



Lämmityksen hybridijärjestelmät

Jere Koivuniemi

OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2023

Talotekniikan koulutusohjelma
LVI-tekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-talotekniikka

KOIVUNIEMI, JERE:
Lämmityksen hybridijärjestelmät

Opinnäytetyö 68 sivua, joista liitteitä 8 sivua
Maaliskuu 2023

Kiinteistöjen energiatehokkuutta tulee kehittää jatkuvasti. Tätä kehitystä pyritään hallitsemaan lakien ja EU-direktiivien perusteella. LVI-talotekniikalla on suuri vaikutus kiinteistön energiatehokkuuteen. Sen avulla voidaan hyödyntää uusiutuvia energialähteitä hyvillä hyötysuhteilla sekä uudelleen jo tuotettua energiaa lämmöntalteenottojen avulla.

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Rejlers Rakentaminen Oy. Työn tavoitteena oli laatia suunnittelijoille teknillinen opas, jossa kerrotaan lämmityksen hybridijärjestelmien teknillisestä toiminnasta ja sen perusteella niiden eri kytkentävaihtoehtoja. Tutkimus toteutettiin kirjallisuutta ja Rejlersiltä saatujen todellisten kohteiden kytkentäkaavioita hyödyntäen.

Opinnäytetyössä tärkeänä näkökulmana pidettiin sitä, miten kaikki saatavilla oleva energia pystyttäisiin hyödyntämään kiinteistöjen ja käyttöveden lämmityksessä. Energiatehokkuus ja tulevaisuudessa hybridijärjestelmien todennäköinen lisääntyminen oli pääsyy saatuaan toimeksiantoon.

Opinnäytetyössä kerrotaan teknisesti kolmesta eri lämmityksen hybridijärjestelmästä: maa- ja aurinkolämmöstä, jäteveden lämmöntalteenotosta ja maalämmöstä, sekä maa- ja lauhdelämmöstä. Näissä jokaisessa pääasiallinen energiantuottotapa on maalämpö.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree programme in Building Services Engineering
HVAC Systems

KOIVUNIEMI, JERE:
Hybrid heating systems

Bachelor's thesis 68 pages, appendices 8 pages
March 2023

The energy efficiency of buildings must be continuously improved. This development is being managed on the basis of laws and EU directives. HVAC technology has a major impact on the energy efficiency of the property. It will make use of renewable energy sources through good efficiency and re-use of energy already produced through heat recovery.

The thesis is commissioned by Rejlers Construction Ltd. The aim of the thesis was to prepare a technical guide for designers, which explains the technical operation of hybrid heating systems and their different switching options. The study was carried out using literature and switching diagrams for real objects from Rejlers.

An important aspect of the thesis was how all available energy could be utilised in heating properties and domestic water. Energy efficiency and the likely adaptation of hybrid systems in the future was the main reason for the mandate received.

The thesis provides technical information on three different hybrid heating systems: geothermal heat and solar heat. Sewage heat recovery and geothermal heat. Geothermal heat and condensate heat. In each of these, the main means of generating energy is geothermal heat.

Key words: Building services engineering, HVAC, hybrid systems

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	MAALÄMPÖ	9
	2.1 Kylmäaineen kiertoprosessi	10
	2.1.1 Teoriassa.....	10
	2.1.2 Käytännössä.....	14
	2.2 Maalämpöpumpun toimintaperiaate	16
	2.3 Maalämpöpumpun lämmönkeruupiirin lämmönlähteet.....	18
	2.3.1 Vesistö.....	18
	2.3.2 Energiakaivo.....	20
	2.3.3 Maaperä	23
3	MAAVIILEÄ.....	27
4	AURINKOLÄMPÖ.....	29
	4.1 Auringon säteily.....	29
	4.2 Auringon säteily Suomessa.....	29
	4.3 Aurinkolämmön aktiivinen hyödyntäminen	30
	4.3.1 Tasokeräin.....	30
	4.3.2 Tyhjiöputkikeräin.....	31
	4.3.3 Aurinkokeräinten hyötysuhde	33
	4.3.4 Aurinkopaneeli.....	34
	4.4 Aurinkoenergian keruun parantaminen	36
5	JÄTEVEDEN LÄMMÖNTALTEENOTTO	39
	5.1 Jäteveden energiamäärä	39
	5.2 Jäteveden lämmöntalteenoton rajoitukset.....	40
	5.3 Ecowec-hybridivaihdin	41
	5.3.1 Tuottotaulukko	41
	5.3.2 Passiivinen LTO-kytkentä.....	42
	5.3.3 Aktiivinen LTO-kytkentä.....	42
6	LAUHDELÄMPÖ.....	44
	6.1 Lauhdelämpö	44
	6.2 Välillinen ja suora lauhdutus	45
7	MAA- JA AURINKOLÄMMÖN HYBRIDIJÄRJESTELMIEN KYTKENTÄKAAVIOT	47
	7.1 Maa- ja aurinkolämmön kytkentätapa 1	47
	7.2 Maa- ja aurinkolämmön kytkentätapa 2	48
	7.3 Maa- ja aurinkolämmön kytkentätapa 3	49

8	MAALÄMMÖN JA JÄTEVEDEN LÄMMÖNTALTEENOTON HYBRIDIJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄKAAVIO	51
8.1	Ecowec-hybridivaihtimen kytkentä maalämpöjärjestelmään	51
9	MAA- JA LAUHDELÄMMÖN LÄMMÖNTALTEENOTON HYBRIDIJÄRJESTELMIN KYTKENTÄKAAVIOT	53
9.1	Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentätapa 1	53
9.2	Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentätapa 2	54
9.3	Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentätapa 3	55
10	POHDINTA	57
	LÄHTEET	59
	LIITTEET	61
	Liite 1. Maa- ja aurinkolämmön kytkentäkaavio 1	61
	Liite 2. Maa- ja aurinkolämmön kytkentäkaavio 2	62
	Liite 3. Maa- ja aurinkolämmön kytkentäkaavio 3	63
	Liite 4. Ecowec R08-hybridivaihdin tuottotaulukko	64
	Liite 5. Ecowec-hybridivaihtimen ja maalämmön kytkentäkaavio	65
	Liite 6. Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentäkaavio 1	66
	Liite 7. Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentäkaavio 2	67
	Liite 7. Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentäkaavio 3	68

ERITYISSANASTO tai LYHENTEET JA TERMIT (valitse jompikumpi)

COP	COP-arvo on lämpöpumpun vuosihyötysuhde, joka on mitattu tietyssä toimintaympäristössä, eikä anna realistista kuvaa lämpöpumpun hyötysuhteesta todellisessa toimintaympäristössä
SCOP	SCOP-arvo on lämpöpumpun vuosihyötysuhde, joka on mitattu sellaisessa toimintaympäristössä, että se antaa lämpöpumpulle realistisen hyötysuhteen, ottaen huomioon vain kiinteistön lämmityksen.

1 JOHDANTO

Sähköä ja ylipäätään energiaa pyritään nykyään, ja tulevaisuudessa säästämään niin paljon kuin mahdollista. Nyt kun energianhinta on kohonnut, ovat ihmiset viimeistään heränneet käyttämään erilaisia energiansäästökeinoja. Energiaa pystytään säästämään käyttämällä uusiutuvaa energiaa, kuten aurinkoenergiaa tai maalämpöä. Lisäksi myös jo valmiiksi tuotetun energian talteenotolla on suuri merkitys energian kulutuksessa. Tällä hetkellä energiatehokkuutta pyritään myös parantamaan erilaisten rakennuksiin kohdistuvien määräysten, EU-direktiivien ja ilmastotavoitteiden kautta.

Opinnäytetyön tehtävänannon on antanut Rejlers Rakentaminen Oy. Tämän opinnäytetyön aiheena on ollut tutkia kirjallisuuden sekä Rejlersiltä saamien tietojen, kuten toteutettujen kohteiden avulla eri hybridijärjestelmiä. Opinnäytetyön lopputulos on teknistä tietoa sisältävä opas, jonka avulla suunnittelijat saavat tietoa erilaisista hybridijärjestelmistä.

Opinnäytetyön aihe on rajattu siten, että siinä käsitellään hybridijärjestelmiä lämmityksen näkökulmasta. Maaviileä on kuitenkin todettu erittäin oleelliseksi asiaksi, joten se on lisätty opinnäytetyöhön, mutta erittäin maltillisesti. Lisäksi opinnäytetyössä käsitellään ainoastaan hybridijärjestelmiä, joissa on yhdistettynä kaksi järjestelmää.

Opinnäytetyössä esitettyjen lämmityksen hybridijärjestelmien pääasiallisena energiantuottotapana käytetään maalämpöjärjestelmää. Tähän syynä on, että Rejlersillä suunnitelluissa kohteissa maalämpöjärjestelmien käyttö on kasvanut runsaasti energian hinnan noustua. Maalämpöjärjestelmästä on opinnäytetyön alussa laaja teoriaosuus, jotta lukija saa käsityksen maalämpöjärjestelmän toiminnasta. Se on lukijan kannalta tärkeää, jotta ymmärtää miten hybridijärjestelmällä pystytään parantamaan järjestelmän energiatehokkuutta.

Maalämmön rinnalle asennettavista teknisistä järjestelmistä käsitellään aurinkolämpö, jäteveden lämmöntalteenotto sekä lauhdelämmön talteenotto. Näiden

teknisten järjestelmien teoriaa käydään läpi, sekä lisäksi esitetään erilaisia kytkentävaihtoehtoja, joilla järjestelmä on mahdollista liittää hybridijärjestelmän pääasialliseen energiantuottajaan, eli maalämpöjärjestelmään.

2 MAALÄMPÖ

Maalämpö on uusiutuvaa energiaa eli sen hyödyntäminen lämmityksessä on erittäin ympäristöystävällistä. Maassa oleva lämpö on peräisin auringon säteilystä ja maan sisäisestä lämmöstä. Maalämpöä saadaan kerättyä kalliosta, maaperästä tai vesistöistä. Energiakaivon avulla kerättävä lämpö kalliosta on yleisin tapa kerätä lämpöä.

Maalämpöä pystytään hyödyntämään kaikista energiatehokkaimmin lämpöpumpputekniikalla. Maalämpöpumpun ohelle on mahdollista myös asentaa toinen energian tuottotapa, jolloin järjestelmästä käytetään nimeä hybridijärjestelmä. Hybridijärjestelmän avulla on mahdollista parantaa rakennuksen energiatehokkuutta entisestään.

Tällä hetkellä yli puolet omakotitalojen rakentajista valitsevat rakennuksiinsa maalämmön. Maalämpöä valitaan myös muihin suurempiin asuinrakennuksiin, kuten kerros- ja rivitaloihin. Maalämmön osuus koko suomen rakennuksien kanssa on ollut nousussa viimeisten vuosien aikana. Maalämmön pääasialliseen valintaan vaikuttaa myös edullisten käyttökustannuksien lisäksi omavaraisuus, jota pidetään nykypäivänä tärkeänä arvona. Taulukossa 1 on tilastokeskuksen dataa, josta voi havaita maalämmön osuuden tasaisen kasvun viimeisien vuosien aikana. (Gebwell b N.d.)

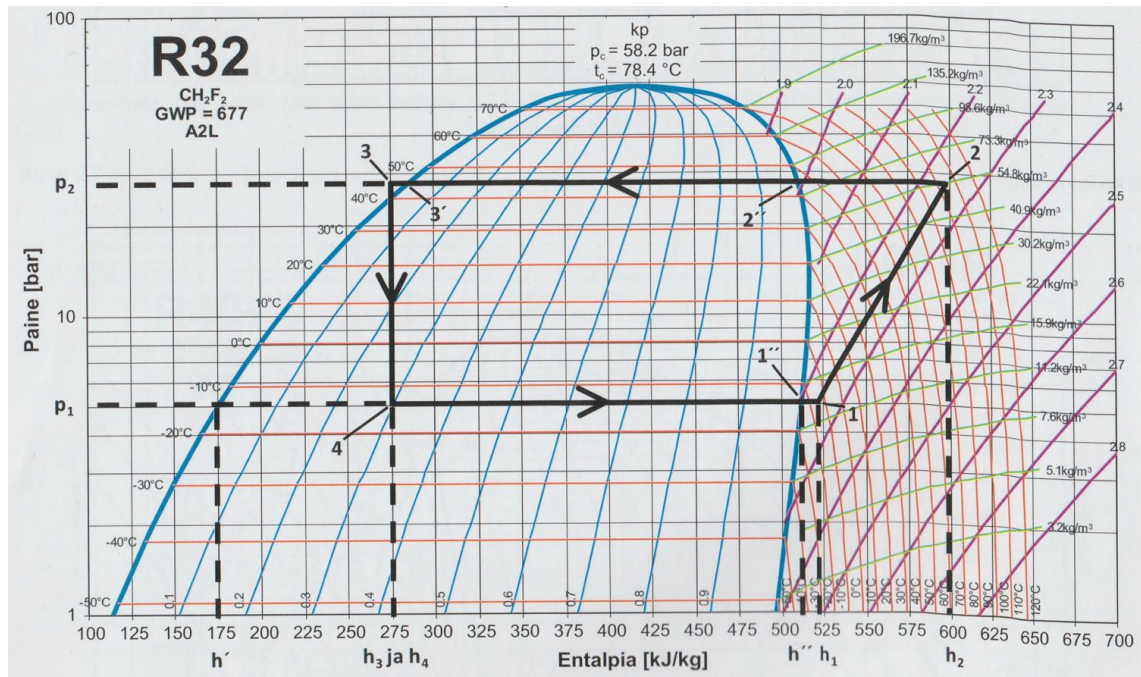
TAULUKKO 1. Kotitalouksien lämmitystavat kaikissa talotyypeissä. (Tilastokeskus 2022.)

	Prosentti		
	2012	2016	2022 (ennakkotieto)
Kaukolämpö	51	52	51
Suora sähkölämmitys	25	24	21
Öljylämmitys	10	8	5
Maalämpö	3	5	9
Ilmalämpöpumppu	1	1	5
Muu	10	10	9
Kaikki lämmitystavat	100	100	100

2.1 Kylmäaineen kiertoprosessi

2.1.1 Teoriassa

Maalämpöpumpun toiminta perustuu kylmäaineen kiertoprosessiin. Kylmäaineen kiertoprosessia kuvataan log p, h -tilapiirroksessa. Seuraavaksi selitetään kylmäaineen kiertoprosessia teoriassa eli sen häviötön kierto hyödyntäen kuvaa 1. Tässä kyseisessä kylmäaineen kiertoprosessissa ei siis oteta huomioon todellisuudessa tulevia ongelmia, kuten painehäviöitä. Seuraavissa kappaleissa mainitut eri pisteet ovat viittauksia kuvassa 1 löytyviin pisteisiin. (Kylmätekniikan perusteet 2022, 24.)



KUVA 1. Kylmäaineen R32 häviötön kiertoprosessi log p,h -tilapiirroksessa. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 24.)

Häviöttömässä kiertoprosessissa kylmäaineen höyrystyminen tapahtuu höyrystimessä aina vakioaineessa. Höyrystyminen tapahtuu pisteiden 4–1 välillä. Höyrystimelle pisteessä 4 tuleva matalapaineinen kylmäaine on jo valmiiksi höyrystynyt osittain paisuntalaitteessa, joka sijaitsee 3–4 pisteiden välissä. Höyrystyneen kylmäaineen osuus voidaan nähdä suoraan katsomalla log p, h -tilapiirrosta tai sitten laskemalla se entalpioiden avulla kaavan 1 mukaan. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 25.)

$$x = \frac{h_4 - h_0}{h_1 - h_0} \quad (1)$$

, jossa

h_0 = kylläisen nesteen entalpia [kJ/kg]

Kaavassa 1 nimittäjässä olevaa entalpioiden välistä erotusta voidaan kutsua kylmäaineen latentiksi lämmöksi. Se tarkoittaa sitä lämpömäärää, joka tarvitaan siihen, että kylmäaineen olomuoto muuttuu kylläisestä nesteestä kylläiseksi höyryksi vakioaineessa. Latentti lämpö merkitään usein kylmäaineiden yhteydessä

termillä h_{lat} . Latentti lämpö voidaan esittää kaavamuodossa kaavan 2 mukaan. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 25.)

$$h_{lat} = h'' - h' = h_1 - h_0 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (2)$$

, jossa

h'' = kylläisen höyryn entalpia [kJ/kg]

h' = kylläisen nesteen entalpia [kJ/kg]

Höyrystimessä tapahtuva entalpiamuutos saadaan laskettua pisteiden 1 ja 4 entalpioiden erotuksesta $h_1 - h_4$. Jos lisäksi tiedetään kylmäaineen massavirta, pystytään laskemaan höyrystimen kokonaisteho kaavan 3 avulla. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 25.)

$$\Phi_{hö} = m\Delta h = m(h_1 - h_4) \quad [kW] \quad (3)$$

, jossa

m = kylmäaineen massavirta [kg/s]

Kompressorin imee höyrystimessä höyrystyneen kylmäaineen kompressorin pisteestä 1 pisteeseen 2, jolloin paine nousee pisteestä p_1 pisteeseen p_2 . Koska tässä on kyseessä häviötön kiertoprosessi, kompressorin tekemä puristus menee vakientropiakäyrän mukaisesti. Kompressorissa tapahtuva entalpiamuutos saadaan laskettua vähentämällä pisteiden 2 ja 1 entalpiat toisistaan. Jos entalpiamuutoksen lisäksi tiedetään kylmäaineen massavirta, on mahdollista laskea kompressorin puristusteho kaavalla 4. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 25.)

$$\Phi_k = m\Delta h = m(h_2 - h_1) \quad [kW] \quad (4)$$

, jossa

m = kylmäaineen massavirta [kg/s]

Kuvassa 1 olevasta log p, h -tilapiirroksesta saatavien tietojen perusteella on mahdollista laskea kyseisen kylmäkoneen tehokkuus eli siis kylmäprosessin kylmäkerroin kaavalla 5. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 25.)

