

Hybridilämmitysjärjestelmän tiedonkeruu ja -analysointi omakotitalokohteelle

Jarkko Nikkarikoski

Pro gradu -tutkielma

Jyväskylän yliopisto
Fysiikan laitos
Uusiutuvan energian koulutusohjelma
27. joulukuuta 2013

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä suunniteltiin ja toteutettiin tiedonkeruujärjestelmä omakotitalon lämmitysjärjestelmälle, jonka muodostavat maalämpöpumppu, aurinkokeräimistö ja vesikiertoinen kamina. Lämminvesivaraajan ja tilojen lämmityksen lisäksi aurinkokeräimistö ja kamina pystyvät esilämmittämään maalämpöpumpun keruunestettä ja lämmittämään lämpöpumpun maapiiriä. Tiedonkeruun avulla saadun datan ja lähdekirjallisuuden avulla järjestelmän toimivuutta ja optimaalista käyttöä arvioitiin. Työn tarkoituksena oli myös selvittää vastasivatko aurinkokeräimelle ja kaminalle ilmoitetut hyötysuhteet mitattuja. Työn pohjaksi käytiin läpi suomalaisen pientalon lämmöntarvetta.

Toteutettu tiedonkeruujärjestelmä on kaksiosainen. Yhdelle tietokoneelle tallennetaan lämpötila- ja tilavuusvirtadataa. Toiselle tietokoneelle tehtiin labview-ympäristöllä sovellus, joka tallentaa pyranometrin mittaamia auringonsäteilyn intensiteetin arvoja.

Aurinkokeräinten ja kaminan hyötysuhteet vastasivat mitattuja. Tiedonkeruujärjestelmän avulla aurinkokeräimille ja kaminalle voidaan laskea hetkellinen teho ja hyötysuhde. Samoin voidaan laskea eri aikajaksoina tuotettu lämpöenergiämäärä. Tiedonkeruun perusteella voidaan selvästi erottaa maapiirin lataus suorasta lämmityksestä. Maapiirin esilämmitystä ei havaittu tutkitulta ajalta, mutta tiedonkeruujärjestelmän avulla esilämmityksen pitäisi olla tunnistettavissa.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella on selkeää, että aurinkokeräimen ja kaminan lämpöenergia kannattaa käyttää aina ensisijaisesti lämminvesivaraajan tai rakennuksen lämmittämiseen. Kaminan käyttö kannattaa ajoittaa talviajalle ja suurin hyöty saadaan kylmimpien päivien aikana. Maalämpöpumpun avulla voitaisiin lämmittää rakennus yksinään, mutta aurinkokeräinten ja kaminan hyöty maalämmön yhteydessä on sitä suurempi mitä matalampi on maapiirin porakaivo.

Alkusanat

Opinnäytetyö on tehty vuonna 2013 touko- ja joulukuun välisenä aikana osana Pisara meressä -tutkimus- ja kehitysohjelmaa.

Kiitän professori Jukka Konttista ja FT Jussi Maunukselaa mielenkiintoisen tutkielman aiheen tarjoamisesta. Haluan kiittää Jussi Maunukselaa myös sekä opinnäytetyön laadukkaasta ohjauksesta että hyvistä neuvoista läpi maisteriopintojen. Lisäksi kiitän Markko Myllystä perheineen mahdollisuudesta lämmitysjärjestelmänsä tutkimiseen sekä osallistumisesta sen toiminnan analysointiin.

Jyväskylässä 27. joulukuuta 2013

Jarkko Nikkarikoski

Sisältö

1	Johdanto	3
2	Omakotitalon lämmöntarve	6
2.1	Yleistä kulutuksesta	6
2.2	Omakotitalojen luokittelu lämmönkulutuksen mukaan	7
2.2.1	Matalaenergiatalo	7
2.2.2	Passiivitalo	7
2.2.3	Nolla- ja plusenergiatalo	7
2.3	Kulutusprofiili	8
2.3.1	Lämmitystarveluku	8
2.3.2	Vedenkulutus	9
2.3.3	Vuosittainen lämmönkulutusprofiili	9
2.3.4	Päivittäinen lämmönkulutusprofiili	10
3	Lämmitysjärjestelmä	12
3.1	Lämmitysjärjestelmän osat	12
3.1.1	Lämmönkehityslaitteet	12
3.1.2	Lämmönvarastointilaitteet	12
3.1.3	Lämmönjakolaitteet	13
3.1.4	Säätö- ja ohjauslaitteet	13
3.2	Aurinkolämpö	13
3.2.1	Aurinkokeräimen toimintaperiaate	15
3.3	Maalämpö	16
3.3.1	Maalämpöpumpun toimintaperiaate	17
3.3.2	Lämmönkeruupiiri	18
3.3.3	Maalämpöjärjestelmän mitoitus ja lämmönjako	20
3.4	Puulämmitys	21
4	Esimerkkikohteen hybridilämmitysjärjestelmä	22
4.1	Lämmitysjärjestelmä	23
4.1.1	Maalämpöpumppu	23

4.1.2	Aurinkokeräimet	23
4.1.3	Kamina	24
4.1.4	Lämmönjako ja -varastointi	25
4.2	Lämmitysjärjestelmän kytkentäkuvaus	26
4.3	Lämmitysjärjestelmän ohjaus	27
4.3.1	Aurinkokeräimen ohjaus kesällä	28
4.3.2	Aurinkokeräimen ohjaus keväällä ja syksyllä	29
4.3.3	Aurinkokeräimen ohjaus talvella	30
4.3.4	Kaminan ohjaus	31
5	Materiaalit ja menetelmät	32
5.1	Järjestelmien monitorointi ja tiedonkeruu	32
5.1.1	Lämpötila- ja virtausmittaukset	32
5.1.2	Auringonsäteilyn mittaus	34
5.2	Tunnusluvut	41
5.3	Aineiston analysointi	42
6	Tulokset	45
6.1	Elokuun lämmöntuotanto aurinkokeräimellä	45
6.2	Suora lämmitys aurinkokeräimellä	46
6.3	Maapiirin lataus aurinkokeräimellä	50
6.4	Esilämmitys	51
6.5	Kaminan käyttötesti	51
6.6	Kaminan ja aurinkokeräinten tuoton vertailu	53
7	Pohdinta	54

1. Johdanto

Suomen ja EU:n tavoitteita ovat uusiutuvan energian käytön lisääminen ja kasvi-huonekaasupäästöjen pienentäminen. Suomen osalta tämä tarkoittaa mm. uusiutuvien energianlähteiden osuuden kasvattamista vuoteen 2020 mennessä 28,5 prosentista 38 prosenttiin. Suomessa energiankulutus vuonna 2011 oli 305,4 TWh ja vastaavalla kulutuksella tavoitemäärä uusiutuvalla energialle olisi 116 TWh. Yksi terawattitunti vastaa 10^9 kilowattituntia ja yhdellä kilowattitunnilla voidaan lämmittää 860 kg vettä yhdellä celsiusasteella. [39, 35]

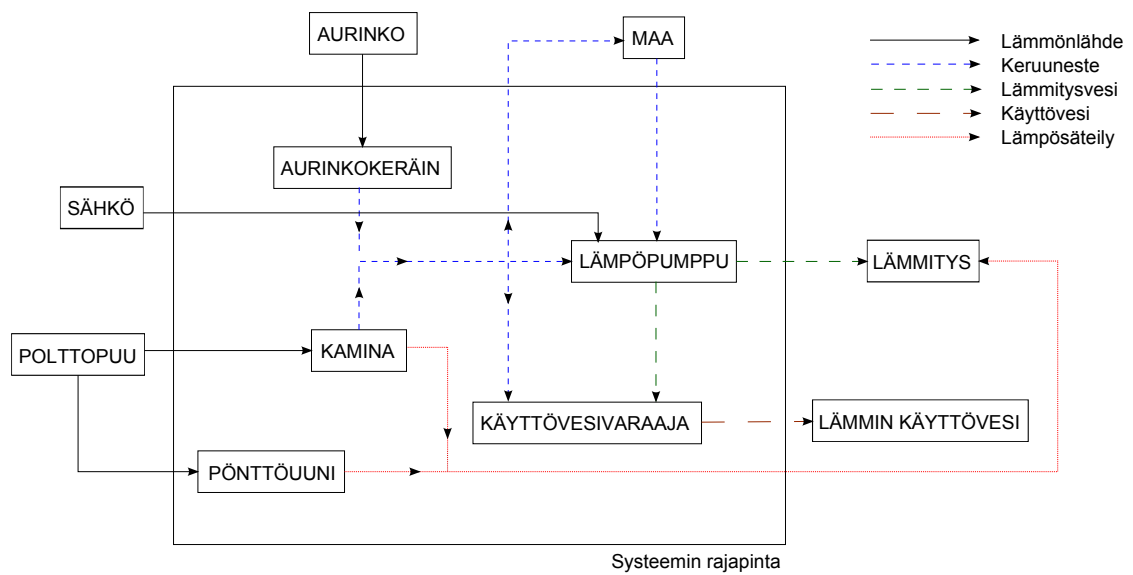
Rakennusten lämmitykseen käytettävän energian osuus kokonaisenergiankulutuksesta on Suomessa ilmastosta johtuen suuri. Vuonna 2011 lämmitykseen käytetty energia oli noin 73 TWh, ja sen osuus kokonaiskulutuksesta on teollisuuden jälkeen suurin. Uusiutuvan energian käytön lisäämisellä rakennusten lämmityksessä on siis vaikutus energiatavoitteiden saavuttamiseen. Uusiutuvien energianlähteiden käytön lisääminen ja rakennusten energiatehokkuuden parantaminen auttavat osaltaan myös kasvihuonepäästöjen vähennystavoitteisiin.

Ainoastaan yhtä uusiutuvaa energianlähdetä hyödyntävä lämmitysjärjestelmä ei tyypillisesti yksinään kykene pientalon ympärivuotiseen lämmöntuotantoon. Uusiutuvaa energiaa voidaan kuitenkin käyttää osana järjestelmää, joka hyödyntää useita lämmönlähteitä. Useaa lämmönlähdetä hyödyntävä lämmitysjärjestelmä määritellään tässä työssä hybridilämmitysjärjestelmäksi. Hybridijärjestelmä on vähemmän riippuvainen yksittäisestä lämmönlähteestä ja antaa mahdollisuuden valita parhaan energianlähteen eri ajanhetkiin. Lähteet voivat myös tukea toisiaan ja esimerkiksi aurinkolämpöä voidaan hyödyntää pienemmillä lämpötiloilla lämpöpumpun maapiirin lämmittämiseen. Järjestelmien käytön seuranta ja tutkiminen on tärkeää, sillä järjestelmän kokonaisyhteydet riippuu siitä kuinka järjestelmän osia käytetään kokonaisuutena. Hybridilämmitysjärjestelmien yleistymistä varten on myös oltava tietoa niiden toimivuudesta.

Maalämmön ja aurinkokeräinten yhdistämistä on tutkittu aiemmin Kansainvälisen Energiajärjestön (International Energy Agency - IEA) joulukuussa 2013 päättyvässä projektissa *Solar and Heat Pump systems* [19]. Projektin päätavoite on optimoida aurinkokeräinten ja maalämmön yhteiskäyttöä. Simuloinnin avulla on pystytty vertailemaan eri toimintatapoja ja saaduissa tuloksissa aurinkoke-

räinten käyttö suoraan lämmitykseen on noin kuusi kertaa tehokkaampaa kuin porakaivon lataus [5]. Aurinkokeräimellä kannattaa siis lämmittää suoraan vesivaraajaa tai lämmitysjärjestelmää kun se on mahdollista. Tulokset osoittavat myös, että aurinkokeräinten hyöty maalämpöpumpun yhteydessä korostuu lyhyemmällä porakaivoilla. Elisabeth Kjellsson on väitöskirjatyössään tutkinut aurinkokeräinten ja maalämmön yhteiskäyttöä ja todennut hybridijärjestelmän kannattavammaksi kun porakaivo on lyhyt tai maaperän lämmönjohtavuus on huono [20]. Maapiirin syvyyden ylimitoitus on siis kannattavin vaihtoehto, jos halutaan ainoastaan estää maapiirin lämpötilan lasku. Kuitenkin esimerkiksi taloa laajennettaessa voi lämpökuorma kasvaa yli mitoituksen, jolloin aurinkokeräimen lisäämisellä on huomattavampi vaikutus maapiirin lämpötilaan. Aurinkokeräin ja kamina kuitenkin myös vähentävät lämpöpumpun käyttötarvetta, jolloin sen kuluvien osien elinikä pitenee. Edellä mainituissa tutkimuksissa on vertailtu maalämpöjärjestelmien toimintatapoja, mutta tutkimuksissa ei kuitenkaan ole käsitelty mahdollisuutta maapiirin kiertonesteen esilämmitykseen aurinkokeräimillä. Tämän työn tarjoama uutuusarvo on esilämmitysmahdollisuuden tarkastelu.

Pro gradu - työ suoritettiin tapaustutkimuksena, jossa tarkasteltiin Jyväskylässä sijaitsevan omakotitalon hybridilämmitysjärjestelmän (kuva 1.1) mittaus- ja seurantajärjestelmän toteuttamista. Lisäksi selvitettiin vesikiertoisen takan ja aurinkokeräinten käyttöä lämpöpumpun yhteydessä vertailemalla valmistajien vastaavasti kaminalle ja aurinkokeräimille antamia hyötysuhteita mitatuista aineistosta laskettuihin arvoihin. Hybridijärjestelmien tutkiminen rajattiin asuinrakennuksiin ja suomalaisten pientalojen lämmöntarvetta tutkittiin tilastojen ja rakennusstandardien pohjalta tuoton ja kulutuksen vertaamiseksi. Hybridilämmitysjärjestelmiä ei tutkittu esimerkkikohteen ulkopuolelta, jottei työstä tulisi liian laajaa ja taloudellinen arvointi jätettiin tekemättä, johtuen jo tehdyistä selvityksistä.

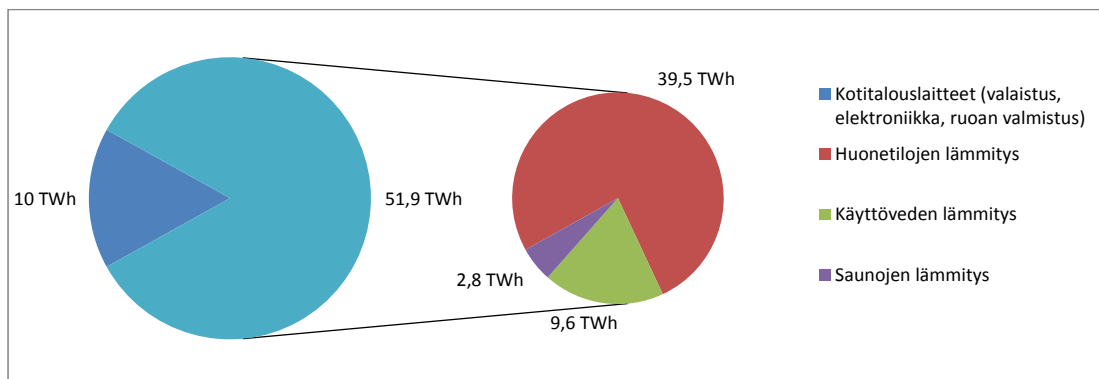


Kuva 1.1: Esimerkkikohteen hybridilämmitysjärjestelmän lämmönlähteet, lämmönkehityslaitteet, lämmönkäyttökohteet ja lämmönsiirtotavat

2. Omakotitalon lämmöntarve

2.1 Yleistä kulutuksesta

Vuonna 2011 asuinrakennusten energiankulutus oli 61,9 TWh [36], josta lämmityksen osuus oli 51,9 TWh eli noin 84 %. Lämmitykseen luetaan sekä käyttöveden ja saunan lämmitys että ilmanvaihtoon ja lämmönjakoon liittyvä lämmitys [37], jotka jakaantuvat kuvan 2.1 havainnollistamalla tavalla. Omakotitalojen lämmönkulutus vaihtelee kuitenkin tapauskohtaisesti ja riippuu mm. talon sijainnista, huonelämpötiloista, lämpimän käyttöveden kulutuksesta ja rakentamisvaiheessa tehdyistä päätöksistä.



Kuva 2.1: Asuinrakennusten energiankulutus Suomessa vuonna 2011. Kuva on luotu lähteen [36] pohjalta.

2.2 Omakotitalojen luokittelu lämmönkulutuksen mukaan

Tyypillisen suomalaisen noin 20 vuotta vanhan pientalon pinta-ala on 100 m^2 ja huonetilojen lämmitysenergian kulutus noin $120 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ [22]. Omakotitalon energiatehokkuutta on kuitenkin mahdollista pienentää esimerkiksi hyvän eristyksen avulla. Uuden pientalon lämmitysenergian kulutus on tyypillisesti alle $100 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ [24]. Tyypilliseen pientaloon verrattuna vähemmän lämmitysenergiaa tarvitseva asuinrakennus määritellään kulutuksen mukaan *matalaenergia-, passiivi-, nollaenergia- tai plusenergiataloksi*.

2.2.1 Matalaenergiatalo

Aikaisemmin käytetyn määritelmän mukaan matalaenergiatalon huonetilojen lämmitykseen tarvittava energia on noin puolet rakennusmääräysten minimivaatimukset täyttävästä talosta, eli noin $40\text{-}60 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$. Vuonna 2010 eristysvaatimukset tiukentuivat ja matalaenergiatalon määritelmä muuttui. Uusien rakentamismääräysten mukaan matalaenergiarakennuksen lämpöhäviöiden tulee olla enintään 85 % rakennukselle määritetystä vertailulämpöhäviöstä. [26]

2.2.2 Passiivitalo

Keski-Euroopassa passiivitalot määritellään yleensä taloiksi, jotka eivät tarvitse erillistä lämmitystä, vaan pysyvät lämpiminä ihmisistä ja kotitalouslaitteista vapautuvalla hukkalämmöllä. Suomen talvi on kuitenkin tähän liian ankara ja passiivitalo tarvitsee tilojen lämmittämiseen Etelä-Suomessa noin $20 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$, Keski-Suomessa $25 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ ja Pohjois-Suomessa $30 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ lämmitysenergiaa. [38]

2.2.3 Nolla- ja plusenergiatalo

Nollaenergiatalo käyttää uusiutuvaa energiaa niin, että rakennuksen yhteydessä tuotettu energia vastaa vuositasolla sekä lämmitykseen että sähkölaitteisiin kulutettua määrää. Mikäli ylijäämä sähköä voidaan syöttää verkkoon, kyetään esimerkiksi aurinkopaneeleilla tuottamaan kesän aikana määrä, joka talvella otetaan sähköverkosta. Plusenergiatalo tuottaa energiaa enemmän kuin kuluttaa [26].

2.3 Kulutusprofiili

Lämpöenergian tarve vaihtelee sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä ja usein kulutus ei korreloi käytettävissä olevan uusiutuvan energian kanssa. Lämmönkulutusprofiilin avulla voidaan arvioida hybridilämmitysjärjestelmän eri osien lämmöntuotantovalmiutta.

2.3.1 Lämmitystarveluku

Ilmatieteenlaitoksen tilastoiman lämmitystarveluvun, eli astepäiväluvun, avulla voidaan vertailla eri ajanjaksojen tai paikkakuntien lämmöntarvetta (taulukko 2.1). Päivittäinen lämmitystarveluku lasketaan vähentämällä sisälämpötilasta vuorokauden keskilämpötila. Sisälämpötilalle käytetään yleisimmin arvoa 17 °C. Päivittäistä lämmitystarvelukua yleisempi on kuukausittainen luku, johon on laskettu yhteen kuukauden kaikkien päivien lämmitystarveluvut. Vuosittaiset lämmitystarveluvut lasketaan vastaavasti laskemalla kuukausittaiset arvot yhteen. Keväällä jätetään huomioimatta päivät, joiden keskilämpötila on yli +10°C ja syksyllä päivät joiden keskilämpötila on yli +12°C, sillä näinä päivinä voidaan arvioida tilojen lämmityksen olevan pois päältä. [18]

Lämmitystarvelukuja voidaan käyttää esimerkiksi arvioitaessa koko vuoden lämmönkulutusta, kun yhden kuukauden todelliset kulutuslukemat ovat tiedossa. Talon lämmönkulutuksesta on kuitenkin vähennettävä ulkolämpötilasta riippumattomien lämmitysten kuten käyttöveden lämmityksen osuus, sillä astepäiväluku kuvaa vain sisätilojen lämmöntarvetta.

