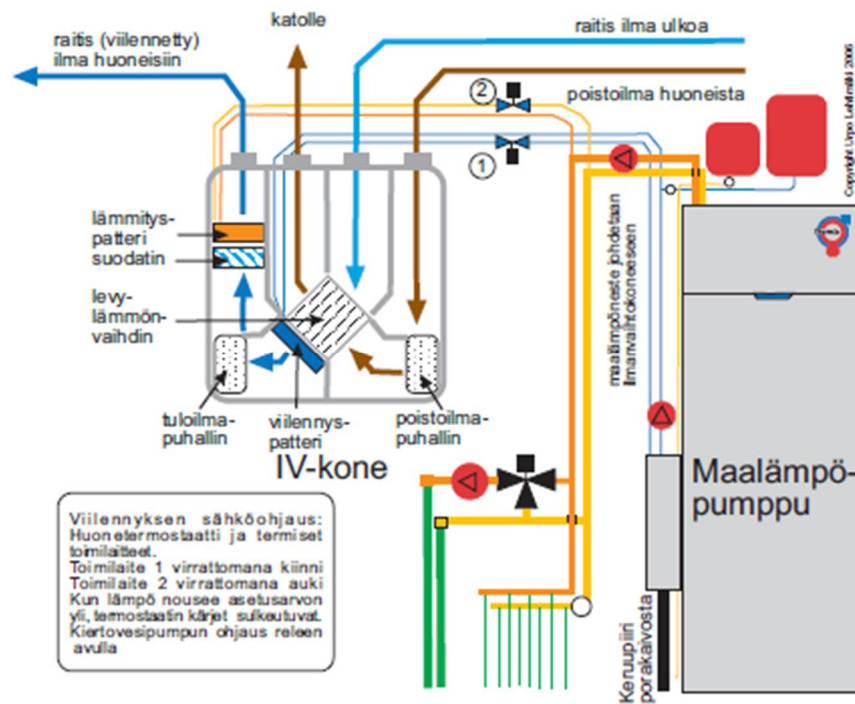
Ylimoitettu pumppu käy vain lyhyitä jaksoja kerrallaan, mikä kuluttaa sekä pumpun osia että lisää sen sähkökulutusta. Laitteen käynnistyessä kestää muutamia minutteja ennen kuin pumppu toimii parhaalla hyötysuhteella. Siten oikein mitoitettu pumppu käy

pitkiä jaksoja kerrallaan ja on näin ollen taloudellisin. Lisäksi oikea mitoitus lisää pumppun käyttöikää vähentämällä kulumista. (Senera Oy 2011.)

Maalämpöratkaisu voidaan toteuttaa myös keskitetysti vastaamaan useamman rakennuksen lämmöntarvetta. Tällöin lämpöpumput sijoitetaan keskitetysti huoltorakennuksiin ja lämpö tuodaan niihin lämpökentiltä, joissa on useita kaivoja. Lämmönjakeluverkot voidaan eriyttää toisistaan, jolloin on omat putkistonsa tilalämmitykselle, lämpimälle käyttövedelle ja jäähdytykselle. (Rajala et al. 2010.) Isommissa kiinteistöissä yksi lämpöpumppu toimii ns. master-pumppuna, joka käy silloin, kun lämpötehon tarve on vähäinen. Muut maalämpöpumput (slave-pumput) alkavat toimia, kun lämmöntarve kasvaa. (Senera Oy 2011.)

Maalämpöpumput tarvitsevat lämpimän käyttöveden lämmitykseen yleensä lämminvesivaraajan apua tasaamaan huippukulutuksia. Lauhtumislämpötilaa ei ole kannattavaa nostaa niin korkeaksi, että lauhduttimesta saataisiin tarpeeksi kuumaa vettä lämpimän käyttöveden tarpeisiin. Lämpötilan loppunostoon lämpimän käyttöveden vaatimusten tasolle voidaan käyttää joko puristetun kylmäainehöyryn tulistuksen poistojärjestelmää tai loppulämmitystä sähkövaraajilla. (Aittomäki 2001, 11.)

Geoenergiaa voidaan käyttää myös tilojen viilennykseen kesäkaudella. Yksi tapa on johtaa maakeruupiirin nestettä ilmanvaihtoon kytkettyyn jäähdytyspatteriin, joka puolestaan viilentää sen läpi puhallettavaa tuloilmaa (Kuva 13). Kun jäähdytykseen ei käytetä kompressoria, kyse on ns. vapaajäähdytyksestä. Tällöin myöskään sähköä ei kulu muuhun kuin lämmönkeruuliuksen kierrättämiseen pumpuilla. (mukailen Holopainen et al. 2007.) Maalämpöratkaisussa investointikustannukset ovat kaukolämpö- tai sähkölämmitysvaihtoehtoja merkittävästi suuremmat. Toisaalta käyttökustannukset ovat edullisemmat.



Kuva 13. Viilennyskytkentävaihtoehto maalämpöpumppujärjestelmällä (Thermia 2006).

3.5.2 Vesistölämpöpumput

Samalla tavoin kuin maaperästä, lämpöä voidaan ottaa putkilla talteen myös vesistöstä. Vesilämpöpumppu voi olla vaihtoehto, jos vesistö on vähintään kaksi metriä syvä ja rakennus sijaitsee vesistön lähistöllä. Tekniikka on periaatteessa sama kuin maalämmön vaakaputkilämmönkeruujärjestelmässä. Vesistössä putket tulee kuitenkin ankkuroida pohjaan ja mikäli upotuskohta on matalahko, voidaan putket upottaa pohjasedimenttiin. Putkistosta saatava teho on 2–3 -kertainen maalämpöputkistoon verrattuna, eli noin 40–50 W/m. Putken asennukseen tarvitaan vesialueen osuuden omistajan suostumus. (Suomen lämpöpumppuyhdistys ry 2011; Aittomäki 2001.)

3.5.2 Ilmalämpöpumput

Ilmalämpöpumput voidaan jakaa ilma-ilmalämpöpumppuihin, ilma-vesilämpöpumppuihin ja poistoilmalämpöpumppuihin. Lämmönkeruu tapahtuu ulkoilmasta tai huoneiston ilmanvaihdon poistoilmasta; toimintaperiaate on muutoin sama kuin muilla lämpöpumpuilla. Ilmalämpöpumppujen tehokerroin on keskimääräisissä olosuhteissa noin 2. Eri ilmalämpötyyppien erona on pääasiassa lämmönjakojärjestelmä. Ilma-ilmalämpöpumppu jakaa tuottamansa lämmön suoraan huoneilmaan puhaltamalla, kun taas ilma-vesipumppu luovuttaa lämmön vesikiertoiseen jakojärjestelmään. Ilma-ilmalämpöpumppua ei ole mahdollista myöskään liittää käyttöveden lämmitysjärjestelmään.

Ilma-ilmalämpöpumppu muodostuu sisä- ja ulkoyksiköstä. Ulkoyksikössä on ilmasta lämpövirtaa ottava höyrystin sekä kompressori ja automatiikan ohjauslaitteita. Sisäyksikössä on lauhdutin sekä puhallinpatteri, joka kierrättää lämmitettävää tai jäähdytettävää ilmaa. Ilma-ilmalämpöpumppua voidaan käyttää ainoastaan tukevana lämmitysmuotona esimerkiksi sähkölämmitykselle, jonka tulee olla mitoitettu täyden tehon mukaan. Ilma-ilmalämpöpumppua ei ole mahdollista käyttää alle yhdeksi muuttuvan lämpötehoker-toimen vuoksi lainkaan alle -25 asteen lämpötilassa. Se toimiikin parhaimmalla lämpökertoimella lisälämmönlähteenä syksyisin ja keväisin. Hankintakustannuksiltaan ilma-ilmalämpöpumppu on melko edullinen ja sen avulla voidaan parhaimmillaan säästää noin 30–40 % vuosittaisista sähkölämmityskustannuksista.

Ilma-vesilämpöpumpun ulkoyksikkö on samankaltainen ilma-ilmalämpöpumpun kanssa, sen sijaan sisäyksikkö sijoitetaan usein tekniseen tilaan. Tällä lämpöjärjestelmällä voidaan kattaa koko rakennuksen lämmitysenergiantarve. Se siirtää lämpöä ulkoilmasta vesikiertoiseen lämmönjakojärjestelmään ja lämmittää myös käyttöveden. Lattialämmitys soveltuu lämmönjakojärjestelmäksi vesikiertopattereita paremmin, koska menolämpötila on siinä alhaisempi. Usein noin 30 °C riittää. Tällöin lämpöpumpun hyötysuhde on suurempi. Tämän tyyppisellä lämpöpumpulla voidaan kattaa rakennuksen koko lämmitystehontarve -15– -20 °C saakka. Alemmilla ulkolämpötiloilla käytetään järjes-

telmään integroituja sähkövastuksia varalämmitysjärjestelmänä. Jäähdytykseen ilma-vesilämpöpumppua ei voida käyttää, toisin kuin ilma-ilmalämpöpumppua.

Poistoilmapumpun lämmönlähteenä on rakennuksen koneellisen ilmastoinnin poistoilman jätelämpö. Laite siirtää lämpöpumpun avulla lämpötehon ulkoa tulevaan huonetiloihin puhallettavaan tuloilmaan. Sillä korvataan samalla poistoilmapuhallin, jolloin laite itse imee poistoilma huonetiloista. Poistoilmalämpöpumppuun yhdistetään usein sähkövastus lisätehon kattamiseksi. Lämpötehokerroin tällä lämpöpumpputyypillä on noin 1,5–2,2. (Motiva 2011b.) Toinen vaihtoehto poistoilman lämmöntalteenotolle on tavalinen lämmönsiirrin yhdistettynä iv-koneeseen.

3.6 Biomassalämpökattilat

Lämpökattilat ovat pelkästään lämpöä tuottavia laitoksia, joissa ei ole sähköntuotantoa. Lämpö siirretään joko veteen tai höyryyn käyttökohteesta riippuen. Aluelämmöntuotannossa lämpö siirretään veteen. Lämpökattiloiden hyötysuhteet riippuvat polttoaineesta, polttotekniikasta sekä kattilan mitoituksesta ja ajotavasta. Tyypillisimmin lämmöntuotannon hyötysuhde on luokkaa 85–93 % (Koskelainen 2006.) Tosin pienemmän kokoluokan biomassakattiloissa hyötysuhde voi olla hieman pienempi. Pienemmän kokoluokan biomassakattiloiden käyttöikä on noin 20 vuotta (Vartiainen et al. 2002.) Yli 1 MW:n kiinteän polttoaineen kattilat on rekisteröitävä KTM:n päätöksen 1999/953 mukaisesti.

Biomassapolttoaineet voidaan jakaa puuperäisiin polttoaineisiin ja jätepolttoaineisiin. Tässä yhteydessä käsitellään puuperäisten polttoaineiden käyttöä paikalliseen lämmöntuotantoon. Puuperäisiä polttoaineita ovat muun muassa teollisesti puunjalostuksen sivutuotteista valmistettu pelletti, erilaiset puuperäiset hakkeet sekä muut biomassat.

Pellettiä on saatavilla kattavasti koko Suomessa sekä irtotavarana että säkeittäin. Irtotavarana pelletit jaetaan pääasiassa säiliöautoilla, josta ne siirretään paineilman avulla suoraan kuluttajan varastoon. Suurimmissa kohteissa käytetään kuorma-autoja, joista

pelletit kuormataan välivarastoon tai suureen polttoainevarastoon. Pellettejä voidaan varastoida joko vaakasiiloissa (V-mallinen pohjarakenne) tai pystysiiloissa (keskittävä pohjarakenne). Siilosta pelletit siirretään suuremmissa järjestelmissä ruuvi- tai spiraalikuljettimilla kattilahuoneen syöttösiiloon, josta edelleen pienemmällä kuljettimella polttimelle. (Puhakka et al. 2003.) Pelletin etuina ovat tasalaatuisuus ja suuri energiatiheys, mutta se on kalliimpaa kuin esimerkiksi metsähake.

Metsähake on hake- tai murskemuotoon hienonnettua puuainesta. Metsähakkeet valmistetaan yleensä puuraaka-aineesta, joka on mitoiltaan tai laatuominaisuuksiltaan ainespuuksi kelpaamatonta. Metsähake voidaan hakettaa joko suoraan palstalla, välivarastossa tai käyttöpaikalla. Hake on joko kokopuuhaketta tai rankahaketta, jossa ei ole oksia, lehtiä tai neulasia, jotka vaikeuttaisivat polttoaineen syöttöä tai palamista. Uusiin yli 100 kW:n lämpölaitoksiin soveltuu yleensä myös kokopuusta valmistettu hake. Hake varastoidaan hakesiiloissa lämpölaitostontilla. (Knuutila 2003.)

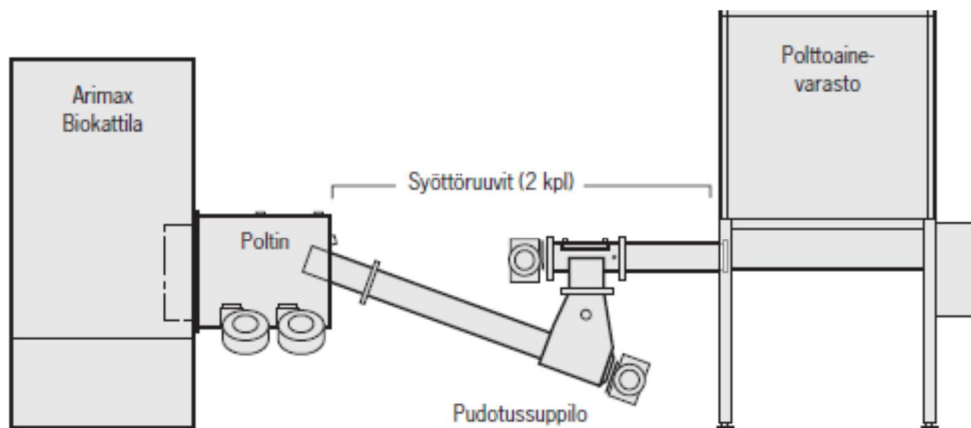
Stokeripolttimet ja -kattilat ovat yleisiä alle 2 MW:n biolämmitysjärjestelmissä. Stokeripoltin koostuu kiinteästä hakesäiliöstä, syöttöruuvista ja kattilan tulipesään sijoitettava palopäästä. Syöttöruuvi annostelee polttoainetta säiliöstä palopäähän. Kattilaveden lämpötila ohjaa syöttöruuvien pyörimisnopeutta. Kuljetusjärjestelmästä johtuen käytettävän polttoaineen on oltava tasalaatuista ja pienipalaista, joten stokeripoltin soveltuu erityisesti pellettipolttoon. Sitä käytetään myös pienempitehoisessa hakepoltossa. (Itä-Suomen energiatoimisto 2001.)

Arinapolttota käytetään yli 1 MW:n kokoluokan kattiloiden polttomenetelmänä. Polttoaine syötetään arinalle koko leveydeltä tasaisena kerroksena ja palamisilma yleensä kahdessa vaiheessa sekä arinan alta että yläpuolelta. (Koskelainen 2006.) Kaasutuspoltoissa polttoaine, esimerkiksi hake, saatetaan ensin kaasumaiseen muotoon, jonka jälkeen tuotekaasu poltetaan kaasupolttimella. Taulukossa 8 on esitetty puuhakkeen polton tyypilliset tehot eri polttotavoilla.

Taulukko 8. Hakkeen polton tyypilliset tehot ja polttotavat pienissä polttolaitoksissa (Itä-Suomen energia-toimisto 2001 & Koskelainen 2006).

Polttotapa	Pienin teho, MW	Normaali teho, MW	Säädettävyyden taso
Stokeri		< 2	
Mekaaninen arina	< 1	2...30	Tyydyttävä
Kerrosleijupoltto	2	10...50	Hyvä
Kiertoleijupoltto	7	20...100	Hyvä
Kaasutusoltto	0,5	2...10	Hyvä

Biolämmitysjärjestelmä koostuu polttimesta ja siihen liitetystä palamisilmapuhaltimesta tai vaihtoehtoisesti arinasta sekä kattilasta lämmönsiirtopintoineen, polttoaineen syöttölaitteista ja niihin liittyvistä turvajärjestelmistä sekä polttoainevarastosta (Kuva 14). Lisäksi tarvitaan säätölaitteita ja apulaitteistoja kuten savukaasuimuri. Lämpö siirretään käyttökohteisiin joko muovisten tai teräksisten vesiputkien välityksellä. Lämpökeskuksen tulee sijaita vähintään 8 metrin päässä asuinrakennuksista. Suositeltava etäisyys on 12–15 m (Tukes 2009).



Kuva 14. Stokeripolttimella varustettu hakelämmitysjärjestelmä (Thermia Oy 2005).