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} = \frac{m(h_1 - h_4)}{m(h_2 - h_1)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{523 \frac{kJ}{kg} - 275 \frac{kJ}{kg}}{600 \frac{kJ}{kg} - 523 \frac{kJ}{kg}} = 3,22 \quad (5)$$

Kaavasta 5 voidaan siis nähdä, että kylmäteknisestä prosessista saatava kylmäteho on höyrystimessä tapahtuvan entalpiamuutoksen ja prosessiin tehdyn työn eli siis kompressorin puristuksen tekemän entalpiamuutoksen suhde. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 25.)

Lauhtuminen tapahtuu pisteiden 2–3 välillä. Pisteessä 2 on tulistunut kylmäaine, joka menee lauhduttimelle. Pisteiden 2 ja 2' välillä höyryn muodossa olevasta kylmäaineesta poistetaan tulistus. Tämän jälkeen höyry lauhtuu pisteiden 2' ja 3 välissä. Kylmäaine on täysin nesteen muodossa pisteessä 3', jonka jälkeen se alijäähtyy pisteeseen 3. Lauhduttimessa tapahtuva entalpiamuutos on $h_2 - h_3$. Jos näiden lisäksi tiedetään massavirta, on mahdollista myös laskea lauhduttimesta saatava teho kaavan 6 avulla. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 26.)

$$\dot{Q}_{la} = m\Delta h = m(h_2 - h_3) \quad [kW] \quad (6)$$

, jossa

m = kylmäaineen massavirta [kg/s]

Kuvassa 1 olevasta log p, h -tilapiirroksesta saatavien tietojen perusteella on mahdollista laskea kyseisen lämpöpumpun tehokkuus eli siis kylmäprosessin lämpökerroin kaavalla 7. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 26.)

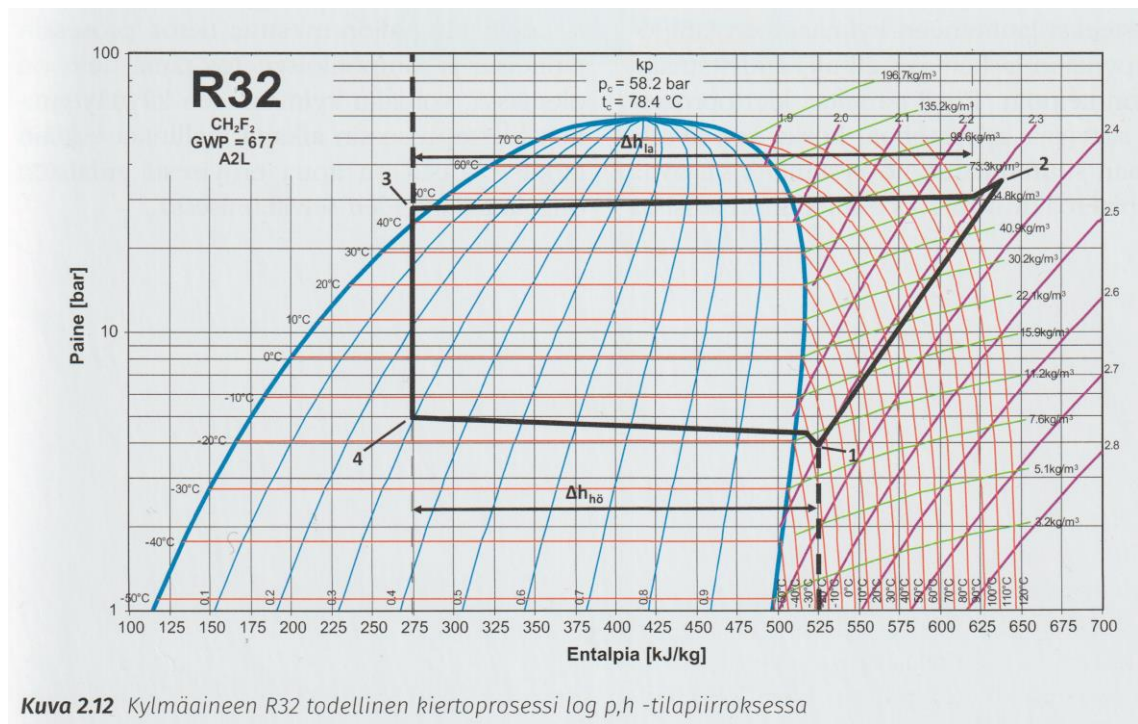
$$\varphi = \frac{Q}{W} = \frac{m(h_2 - h_3)}{m(h_2 - h_1)} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 275 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{600 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 523 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 4,22 \quad (7)$$

Kaavalla 7 laskettu lämpökerroin siis kertoo sen, kuinka paljon maalämpöpumppu pystyy tuottamaan lämpöä sen ottamaan energiaan nähden. Lämpökerrointa kutsutaan yleisesti nimellä COP (Coefficient of performance). Maalämpöpumppu on yksi useista eri lämmitysvaihtoehdoista, joten energiatehokkuus on erittäin tärkeää sen kilpaillessa muita lämmöntuottotapoja vastaan. Energiatehokkuutta on mahdollista parantaa mm. erilaisten hybridijärjestelmien avulla.

Pisteessä 3 oleva nestemäisessä muodossa oleva kylmäaine johdetaan seuraavaksi paisuntalaitteelle. Siellä kylmäaineen painetta lasketaan paisuntaventtiin avulla, jolloin sen paisumiseen ei tarvita työtä ja entalpia pysyy vakiona. Paisunnan aikana kylmäaineen lämpötila ja paine laskevat, sekä lisäksi osa siitä höyrystyy pisteiden 3 ja 4 välillä. Kun kylmäaine on osittain höyrystyneenä pisteessä 4, aloittaa se jälleen kiertoprosessin alusta. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 26.)

2.1.2 Käytännössä

Käytännössä kiertoprosessi tapahtuu eri tavalla kuin teoriassa eli häviöttömässä. Käytännössä kylmäaineen kiertoprosessissa tapahtuu useita erilaisia häviöitä, joiden vuoksi kiertoprosessi ei ole hyötysuhteeltaan niin hyvä kuin teoriassa. Kuvassa 2 on esitetty R32 kylmäaineen todellista kiertoprosessia esittävä log p, h-tilapiirros. Seuraavissa kappaleissa mainitut eri pisteet ovat viittauksia kuvasta 2 löytyviin pisteisiin. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 27.)



Kuva 2.12 Kylmäaineen R32 todellinen kiertoprosessi log p,h -tilapiirroksessa

KUVA 2. Kylmäaineen R32 todellinen kiertoprosessi log p,h -tilapiirroksessa. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 27.)

Kompressorin puristus ei käytännössä ole häviötön. Kompressorin puristuksen aikana tapahtuu lämpöhäviöitä, joka tarkoittaa sitä, että kompressorin tekemä puristus ei etene vakioentropiakäyrän mukaan. Pisteet 1 ja 2 taittuu todellisuudessa enemmän oikealle, minkä seurauksena kylmäaine höyry tulistuu enemmän puristuksessa, eikä prosessi ole isentrooppinen. Tästä syystä puristuksen aikainen entalpiaero h_1 ja h_2 välillä on suurempi eli puristus vaatii enemmän energiaa kuin häviöttömässä prosessissa. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 27; kylmälaitoksen suunnittelu 2013,12–13.)

Kompressorin imu- ja paineventtiilit aiheuttavat myös painehäviöitä, joiden vuoksi kompressorin imemä kylmäaine on aina hieman lämpimämpää kuin höyrystimestä tuleva kylmäaine. Lisäksi kompressorin puristuksen lopussa tulistuneen kylmäainehöyryn lämpötila ja paine kasvavat myös hieman korkeammaksi, mitä lauhtumislämpötila on. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 27.)

Höyrystimessä ja lauhduttimessa molemmissa tapahtuu painehäviöitä. Painehäviöiden takia höyrystyminen ja lauhtuminen ei kumpikaan tapahdu vakiopainneessa, vaan todellisuudessa paine laskee molempien fysikaalisten tapahtumien aikana. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 27–28.)

Kylmäprosessissa kylmäaineen tulistus ennen kompressorissa tapahtuvaa puristusta pienentää kompressorista saatavaa kylmätehoa, sillä tulistus pienentää kylmäaineen tiheyttä. Pienen tiheyden vuoksi kompressorin läpi menevä massavirta pienenee, jonka vuoksi kompressorin teho laskee. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 28.)

Lauhduttimessa kylmäaineen muuttuessa nesteeksi sen lämpötilaa pyritään laskemaan eli alijäähdyttämään. Alijäähdyttäminen on kannattava tehdä, koska se lisää kiertoprosessista saatavaa kylmätehoa, koska se kasvattaa höyrystimeltä saatavaa entalpiaeroa. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 28.)

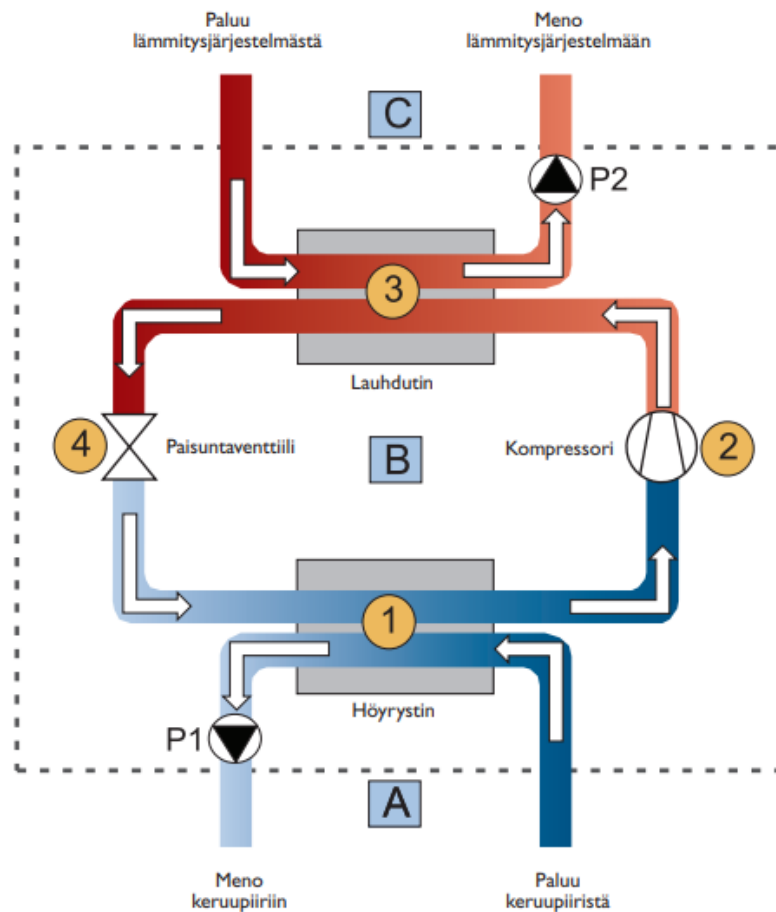
Todellisen kylmäprosessin kylmä- ja lämpökertoimet voidaan laskea kuvasta 2 saatavista tiedoista. Kaavan 8 avulla saadaan laskettua todellisen kiertoprosessin lämpökerroin ja kaavalla 9 saadaan laskettua todellisen kiertoprosessin kylmäkerroin. Näiden laskujen perusteella voidaan selkeästi todeta, että todellisen kiertoprosessin hyötysuhteet ovat huonommat kuin häviöttömän kiertoprosessin. (Kylmätekniiikan perusteet 2022, 28.)

$$\varphi = \frac{Q}{W} = \frac{m(h_2 - h_3)}{m(h_2 - h_1)} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{622 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 275 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{632 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 525 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 3,24 \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} = \frac{m(h_1 - h_4)}{m(h_2 - h_1)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{525 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 275 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{6,32 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 525 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 2,34 \quad (9)$$

2.2 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Maalämpöpumpun toiminta perustuu kylmäaineen kiertoprosessiin. Kylmäainekierrossa hyödynnetään vesistöissä, maassa tai energiakaivossa lämmennyttä maalämpönestettä, joka kierrätetään höyrystimen (1) läpi. Kylmäainekierrossa oleva kylmäaine höyrystyy höyrystimessä (1) kerätessään lämpöä höyrystimessä (1) kiertävästä maalämpönesteestä. Kylmäaineen sitoessaan energiaa maalämpönesteestä, se viilenee, jolloin se lähtee taas keräämään itseensä lämpöä. Kun kylmäaine on höyrystynyt, liikkuu se kylmäaineputkistoa pitkin kompressorille (2). Kompressorin (2) tehtävänä kylmäainekierrossa on imeä matalapaineinen höyrystynyt kylmäaine ja puristaa kylmäaine korkeaan paineeseen, jolloin kylmäaine lämpenee. Kompressorin (2) jälkeen kylmäaine menee lauhduttimeen (3), jossa höyryn muodossa oleva kylmäaine lauhtuu eli luovuttaa lämpöä. Samalla kylmäaine muuttaa muotoaan lauhduttimessa (3) höyrystä nesteeksi. Lauhduttimessa (3) nesteenä oleva kylmäaine johdetaan paisuntaventtiilille (4), joka laskee kylmäaineen lämpötilaa, jolloin se muuttuu takaisin höyryksi. Kylmäaineen ollessa jälleen höyrynä, se kykenee keräämään itseensä energiaa höyrystimestä (1) ja jatkamaan kiertoprosessia. Kuvassa 3 on esitetty maalämpöpumpun osat sekä sen toimintaperiaate. (Kylmälaitoksen suunnittelu 2013, 230.)



Kuva 3. Maalämpöpumpun osat ja toimintaperiaate. Katkoviiva rajaa varsinaisen lämpöpumpun. (Energiakaivo 2013, 12.)

2.3 Maalämpöpumpun lämmönkeruupiirin lämmönlähteet

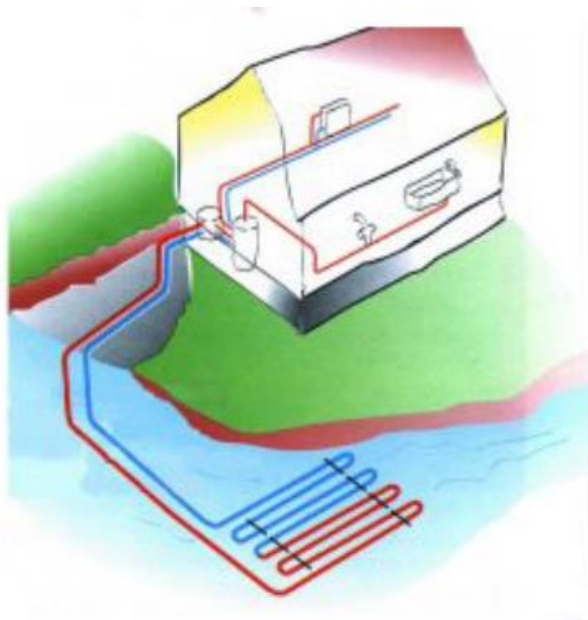
2.3.1 Vesistö

Vesistössä olevaa lämpöä voidaan myös hyödyntää maalämpöpumpun lämmönkeruupiirin lämmönlähteenä. Tätä lämpöä pystytään hyödyntämään kahdella erilaisella kytkennällä, avoimella tai suljetulla. (Kylmätekniikka 2012, 353.)

Avoimella kytkennällä toteutetaan usein projekteja, joissa käytetään suuritehoisia lämpöpumppuja. Avoimessa kytkennässä pumppu siis imee suoraan vesistöstä vettä höyrystimeen, jolloin järveen ei erikseen asenneta putkistoa. Avoimessa

kytkennässä vesi jäähtyy höyrystimessä noin 2...3 K. Mitoituksissa on kuitenkin otettava huomioon mahdollinen jäätymisvaara. Suomen Järvissä veden lämpötila laskee syvänteissäkin kevätalvella vain 1...2 asteen päähän 0 °C, joten on huomioitava, että jäähdytysvara ei paljoa ole. Jokiveden lämpötila voi olla jopa alle 0 °C, jolloin vesi on alijäähtynyttä. Tällöin vesi jäätyy välittömästi esimerkiksi kylmässä pinnassa. (Kylmätekniikka 2012, 353.)

Suljetussa kytkennässä vesistöön upotetaan putkisto. Putkisto upotetaan vesistön pohjalle siihen ankkuroiduilla painoilla. Putkistossa kierrätetään siihen tarkoitettua liuosta, jonka tehtävän on sitoa itseensä lämpöä putken seinämän läpi. Vesistöön asennetusta lämmönkeruuputkiston periaatekuva löytyy kuvasta 4. (Kylmätekniikka 2012, 353.)



KUVA 4. Vesistöön asennettu lämmönkeruuputkisto. (Gebwell a N.d.)

Vesistöjen pohjalla olevan veden lämpötila laskee talvisin lähelle 0 °C, jolloin pohjassa olevan putken ympärille muodostuu nostetta aiheuttavaa jäätä. Putken ympärille syntynyt jää heikentää myös lämmönsiirtymistä. Osa lämmöstä saadaan vesistön pohjasedimentistä, joka kerää itseensä kesän aikana lämpöä ja on vettä lämpimämpää. Vesistöistä saatava sallittu teho riippuu veden virtauksista ja lämpötilasta. Sallittuna tehona pidetään noin 40...50 W/m. Sallitut tehot eri lämpötiloille löytyy taulukosta 2. Jos vesistöissä on kuitenkin runsaasti virtauksia, ei lämmönottoa rajoita veden lämpötilan lasku. Putkistoja pystytään myös asentamaan

suoraan sedimenttiin kaivamalla tai erityistä poraustekniikkaa hyödyntäen. Sedimentissä oleva lämpö on peräisi kesällä lämmentyneestä vedestä, eli periaatteessa auringon ja ulkoilman lämmöstä. (Kylmätekniikka 2012, 353–354.)