Taulukko 2.1: Eri paikkakuntien kuukausittaisten lämmitystarvelukujen keskiarvot vuosilta 1981-2010 kuukausittain [18]

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Vuosi
Helsinki	647	612	566	383	153	21	5	22	125	316	464	588	3902
Tampere	724	675	612	400	176	34	12	42	192	382	529	667	4445
Jyväskylä	785	721	646	440	206	49	16	60	227	414	569	718	4851
Oulu	824	742	677	465	249	52	16	59	224	423	593	749	5073
Ivalo	923	819	755	557	377	146	71	147	318	523	722	875	6233

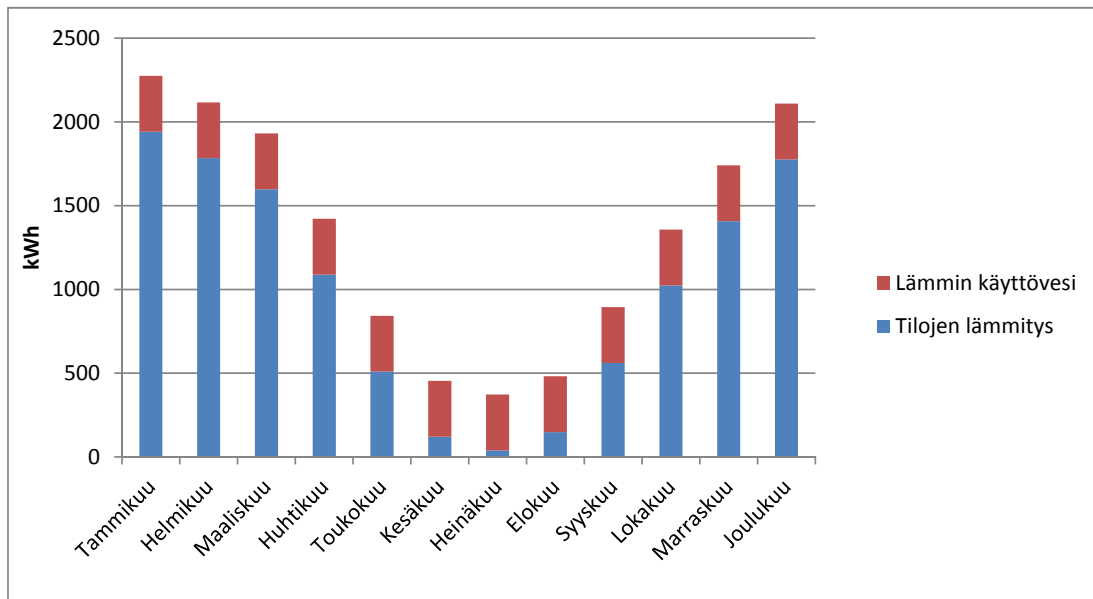
2.3.2 Vedenkulutus

Suomalaiset kuluttavat vettä keskimäärin 155 l/vrk asukasta kohden ja lämpimän käyttöveden osuus tästä on noin 40 - 50 litraa. Vuosittain käyttöveden lämmitykseen tarvittava energiamäärä on noin 800 - 1200 kWh/asukas [24]. Käyttöveden kulutus ja käyttöprofiilit voivat poiketa paljon tapauskohtaisesti, mutta kotitaloutta- tai asukasta kohti mitattu kulutus pysyy yleisesti samansuuruisena vuoden ympäri [32]. Yleisesti lämmintä käyttövettä kuluu hieman enemmän talvisin, sillä ihmiset kuluttavat enemmän aikaa sisätiloissa ja käyttävät enemmän lämmintä käyttövettä. Kesällä on myös yleisempää lähteä lomalle ja kokonaan pois vakituisesta asunnosta, jolloin kulutusta ei ole [15].

Lämpimän käyttöveden kulutus ja käyttöajat vaikuttavat oleellisesti aurinkokeräinten käyttöasteeseen [14], mikäli keräintä käytetään vain käyttöveden lämmitykseen. Optimaalisinta olisi kuluttaa lämmintä vettä samanaikaisesti aurinkokeräimen tuotannon kanssa. Tällöin lämminvesivaraajan ja keräimistön lämpötila pysyy matalampana ja aurinkokeräin voi toimia pidempään ja paremalla hyötysuhteella lämmönsiirtohäviöiden ollessa pienemmät. Kulutustottumusten vaikutus käyttöasteeseen laskee, kun myös lämpöpumpun maapiirin lataaminen on mahdollista, kuten tässä työssä käsiteltävän esimerkkikohteen tapauksessa.

2.3.3 Vuosittainen lämmönkulutusprofiili

Huonetilojen lämmitykseen tarvittavan lämmön määrä vaihtelee suuresti kuukausittain, kuten taulukon 2.1 lämmitystarveluvuista nähtiin. Omakotitalon vuosittaista lämmönkulutusprofiilia voidaan arvioida esimerkin avulla: Oletetaan pinta-alaltaan sadan neliömetrin talo ja lämmönkulutukseksi 120 kWh/m²/a. Tällöin huonetilojen lämmitykseen kuluu vuodessa 12 000 kWh. Kun oletetaan talo Jyväskylään ja jaetaan kulutus lämmitystarvelukujen (taulukko 2.1) mukaisesti, saadaan arvio rakennuksen kuukausittaiselle lämmitystarpeelle kilowattitunteina (kuva 2.2). Lisäksi talon lämpimän käyttöveden kulutusta voidaan arvioida asukkaiden lukumäärän mukaan.

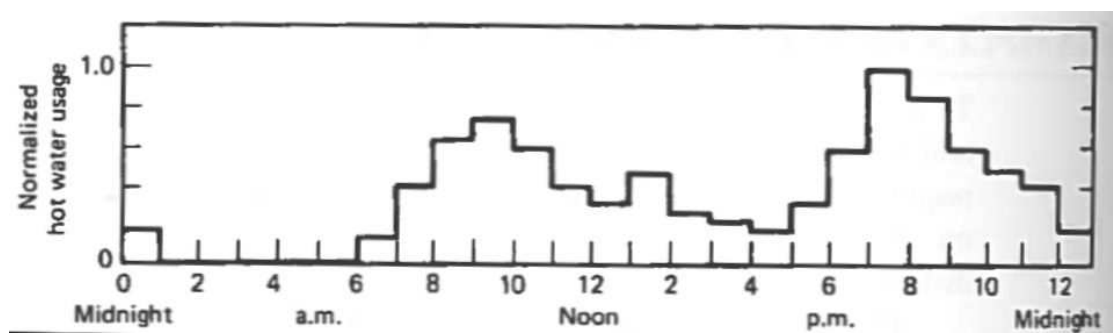


Kuva 2.2: Arvio 100 m² omakotitalon lämpimään veteen ja tilojen lämmitykseen tarvitsevästä energiamäärästä kuukausittain nelihenkiselle perheelle, kun lämmöntarve vuodessa tilojen lämmitykseen on 120 kWh/m² ja käyttöveden lämmitykseen 1000 kWh/asukas.

2.3.4 Päivittäinen lämmönkulutusprofiili

Vuorokauden aikana lämpöä ei kulu tasaisesti, johtuen yön ja päivän lämpötilaeroista ja kulutustottumuksista. Käyttöveden kulutus on täysin asukaskohtaista, mutta yleisesti ihmiset esimerkiksi nukkuvat öisin, jolloin käyttöveden kulutusta ei ole. Ensimmäinen kulutuspiikki ajoittuu aamulle, jolloin herätään ja seuraava kulutuspiikki iltapäivälle, kun palataan töistä (kuva 2.3). [15]

Ulkolämpötilaerojen vaikutus on suuri varsinkin syksyisin ja keväisin, jolloin tarvittavan lämmityksen määrä on merkittävästi pienempi päivällä kuin yöllä. Auringonsäteily myös lämmittää taloa passiivisesti päivällä [15]. Toisin sanoen auringon säteily lämmittää talon pintaa ja ikkunoiden kautta sisätiloja. Korkeamman ulkolämpötilan ansiosta lämpötilaero talon ulko- ja sisäpuolella on pienempi päivisin, jolloin lämpöhäviöt ovat pienemmät.



Kuva 2.3: Esimerkki normalisoidusta lämpimän käyttöveden kulutusprofiilista [12]

3. Lämmitysjärjestelmä

Tässä luvussa käydään läpi yleiset lämmitysjärjestelmän osat, ja tarkastellaan aurinkokeräinten, maalämpöpumpun ja puulämmityksen toimintaperiaatetta.

3.1 Lämmitysjärjestelmän osat

Omakotitalon lämmitysjärjestelmän osat voidaan jakaa lämmönkehitykseen, -varastointiin, -jakoon sekä ohjaus- ja säätölaitteisiin [25]. Joskus osat voivat olla yhdessä, kuten käytettäessä takkaa, joka toimii sekä lämmönkehitys- että lämmönjakolaitteena. Varaava takka toimii myös lämpövarastona.

3.1.1 Lämmönkehityslaitteet

Lämmönlähteiden energia muunnetaan hyödynnettäväksi lämmöksi lämmönkehityslaitteilla, joita ovat mm. aurinkokeräin, kamina, lämpöpumppu, sähkölämmityslaitteet ja kaukolämmönvaihtimet [25]. Lämmönkehityslaitteisiin liittyy hyötysuhde, joka kertoo kuinka suuri osa käytettävästä energiasta saadaan muutettua hyödynnettäväksi lämmöksi. Esimerkiksi uusien öljykattiloiden hyötysuhde on noin 0,9, jolloin 90 % öljyn sisältämästä energiasta muutetaan lämmöksi [22]. Sähkölämmityslaitteiden voidaan katsoa toimivan 100 prosentin hyötysuhteella.

3.1.2 Lämmönvarastointilaitteet

Lämpövarastojen avulla lämpöä ei tarvitse tuottaa yhtäaikaisesti kulutuksen kanssa. Ominaisuus on erityisen tärkeä aurinkokeräinten yhteydessä. Yleisesti käytetty lämpövarasto on lämminvesivaraaja, josta lämpö tarvittaessa siirretään hyödynnettäväksi. Myös asumusten rakenteet toimivat lämpövarastoina tasaten kulutusta.

3.1.3 Lämmönjakolaitteet

Lämmönjaon avulla lämpö siirretään lämpövarastoista ja lämmönkehityslaitteilta käyttökohteeseen. Lämmönjakolaitteisiin kuuluvat siirtoputkistot ja huonetilojen lämmityslaitteet kuten vesi- tai sähköpatterit [25].

3.1.4 Sääto- ja ohjauslaitteet

Lämpötilan pitämiseksi tasaisena ja halutunlaisena tarvitaan ohjauslaitteita, jotka voivat esimerkiksi säätää lämmönjakolaitteilla kiertävän veden lämpötilaa ulkolämpötilan mukaan. Huonetiloissa tai lämmityspatterissa on myös termos- taatteja jotka voivat katkaista lämmityksen huonekohtaisesti [22]. Ohjauslaitteen avulla voidaan lämmitystä myös ajoittaa esimerkiksi sähkön mahdollisen hinta- vaihtelun perusteella.

3.2 Aurinkolämpö

Vuosittain maapallolle saapuvan aurinkoenergian määrä on noin $1,52 \cdot 10^{18}$ kWh, josta noin 30 % siroaa takaisin avaruuteen. Maapallon pinnan saavuttava säteily - noin 10^{18} kWh - on 10 000 kertainen verrattuna vuotuisen energiankulutukseen planeetallamme. [8, 6]

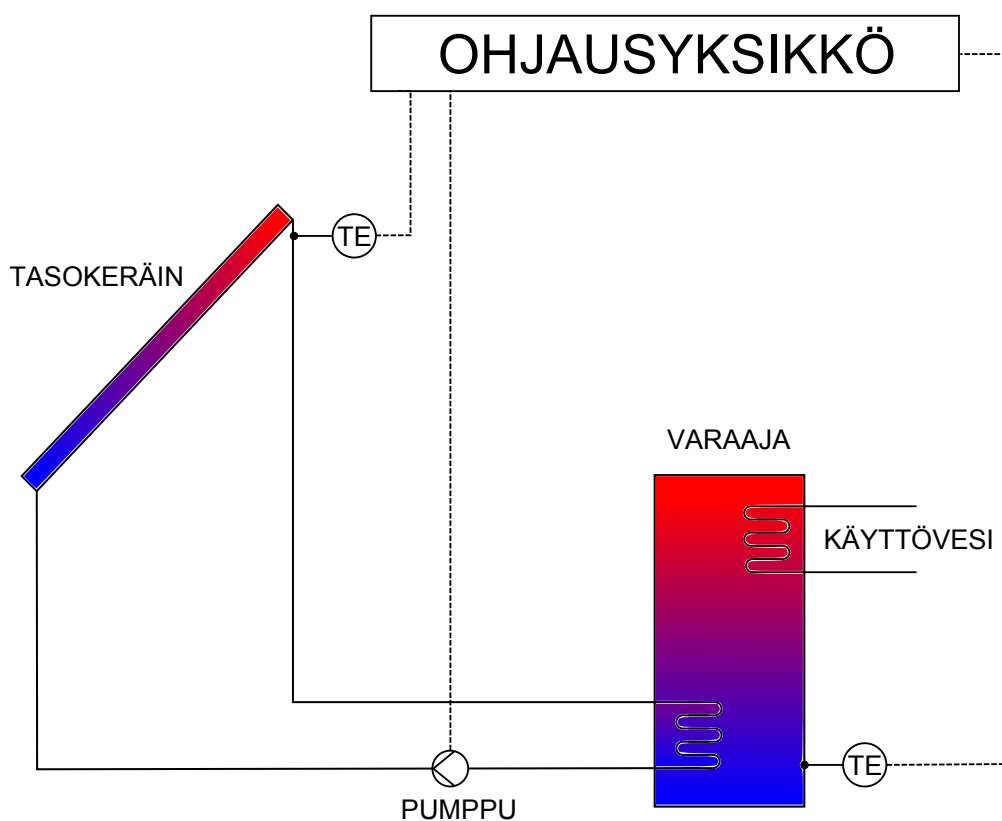
Aurinkoenergiaan pohjautuvat uusiutuvat energianlähteet jaotellaan suoriin- ja epäsuoriin lähteisiin. Epäsuoria energianlähteitä ovat mm. bio-, tuuli- ja aal- toenergia, jotka syntyvät auringon vaikutuksesta. Suoralla hyödyntämisellä tarkoitetaan auringon säteilyenergian muuntamista sähköksi tai lämmöksi [6]. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan aurinkolämpöjärjestelmiä, jotka muuntavat säteilyenergian lämmöksi.

Käytännössä jokainen asunto käyttää aurinkolämpöä hyväkseen auringon lämmittäessä rakenteita ja paistaessa ikkunoista sisään. Tällöin puhutaan pas- siivisesta aurinkolämmön hyödyntämisestä. Aktiivisella hyödyntämisellä tar- koitetaan auringonsäteilyn hyödyntämistä aurinkokeräimen avulla. Keräin on siis lämmönkehityslaite, jolta lämpöä siirretään käytettäväksi tai varastoidaan lämminvesisäiliöön.

Aurinkokeräimen ohjaus perustuu yleensä lämpötilaeroihin ohjausyksikön mitatessa lämpötilaa keräimellä ja lämminvesisäiliössä (kuva 3.1). Lämpötilaeron ollessa 5 - 10 °C [31] ohjainyksikkö käynnistää pumpun, joka kuljettaa kiertoi- netta lämminvesisäiliön lämmönvaihtimien kautta. Kiertoaine, joka on säiliön vettä lämpimämpää, luovuttaa lämpöä lämmönvaihtien kautta säiliöön. Kiertoai- ne jäähtyy ja palaa jälleen aurinkokeräimelle. Tyypillinen vesivaraajan lämpötila

on 60 - 70 °C ja Legionella-bakteerin vuoksi varaajan lämpötilan on oltava vähintään 55 °C [27]. Varaajan lämpötila voidaan myös nostaa ajoittain yli kyseisen lämpötilan, kuten esimerkkitapahtuman lämminvesivaraajan tapauksessa on tehty. Tällöin lisätään aurinkokeräimen käyttömahdollisuutta, koska käyttö voidaan aloittaa pienemmällä lämpötilalla.

Lämminvesisäiliön stratifikaatiota voidaan hyödyntää ottamalla käyttövesi säiliön yläosasta, jossa vesi on kuuminta, mutta kierrättämällä aurinkokeräimelle menevä kiertoneste varaajan alaosan kautta [11, 34], jossa vesi on viileintä. Tällöin lämmönsiirtonesteen lämpötilan ei keräimellä tarvitse nousta yhtä korkealle, kuin lämmitettäessä varaajan yläosaa, ja vähemmän lämpöä karkaa keräimeltä ulkoilmaan.



Kuva 3.1: Yksinkertaisen aurinkokeräinjärjestelmän toimintaperiaate: Ohjausyksikkö mittaa lämpötiloja aurinkokeräimen yläosassa sekä lämminvesisäiliössä ja lämpötilaeron ollessa tarpeeksi suuri käynnistää lämmönsiirtonestettä kierrättävän pumpun. Katkoviiva kuvaa ohjausyksikön yhteyttä lämpötila-antureihin ja pumppuun. Yhtenäinen viiva kuvaa lämmönsiirtoputkistoa. (TE = lämpötila-anturi)

Aurinkokeräimen teoreettinen hyötysuhde eri lämpötiloissa määritellään yhtälöllä [1]

$$\eta_A' = \eta_0 - \frac{\alpha_1(T_{ka} - T_u)}{I} - \frac{\alpha_2(T_{ka} - T_u)^2}{I}, \quad (3.1)$$

missä α_1 , α_2 ja η_0 ovat valmistajan määrittämiä parametrejä keräimelle. Kertoimet α_1 ja α_2 kuvaavat keräimeltä ulkoilmaan johtuvia lämpöhäviöitä, ja η_0 on keräimen optinen hyötysuhde, eli keräimen korkein mahdollinen hyötysuhde kun lämpöhäviöitä ei ole. Yhtälössä T_{ka} on keräimen keskilämpötila, T_u ulkolämpötila ja I auringon säteilytysvoimakkuus (W/m^2). Yhtälöstä nähdään, että hyötysuhde heikkenee lämpötilaeron kasvaessa sitä enemmän mitä suuremmat arvot α_1 ja α_2 saavat.

Hyötysuhde voidaan määrittää myös kokeellisesti jakamalla lämmönsiirtonesteeseen keräimessä siirtynyt lämpöteho säteilytysvoimakkuudella:

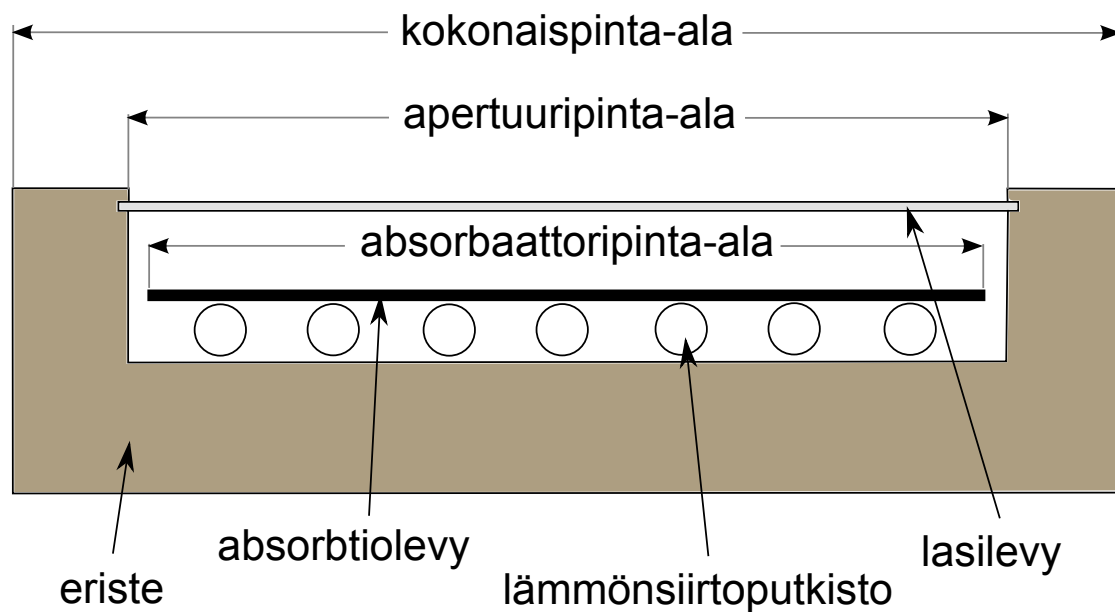
$$\eta_A = \frac{c\dot{V}\rho(T_2 - T_1)}{IA}, \quad (3.2)$$

missä c on lämmönsiirtonesteen ominaislämpökapasiteetti ($J/(kg^\circ C)$), \dot{V} tilavuusvirta (m^3/s), ρ lämmönsiirtonesteen tiheys (kg/m^3) ja A keräimen pinta-ala. Muuttujat T_2 ja T_1 ovat vastaavasti keräimeltä lähtevän ja keräimelle tulevan nesteen lämpötilat. Lämpötilat riippuvat lämmön käyttökohteesta, ja tyypillinen lämpötilaero käyttökohteen ja keräimen välillä on 5 - 10 °C. Tässä työssä laskeissa käytettävä pinta-ala on *apertuuripinta-ala*, josta lisää seuraavassa luvussa 3.2.1. Hyötysuhteen laskennassa voitaisiin ottaa huomioon myös sähkölaitteiden, kuten keräinnestettä kierrättävän pumpun, sähkönkulutus. Sähkönkulutus on kuitenkin oletettu pieneksi lämmöntuotantoon verrattuna ja näin ollen jätetty tarkastelun ulkopuolelle.