Lämmöntuotannon kannalta polttoaineen tärkein ominaisuus on sen lämpöarvo, joka kertoo polttoaineesta saatavan energian polttoainemäärää kohti. Tässä yhteydessä käytetään alempaa eli tehollista lämpöarvoa, josta on vähennetty vesihöyryn tiivistymisen

luovuttama lämpösisältö. Tämä vastaa todellisia kattilaolosuhteita paremmin kuin kalorimetrinen lämpöarvo. Polttoaineen todellinen lämpöarvo käyttökosteudessa saadaan kuiva-aineen tehollisesta lämpöarvosta, kun tiedetään polttoaineen kosteus (Koskelainen 2006.) Taulukossa 9 on esitetty puupolttoaineiden lämpöarvoja. Polttoaineiden kosteuspitoisuuksina on käytetty tyypillisiä arvoja.

Taulukko 9. Puupolttoaineiden tyypillisiä lämpöarvoja (Tilastokeskus 2009).

Polttoaine	Kosteus -%	Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
Metsätähdehake ¹⁾	50...60	6...10
Kokopuuhake ¹⁾	45...55	7...11
Kuori		5...11
Sahanpuru	45...60	6...10
Kutterilastu	5...15	16...18
Puupelletit	8...10	15...18

¹⁾ Kaatotuoreena

Kattilat mitoitetaan käytettävän polttoaineen mukaan. Mitoituspolttoaineen kosteus vaikuttaa kattilaan ja varastojärjestelmiin sekä polttotekniikkaan. Mitä kosteampaa polttoainetta käytetään, sitä suuremmat järjestelmät tarvitaan massavirtojen kasvun vuoksi. Polttoaineen mitoituskosteuden nosto kasvattaa siten alkuinvestointia. Esimerkiksi polttoaineen kosteuden muutos 25 %:sta 50 %:iin nostaa 1 MW:n hakekattilalaitoksen investointikustannuksia 12 %. Kattiloille on yleensä määritelty tietty polttoaineen mitoituskosteus, jolla saavutetaan nimellisteho. (Satakunnan ammattikorkeakoulu 2002, 11.)

Hakkeelle suunnitellussa kattilassa voidaan polttaa myös pellettejä. Tällöin on huomiotava pelletin suurempi energiasisältö kattilan säädettävyydessä. Kattilan tukipolttoaineena voidaan käyttää lisäksi turvetta, mikäli sitä on saatavilla kohtuullisin kuljetuskustannuksin. Tällöin on kuitenkin huomiotava turpeen suurempi tuhkapitoisuus.

Biomassakattiloiden hinnat ovat pienessä kokoluokassa 50–100 euroa/kW, isommassa kokoluokassa alle 50 euroa/kW. Lisäksi investointikustannuksiin tulee laskea polttoai-

neen syöttöjärjestelmä, 100–150 euroa/kW. Käyttö- ja kunnossapitokustannuksia muodostuu muun muassa kattilan puhdistuksesta, tuhkanpoistosta ja nuohouksesta. Merkittävin biomassalla tuotetun lämmön hintaan vaikuttava tekijä on kuitenkin polttoaineen hinta, joka riippuu korjuu-, kuljetus- ja käsittelykustannuksista. Esimerkiksi metsähakkeen taloudellinen kuljetusmatka jalostamattomana on maksimissaan 150 km. (Vartiainen et al. 2002.) Taulukkoon 10 on koottu alle 10 MW:n biomassakattiloiden kustannustietoja.

Taulukko 10. Biomassakattiloiden lämmöntuotannon kustannustietoja (muunneltu lähteestä Vartiainen et al. 2002).

Investointi (euroa/kW)	150...250
Käyttö- ja kunnossapito (euroa/MWh)	2
Polttoainekustannukset	
Metsähake ¹⁾ (euroa/MWh)	18,2
Pelletti yksityiskäyttöön ²⁾ (euroa/MWh)	52,8
Tuotantokustannus³⁾ (euroa/MWh)	
Metsähakkeella tuotetulle lämmölle	26...28
Pelleteillä tuotetulle lämmölle	64...66

¹⁾ Käyttöpaikalle toimitettuna, kuljetusetäisyys 50 km, hintatieto Q1/2011, lähde www.puunhinta.fi

²⁾ lähde: www.pellettienergia.fi

³⁾ Arviossa käytetty huipunkäyttöaika 3500 h/a, kulutusuhdetta 1,2 sekä käyttöikä 20 vuotta ja korkokantaa 5 %

3.7 Termisen energian varastointi

Lämpöenergiaa voidaan säilyttää tuntuvana lämpönä nostamalla varastoivan aineen lämpötilaa, kemiallisena reaktioenergiana tai faasimuutosenergiana. Suomessa lämpövarastoja on rakennettu etupäässä kaukolämpöjärjestelmiin, joissa tuotetaan myös sähköä. Lämpövarastoinnin tarkoituksena on maksimoida CHP-tuotannon sähkön tuotanto ja

vähentää vesikattiloiden käyttöä. Myös biopolttoaineen aluelämmityksessä lämpövarasto on tärkeä tekijä muun muassa joustavuuden kannalta. Lyhytaikaisvarastoinnin väliaineena käytetään yleensä vettä, jonka ominaislämpökapasiteetti on 4,2 kJ/kgK eli vesikuutiometriä kohden 1,17 kWh/K. (Kara et al. 2004.)

Aluelämmitysjärjestelmissä lämmönvarastoinnilla voidaan saavuttaa muun muassa seuraavia etuja (Koskelainen, 2006):

- Kattilan lämpökuormitusta voidaan tasata vuorokausi- ja viikkojaksolla
- Polttoaineen epähomogeenista laatua voidaan kompensoida
- Voidaan vähentää öljyn (varakattila) ja lisätä biopolttoaineen käyttöä
- Voidaan käyttää lämmönlähteenä kattilan alasajossa
- Voidaan käyttää verkon vesireservinä ja joissain tapauksissa verkon paisuntasäiliönä
- Vähentää viikonloppupäivystysten tarvetta, kun lämpö voidaan tuottaa lämpövarastolla

Lämpövarastot voidaan jakaa maanalaisiin varastoihin ja maanpäällisiin varastoihin. Maanalaisia varastoja ovat muun muassa tankit, kaivannot ja kallioon louhitut varastot. Maan päällä lämpöä voidaan varastoida vesisäilöihin ja huoneistokohtaisesti perinteisiin lämpövaraajiin. (Paalanen & Siren 1997.)

3.8 Jäteveden lämmöntalteenotto

Viemäriin johdettavan veden hukkalämmöstä on mahdollista saada osa talteen erikseen asennettavilla ratkaisuilla. Lämpimän veden osuus jätevedestä on suurempi kuin lämmitysratkaisuilla lämmitettävästä käyttövedestä, koska osa kylmään vesijohtoon kytketyistä laitteista, esimerkiksi pesukone, lämmittävät sähkövastuksella veden tarvitsemaansa lämpötilaan.

Lämmöntalteenotto jätevedestä voidaan toteuttaa joko kiinteistökohtaisesti tai keskitysti. Kiinteistökohtaisessa ratkaisussa jäteveden lämmöllä voidaan suoraan lämmittää

kylmää käyttövedettä. Järjestelmävaatimuksena on, että lämpimät ja kylmät jätevedet erotetaan toisistaan lämmönsiirtimille asti. Kiinteistökohtaisen lämmöntalteenoton ongelmana on jäteveden epätasainen virtaama, mikä aiheuttaa haasteita erityisesti tekniselle toteutukselle. Ratkaisu on mahdollinen lämmön varastoinnin avulla, jota on käsitelty enemmän kappaleessa 3.7. Lämmönvarastointi luonnollisesti lisää tekniikan investointikustannuksia.

Keskitettyssä ratkaisussa jäteveden virtaus on tasaisempaa, joten lämmöntalteenotto on helpompi toteuttaa. Lämpö voidaan ottaa talteen joko puhdistetuista jätevesistä tai erottaa lämpimät vedet kaksiviemärijärjestelmällä. Keskitetyn ratkaisun ongelmana on, että talteen otettua lämpöä ei pystytä hyödyntämään suoraan. Lämpötilaa on nostettava lämpöpumpuilla, jotta lämpö olisi hyödynnettävissä. (Rajala et al. 2010.) Ratkaisussa on otettava huomioon lämmönsiirtopintojen likaantuminen ja siitä aiheutuva lämmönsiirron huonontuminen sekä huoltokustannukset.

3.9 Pienimuotoinen CHP

Pienimuotoiseksi sähkön ja lämmön yhteistuotannoksi määritellään tässä työssä sähköteholtaan alle 10 MW_e laitokset. Pienimuotoista sähkön ja lämmön yhteistuotantoa kiinteällä polttoaineella on toteutettu toistaiseksi vähän. Lähinnä syynä on tällaisten voimalaitosten huonosta rakennusasteesta (0,1–0,2) johtuva heikko kilpailukyky. Teknisinä ratkaisuinä käytetään samoja tekniikoita kuin suuremmassakin kokoluokassa. (Savolainen et al. 2008.) Pientuotannon vaihtoehtoja on esitelty seuraavissa kappaleissa. Lisäksi käsitellään sähköverkkoon liittymisen edellytyksiä.

Pienimuotoisen CHP-tuotannon kannalta merkittävimpiä tekijöitä ovat hyötysuhde ja käyttöikä. CHP-tekniikoista paras sähköhyötysuhde on polttokennolla, jonka jälkeen tulevat kaasua- ja dieselmootorit. Yleisesti ottaen pienimuotoinen tuotanto on kuitenkin hyötysuhteeltaan heikompaa kuin suuremman mittakaavan tuotanto. Tosin tekniikan kehittyminen voi pienentää tätä eroa pitkällä aikavälillä. Lisäksi pientuotannon kustannukset alentuvat tekniikan yleistyessä. Pienimuotoisessa tuotannossa on myös erityisen

tärkeää, että polttoaine on tasalaatuista ja sen kosteuspitoisuus tulisi olla mahdollisimman pieni. Suomen energiajärjestelmän rakenteelliset muutokset muun muassa sähköverkon kehittämisen osalta voivat auttaa pientuotannon yleistymisessä. (osin Vartiainen et al. 2002.)

Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa kummankin tuotteen kustannukset on pystyttävä määrittämään erikseen kummallekin hyödykkeelle. Tähän käytetään esimerkiksi hyödynjakomenetelmää, jossa kokonaiskustannukset jaetaan sähkölle ja lämmölle korvaavien vaihtoehtoisten hankintamuotojen kustannusten suhteessa. Vaihtoehtoiseksi hankintamuodoksi valitaan edullisin kyseessä olevaa voimalaitosta korvaava hankinta. Sähkön osalta tämä on usein markkinasähkö. Lämmöntuotannossa käytetään usein vesikatilan kustannustietoja. (Koskelainen 2006.)

3.9.1 Pientuotannon liittäminen sähköverkkoon

Sähkön tuottaminen on Suomessa, ydinvoimaa lukuun ottamatta, kaikille vapaata toimintaa. Kaikki tuotantolaitokset voivat myös liittyä yleiseen sähköverkkoon ja myydä sähköä avoimilla sähkömarkkinoilla. Sähköntuottajan tulee kuitenkin varmistaa, että tuotantolaitos täyttää viranomaisten ja sähkölaitosten tuotannolle asettamat vaatimukset kuten tekniset vaatimukset. (Pöyry Energia Oy 2006, 13.)

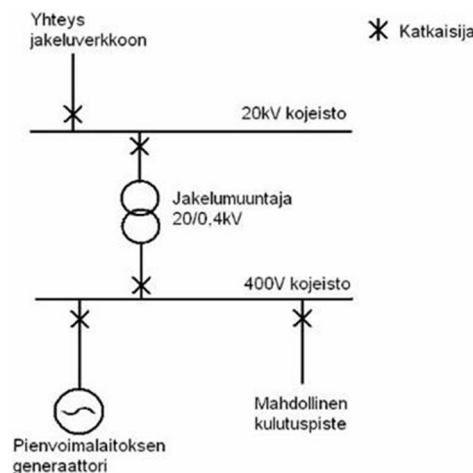
Suomen sähköverkko muodostuu valtakunnallisesta 110–400 kV:n kantaverkosta, 110 kV:n alueverkosta ja 0,4–70 kV:n jakeluverkosta (Pöyry Energia Oy 2006, 14). Kantaverkkoja hallitsee valtakunnallisesti Fingrid Oy ja jakeluverkkoja puolestaan paikalliset sähköyhtiöt. Sähkömarkkinalain (386/1995) mukaan verkossa toimimiseen tarvitaan Energiamarkkinaviraston lupa lukuun ottamatta tilannetta, jossa laitoksen hallinnassa olevalla sähköverkolla hoidetaan vain kiinteistöryhmän sisäistä sähkönjakelua.

Sähköverkon kannalta pienvoimalat voidaan jakaa kahteen ryhmään:

- Voimalat, joita ei ole liitetty yleiseen verkkoon
- Voimalat, jotka toimivat rinnan yleisen jakeluverkon kanssa niin, että tuotanto voidaan siirtää osin tai kokonaan jakeluverkkoon (Pöyry Energia Oy 2006, 13)

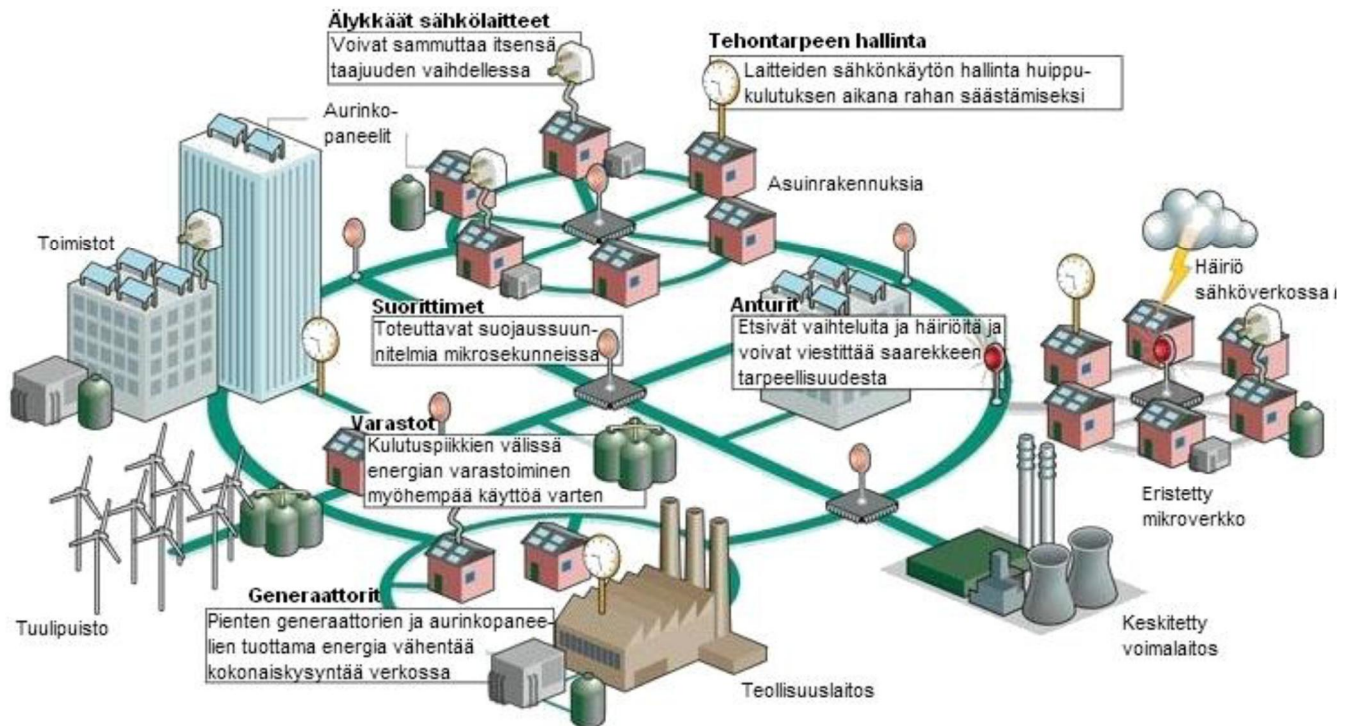
Pienvoimalan sähköverkkoon kytkeminen on usein sähköverkon kannalta haasteellista, mikä johtuu siitä, että jakeluverkot on perinteisesti suunniteltu yksisuuntaiseen tehosiirtoon säteittäisessä verkkorakenteessa. Liitettäessä pienvoimalaitos verkkoon tehovirtauksen suuruus ja suunta saattavat muuttua, mikä aiheuttaa ongelmia verkon hallinnan ja suojauksen kannalta. Toisaalta myös jakeluverkossa esiintyvät viat vaikuttavat pienvoimalaan ja voivat vahingoittaa voimalaitosta ja sen sähköjärjestelmiä, jos sitä ei ole asianmukaisesti liitetty sähköverkkoon ja suojattu liityntäpisteessä. (Pöyry Energia Oy 2006, 20.)