TAULUKKO 2. Vesistöputkesta saatava lämmönsiirtoteho ympäröivän veden lämpötilan mukaan. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 273.)

Veden lämpötila °C	Sallittu teho W/m
1	20
2	40
3	50
4	55

2.3.2 Energiakaivo

Yhä useammin uusissa maalämpökohteissa lämmityksen lisäksi hyödynnetään myös maasta saatavaa maaviilää. Tämän vuoksi myös nykyään useammin lämpökaivon sijaan käytetään termiä energiakaivo, koska siitä saatavaa energiaa käytetään jäähdyttämiseen ja lämmittämiseen. Useamman energiakaivon kokonaisuutta kutsutaan energiakentäksi. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 274.)

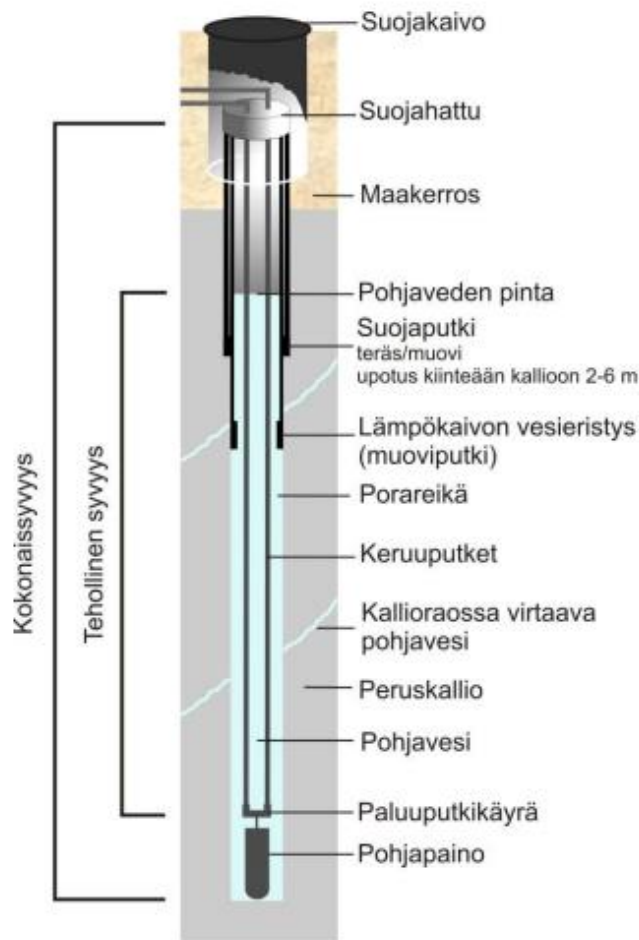
Energiakaivon kallion lämpötila vaihtelee vuoden aikana vain 10...15 metrin syvyyteen sakka, jossa lämpötila on 4...8 astetta. Kun tästä mennään syvemmälle, nousee maapallon keskustasta tuleva lämpö ns. geotermisen gradientin verran. Lämmön nousu Suomessa on pientä paksun kalliokilven vuoksi, vain noin 1...1,5 Kelviniä 100 metriä kohti. Geotermisen lämpövirran tiheys on Suomessa täten vain 0,03...0,04 W/m², joten suurin osa porareiästä saatavasta energiasta on lähöisin auringosta. Lisäksi geotermisen lämpövirran tiheys riippuu tietenkin kallion materiaalin lämmönjohtavuudesta. Suomen yleisimpien kivilajien lämmönjohtavuuksia on listattu taulukkoon 3. (Kylmätekniikka 2012, 352.)

TAULUKKO 3. Kallio- ja maaperässä olevien aineiden lämmönjohtavuuksia. (Purhonen 2016, 20.)

Kallio- tai maalaji	Lämmönjohtavuus (W/mK)
---------------------	---------------------------

Savi (kuiva)	0,4–0,9
Savi (märkä)	0,9–2,2
Hiekka (kuiva)	0,4
Hiekka (märkä)	1,4
Gneissi	1,9–4,0
Graniitti	2,1–4,1
Kvartsi	3,6–6,6
Vesi	0,6
Jää	2,2

Energiakaivojen syvyyteen sekä lukumäärään vaikuttavat kiinteistön energiatarve. Yhden porareian syvyys on yleensä 120–300 metriä, mutta suuremman energiatarpeen vuoksi on myös mahdollista porata syvemmälle. Syvien reikien poraaminen on kuitenkin erittäin kallista, minkä vuoksi yleensä on taloudellisesti kannattavampaa porata useampia reikiä yhden syvän reiän sijaan. Suomessa porareikien halkaisija kalliossa vaihtelee 105...165 mm välillä. Kaivojen yläosaan maaperäkerroksen osuudelle asennetaan aina suojaputki, joka estää irtoaineksen pääsemisen kaivoon ja sitä kautta pohjaveteen. Suojaputki upotetaan yleensä 2...6 metrin syvyyteen, mutta upotussyvyys vaihtelee kuitenkin kalliopin-
nan kiinteyden mukaan. Pohjavesialueella suojaputki on upotettava vähintään 6 metrin syvyyteen. Energiakaivon periaatekuva on esitetty kuvassa 5. (Energiakaivo 2013, 33.)



KUVA 5. Energiakaivon rakenne. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 275.)

Keruuputkiston materiaalina käytetään yleensä polyeteeniä. Keruuputkiston pitää olla standardien mukaiset. Urakoitsijan on pystyttävä näyttämään sen käyttämän tuotteen tarvittavat dokumentit, jos niitä vaaditaan. Usein porareikään sijoitettujen putkien liitännät on tehty jo valmiiksi tehtaalla muovisilla hitsausliitoksilla. Urakoitsijan on lisäksi pystyttävä takaamaan, että sen käyttämät menetelmät eivät aiheuta pohjaveden laadun muuttumista. (Energiakaivo 2013, 39.)

Porareikä täyttää itsensä vedellä yleensä muutaman päivän sisällä porauksen jälkeen. Jos porareikä täyttymisessä ilmenee ongelmia, täytyy porareikä itse täyttää vedellä. Tällöin on erittäin tärkeää huomioida mille tasolle vedenpinta asettuu täytön jälkeen ja miten saavutettu tehollinen syvyys vaikuttaa lämmönsaantiin. Jos porareikä yläosa kalliossa on kuiva, on porareikä mahdollista täyttää keruuputkien asennuksien jälkeen esim. bentoniitilla, joka parantaa keruuputkiston ja kallion välistä lämmön siirtymistä. (Energiakaivo 2013, 33.)

Kallioon poratun energiakaivon lämmönsiirto perustuu puhtaammin johtumiseen, kuin vesistön tai maaperän lämmönsiirron. Tätä johtumista voidaan kuvata Fourierin lämmönjohtavuuslain avulla kaavalla 9. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 274.)

$$q_{geo} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta h} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (10)$$

, jossa

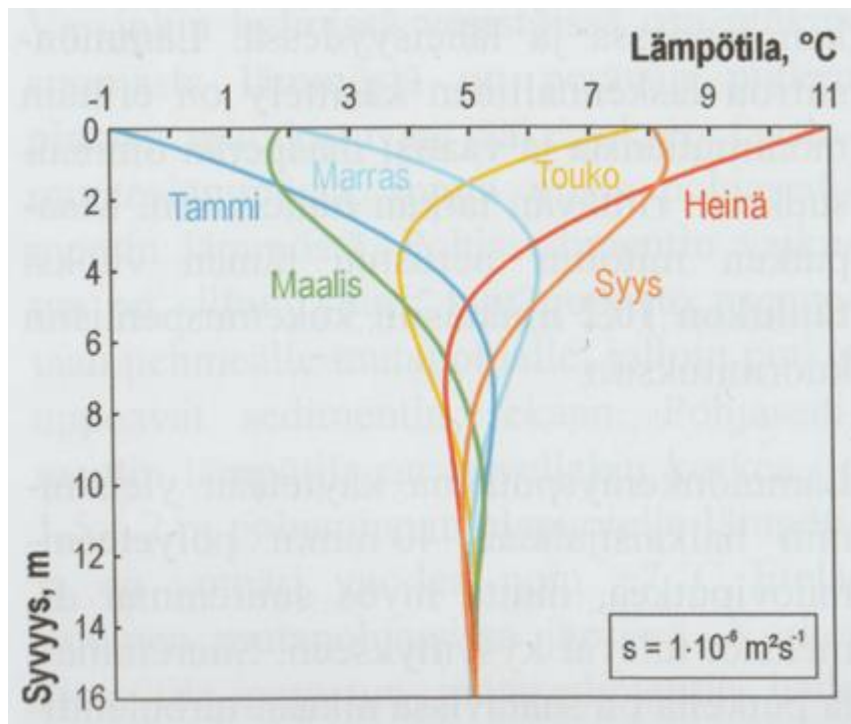
λ = väliaineen lämmönjohtavuus [W/m K]

ΔT = lämpötilan muutos [K]

Δh = matka [m]

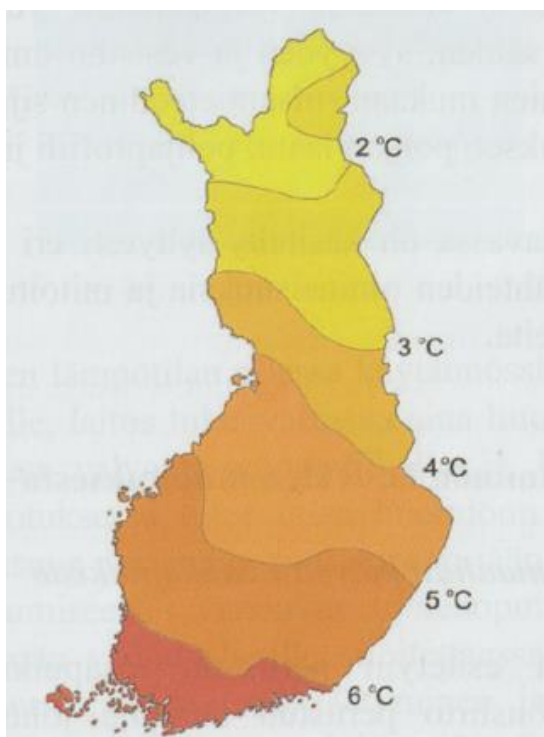
2.3.3 Maaperä

Suomessa maaperän hyödynnettävyyteen vaikuttaa sen lämpötila ja sen lämpötekniset ominaisuudet. Nämä kaksi ominaisuutta vaihtelevat Suomenkin mitta-kaavalla paljon. Maaperän pintaosien pintalämpötila vaihtelee Suomessa vuodenaikojen mukaan vain 10...15 metrin syvyydessä. Tästä syvemmälle mentäessä vuodenaikat eivät enää häiritse lämpötasapainoa. Kuvassa 6 on esitetty Suomessa maaperän pintalämpötilat. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 270.)



KUVA 6. Pintamaan tyypillinen lämpötilavaihtelu. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 271.)

Suomessa maan pinnan keskilämpötila on aina vähintään 2 °C korkeampi kuin ilman. Suomi on jaettu eri vyöhykkeisiin maan pinnan keskilämpötilan mukaan, jota on havainnollistettu kuvassa 7. Geoenergiaa on saatavilla Suomen maaperässä maanlaajuisesti, eli maalämpöpumppua on mahdollista käyttää koko maassa lämmönlähteenä. Etelä-Suomessa on suurempi maanpinnan keskilämpötila kuin pohjoisessa, joten siellä on enemmän geoenergiaa saatavilla.



KUVA 7. Maanpinnan keskilämpötila. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 271.)

Maaperään asennettava lämmönkeruuputkisto asennetaan 1...2 metrin syvyyteen ja vähintään 1...2 metrin etäisyyteen toisistaan. Putkistossa käytetään yleisimmin lämmönottoon vesi/etanoli -liuosta, jonka pitoisuus on n. 25 %. Putkiston dimensio tulee mitoittaa siten, että virtaus olisi turbulenttinen, sillä laminaarisella virtauksella lämmön siirtyminen on huonompaa. Turbulenttisessa virtauksessa virtausnopeus on yleensä 0,05...0,08 m/s ja lämpötilan muutos n. 2...3 K. Talvisin liuos on yleensä hieman alle 0 °C:n alapuolelle. (Kylmätekniikka 2022, 351.)

Lämmönoton mitoituksien kriteerinä on tietyltä pinta-alalta saatava lämpömäärä, eikä ainoana kriteerinä voida pitää lämmönkeruuputkiston pituutta. Usein koh-teissa lämpömäärää rajoittaa käytettävissä olevan maan pinta-ala. Toinen mitoi-tuksen rajoittava tekijä on maa-aineksen jäätyminen putken ympäriltä. Routiva maalaji aiheuttaa sen, että routivan maan ”työntäessä” maa-ainesta pois tieltään, syntyy putken ympärille jääsylinteri. Jääsylinterin sulaessa putken ympärille jää tyhjää tilaa. Tästä aiheutuu se, että lämmönsiirtyminen heikkenee ja putkea tar-vitaan enemmän, jolloin projektista tulee kalliimpaa. Lisäksi myös pintamaan maa-aines vaikuttaa siihen, kuinka paljon energiaa siitä on saatavilla. Taulukon

4 perusteella voidaan huomata, että savimaa on energiatehokkaampaa kuin hiekkamaa. (Kylmätekniikka 2022, 352.)

TAULUKKO 4. Pintamaan hyödyntämisessä käytettäviä energiaottomääriä ja tehoarvoja. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 272.)

Sijainti (Suomi)	Savi		Hiekka	
	Energia [kWh/m]	Max.teho [W/m]	Energia [kWh/m]	Max.teho [W/m]
Etelä*	50–60	20	30–40	14
Keski	40–45	18	15–20	10
Pohja. **	30–35	14	0–10	5
* Linjan Kokkola-Savonlinna eteläpuolella				
** Lappia lukuunottamatta				

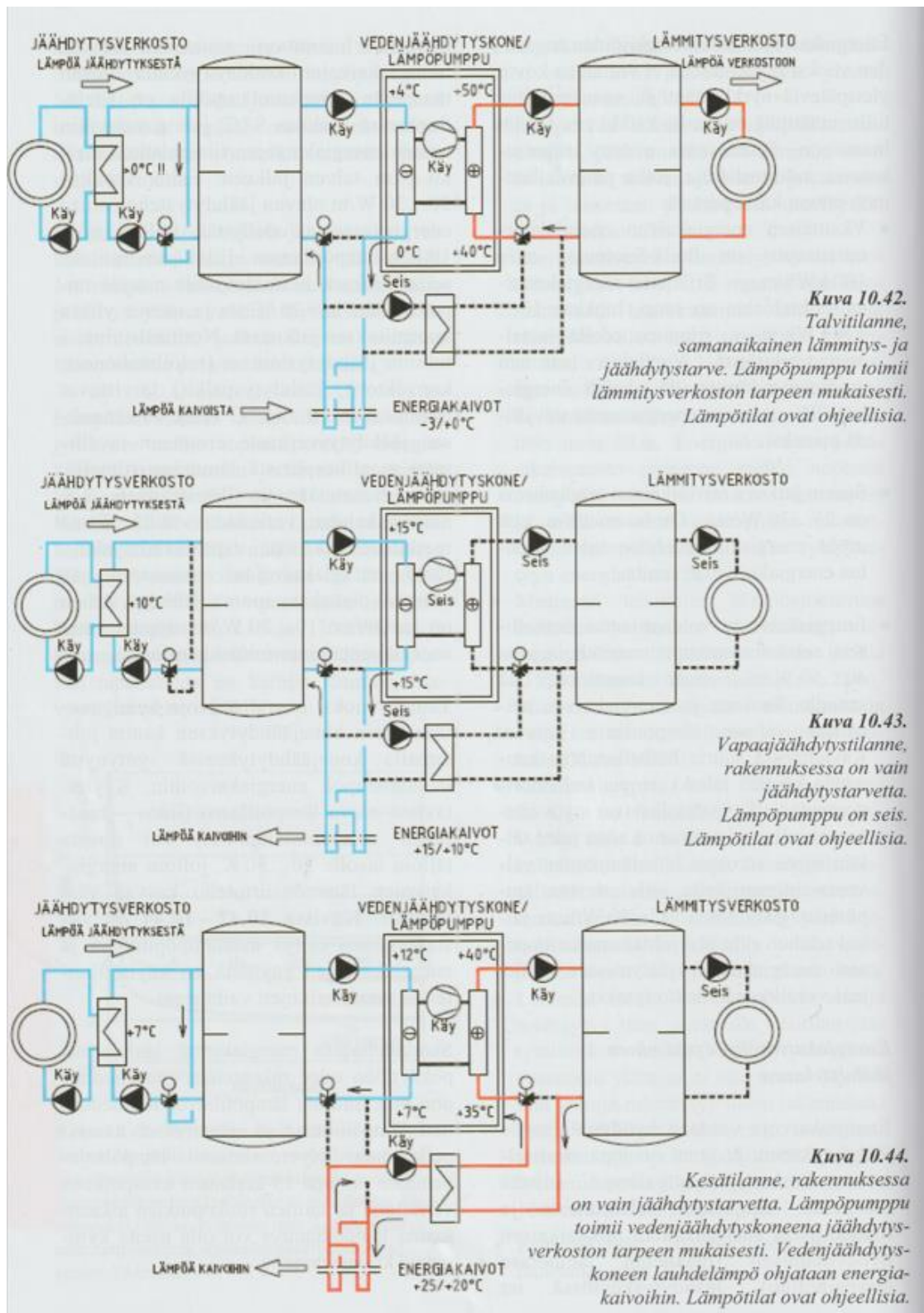
3 MAAVILEÄ

Energiakaivoja käytetään kiinteistöjen lämmitykseen ja jäähdytykseen. Jäähdytykseen on jopa suotavaa käyttää, sillä se edesauttaa maaperän lämpötilan palautumista. Jäähdytyksestä syntyvä lämpö "ajetaan" takaisin kaivoon, jolloin energiakenttä palautuu. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 277.)