3.2.1 Aurinkokeräimen toimintaperiaate

Aurinkokeräimen avulla auringon säteilyenergia muunnetaan lämpöenergiaksi, joka voidaan varastoida tai siirtää käytettäväksi. Nestekiertoisen tasokeräimen sisällä on putkisto jossa kiertää lämmönkeruuneste. Putkiston lähellä sijaitsee tumma absorbtiolevy, joka lämpenee lasilevyn läpi tulevasta auringon säteilystä. Absorbtiiolevyltä lämpö siirtyy putkistoon, josta keruunesteen mukana edelleen käytettäväksi tai varastointiin. Aurinkokeräimen rakenne näkyy kuvassa 3.2.

Aurinkokeräimen pinta-alalla tarkoitetaan tapauskohtaisesti yhtä kolmesta eri määritelmästä. *Apertuuripinta-ala* on lasilevyn ala, jonka läpi auringonsäteily kulkee keräimen sisälle. *Kokonaispinta-alassa* on mukana myös lasilevyä ympäröivän kehikon ala, eli käytännössä tarkoitetaan alaa, jonka keräin vie asennuspaikalta. *Absorbaattoripinta-ala* on absorbtiolevyn ala, joka esimerkkikohteen



Kuva 3.2: Aurinkokeräimen rakenne. Kuva on tehty lähteen [29] pohjalta.

aurinkokeräinten tapauksessa on sama kuin apertuuripinta-ala. Tässä työssä puhuttaessa pinta-alasta tarkoitetaan apertuuripinta-alaa, sillä se on käytössä eurooppalaisissa standardeissa. [1, 29]

Aurinkokeräinjärjestelmän hyötysuhteeseen vaikuttavista häviöistä ensimmäinen tapahtuu auringon säteiden saapuessa keräimen lasipinnalle, josta osa säteilystä heijastuu takaisin taivaalle. Keräimen sisään absorbitiolevyä lämmittämään pääsevä säteilyn osuus vastaa optista hyötysuhdetta η_0 . Keräimen lämmetessä myös lämpötilaero ulkoilman kanssa kasvaa ja lämpöä johtuu keräimen eristeiden läpi. Osa lämmöstö kulkee lämpösäteilynä lasin pinnalle ja edelleen johtumalla lasin läpi ulkoilmaan. Kovalla tuulella keräimen ulkopinta viilenee nopeammin, jolloin lämpöhäviöt ovat suuremmat. Keräimeltä lämpö siirtyy lämmönsiirtonesteessä putkistoa pitkin, joissa tapahtuu myös lämpöhäviöitä. Talon sisällä kulkevien putkien osalta putkistohäviöt kuitenkin lämmittävät rakennusta. [12]

3.3 Maalämpö

Myös maaperän lämpö on osittain peräisin auringosta, joka lämmittää maan pintakerrosta säteilyn, sateiden ja lämpimän ilman avulla. Auringon huomattavin

vaikutus ulottuu routarajaan¹ asti, ja noin 10 metrin syvyydessä lämpötila pysyy jo jotakuinkin tasaisena vuoden ympäri [4].

Maapallon pintakerroksen alapuolisen maaperän geoterminen lämpö on peräisin radioaktiivisista hajoamisista ja maapallon syntyhetken jäännöslämmöstä [10, 33].

3.3.1 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumpun avulla voidaan lämpöä siirtää kylmemmästä lähteestä kuumempaan ja maalämpöpumpun tapauksessa lämpö siirretään maaperästä. Lämpö kerätään maahan upotetulla putkistolla, jossa kiertää kiertoaaine. Mikäli jääty-
misen vaaraa ei olisi, kiertoaaineena voisi toimia pelkkä vesi. Esimerkkikohteen maapiirissä kiertää veden ja jäätyminenestoaineen sekoitus.

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpöä ei voida siirtää kylmemmästä kuumempaan ilman työtä, ja lämpöpumpun kierrossa työn tekee kompressori, joka omakotitalojen tapauksessa käyttää sähköenergiaa. Lämpöpumpun toimintaperiaatetta selventää kuva 3.3. Maalämpöpumpun tuottama energia on siis peräisin maaperästä ja sähköverkosta. Lämpöpumppujen hyvyttä kuvaava lämpökerroin (engl. *coefficient of performance*) lasketaan yhtälöllä [7]

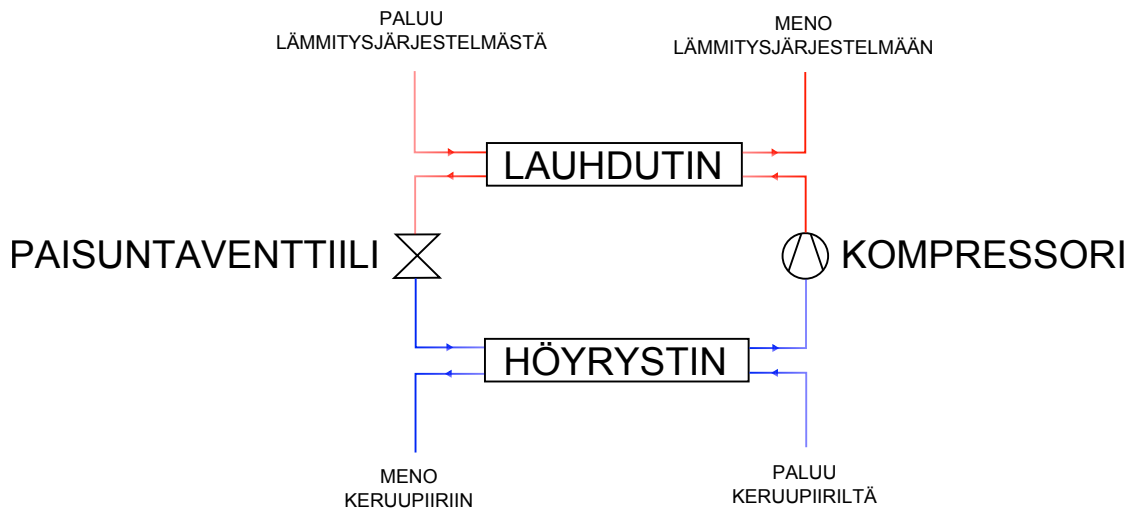
$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{H}}}{W_{\text{net,in}}}, \quad (3.3)$$

missä Q_{H} on tuotettu lämpö ja $W_{\text{net,in}}$ on kompressorin tekemä työ. Lämpökerroin on siis sitä parempi, mitä pienempi on sähköverkosta saatavan energian osuus. Koska kompressorin tekemä työ päättyy kokonaisuudessaan lämmöksi voidaan lämpökerroin kirjoittaa maaperästä saatavan lämmön Q_{L} avulla muotoon

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_{\text{H}}}{Q_{\text{H}} - Q_{\text{L}}}. \quad (3.4)$$

Lämpökerroin vaihtelee maapiirin ja lämmityspiirin lämpötilaeron mukaan. Talvella maaperän viiletessä kompressorin täytyy tehdä suurempi työ lämpötilan nostamiseen, jolloin lämpökerroin heikkenee. Suomessa käytössä olevien maalämpöpumppujen lämpökertoimen vuotuinen keskiarvo on yleisesti noin 3. [13, 21]

¹Talvisin maaperä jäätyy routarajaan asti [4]



Kuva 3.3: Maalämpöpumpun toimintaperiaate: Höyrystimellä kylmäaine vastaanottaa maaperässä kulkevan kiertoaineen lämpöä lämmönvaihtimen kautta ja höyrystyy. Kompressori nostaa höyrin painetta ja lämpötilaa ennen kylmäaineen päätymistä lauhduttimelle, jossa luovuttaa lämpöenergian lämmönvaihtimien kautta lämmitysjärjestelmälle ja muuttuu taas nestemäiseksi. Paisuntaventtiilin läpi kulkevan kylmäaineen lämpötila laskee alle maaperän kiertoaineen lämpötilan, jolloin on jälleen valmis sitomaan lämpöä. [7]

3.3.2 Lämmönkeruupiiri

Maaperällä ja putkiston asennuksella on iso merkitys lämpöpumpputjärjestelmän toimintaan. Mikäli maaperän lämmönjohtavuus on huono, voi maa keruuputkiston läheltä viiletä kovalla käytöllä, jolloin COP_{HP} pienenee. Yleisesti lämmönkeruuputkisto asennetaan joko vaakatasoon lähelle maan pintaa tai vertikaalisesti porakaivon kuvan 3.4 osoittamilla tavoilla. [4, 28]

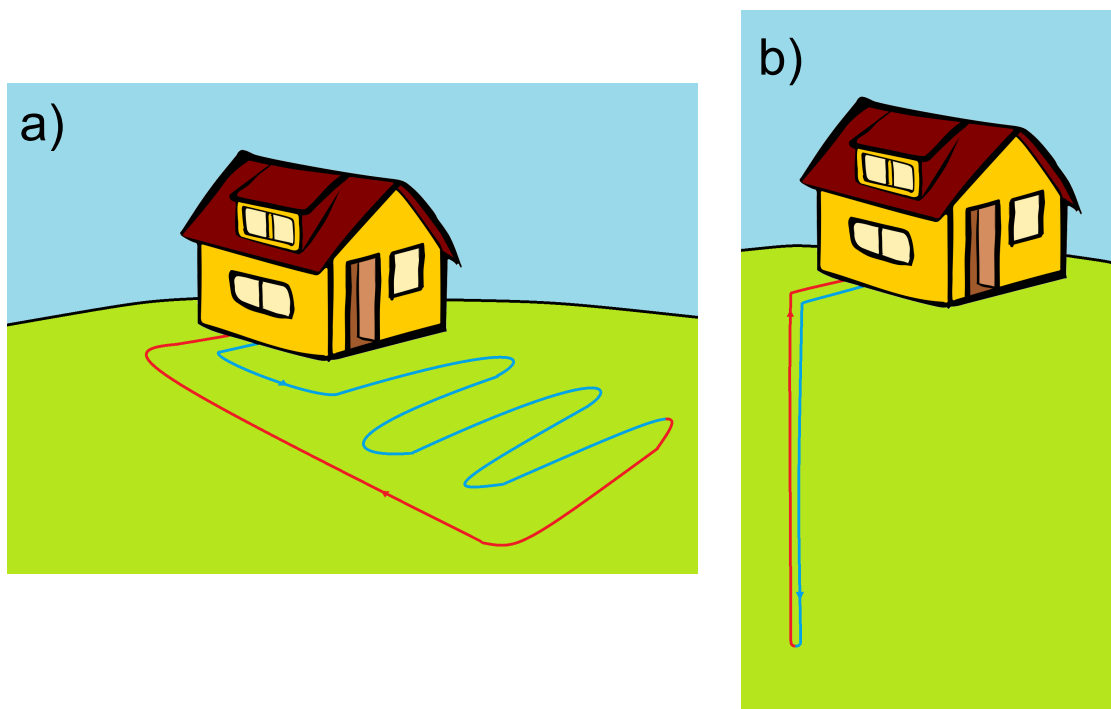
Vaakatasoon asetettavan putkisto on yleensä halvempi vaihtoehto, mutta se tarvitsee porakaivon verrattuna paljon enemmän maapinta-alaa. Lähellä maanpintaa putkisto pystyy käyttämään hyödykseen auringon lämmittävää vaikutusta, mutta toisaalta putkilinjasto on alttiimpi viilenemiselle talvi-aikaan, kun lämmöntarve on suurin. Lähellä maan pintaa myös maaperän termiset ominaisuudet vaihtelevat herkemmin ja maaperä saattaa esimerkiksi kuivua

sateettomana aikana lämmönjohtuvuuden kärsiessä. [23]

Porakaivoa käyttävän järjestelmän tekevät kalliimmaksi porauskustannukset. Kuitenkin syvemmällä maaperässä vuodenajasta johtuvat lämpötilanvaihtelut ovat mitättömiä, jolloin lämmönkeruuputkiston pituus voi olla lyhempi verrattuna vaakatasoon asennettuun putkistoon. Tällöin järjestelmä vaatii myös vähemmän pumppausenergiaa. Yleensä kaivon annetaan täyttyä pohjavedelle ja kaivoon upotetaan painojen avulla U-putki². Porakaivojen maksimisyvyys on noin 200 metriä. Lämpöpumppu voi kuitenkin käyttää useampia rinnan kytkettyjä kaivoja. [23, 8]

Pohjavesi auttaa lämmönsiirtymistä ja mahdolliset pohjavesivirtaukset auttavat ennestään pitämään lämpötilaa tasaisena. Porakaivojärjestelmän ongelmaksi voi koitua alimitoitus, jolloin talven aikana laskenut lämpötila ei välttämättä ehdi palautua kesäkauden aikana. [23, 27] Porakaivon normaali vuosittainen lämpöpumpun käytöstä johtuva lämpötilavaihtelu lähellä maanpintaa on noin 2°C. Porakaivon pohjalla vuotuisia vaihteluita ei juuri tapahdu. Kuitenkin jos porakaivon lämpötila ei ehdi kesän aikana palautua, tapahtuu vuosien saatossa porakaivon lämpötilassa laskua koko syvyydeltä. Lämpötilan lasku on kuitenkin pieni verrattuna kaivon yläosan vuosittaiseen vaihteluun. [20]

²U-putki nimitystä käytetään putkiparista, joka on porakaivon pohjalla yhdistetty 180°mutkalla



Kuva 3.4: Periaatekuva yleisimmistä maapiirin asennustavoista: a) lämmönkeruuputkisto asennettu horisontaalisesti maan sisään noin 1 - 1,2 metrin syvyyteen [3], b) putkisto asennettu vertikaalisesti porakaivoon. Kuvat on luotu lähteen [8] pohjalta.

3.3.3 Maalämpöjärjestelmän mitoitus ja lämmönjako

Maalämmön keruuputkiston pituus ja lämpöpumpun teho voidaan mitoittaa omakotitalon lämmönkulutuksen avulla. Keruupiiri kannattaa suunnitella minimitarvetta pidemmäksi, jotta piirin lämpötilan lasku pysyisi maltillisena. Järjestelmä voidaan suunnitella täysteholle niin, että lämpöpumppu kykenee hoitamaan kaiken lämmityksen kovimmillakin pakkasilla. Osateholle mitoitettu järjestelmä tuottaa huippupakkasilla 60 - 80 % lämmöstä lämpöpumpulla ja loput lisävastuksen avulla. Tällöin lämpöpumpun maksimitehon ei tarvitse olla niin suuri, ja keräinpiiri voi olla lyhyempi. Kuitenkin 95 - 99 % vuotuisesta energiantarpeesta saadaan tuotettua lämpöpumpulla osateholle mitoitettun järjestelmän avulla. [27]

Maalämmön yhteydessä lämpö siirretään lämmönsiirtonesteen mukana yleensä patteriverkostoon tai lattialämmityksen putkistoon. Lattialämmityksen käyttö maalämpöpumpun yhteydessä on suositeltavaa, sillä lämpenevää pinta-alaa

on yleensä enemmän ja kiertonesteen lämpötila voi olla alhaisempi. Lämmönjako- ja keruupiirin lämpötilaeron ollessa pienempi, lämpökerroin on suurempi, jolloin sama lämpöenergiämäärä voidaan tuottaa pienemmällä määrällä sähköä. [21]

3.4 Puulämmitys

Polttopuuta voidaan pitää uusiutuvana energiana ja toisin kuin esimerkiksi auringon ja tuulen kanssa, lämmitysenergian saatavuus ei ole riippuvainen vuodenajasta tai säästä. Vastavuoroisesti polttopuut tarvitsevat varastotilaa ja puiden keräämiseksi on tehtävä työtä tai käytettävä rahaa. Myös puiden polttaminen vaatii työtä, sillä järjestelmän automatisoiminen on hankalaa puupilkkeen epäsäännöllisen muodon takia.

Puusta saatava lämpömäärä vaihtelee puun kosteuden ja puulajin mukaan. Polttopuiden kuivaaminen on tärkeää, sillä kosteita puita polttaessa joudutaan höyrystämään niissä oleva vesi. Suomalaisten puiden lämpöarvoja³ listaavasta taulukosta 3.1 nähdään, että lämpöarvo ei vaihtelee suuresti puulajeittain. Kuitenkin koivun ollessa tiheämpää, on sen energiasisältö tilavuusyksikköä kohden selvästi muita suurempi.

Poltettavien puulajien lämpöarvon ollessa tiedossa voidaan vapautuvaa energiamäärää Q_{polttto} arvioida yhtöllä

$$Q_{\text{polttto}} = \eta m H, \quad (3.5)$$

eli kertomalla lämpöarvo H puumäärän massalla m ja polttolaitteiston hyötysuhteella η .

Taulukko 3.1: Kuivan polttopuun (kosteus 20 %) lämpöarvo ja energiasisältö pinokuutiometriä kohden eri puulajeille [30]

	Lämpöarvo (kWh/kg)	Energiasisältö (kWh/p-m ³)
Koivu	4,15	1700
Mänty	4,15	1360
Kuusi	4,10	1320
Leppä	4,05	1230
Haapa	4,00	1330

³Lämpöarvo kertoo poltettavien energialähteiden energiamäärän painoyksikköä kohden [30]

4. Esimerkkikohteen hybridilämmitysjärjestelmä

Esimerkkikohde (kuva 4.1) on rakennettu vuonna 1945 ja rakennuksen ala on 120 m². Talossa on kolme kerrosta, joista keskimäinen ja ylin ovat asuttuja. *Nereus Geo Sun II* -lämpöpumppu ja kaksi lämminvesivaraajaa sijaitsevat kellari-kerroksessa. Vesikiertoinen takka on sijoitettu yläkertaan. Talossa on patterikiertoinen lämmönjako ja yhteensä noin 300 m² lämmitettävää alaa. Lämmitysjärjestelmästä irrallisia lämmönkehityslaitteita ovat keskikerroksen pönttöuunit ja kellarissa sijaitsevan saunan kiuas. Talon harja on pohjois-etelä -suuntainen ja aurinkokeräimet on asennettu katolle harjan itäpuolelle.

Aurinkokeräin ja kamina on asennettu rinnakkain käsikäyttöisillä kytkimillä, joten niistä vain toinen voi kerrallaan tuottaa lämpöä järjestelmään.



Kuva 4.1: Omakotitalokohde ja sen katolla sijaisevat aurinkokeräimet

4.1 Lämmitysjärjestelmä

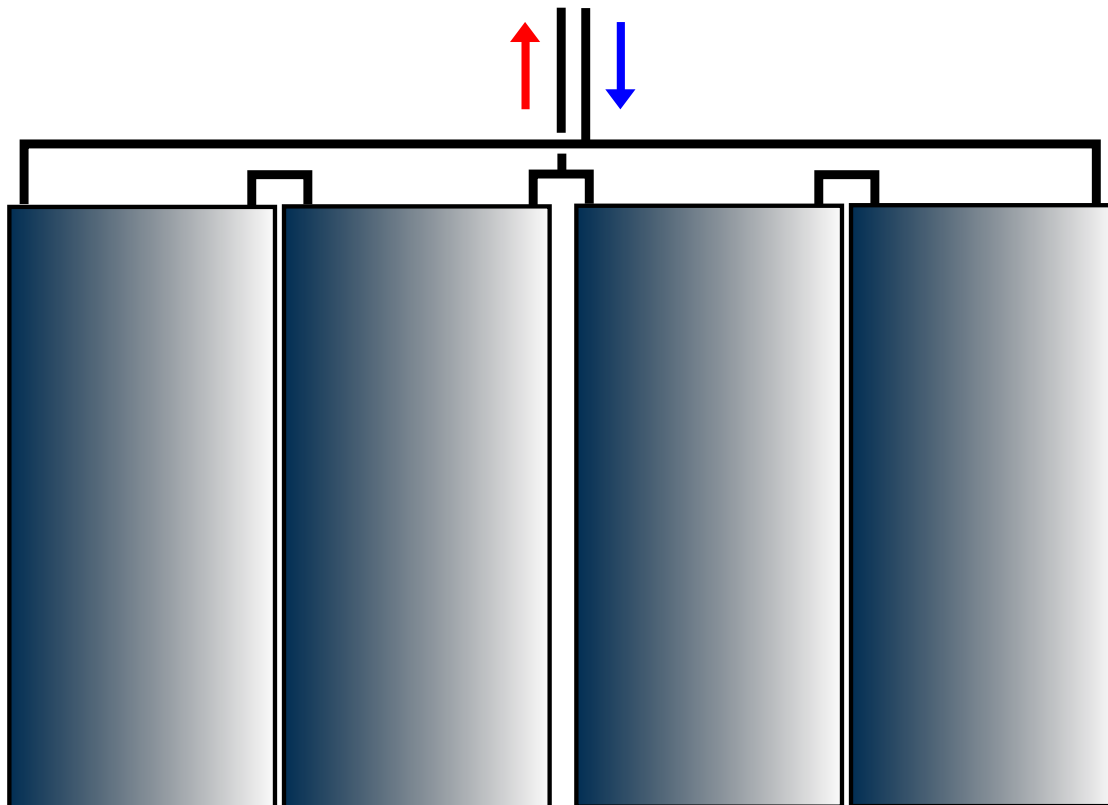
4.1.1 Maalämpöpumppu

Maalämpöpiiri on asennettu rinnan kahteen hieman vinoon porattuun porakai-voon, joiden syvyydet ovat 120 ja 140 metriä. Piirissä kiertää jäätymisenestoaineena toimivan propyleeniglykolin ja veden seos, propyleeniglykolin massaosuuden ollessa 40 %. Lämpöpumpun malli on *Nereus Geo Sun II* ja sen lämmitysteho on 12 kW.