Sähkötuoittajan tuotantolaitteisto voi olla kytketty jakeluverkkoon joko suoraan tai kiinteistöryhmän sisäisen sähköverkon kautta. Kuvassa 15 on esitetty yksinkertaistettu pääkaavioesimerkki pienehkön (noin 100 kW) voimalan kytkemisestä samaan 400 V:n kojeistoon kulutuksen kanssa. Kytkentäratkaisut ovat kuitenkin aina tapauskohtaisia. (Pöyry Energia Oy 2006, 23.)



Kuva 15. Pienvoimalan kytkeminen samaan 400 V:n kojeistoon kulutuksen kanssa (Pöyry Energia Oy 2006).

Tulevaisuudessa sähköverkkoja on tavoitteena kehittää niin sanotun älykkään sähköverkon (Smart Grid) suuntaan, jolloin myös hajautetun sähköntuotannon syöttäminen verkkoon helpottuu. Tarkoituksena on, että kaksisuuntainen tehon siirto verkkoon ja verkosta helpottuu. Kuvassa 16 on esitetty eräs näkemys tulevaisuuden älykkäästä sähköverkosta.



Kuva 16. Eräs näkemys älykkäästä sähköverkosta (Heyerman 2009; suomennos Palmumaa 2010).

3.9.2 Polttomoottorivoimalat

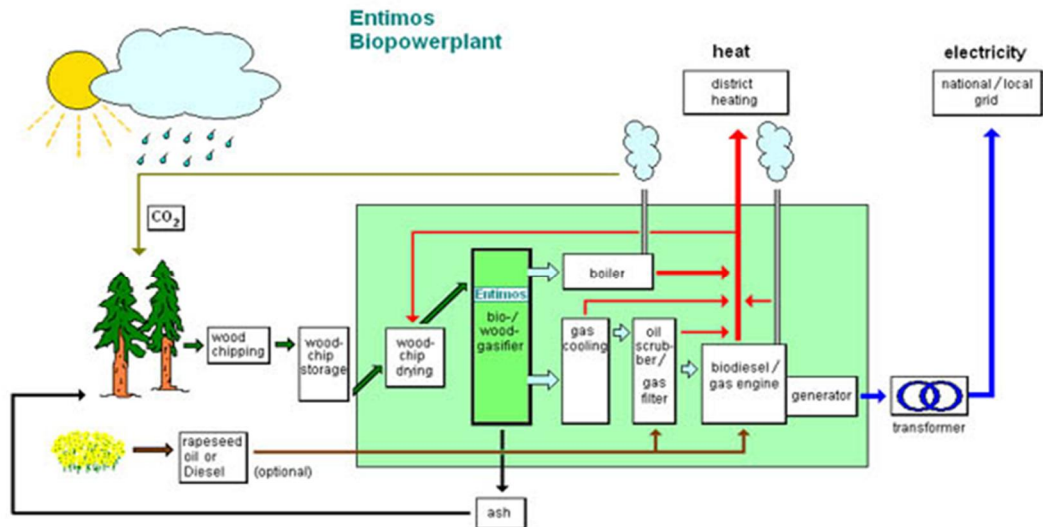
Polttomoottorivoimala koostuu mäntämoottorista ja siihen liitetystä generaattorista. Toimintasykli alkaa puristamalla ilmaa tai ilman ja polttoaineen seosta ympäristöään suurempaan paineeseen, jonka jälkeen kaasun energiasisältöä kasvatetaan polttoaineen poltolla. Lämpötilan kohoamisen vaikutuksesta kaasu pyrkii nyt laajenemaan puristusvaiheen lähtöarvoa suurempaan tilavuuteen, jolloin se työntää mäntää ja saa aikaan mekaanista energiaa. Mäntään kohdistunut voima ohjataan kiertokangen avulla kampiakseliin ja edelleen generaattoriin. (Larjola 2010.)

CHP-tuotannossa hyödynnetään sähkön lisäksi myös prosessissa muodostuva lämpö. Moottorivoimalaitokselle on ominaista korkea sähköhyötysuhde, laaja tehoalue sekä monipuolinen polttoainevalikoima. Lisäksi etuna ovat lyhyt rakennusaika sekä modulaarisuus, jolloin haluttu tehotaso voidaan saavuttaa kytkemällä useita standardoituja yksiköitä yhteen. Yhteistuotannossa kaasu- ja dieselmoottoreita käytetään joko lämpimän veden (85–100 °C) tai matalapainehöyryn (alle 20 bar) tuottamiseen. (Vartiainen et al. 2002, 17.) Kaasu- ja dieselmoottoreiden tyypilliset ominaisuudet on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Kaasu- ja dieselmoottorivoimaloiden tyypilliset tekniset ominaisuudet (Vartiainen et al. 2002).

Ominaisuus	<200 kW _e	200–2000 kW _e	2–10 MW _e
Sähköhyötysuhde (%)	30...38	35...40	40...45
Lämpöhyötysuhde (%)	45...50	45...50	45...50
Kokonaishyötysuhde (%)	75...85	80...90	85...90
Lämmöntuotto (°C)	85...100	85...100, höyry	85...100, höyry
Käytettävyys (%)	96	94	96
Kierrosnopeus (1/min)	1000...3000	1000...1800	600...1000

Eräs biomassan kaasutukseen perustuva moottorivoimalaitosvalmistaja on suomalainen Entimos Oy, jonka tuotteita ovat *polttoaineteholtaan* 1-7 MW_{pa} yhteistuotantolaitokset. Sähköntuotantohyötysuhteeksi on ilmoitettu 30 %. (Entimos Oy, 2011.) Kaavio prosessista on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Kaavio kaasutukseen perustuvasta moottorivoimalaitoksen lämpöä ja sähköä tuottavasta prosessista (Entimos Oy, 2011).

Moottorivoimalaitoksen investointikustannukset muodostuvat suurelta osin muiden laitteiden ja asennustyön kustannuksista kuin moottori-generaattorin kustannuksista. Yksikköön kasvaessa ominaisinvestointikustannukset laskevat. Kustannuksia on esitetty taulukossa 12. Kaasu- ja dieselmootorit soveltuvat parhaiten kohteisiin, joissa on kohtuullisen tasainen sähkön ja lämmön tarve, ja joissa edellytetään hyvää sähköntuotannon hyötysuhdetta. Moottorivoimalaitokset soveltuvat myös aluelämpöjärjestelmiksi. (Vartiainen et al. 2002, 18.)

Taulukko 12. Kaasu- ja dieselmootoreihin perustuvien yhteistuotantolaitosten kustannustietoja (Vartiainen et al. 2002).

	<200 kW	200–2000 kW	2–10 MW
Investointi (euroa/kW _e)	900...1400	450...1000	550...900
Käyttö- ja kunnossapito (euroa/MWh _e)	13...22	7...17	4...11
Polttoaine, keskimäärin (euroa/MWh)		20	

3.9.3 Polttokennot

Polttokennossa polttoaineen kemiallinen energia muunnetaan suoraan sähköksi. Yleisin polttoaine on vety, jota voidaan tuottaa esimerkiksi maakaasusta. Kennossa toiselle elektrodille syötetään polttoainetta ja toiselle hapetinta. Elektrolyytti toimii ionien eli varauksen kuljettajana, samalla kun ulkoisessa virtapiirissä kulkevat elektronit saavat aikaan sähkövirran.

Polttokennolla on muihin sähköntuotantomuotoihin verrattuna korkea sähköhyötysuhde. Pienimmissä matalalämpötilaisissa kennoissa hyötysuhde on tosin pienempi. Korkealämpötilaisissa kennoissa hyötysuhde saattaa olla jopa 50 %, minkä lisäksi ne tuottavat lämpöä, jota voidaan hyödyntää. Polttokennojen eliniästä ja käytettävyydestä on kuitenkin vielä varsin vähän tietoa. (Vartiainen et al. 2002, 22.)

3.9.4 Höyryturbiinit ja -koneet

Höyrykone eroaa yleisemmin sähköntuotantoon käytetystä höyryturbiinista siten, että höyrykoneessa höyry liikuttaa sylinterin mäntää. Kun taas höyryturbiinivoimalaitoksessa korkeapaineinen höyry paisuu turbiinin läpi pyörittäen roottoria, joka puolestaan pyörittää akselia. Akselin kautta mekaaninen energia välittyy generaattorin roottoriin.

Höyrykoneessa puolestaan sylinterin mäntä yhdistetään generaattoriin kampiakselin avulla sähköntuotantoa varten. Sylinterin jälkeistä matalapaineisempaa höyryä voidaan käyttää edelleen lämmön tuottamiseen. Höyry muodostetaan erillisessä kattilassa, jolloin polttoainevalikoima on laaja. Muun muassa biopolttoaineita voidaan käyttää.

Höyrykoneen käyttö pienen kokoluokan CHP-tuotannossa on perusteltua siinä mielessä, että höyrykone on höyryturbiinia taloudellisempi vaihtoehto alle 1 MW_e laitoksissa, koska höyryturbiinien hyötysuhde on alhainen osakuormilla. Yli 1 MW_e laitoksissa käytetään aina höyryturbiinia. (Vartiainen et al. 2002.)

Yksi esimerkki pien-CHP:n laitostoimittajasta on Savonia Power Oy, joka valmistaa ja toimittaa muun muassa vakiomoduulista 1 MW_e:n höyryturbiinibiovoimalaitosta. Laitoksen mitoituslämpöteho on 5,9 MW. Polttoaineeksi soveltuvat biopolttoaineet, muun muassa metsähake. (Savonia Power 2011.)

Pienen kokoluokan höyryvoimalaitoksen järjestelmiin kuuluvat periaatteessa samat järjestelmät kuin isomman sähköntuotoltaan yli 10 MW:n laitoksiin, tosin pienemmässä mittakaavassa. Osa pienemmän kokoluokan valmistajista toimittaa moduuleita, joihin on integroitu eri järjestelmän osia, mikä saattaa tuottaa kustannussäästöjä.

CHP-voimalaitoksen erillisiä kustannuksia aiheuttavat järjestelmät voidaan jakaa seuraavasti:

- Sähkö- ja automaatiojärjestelmät
- Polttoaineen ja tuhkan käsittelyjärjestelmät
- Raakavesijärjestelmä
- Kattilalaitos
- Vesi- ja höyryjärjestelmä
- Höyryturbiini ja generaattori
- Kauko/aluelämmön jakelujärjestelmä
- Jäähdytysvesijärjestelmä
- Apu- ja lisäjärjestelmät sekä rakennukset (Kaikko 2011.)

4 LÄMMÖNJAKO

Alueellisesti tai paikallisesti tuotettu lämpöteho siirretään käyttökohteisiin kaukolämpö- tai aluelämpöverkossa. Rakennuksissa lämpöteho jaetaan tiloihin lämmönjakojärjestelmien välityksellä rakennuksen lämpöhäviöiden ja kunkin ajankohdan ulko- ja sisälämpötilojen erotuksen sekä lämpimän käyttöveden tarpeen perusteella. Kulutettavaan tehoon vaikuttavat myös lämmönjakojärjestelmien hyötysuhteet.

Tilojen lämmönjaon vaihtoehtoja ovat:

- Vesipatterijärjestelmä
- Lattialämmitys joko vesikiertoisena tai sähkölämmityksenä
- Suora sähkölämmitys sähköpattereilla
- Sähkölämmitys vesipattereilla
- Ilmanvaihtolämmitys joko vesipatterijärjestelmänä tai sähkövastusjärjestelmänä
- Sähkölämmitys kattosäteilylämmityksenä
- Yhdistelmälämmitys: esimerkiksi ilmanvaihtolämmitys täydennettynä muutamilla sähköpattereilla tai lattialämmityksellä (RIL 2009, 117)

Tässä yhteydessä lämmönjakoa käsitellään erityisesti matalaenergiarakentamisen näkökulmasta ja vaihtoehtoista kuvataan tarkemmin lähinnä patteri-, lattia- ja ilmanvaihtolämmitys. Lisäksi käsitellään alueellisen matalalämpötilaverkon rakennetta ja ominaisuuksia matalaenergiarakentamisen sekä vaihtoehtoisten energiamuotojen kuten maalämmön näkökulmasta.

4.1 Patterilämmitys ja yhdistelmälämmitys

Perinteisesti kerrostaloissa käytettävät vesikiertoiset patterilämmitysjärjestelmät on toteutettu kaksiputkikytkennällä, jolloin vesi kiertää aina pystylinjoissa lämmitystarpeesta riippumatta. Lämpötilaa säädetään patteritermostaattilla, joka katkaisee kierron patterissa asetusarvon ylityttyä. Matalaenergiarakentamisessa on suositeltavaa käyttää eristetyillä runkoputkillä varustettua jakotukkijärjestelmää, joka vähentää rakennuksen yllälämpe-

nemistä silloin kun lämmitystarve on vähäinen. (RIL 2009, 118.) Riittävän suurella patteripinta-alalla saadaan toteutettua myös matalalämpötilaverkon lämmönjako (Senara Oy 2011).

Jakotukkijärjestelmässä jokainen huoneisto varustetaan omalla jakotukilla, jolloin myös lämpöenergian huoneistokohtainen mittaus on helppo toteuttaa. Pattereissa on edelleen termostaatti, mutta sen sulkeutuessa vesikierto pysähtyy kyseisessä piirissä täysin. Tämä parantaa järjestelmän hyötysuhdetta ja järjestelmä voidaan pitää päällä myös kesäaikana märkätilojen lämmitystarpeen takia. Menoveden lämpötilaa ohjataan ulkoilman lämpötilan mukaan. (RIL 2009, 119.)

4.2 Lattialämmitys

Lattialämmitys voidaan toteuttaa kaikkien alapohja- ja välipohjarakenteiden yhteyteen. Lattialämmityksen lämmönluovutusta säätelevät lattian pintamateriaalit, putkiväli ja meno/paluuveden mitoituslämpötilat. Puu- ja parkettilattiat määräävät meno- ja paluuveden mitoituslämpötilat, jotka ovat korkeintaan 40/33 °C. Lattialämmitystä säädetään huonetermostaatilla. (RIL 2009, 120.)

Käytännössä lattialämmitys on hyvä vaihtoehto energiatehokkaille ja matalaenergiaverkkoa käyttäville rakennuksille, koska lattialämmityksessä lämpöä luovuttavaa pinta-alaa on enemmän kuin esimerkiksi patterilämmityksessä. Tämän vuoksi lämpötilatasot voivat olla matalampia. Matalaenergiarakennuksissa on kuitenkin huomioitava tilojen ylikämmenemisen riski. Usein riittää kun oikein mitoitettu lämmönjakokaista asennetaan huoneen lattian ulkoseinäisivustalle. (Senara Oy 2011; RIL 2009, 120.)

4.3 Ilmanvaihtolämmitys

Mikäli tilojen lämmitys ja jäähdytystarve saadaan rakenneratkaisuilla riittävän pieneksi, voi rakennusta olla taloudellista lämmittää ja jäähdyttää pelkällä ilmanvaihdolla. Ilman-

vaihtolämmitystä voidaan pitää yhtenä vaihtoehtona, mikäli matalaenergiatalon tilojen lämmitysenergiatarve on välillä 30–40 kWh/m²,a. (RIL 2009, 129.) Rakentamis- ja huoltokustannuksia saadaan pienennettyä erillisen lämmönjakojärjestelmän kuten patterijärjestelmän jäädessä pois.

Huoneistokohtaisessa ilmanvaihtolämmityskoneessa ulkoilma esilämpää pääasiassa poistoilman lämmöllä lämmöntalteenottolaitteessa. Yleensä vain pakkaskaudella ilmaa lisälämmitetään jälkilämmityspatterissa. Lisälämmön tarve riippuu rakennuksen lämpöhäviöistä. Ilmanvaihtokoneen jälkilämmitin voidaan toteuttaa esimerkiksi vesikiertoisena, jolloin mitoituksena voidaan käyttää noin 50/30 °C meno/paluulämpötiloja. (RIL 2009, 122, 122; Klobut et al. 2009, 20.)

Lisäksi huonekohtaisia lisälämmittäjiä esimerkiksi sähkövastuksella voidaan asentaa hienosäätämään päätelaitteesta puhallettavaa ilmaa. Järjestelmät voidaan optimoida siten, että tuloilmaa lämmitetään vain sen verran, että huonelämpötila olisi noin 19–20 °C. Tällöin loppulämmitys huonekohtaisesti tarvittavaan lämpötilaan hoidetaan päätelaitteiden sähkövastuksilla. (RIL 2009; Pietarinen & Saari 1997, 12.)

Lämmityksen minimi-ilmavirrat määräytyvät ilmalla lämmitettävien tilojen ja ilmanvaihdon huoneen lämpöhäviöiden perusteella. Nämä lämpöhäviöt korvataan huoneisiin siirrettävällä lämpöteholla eli ylilämmittämällä ilma kunkin huonetilan lämpötilaan nähden. (RIL 2009, 123.) Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmässä on yleensä paremmat säätö- ja ohjausmahdollisuudet kuin perinteisessä radiaattorilämmityksessä.