Jäähdytyskäyttöön olevan energiakaivon käytössä on otettava huomioon tiettyjä seikkoja. Etelä-Suomessa energiakaivojen keskisyvyydellä oleva tasapainolämpötila on noin 8 °C. Uusien energiakaivojen tasapainolämpötila siis palautuu erittäin pian talven jälkeen. Yleisesti jäähdytykseen käytettävät tuloilmakoneet, konvektorit ja jäähdytyspalkit tarvitsevat toimiakseen 10...15 °C vettä. Tämä tarkoittaa, että energiakaivon tarvitsisi antaa jäähdytystehoa noin 20...30 W/m, joka tarkoittaa 10 K:n lämpötilaeroa. Kuormituksen ollessa jatkuvaa, voi liuoksen keskilämpötila nousta jopa 20 °C. Usein kuitenkin jäähdytysverkosto ja maaliuospiiri erotetaan lämmönsiirtimellä, jolloin tarvitaan lämmönsiirrin. Lämmönsiirrin aiheuttaa tavallisesti 1...2 K lämpöhäviön, jolloin energiakaivosta saatava teho laskee vielä pienemmäksi, noin 10...20 W/m. Tämä merkitsee sitä, että vapaajäähdytyskäytössä olevan energiakaivon tehosaanto jää yleensä liian pieneksi. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 277.)

Edellä mainittujen asioiden vuoksi energiakaivoja käytetäänkin usein konejäähdytyksen avulla. Konejäähdytyksessä syntynyt lauhdelämpö ajetaan energiakaivoon. Tällöin kaivossa olevan keruuputkiston ja maaperän lämpötilaeroa saadaan korkeammaksi, jopa 20...30 K:n tasolle. Lämmönsiirtoteho siis paranee huomattavasti ja kaivosta saadaan enemmän irti. Lauhdelämpöä kaivoon ajassa on kuitenkin huomioitava suuret lämpötilaerot. Se aiheuttaa lämpöjännitystä ja -liikkeitä keruuputkistossa. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 277.)

Kuvassa 8 on pyritty esittämään maalämpöpumpun toimintaa eri vuodenaikoina, jolloin energiakaivoa on myös käytetty jäähdytykseen. Kuvan 8 kolmen eri tilanteen vieressä on selite, joka kuvaa tilannetta.



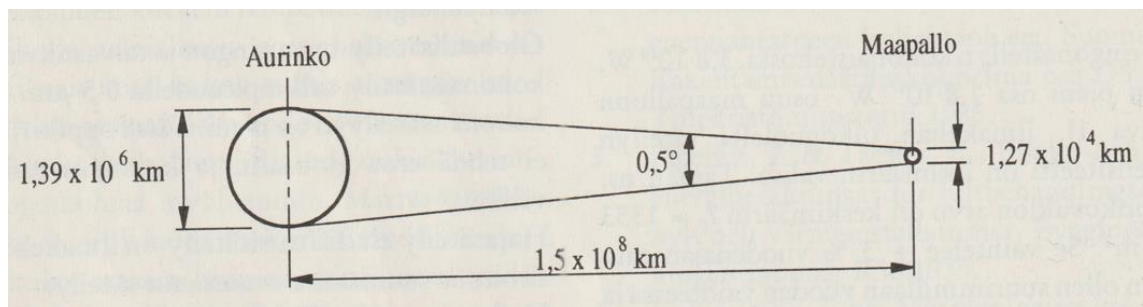
KUVA 8. Maalämpöpumpun ja energiakaivojen toimintaa eri vuodenaikoihin. (Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät 2016, 278.)

4 AURINKOLÄMPÖ

4.1 Auringon säteily

Säteilyolot vaihtelevat paljon paikkakunnan, vuodenajan ja lisäksi pilvisyyden mukaan. Säteilydataa on tutkittu pitkään ja niiden avulla on mahdollista ennustaa kuinka säteily vaikuttaa rakennukseen. Säteilyn tunteminen on tärkeää, sillä se vaikuttaa mm. rakennuksen lämmitysenergian käyttöön ja jäähdytystehon tarpeen laskemiseen. (Seppänen 2001, 39.)

Auringonsäteilystä vain osa osuu maapallolle, mitä on havainnollistettu kuvassa 9. Auringonsäteilyn kokonaisteho on $3,8 \cdot 10^{26}$ W, josta vain $1,8 \cdot 10^{17}$ W osuu maapallon pinnalle. Ilmakehän ulkopuolella säteilyn intensiteettiä (I_0) voidaan pitää vakiona, joka on keskimäärin 1353 W/m². (Seppänen 2001, 40.)



KUVA 9. Auringon ja maapallon mittasuhteet. (Seppänen 2001, 40.)

Auringonsäteily koostuu näkyvistä valonsäteistä, infrapunaisista lämpösäteistä ja ultraviolettisäteilystä. Auringonsäteily jakautuu kolmeen ryhmään: Hajasäteilyyn, joka on siroutunut tai muuttanut suuntaa ilmakehässä olevien ainehiukkasten vuoksi. Suora auringonsäteily, joka on suoraan Auringosta tuleva säteily maapallolle. Heijastunut säteily, joka on maanpinnasta heijastunut säteily. (Tahkokorpi 2016, 28.)

4.2 Auringon säteily Suomessa

Suomessa merkittävin osuus kokonaissäteilystä on hajasäteilyä. Etelä-Suomeen tulevasta säteilystä noin puolet on hajasäteilyä. Tällä ei ole merkitystä aurinkoenergian keräämisen kannalta, onko säteily haja- vai suorasäteilyä. (Motiva c 2023.)

Etelä-Suomessa vuotuinen kokonaissäteilyn määrä on hyvin lähellä Pohjois-Saksan tasoa. Suomessa kuitenkin säteily keskittyy erittäin vahvasti kesäkuukausille, joten tuotanto vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Taulukossa 5 on esitetty Suomessa aurinkoenergian vuosittaista saantimahdollisuutta. (Motiva c 2023.)

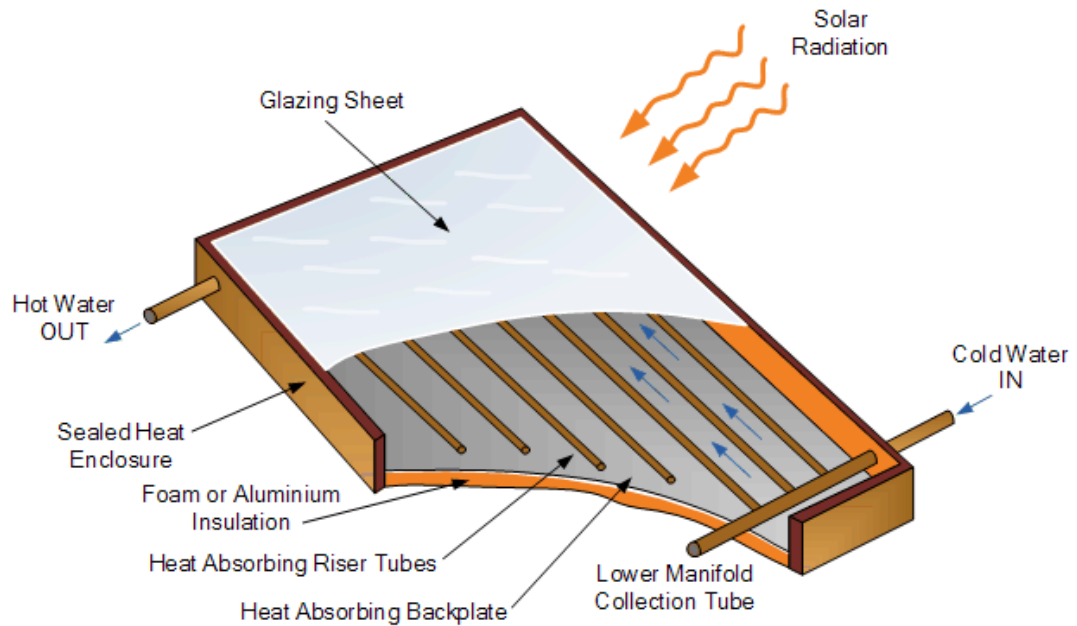
TAULUKKO 5. Aurinkoenergian vuosittainen saantimahdollisuus vaakatasossa, Suomessa ja eri puolilla maailmaa. (Tahkokorpi 2016, 15.)

Kaupunki	Leveyspiiri	kWh/m ² A
Helsinki	60° 12' N	938
Jokioinen	60° 49' N	887
Sodankylä	67° 22' N	807

4.3 Aurinkolämmön aktiivinen hyödyntäminen

4.3.1 Tasokeräin

Euroopassa yleisin keräintyyppi on karkaistulla lasilla varustettu tasokeräin. Tasokeräimet keräävät auringon säteilyä tumman keräinelementtinsä avulla. Tämä elementin tumma pinta absorboi eli käytännössä imee siihen osuvan säteilyä suurimman osan ja kuumenee. Absorptiolevyyn on kiinnitetty ohuet lämmönsiirtonestettä kuljettavat putket, jotka yhdistyvät suurempiin kokoojaputkiin keräimen ylä- ja alapäässä. Elementissä rakenne on yleensä metallinen, mutta on myös mahdollista käyttää hyvin lämpöä kestäviä muoveja varsinkin kattamattomissa keräimissä. Tasokeräimestä pystytään käyttämään lähes koko pinta-ala säteilyn vastaanottamista varten. Kuvassa 10 on esitetty tasokeräimen rakennekuva. (Tahkokorpi 2016. 82, 87; Motiva a 2020.)



KUVA 10. Tasokeräimen rakennekuva. (Alternative energy tutorials a N.d.)

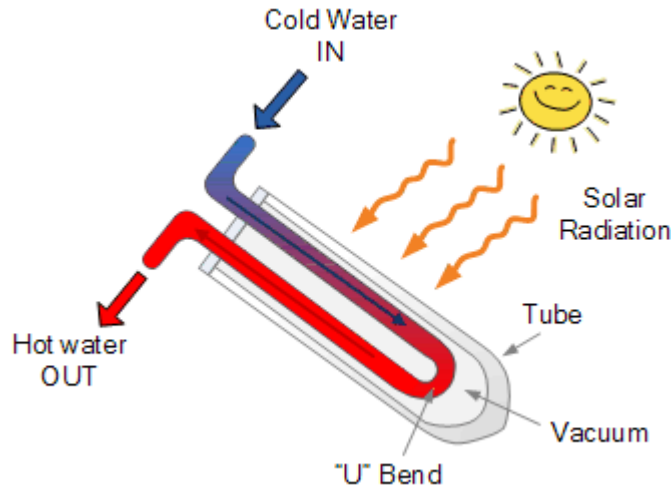
Tasokeräimet jaetaan yleisesti kahteen ryhmään, katettuihin ja kattamattomiin tasokeräimiin. Kattamattomia tasokeräimiä käytetään usein sellaisissa tilanteissa, joissa keräimen avulla tuotetun nesteen lämpötilaa ei tarvitse nostaa korkeaksi. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi uima-altaiden lämmittäminen tai joissain tilanteissa lämpimän käyttöveden tuottaminen, jos muita lämmitysmuotoja ei ole käytettävissä. Kattamattomilla tasokeräimillä on mahdollista myös tuottaa lämpöä lämpöpumppujen ”kylmälle” puolelle. (Tahkokorpi 2016, 84.)

4.3.2 Tyhjiöputkikeräin

Tyhjiöputkikeräimessä sen rakenne koostuu useasta rinnakkain asennetusta lasiputkesta. Lasiputket toimivat tyhjiöinä, jonka avulla lasiputket estävät absorboituneen lämmön karkaamista. Tyhjiöputkikeräimen lämmöneristävyys on siis hyvä ja suurin osa kerätystä lämmöstä pystytään hyödyntämään. (Tahkokorpi 2016, 84.)

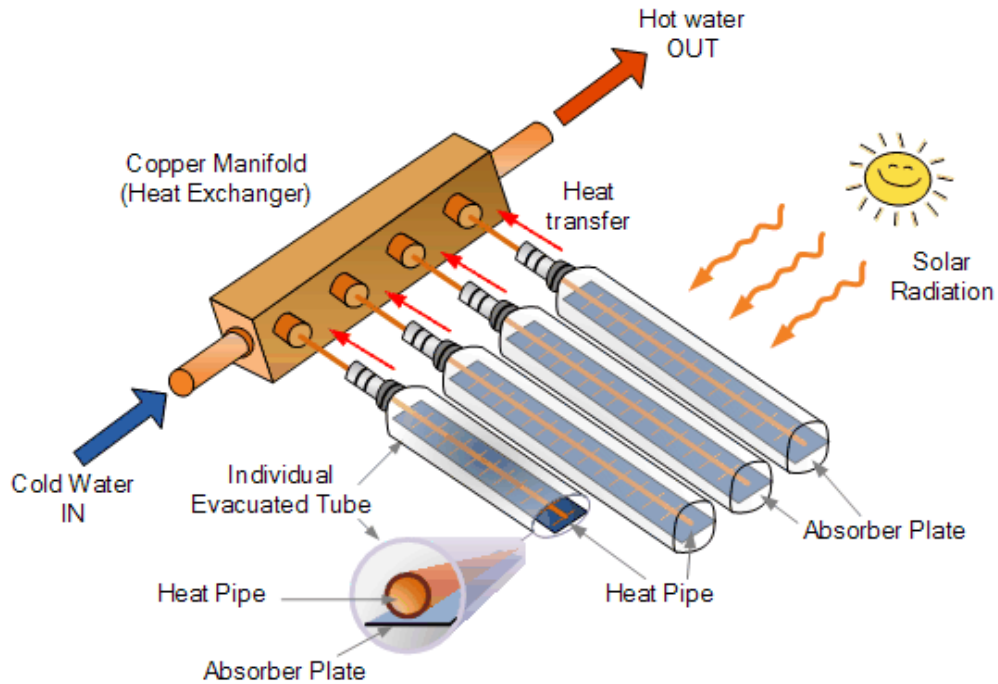
Absorboituneen lämmön siirtäminen lämmönsiirtonesteeseen, eli veteen tai johonkin jäänestönesteeseen (esim. propyleeniglykoli) tehdään kahdella eri tavalla. Lämmönsiirto voidaan tehdä tyhjiöputken sisällä kulkevalla läpivirtauksella. Läpivir-

tauksessa lämmönsiirtoneste kiertää u:n muotoisen lenkin ja kerää itseensä lämpöä. Kuvassa 11 on läpivirtausperiaatteella toimivan tyhjiöputkikeräimen periaatekuva. (Tahkokorpi 2016, 84, 95.)



KUVA 11. Läpivirtausperiaatteella toimiva tyhjiöputkikeräimen rakennekuva. (Alternative energy tutorials b N.d.)

Heat pipe-tekniikalla toimiva tyhjiöputken lämmönsiirtoliitos on aina kuiva. Lämpöputkessa on matalan kiehumispisteen omaavaa nestettä. Tämä helposti höyrystyvä neste muodostaa oman lämmönsiirtopiriin. Käytännössä höyrystynyt neste nousee tyhjiöputkessa höyrynä putken yläosaan, jossa se luovuttaa lämmön ja kondensoituu ja palaa takaisin putken pohjalle nesteen muodossa. Kuvassa 12 on heat pipe-tekniikalla toimivan tyhjiöputkikeräimen periaatekuva. (Tahkokorpi 2016, 97.)