4.1.2 Aurinkokeräimet

Lämmitysjärjestelmään on kytketty neljä aurinkokeräintä siten, että kaksi sarjaan kytkettyä keräinparia on kytketty rinnan kuvan 4.2 osoittamalla tavalla. Keräinten valmistaja on suomalainen Savo-Solar Oy ja niiden malli *SF 100-03-DS*.

Keräinten kallistuskulma noudattaa katon kaltevuutta, joka on 45° , ja keräimet katon mukana on suunnattu itään. Keräimen ominaisuuksista kertovista parametreista α_1 on $1,800 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ja α_2 on $0,0360 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$.



Kuva 4.2: Esimerkkikohteen katolla olevien aurinkokeräinten kytkentäkaavio

4.1.3 Kamina

Esimerkkikohteen yläkertaan asennetun vesikiertoisen *Olymberyl Aidan* -kaminan kokonaishyötysuhteeksi η_{kok} on ilmoitettu 78 % ja kokonaistehoksi 21 kW, josta 15 kW on lämmitysteho vesikierrolle ja loput 6 kW on lämmitysteho huoneilmalle. Kaminan termostaatit estävät veden lämpötilaa nousemasta yli $(83 \pm 3)^\circ\text{C}$.

Kaminalle mainittujen tehojen perusteella $15/21$, eli noin 71,4 prosenttia kokonaislämmitystehosta kohdistuu veden lämmitykseen. Voidaan määritellä vastaava hyötysuhde η_{ve} veden lämmitykselle, joka nyt on 0,714. Puumassan energiasisällöstä veteen - esimerkkikohteen tapauksessa lämmönsiirtonesteeseen - siirtyvälle osuudelle voidaan laskea laskea hyötysuhde:

$$\eta_k = \eta_{\text{kok}}\eta_{\text{ve}} = 0,87 \cdot 0,714 = 0,557.$$

Tällöin siis poltetun puumassan energiasisällöstä 55,7 % siirtyy lämmönsiirtonesteeseen.



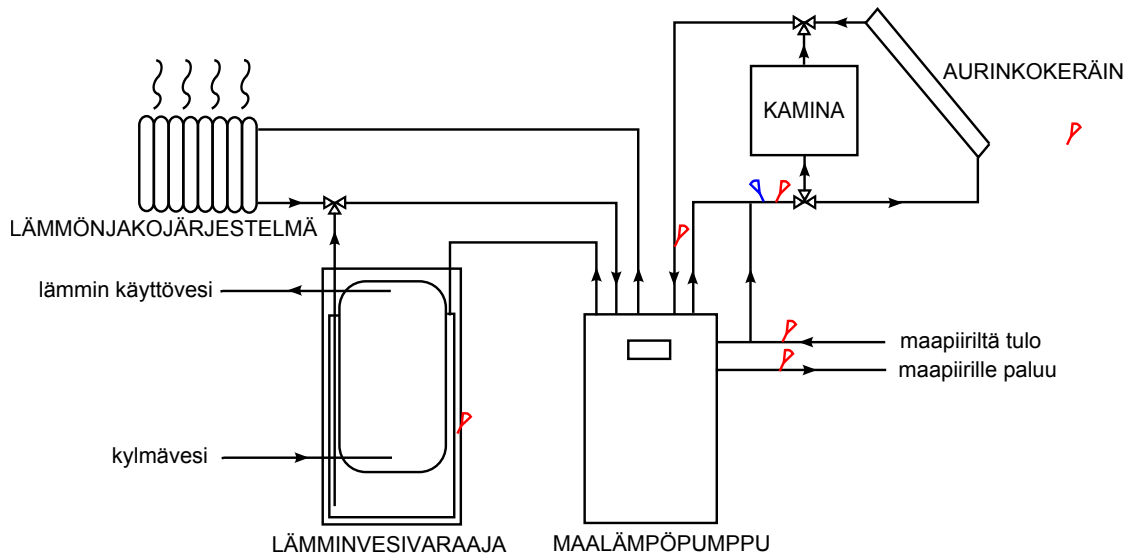
Kuva 4.3: Esimerkkikohteen kamina ja tämän takana vasemmalla lämmitysjärjestelmän tulo- ja paluuputket

4.1.4 Lämmönjako ja -varastointi

Järjestelmän lämpövarastona toimii kaksi sarjaan kytkettyä identtistä *Nereus 300/160* -lämmivesivaraajaa, joiden yhteistilavuus on 920 l. Varaajissa on sisäkkäin kaksi säiliötä, joista sisäsäiliöissä (300 l) kiertää käyttövesi ja ulkosäiliöissä (160 l) lämmitysjärjestelmän lämmönsiirtoneste. Ulomman säiliön funktio on kuitenkin vain lämmittää käyttövettä, sillä talon lämmitys tapahtuu aina suoraan lämpöpumpukoneiston kautta, eikä lämmönsiirtonesteen kierrättäminen varaajan ja lämmönjakojärjestelmän välillä ole mahdollista.

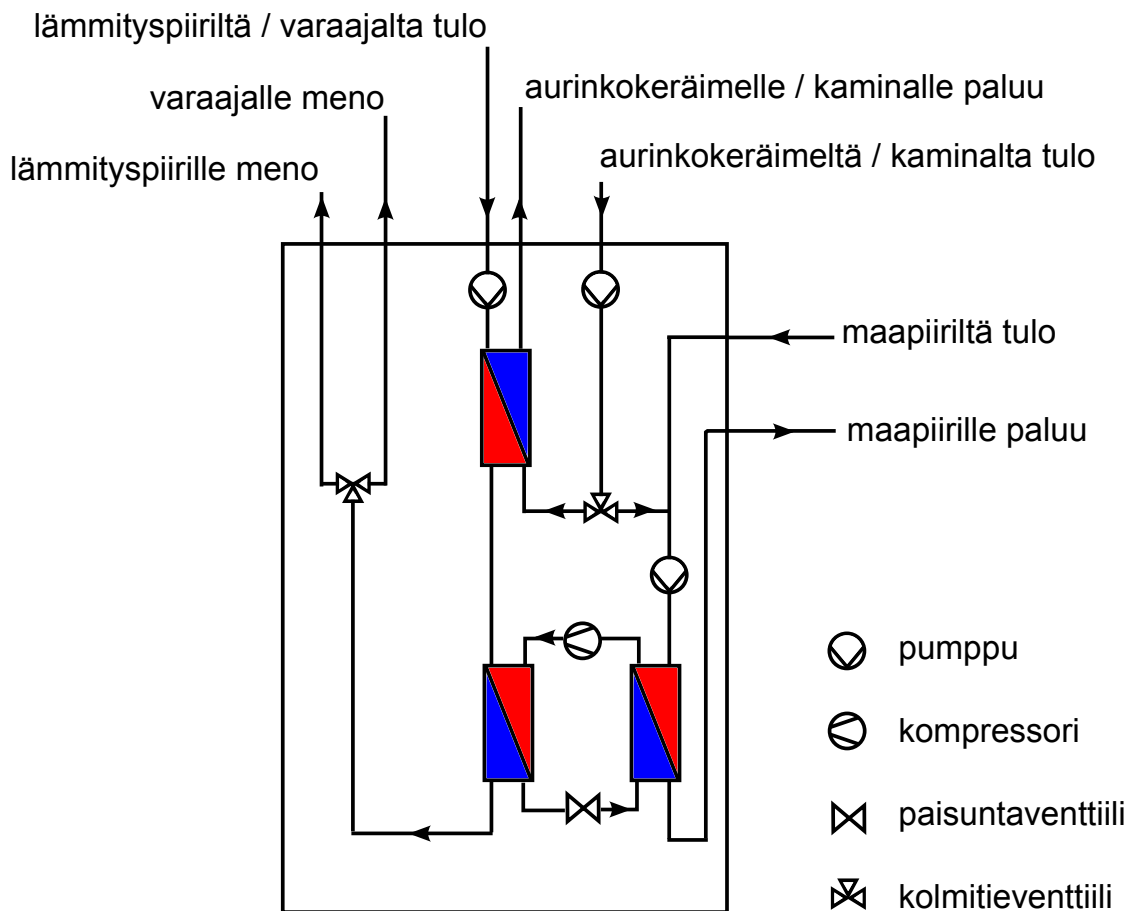
4.2 Lämmitysjärjestelmän kytkentäkuvaus

Järjestelmää ohjaa lämpöpumppu, jonka kautta kaikki lämmönsiirtoputkistot kulkevat. Aurinkokeräin ja kamina on kytketty käytännössä rinnakkain vain toisen ollessa kerrallaan toiminnassa. Vaihto keräimeltä kaminaan ja takaisin suoritetaan manuaalisesti kolmitieventtiileillä. Järjestelmän rakenne ja anturointi näkyvät kuvassa 4.4.



Kuva 4.4: Esimerkkikohteen lämmitysjärjestelmän kytkennät ja anturointi. Punaiset merkit indikoivat tiedonkeruujärjestelmän lämpötila-antureiden paikkoja, joista aurinkokeräimen oikealla puolella sijaitseva merkki tarkoittaa ulkolämpötilan mittausta. Sininen merkki osoittaa tilavuusvirtausmittauksen paikkaa. Selkeyden vuoksi järjestelmän kaksi sarjaan kytkettyä varaajaa on korvattu kuvassa yhdellä.

Lämpöpumppulaitteiston kotelon sisällä (kuva 4.5) eri lähteistä saatava lämpö siirtyy lämmönvaihtimien kautta lämmityspiirin kiertonesteeseen. Aurinkokeräimen kiertoneste ohjataan oman lämmönvaihtimen kautta lämmityspiirille, kun aurinkokeräin lämmittää suoraan varaajaa tai lämmitysjärjestelmää. Kun käytössä on esilämmitys, keräimen kiertoneste ohjataan lämpöpumpun kylmän puolen lämmönvaihtimelle.



Kuva 4.5: Lämpöpumpulaitteiston kytKentäkuvaus ja kaaviomerkkien selitykset

4.3 Lämmitysjärjestelmän ohjaus

Esimerkkikohteen lämmitysjärjestelmässä lämpöpumpun ohjausjärjestelmä ohjaa kaikkea lämmitysjärjestelmän osista tuotavaa lämpöä ja lämmönjakoa. Aurinkokeräinten käytön asetukset vaihtelevat riippuen siitä onko talvi, kesä vai syksy / kevät. Meneillään olevan vuodenajan lämpöpumppu määrittää edellisen päivän keskilämpötilan perusteella.

Lämmityspattereissa kiertävän lämmönsiirtonesteen lämpötilan ohjaus määrittelee ulkolämpötilan perusteella. Lämmönsiirtonesteen lämpötilan eri ulkolämpötiloissa kertoo *lämmityskäyrä*, jota voidaan muokata asuntokohtaisesti. Lämmityksen tarve taas määritellään ns. *integraalilaskennan* avulla. Integraalilaskenta käynnistää lämmityksen, kun lämmityspiirin lämpötila on laskenut

hieman alle lämmityskäyrän määrittämän oletusarvon ja kytkeytyy pois päältä, kun lämpötila on noussut hieman yli oletusarvon. Järjestelmä laskee yhteen asteminuutteja, joka on minuutin välein laskettava lämpötilaero asetusravosta. *Integraali*-nimitystä käytetään astelukujen summasta, jonka tehdasasetusarvo on $\pm 50^\circ\text{min}$. Esimerkiksi lämmitysjärjestelmän kiertonesteen ollessa 20 minuuttia 1°C alle asetusravon ja tämän jälkeen 16 minuuttia 2°C alle asetusravon, on asteminuuttien summa -52°min ja lämmitys alkaa.

Säätämällä integraalin itseisarvoa pienemmäksi käynnistyy lämmitys useammin ja on päällä lyhyempiä aikoja, mutta huonelämpötila pysyy vakaampana. Arvon kasvattamisella on vastaavasti käänteinen vaikutus.

Mikäli integraalin arvo kovilla pakkasilla laskee lämpöpumpun ollessa päällä alle raja-arvon, joka on oletuksena -500°min , kytkeytyy 3 kW lämpövastus päälle. Mikäli integraali edelleen laskee vastuksen ollessa päällä, nousee vastuksen tehoksi 6 kW.

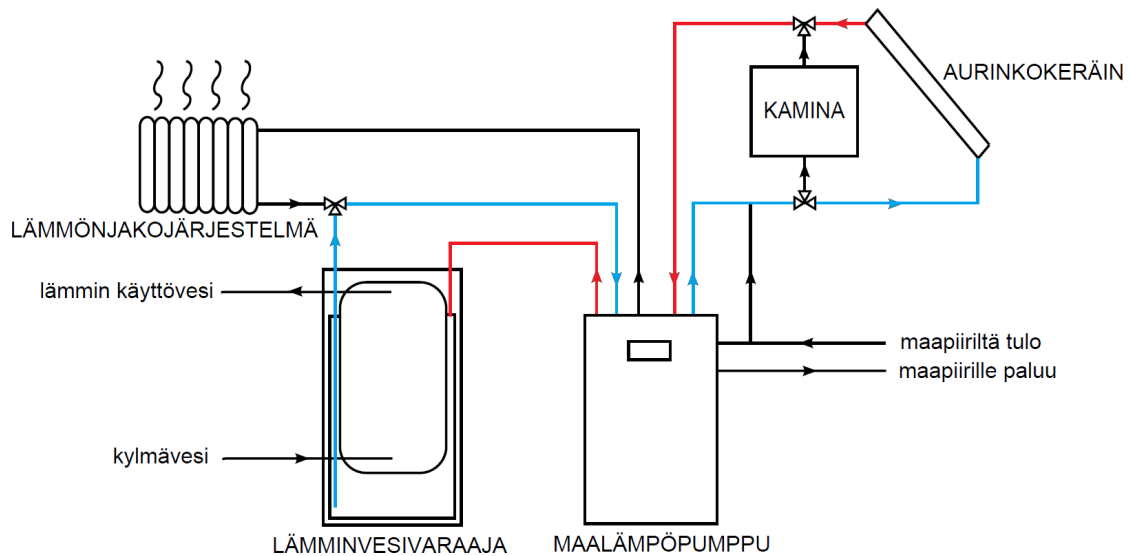
Käyttöveden lämmitystä ohjataan lämminvesivaraajan ylä- ja alaosassa sijaitsevien lämpötila-antureiden avulla. Lämmitys alkaa aina kun alemman anturin arvo on alle 44°C ja ylemmän alle 55°C . Legionella-bakteerin torjumiseksi lämpötilaa myös nostetaan aika-ajoin, mikäli säiliön lämpötila on pysynyt pitkään alhaisena.

Lämpöpumpun kompressorin ollessa käynnissä, eli lämpöpumpun ollessa toiminnassa, ja keräimen lämpötilan kohotessa noin 20°C maapiirin tulolämpötilaa korkeammaksi, alkaa aurinkokeräin esilämmittämään keruunestettä. Kun kompressori ei ole päällä ja integraalin arvo on alle 0°min , aurinkokeräin yrittää lämmittää taloa, kun sen lämpötila on lämmitysjärjestelmän tavoitelämpötilaa korkeampi. Mikäli integraaliarvo laskee edelleen ja putoaa alle -50°min , lämpöpumppu käynnistyy avustamaan lämmitystä. Jos aurinkokeräin jäähtyy tässä tilassa, se siirtyy esilämmitykseen ja mikäli edelleen jäähtyy, kierto keräimellä katkaistaan. Kun lämmityksen integraaliarvo on yli 0°min ja keräimen lämpötila yli varaajan lämpötilan, koettaa aurinkokeräin lämmittää varaajaa. Aurinkokeräimen toimintaa ohjataan kuitenkin hieman eri tavoin riippuen vuodenajasta.

4.3.1 Aurinkokeräimen ohjaus kesällä

Lämpöpumppu siirtyy keväällä kesäasetuksiin, kun vuorokauden keskilämpötila ylittää 15°C . Kesäaikaan lämmitystä ei ole käytössä, joten sekä lämpöpumppu että aurinkokeräin lämmittävät käyttövettä. Lämmönsiirto aurinkokeräimeltä varaajaan näkyy kuvasta 4.6. Aurinkokeräimen lämpötilan ylittäessä käyttöveden lämpötilan, ohjausyksikkö suorittaa ns. *aurinkotestin* ja kierrättää keräimessä nestettä ilman kuormaa. Mikäli kiertonestee lämpenee tarpeeksi, käynnistyy käyttöveden lämmitys. Lämmitys jatkuu kunnes varaajan lämpötila on 80°C , tai

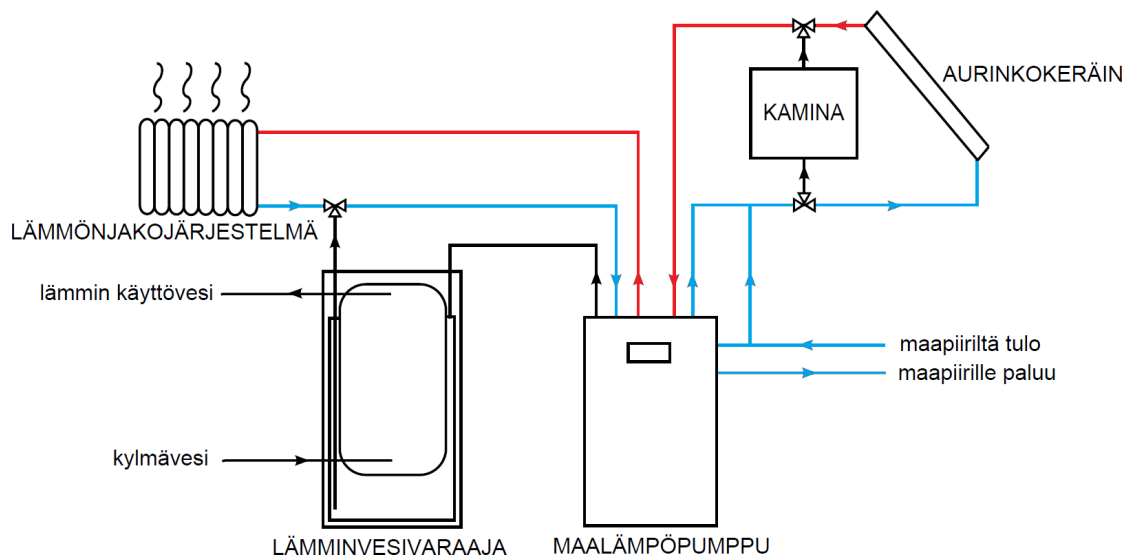
kunnes aurinkokeräin ei enää pysty tuottamaan tarpeeksi lämpöä. Mikäli keruunesteen lämpötila nousee tämän jälkeen yli 100°C, alkaa jäähtytys kierrättämällä keruunestettä maapiirillä. Samalla keräimeltä palaava kiertoneste lämmittää, eli "lataa", maapiiriä.



Kuva 4.6: Lämmitysjärjestelmässä tapahtuvat putkistovirtaukset aurinkokeräimen lämmittäessä varaajaa.