4.4 Matalalämpötilaverkot

Perinteisesti kaukolämpöverkot koostuvat Suomessa kiinnivaahdotetuista johdoista, joissa teräksinen virtausputki ja polyeteenisuojakuori on liitetty kiinteästi yhteen polyuretaanieristeellä. Teräksinen virtausputki mahdollistaa menolämpötilan noston aina 120 °C asti sekä 16 bar:n käyttöpaineen. Korkeiden lämpötilojen käyttö suurentaa siir-

tokapasiteettia ja pienentää pumppauskustannuksia sekä näin ollen mahdollistaa pitkät siirtoetäisyydet voimalaitoksilta käyttökohteisiin. (Koskelainen 2006, 137.)

Alueellisessa lämpöverkossa siirtomatkat eivät ole pitkiä ja mikäli tilojen lämmitysjärjestelmä mahdollistaa alempien lämpötilojen käytön lämmönjaossa, voidaan alueelle harkita matalalämpötilasiirtoverkon rakentamista. Esimerkiksi maalämmön käyttäminen kustannustehokkaasti edellyttää matalampia siirtolämpötiloja. Matalalämpötilaverkkojärjestelmässäkin käyttöveden lämmitys vaatii kuitenkin noin 60–70 °C lämpötiloja, mikä tarkoittaa, että järjestelmän hyödyt saadaan parhaiten esiin rakentamalla erilliset lämmönsiirtoverkot tilalämmitykselle (noin 40–50/30 °C) ja käyttöveden lämmitykselle (menolämpötila noin 70 °C) sekä tarpeen mukaan myös jäädytykselle.

Matalalämpötilaverkoissa voidaan käyttää teräsputkien sijaan muoviputkia, jotka kestävät enintään noin 80 °C lämpötilaa (95 °C hetkellisenä) ja 6 bar:n painetta (10 bar hetkellisenä). Yleisin virtausputkimateriaali on PEX. Putket pinnoitetaan diffuusionestekerroksella. Eristeenä on polyuretaanivaaho ja suojaputki on yleensä polyeteeniä, kuten teräsputkissakin. Putket toimitetaan erimittaisina kieppeinä ja ne voidaan asentaa ilman jatkosaumoja, joten asentaminen on perinteistä jäykkää johtoa nopeampaa. (Koskelainen 2006, 143.)

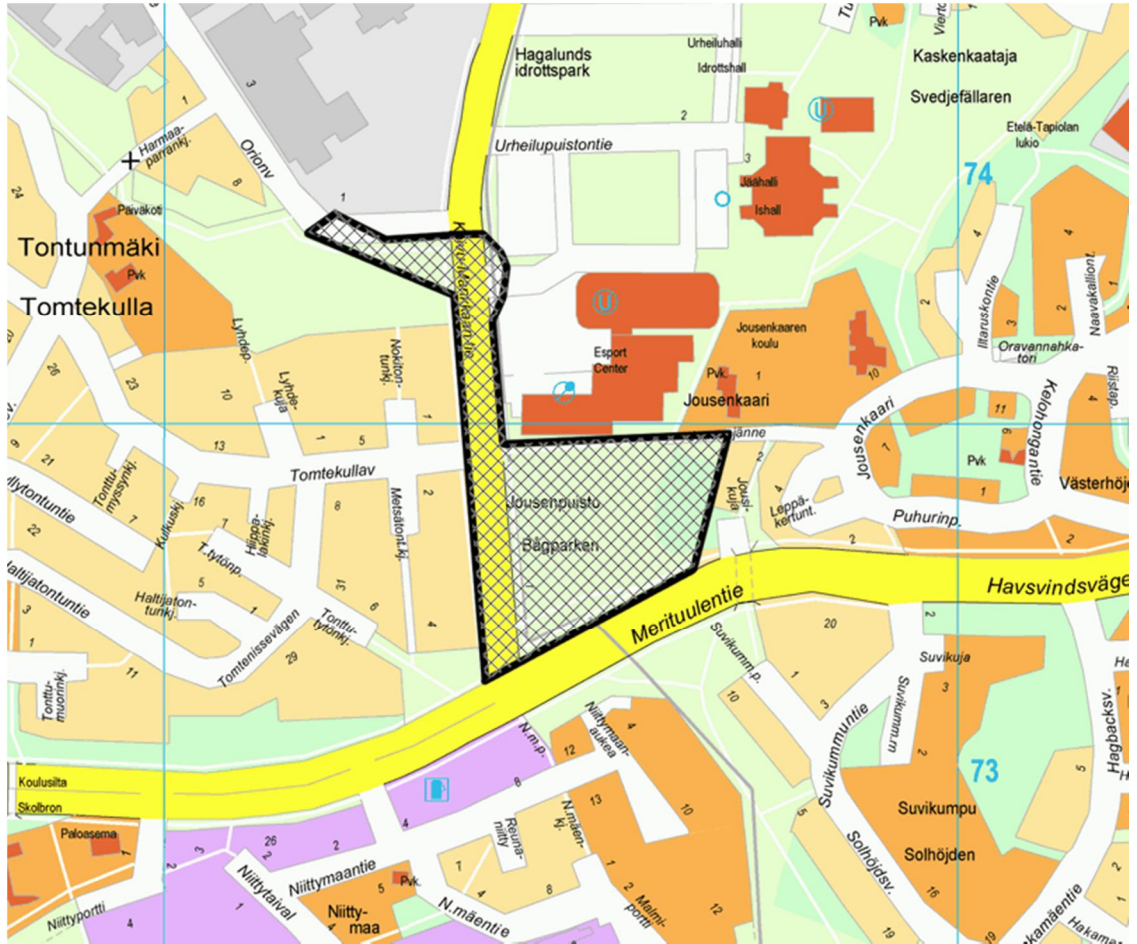
5 TAPAUSKOHTAINEN TARKASTELU -JOUSENPUISTO

Tässä työssä vaihtoehtoisia energiantuotantomuotoja tarkastellaan tapauskohtaisesti Espooseen rakennettavan Jousenpuiston asuinalueen osalta. Asuinalue tulee sijaitsemaan uuden länsimetroreitin varrella. Lähtökohtana Jousenpuiston alueen suunnittelulle ja rakentamiselle on asemakaavan muutos, jolla osoitetaan uutta liike- ja asuinrakentamista Urheilupuiston metroaseman yhteyteen. Asemakaavaehdotuksen valmistumistavoite on vuoden 2011 loppuun mennessä (Espoon kaupunki 2010). Yleiskuva kaava-alueesta on esitetty kuvassa 18.

Alueen energiankulutus määritellään ennakoiden tulevia rakennusnormitiukennuksia, joten lähtötasona käytetään vuoden 2012 normeja, mikä tarkoittaa kokonaisenergiankulutuksena asuinkeuhkotalolle enintään 130 kWh/m²,a. YIT:n matalaenergiakonseptin avulla on mahdollisuus saavuttaa vuoden 2012 tasosta vielä 15 % vähennys. Tämä tarkoittaa matalaenergiarakentamista, joka saavutetaan käytännössä kappaleessa 2 esitetyillä rakenteellisilla ja teknisillä ratkaisuilla.

5.1 Tietoa alueesta

Jousenpuisto sijaitsee Espoon Tapiolan kaupunginosassa Urheilupuiston eteläpuolella, Koivu-Mankkaan-tien ja Merituulentien risteyksen koillispuolelle rajautuvalla alueella (Kuva 18). Espoon kaupunki omistaa kaavamuutoksen alaisen alueen lukuun ottamatta pysäköintialueita, jotka ovat osakeyhtiöiden omistamia. Alue on rakentamatonta ja pääosin joutomaata. Kaavamuutosalueen pinta-ala on noin 8,3 ha. (Espoon kaupunki 2010.)



Kuva 18. Yleiskuva kohteen kaava-alueesta (Espoon kaupunki 2010).

Alue koostuu pohjoisimmasta metrokorttelista sekä eteläosan asuinkortteleista 1 ja 2. Jousenpuiston metroasemahallin päälle sijoitetaan kolme kerrosta maanalaista paikoitusta, jonka päälle sijoittuu liiketilaa ja neljä asuinkerrostaloa. Loput asuinkerrostalot sekä pienemmät paikoitusalueet pihakansille sijoittuvat asuinkortteleihin 1 ja 2. Tiedot rakennuksista on koottu taulukkoon 13. Yhteensä kerrosalaa on alueelle suunniteltu $65\,830\text{ km}^2$.

Taulukko 13. Jousenpuiston alueen suunnitellut kerrosalat.

	Kerroksia	Liiketilaa (kem ²)	Asuntoja (kem ²)
Metrokortteli			
A-torni	20 + saunaosasto		9 100
B-torni	16 + saunaosasto		7 400
C-torni	16 + saunaosasto		7 600
D-torni	16 + saunaosasto		7 600
Liiketilat		2 600	
Asuinkorttelit 1	6...8		10 560
Asuinkorttelit 2	4...6,5	320	20 650
Yhteensä		2 920	62 910

Alueen asukaslukua voidaan arvioida neliötehokkuusluvun ja asumistiheyden perusteella. Lähtökohtana on asuinrakennusten kerrosneliöala. Asumisväljyytenä käytetään Suomen keskimääräistä asumisväljyyttä 38 as-m²/asukas (Juntto 2008, 35). Tulokset on esitetty taulukossa 14. Asuinrakennusten lisäksi alueelle kaavoitetaan liiketilaa, mikä vaikuttaa alueen käyttöveden tarpeeseen.

Taulukko 14. Jousenpuiston arvioitu asukasluku.

Kerrosala, kem ²	Neliötehokkuusluku, as-m ² /kem ²	Asuinala, as-m ²	Asumisväljyys, as-m ² /asukas	Asukasluku
62 910	0,85	53 474	38	1 407

Autopaikkatiheys on väljä eli 1 autopaikka/100 kem². Asuinalue perustuukin pääasiassa metron käyttöön. Lisäksi autopaikoitusta varataan liiketilojen ja liityntäliikenteen käyttöön. Metroaseman sisäänkäynti sijoittuu erilliseen paviljonkirakennukseen, joka sijaitsee kaava-alueen luoteisnurkassa. (Espoon kaupunki 2010.)

5.2 Alueen rakennusten energiankulutus

Tässä työssä rakennusten lämmitysenergian ominaiskulutukseksi on arvioitu 70 kWh/kem². Tämä vastaa nykyistä A-energialuokan rakentamista, jota on vielä tiukennettu 15 %:lla. Tästä huonetilojen ja ilmanvaihdon lämmityksen osuudeksi on arvioitu

48 kWh/kem² ja lämpimän käyttöveden valmistuksen tarpeeksi 22 kWh/kem² (Taulukko 15). Nykyinen A-energialuokan rakentaminen tulee vastaamaan suunnilleen tulevaa vuoden 2012 rakennusmääräysuudistuksen normitasoa. Näin olleen voidaan sanoa, että Jousenpuiston rakentaminen vastaa vuoden 2012 normeihin verrattuna 15 % energiatehokkaampaa asumista.

Edellä mainitut arvot koskevat nimenomaan asuinkerrostaloa. Koska Jousenpuiston alueeseen kuuluu myös liiketilaa, tulee tämä ottaa käyttöveden valmistuksen ominaiskulutuksessa huomioon. Liiketiloiissa vedenkulutus on vähäisempää kuin asuintiloissa. Tässä työssä liiketilojen lämpimän veden ominaiskulutuksena käytetään arvoa 100 litraa/kem²,a (Ympäristöministeriö 2007, 27). Kun tiedetään vuosittainen lämpimän käyttöveden määrä, saadaan sen valmistuksen vuosittainen energiantarve liiketilan osalta laskettua kaavalla:

$$Q_{LKV} = \rho * c_p * V_{LKV} * (T_{LKV} - T_{KV}) * \frac{1}{3600} \quad (9)$$

jossa

Q_{LKV} = käyttövedenlämmityksen tarvitsema energia (kWh)

ρ = veden tiheys, 1000 kg/m³

c_p = veden ominaislämpökapasiteetti, 4,2 kJ/kgK

V_{LKV} = lämpimän käyttöveden kulutus (m³)

$(T_{LKV} - T_{KV})$ = lämpimän käyttöveden ja kylmän käyttöveden lämpötilaero, 50 °C

Kiinteistösähkön ja kotitaloussähkön ominaiskulutuksena asuinkerrostalon osalta käytetään teoksen RIL 2009 mukaista lukua matalaenergiarakennukselle. Matalaenergialiikerakennuksen kiinteistö- ja laitesähkön ominaiskulutukselle ei ole olemassa viitearvoa, joten se on arvioitu lähdetiedon perusteella ottamalla huomioon matalaenergiarakennuksen pienempi kulutus (Ympäristöministeriö 2007). Tässä työssä käytetyt ominaisenergiankulutusarvot on koottu taulukkoon 15.

Taulukko 15. Laskennassa käytetyt energian ominaiskulutukset.

	Huonetilojen lämmityksen ominaiskulutus [kWh/kem ²]	Ilmanvaihdon lämmityksen ominaiskulutus [kWh/kem ²]	LKV:n valmistuksen ominaiskulutus [kWh/kem ²]	Kiinteistö- ja laitesähkön ominaiskulutus [kWh/kem ²]
Asuinkerrostalo	19	29	22	33
Liikerakennus	19	29	5,8	55

Ominaiskulutusten ja kerrosalojen perusteella laskettiin alueen rakennusten energiankulutus eriteltynä tilojen lämmitykseen, ilmanvaihdon tuloilman lämmitykseen, lämpimän käyttöveden valmistukseen sekä kiinteistö- ja laitesähkön kulutukseen. Jousenpuiston alueen energiankulutus eri kortteleihin jaoteltuna on esitetty taulukossa 16. Kokonaisuudessaan alueen energiankulutus on noin 6 800 MWh/a. Lämpöenergian kulutus alueella on noin 4 550 MWh/a.

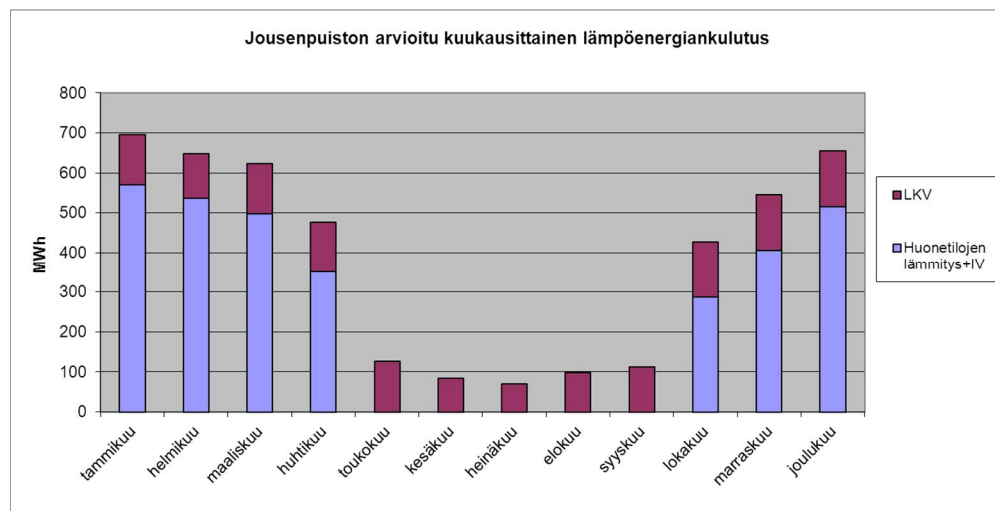
Taulukko 16. Jousenpuiston alueen arvioitu vuosittainen energiankulutus.

	Tilojen lämmitys, [MWh/a]	Ilmanvaihdon lämmitys, [MWh/a]	LKV, [MWh/a]	Sähkö, [MWh/a]
Metrokortteli				
A-torni	173	264	200	300
B-torni	141	215	163	244
C-torni	144	220	167	251
D-torni	144	220	167	251
Liiketilat	49	75	15	129
Asuinkorttelit				
1	201	306	232	348
Asuinkorttelit				
2	398	608	456	697
Yhteensä	1 240	1 909	1 401	2 221

Matalaenergiarakennuksissa lämmityskausi on lyhyempi kuin rakennuskannassa yleensä. Lämmityskausi voi olla jopa alle kuusi kuukautta (RIL 2009, 144). Tässä työssä oletetaan, että Jousenpuiston rakennusten tilojen lämmityskausi on 7 kuukautta.

Tilojen lämmitys- ja ilmastointilaitteiden energiankulutus on likimain verrannollinen keskimääräiseen sisä- ja ulkolämpötilojen erotukseen. Astepäivälukua käytetään ku-

vaamaan tätä yhteyttä. Kuukauden astepäiväluku lasketaan summaamalla päivittäisten ulko- ja sisälämpötilojen erotus. Laskennassa ei oteta huomioon päiviä joiden keskilämpötila on syksyllä yli 12 °C ja keväällä yli 10 °C (Ilmatieteenlaitos 2011b.) Tilojen lämmitysenergian tarve voidaan normittaa eri kuukausille kuukausittaisen astepäivälukujen perusteella. Jousenpuiston kuukausittainen energiankulutuksen jakautuminen on esitetty kuvassa 19. Tarkemmat tiedot lähtöarvoista on liitteessä 1.