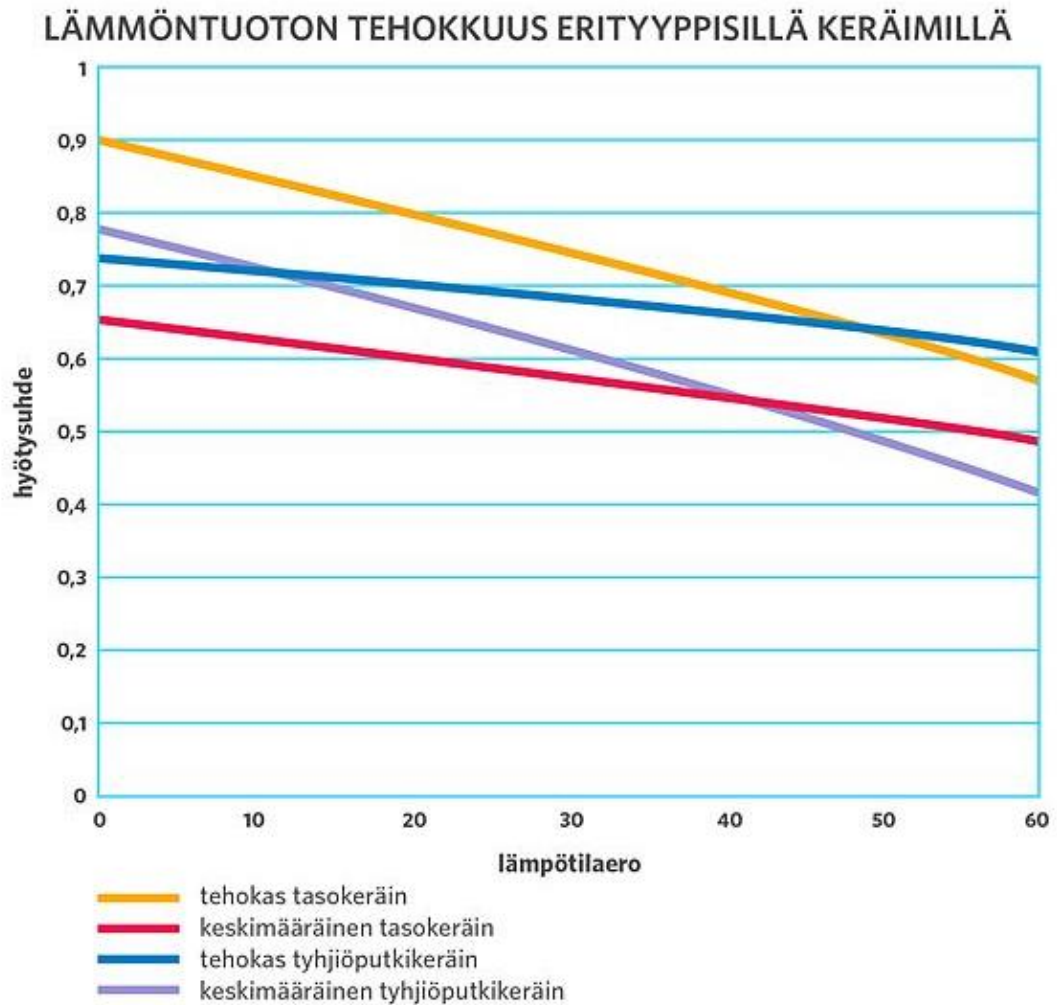


KUVA 12. Heat pipe -periaatteella toimiva tyhjiöputkikeräimen rakennekuva. (Alternative energy tutorials b N.d.)

4.3.3 Aurinkokeräinten hyötysuhde

Aurinkokeräimeen osuvan auringonsäteilyn määrästä pystytään hyödyntämään vain osa. Laadukkaalla tekniikalla ja otollisilla olosuhteilla on mahdollista kuitenkin saada jopa yli 70 prosentin hyötysuhde keräimelle. Koko aurinkojärjestelmän hyötysuhde on usein kuitenkin pienempi, sillä käytännössä lämpötilaolosuhteet ja lämpöenergian varastointi tuottavat ongelmia. (Motiva d 2022.)

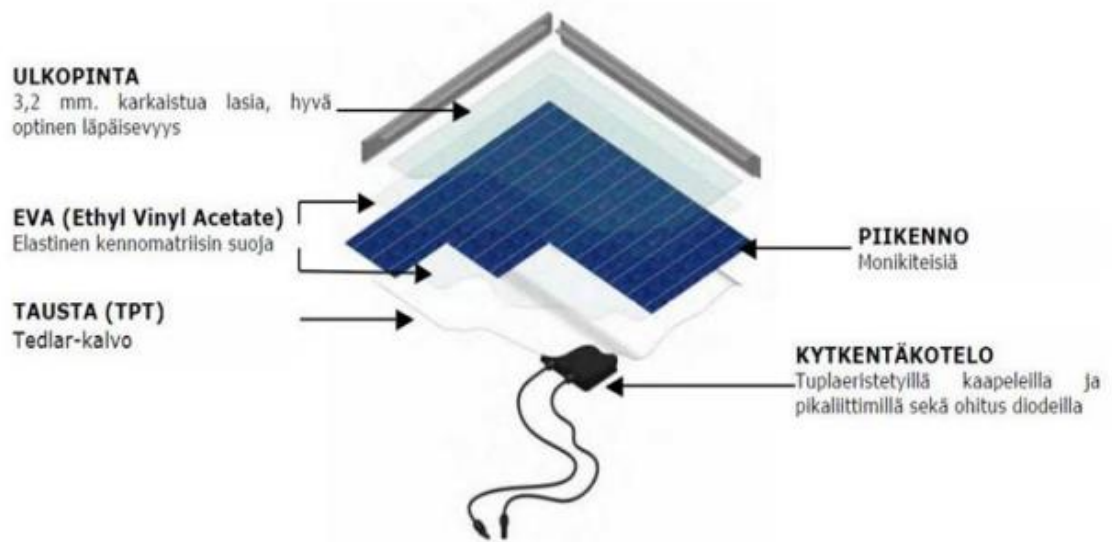
Aurinkokeräimille pystytään laskemaan hyötysuhde ja lämpöteho, jos tiedossa ovat keräimen pinta-ala, ympäristön lämpötila, keskimääräinen lämpötila ja säteily määrä. Yleisesti keräimien hyötysuhde heikkenee lämpötilaeron kasvaessa ympäristön ja sen välillä. Lisäksi myös auringon säteilyteho vaikuttaa hyötysuhteeseen. Kuvassa 13 on esitetty, miten lämmöntuotto heikkenee erityyppisillä keräimillä lämpötilaeron noustessa. (Motiva d 2022.)



KUVA 13. Hyötysuhteita erityyppisillä aurinkokeräimillä. (Motiva d 2022.)

4.3.4 Aurinkopaneeli

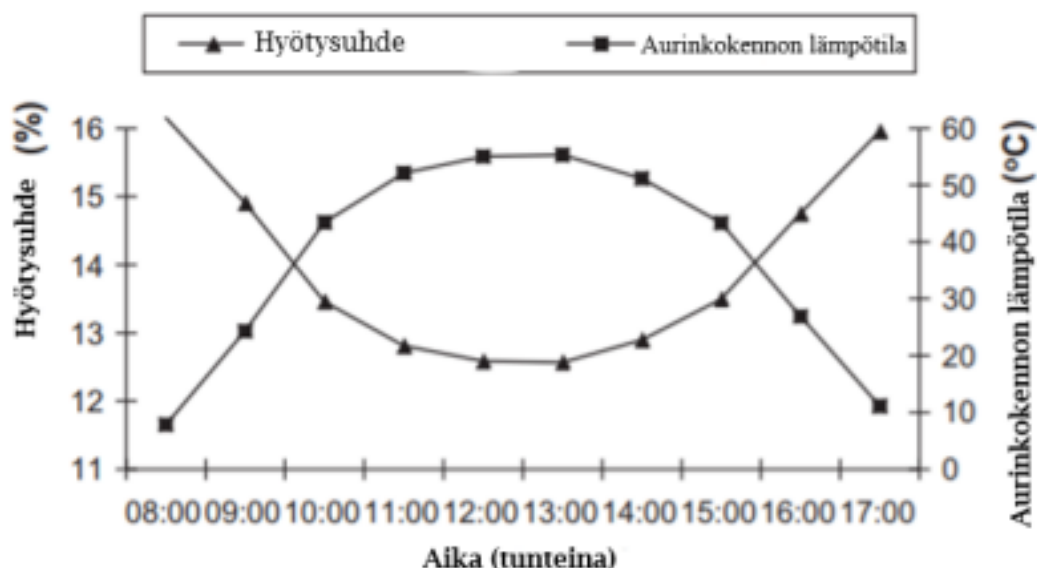
Aurinkopaneelin yleisin valmistusmateriaali on yksi- tai monikiteinen pii. Yli 90 prosenttia maailmassa olevista aurinkokennoista on nimenomaan piikidekennoja. Piikidekennojen hyötysuhde on tavallisesti noin 15–17 prosenttia. Toinen yleinen aurinkosähköpaneeli on ohutkalvopaneeli. Siinä lisätään erittäin ohuita kerroksia valolle herkkää materiaali edulliselle pohjamateriaalille. Ohutkalvopaneelien hyötysuhde on 9–11 prosenttia. (Motiva e 2022.)



KUVA 14. Piistä valmistetun aurinkopaneelin rakenne. (Nyman 2019.)

Aurinkosähkön tuottaminen perustuu auringon säteilyenergian muuttamiseen sähkövirraksi. Auringon säteilyenergia koostuu pienistä hiukkasista eri fotoneista. Niiden osuessa aurinkopaneeliin fotonit imeytyvät paneelin puolijohdemateriaaliin, kuten piihin. Puolijohde irrottaa elektronit atomeistaan, jolloin elektronit alkavat virtaamaan puolijohdetta pitkin ja muodostaa sähkövirtaa aurinkopaneelin virtajohtimiin. Säteilyn intensiteetin kasvaessa pystytään tuottamaan enemmän sähköä, eli siis aurinkopaneeli tuottaa enemmän kesällä kuin talvella. (Vattenfall N.d.)

Aurinkopaneelien hyötysuhteeseen vaikuttaa erittäin paljon kennoston lämpötila. Kennoston lämpötilan ollessa suurempi on myös sen hyötysuhde pienempi. Tämä johtuu siitä, että aurinkopaneelin muodostama teho on jännitteen ja virran tulo. Kennoston lämpötilan noustessa kasvaa myös virta, mutta se kasvaa pienemmässä suhteessa kuin jännite laskee. (Virtanen 2019, 12.)



KUVA 15. Aurinkopaneelin hyötysuhde ja lämpötila tyypillisenä keskipäivänä. (Virtanen 2019, 13.)

4.4 Aurinkoenergian keruun parantaminen

Aurinkoenergialaitteet ja etenkin paneelien tulisi saada tasaisesti säteilyä. Keräinlaitteen tulee myös saada tasaisesti säteilyä. Talvella Suomessa on aurinko alhaalla ja varjot ovat pidempiä kuin kesällä. Tällöin keräimen sijainnilla on suuri merkitys, sillä varjostuksilla on ratkaiseva vaikutus sen energiantuotantoon. (Tahkokorpi 2016, 17.)

Aurinkoenergiajärjestelmää valitessa on päätettävä sen asennustapa. Aurinkoenergialaitteet voidaan asentaa kiinteäksi tai aurinkoa seuraavaksi. Kiinteästi asennettavat aurinkoenergiajärjestelmät suunnataan yleensä etelää eli päiväntasaajaa kohti. Joskus etelään suuntaamiselle voi olla esteitä, kuten talon aiheuttama varjo. Näissä tilanteissa järjestelmä suunnataan idän ja lännen väliselle alueelle, mutta se näkyy kuitenkin energiantuotossa, koska suuntaus ei ole enää optimaalinen. On myös mahdollista suunnata järjestelmä kaakon ja lounaan väliin, jossa tuotto on lähes etelään suunnatun järjestelmän tasolla. Kuitenkin energiantuotto tapahtuu usein väärään aikaan, eikä järjestelmän tuottamaa energiaa pystytä täysin hyödyntämään. (Tahkokorpi 2016, 17–18.)

Aurinkoa seuraavaksi asennettu aurinkoenergiajärjestelmä on saatavilla yhden tai kahden akselin seurannalla. Yhdellä seuranta akselilla varustettu järjestelmä voi seurata joko ilmansuuntaa tai auringon korkeutta. Kahden seuranta akselin avulla keräimet voidaan suunnata aina aurinkoa kohti ja tällöin pystytään parantamaan 1,5–2 kertaisesti vuosituottoa verrattuna kiinteästi asennettuun järjestelmään. (Motiva b 2023.)

Seurantajärjestelmällä on kuitenkin myös negatiivisia puolia. Järjestelmä on usein erittäin kallis ja koostuu useasta liikkuvasta osasta. Tämä tarkoittaa sitä, että järjestelmän toimintavarmuus kärsii ja lisää myös huoltotarvetta. Täysin pilvisellä säällä Suomessa on käytännössä ainoastaan tarjolla hajasäteilyä. Tällöin auringon eli suoran säteilyn seuraaminen pienentää hieman tuottoa ja pilvettömällä säällä taas suurentaa tuottoa. Suomessa hajasäteilyn osuus on 40–50 % kokonaissäteilystä, joten aurinkoa seuraavan järjestelmän asentaminen ei välttämättä ole aina kannattavaa. (Motiva b 2023.)

Aurinkoenergialaitteen kallistuskulmalla on olennainen osa sitä, kuinka paljon tehoa saadaan irti. Auringonsäteilyn tulokulman ollessa 0° saadaan paras teho irti. Yleinen nyrkkisääntö parhaalle kallistuskulmalle voidaan pitää leveysaste – 20 astetta. Suomessa ideaalina kallistuskulmana voidaan pitää noin 45°. Taulukossa 6 on havainnollistettu eri kallistuskulmilla saatuja energiamääriä Helsingissä. (Tahkokorpi 2016, 19.)

TAULUKKO 6. Säteily/vrk eri kallistuskulmilla, suuntaus Helsingissä etelään ilman varjostuksia (kWh/m²/d). (Tahkokorpi 2016, 19.)

KUUKAUSI	30°	45°	60°
Tammikuu	0,4	0,5	0,5
Helmikuu	1,5	1,8	1,9
Maaliskuu	3,1	3,4	3,2
Huhtikuu	4,4	4,5	3,4
Toukokuu	5,9	5,7	3,7
Kesäkuu	6,6	6,3	3,9
Heinäkuu	5,7	5,5	3,6
Elokuu	5	5	3,6
Syyskuu	3,3	3,5	3
Lokakuu	1,6	1,8	1,7
Marraskuu	0,5	0,5	0,5

Joulukuu	0,4	0,5	0,5
----------	-----	-----	-----

5 JÄTEVEDEN LÄMMÖNTALTEENOTTO

Energiatohokkuuden tärkeyden vuoksi kaikki mahdollinen tarjolla oleva energia tulisi hyödyntää. Kiinteistöissä kuluu erittäin paljon energiaa käyttöveden lämmitykseen. Asuinrakennuksissa n. 30 % vuosittaisesta lämmitysenergian käytöstä menee käyttöveden lämmitykseen. Erittäin korkean energiatohokkuusluokan taloissa käyttöveden lämmitykseen käytetty energia on jopa 50 %. (Ecowec b N.d).

Käytön jälkeen käyttövesi kulkeutuu viemärin kautta kunnalliseen viemäriverkostoon jopa 30-asteisena. Tämä käyttöveden lämmittämiseen käytetty energia on kuitenkin mahdollista ottaa talteen nykyaikaisella lämmöntalteenotto-tekniikalla. Jäteveden lämmöntalteenotto on erittäin kustannustehokas järjestelmä, jonka avulla saadaan pienennettyä energiankulutusta. (Ecowec b N.d).

5.1 Jäteveden energiamäärä

Jäteveden lämmöntalteenoton avulla on mahdollista laskea E-lukua ja nostaa rakennuksen energiatohokkuutta. Jäteveden sisältämä energiamäärä saadaan laskettua kaavan 13 avulla. (Turpeinen 2019, 31.)

$$E = \frac{m \cdot C \cdot \Delta T}{3600} [kWh] \quad (14)$$

, jossa

m = veden massa, kg

C = veden ominaislämpökapasiteetti, KJ/Kg·K

ΔT = Kylmän ja lämpimän käyttöveden lämpötilaero

Seuraavaksi esitetään jäteveden lämmöntalteenoton energiamäärän lasku kaavaa 14 hyödyntäen. Lasku on kohdistettu 150 henkilöön eli esimerkiksi kerrostaloon ja siinä esitetään vuoden potentiaalinen energiamäärä, joka voitaisiin ottaa

talteen jätevedestä. Suomalaiset käyttävät noin 155 litraa vettä päivässä ja lämpimän veden osuus on siitä 40 %. Kylmän ja lämpimän käyttöveden lämpötilaero on 50 K. (Ecowec b N.d.)

$$E = \frac{150 \text{ hlö} \cdot 155 \frac{\text{l}}{\text{hlö} \cdot \text{d}} \cdot 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot 0,4 \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 50 \text{ K}}{3600} = 198000 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \quad (15)$$

Jäteveden lämmöntalteenotolla pystytään siis tekemään suuri vaikutus kiinteistön lämmityskustannuksiin. Esimerkiksi Tampereella sijaitsevan kaukolämpökohteen, jonka vuotuinen jäteveden energiamäärä on 198000 kWh olisi mahdollista säästää Tampereen kaukolämmön noin 60 euron (alv 0 %) hinnalla jäteveden lämmöntalteenoton avulla jopa 11 880 euroa vuodessa. (Sähkölaitos N.d.)

5.2 Jäteveden lämmöntalteenoton rajoitukset

Jäteveden lämmöntalteenotto on nostanut päätään pinnalle energian hintojen nousun sekä rakennuksista annettujen energiatehokkuusmääräyksien vuoksi. Jäteveden hukkalämmöstä ei ole tällä hetkellä annettu Suomessa rajoituksia tai sääntelyjä. Esimerkiksi Ruotsissa on jäteveden lämmöntalteenotolle lainsäädännöllisiä määräyksiä. Siellä on haettava vesilaitokselta lupaa, jotta jäteveden lämpöenergiaa saa hyödyntää lämpöpumpputekniikalla, sillä jäteveden lämpötila ei saa alittaa kiinteistölle toimitettavan veden lämpötilaa. (Gaia 2021.)

Suomessa jäteveden lämmöntalteenotot voivat kuitenkin aiheuttaa harmia. Jos hukkalämpöä eli jäteveden sisältämä lämpö otetaan viemärin alkupäässä talteen, niin jätevesi luonnollisesti jäähtyy. Alhaisempi jäteveden lämpötila voi tehdä arvaamattomia yllätyksiä jätevesiverkostossa sekä myös puhdistusprosessissa. Jätevesi voi jäätymä viemäriverkostoon tai heikentää jätevedenpuhdistamon puhdistamistehoa, joten vedenpuhdistamoita tulisi näin laajentaa ja täten vedenpuhdistamon päässä energiankulutus kasvaisi. (Gaia 2021.)