4.3.2 Aurinkokeräimen ohjaus keväällä ja syksyllä

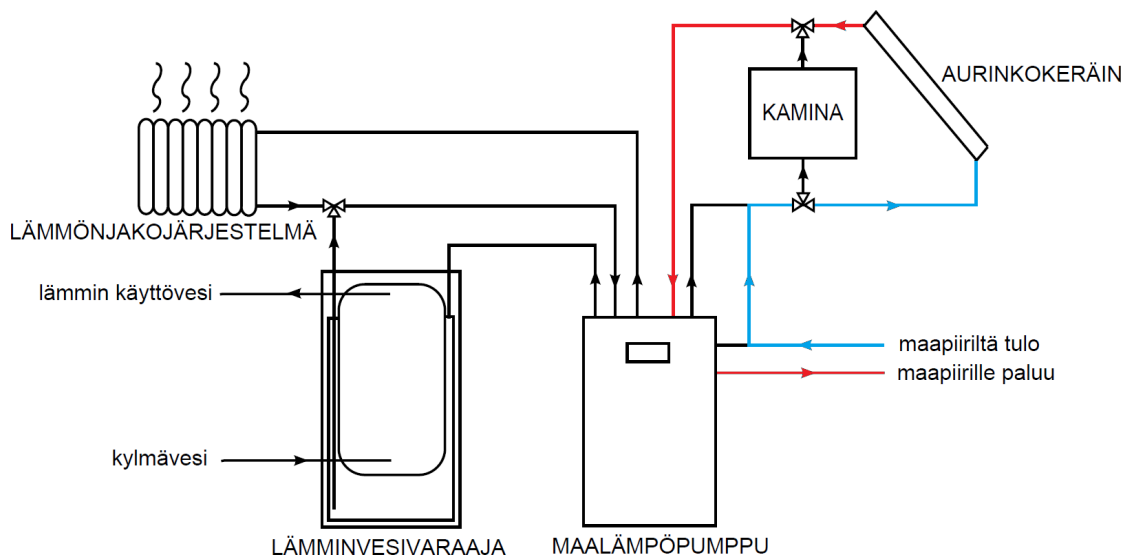
Syksyllä ja keväällä aurinkokeräimen lämpöä käytetään käyttöveden lisäksi lämmitykseen. Kun aurinko yksin ei riitä, esilämmitetään maapiirin keruunestettä kierrättämällä osa siitä aurinkokeräimen kautta ennen lämpöpumppua (kuva 4.7).



Kuva 4.7: Lämmitysjärjestelmässä tapahtuvat putkistovirtaukset aurinkokeräimen esilämmittäessä maapiiriltä saapuvaa lämmönsiirtonestettä, kun lämpö käytetään talon lämmitykseen. Lämpö voidaan siirtää lämmönjakojärjestelmän sijaan myös lämminvesivaraajaan

4.3.3 Aurinkokeräimen ohjaus talvella

Talvella aurinkokeräin joko esilämmittää keruunestettä tai lataa maapiiriä. Ohjausjärjestelmä toimii talviasetuksin edellisen vuorokauden keskilämpötilan ollessa 0°C tai vähemmän. Maapiirin latauksen yhteydessä käytössä olevat putkistot löytyvät kuvasta 4.8.



Kuva 4.8: Lämmitysjärjestelmässä tapahtuvat putkistovirtaukset aurinkokeräimen ladatessa maapiiriä

4.3.4 Kaminan ohjaus

Aurinkokeräin ja kamina on yhdistetty rinnan samaan putkipiiriin käsikäyttöisesti säädettävillä kolmitieventtiileillä, jolloin samanaikaisesti voi käytössä olla vain joko kamina tai keräin. Lämpöpumpun ohjausyksikkö ei tunnista kaminaa erikseen, vaan pitää tätä aurinkokeräimenä. Kaminan tulo- ja lähtöputkiin on myös asennettu omat lämpötila-anturit, jotka kytetään päälle aurinkokeräinten vastaavien sijaan.

Ohjausjärjestelmän heikkous on kaminan käyttö talviaikaan, sillä kaminan lämmöllä olisi mahdollista lämmittää suoraan lämminvesivaraajaa, tai lämmitysjärjestelmää, mutta talviasetukset eivät tätä salli. Suurin hyöty kaminan käytöstä saataisiin juuri kovimmilla pakkasilla, jolloin lisävastusten päälle kytkeytyminen on todennäköisintä. Talviasetuksiin siirtymisen ulkolämpötila-arvoa, kuten muitakin asetusten lämpötilojen raja-arvoja on kuitenkin mahdollista säätää ja mikäli järjestelmä saadaan talvella toimimaan kevät/syksy asetuksin, saadaan kaminan käytöstä suurempi hyöty irti.

5. Materiaalit ja menetelmät

5.1 Järjestelmien monitorointi ja tiedonkeruu

Tiedonkeruu suoritettiin kahden tietokoneen avulla, joille kerättiin minuutin välein keskiarvoistettua dataa, joka tallennettiin vuorokausittain. Yhdelle tietokoneelle kerätään lämpötila- ja virtausdataa aurinkokeräinen ohjaukseen tarkoitettulla *Resol M* -ohjausyksiköllä. Toinen tietokone kerää ainoastaan auringonsäteilyn intensiteetin arvoja.

Mittauksissa käytettävä aikajärjestelmä päätettiin pitää yhtenäisenä Suomen virallisen ajan kanssa, joka helpottaa omistajan mahdollista kirjanpitoa kamunan käytöstä. Mikäli aurinkokeräimen toimintaa haluttaisiin vertailla muiden vastaavien järjestelmien kanssa olisi kannattavampaa käyttää aurinkoaikaa¹.

5.1.1 Lämpötila- ja virtausmittaukset

Ulkolämpötilan mittaukseen aurinkokeräinten yhteydessä Suomen Standardisoimisliitto (SFS) ohjeistaa lämpötila-anturin asennuksen keräimen keskikorkeudelle ja alle 10 m päähän keräimestä. Anturin on myös oltava vähintään 1 m korkeudella alapuolella olevasta lämpenevästä pinnasta ja valkoisen varjostavan kopan sisällä [1]. Tätä varten rakennettiin kuvassa 5.1 näkyvä anturikotelo, joka asennettiin katolle keräinten viereen. Kotelon varren pituus on noin 1 m ja se on kiinnitetty aurinkokeräimen alaosaan sijaitsevaan keräinten kiinnityspalkkiin.

Aurinkokeräimessä kiertävän nesteen lämpötiloja mitataan yleensä joko keräimessä valmiina olevista anturipaikoista tai keräimen tulo- ja lähtöputkista [29]. Putkissa tapahtuvien virtausten lämpötilojen mittauksiin käytetään anturitaskuja, joiden avulla anturi saadaan lähelle putken keskikohtaa, jossa virtausnopeus, ja tästä johtuen myös lämmönjohtavuus anturiin, on suurimmillaan [17]. Esi-merkkikohteen tapauksessa aurinkokeräimessä valmiina olevat anturipaikat ovat lämpöpumpun ohjausjärjestelmän käytössä. Mittauslaitteistoa varten on

¹Aurinkoaika määritellään pituuspiirin mukaan, niin että aurinko on aina korkeimmillaan kello 12.00 [12]

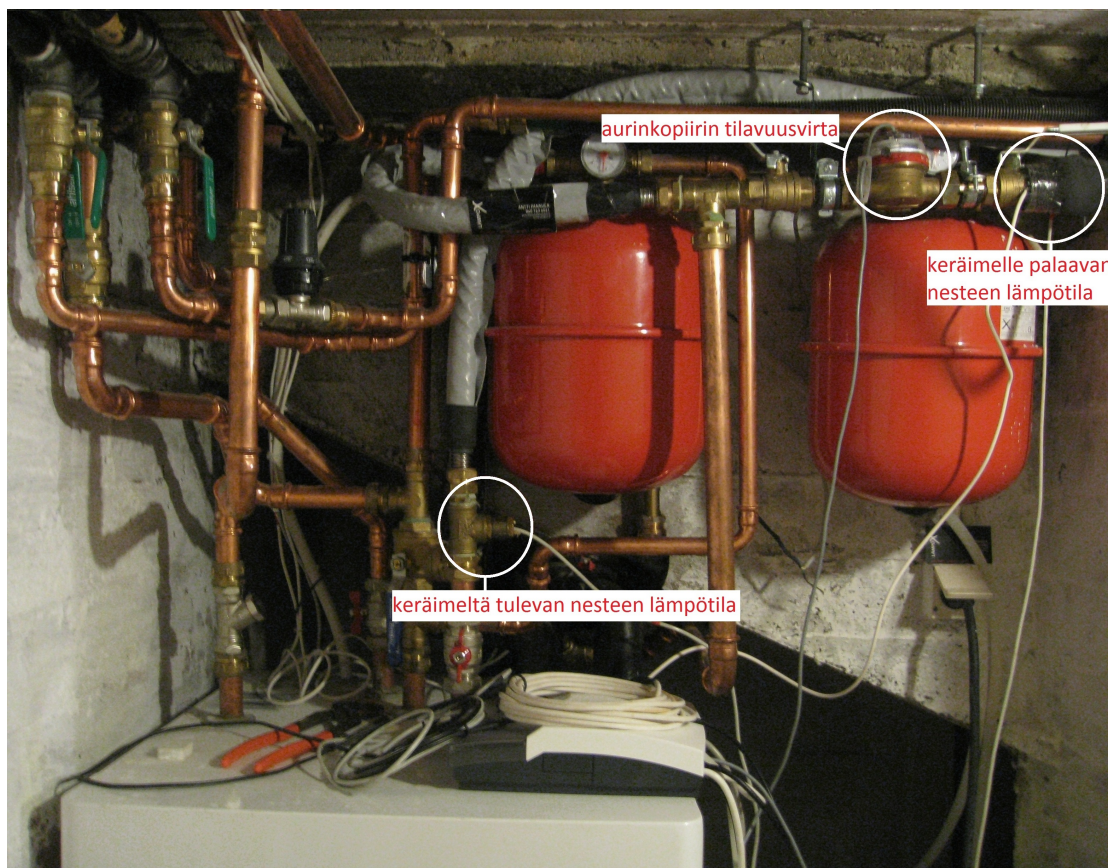


Kuva 5.1: Ulkolämpötilamittauksia varten rakennettu anturikotelo.

kuitenkin asennettu omat, kuvassa 5.2 näkyvät, anturitaskut aurinkokeräinputkiston loppupäähän kellariin lämpöpumppukoneiston lähelle. Aurinkokeräinten ja kellarin välillä on kuitenkin putkistohäviöitä. Tämän vuoksi mitattu aurinkokeräimeltä tuleva lämpötila on siis pienempi, kuin lähempänä keräintä. Mitattu aurinkokeräimelle menevä lämpötila taas on suurempi, kuin lähempänä keräintä.

Maapiirin meno- ja paluuputkissa ei ollut asennettuja anturitaskuja, joten lämpötila-anturit sijoitettiin putkien ja näiden ympärillä olevien eristeiden väliin. Tällöin lämpötila ei vastaa niin hyvin todellista virtauslämpötilaa ja lämpötilojen muutoksessa on viive. Ulkolämpötilan mittausanturin johto kulkee talon rakenteiden välistä katolle ja lisäksi yksi anturi on sijoitettu indikoimaan sarjaan kytketyistä lämminvesivaraajista jälkimmäisen lämpötilaa. Myöskään varaajassa ei ollut anturitaskua käytettävänä, joten anturi on työnnetty varaajan eristeen läpi ulomman säiliön ulkopinnalle hieman säiliön keskikohdan alapuolelle. Varaajan lämpötila-anturi asennettiin kuitenkin vasta tässä työssä

käsiteltävän aikajakson jälkeen, joten anturin antamaa dataa ei ole analysoitu. Kaikkien lämpötila- ja virtaama-antureiden suuntaa antavat sijainnit ovat nähtävillä kuvassa 4.4.



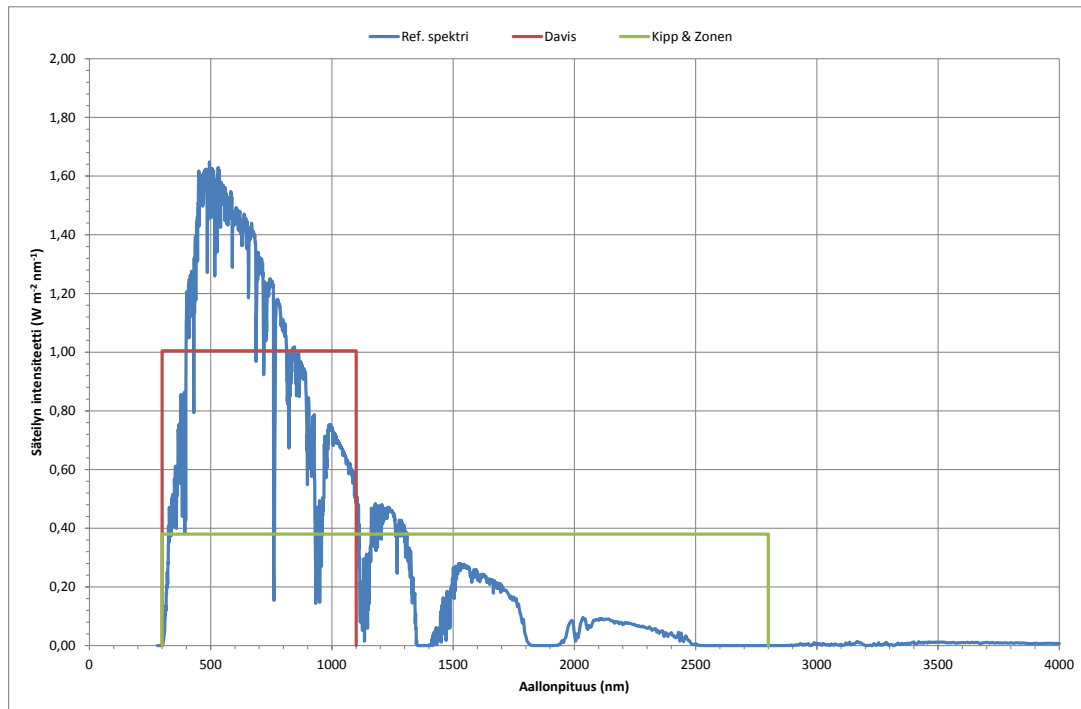
Kuva 5.2: Kellarissa sijaitsevan lämpöpumppulaitteiston yläpuolella sijaitsevat tiedonkeruujärjestelmän putkistomittaukset. Kuvan ulkopuoliset anturit mitaavat lisäksi maapiirin meno- ja paluuputkien lämpötiloja, lämminvesisäiliön lämpötilaa ja ulkolämpötilaa

5.1.2 Auringonsäteilyn mittaaminen

Keräimen hyötysuhteen määrittämiseksi tarvitaan tuotetun lämmön lisäksi auringonsäteilyn intensiteetti, jotta tuotettua lämpöä voidaan verrata saatavilla olevaan energiamäärään.

Aurinkosähkökennojen tuotto on verrannollinen säteilyn määrään ja halvemmän hintaluokan säteilymittarit käyttävät tätä ominaisuutta hyväkseen [16].

Yleisesti aurinkopaneelit kykenevät kuitenkin käyttämään vain osaa auringon säteilyn spektristä ja ongelma toistuu samaan teknologiaan perustuvilla säteilyantureilla. Esimerkiksi markkinoilla olevan Davis-anturin mittausalue on 300 - 1100 nm, kun tarkempaan säteilymittaukseen käytettävän pyranometrinn mittausalue on 300 - 2800 nm. Verrattuna pyranometriin, jää Davis-anturilta mittaamatta säteilyn tehosta 15 %. Mittausalueita on verrattu suhteessa esimerkisppektriin kuvassa 5.3



Kuva 5.3: Davis- ja Kipp & Zonen-säteilyantureilla mitattavat aallonpituudet. Vastaavien mittausalueiden keskimääräisen intensiteetin ilmaisee laatikon korkeus. Referenssispektri on kokonaissäteilylle 37 °kulmassa olevalle tasolle [2]

Pyranometrinn kalibrointi

Pyranometrinn toiminta perustuu kahden sisäkkäisen puolipallon muotoisen lasikuvun suojissa olevaan mustaan levyyn, joka absorboi auringon säteilyn lämmöksi. Lämpö kulkee lämpövuoston läpi, jolloin vuoston eri puolien lämpötilaero luo jännitteen U_{py} , jota voidaan mitata. Käytettävässä Kipp & Zonen CM11 -pyranometrissä jännite on kokoluokaltaan 0 - 20 mV. Säteilynn

voimakkuus saadaan jakamalla jännite herkkyydellä S , joka on määritelty pyranometrille kalibrointivaiheessa.

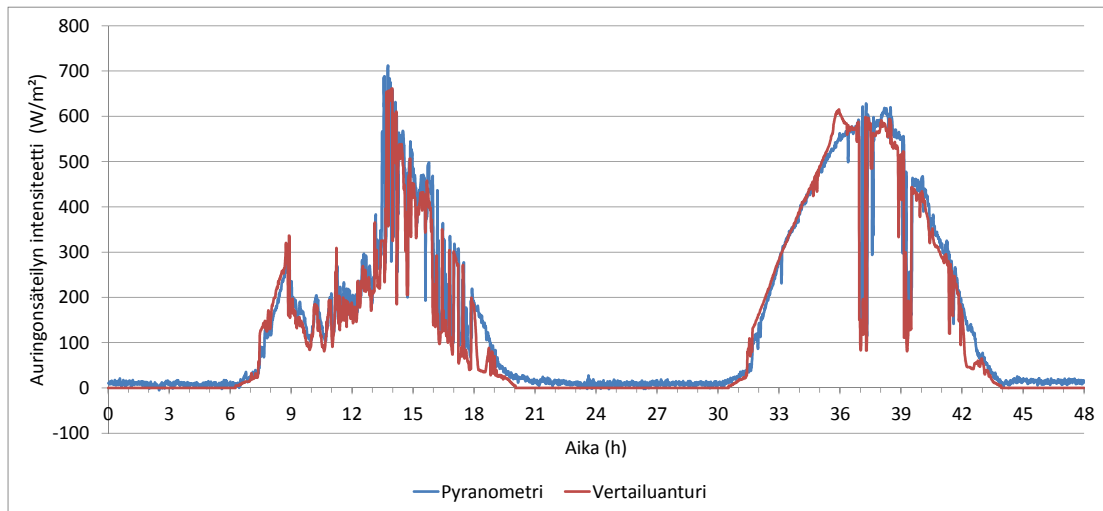
Mittauksissa käytettävää pyranometriä testattiin Jyväskylän yliopiston kemian laitoksen katolla, jolloin mittausdataa pystyttiin vertailemaan samalla katolla sijaitsevan sääaseman tietoihin. Sääaseman käytössä on edellisessä luvussa mainittu, pyranometriä halvempi, Davis -säteilyanturi. Pyranometri asennettiin varjottomaan paikkaan noin 0,5 metriä katon pinnasta ja silmämääräisesti vaakatasoon.

Tehdyissä mittauksissa huomattiin säteilyarvojen olevan yöaikaan negatiivisia, kun säteilyn intensiteetin kuuluisi olla pienimmillään 0 W/m^2 . Pyranometrin käyttöohjeen mukaan poikkeama johtuu sisimmäisen lasikuvun lämpötilan laskusta alle lämpövastuksen lämpötilan. Tämän kerrotaan tapahtuvan helposti yöaikaan sekä kirkkaina päivinä. Käyttöohjeen mukaan poikkeama on yleinen ongelma ja suuruudeltaan noin -5 W/m^2 . Virheen tunnistamiseksi käyttöohje neuvoa asettamaan uloimman lasikuvun päälle alumiinifolion ja tarkkailemalla kuinka paljon alle nollan jännite laskee. Menetelmällä saatu poikkeama, U_{py} , voidaan vähentää jännitelukemista virheen poistamiseksi, jolloin korjattu säteilyvoimakkuus saadaan yhtälöllä

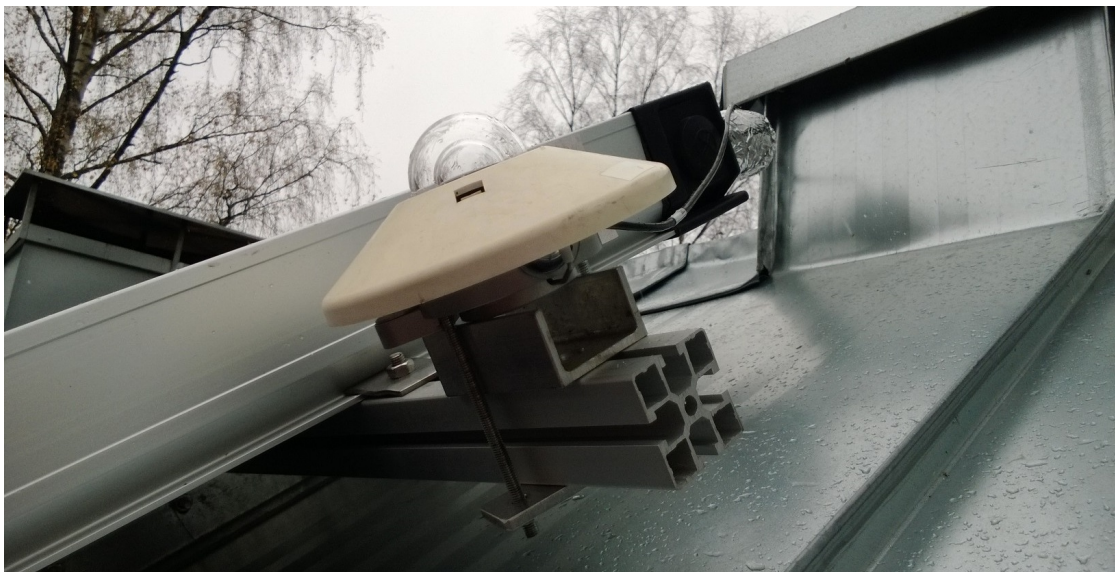
$$U'_{py} = \frac{U_{py} - U_{po}}{S}. \quad (5.1)$$

Alumiinifoliotestillä saatu poikkeama nolasta oli $-0,0003 \text{ V}$, jota vastaava säteilytysmäärä on noin 60 W/m^2 . Mittauksissa saatu poikkeama on siis yli kymmenkertainen ohjekirjan lukuun verrattuna, joten mittauksia rasittaa luultavasti myös jokin toinen, tuntematon virhetekijä. Korjausta käyttämällä kuitenkin myös päivällä pyranometrin antamat lukemat ovat lähempänä vertailuanturin lukuja, kuten nähdään kuvasta 5.5. Hieman eri korkeuksille laskeutuvista pyranometrin arvoista öisin nähdään myös että poikkeama ei ole vakio vaan riippuu luultavimmin ympäröivistä sääolosuhteista. Tiedonkeruun yhteydessä päätettiin käyttää korjattua säteilytysmäärää ja poikkeamalle U_{po} arvoa $0,0003 \text{ V}$. Tiedonkeruujärjestelmä tallentaa kuitenkin myös alkuperäiset jännitelukemat.