Kuva 19. Jousenpuiston kuukausittaiset energiajakaumat.

5.3 Alueen rakennusten lämmitystehon tarve

Lämmityksen mitoitus ja kapasiteetti on valittava siten, että lämmön käyttäjille turvataan riittävä energian saanti paikkakunnan mitoitusulkolämpötilassa. Kaikkein korkeimpien huippujen aikana rakennusten sisälämpötila saa kuitenkin alentua parilla asteella (Koskelainen 2006.) Mitoitustehon maksimikapasiteettia tarvitaan kuitenkin harvoin, arviolta kerran 20–30 vuodessa. Tästä johtuen matalaenergiarakennuksen ja normirakennuksen mitoitustehon välillä ei ole suhteellisesti yhtä suurta ero kuin energiankulutuksessa (RIL 2009.) Tehon määrittäminen perustuu kappaleessa 2.2 esitetyn mukaisesti rakennusvaipan ja ilmapuotojen lämpöhäviöiden kattamiseen sekä tuloilman lämmittämiseen.

Tässä työssä tilojen ominaismitoitustehona käytetään matalaenergiakerrostalon arvoja eli tilojen lämmitykselle ominaisarvoa 10 W/kem^2 ja ilmanvaihdon lämmitykselle 13 W/kem^2 . Alueen mitoitusteho on siten ominaistehon ja kerrosneliöiden tulo.

Lämpimän käyttöveden tehontarpeen laskennassa tulee huomioida tehon risteily. Tämä voidaan ottaa huomioon esimerkiksi Energiategollisuus ry:n kaavalla:

$$\Phi_{LKV} = 57 + 15,3[\ln(n^3 - n^2 + 1)]^{1,17} \quad (10)$$

jossa

Φ_{LKV} = lämpimän käyttöveden valmistuksen tehontarve (kW)

n = asuinhuoneistojen määrä (kpl)

Lämpimän käyttöveden valmistuksen vaatima teho voidaan edellä kuvatulla kaavalla laskea joko asuinkeuhkaloerkohtaisesti tai koko tarkasteltavalle alueelle. Jousenpuiston alueen huipputehontarpeet sekä lämmityksen että käyttöveden lämmityksen osalta on esitetty taulukossa 17.

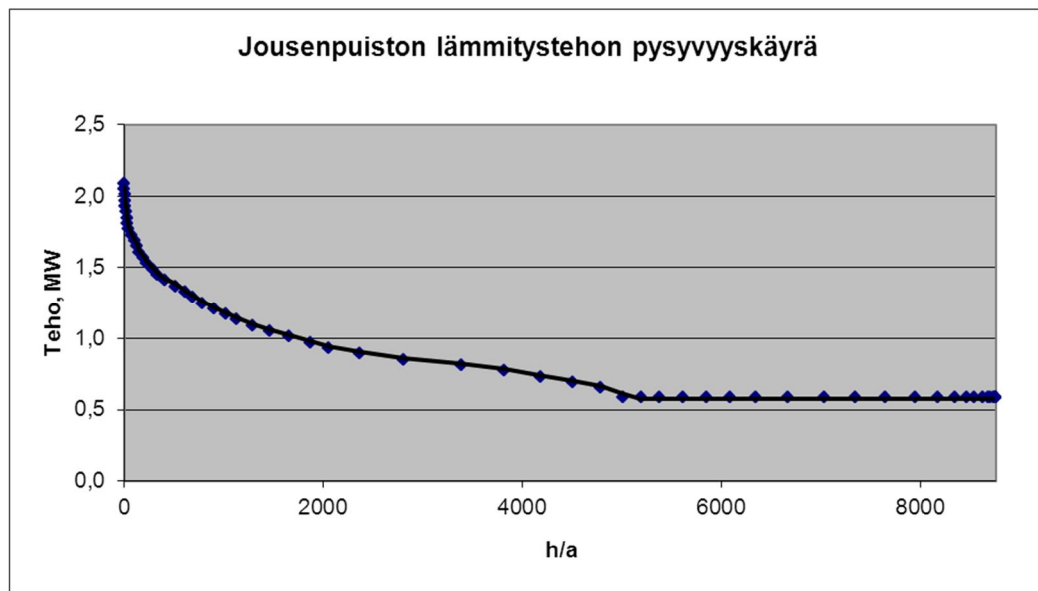
Taulukko 17. Jousenpuiston mitoitustehoja.

	Tilojen lämmityksen mitoitusteho [kW]	IV-lämmityksen mitoitusteho (kW)	LKV:n mitoitusteho ¹⁾ [kW]
Metrokortteli	343	446	517
A-torni	91	118	409
B-torni	74	96	391
C-torni	76	99	393
D-torni	76	99	393
Liiketilat	26	34	
Asuinkorttelit 1	106	137	421
KerrostaloE&F	35	46	329
KerrostaloG&H	35	46	329
KerrostaloI&J	35	46	329
Asuinkorttelit 2	207	268	479
Kerrostalo1	34	45	327
Kerrostalo2	34	45	327
Kerrostalo3	34	45	327
Kerrostalo4	34	45	327
Kerrostalo5	34	45	327
Kerrostalo6	34	45	327

¹⁾ Keskimääräisenä asunohuoneiston pinta-alana käytetty 60 m^2

Yhteensä koko alueen lämmityksen mitoitusteho on reilu 1 500 kW ja lämpimän käyttöveden teho noin 600 kW. Koko alueen kannalta lämpimän käyttöveden valmistuksen tehon tarve ei ole suhteessa niin merkittävä risteilyn takia. Sen sijaan jos tarkastellaan tehoja rakennuskohtaisesti, on lämpimän käyttöveden valmistuksen tehon tarve asuinrakennuksissa tilojen lämmitystarvetta suurempi.

Alueen lämmöntarpeen pysyvyyskäyrää voidaan arvioida vuosittaisten lämpötilan pysyvyystietojen perusteella, koska lämmityksen tarve ja lämpötilaerotus sisäilmaan ovat lähes suoraan verrannollisia. Pysyvyyskäyrän huippu on alueen tilojen lämmityksen mitoitusteho. Alueen lämmöntarpeen arvioitu pysyvyyskäyrä on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Arvioitu Jousenpuiston lämmitystehon pysyvyyskäyrä.

Kuvasta nähdään, että lämpimän käyttöveden valmistuksen tasainen pohjakuorma muodostaa suhteessa suuremman osuuden mitoitustehosta kuin vanhan rakennuskannan alueilla, joissa pohjakuormateho on suhteellisesti pienempi. Tämä johtuu siitä, että lämpimän käyttöveden valmistuksen teho ei laske samassa suhteessa kuin matalaenergiarakennusten tilalämmityksen tehot.

Kaukolämmön liittymisteho tulee puolestaan määrittää kaukolämmön liittymiskustannusten laskemiseksi. Se lasketaan lämmityksen ja ilmastoinnin suurimman tehon sekä käyttöveden vaatiman tuntikeskitehon mukaan. Tässä lämmityksen ominaistehona käytetään edellä mainittua 23 kWh/kem². Käyttöveden keskituntiteho lasketaan asuntomäärän mukaan kaavalla (Koskelainen 2006, 65):

$$\Phi_{LKV} = 0,28 * n + (19,9 * n - 7,9)^{0,5} + 7,3 \quad (11)$$

Jousenpuiston rakennuskohtaiset liittymistehot on esitetty taulukossa 18. Kustannuksiin lyhytaikaiset kulutushuiput eivät vaikuta niin voimakkaasti, joten laskennassa oletetaan lämpimän käyttöveden valmistuksen tehon risteily suuremmaksi kuin mitoitustehon laskennassa. Tämä näkyy taulukosta 18 pienempänä lämpimän käyttöveden laskennallisena tehana kuin muussa mitoituksessa.

Taulukko 18. Jousenpuiston rakennusten liityntätehot.

	Tilalämmitysteho [kW]	LKV teho ¹⁾ [kW]	Kiinteistön liittymisteho [kW]
Metrokortteli			
A-torni	209	94	303
B-torni	170	82	252
C-torni	175	84	258
D-torni	175	84	258
Liiketilat	60		60
Asuinkorttelit			
1			
KerrostaloE&F	81	53	134
KerrostaloG&H	81	53	134
KerrostaloI&J	81	53	134
Asuinkorttelit			
2			
Kerrostalo1	79	52	131
Kerrostalo2	79	52	131
Kerrostalo3	79	52	131
Kerrostalo4	79	52	131
Kerrostalo5	79	52	131
Kerrostalo6	79	52	131

¹⁾ Keskimääräisenä asuntohuoneiston pinta-alana käytetty 60 m²

6 ENERGIANTUOTANTOVAIHTOEHTOJEN VERTAILU KOHTEESEEN MITOITETTUNA

Edellä osiossa 3 esitellyistä energiantuotantovaihtoehtoista tarkempaan tarkasteluun on valittu ennalta arvioiden Jousenpuiston kohteeseen soveltuvat ja taloudellisesti toteuttamiskelpoiset ratkaisut. Nämä vaihtoehdot on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. Jousenpuiston energiantuotannon tarkasteluvaihtoehdot.

Vaihtoehto	Lyhenne
Kaukolämpö ja kompressorijäähdytys	KL+kompr.jäähdytys
Pellettilämpölaite 1 MW ja kompressorijäähdytys	Pelletti1MW+kompr.jäähdytys
Pellettilämpölaite 1,5 MW ja kompressorijäähdytys	Pelletti1,5MW+kompr.jäähdytys
Hakelämpölaite 1 MW ja kompressorijäähdytys	Hake1MW+komp.jäähdytys
Hakelämpölaite 1,5 MW ja kompressorijäähdytys	Hake1,5MW+kompr.jäähdytys
Pien-CHP laite 1 MW ja kompressorijäähdytys	CHP1MW+kompr.jäähdytys
Pien-CHP laite 1,5 MW ja kompressorijäähdytys	CHP1,5MW+kompr.jäähdytys
Maalämpö ja kaukolämpö ja vapaajäähdytys	ML&KL+vapaajäähdytys

Tarkastelussa arvioidaan myös jäähdytysenergian tuotanto. Vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi alueen kokonaisjäähdytysteho määritellään 600 kW:ksi maalämmitysvaihtoehdon vapaajäähdytyksen kapasiteetin perusteella. Jäähdytysenergiantuotanto on 600 MWh/a. Tarkasteluun ei oteta mukaan liikekeskuksen jäähdytystarvetta. Oletuksena on, että kaikissa vaihtoehtoissa liikekeskuksen jäähdytystarve hoidetaan vedenjäähdytyskoneella ja nestejäähdyttimellä. Siten liikekeskuksen jäähdytyksellä ei ole vaikutuksia vertailutuloksiin.

Maalämpövaihtoehdossa jäähdytysenergia tuotetaan ilman kompressoria vapaajäähdytyksellä, jossa lämpökaivojen viileä neste kiertää jäähdytysvaihtimen kautta. Jäähdytysvaihtimella viilentynyt jäähdytysverkoston kiertovesi johdetaan jäähdytysvaraajan kautta tuloilmakoneen jäähdytyspatteriin. Muissa vaihtoehtoissa sama jäähdytysenergia

(600 MWh/a) tuotetaan kompressorien avulla. Tällöin tuloilma jäädytetään kiinteistökohtaisen vedenjäähdytyskoneen ja nestejäähdyttimen avulla. Kompressorien kylmäker-toimeksi (COP) on arvioitu 4.

Tarkemmassa tarkastelussa lämmitysenergian kulutukseen on kaikkien vaihtoehtojen osalta lisättävä lämmön siirron häviöt. Ainoastaan kaukolämmöllä tuotannon ja siirron häviöt sisältyvät kustannuksiin, mutta myös kaukolämmölle on määritettävä siirtohäviöt päästöjen laskemiseksi. Kokonaissiirtohäviöt on arvioitu sekä kaukolämmöllä että bio-lämmöllä noin 5 %:ksi Jousenpuiston lämpöenergian kulutuksesta. Maalämpövaihtoehdossa siirtohäviöt on arvioitu 2 %:ksi maalämmöllä tuotetusta energiasta.

Teknisessä mielessä sekä kaukolämpövaihtoehdossa että biokattilavaihtoehdossa siirto-verkoston rakenne on sama. Sen sijaan maalämmössä lämpöpumpuilta kiinteistöjen lämmönjakokeskuksille johtavat lämpöputket mitoitetaan alhaisemmalle lämpötilalle, jolloin putkikoot kasvavat.

6.1. Kaukolämpö

Kaukolämpö on perusratkaisu, johon muita vaihtoehtoja verrataan. Alueen liittyessä kaukolämpöön rakennukset liitetään talojohdoilla kaukolämpöverkkoon, jonka lämpö tuotetaan Espoossa Fortumin Suomenojan yhteistuotantovoimalaitoksella. Talajohtojen liittymistehot on esitetty taulukossa 18.

Suomenojan kaukolämpövoimalaitoksen pääyksiköt ovat 265 MW:n hiilipölykattila-voimalaitos ja 600 MW:n maakaasua käyttävä kaasukombivoimalaitos. Lisäksi on pie-nempiä vara- ja huippukattiloita. Hiilipölykattilan sähköteho on 80 MW ja kaukolämpö-teho 160 MW. Kombivoimalaitoksen sähköteho on 280 MW ja kaukolämpöteho 260 MW. Suomenojan voimalaitoksen kokonaishyötysuhde on 86 %. (LSY 2006.)

6.2 Alueellinen biokattila

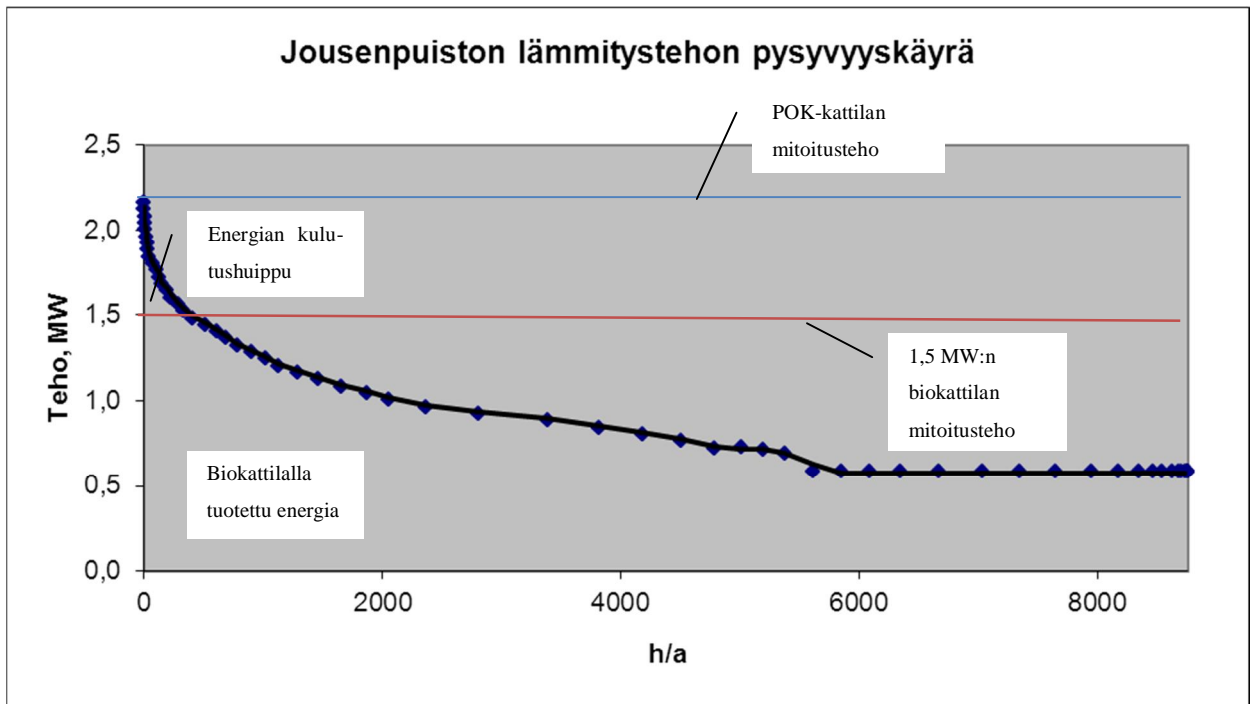
Alueellista kiinteän biopolttoaineen lämpökattilaa ei ole yleensä tarkoituksenmukaista mitoittaa koko verkosto huipputeholle. KPA-kattilan hallittavuus on nimittäin helpointa lähempänä sen nimellistehoa. Lisäksi hyötysuhde useimmiten heikkenee, kun kattila toimii alle puolella nimellistehostaan. Biopolttoainekattila soveltuu siten peruslämmön tuottajaksi, jonka kuorma on mahdollisimman tasainen sekä huipunkäyttöaika suuri. (Satakunnan ammattikorkeakoulu 2002, 8.)