Helenin Katri Valan lämpöpumppulaitoksella lämpö otetaan talteen puhdistetusta jätevedestä, jonka Helen hyödyntää kaukolämpöverkostossa. Näin ollen lämpöä

saadaan hyödynnettyä tasapuolisesti kaukolämpöverkon asiakkaille. Kuitenkin kiinteistön käyttöveden lämmittää, eli siis maksaa kiinteistön omistaja. On siis helppoa ymmärtää, että he haluavat ottaa kaiken rahalliset säästömahdollisuudet käyttöön, mitä on. Jos kuitenkin lämmöntalteenotto aiheuttaa ongelmia viemäri-verkostossa, on maksaja yleensä kiinteistön omistaja. (Gaia 2021.)

5.3 Ecowec-hybridivaihdin

5.3.1 Tuottotaulukko

Liitteessä 4 on esitetty R08-hybridivaihtimen tuottotaulukko. R08-hybridivaihdin on suurempiin yli 3000 m² kokoisiin rivi- ja kerrostaloihin soveltuva hybridivaihdin. Ecowecin-verkkosivuilta löytyy heidän jokaiselle hybridivaihtimelle oma tuottotaulukonsa. Tuottotaulukossa on esitetty se primäärienergia määrä, jonka hybridivaihtimen avulla saadaan hyödynnettyä 26-asteisesta jätevedestä.

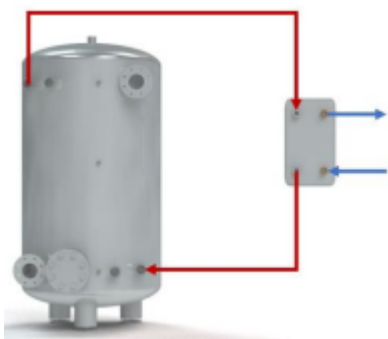
Lämpöpumppu lämmöntuotto lattialämmitykseen on 1,2ertainen ja lämpimään käyttöveteen 1,5ertainen. Eli lämpöpumpun saadessa jäteveden LTO-järjestelmästä primäärienergiaa 100000 kWh/a, on sen lämmöntuotto 120000–150000 kWh/a. Tämän lasketun lämmöntuoton eli sekundäärienergian määrästä saadaan laskettua LTO-järjestelmän SCOP-arvo, kun se jaetaan lämpöpumpun sähkönkulutuksella.

Liitteessä 4 olevasta tuottotaulukosta voidaan huomata, että LTO-kytkennässä, jossa hybridivaihtimen tuottamaa primäärienergian määrä ei ole kovin suuri, jos se hyödynnetään käyttöveden esilämmitykseen. Jäteveden lämmöntalteenotto onkin usein erittäin turha, jos sitä hyödynnetään vain käyttöveteen. Hybridivaihtimesta saatava energiamäärä on siirrettävä käyttöveteen lämmönvaihtimen kautta, joka lisää vielä lämpöhäviötä ja laskee järjestelmän kannattavuutta.

Liitteessä 4 olevasta tuottotaulukosta voidaan myös huomata, että hybridivaihdin pystyy tuottamaan enemmän primäärienergiaa, jos se hyödynnetään lämpöpumpulla, kuten maalämpöpumpulla. Syy tähän on se, että lämpöpumpun avulla saadaan hyödynnettyä matalalämpöistäkin jätevettä energiatehokkaasti.

5.3.2 Passiivinen LTO-kytkentä

Passiivisessa jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmässä lämmöntalteenottovaihtimen toimintaa hyödynnetään ilman lämpöpumppua. Lämmönvaihdin voi toimia täysin ilman ulkopuolista energiaa, jolloin vaihdin ei käytä paljoa sähköä. Viemäröintivallalla ei ole merkitystä. Kohteessa voi olla yksiviemärijärjestelmä tai kaksoisviemäröinti. Passiivinen asennustapa ei lisää kiinteistön energiakustannuksia. Lisäksi passiivinen kytkentä on lähes huoltovapaa, sillä järjestelmä on yksinkertainen eikä sisällä liikkuvia osia. Passiivisella kytkentävaihtoehdolla voidaan siirtää talteenotettu lämpö teollisuudessa prosesseihin, kiinteistöissä lämmitykseen tai käyttöveden esilämmitykseen. (Ecowec a N.d.)

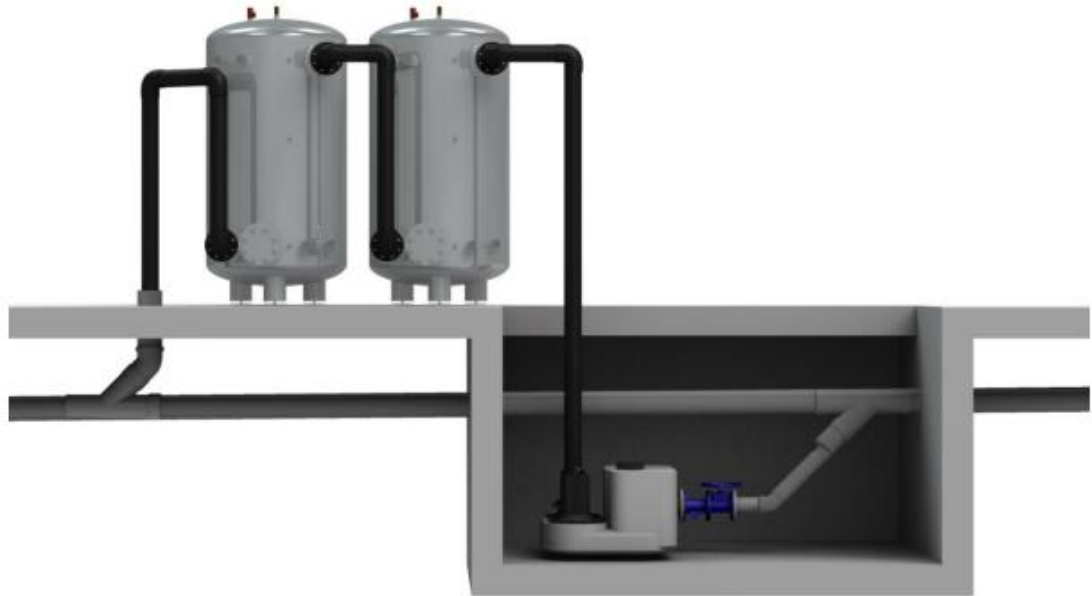


KUVA 16. Passiivisen LTO-järjestelmän kytkentäperiaate ilman lämpöpumppua. (Ecowec a N.d.)

5.3.3 Aktiivinen LTO-kytkentä

Jos kiinteistön viemäröintilinjaa ei saada viettämään painovoimaisesti hybridivaihtimeen tai hybridivaihtimen hyötysuhdetta ja tehoa halutaan kasvattaa, on kiinteistöön suunniteltava paineviemäröinnillä oleva jätevesipumppaamo. On

myös mahdollista asentaa useampi hybridivaihdin sarjaan, jos kiinteistön vedenkulutus on suurta. Näin saadaan LTO-järjestelmän hyötysuhdetta kasvatettua entisestään. Aktiivisessakaan kytkennässä viemäröintitavalla ei ole merkitystä, eli kohteessa voi olla yksiviemärijärjestelmä tai kaksoisviemäröinti. (Ecowec a N.d.)



KUVA 17. Periaatekuva jätevesipumppaamon kytkennästä kahteen Ecowec-hybridivaihtimeen. (Ecowec a N.d.)

6 LAUHDELÄMPÖ

Koneellisen jäähdytyksen toiminta perustuu kylmäaineen kiertoprosessiin. Kylmäaineen kiertoprosessiin sisältyvät pääkomponentit: höyrystin, kompressori, lauhdutin ja paistuntaventtiili eli toiminta perustuu kylmäainekierto, kuten maalämpöpumpussakin. Koneellisessa jäähdytyksessä lauhduttimen kautta laskeaan kuumaa korkeapaineista kylmäainehöyryä lämpötilaa. Tämä kylmäaineen lämpötilan laskeminen tapahtuu kontrolloidusti siihen annetuissa raja-arvoissa joko ilma- tai nestelauhteisesti.

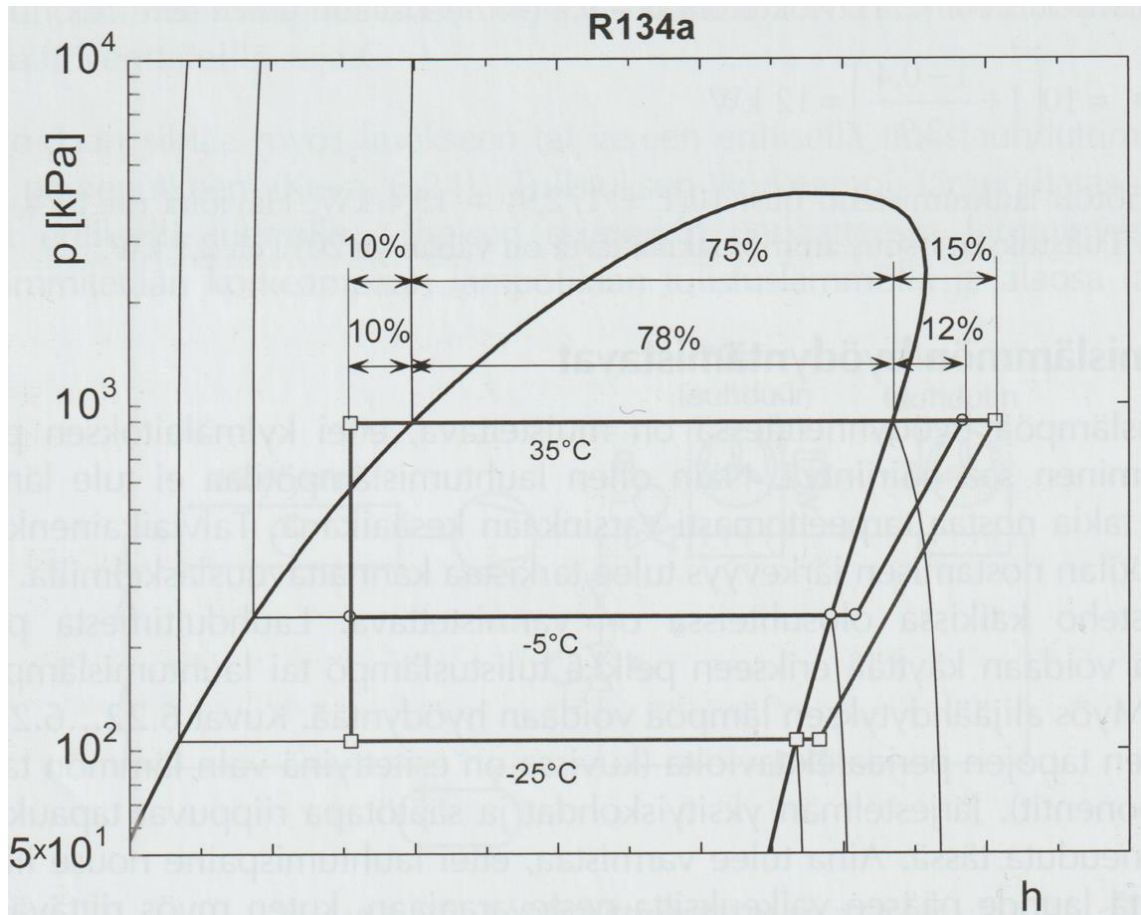
Maalämpöjärjestelmän lämpöpumpussa siis syntyy lauhdelämpöä ja sitä on mahdollista hyödyntää kuvassa 8 esitetyllä tavalla. Rejlers Rakentaminen Oy halusi kuitenkin myös tuoda opinnäytetyöhön näkökulmaa siitä, miten suurempien kylmäkoneistojen lauhdelämpöä voidaan hyödyntää. Näitä suurempia kylmäkoneistoja löytyy liikkeistä, joissa kylmää tarvitsee tuottaa koko ajan esimerkiksi viileässä säilytettävillä elintarvikkeilla.

6.1 Lauhdelämpö

Kylmäaineen kierrossa lauhduttamisessa muodostuu lauhdelämpöä, joka koostuu kolmesta eri osatekijästä: tulistusslämmöstä, lauhdelämmöstä sekä alijäädytyksen lämmöstä. Tulistusslämmön osuus lauhdutustehosta on noin 10–20 % ja alijäädytyslämmön osuus vain 0–5 %. Varsinaisen lauhdutusslämmön osuus on suurin 80–90 %. (Kylmälaitoksen suunnittelu 2013, 217.)

Kylmäaineella on myös merkitystä kylmäainekierron syntyvään lauhdelämpöön. Kylmäaineet poikkeavat toisistaan eniten puristuksessa tapahtuvan lämpiämisen ja tulistuksen entalpiaosuuksien osalta. Kuvassa 18 on esitetty R134a-kylmäaineen kiertoprosessi tietyissä lämpötiloissa. R134a on erittäin yleinen kylmäaine, jota käytetään esimerkiksi teollisuuden kylmälaitteissa sekä asuinrakennuksien ilmastoinneissa.

Kuvassa 18 on havainnollistettu, millainen merkitys höyrystyslämpötilalla on lauhtumislämmön määrään. Voidaan huomata, että höyrystyslämmön las-
 kiessa -5 asteesta -25 asteeseen tulistusteho nousee 3 %, lauhtumisteho laskee
 3 %, mutta alijäähdysteho pysyy samana. Tämä 20 asteen ero höyrystisläm-
 mössä vaikuttaa eri suuruudelle eri kylmäaineiden välillä, joten jokaista kylmäai-
 netta on tarkasteltava erikseen. (Kylmäteknikka, 208.)



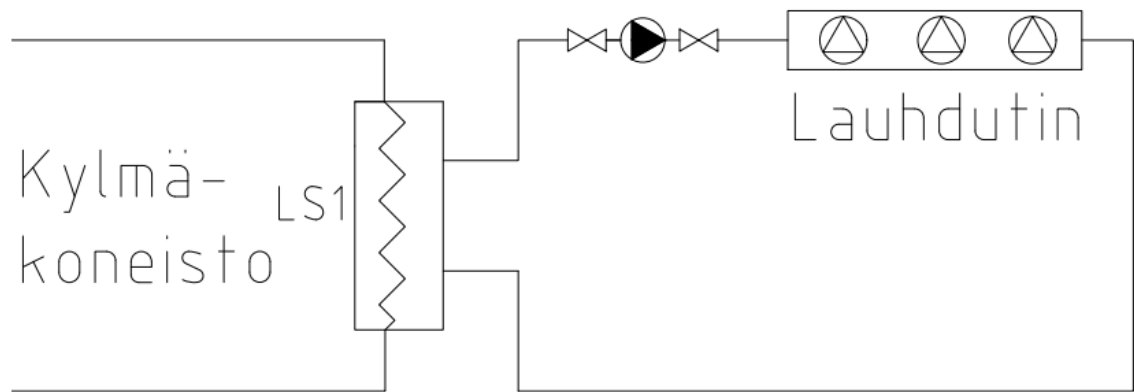
KUVA 18. R134a kylmäaineen höyrystyslämpötilan vaikutus lauhtuttimen te-
 hon jakautumaan. (Kylmäteknikka 2021, 209.)

6.2 Välillinen ja suora lauhdutus

Koneellisessa jäähdytyksessä lauhtuttaminen voidaan toteuttaa suoralla tai vä-
 lillisellä tavalla. Suorassa lauhtuttamisessa lämpö siirretään lauhtuttimen avulla
 ulkoilmaan suoraan kylmäaineesta. Suoraa lauhtutusta käytetään usein koh-

teissa, joissa järjestelmän halutaan olevan edullinen. Lisäksi suorassa lauhduttuksessa lämmöntalteenoton mahdollisuudet ovat pienemmät kuin välillisessä lauhduttuksessa. (Kylmälaitoksen suunnittelu 2013, 51.)

Välillisessä järjestelmässä kylmäjärjestelmän lauhduttaminen suoritetaan lämmönsiirtimen avulla. Lämmönsiirtimen avulla kylmäaineeseen sitoutunut lämpö siirretään lauhduttimen puoleisen lauhdutuspiirin nesteeseen. Lauhdutuspiirin nesteestä on mahdollista ottaa lämpöä talteen lämmönsiirtimien avulla. Kuvassa 19 on havainnollistettu, kuinka välillinen lauhdutus toimii. Lämmönsiirrin (LS1) toimii lauhduttimena. (Kylmälaitoksen suunnittelu 2013, 51.)



KUVA 19. Välillinen lauhdutus.

7 MAA- JA AURINKOLÄMMÖN HYBRIDIJÄRJESTELMIEN KYTKENTÄ- KAAVIOT

Auringosta saatavaa energiaa on mahdollista hyödyntää maalämpöjärjestelmässä. Aurinkojärjestelmän lisäämistä maalämpöjärjestelmään on kuitenkin tehtävä siten, että maalämpöjärjestelmä on pääasiallinen energiantuottaja, ja aurinkokeräimistä saatava energia on ns. lisäenergiaa, jolla parannetaan järjestelmän energiatehokkuutta. Seuraavaksi käsitellään, miten aurinkokeräimet on mahdollista kytkeä maalämpöjärjestelmään ja mitä hyötyä siitä on.

Lisäksi aurinkoenergialla on mahdollista tuottaa sähköä aurinkopaneelien avulla. Tätä sähköä voidaan esimerkiksi käyttää hybridijärjestelmän sähkökuormiin, joita ovat esimerkiksi maalämpöpumppu, varaajien vastukset ja kiertovesipumput.

7.1 Maa- ja aurinkolämmön kytkentätapa 1

Kytkentätavassa 1 aurinkojärjestelmä ja maalämpöjärjestelmä ovat asennettu rinnan, jolloin ne toimivat periaatteessa omina järjestelminään. Molemmat järjestelmät tuottavat lämmitysenergiaa kiinteistön lämpimälle käyttövedelle sekä lämmitysjärjestelmälle. Yksinkertainen kytkentäkaavio kytkentätavasta 1 löytyy liitteestä 1.