Pyranometrin asennus esimerkkikohteen katolle toteutettiin kiinnittämällä se aurinkokeräinten yläkiinnityspalkkiin (kuva 5.1), jolloin pyranometri saatiin samaan kulmaan keräinten kanssa. Pyranometrin ja palkin väliin asetettiin alumiininen korokepala, joka nostaa pyranometrin lasikuvun alaosan keräintänsä. Korokepala myös pitää pyranometrin alaosan paremmin tuuletettuna, jolloin lämpötilaeroja hyödyntävä anturi pysyy ympäröivän ilman kanssa paremmin samassa lämpötilassa.



Kuva 5.4: Pyranometrin ja Davis-vertailuanturin mittaama auringonsäteilyn intensiteetti kahden päivän ajalta, kun pyranometrin jännitearvoista on vähennetty poikkeama U_{p0} arvolla 0,0003 V.



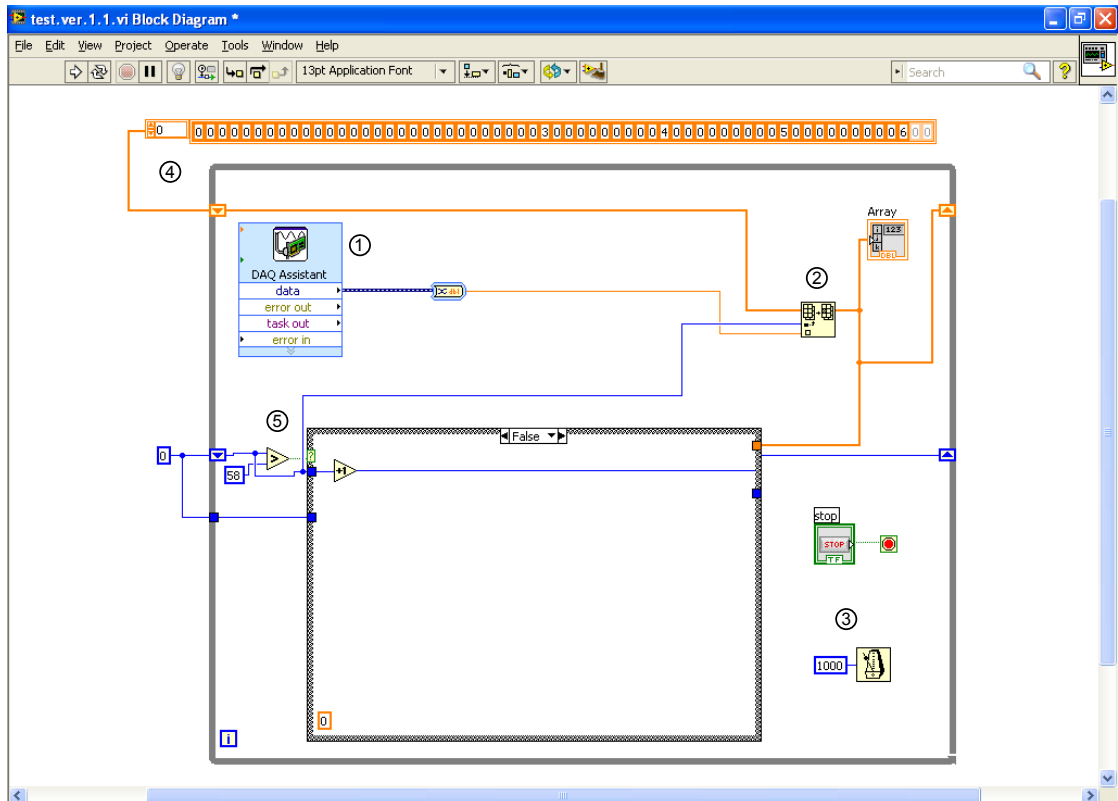
Kuva 5.5: Esimerkkikohteen katolle asennettu pyranometri.

Pyranometrin tiedonkeruu

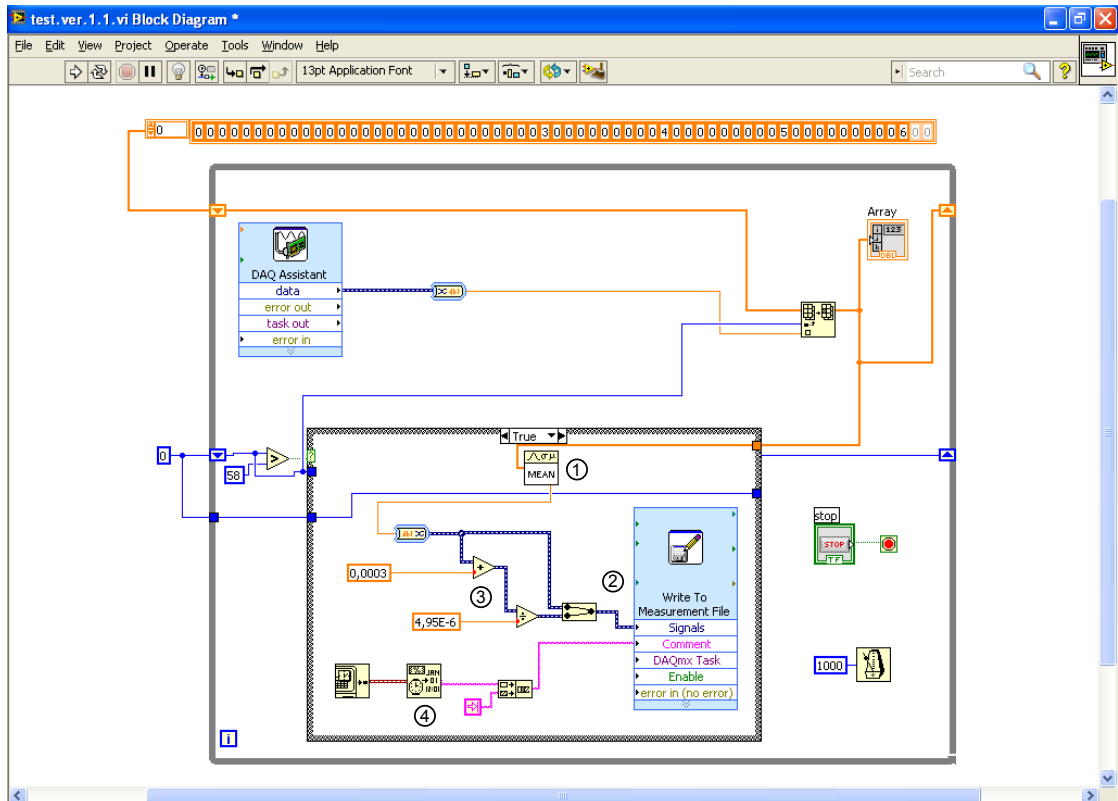
Tiedonkeruu on toteutettu pääosin aurinkokeräinten ohjaukseen tarkoitettulla Resol M -ohjauslaitteella, joka ei kuitenkaan kykene lukemaan pyranometrin jännitearvoja. Auringonsäteilymittauksille tehtiin *Labview*-ohjelmalla oma tiedonkeruusovellus erilliselle tietokoneelle. *Labview* on *National Instruments* -yhtiön graafinen ohjelmointiympäristö, jota käytetään automatisointiin ja tiedonkeruuseen. Tiedonkeruuseen tarvitaan lisälaitteena tiedonkeruukortti, jona toimii *NI myDAQ*. Pyranometri on kytkettynä tiedonkeruukorttiin, joka taas on USB-piuhan kautta yhteydessä tietokoneeseen. *Labview*-ohjelmalla tehty sovellus mittaa pyranometrin antamia jännitearvoja sekunnin välein ja tallentaa minuutin keskiarvot tekstitiedostoon. Jännitearvon yhteydessä tallennetaan myös aikaleima sekä jännitekeskiarvosta ohjelman laskema säteilyn intensiteetti. Tiedostot tallennetaan vuorokausittain ja nimetään päivämäärän mukaan.

Tehdyn tiedonkeruusovelluksen rakenne näkyy kuvista 5.6 ja 5.7. Tiedonkeruukorttiin yhteydessä oleva *DAQ Assistant* hakee pyranometrin jännitelukemia ja tuo ne matriisiin ajastimella säädetyn tuhannen millisekunnin, eli yhden sekunnin, välein. Matriisi määritellään vakiomatriisin avulla 1×60 matriisiksi ja kunkin jännitelukeman oikea paikka matriisissa määritellään ehtolausekkeen avulla. Ehtojärjestelmä hyödyntää *Labview*en *Shift register* -toimintoa, jolla seuraavan mittauksen järjestyslukuun lisätään luku yksi, kunnes summa on 60 ja ehtolauseke toteutuu. Tällöin seuraa kuvan 5.7 mukainen tilanne ja ohjelma laskee saatujen datapisteiden keskiarvon tallentaen sen *.lvm*-tiedostoon². Ohjelma laskee ja tallentaa myös säteilytysvoimakkuuden yhtälöllä (5.1). Lisäksi ohjelma hakee tietokoneen ajan ja tallentaa aikaleiman omaan sarakkeeseensa tallennustiedostoon. Tallentamisen jälkeen laskuri nollaantuu ja matriisi täyttyy uusilla arvoilla, joiden keskiarvon ohjelma tallentaa jälleen minuutin kuluttua.

²*.lvm*-tiedosto on tekstimuotoinen tiedosto, jonka voi avata tekstieditorilla, tai taulukonkäsittelyohjelmalla.



Kuva 5.6: Labview-ohjelman rakenne, kun muodostettu ehtolauseke epätosi: (1) DAQ Assistant, (2) matriisi, (3) ajastin, (4) vakiomatriisi ja (5) ehtolauseke.



Kuva 5.7: Labview-ohjelman rakenne, kun muodostettu ehtolauseke tosi: (1) keskiarvoistaja, (2) tallennus, (3) yhteen- ja jakolaskutoimitus ja (4) aikaleima.

5.2 Tunnusluvut

Energiaomavaraisuutta parantavien ja energiasäästöjä aikaansaavien valintojen tekeminen energiantuotantoon liittyvän tiedon pohjalta edellyttää vertailukelpoisia tunnuslukuja. Tunnuslukujen, ja yksittäisten mittausten, avulla voidaan myös pitää silmällä laitteiston toimintaa ja havainnoida mahdollisia ongelmatilanteita. Eri tunnuslukuja ja niihin tarvittavia mitattavia suureita on kerätty taulukkoon 5.1.

Aurinkokeräinjärjestelmälle voidaan kohtuullisen yksinkertaisin mittauksin laskea *tuotettu lämpö*, jonka avulla voidaan verrata keräinjärjestelmän tuottoa esimerkiksi eri kuukausien välillä. Jos taas halutaan vertailla aurinkokeräimiä keskenään on laskettava *tuotettu lämpö aurinkokeräinalaa kohden*. Luku ei silti ole täysin vertailukelpoinen, mikäli keräimet eivät sijaitse samassa paikassa samoin asetuksin.

Vertailukelpoisempi tunnusluku ja myös enemmän keräimen toiminnasta kertova luku on *hyötysuhde*, jossa lämmöntuottoa verrataan saatavissa olevaan auringon säteilyenergiaan. Hyötysuhteen laskemista käsiteltiin luvussa 3.2, jossa määriteltiin teoreettinen ja kokeellinen hyötysuhde. Aurinkokeräimen todellista käyttäytymistä ilmaisee paremmin kokeellinen hyötysuhde. Kokeellisesti määritetty hyötysuhde ei kuitenkaan ota huomioon ulkolämpötilan vaikutusta. Teoreettinen hyötysuhde ottaa huomioon ulkolämpötilan vaikutuksen ja vertaamalla teoreettisen ja mitatun hyötysuhteen eroissa tapahtuvia muutoksia voidaan tarkemmin huomioida keräimessä mahdollisesti tapahtuvia muutoksia. Kokeellinen ja teoreettinen hyötysuhde ilmaisevat hyötysuhteen tietyllä ajanhetkellä, mutta päivittäiset kuvaajat tekevät lukujen analysoinnista mielekkäämpää. On myös mahdollista määrittää *päivittäinen hyötysuhde*, jossa verrataan tuotettua lämpöenergiaa koko päivän aikana saatavilla olleeseen säteilyenergiaan. Päivittäisiä hyötysuhdelukuja voidaan edelleen summata pidempien aikajaksojen hyötysuhteiden määrittämiseksi.

Aurinko-osuus tarkoittaa auringolla tuotetun lämpöenergian osuutta rakennuksen kokonaislämmöntuotannosta. Tätä varten pitäisi määrittää joko muilla lämmöntuotantolaitteille tuotettu energiamäärä tai kokonaislämmöntuotanto. Esimerkkikohteen tapauksessa aurinko-osuutta ei laskettu, sillä rakennuksessa käytettävät kamina ja pönttöuuni tekevät mittauksista vaikeita.

Taulukko 5.1: Aurinkokeräinjärjestelmien tunnuslukuja ja niihin tarvittavat suureet

Tunnusluku	Mitattavat suureet
Tuotettu lämpö (kWh tai kWh/m ²)	Tilavuusvirta (l/min tai m ³ /s)
	Tulolämpötila (°C)
	Menolämpötila (°C)
Hyötysuhde (%)	Tilavuusvirta (l/min tai m ³ /s)
	Tulolämpötila (°C)
	Menolämpötila (°C)
	Auringonsäteilyn voimakkuus (W/m ²) (Ulkolämpötila (°C))
Aurinko-osuus (%)	Tilavuusvirta (l/min tai m ³ /s)
	Tulolämpötila (°C)
	Menolämpötila (°C)
	Muu lämmitys (kWh)

5.3 Aineiston analysointi

Mittausdatan läpikäymiseksi kahden tiedonkeruutietokoneen datatiedostot siirrettiin aluksi yhteiseen paikkaan ja kerätty data analysoitiin MATLAB -ohjelmalla, joka on numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelmisto. Ohjelman avulla käytiin läpi sekä pyranometrillä mitatut auringonsäteilyn intensiteetin arvot että RESOL -ohjausyksikön keräämä lämpötila- ja virtausdata. Kaikki tiedonkeruu on asetettu minuutin välein vuorokauden pätkissä, mutta Resol -ohjausyksikön keräämistä tiedostoista puuttui yksittäisiä minuutteja. Vika lienee ohjausyksikön omassa ohjelmoinnissa. Puuttuvat minuutit määriteltiin tyhjiksi ja niiden pienen määrän ansiosta ne eivät vaikuttaneet datan analysointiin.

Tiedonkeruun mittaustietojen perusteella voidaan laskea aurinkokeräimen hetkellinen teho. Tiedonkeruun tallentaessa keskiarvoistettuja arvoja minuutin ajalta, myös laskettu teho on yhden minuutin keskimääräinen teho. Keräimessä lämmönsiirtonesteeseen siirtynyt lämpöteho hetkellä i saadaan määriteltävä yhtälöllä

$$P_{A,i} = \dot{m}_i c_i (T_{2,i} - T_{1,i}), \quad (5.2)$$

missä \dot{m}_i on massavirta kyseisellä ajanhetkellä (kg/s) ja c_i on lämmönsiirtonesteen ominaislämpökapasiteetti. Muuttujat $T_{2,i}$ ja $T_{1,i}$ ovat vastaavasti keräimeltä tulevan ja keräimelle menevän nesteen lämpötilat. Massavirran sijaan voidaan käyttää tiedonkeruujärjestelmän mittaamaa tilavuusvirtaa, jolloin saadaan

$$P_{A,i} = \alpha \dot{V}_i c_i \rho_i (T_{2,i} - T_{1,i}), \quad (5.3)$$

missä α on muunnoskerroin, $0,000016667 \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{l}/\text{min}}$, jolla tilavuusvirran yksiköksi muunnetaan m^3/s , joka on SI-järjestelmän vaatima yksikkö. Muuttuja \dot{V}_i on tilavuusvirta kyseisellä ajanhetkellä (l/min) ja ρ_i on tiheys.

Sekä lämpökapasiteetti että tiheys ovat lämpötilariippuvaisia. Käytetyn lämmönsiirtonesteen valmistaja ei kuitenkaan ole julkaissut lämpötilariippuvuuksia, joten lämpökapasiteetille ja tiheydelle käytettiin toisen valmistajan tarjoamia arvoja [9] suoraan 40 prosentiselle polypropyleeniglykoliliuokselle. Lukuarvot haettiin 20°C välein väliltä $0 - 100^\circ\text{C}$ ja ne on kerätty taulukkoon 5.2. Mittapisteidän ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden arvot määritettiin Matlab-ohjelmalla interpoloimalla lineaarisesti vastaavasta taulukosta. Lämpökapasiteetin määrittämiseen käytettiin aurinkokeräimen meno- ja paluulämpötilojen keskiarvoa kyseisenä ajanhetkenä. Tiheyden määrittämiseen käytettiin keräimelle menevän veden lämpötilaa, jota mittaava lämpötila-anturi sijaitsee tilavuusvirran mittauksen yhteydessä.

Taulukko 5.2: vesi-propyleeniglycoli-seoksen (40 %) ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden arvot eri lämpötiloissa. Taulukko on laadittu lähteen [9] pohjalta.

Lämpötila ($^\circ\text{C}$)	0	20	40	60	80	100
Ominaislämpökapasiteetti ($\text{J}/^\circ\text{C}\cdot\text{kg}$)	3680	3710	3739	3768	3797	3823
Tiheys (kg/m^3)	1048	1045	1040	1035	1028	1022

Hetkellinen teho keräinalayksikköä kohden saadaan jakamalla yhtälö (5.3) keräinten apertuuripinta-alalla A , jolloin saadaan

$$P''_{A,i} = \frac{\alpha \dot{V}_i c_i \rho_i (T_{2,i} - T_{1,i})}{A}. \quad (5.4)$$

Teorettinen teho voidaan laskea kertomalla pyranometrin mittaama säteilyn intensiteetti teoreettisella hyötysuhteella, joka laskettiin yhtälöllä (3.1). Teoreettiselle teholle saadaan näin yhtälö

$$P'_{A,i} = \eta_i I_i. \quad (5.5)$$

Yhtälöitä (5.4) ja (5.5) voidaan käyttää putkihäviöiden arviomiseen olettamalla, että tehojen erotus johtuu putkistohäviöistä. Teholle $P''_{A,i}$ voidaan kirjoittaa

$$P''_{A,i} = \dot{m}_i c_i (T_{2,i} - T_{1,i}). \quad (5.6)$$

Yhtälössä \dot{m}_i on massavirta. Teholle $P'_{A,i}$ voidaan kirjoittaa vastaavasti

$$P'_{A,i} = \dot{m}_i c_i (T'_{2,i} - T'_{1,i}), \quad (5.7)$$

missä $T'_{2,i}$ ja $T'_{1,i}$ ovat vastaavasti aurinkokeräimen meno- ja tulolämpötilat mitattuna putkista keräimen viereltä. Nyt tehojen erotukselle saadaan:

$$P'_{A,i} - P''_{A,i} = \dot{m}_i c_i [(T'_{2,i} - T_{2,i}) + (T_{1,i} - T'_{1,i})]. \quad (5.8)$$

Yhtälöstä (5.8) voidaan laskea lämpötilaero

$$\Delta T_i \equiv \frac{P'_{A,i} - P''_{A,i}}{\dot{m}_i c_i} = (T'_{2,i} - T_{2,i}) + (T_{1,i} - T'_{1,i}), \quad (5.9)$$

missä ΔT_i on lämmönsiirtoputkistoissa aurinkokeräinten ja lämpöpumppukoneiston välillä tapahtuvien lämpötilahäviöiden summa.

Tutkittaessa yhden päivän tuottoa kilowattitunteina, käydään läpi kaikki päivän ajalle lasketut teholumemat. Tuotettu lämpöenergia voidaan päivän ajalta määrittää hetkellisen tehon $P_{A,i}$ avulla yhtälöllä

$$E_p = \beta \sum_{i=1}^n P_{A,i} \Delta t, \quad (5.10)$$

jossa kerroin β on $1/3600000$ kWh/J ja se muuntaa tuloksen kilowattitunneiksi. n on datapisteiden määrä, joka kyseisellä järjestelmällä vastaa vuorokauden minuuttien määrää. Δt on yksittäistä datapistettä vastaava aika, joka on jatkuvasti 60 sekuntia.