Jousenpuiston tapauksessa, kun kesäinen lämpimän käyttöveden valmistuksen peruskuorman teho on lähempänä huipputehoa kuin vanhalla rakennuskannalla, biokattila soveltuu hyvin alueelliseksi lämmitysratkaisuksi. Tässä tapauksessa myös kesäaikainen lämmin käyttövesi on siis mahdollista tuottaa poikkeuksellisesti biokattilalla, koska tehon säädettävyys riittää.

Mitoitusratkaisuina tarkastellaan kahta eri vaihtoehtoa. Vaihtoehto 1) on 1,5 MW:n biopolttoainekattila, jonka huippu- ja varajärjestelmänä toimii 2,2 MW:n kevytpolttoöljykattila (jäljempänä POK). Tällöin yli 1,5 MW menevä tehon kulutuksen huippu tuotetaan kevyellä polttoöljyllä ja peruskuorma biopolttoaineilla. Vaihtoehto 2) on mitoitus-teholtaan pienempi 1 MW:n biopolttoainekattila, jonka huippu- ja varajärjestelmänä on 2,2 MW:n POK-kattila, kuten ensimmäisessäkin vaihtoehdossa. Kattiloiden hyötysuhteeksi on arvioitu 0,9. Kummassakin vaihtoehdossa tuotetaan siirtohäviöt mukaan luki-en lämpöä 4 780 MWh vuodessa.

Teknisinä ratkaisuina kummassakin vaihtoehdossa tarkastellaan pelletin polttoon perustuvaa lämmityskonttia sekä hakkeen kaasutukseen ja tuotekaasun polttoon perustuvaa Bionear-laitteistoa. Molempien ratkaisujen laitetoimittaja on HT Enerco Oy.

Öljykattilalla tuotettavan energian kulutushuipun osuus on mahdollista määrittää lämmitystehon pysyvyyssäyrästä pinta-alojen suhteiden perusteella (Kuva 21). Lisäksi energiaosuuksien kokonaisuuksien jakautumisessa on otettava huomioon KPA-kattilan käytettävyys, mikä vähentää sillä tuotettavaa lämpöenergian määrää.



Kuva 21. Jousenpuiston alueen mitoitus-tehon ja kattilan mitoituksen suhde vaihtoehdossa 1.

Käytettävyys tarkoittaa todennäköisyyttä sille, että yksikkö on toimintakunnossa tietty-nä ajanhetkenä (Koskelainen 2006). Toisin sanoen käytettävyttä pienentää muun mu-assa vika- ja korjausajat sekä huoltoajat. Tässä tapauksessa biokattilan käytettävydeksi oletetaan 96 %. Varatehon suuruutena käytetään biokattilan painotettua keskiarvotehoa, joka on kummallekin vaihtoehdolle 0,8 MW. Edellä mainittujen oletusten perusteella lasketut energiantuotanto-osuudet ja mitoitus-tiedot on esitetty taulukossa 20.

Taulukko 20. Mitoitustietoja. Huom. laitteistovalinta pellettikontin ja hakkeen kaasutuslaitteiston välillä ei vaikuta taulukon tietoihin.

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2
Mitoitus-teho KPA-kattila	1,5 MW	1 MW
KPA-kattilan mitoitus huipputehosta	70 %	50 %
Mitoitus-teho öljykattila	2,2 MW	2,2 MW
KPA-kattilalla tuotettu energia	4450 MWh/a	4120 MWh/a
Öljykattilalla tuotettu energia	330 MWh/a	660 MWh/a
KPA-kattilan huipunkäyttöaika	2970 h/a	4120 h/a
KPA-kattilalla tuotettava energia vuosit-taisesta kokonaislämmitysenergiasta	93 %	86 %

Pellettilämmitysratkaisu perustuu pelletin polttamiseen ns. stokeripolttimessa, johon pelletti siirretään välisäiliöstä automaattisilla kuljettimilla. Polttoaineen palaminen tapahtuu arinalla. Lämpöteho siirtyy kattilan lämmönsiirtopintojen kautta putkistoissa kiertävään lämmitysjärjestelmän veteen. Pellettilämmityskontin toimitukseen kuuluvat pellettisiilo siirtoruuvilla varustettuna, lämmityskontti, sähkö- ja LVI-tekniiset työt sekä käyttöönotto ja käyttökoulutus. Polttoaineena voidaan käyttää sekä puupellettiä että turvepellettiä. POK-kattilan polttoaine on kevyt polttoöljy. Pellettisiilon tilavuus (100 m³) riittää 1,5 MW:n mitoitusratkaisussa huippupakkasilla noin viikon täyttöväliin.

Hakkeen kaasutusratkaisu perustuu Bionear-laitteestoon. Prosessissa hake syötetään kaasuttimen yläosaan, josta se valuu hitaasti kuivumis-, pyrolyysi-, kaasutus- ja polttovyöhykkeiden läpi. Tuhka poistetaan reaktorin pohjalta. Ilma ja vesihöyry syötetään kaasuttimen alaosaan arinan kautta. Edellytyksenä kaasutukselle on, että ilmakerroin on alle 1 (Kara et al. 2004, 244.) Tuotettu kaasuseos poltetaan bioenergiakattilassa kaasupolttimella.

Kaasutusratkaisun toimitukseen kuuluu Bionear-laitteisto, konttirakennus, laitteiden asennukset ja säädöt sekä käyttökoulutuksen. Polttoaineena käytetään puuhaketta. Hakkeen suositeltavin palakoko on 40–70 mm ja paksuus 5–25 mm. Toimintavarmuuden kannalta kosteuden tulee olla pääsääntöisesti alle 35 %. Hakkeen energiasisältö kuutiometriä kohden on pellettiä pienempi, joten täyttövälikin on tiheämpi. 1,5 MW:n mitoitusratkaisussa täyttöväli on huippupakkasilla noin 4 vuorokautta.

6.3 Alueellinen CHP-voimalaitos

Tässä työssä CHP-vaihtoehtoa tarkastellaan yleisellä tasolla lähinnä kustannusten ja päästöjen kannalta. Tekniikkana voidaan käyttää esimerkiksi hakkeen kaasutusta ja kaasun käyttöä moottorivoimalaitoksessa. Toinen toteuttamiskelpoinen vaihtoehto on pienimuotoinen höyryturbiinikoneisto, jonka kattilassa poltettaisiin metsähaketta.

Vaihtoehtoina tarkastellaan sekä 1 MW_{th} että 1,5 MW_{th} ratkaisuja. Varakattilan eli öljykattilan mitoitusteho on 2,2 MW kuten lämpölaitosvaihtoehtoissakin. Rakennussuhteenä käytetään lukua 0,2. Vaihtoehtojen lukuarvoja on esitetty taulukossa 21.

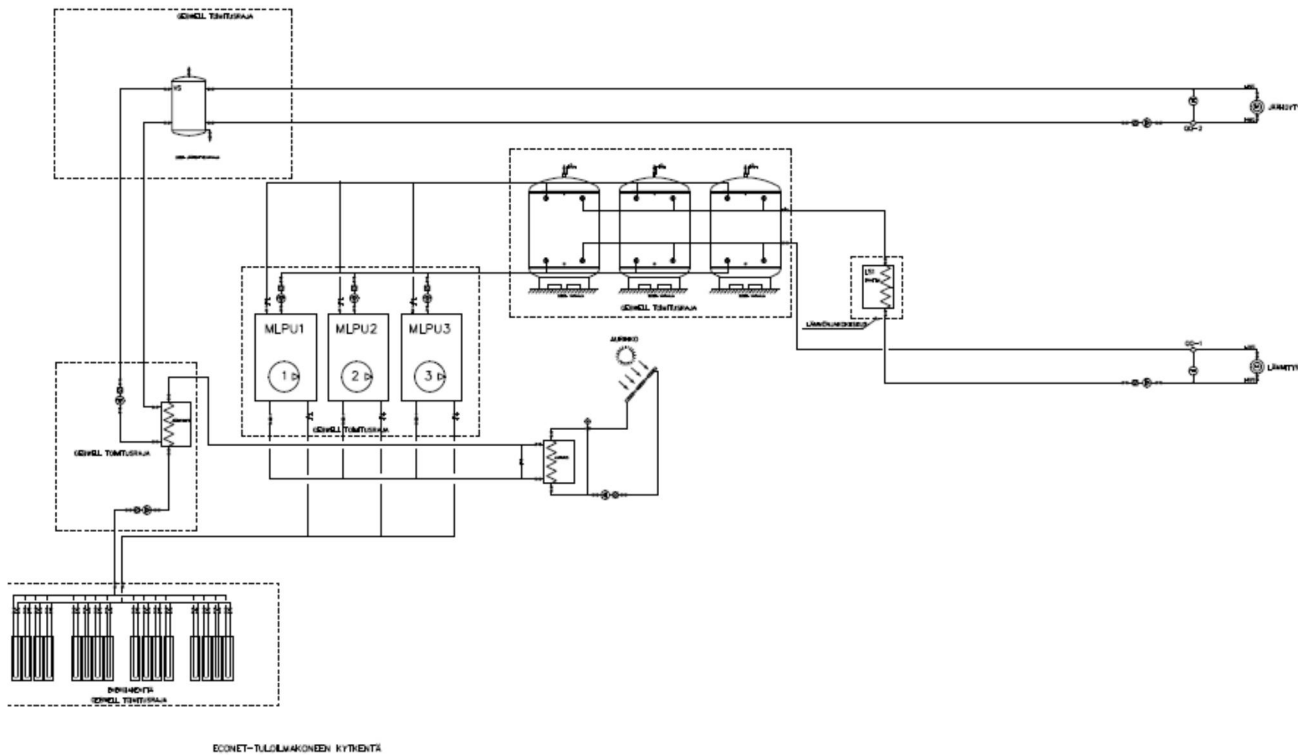
Taulukko 21. CHP- vaihtoehtojen mitoituskilpailu.

CHP-laitoksen lämpöteho	1 MW _{th}	1,5 MW _{th}
Sähköteho	200 kW _e	300 kW _e
CHP:llä tuotettu lämpöenergia	4 120 MWh/a	4 450 MWh/a
Tuotettava sähköenergia	830 MWh/a	891 MWh/a
CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde	0,8	0,8
CHP:n hakkeen kulutus	6 200 MWh	6 680 MWh
Öljykattilalla tuotettu energia	660 MWh/a	330 MWh/a
Öljykattilan polttoaineen kulutus	733 MWh/a	367 MWh/a

6.4 Maalämpö ja vapaajäähdytys

Maalämmitysvaihtoehdossa tarkastellaan peruslämmön tuotantoa maalämmöllä. Sekundäärijärjestelmänä käytetään osateholle mitoitettua kaukolämpöä. Energiaverkkoja toteutetaan kolme: yksi tilalämmitykselle, yksi lämpimälle käyttövedelle ja yksi jäähdytykselle.

Lämmityksen paluuverkon vesi lämmitetään ensin maalämmöllä varaajissa. Tilalämmityksen mahdollinen loppulämmitys ulkolämpötilasta riippuvaan loppulämpötilaan sekä LKV-verkoston jatkuva priimaus 65 asteeseen toteutetaan kaukolämpövaihtimella. Mitoitustilanteessa lämmitysverkoston vesi palaa maalämpöpumppujen varaajille 35 asteisenä, jolloin se lämmitetään 50 asteeseen. Kaukolämmönvaihtimessa tapahtuu edellä mainittu priimaus 65 asteeseen. Lisäksi järjestelmään kuuluu jäähdytys, joka toteutetaan vapaajäähdytyksenä, toisin sanoen ilman kompressoria. Jäähdytyksessä verkkojen mitoitustilanteet ovat menovedelle 10 °C ja paluuedelle 15 °C (Kuva 22).



Kuva 22. Maalämpövaihtoehdon kaaviokuva.

Maalämpöpumppujen yhteinen mitoitusteho on 1 350 MW ja kaukolämmönvaihdinten 750 kW. Maalämmöllä on arvioitu tuotettavan lämpöenergiaa noin 2 800 MWh vuodessa ja kaukolämmöllä 1 900 MWh vuodessa. Vuotuinen energiantuotto on suhteessa pienempää kuin tehoerusteiset pysyvyyslukujen mukaiset energiantuotot, koska matala-energiarakentamisessa mitoitustehon suhde tuotettuun energiaan on suurempi kuin tavanomaisessa rakentamisessa.

Kun Jousenpuiston tapauksessa kyse on suuresta lämmöntarpeesta, joka aiotaan kattaa maalämmöllä, korostuu tarve tuntea paikallinen geoenergiakenttä hyvin. Paikalliset olosuhteet kuten kallioperän rikkonaisuus ja sen lämmönjohtavuus sekä pohjavesiolosuhteet tulee selvittää perusteellisesti. Porareikien määrän ja sijainnin optimoinniksi tarvitaan paikallisia kuormitustestejä. (GTK 2008.) Tässä työssä on tehty oletus, että geokenttä soveltuu maalämmön tuotantoon.

Tässä vaihtoehdossa rakennusten alle noin metrotunnelin tasolle muun muassa huolto-tunneliin asennettaisiin porakaivoista muodostuvat lämmönkeruukentät, joista lämmön-keruuneste johdettaisiin keskitettyihin lämpöpumppujärjestelmiin. (Kuva 23).



Kuva 23. Periaatekuva maan alle sijoitettavasta maalämpöverkostosta (GTK 2008).

7 KUSTANNUKSET

Tässä kappaleessa tarkastellaan Jousenpuiston eri lämmöntuotantojärjestelmien kustannuksia, joihin kuuluvat sekä lämmöntuotantolaitteiston investointikustannukset että vuosittaiset juoksevat kustannukset kuten polttoainekustannukset. Investoinnit saadaan vuosittaisiksi kustannuksiksi annuiteettimenetelmän avulla. Annuiteettimenetelmässä alkuperäinen kokonaisinvestointi kerrotaan korkokantaan ja laskenta-aikaan perustuvalla annuiteettitekijällä (Kaava 12). Peruslaskenta-ajanjaksona käytetään 30 vuotta ja laskentakorkona 5 %.

$$\text{Investoinnin vuosikustannus} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} * I \quad (12)$$

jossa

i = korkokanta [%]

n = laskenta-aika [a]

I = alkuinvestointi [€]

Vaihtoehtojen vuosittaisiin kokonaiskustannuksiin lasketaan sekä lämpöenergian, jäähdytysenergian että sähköenergian kustannukset. Lisäksi lasketaan kustannukset MWh:a kohti. Jäähdytysenergian kustannus on laskettu tarkastelutavasta johtuen *tuotettua* MWh kohti kun taas lämmitysenergian kustannus on kaukolämmön tasapuolisen kohtelun vuoksi laskettu *kulutettua* MWh kohti.

Kustannuslaskennassa on tehty tiettyjä oletuksia, jotka ovat perusteltavissa työn tavoitteella ja alustavalla tarkastelulla. Lämmönjako- ja luovutusverkostot rakennusten sisällä on arvioitu kaikissa vaihtoehdoissa kustannuksiltaan samanhintaisiksi. Lisäksi on oletettu, että viilennysenergiaa tuotetaan vain maalämmön kapasiteetin eli 600 MWh:n verran vuodessa. Tämä viilennysenergia tuotetaan maalämpövaihtoehdossa vapaajäähdytyksellä ja kaikissa muissa vaihtoehdoissa iv-konehuonekohtaisella vedenjäähdytyksellä. Mahdollista 600 MWh:n ylittävää jäähdytyksen tarvetta ei siis työssä tutkittu.

7.1 Kaukolämmön kustannukset

Kaukolämmön kustannukset koostuvat kiinteistökohtaisista liittymismaksuista, vuosittaisista perusmaksuista sekä energiankulutuksesta riippuvasta energiamaksusta. Kaukolämpöyhtiön hinnoitteluun sisältyvät siirtohäviöt, joten niitä ei tarvitse ottaa huomioon. Kaikkiaan kaukolämpöä ostetaan siis perusvaihtoehdossa 4 550 MWh vuodessa.

7.2 Aluelämpölaitoksen kustannukset

Tässä vaihtoehdossa tarkastellaan siirtohäviöiden kanssa kokonaisuudessaan 4 780 MWh:n vuosittaista lämpöenergiantuotantoa. Alueellisen biolämpölaitoksen investointikustannukset koostuvat rakenteiden perustuskustannuksista, projektinhoitokustannuksista, alueellisesta siirtoverkosta sekä laitteiden, rakenteiden ja näihin liittyvän työn kustannuksista. Perinteisesti biolämpölaitoksilla investointikustannukset muodostavat suhteessa suuremman osan vuosittaisista kokonaiskustannuksista kuin kaukolämmön vastaavat vuosittaiset kiinteät maksut.

Merkittävimpiä biolämpölaitoksen muuttuvia kustannuksia ovat polttoainekustannukset. Muita muuttuvia kustannuksia ovat huolto- ja kunnossapitokustannukset sekä työvoimakustannukset.