Aurinkokeräimistä saatava lämpö käytetään kytkentäkaaviossa olevien varaajien lämmittämiseen. Aurinkokeräimistä saatava lämpö siirretään sen omasta lämmönkeruupiiristä puskurivaraajaan (L-varaaja) ja lämpimän veden varaajaan (LV-varaaja) lämmönsiirtimen (LS1) avulla. Aurinkokeräimen lämmönkeruupiiriä ohjataan omalla taajuusmuuttaja pumpulla. Maalämpöjärjestelmä tuottaa varaajiin lämpöä silloin, kun aurinkojärjestelmä ei siihen yksin pysty. Järjestelmää ohjataan automaation avulla.

Kesäkuukausina on mahdollista, että aurinkoenergiaa on niin paljon saatavilla, että varaajien lämpötilat saadaan nostettua mitoitusarvoihin. Tässä tilanteessa

maalämpöjärjestelmän ei tarvitse tuottaa ollenkaan lämpöä. Käytännössä järjestelmä hyödyntää vain auringosta saatavaa ”ilmaista” energiaa. Kytkenässä ei kuitenkaan oteta huomioon sitä, että jos järjestelmän varaajat saadaan ”ladattua” eli siis varaajien lämpötilat saadaan mitoitusarvoihin, ei saatavilla olevaa aurinkoenergiaa pystytä hyödyntämään enempää. Tässä kytkentätavassa ei siis käytetä kaikkia saatavilla olevaa energiaa, joten tämä kytkentä ei ole kaikista energiatehokkain tapa muodostaa aurinko- ja maalämmön hybridijärjestelmää.

7.2 Maa- ja aurinkolämmön kytkentätapa 2

Kytkenätapa 2 on kytkentämalli, jota voidaan hyödyntää maa- ja aurinkolämmön hybridijärjestelmässä. Tämä kytkentätapa on esitettyä yksinkertaisena kytkentäkaaviona liitteessä 2.

Tässä kytkennässä aurinkoenergiaa hyödynnetään siten, että sen avulla pyritään nostamaan maalämpöpumpulle menevän lämmönkeruunesteen lämpötilaa. Aurinkokeräin on siis yhdistetty sarjaan kytkennällä maalämpöjärjestelmään, muodostaen hybridijärjestelmän. Aurinkokeräin nostaa sen omassa piirissä olevan nesteen lämpötilaa. Tätä omaa piiriä ohjataan taajuusmuuttaja pumpulla. Aurinkokeräin piirin lämmitetyn nesteen avulla pystytään nostamaan lämmönkeruunesteen lämpötilaa lämmönsiirtimen (LS1) avulla. Lämmönkeruunesteen lämpötilan noustessa pystytään parantamaan maalämpöpumpun lämpökerrointa. Syy tähän on, että höyrystimessä saadaan kylmäaineen lämpötilaa korkeammaksi aurinkolämmöllä lämmitetyn lämmönkeruunesteen ansiosta, jolloin kompressorin työ eli sen käyttämä energia jää pienemmäksi. Tällöin saadaan maalämpöpumpun vuotuista ostoenergiaa vähennettyä, joka parantaa järjestelmän taloudellista kannattavuutta sekä nopeuttaa järjestelmän takaisinmaksuaikaa.

Lämpiminä kuukausina maalämpöpumppu on vähäisemmällä käytöllä, sillä lämmitystä ei tarvita samassa laajuudessa kuin kylmempinä kuukausina. Kuitenkin tällöin lämpiminä kuukausina aurinkoenergiaa on eniten saatavilla. Tässä tilanteessa tämän kytkentätavan avulla saadaan aurinkoenergialla kohotettua maalämpöjärjestelmän energiakaivojen lämpötilaa. Aurinkokeräin nostaa jälleen

omassa piirissä olevan nesteen lämpötilaa, jonka sisältämä lämpö siirretään lämmönkeruunesteeseen lämmönsiirtimen (LS1) avulla. Maalämpöpumppu ei tässä tilanteessa käy, eli se ei siis käytä lämmönkeruunesteen sisältävää lämpöä. Tämä nesteeseen varastoitunut lämpö siis siirtyy energiakaivoon.

Lämpiminä kuukausina siis ”ladataan” energiakaivoja niin paljon kuin se on mahdollista. Kun maalämpöpumppu alkaa jälleen tuottamaan lämpöä, on sen lämpökerroin parempi, sillä höyrystimessä kiertävän lämmönkeruunesteen lämpötila on korkeampi lämpimien kuukausien aikana ”ladattujen” energiakaivojen myötä. Näin saadaan entistä energiatehokkaampia järjestelmiä. Tällaisien järjestelmien pääasiallisena ideana on se, että kun energiaa on saatavilla, se myös pystytään aina hyödyntämään.

7.3 Maa- ja aurinkolämmön kytkentätapa 3

Kytchentätapa 3 on kytkentämalli, jossa pystytään hyödyntämään vielä hieman laajemmin auringosta saatavaa energiaa verrattuna kahteen edelliseen kytkentätapaan. Tämän kytkentätavan yksinkertaistettu kytkentäkaavio on esitetty liitteessä 3.

Aurinkokeräimen avulla kerättyä energiaa siirretään sen omassa piirissä olevaan nesteeseen, jolloin sen lämpötila nousee. Aurinkokeräimen piirin virtaamaa ohjataan taajuusmuuttaja pumpulla. Piirin nesteessä sisältämä lämpöenergia saadaan siirrettyä hybridijärjestelmässä eteenpäin lämmönsiirtimien (LS1 ja LS2) avulla.

Lämmönsiirtimen ”LS1” avulla on mahdollista nostaa puskurivaraajan (L-varaaja) sekä lämpimän käyttöveden varaajan (LV-varaaja) lämpötilaa. Varaajien lämpötilat pyritään nostamaan aurinkoenergian avulla niille asetettuihin mitoitusarvoihin. Varsinkin lämpiminä kuukausina, kuten kytkentätavassa 1, pyritään varaajien lämpötilat nostamaan mitoitusarvoihin. Näin maalämpöpumpun ei tarvitse tuottaa lämpöä varaajiin, jolloin järjestelmästä tulee energiatehokkaampi.

Lämpimänä kuukausina, kun aurinkoenergiaa on niin paljon, että varaajat on saatu ”ladattua” täyteen, on tällä kytkennällä myös mahdollista lämmittää lämmönkeruunesteen lämpötilaa. Lämmönkeruunesteen lämpötilaa nostetaan ja sen sisältämä lämpö varastoidaan energiakaivoon samalla periaatteella kuin kytkentävassa 2 on selitetty.

Kylminä kuukausina aurinkoenergiaa säädellään automatiikan avulla. Automatiikan avulla ohjataan, ladataanko aurinkoenergialla hybridijärjestelmissä olevia varaajia vai nostetaanko sillä lämmönkeruunesteen lämpötilaa.

Tämä kytkentämalli on monimutkaisempi kuin edellä esitetyt kaksi. Kuitenkin tällä kytkentämallilla on mahdollista saavuttaa energiatehokkaampi järjestelmä, joka on erittäin tärkeää. Ja mikä tärkeintä, saadaan hyödynnettyä kaikki saatavilla oleva energia.

8 MAALÄMMÖN JA JÄTEVEDEN LÄMMÖNTALTEENOTON HYBRIDIJÄRJESTELMÄN KYTKENTÄKAAVIO

Maalämpöjärjestelmän hyötysuhdetta on mahdollista parantaa liittämällä järjestelmään Ecowecin hybridivaihtimen. Hybridivaihtimella on mahdollista nostaa lämmönkeruupiirin nesteen lämpötilaa, jonka vaikutuksesta maalämpöpumpun hyötysuhde kasvaa. Näin saadaan myös vähennettyä lämpöpumpun sähkönkulutusta (kompressori). Hybridivaihdin kasvattaa maalämpöpumpun tehoa sekä sen tuottoa. Maalämpöjärjestelmät mitoitetaan usein siten, että järjestelmä ei vastaa koko kohteen lämmön- ja käyttövedentarvetta, vaan osa katetaan sähköllä. Hybridivaihtimen avulla järjestelmä on mahdollista mitoittaa täystehoiseksi, koska järjestelmä ei ole riippuvainen vain lämmönkeruupiiristä saatavasta primäärienergiasta. (Ecowec a N.d.)

Hybridivaihtimen avulla jätevedestä saatavalla primäärienergialla on mahdollista kattaa osa maalämpöjärjestelmän tarvitsemista keruupiireistä, kuten energiakaivoista. Tämän vuoksi osa energiakaivoista voidaan jättää poraamatta ja maalämpöjärjestelmiä saadaan enemmän alueille, joissa tonteilla ei ole tilaa useille energiakaivoille. Lisäksi maalämpöjärjestelmän kokonaisinvestointi ei kasva, vaikka siitä tulee entistä energiatehokkaampi. (Ecowec a N.d.)

Maalämpöjärjestelmässä oleva lämpöpumppu tarvitsee käytön aikana myös säännöllisesti huoltoa. Hybridivaihdin nostaa lämmönkeruunesteen lämpötilaa, jolloin sen lämpötila on lähempänä tuotettavan veden lämpötilaa ja maalämpöpumppu käy tasaisemmin. Tästä syystä maalämpöpumppu on kestävämpi ja tarvitsee yhä vähemmän korjauksia ja huoltoa. (Ecowec a N.d.)

8.1 Ecowec-hybridivaihtimen kytkentä maalämpöjärjestelmään

Liitteessä 5 on esitetty kytkentämalli, jossa hyödynnetään Ecowecin hybridivaihtinta jätevesipumppaamon avulla. Jätevedestä saatavalla energialla lämmitetään vaihtimessa energiakaivosta tulevaa lämmönkeruunestettä. Näin saadaan maalämpöpumpun energiatehokkuutta tehostettua.

Kun maalämpöpumpun ei tarvitse tuottaa lämpöä, voidaan lämmönkeruupiirin nestettä silti kierrättää piirin läpi. Tällöin ladataan jätevedestä saatavaa lämpöä energiakaivoon. Näin saadaan hyödynnettyä kaikki jätevedestä tarjolla oleva energia.

Kytkentämallista voidaan huomata, että hybridivaihtimeen on suunniteltu ohituslinja lämmönkeruupiirin nesteelle. Ohituslinjaa ohjataan magneettiventtiin avulla. Tämä tehdään siitä syystä, että lämmönkeruupiirin nesteen lämpötila voi laskea alle 0 asteen. Ohituslinjan avulla voidaan alle 0 asteinen neste kierrättää hybridivaihtimen ohi. Tämä tehdään, sillä sen avulla estetään jäteveden mahdollinen jäätymisvaara. (Ecowec a N.d.)

Kytkentämalli ei sisällä erikseen käyttövedelle sähkökattilaa. Kytkenässä oletetaan, että Ecowecin hybridivaihtimesta saadaan niin paljon energiaa, että sähkökattilaa ei tarvita. Jos kuitenkin halutaan varmistua siitä, että lämpimän käyttöveden ja lämmityksen lämpötila on sille asetetuissa lämpötiloissa, on mahdollista molempiin varaajiin asentaa sähkövastuksia.

9 MAA- JA LAUHDELÄMMÖN LÄMMÖNTALTEENOTON HYBRIDIJÄRJESTELMIN KYTKENTÄKAAVIOT

Maalämpöpumppu on erittäin järkevä valinta pääasiallisesti energiantuottajaksi kohteessa, jossa on kylmäkoneisto, sillä sen tuottamaa lauhdelämpöä voidaan hyödyntää maalämpöjärjestelmässä.

Suunnitteluvaiheessa on huomioitava lämmön tarpeen ja jäähdytyksen tarpeen samanaikaisuus, koska sillä on suuri vaikutus järjestelmän kannattavuuteen. Sillä usein kylmäkoneistot käyvät silloin, kuin esimerkiksi lämmitystä ei tarvita. Lisäksi myös kohteeseen suunniteltavien jäähdytyksen ja lämmityksen lämpötilatasojen eroavaisuus on syytä ottaa huomioon, koska se vaikuttaa lauhdelämmön hyödyntämisen kannattavuuteen. (Kylmätekniikka 2021, 348)

Usein lauhtumislämmön hyödyntäminen vaatii lauhtumislämpötilatason nostamista verrattuna pelkkään jäähdytyskäyttöön. Seurauksena on sähkön kulutuksen nostaminen, sillä kompressorin täytyy nostaa kylmäainehöyryn lämpötilaa. Jokainen kohde on siis tarkasteltava yksityiskohtaisesti laskelmin, jotta järjestelmä olisi kannattava. Jäähdytyskoneen lauhdelämmöstä hyödynnettävää lämpöä on mahdollista nostaa korkeampaan lämpötilaan lämpöpumpputekniikan avulla. Näin lauhdelämpöä saadaan hyödynnettyä laajemmin ja energiatehokkaammin. (Kylmätekniikka 2021, 348.)

9.1 Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentätapa 1

Liitteessä 6 on mallinnettu ensimmäinen kytkentätapa, jossa maalämpöjärjestelmä voi hyödyntää kylmäkoneistossa syntyvää lauhdelämpöä. Sen avulla voidaan nostaa lämmönkeruupiirin nesteen lämpötilaa lämmönsiirtimen (LS2) avulla. Kun lämmönkeruunesteen lämpötilaa nostetaan, saadaan parannettua maalämpöpumpun energiatehokkuutta. Maalämpöpumpun energiatehokkuus

paranee, koska höyrystimessä saadaan nostettua kylmäaineen lämpötilaa korkeammalle, ja näin kompressorin täytyy nostaa vähemmän kylmäaineen lämpötilaa.

Tätä kytkentämallia on mahdollista hyödyntää sekä välillisessä että suorassa lauhdutuksessa. On kuitenkin huomioitava, että lauhdelämpöä on saatavilla vain tietty määrä. Suorassa lauhdutuksessa on tehtävä ohitus lämmönsiirtimelle (LS2). Tämä siksi, että kylmäaine ei lauhdu liikaa eli sen lämpötila ei laske alle sille asetetulle minimiarvolle.

Välillisessä lauhdutuksessa kylmäaine lauhdutetaan lämmönsiirtimen avulla toiseen neste piiriin, kuten aiemmin on kerrottu. Tätä nestettä voidaan kierrättää lämmönsiirtimellä (LS2). Tällöin lauhdelämpö saadaan siirrettyä lämmönkeruupiiriin nesteeseen. Lämmönkeruunestettä virtaamaa ohjataan taajuusmuuttaja pumpulla, joka ohjautuu lauhteen lämpötilan mukaan.

Lämpiminä kuukausina lämmityksen tarve on pienempää kuin kylminä kuukausina. Tällöin maalämpöpumpun ei tarvitse käydä kovinkaan paljoa. Tällöin lauhdelämpöä voidaan varastoida energiakaivoon. Energiakaivon lämpötilaa saadaan nostettua. Kun maalämpöpumppu alkaa jälleen tuottamaan kylminä kuukausina tuottamaan enemmän lämpöä, saadaan energiakaivoihin ”ladattu” lämpö hyötykäyttöön ja järjestelmän energiatehokkuus paranee.

9.2 Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentätapa 2

Lauhdelämmöstä noin 10–20 % on tulistuslämpöä. Liitteessä 7 olevassa kytkentätavassa hyödynnetään juuri tulistuslämpöä. Tulistuslämmön avulla on mahdollista lämmittää maalämpöjärjestelmän lämminvesivaraajan (LV-varaaja) yläosaa. Tämä siksi, koska tulistuslämpö on erittäin korkea lämpöistä, ja se on järkevintä hyödyntää lämminvesivaraajan yläosan lämmittämisessä. Tämän avulla saadaan vähennettyä järjestelmän sähkön käyttöä, eli siis sähkövastuksen käyttö vähentyy.

Tulistuslämpö hyödynnetään erillisen lämmönsiirtimen avulla. Kytkentäkaaviossa tämä kyseinen lämmönsiirrin on ”LS2”. Lämmönsiirtimessä kierrätetään taajuusmuuttaja pumpun avulla vettä lämminvesivaraajan tarpeen mukaan. Järjestelmässä on kuitenkin hyvä olla mukana sähkökattila tai varaajassa oleva vastus, jotta saadaan käyttöveden lämpötila tarpeeksi korkealle. Näin vältetään Legionella-bakteerilta.

9.3 Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentätapa 3

Lauhdelämpöä on mahdollista käyttää laajasti hyödyksi maalämpöjärjestelmässä. Tässä kytkentätavassa hyödynnetään niin lauhdelämpöä kuin tulistuslämpöä ja sen kytkentäkaavio on esitetty liitteessä 8.

Tulistuslämpöä hyödynnetään täysin samalla tavalla kuin kytkentätavassa 2. Eli siis sen avulla lämmitetään lämminvesivaraajan yläosaa tarpeen mukaan. Tätä piiriä ohjataan taajuusmuuttaja pumpulla. Tässäkin järjestelmässä on mukana sähkökattila, jotta lämpimän veden lämpötila on aina tarpeeksi korkea. Tämä siksi, että vältetään Legionella-bakteerilta.

Lauhdelämpöä järjestelmä hyödyntää hieman monimutkaisemmin kuin aikaisemmissa kytkentätavoissa. Lämmityksestä palaavaa vettä hyödynnetään lämmönkeruunesteen lämpötilan nostamisessa. Tämän jälkeen, kun lämmityksestä palaava neste on luovuttanut lämmönsiirtimen (LS4) kautta lämpöä lämmönkeruupiiriin, nostetaan sen lämpötilaa lauhdelämmön avulla. Lauhdelämpö siirretään lämmityksen nesteeseen lämmönsiirtimen (LS3) avulla. Tätä piiriä ohjataan taajuusmuuttaja pumpulla. Tämän jälkeen lämmityksen neste menee lämmitysvaraajaan, josta se otetaan sitten takaisin lämmitysjärjestelmään.