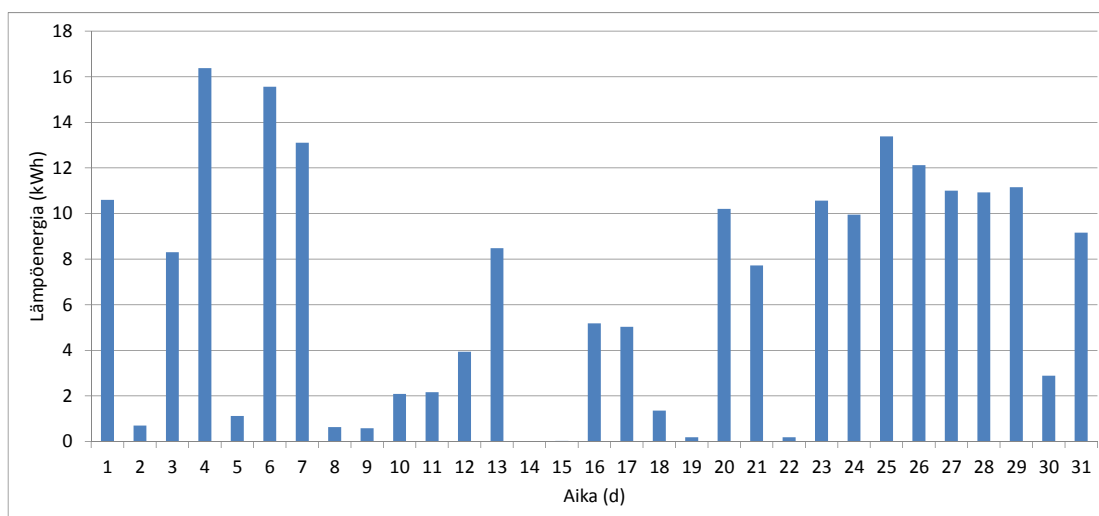
6. Tulokset

Aurinkokeräimen ja järjestelmän toimintaa tarkasteltiin käymällä päivittäisiä arvoja läpi ja tulokset esiteltiin esimerkkipäivien ja esimerkkikuukauden avulla.

Resol -ohjausyksikön kautta toimiva tiedonkeruu saatiin toimimaan heinäkuussa, jolloin esimerkkitalon isäntäperhe oli poissa noin kuukauden. Tänä aikana pystyttiin seuraamaan järjestelmän toimintaa, kun kulutusta ei ole. Lämminvesivaraajan lämpötilan kasvu ei kuitenkaan vastannut tuotettua lämpöenergiaa ja myöhemmin paljastui, että lämminvesivaraajan putket oli asennettu väärinpäin. Järjestelmä siis vei lämmönsiirtonestettä keräimelle varaajaan yläosasta, jossa neste on kuuminta. Lämmönsiirtoneste on tarkoitus viedä keräimelle varaajan viileämmästä alaosasta. Tiedonkeruujärjestelmän datan perusteella talon omistaja kuitenkin pystyi havaitsemaan ongelman. Tässä työssä käsiteltävä aineisto on kerätty putkiliitosten korjaamisen jälkeen.

6.1 Elokuun lämmöntuotanto aurinkokeräimellä

Ensimmäinen kokonainen kuukausi, jolloin tiedonkeruujärjestelmä pyranometriä lukuunottamatta oli käytössä oli elokuu. Aurinkokeräimen päivittäinen tuotto nähdään kuvassa 6.1 ja yhteensä aurinkokeräin tuotti elokuussa 200 kWh lämpöenergiaa. Luvussa 2.3 arvioidusta elokuun lämmöntarpeesta tämä on hie-man alle puolet. Mikäli dataa olisi pidemmältä ajalta oli mielekkäämpää laskea kuukausittaiset lämmöntuotot, jolloin eri kuukausia on mahdollista verrata. Päivittäisten lämmöntuottolukemien suuresta vaihtelusta voidaan kuitenkin nähdä sääolosuhteiden merkitys lämmöntuottoon.



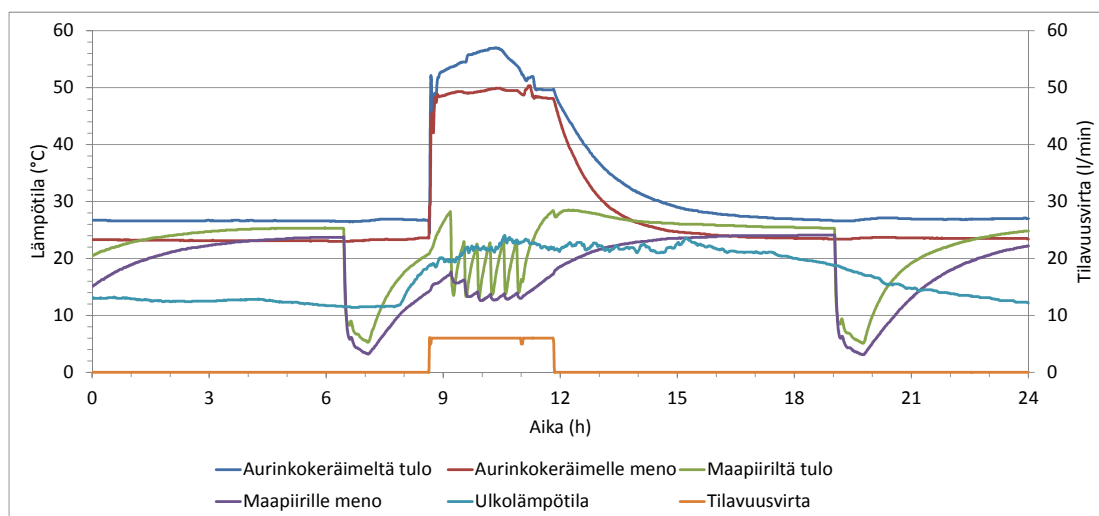
Kuva 6.1: Aurinkokeräimen lämmöntuotto päivittäin elokuussa 2013

6.2 Suora lämmitys aurinkokeräimellä

Analysoitavan datan joukossa on vain harvoja aurinkoisia päiviä, joilta on tiedossa myös pyranometrin lukemat, sillä pyranometri asennettiin esimerkkikohteen katolle vasta kesän loputtua syyskuun 13. päivää.

Syyskuun 14. päivä aurinkokeräin tuotti lämpöä loppukesän päivistä pisimmän aikajakson. Kuvasta 6.2 nähdään, että aurinkokeräin kytkeytyi päälle noin kello 8:40, jolloin tilavuusvirta alkaa saada arvoja. Itään suunnattujen keräinten ansiosta aurinkokeräimet alkavat tuottaa lämpöä aikaisin, mutta tuotto loppuu jo hieman ennen kahtatoista. Tarkasteltavana päivänä lämpöpumppu on käynnissä kerran aamulla ja kerran illalla, joka nähdään maapiirin lämpötilojen laskusta. Lämmityksen jälkeen maapiirin lämpötilojen nähdään hiljalleen nousevan, joka johtuu putkien lämpötilojen tasaantumisesta lähemmäksi kellarin lämpötilaa. Maapiirin lämpötilojen nähdään sahaavan aurinkokeräimen ollessa päällä, mutta tälle käyttäytymiselle ei löydetty selitystä. Asunnon omistajan mukaan lämpöpumppu ei kuitenkaan ollut käytössä.

Auringonsäteilyn intensiteetti näkyy kuvassa 6.3. Pyranometrin antamien arvojen nähdään heittelevän vahvasti öisin, jolloin lukeman kuuluisi olla lähellä nollaa. Dataa käsiteltiin määrittämällä todennäköiset yöarvot nollassa mikäli luku on alle 100 W/m^2 ja jokin seuraavista neljästä lukemasta on vähemmän kuin -10 W/m^2 . Erikoinen määritysmenetelmä löydettiin kokeellisesti tutkimalla arvojen vaihtelua. Menetelmän todettiin toimivan paremmin kuin testatut keskiarvoistamiseen perustuvat menetelmät. Todennäköisten yöarvojen poistamisen

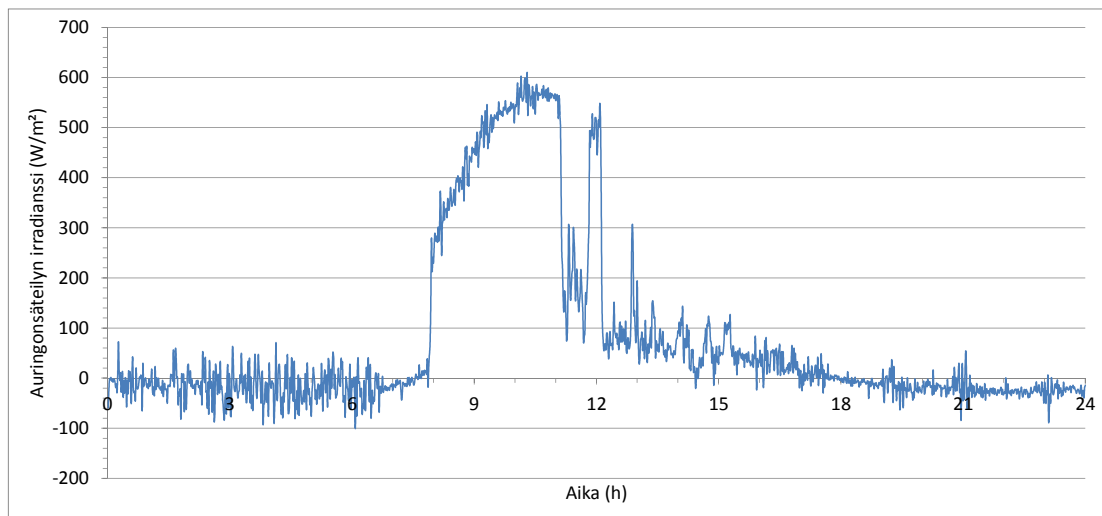


Kuva 6.2: Lämpötila- ja virtaamadata 14. syyskuuta 2013

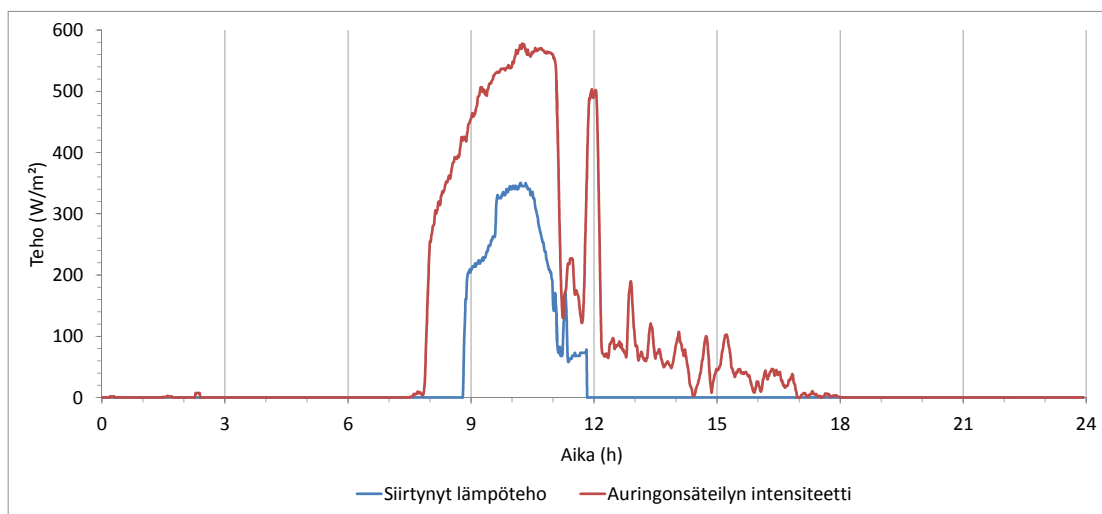
jälkeen dataa tasoitettiin liukuvan keskivaron avulla laskemalla jokaiselle arvolle keskiarvo sitä ympäröivien kuuden luvun kanssa. Edellämainituin keinoin tasoitettu säteilytysvoimakkuuskäyrä nähdään kuvassa 6.4, jossa on mukana myös aurinkokeräinten teho keräinpinta-alayksikköä kohden.

Kuva 6.4 näyttää yhtälöllä (5.4) lasketun aurinkokeräinten tehon ja aurin-gonsäteilyn intensiteetin. Päivittäinen hyötysuhde keräinjärjestelmälle vastaa kuvassa käyrien alle jäävien pinta-alojen suhdetta, joka kyseisenä päivänä oli 0,33. Aurinkokeräinten tuottama lämpö kokonaisuudessaan päivän aikana oli 5,5 kWh, ja se saatiin yhtälöllä (5.10).

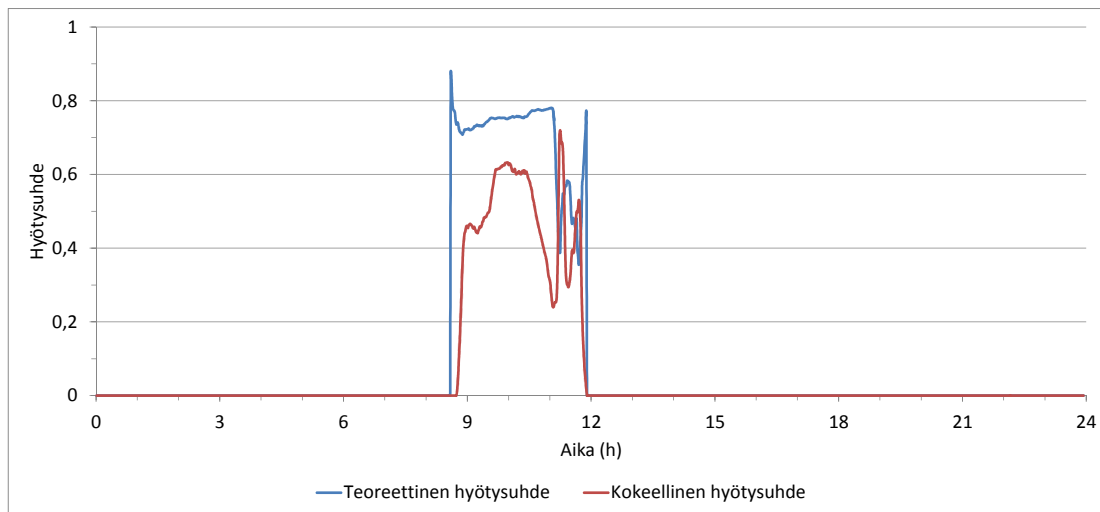
Aurinkokeräimelle määriteltiin teoreettinen hyötysuhde yhtälöllä (3.1) ja mittaustuloksista laskettava hyötysuhde yhtälöllä (3.2). Molemmat hyötysuhdekäyrät esimerkkipäivältä on piirretty kuvaan 6.5, josta nähdään teoreettisen hyötysuhde-olevan korkeampi. Näin kuuluukin olla, sillä teoreettisessa hyötysuhteessa ei ole mukana lämpöhäviöitä putkistoissa. Häviöiden suuruutta arvoitiin yhtälöllä (5.9), jonka tulokset näkyvät kuvassa 6.6. Nähdään että keräimen toimiessa tasaisesti on lämpötilaero noin 2°C. Muilta päiviltä saadut tulokset olivat samaa suuruusluokkaa. Voidaan siis arvoida että keräinneste viilenee meno- ja paluuputkistoissa yhteensä noin 1 - 3°C, kun aurinkokeräin lämmittää vesivaraajaa.



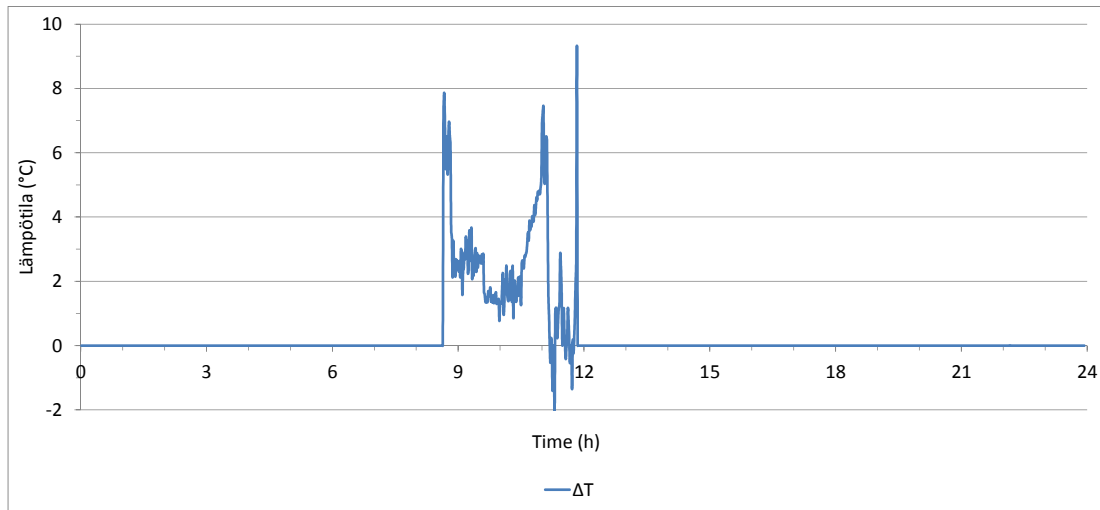
Kuva 6.3: Pyranometriltä kerätty data 14. syyskuuta 2013.



Kuva 6.4: Auringonsäteilyn intensiteetti ja keräimeltä siirtynyt lämpöteho pinta-alayksikköä kohden 14. syyskuuta 2013.



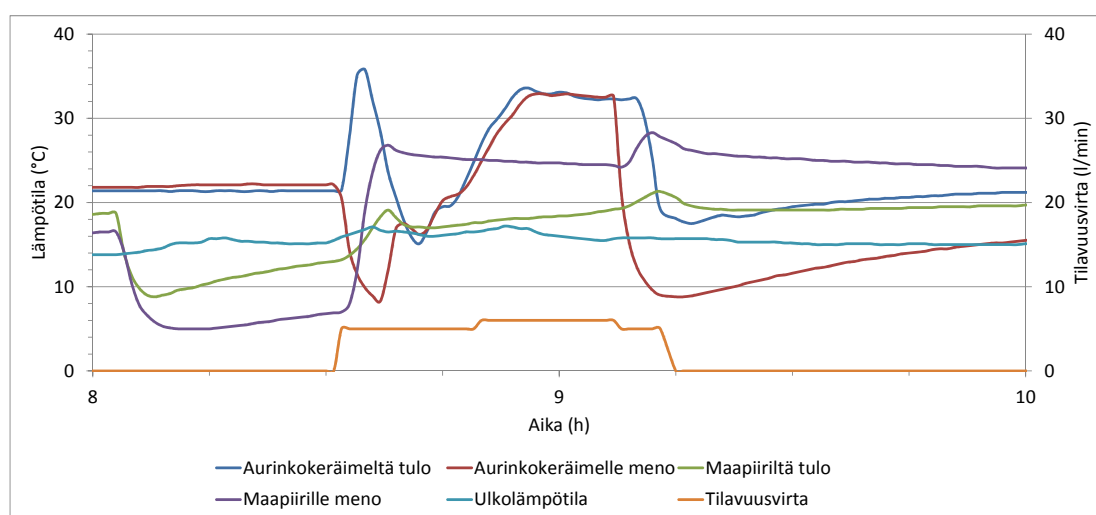
Kuva 6.5: Aurinkokeräimen teoreettinen ja mitattu hyötysuhde 14. syyskuuta 2013.



Kuva 6.6: Teoreettisen- ja mitatun tehon erotusta vastaava lämpötilaero 14. syyskuuta 2013.