Vaihtoehtojen kustannusrakenteeseen vaikuttaa pelletin haketta merkittävästi kalliimpi hinta, mikä pitkällä tarkastelujaksolla kasvattaa hakelämpölaitoksen edullisuutta pellettilaitokseen nähden. Investointikustannukset hakelämpölaitokselle ovat puolestaan suuremmat kuin pellettikattilalle.

1,5 MW:n mitoitus biopolttoainekattilalle on 1 MW:n mitoitusta edullisempi vaihtoehto 30 vuoden laskenta-ajalla. Tämä johtuu öljyn korkeasta markkinahinnasta. Tarkastelussa ei ole huomioitu esimerkiksi riittävydestä tai verotuksesta johtuvia polttoaineen hintakehityksen muutoksia tulevaisuudessa.

7.3 Alueellisen CHP-laitoksen kustannukset

Pien-CHP:n osalta siirtohäviöt ovat aluelämpölaitosvaihtoehtoa vastaavat, joten kokonaisuudessaan tarkastellaan 4 780 MWh:n vuosittaista lämpöenergiantuotantoa. Tässä työssä CHP kustannustarkastelunkohteeksi on valittu hakkeen kaasutustekniikka. Kustannusrakenne vastaa muutoin aluelämpölaitosvaihtoehtoa eli investointikustannukset koostuvat rakenteiden perustuskustannuksista, projektinhoitokustannuksista, alueellisesta siirtoverkosta sekä laitteiden, rakenteiden ja näihin liittyvän työn kustannuksista. Muuttuvat kustannukset koostuvat puolestaan polttoaine-, työvoima ja huoltokustannuksista.

Voimankehityksen vaativamman tekniikan vuoksi sekä investointikustannukset että työvoima- ja huoltokustannukset ovat CHP-vaihtoehdossa aluelämpölaitosta suuremmat. Kokonaiskustannuksia kuitenkin osaltaan laskee tuotetun sähkön myynti. Tarkastelussa ei ole huomioitu sähköverkkoon liittymisen kustannuksia.

7.4 Maalämpövaihtoehdon kustannukset

Maalämpövaihtoehdossa siirtohäviöt lasketaan kustannuksiin vain maalämmön siirto-putkistojen osalta. Siirtohäviöt on arvioitu 2 %:ksi maalämmöllä tuotetusta energiasta. Kaukolämmöllä tuotettavan priimausenergian siirtohäviöt sisältyvät kaukolämmön maksuihin. Kokonaisuudessaan tarkastellaan siten noin 4 600 MWh vuotuista lämpöenergiantuotantoa.

Maalämpövaihtoehdossa kaukolämpö on mitoitettu vain osateholle, joten sekä liittymismaksut että vuosittaiset perusmaksut ovat pienemmät kuin täysteholle mitoitetussa kaukolämpövaihtoehdossa. Energiamaksu on vuosittain kaukolämmöllä tuotetun energian (1 820 MWh) mukainen.

Maalämpö- ja vapaajäähdytysjärjestelmän investointikustannuksiin on laskettu varaajat, siirtimet, jäähdytyksen kiertopumput, jäähdytysputkistoverkostot, maalämpöpumput, energiakenttä, vaakavedot, liitokset, maanrakennustyöt sekä projektinhoitokustannukset.

Maalämpöjärjestelmän muuttuvat kustannukset koostuvat lämpöpumppujen ottamasta sähköenergiasta ja jäähdytyskierron pumppausenergiasta. Jäähdytyskierrossa vettä pumpataan jäähdytys siirtimeltä kiinteistöjen iv-konehuoneisiin ilmanvaihdon jäähdytyspatteriin. Lämpökaivoissa kiertävän nesteen pumppauskustannukset sekä järjestelmän huoltokustannukset on sen sijaan arvioitu kokonaisuuteen nähden merkityksettömiksi.

7.5 Vaihtoehtojen kustannusvertailu

Vaihtoehtojen kokonaiskustannuksiin laskettiin sekä lämpö- ja viilennysenergian tuotannon kustannukset että kiinteistöjen sähköenergian oston kustannukset. Vuosittaisiin kokonaiskustannuksiin perustuen edullisimmaksi vaihtoehdoksi tuli maalämmön ja kaukolämmön yhdistävä vaihtoehto, johon kuuluu myös vapaajäähdytys. Tämän vaihtoehdon kokonaiskustannukset olivat lähes 15 % pienemmät kalleimpaan vaihtoehtoon eli 1 MW:n pien-CHP-voimalaan verrattuna. Perusvaihtoehtoon eli kaukolämpöön verrattuna kustannukset olivat noin 10 % pienemmät.

Kun verrataan keskenään *lämpöenergian* tuotantokustannuksia kulutettua MWh kohti, on 1,5 MW:n hakelämpölaitos edullisin vaihtoehto. On huomioitava, että tässä vertailtavassa ei oteta huomioon viilennysenergian tuotantokustannuksia. Tämän vuoksi edullisin vaihtoehto ei ole sama kuin vuosittaisten kokonaiskustannusten perusteella vertailtuna.

Työssä tutkittu maalämpövaihtoehto perustui sekä maalämmön että kaukolämmön hyödyntämiseen. Kun tarkastellaan ko. maalämpövaihtoehdon takaisinmaksuaikaa verrattuna perinteiseen kaukolämpövaihtoehtoon, saadaan 5 % korkokannalla takaisinmaksuajaksi noin 15 vuotta.

8 CO₂-PÄÄSTÖVERTAILU

Tässä kappaleessa tarkastellaan Jousenpuiston asuinalueen lämpö- ja sähköenergiankulutuksesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Ensimmäinen tavoite on vertailla Jousenpuiston energiatehokkuuskonseptin mukaisen rakentamisen hiilidioksidipäästöjä sekä normi 2012 rakentamiseen että maamme kerrostalorakennuskannan keskiarvoihin. Jousenpuiston asuinalue rakennetaan matalaenergiakonseptilla, jossa kokonaisenergiankulutus on 15 % pienempi verrattuna vuonna 2012 voimaan tuleviin rakennusmääräyskoelman normeihin. Toinen tavoite on vertailla eri lämpöenergiantuotantomuotojen päästöjä. Kokonaisvuosipäästöihin on laskettu sekä lämmöntuotannon että kiinteistön kuluttaman sähkön tuotannon päästöt. Tarkasteluyksiköt on esitetty taulukossa 22.

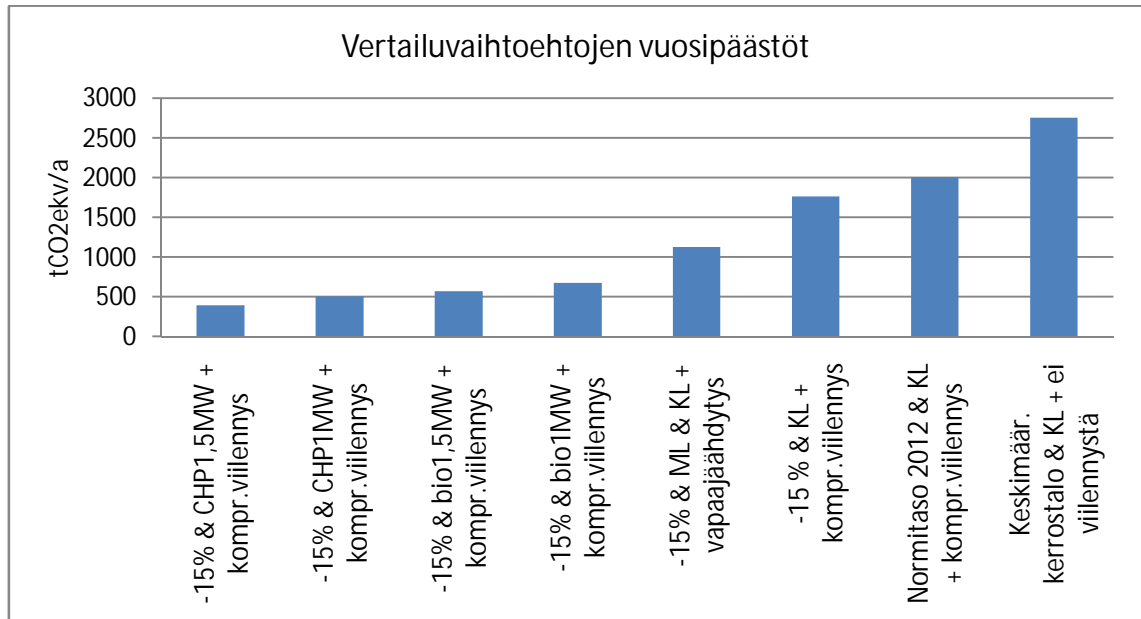
Taulukko 22. Päästötarkasteluyksiköt. Kaikkiin vaihtoehtoihin on laskettu kiinteistön sähkönkulutus.

Vaihtoehto	Lyhenne
Keskimääräinen kerrostalorakennuskanta Kaukolämpö Ei viilennystä	Keskimäär. kerrostalo & KL + ei viilennystä
Kerrostalon normitaso 2012 Kaukolämpö Kompressoriviilennys	Normitaso2012 & KL + kompr.viilennys
Jousenpuisto Kaukolämpö Kompressoriviilennys	-15% & KL+ kompr.viilennys
Jousenpuisto Biolämpölaite 1 MW Kompressoriviilennys	-15% & bio1MW + kompr.viilennys
Jousenpuisto Biolämpölaite 1,5 MW Kompressoriviilennys	-15% & bio1,5MW + kompr.viilennys
Jousenpuisto Pien-CHP laite 1 MW Kompressoriviilennys	-15% & CHP1MW + kompr.viilennys
Jousenpuisto Pien-CHP laite 1,5 MW Kompressoriviilennys	-15% & CHP1,5MW + kompr.viilennys
Jousenpuisto Maalämpö ja kaukolämpö Vapaajäähdytys	-15% & ML/KL + vapaajäähdytys

Tässä työssä tarkastellaan vain *energiantuotannosta* aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Siten esimerkiksi polttoaineen valmistuksesta tai kuljetuksista aiheutuneita päästöjä ei ole laskettu mukaan. Hiilidioksidipäästöyksikkönä käytetään hiilidioksidiekvivalenttia. Kaukolämmön päästökertoimenä on käytetty Espoossa sijaitsevan Fortumin Suomenojan voimalaitoksen vuoden 2010 lukua $270 \text{ kgCO}_{2\text{ekv}}/\text{MWh}$ (Ahonen 2011). Tarkastelussa ei ole huomioitu mahdollista Suomenojan voimalaitoksen kivihiilen polton korvaamista biopolttoaineilla tulevaisuudessa, mikä laskisi kaukolämmön hiilidioksidipäästöjä. Biokattilavaihtoehtojen pelletti ja hake ovat uusiutuvia polttoaineita, joten taaseen kannalta ne eivät tuota hiilidioksidipäästöjä. Varakattilan polttoaineena on kevyt polttoöljy, jonka päästökertoimenä käytetään arvoa $267 \text{ kgCO}_{2\text{ekv}}/\text{MWh}$ (Suomi & Hietaniemi 2004).

Sähköenergian tuotannon päästöt on laskettu keskimääräisen suomalaisen sähköntuotannon ominaispäästökertoimen perusteella, joka on $202 \text{ kg CO}_{2\text{ekv}}/\text{MWh}$ (Tilastokeskus 2011a). Maalämmön osalta on tarkasteltu myös skenaariota, jossa maalämpövaihtoehdon lisäsähkön kulutukselle lasketaan päästöt marginaalisähkön tuotannon mukaan eli päästökertoimella $750 \text{ kgCO}_{2\text{ekv}}/\text{MWh}$ (Rajala et al. 2010). Päästöt on laskettu Jousenpuiston kerrosneliömetrien mukaan kaikille vaihtoehdoille, joten ne ovat vertailukelpoisia Jousenpuiston kokoisen asuinalueen osalta.

Tuloksista havaitaan (Kuva 24), että energiatehokkuudeltaan keskimääräistä kerrostalorakennuskantaa vastaavalla asuinalueella on yli 50 % suuremmat päästöt kuin Jousenpuiston mallilla rakennetulla asuinalueella, kun kummankin asuinalueen lämmönlähteenä toimii kaukolämpö. Jousenpuiston päästöihin on lisäksi laskettu kompressoriviilennys. Keskimääräisen asuinalueen päästöihin ei ole laskettu mukaan viilennystä, koska vanhemmassa asuinrakennuskannassa sitä ei ole yleensä käytetty.



Kuva 24. Jousenpuiston tarkasteluvaihtoehtojen vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt.

Energiantuotantovaihtoehdoista pienimmät päästöt on 1,5 MW:n pien-CHP laitosvaihtoehdolla (Kuva 24). Kun otetaan huomioon vain kustannustehokkaimmat vaihtoehdot (ks. kpl 7.5), pienimmät päästöt on 1,5 MW:n teholle mitoitettulla biokattilalla. Pääpolttoaineena voi toimia joko hake tai pelletti. Tuloksista huomataan myös, että maalämmön ja kaukolämmön yhdistelmällä saadaan aikaan päästövähennyksiä kaukolämpövaihtoehtoon verrattuna.

Mikäli oletetaan, että maalämpövaihtoehdon lisäsähkönkulutus eli lämpöpumppujen ja jäähdytysvesiverkoston pumppujen sähköntarve katetaan marginaalisähköllä, tulee maalämpövaihtoehdon kokonaispäästöiksi noin 1 600 tCO₂ekv vuodessa. Siten maalämpövaihtoehdon päästöt jäävät tässäkin tarkastelutavassa nykyistä kaukolämpövaihtoehtoa alhaisemmiksi. Tosin tulevaisuudessa, mikäli Suomenojan voimalaitoksella korvataan kivihiltä biopolttoaineilla, ero kaventuu, mikäli oletetaan, että marginaalisähkö tuotetaan tulevaisuudessa edelleen pääasiassa kivihilipohjaisena lauhdesähköä.

Jos taas oletetaan, että maalämpövaihtoehdon lisäsähkönkulutus katetaan ostamalla ”vihreää” sähköä kuten tuulivoimalla tuotettua sähköä, maalämpövaihtoehdon laskennalliset päästöt pienenevät lukuun 1 000 tCO₂ekv vuodessa. Tosin käytännössä verkosta ostettu sähkö on todennäköisimmin etenkin talvikaudella marginaalisähköä, mutta las-

kennallisesti edellä mainittu oletus voidaan tehdä. Sähköä on mahdollisuus ostaa valitsemaltaan toimittajalta, ja siten vaikuttaa ostamansa sähkön päästökertoimeen, mutta kaukolämmön toimittaja on alueella kiinteä, joten yksittäisellä asiakkaalla ei mahdollisuutta vaikuttaa ostamansa kaukolämmön päästöihin.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Valtioneuvoston pitkän aikavälin energia ja ilmastostrategiassa on asetettu tavoitteita energiankäytön tehostamiseksi ja uusiutuvan energian käytön lisäämiseksi. Käytännössä rakentamis- ja asumissektorilla tavoitteet näkyvät muun muassa kiristyneinä rakennusmääräyskokoelman normeina rakennusten energiatehokkuudesta. Uusissa vuonna 2012 voimaan tulevilla rakennusmääräyskokoelman määräyksissä normit on myös mahdollisuus täyttää käyttämällä lämmitysmuotona uusiutuvaa energiaa kuten biopolttoaineilla tuotettu lämpöä.

Tässä työssä tutkittiin lämpöenergian alueellisia tuottamismahdollisuuksia uuden asuinalueen osalta. Näkökulmana oli vaihtoehtojen taloudellisuus ja kasvihuonekaasupäästöt. Vaihtoehdot pyrittiin myös teknisesti mitoittamaan mahdollisimman tarkasti. Työssä ei kuitenkaan tarkasteltu vaihtoehtojen yksityiskohtaisempaa soveltuvuutta alueelle, kuten alueellisen biolämpölaitoksen maisemavaikutuksia tai maalämmön vaatimia maaperäselvityksiä.

Tulosten mukaan taloudellisin vaihtoehto on maalämpö yhdistettynä kaukolämpöön. Tässä ratkaisussa peruslämpö tuotetaan maalämmöllä, käyttöveden priimaus ja huippulämpö puolestaan kaukolämmöllä. Lisäksi vaihtoehtoon kuuluu kapasiteetiltaan rajoitettu vapaajäähdytys. Myös alueellinen 1,5 MW:n hakelämpölaitos voi olla taloudellisesti kannattava vaihtoehto. Kustannuksiltaan edellä mainittujen kahden vaihtoehdon lisäksi myös 1 MW:n hakelämpölaitos sekä 1,5 MW:n pellettilämpölaitos olivat kokonaiskustannuksiltaan kaukolämpövaihtoehtoa edullisempia 30 vuoden laskenta-ajalla.

Lämpölaitoksen mitoitusta koskeva huomioitava tulos on, että suuremmalle teholle (1,5 MW) mitoitettu vaihtoehto oli kustannuksiltaan kannattavampi kuin 1 MW:n biolämpölaitos. Tämä johtuu pääasiassa öljyn korkeasta markkinahinnasta sekä näiden kahden mitoitusvaihtoehdon investointikustannusten vähäisestä eroavaisuudesta. Lisäksi on huomioitava, että matalaenergiarakennuskannassa biolämpölaitos soveltuu alueelliseksi lämmöntuotantomuodoksi hyvin, koska matalaenergiarakentamisessa kesäinen käyttöveden lämmityksen aiheuttama tehon tarve on lähempänä huipputehoa kuin kes-

kimääräisellä rakennuskannalla. Tästä seuraa, että matalaenergiarakentamisen alueella myös kesän aikainen lämpöteho on mahdollista tuottaa biolämmöllä, mikä toisaalta myös pienentää öljyn aiheuttamia kustannuksia sekä päästöjä.

Tarkastelussa oli laskennallisesti mukana myös energiatehokkaamman rakentamisen vaikutukset asuinalueen energiantuotannon hiilidioksidipäästöihin. Tulosten mukaan keskimääräisen suomalaisen kerrostaloasuinalueen päästöt ovat yli 50 % suuremmat kuin Jousenpuiston mallilla rakennetulla asuinalueella. Tutkituista energiantuotantovaihtoehdoista pienimmät päästöt olivat pien-CHP-laitoksella, mikä johtuu biopolttoaineen pääasiallisesta käytöstä sekä siitä, että kyseisessä vaihtoehdossa osa ostosähkön päästöistä kompensoidaan laskennallisesti laitoksen tuottamalla vihreällä sähköllä. Kustannustehokkaimmista vaihtoehdoista pienimmät päästöt on alueellisella biopolttoainelämpölaitoksella. Merkittävä tulos on myös se, että maalämmön ja kaukolämmön yhdistelmällä saadaan aikaan päästövähennyksiä kaukolämpöön verrattuna.

LÄHTEET

Adato. 2008. Kotitalouksien sähkönkäyttö 2006. Tutkimusraportti 2.10.2008. ISBN 978-952-9696-41-3.

Ahonen Timo. 2011. Sähköpostitiedonanto 17.10.2011. Fortum.

Aittomäki Antero. 2001. Lämpöpumppulämmitys. Suomen lämpöpumppuyhdistys. [viitattu 23.5.2011]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/units/me/ener/julkaisut/LP-opas.PDF>

Doranova Oy. 2011. Solarblue aurinkolämpökerääjät. Esite.

Energiateollisuus ry. 2010. Kaukolämpötilasto 2009. ET-Kaukolämpökansio 7/1.

ISSN 0786-4809. Saatavissa:

http://www.energia.fi/fi/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammitys/kaukolampotilasto_2009_pdf_web.pdf

Energy visions 2050. 2009. Porvoo. ISBN 978-951-37-5595-9.

Entimos Oy. 2011. Tuotteet. [Entimos Oy:n www-sivuilla]. [viitattu 27.5.2011].

Saatavissa: <http://www.entimos.fi/tuotteet.htm>

EPIA 2011. European Photovoltaic Industry Association. Solar Generation 6. Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World. Saatavissa:

<http://www.epia.org/publications/photovoltaic-publications-global-market-outlook.html>

Erat Bruno, Erkkilä Vesa, Nyman Christer, Peippo Kimmo, Peltola Seppo & Suokivi Hannu. 2008. Aurinko-opas - Aurinkoenergiaa rakennuksiin. Aurinkoteknillinen Yhdistys ry. Porvoo. ISBN 978-952-92-2721-1.

Espoon kaupunki. 2010. Kaupunkisuunnittelulautakunnan kokouksen lisäteksti.

8.12.2010. Saatavissa:

http://www.espoo.fi/asiakirja.asp?path=1;31;37423;37424;37425&id=67110C153A984651C22577FC0028CA87&kanta=Kunnari\intrakun_e.nsf

Fortum. 2011. Kaukolämpöhinnasto, Espoo, Kauniainen ja Kirkkonummi 1.1.2011 alkaen. [Fortumin www-sivuilla]. Updated May, 5 2011. [viitattu 13.5.2011]. Saatavissa: http://www.fortum.fi/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Kaukolampo/Hinnastot%20ja%20sopimusehdot/Kaukolampohinnasto_Espoo_01012011.pdf

Freris Leon & Infield David. 2008. Renewable energy in power systems. Wiley. ISBN 978-0-470-01749-4.

GTK 2008. Maa- ja kalliolämpö - uusiutuvaa energiaa. Geofoorumi 1/2008. Geologian tutkimuskeskus. Saatavissa:

<http://www.gtk.fi/Media/painotuotteet/esitteet/MessuEsite.pdf>

Heljo Juhani, Nippala Eero & Nuuttila Harri. 2005. Rakennusten energiankulutus ja CO₂ -päästöt Suomessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakentamistalouden laitos. Raportti 2005:4. Tampere. Saatavissa:

http://www.tut.fi/units/rak/rtt/tutkimus/ekorem/EKOREM_Loppuraportti_051214.pdf

Hemmilä Kari & Saarni Risto. 2002. Ikkunaremontti. Rakennustieto Oy. Helsinki. 115 s. ISBN 951-682-654-7.

Heyerman David. 2009. The Smart Grid Frontier: Wide Open. Tinycomb tech news. Saatavissa: <http://tinycomb.com/2009/05/03/what-is-the-smart-grid/>

Holopainen Riikka, Heikkinen Martti, Hemmilä Kari & Norvasuo Markku. 2007. Suomalaisen rakennusten energiakorjausmenetelmät ja säästöpotentiaalit. VTT tiedotteita 2377. Espoo. 112 s. ISBN 978-951-38-6908-3.

Honkapuro Samuli, Jauhiainen Niko, Partanen Jarmo & Valkealahti Seppo. 2009. Sähkön ja kaukolämmön rooli energiatehokkuudessa ja energiansäästöissä. LUT Energia tutkimusraportti 4. ISBN 978-952-214-841-4.

Ilmatieteenlaitos. 2011a. Vuoden 2003 säät. Vuositilastot 2003. [Ilmatieteenlaitoksen www-sivuilla]. [viitattu 25.7.2011]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/536>

Ilmatieteenlaitos. 2011b. Lämmitystarveluvut. [Ilmatieteenlaitoksen www-sivuilla]. [viitattu 1.7.2011]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>

Itä-Suomen energiatoimisto. 2001. Hakelämmitys pienopas. [viitattu 17.8.2011]. Saatavissa: <http://www.esavo-energia.fi/wp-content/uploads/2009/05/hakelammitysopas.pdf>

Juntto Anneli. 2008. Asumisen muutos ja tulevaisuus. Rakennetarkastelu. Erilaistuva asuminen, osaprojekti 1. Suomen ympäristö 33/2008. Ympäristöministeriö. Helsinki. 126 s. ISBN 978-952-11-3218-6.

Juvonen Janne (toim.). 2009. Lämpökaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas 2009. Suomen ympäristökeskus. Helsinki. ISBN 978-952-11-3531-6
Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=108367>

Kaikko Juha. 2011. Voimalaitoksen kustannusarvion laatiminen. Kurssin Voimalaitosoppi luentomoniste. Kevät 2011. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT Energia.

Kara et al. (toim.). 2004. Energia Suomessa. Helsinki. ISBN 951-37-4256-3.

Klobut Krzysztof, Heikkinen Jorma, Shemeikka Jari, Laitinen Ari, Rämä Miika & Sipilä Kari. 2009. Huippuenergiatehokkaan asuintalon kaukolämpöratkaisut. VTT. ISBN 978-951-38-7541-1.

Knuuttila Kirsi (toim.). 2003. Puuenergia. Jyväskylän teknologiakeskus Oy. BENET Bioenergiaverkosto. Jyväskylä. ISBN 952-5165-20-5.

Koskelainen Lasse, Saarela Rauli & Sipilä Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Energiategiateollisuus ry. Helsinki. 566 s. ISBN 952-5615-08-1.

L 30.12.2010/1396. Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta.

Larjola Jaakko. 2010. Polttomoottorit. Kurssin Energianmuuntoprosessit luentomoniste. Syksy 2010. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT Energia.

Latva Ville. Project Manager. Doranova Oy. Sähköpostitiedonanto 9.6.2011.

LSY. 2006. Länsi-Suomen ympäristölupavirasto. Ympäristölupa nro 24/2006/2. Helsinki.

Motiva 2011a. Lämpöä omasta maasta. [Motivan www-sivuilla]. [viitattu 23.5.2011].

Saatavissa:

http://www.motiva.fi/files/3378/Lampoa_omasta_maasta_maalampopumput.pdf

Motiva 2011b. Lämpöä ilmassa. [Motivan www-sivuilla]. [viitattu 23.5.2011].

Saatavissa:

http://www.motiva.fi/files/211/Lampoa_ilmassa_Lammitysjarjestelmat_ilmalampopumppu.pdf

Motiva 2011c. Tuulivoima. [Motivan www-sivuilla]. [päivitetty 14.6.2011]. [viitattu

5.7.2011]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/tuulivoima

Oilonhome. 2011. Verkkodokumentti. Tulistusmaalämpöpumppu Geopro SH. [viitattu

22.7.2011]. Saatavissa:

http://netfi.oilon.com/cms400/uploadedFiles/OilonHome2010/Products/Groundheating/Oilon_Geopro_SH_FI.pdf

Ojaniemi Asko & Penttinen Lauri. 2009. Pudasjärven matalaenergiarakentamisen hirsi-korttelialue - Selvitys lämmöntuotannosta uusiutuvalla energialla. Keski-Suomen energiatoimisto. Saatavissa:

<http://www.oulunkaari.com/tiedostot/Uusiutuvaenergia/raportit/Benet%20Pudis%20rap.pdf>

Paalanen Jukka & Siren Kai. 1997. Termisen energian varastoinnin hyväksikäyttömahdollisuudet rakennusten lämmityksessä ja jäädytyksessä. Osa 1. Varastointitekniikat - Tilannekatsaus. Teknillinen korkeakoulu. Konetekniikan osasto. Espoo. ISBN: 951-22-3475-0

Palmumaa Petteri. 2010. Tuulivoiman verkkomääräykset Euroopassa ja Yhdysvalloissa sekä niiden kehittyminen tulevaisuudessa älykkäiden sähköverkkojen kannalta. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Pietarinen Petri & Saari Mikko. 1997. Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio. VTT tiedotteita 1859. Espoo. ISBN 951-38-5153-2. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1997/T1859.pdf>

Puhakka Asko, Alanen Veli-Matti, Kokkonen Anssi, Nalkki Janne & Rousku Petri. 2003. Pellettilämmitysopas. Perustietoa pellettilämmityksestä. Motiva Oy. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Helsinki. Joensuu. ISBN 951-604-030-6. Saatavissa:
http://www.pellettikarelia.fi/pelletti_karelia/materiaali/pellettiopas.pdf

Pvresources. 2009. Economics. [Pvresources www-sivuilla]. [päivitetty 7.2.2011]. [viitattu 27.6.2011]. Saatavissa: <http://www.pvresources.com/en/economics.php>

Pöyry Energy Oy. 2006. Sähkön pientuotannon liittäminen verkkoon. Motiva Oy. Helsinki. Saatavissa:
http://www.motiva.fi/files/232/Sahkon_pientuotannon_liittaminen_verkkoon.pdf

- Rajala Pasi et al. 2010. Energiatehokkuus kaavoituksessa. Skaftkärr, Porvoo - kaavarunkovaiheen loppuraportti. Sitran selvityksiä 41. Helsinki. ISBN: 978-951-563-741-3. Saatavissa: <http://www.sitra.fi/julkaisut/Selvityksi%C3%A4-sarja/Selvityksi%C3%A4%2041.pdf>
- RIL. 2009. Matalaenergiarakentaminen. Asuinrakennukset. Julkaisu 249-2009. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN 978-951-758-517-0.
- Satakunnan ammattikorkeakoulu. 2002. Hakelämpökeskuksen hankinta. Suomen kuntaliitto. ISBN 951-755-783-3. Saatavissa: <http://hosted.kuntaliitto.fi/intra/julkaisut/pdf/p040209144251P.pdf>
- Savolainen Ilkka, Similä Lassi, Syri Sanna & Ohlström Mikael (toim.). 2008. Teknologia-polut 2050. Tekniikan mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa. VTT tiedotteita 2432. Espoo. ISBN 978-951-38-7207-6. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2432.pdf>
- Savonia Power. 2011. Tuotteet. [Savonia Power Oy:n www-sivuilla]. [viitattu 25.5.2011]. Saatavissa: http://www.savoniapower.com/fi/products_powex.html
- Senera Oy. 2011. Energiaremontti. Maalämpö. [Senera Oy:n www-sivuilla]. [viitattu 14.7.2011]. Saatavissa: <http://senera.fi/Maalampo>
- Seppänen Olli & Seppänen Matti. 1997. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Sisäilmayhdistys ry. Jyväskylä. ISBN 951-97186-5-6.
- Suomen lämpöpumppuyhdistys. 2011. Maalämpöpumppu. [Suomen lämpöpumppuyhdistyksen www-sivuilla]. [viitattu 23.5.2011]. Saatavissa: http://www.sulpu.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=114

Suomi Ulla & Hietaniemi Janne. 2004. Yksittäisen kohteen CO₂-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO₂-päästökertoimet. Motiva Oy. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje_CO2_kohde_040622.pdf

Sähkölämmitysfoorumi. 2011. Sähkölämmityksen toteutus. [Sähkölämmitysfoorumin www-sivuilla]. [viitattu 17.5.2011]. Saatavissa: <http://www.lamminkoti.fi/index.php?k=17611>

Sähkömarkkinalaki (386/1995).

TEM. 2009. Ehdotus tuulivoiman syöttötariffiksi. Syöttötariffiryhmän väliraportti. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/24646/Sy_tt_tariffiryhm_n_v_liraportti_liite_1.pdf

Thermia 2005. Verkkodokumentti. Arimax biolämpöopas. [viitattu 22.7.2011]. Saatavissa: <http://onninen.procus.fi/documents/original/12504/7/1/pellettiopas.pdf>

Thermia. 2006. Verkkodokumentti. Maalämpö-sanomat 9/2006. [viitattu 22.7.2011]. Saatavissa: http://www.turunmaanlampotalo.fi/pdf/Maalamposanomat09_2006.pdf

Tilastokeskus. 2009. Energiaennakko 2009.

Tilastokeskus. 2010. Taulukot. Energian hankinta, kulutus ja hinnat. Liitetaulukot 2010. Taulukko 6. Kivihiilen, maakaasun ja kotimaisten polttoaineiden käyttäjähinnat lämmöntuotannossa. [Tilastokeskuksen www-sivuilla]. [päivitetty 23.9.2010]. [viitattu 25.5.2011]. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ehkh/tau.html>

Tilastokeskus. 2011a. Energiatilasto. Vuosikirja 2010. Helsinki. ISBN: 978-952-244-288-8

Tilastokeskus. 2011b. Polttoaineluokitus 2011. [Tilastokeskuksen www-sivuilla]. [päivitetty 1.1.2011]. [viitattu 1.9.2011]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Tilastokeskus. 2011c. Tilastot. Kasvihuonekaasut 2009. [Tilastokeskuksen www-sivuilla]. [päivitetty 28.4.2011]. [viitattu 30.5.2011]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/khki/2009/khki_2009_2011-04-28_tie_001_fi.html

Tukes 2009. Kiinteän polttoaineen lämmityskattiloiden turvallisuus. [viitattu 17.8.2011]. Saatavissa: http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_oppaat/Kattilaopas.pdf

Tuulivoiman tietopaketti. 2011. Tuulivoimatekniikka. [viitattu 30.5.2011]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/tuulivoimatekniikka>

Tuulivoimaopas. 2011. Voimalan sijoittaminen. [viitattu 30.5.2011]. Saatavissa: http://www.tuulivoimaopas.fi/yleista_tuulivoimasta/voimalan_sijoittaminen

Valtioneuvosto. 2010. Valtioneuvoston periaatepäätös energiatehokkuustoimenpiteistä. 4.2.2010.

Vartiainen Eero. 2000. Daylight modelling and optimization of solar facades. Helsinki University of Technology Publications in Engineering Physics. Report TKK-F-A803.

Vartiainen Eero, Luoma Päivi, Hiltunen Jari & Vanhanen Juha. 2002. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO₂ - päästöt. Gaia Group Oy. ISBN: 952-91-4465-2

Ympäristöministeriö. 2007. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehon tarpeen laskenta. Ohjeet 2007. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.

Ympäristöministeriö. 2008. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2010. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.

Ympäristöministeriö. 2010. C3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten lämmöneristys. Määräykset 2010. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.

Ympäristöministeriö. 2011 a. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.

Ympäristöministeriö. 2011 b. Uudet rakentamisen energiamääräykset annettu. Tiedotteet. 30.3.2011. [viitattu 20.6.2011]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=380479&lan=fi>