6.3 Maapiirin lataus aurinkokeräimellä

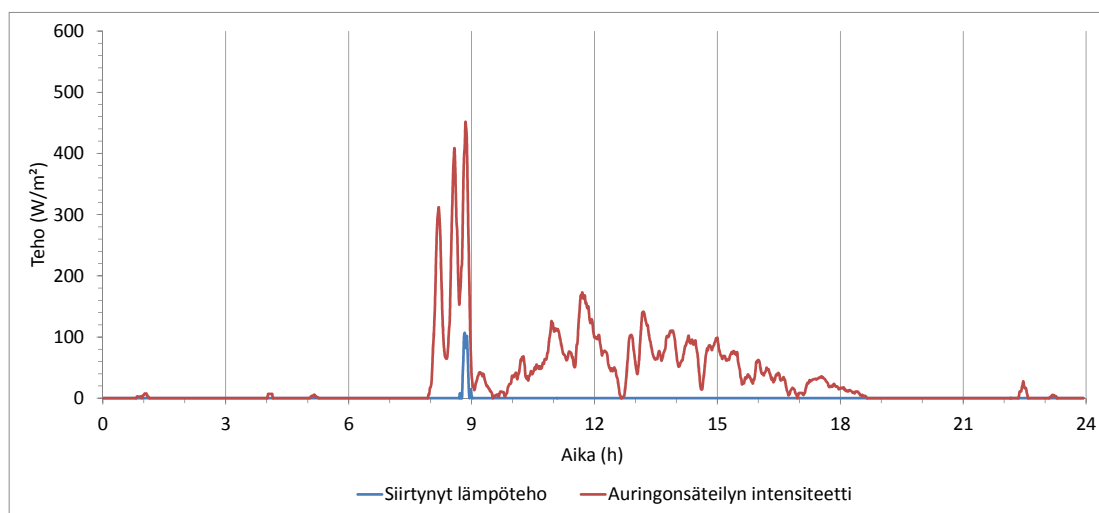
Kuvan 6.7 avulla voidaan tarkastella järjestelmän käyttäytymistä maapiirin latauksen yhteydessä. Kuvaajan alussa maapiirin lämpötilat ovat tasaantumassa huoneen lämpötilaan edellisestä lämmityskerrasta. Vähän kahdeksan jälkeen aurinkopiirissä alkaa virtaus ja aurinkopiirin kiertoneste alkaa kiertää maapiirissä. Aurinkokeräin lämmittää maapiiriä, kunnes keräimeltä tulevan nesteen lämpötila alkaa olla yhtä suuri kuin maapiiristä keräimelle menevän. Tämän jälkeen kierto maapiirissä lakkaa ja systeemi kierrättää keräinnestettä ainoastaan keräinpiirissä. Maapiirin lämmitys aurinkokeräimellä alkaa uudelleen noin kello 9:07, jonka jälkeen kierto aurinkokeräimellä ja maapiirissä lakkaa kello 9:15. Tämän jälkeen nähdään ainoastaan putkien lämpötilojen tasaantumista kellarin lämpötilaan.



Kuva 6.7: Ote lämpötila- ja virtaamadatasta 18. syyskuuta 2013, jolloin aurinkokeräin lämmitti maapiiriä.

Auringonsäteilyn intensiteetti ja tuotettu teho tarkasteltavana päivänä nähdään kuvassa 6.8. Tällöin aurinkokeräin tuotti 1,1 kWh ja päivän kokonaishyötysuhde oli 0,002.

Muiden tarkasteluiden, kuten hetkellisen hyötysuhteen määrittäminen, ei ollut mielekästä maapiirin latauksen yhteydessä. Lämmitykset kestivät vain lyhyen hetken, jolloin järjestelmä ei ehtinyt toimia tasaisesti analysointia varten. Luultavasti maapiiriltä tuleva neste on aina niin kylmää että aurinkokeräin kykenee lämmittämään sitä vain jaksoittain. Tilavuusvirran pienentäminen muuttaisi tilanteen.



Kuva 6.8: Auringonsäteilyn intensiteetti ja tuotettu lämpöteho 18. syyskuuta 2013, jolloin aurinkokeräin lämmitti maapiiriä.

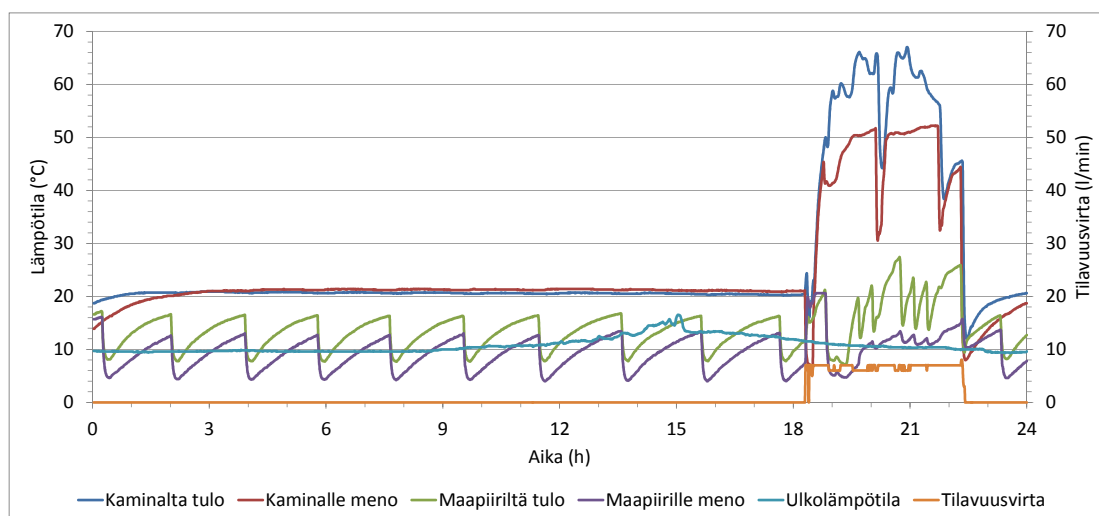
6.4 Esilämmitys

Kerätty data käytiin läpi kesän ja alkusyksyn ajalta, jolloin ei nähty viitteitä esilämmityksestä. Esilämmitystoiminnon pitäisi näkyä kerätystä datasta hetkenä, jolloin aurinkokeräimellä kiertää keruuneste lämpöpumpun samanaikaisesti työntäessä kylmää lämmönsiirtonestettä maapiiriin.

6.5 Kaminan käyttötesti

Tarkasteltavan kohteen omistaja teki kaminalle useita käyttötestejä ja lokakuun 6. päivä tehdyn testin lämpötila- ja tilavuusvirtatiedot näkyvät kuvassa 6.9. Polttopuina käytettiin kuivaa koivua ja puiden massaksi mitattiin 8 kg. Sytytyksen jälkeen kaminassa pidettiin tasaisesti tulta lisäämällä puita aina ennen tulen hiipumista.

Kuvasta 6.9 nähdään, että päivällä aurinkokeräin ei ole kyennyt tuottamaan lämpöä. Maapiirin lämpötiloista nähdään lämpöpumpun olleen käytössä parin tunnin välein ulkolämpötilan ollessa keskimäärin noin 10 °C. Kaminan lämmityskäyttö määritellään alkavaksi hetkestä, jolloin virtauksen nähdään käynnistyvän ja loppuvaksi hetkestä, jolloin virtaus lakkaa. Kamina tuotti lämpöenergiaa siis noin kello 18:20 - 22:20. Kaminan korkeiden tulo- ja menolämpötilojen perusteella tiedetään, että lämpö varastoituu pääsääntöisesti varaajaan. Lämpötiloissa



Kuva 6.9: Lämpötila- ja virtaamadata 6. lokakuuta 2013, jolloin kaminalle on suoritettu lämmitystesti.

nähdään kuitenkin kaksi piikkiä alaspäin lämmityksen aikana. Tuolloin lämpöä on käytetty integraalilaskennan käskemänä talon lämmittämiseen, jolloin kaminan kautta on kierrätetty lämpöpattereissa kiertävää viileämpää lämmönsiirtonestettä.

Kaminan teho ja tuotettu lämpöenergia voidaan laskea samoin menetelmin kuin aurinkokeräimillä. Neljän tunnin aikana keskimääräinen lämmönsiirtonestettä lämmittävä teho oli 4,3 kW, kun kaminalle ilmoitettu maksimiteho on 15 kW. Kaminaa olisi siis luultavasti mahdollista lämmittää suuremmalla teholla. Kaminasta lämmönsiirtonesteeseen siirtynyt lämpöenergia oli 17,2 kWh. Koivun lämpöarvo on 4,15 kWh/kg (taulukko 3.1) ja yhtälöllä (3.5) laskettu teoreettinen tuotto kaminan hyötysuhteen ollessa 55,7 % on 18,5 kWh. Myös kaminan tapauksessa mitattu tuotto oli pienempi kuin teoreettinen tuotto, jossa ei ole huomioitu putkistohäviöitä. Kaminan tapauksessa lämmönsiirtoputkisto kuitenkin kulkee koko pituudeltaan talon sisällä näin lämmittäen ainoastaan sisäilmaa. Teoreettisessa hyötysuhteessa on mukana myös koko poltetun puun massa, josta osa palaa polton alku- ja loppuvaiheissa jolloin lämpötila ei kuitenkaan ole tarpeeksi korkea lämmitysjärjestelmän käyttöön.

6.6 Kaminan ja aurinkokeräinten tuoton vertailu

Aurinkokeräimet tuottivat elokuussa 200 kWh lämpöenergiaa. Saman tuoton aikaansaamiseksi kaminalla pitäisi polttaa 93 kg kuivaa koivua, joka saataisiin polttamalla 12 päivänä käyttötestissä käytetty 8 kg. Mikäli aurinkokeräimillä ja kaminalla tuotettaisiin joka kuukausi yhteensä 200 kWh lämpöenergiaa, saataisiin kuvassa 2.2 arvioidusta lämmön vuosikulutuksesta 15 %.

Maapiiriirin latausta havaittiin harvoina päiviä ja tällöin tuotto oli yhden kilowatin suuruusluokkaa. Vastaava määrä saataisiin polttamalla noin 0,5 kg kuivaa polttopuuta. Tällöin lämpöenergia voitaisiin kuitenkin käyttää suoraan lämmitykseen, jolloin hyöty olisi noin kuusinkertainen [5].

Mikäli kaminaa käytetään talvikaudella ahkerasti ja kytkentöjä ei haluta joka kerta vaihtaa aurinkokeräimen ja kaminan välillä, saadaan pienellä lisäpuumäärällä korvattua auringosta saatava hyöty. Kesäkaudella sen sijaan kaminaa joutuisi käyttämään joka päivä useita tunteja aurinkokeräimen tuoton saavuttamiseksi. Kesän aikana myös maapiirin lämpötila on pienen kuorman ja luonnollisen palautumisen ansiosta korkeimmillaan, joten maalämpöpumpun lämpökerroin on korkeimmillaan. Pienin hyöty kaminan käytölle on siis kesällä, jolloin luultavasti yläkerran huoneilma myös käytön aikana lämpenisi liikaa. Keväällä ja syksyllä kaminan käyttöä kannattaa välttää aamupäivisin, jolloin aurinkokeräinten lämmöntuotto on todennäköisintä.

7. Pohdinta

Sekä aurinkokeräimelle että kaminalle määritetyt hyötysuhteet tukivat valmistajien ilmoittamia lukemia. Seuranta jatkamalla on mahdollista tarkkailla mahdollisia muutoksia molempien lämmöntuotantolaitteiden hyötysuhteissa. Kaminan tapauksessa pudonnut hyötysuhde voi kieliä esimerkiksi nuohouksen tarpeesta.

Yksi työn tavoitteista oli saada uutta tietoa maapiirin lämmönsiirtonesteen esilämmityksestä aurinkokokeräimillä. Tiedonkeruukauden aikana esilämmitystä ei kuitenkaan havaittu. Tämä saattaa johtua siitä, että lämpöpumppu on yleensä päällä vain lyhyitä aikoja, jolloin ohjausjärjestelmä ei välttämättä ehdi ottaa aurinkokeräintä käyttöön. Kesäkauden aikana ohjausjärjestelmä ei edes yritä esilämmittää maapiirin keruunestettä. Kerätyn datan perusteella esilämmityksen käyttö voisi kuitenkin olla hyödyllistä kesäpäivinä, jolloin aurinkokeräin ei kykene suoraan lämmitykseen ja käyttövesi lämmitetään lämpöpumpulla. Tiedonkeruujärjestelmän jatkoseuranta voi tarjota lisää tietoa esilämmityksen toiminnasta.

Kaminan integroiminen järjestelmään, johon sitä ei lähtökohtaisesti ole tarkoitettu, oli käyttöttestien perusteella onnistunut. Järjestelmän suurin ongelma on kaminan käyttö talvella, jolloin talviasetukset ohjaavat lämpöenergiaa ainoastaan maapiirin lataukseen. Kaminan avulla saavutetaan helposti korkea lämpötila, jolloin lämpöenergia kannattaa käyttää ensisijaisesti suoraan asunnon tai lämminvesivaraajan lämmittämiseen. Lämpöpumpun asetuksista voidaan kuitenkin säätää syksy/kevät -asetukset voimaan, jolloin kaminaa voidaan käyttää optimaalisesti. Suurin hyöty kaminan käytölle on juuri kovimpien pakkasten aikaan, jolloin voidaan välttää lämpöpumpun lisävastusten käyttöä.

Tässä työssä ei ole tutkittu vesikiertoisen kaminan toimintaa suhteessa tavalliseen, ainoastaan huoneilmaa lämmittävään kaminaan. Tavallinen kamina vähentäisi myös lämpöpumpun maapiirilta hakeman lämpöenergian määrää lämmityksen tarvetta vähentämällä. Ellei kyseessä olisi hyvin pieni rakennus, kamina ei kykenisi kuitenkaan lämmittämään kaikkia tiloja, jolloin lämpöpumpun käyntikerrat eivät vähenisi. Vesikiertoisella kaminalla saatetaan myös saavuttaa keskimääräistä kaminaa parempi hyötysuhde.

Maalämpöpumpun ohjausjärjestelmässä on hyvää esimerkiksi se, että läm-

minvesivaraajan lämpötilaa ei nosteta lämpöpumpulla korkealle, jolloin mahdollisuus aurinkoenergian käyttöön kasvaa. Aurinkokeräimen ohjaus tuntuu kuitenkin kankealta ja esimerkiksi luvun 6.2 esimerkkipäivänä lämmöntuotanto loppuu hetkellisen pilvipeitteen aikana. Vastaavassa tilanteessa mahdollisuus aurinkopiirin tilavuusvirran pienentämiseen toisi ohjaukseen joustavuutta. Tällöin pilvipeitteen aikana keräin pysyisi toiminnassa, jonka jälkeen tilavuusvirran nostaminen normaaliksi olisi mahdollista ilman aurinkotestiä.

Anturitaskuissa sijaitsevat lämpötila-anturit antoivat tarkkoja lämpötilalukemia ja niiden avulla laskettuja tunnuslukuja voidaan pitää luotettavina. Putkien pinnoille asennettujen antureiden lukemien avulla ei epätarkkuudesta johtuen voitu laskea lisätuloksia, kuten maaperän lämmöntuottoa. Maapiirin anturit kuitenkin palvelivat tarkoitustaan ja niiden avulla pystyttiin havainnoimaan kulloinkin käytössä ollut lämmitysmoodi. Lämminvesivaraajan lämpötila-anturi asennettiin vasta datan käsittelyn loputtua, mutta tulevaisuudessa sen avulla on mahdollista seurata varaajan lämpötilan muutoksia ja niiden yhteyttä aurinkokeräimen toimintaan. Myös lämminvesivaraajan lämpötilan mittausta on kuitenkin vain suuntaa antava, johtuen anturitaskun puuttumisesta.

Työssä on keskitytty lämmöntuotannon seurantaan ja seuraavaksi olisi hyvä kerätä tietoa myös lämmönkulutuksesta. Lämminvesivaraajalle ja lämmityspiirille meneviin putkiin voidaan lisätä lämpötila-anturit ja samoin varaajan ja lämmityspiirin yhteiseen paluuputkeen voidaan asentaa lämpötila- ja virtaamamittaus. Lisäyksien avulla voidaan selvittää rakennuksen lämmönkulutus ja lisäksi voidaan tarkastella aurinkokeräinten lämmöntuoton osuutta tästä kulutuksesta. Huonelämpötilamittausten avulla voitaisiin tehdä arvioita rakennuksen lämpöhäviöistä.

Lähteet

- [1] SFS-EN 12975-2:en *Thermal solar systems and components. Solar collectors. Part 2: Test methods*. Suomen Standardisoimisliitto, 2006.
- [2] Reference solar spectral irradiance: Air mass 1.5, [online]. <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>, viitattu 02.09.2013.
- [3] Maaperä lämmönlähteenä, [online]. <http://www.sulpu.fi/maapera-lammon-lahteenä>, viitattu 18.07.2013.
- [4] D. Banks. *Introduction to Thermogeology : Ground Source Heating and Cooling*. Wiley, toinen laitos, 2012.
- [5] E. Bertram. Impact of solar heat pump system concepts on seasonal performance - simulation studies. *SHC Task 44 - publications*, 2012.
- [6] G. Boyle. *Energy Systems and Sustainability: Power for a Sustainable Future*. Oxford University Press, ensimmäinen laitos, 2003.
- [7] Y. Çengel. *Thermodynamics and heat transfer*. McGraw-Hill, toinen laitos, 2008.
- [8] C.J. Chen. *Physics of Solar Energy*. Wiley, ensimmäinen laitos, 2011.
- [9] The Dow Chemical Company. A guide to glycols, [online]. <http://www.dow.com/>, viitattu 11.12.2013.
- [10] I. Dincer ja M. Kanoglu. *Refrigeration Systems and Applications*. Oxford University Press, toinen laitos, 2010.
- [11] I. Dincer ja M.A. Rosen. *Thermal Energy Storage : Systems and Applications*. Wiley, toinen laitos, 2010.
- [12] J.A. Duffie ja W.A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, kolmas laitos, 2006.

- [13] B. Erat, V. Erkkilä, T. Löfgren, C. Nyman, S. Peltola, ja H. Suokivi. *Aurinko-opas, aurinkoenergiaa rakennuksiin*. Kustantajat Sarmala Oy, Rakennusalan Kustantajat, 2001.
- [14] S. Furbo. Smart solar tanks for small solar domestic hot water systems. *Solar Energy*, No. 78:269–279, 2005.
- [15] H. Gadd ja S. Werner. Daily heat load variations in Swedish district heating systems. *Applied Energy*, No. 106:47–55, 2013.
- [16] M. Grupp ja M. Balmer. *Time to Shine : Applications of Solar Energy Technology*. Wiley, ensimmäinen laitos, 2012.
- [17] P. Halko. *Teollisuuden mittaustekniikka: Perusmittauksia*. Painatuskeskus, kolmas laitos, 1990.
- [18] Ilmatieteenlaitos. Lämmitystarveluvut, [online]. <http://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>, viitattu 12.10.2013.
- [19] International Energy Agency. Shc task 44 - solar and heat pump systems, [online]. <http://task44.iea-shc.org/>, viitattu 26.12.2013.
- [20] E. Kjellsson. *Solar Collectors Combined with Ground-Source Heat Pumps in Dwellings*. Väitöskirja, Lund University, 2009.
- [21] J. Laitinen. *Pieni suuri energiakirja*. Into Kustannus Oy, 2010.
- [22] P. Leppänen. *Rakennan energiaa säästävän pientalon*. Rakentajain Kustannus, 1994.
- [23] A. Omer. Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 12:344–371, 2008.
- [24] Adato Energia Oy. *Kodin Energia Opas*. Motiva Oy, 2012.
- [25] Motiva Oy. *Pientalon lämmitysjärjestelmät*. Motiva Oy, 2012.
- [26] Motiva Oy. Matalaenergiatalon määritelmiä, [online]. http://www.motiva.fi/rakentaminen/millainen_on_energiatehokas_pientalo/matalaenergiatalon_maaritelmia, viitattu 18.06.2013.
- [27] Motiva Oy. Hanki hallitusti maalampojarjestelma, [online]. http://www.motiva.fi/files/4764/Hanki_hallitusti_maalampojarjestelma.pdf, viitattu 18.07.2013.

- [28] C.-H. Park. Ground thermal conductivity for (ground source heat pumps) gshps in korea. *Energy*, No. 56:167–174, 2013.
- [29] F. A. Peuser. *Solar thermal systems*. Solarpraxis, ensimmäinen laitos, 2002.
- [30] H. Pirinen. *Pilkeopas omakotitaloille*. Työtehoseura, 1997.
- [31] V. Quaschnig. *Understanding Renewable Energy Systems*. Routledge, 2004.
- [32] M.C. Rodríguez-Hidalgo. Domestic hot water consumption vs. solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank. *Applied Energy*, No. 97:897–906, 2012.
- [33] B. Sørensen. *Renewable energy, It's physics, engineering, environmental impacts, economics planning*. Academic Press, toinen laitos, 2000.
- [34] B. Sørensen. *Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage*. Academic Press, 2007.
- [35] Suomen virallinen tilasto. Energian hankinta ja kulutus, [online]. <http://www.stat.fi/til/ehk/tau.html>, viitattu 13.06.2013.
- [36] Suomen virallinen tilasto. Asumisen energiankulutus, [online]. <http://tilastokeskus.fi/til/asen/>, viitattu 28.05.2013.
- [37] Suomen virallinen tilasto. Käsitteet ja määritelmät - asuinrakennusten lämmitysenergian kulutus, [online]. <http://www.stat.fi/meta/kas/asuinrakennuste.html>, viitattu 28.05.2013.
- [38] VTT. Passiivitalo - energian kulutus, [online]. http://passiivitalo.vtt.fi/energian_kulutus.html, viitattu 18.06.2013.
- [39] Ympäristöministeriö. Euroopan unionin ilmastopolitiikka, [online]. http://www.ymparisto.fi/FI-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastomuutoksen_hillitseminen/Euroopan_unionin_ilmastopolitiikka, Viitattu 02.12.2013.