Lämpiminä kuukausina tässä kytkentämallissa on mahdollista hyödyntää lauhdelämmöstä saatava energia energiakaivoihin, kuten kytkentätavassa 2. Lauhdelämmön talteenotosta muodostuu ns. oma piiri. Tässä piirissä kierrätetään vettä, jonka lämpö siirretään lämmönkeruunesteeseen, ja jäähtyneen veden läm-

pötilaa nostetaan jälleen lauhdelämmöllä. Näin on mahdollista, että saadaan hyödynnettyä saatavilla oleva energia mahdollisimman tehokkaasti myös silloin, kun lämmitysjärjestelmää ei tarvita.

10 POHDINTA

Tämän työn tavoitteena oli luoda teknillinen opas lämmityksien hybridijärjestelmiin. Työssä käydään läpi kolme erilaista lämmityksen hybridijärjestelmää. Näissä kolmessa hybridijärjestelmissä käytettyjen järjestelmien teoriaa käydään laajalti läpi kirjallisuuden avulla. Lisäksi hyödynnetään myös Rejlersiltä saatujen todellisten kohteiden kytkentäkaavioita.

Teoriaa työssä oli erittäin paljon, jopa liikaa. Työssä olisi voinut käydä läpi enemmän mm. dataa kohteista, joihin Rejlers on hybridijärjestelmän suunnitellut. Näin lukija olisi nähnyt konkreettisia lukuja siitä, millaisia tuloksia kyseisillä hybridijärjestelmillä voi todellisuudessa saavuttaa ja kuinka kannattavia ne ovat. Jos kuitenkin olisin alkanut kohteiden dataa käsittelemään, olisi opinnäytetyö laajuus kasvanut mielestäni jo liian suureksi, eikä aika tämä tekemiselle olisi riittänyt. Johonkin oli siis vedettävä raja.

Työssä tärkeänä pointtina pidän sitä, että lämmityksen hybridijärjestelmät ovat hyvin yksilöllisiä. Tällä tarkoitan sitä, että suunnittelijan on ymmärrettävä se, että jokainen hybridijärjestelmä on omansa. On tietenkin varmasti toinen samankaltainen kohde toteutettuna, mutta on hyvä muistaa, että jokaisella kohteella on mm. oma lämmitysveden lämpötila, lämmönjakotapa ja sijainti. Jo näillä tekijöillä on suuri vaikutus siihen, onko lämmityksen hybridijärjestelmä kannattava toteuttaa kohteeseen ja jos on, miten sen toteuttaa. Siksi lämmityksen hybridijärjestelmiin on järkevää tehdä laskelmia ja verrata myös sitä samankaltaisiin muihin kohteisiin. Tämä siksi, ettei suunniteltaisi turhia hybridijärjestelmiä, joiden hyötysuhde on heikkoa eivätkä ne parantaisi alkuperäistä lämmitysjärjestelmää.

Tulevaisuudessa lämmityksen hybridijärjestelmät tulevat kuitenkin aivan varmasti lisääntymään. Jo noussut energianhinta sekä myös kiinteistöjen energiatehokkuuteen tehtyjen lakien kautta hybridijärjestelmiä on alettu pitämään potentiaalisina järjestelminä, joihin kannattaa rahaa sijoittaa. Hybridijärjestelmien pitäisi oikein suunniteltuna kuitenkin olla aina positiivinen sijoitus, joka maksaa itsensä tietyssä ajassa takaisi, jonka jälkeen se alkaa ”tuottamaan” rahaa.

Työssä laajalti tehtävää kirjallisuusselvitystä tehdessä sain kuitenkin paljon hyödyllistä teknistä tietoa. Käsittelemäni järjestelmät ovat yleistymässä ja koen tärkeäksi, että niiden tekniikka ymmärretään. Kokonaisuudessaan opinnäytetyöprosessissani opin lämmityksen hybridijärjestelmistä paljon ja koen, että valmistumiseni jälkeen siitä on paljon hyötyä.

LÄHTEET

Aittomäki, A (toim.). 2012. Kylmäteknikka. Painos 4. Bookwell Oy.

Alternative energy tutorials a. N.d. Flat plate collector. Luettu 23.1.2023.
<https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/flat-plate-collector.html>

Alternative energy tutorials b. N.d. Evacuated tube collector. Luettu 23.1.2023.
<https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html>

Ecowec a. N.d. Ecowec-hybridivaihdin suunnitteluohjeet. Luettu 28.2.2023

Ecowec b. N.d. Jäteveden lämmöntalteenotto. Luettu 6.2.2023. <https://ecowec.com/ratkaisut/jateveden-lammontalteenotto/>

Finess. N.d. Jäteveden lämmöntalteenotto. Luettu 15.2.2023. <https://finess.fi/jarjestelmat/jateveden-lammontalteenotto>

Gaia. 4.11.2021. Missä jäteveden hukkalämpö kannattaa ottaa talteen. Luettu 8.2.2023. <https://gaia.fi/fi/missa-jateveden-lampo-kannattaa-ottaa-talteen/>

Gebwell a. N.d. Maalämpö. Luettu 9.1.2023. <https://gebwell.fi/maalampo/>

Gebwell b. N.d. Maalämpö. Maalämpö suurten kiinteistöjen lämmityksessä. Luettu 20.1.2023. <https://gebwell.fi/maalampo/maalampo-suurten-kiinteistojen-lammityksessa/>

Hakala, P & Kaappola, E. Kylmälaitoksen suunnittelu. 2013. Painos 3. Opetushallitus

Hirvelä, A., Jokela, M., Kaappola E. & Kianta. J. 2022. Kylmäteknikan Perusteet. Painos 10. Opetushallitus.

Juvonen, J & Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo. Luettu 10.1.2023.
https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Motiva a. 5.8.2020. Tasokeräimet. Luettu 24.1.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/nestekiertoiset_keraimet/tasokeraimet

Motiva b. 11.1.2023. Aurinkopaneelien asentaminen. Luettu 24.1.2023.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen

Motiva c. 22.8.2023. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Luettu 24.1.2023.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa

Motiva d. 25.3.2022. Aurinkokeräinten hyötysuhteet. Luettu 1.2.2023.

https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampo-jarjestelmat/aurinkokerainten_hyotysuhteet

Motiva e. 2.8.2022. Aurinkosähköteknologiat. Luettu 1.2.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat

Nyman, M. 2019. Aurinkokennoteknologiat ja niiden kierrätys. Luettu 2.2.2023.

<http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201912203374.pdf>

Purhonen, S. 2016. Energiakaivojen mitoitukseen liittyvät tekijät. Luettu

11.1.2023. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/108157/Energiakai-vojen%20mitoitukseen%20liittyvat%20tekijat.pdf>

Rakentamismääräykset. Asetuksiin liittyvät ympäristöministeriön ohjeet. Energiategohkuus – Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen las- kenta (2018). Luettu 7.2.2023. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

Sandberg, E. 2016. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Osa 1. Painos 2. Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Seppänen, O. 2001. Rakennusten lämmitys. Painos 2. Suomen LVI-liitto ry.

Sähkölaitos. N.d. Lämpöratkaisut. Luettu 7.2.2023. <https://www.sahkolai-tos.fi/yrityksille-ja-taloyhtiaille/lamporatkaisut/>

Tahkokorpi, M (toim.). 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Into Kustannus.

Tilastokeskus. 10.6.2022. Kotitalouksien kulutus. Asunnon pääasiallinen lämmitystapa talotyypeittäin, 2012–2022. Luettu 23.1.2023.

https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ktuk/stat-fin_ktuk_pxt_13qk.px/table/tableViewLayout1/

Turpeinen, A. 2019. Jäteveden lämmöntalteenotto asuinkerrostaloissa. Luettu 6.2.2023. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/168895/Turpeinen_Antti.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta

20.12.2017/1010. Luettu 6.2.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010#Pidm45053757047552>

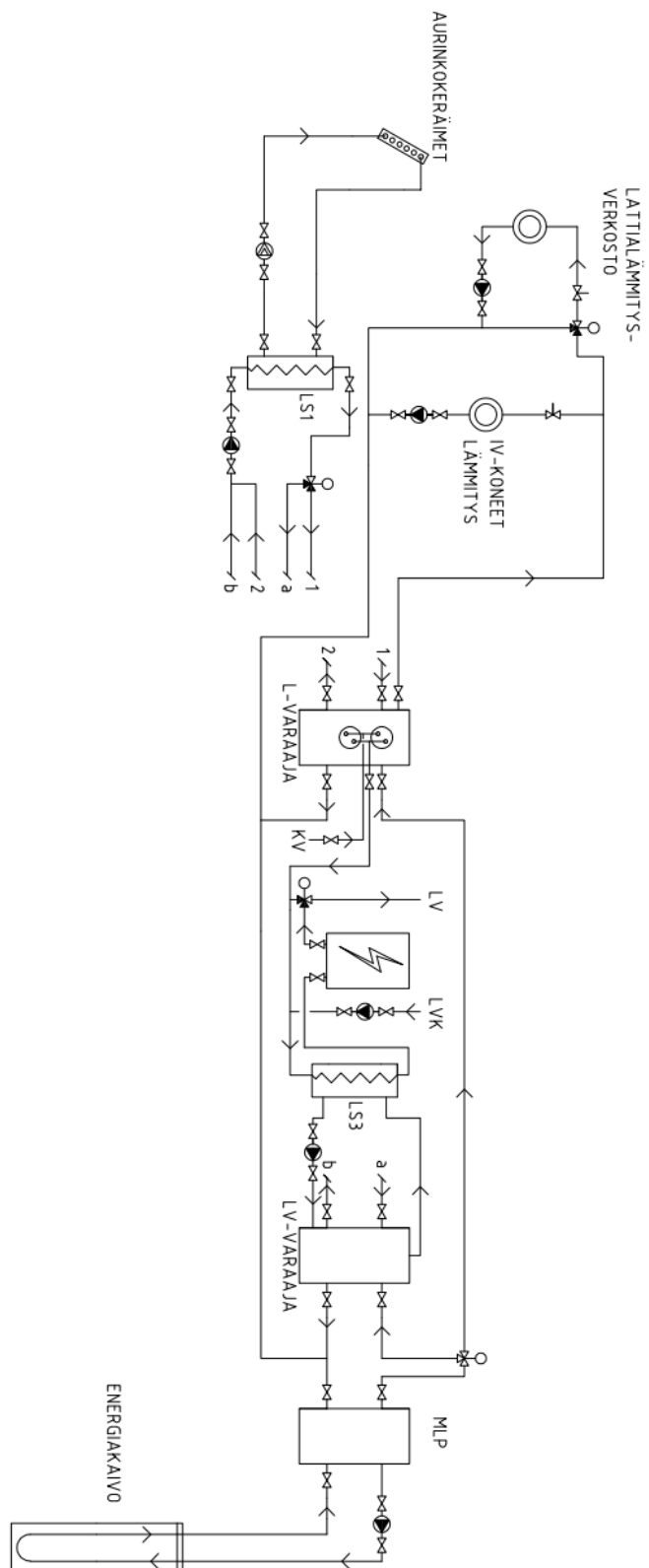
Vattenfall. N.d. Aurinkovoima. Luettu 1.2.2023. <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/aurinkovoima/>

Virtanen, Veli-Matti. 2019. Aurinkopaneelien lämmönsiirto. Luettu 2.2.2023.

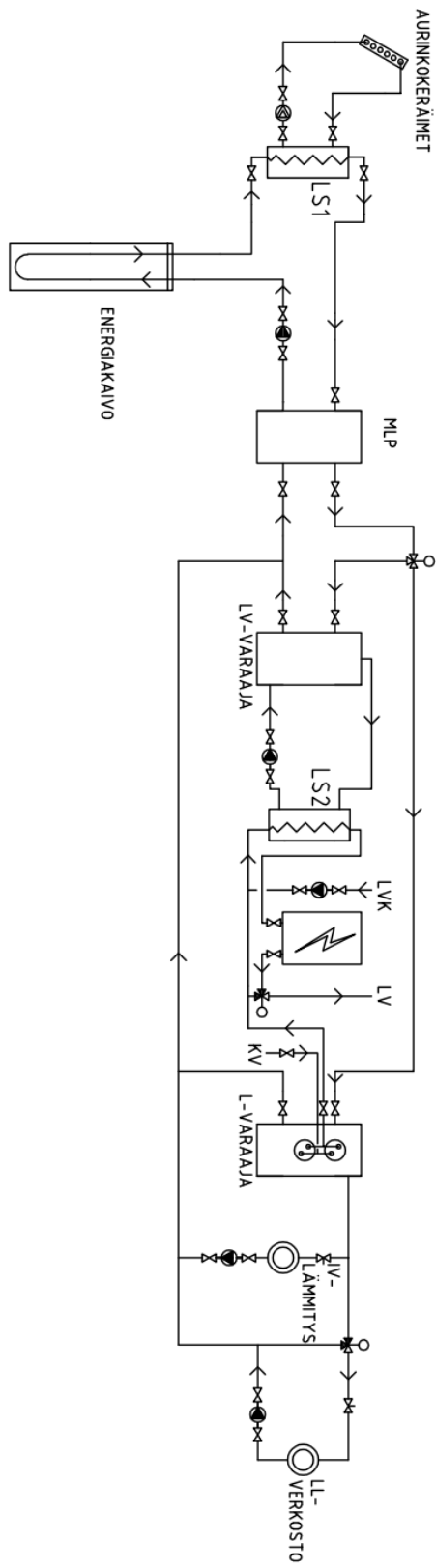
<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159313/Aurinkopaneelien%20l%C3%A4mm%C3%B6nsiirto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

LIITTEET

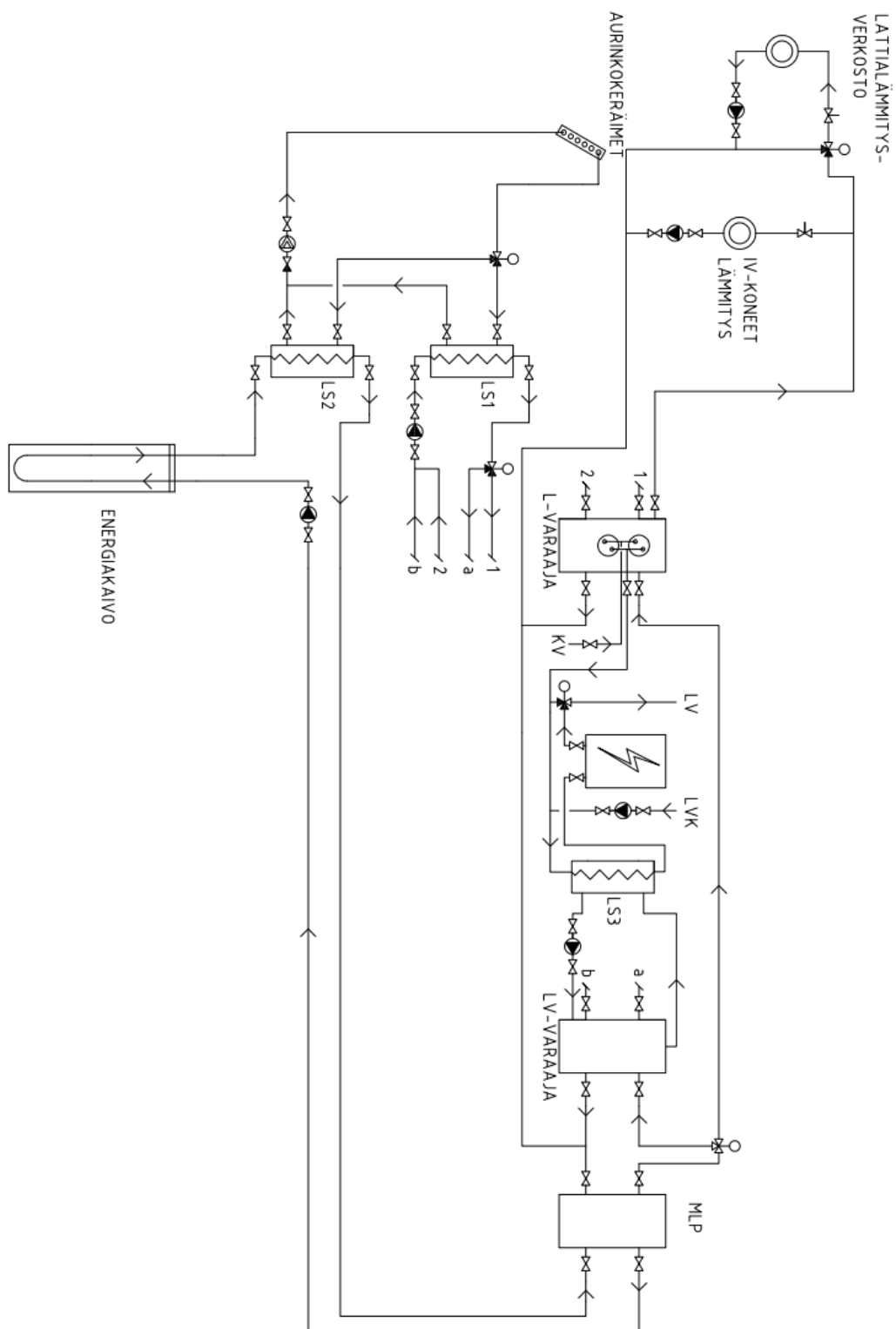
Liite 1. Maa- ja aurinkolämmön kytkentäkaavio 1



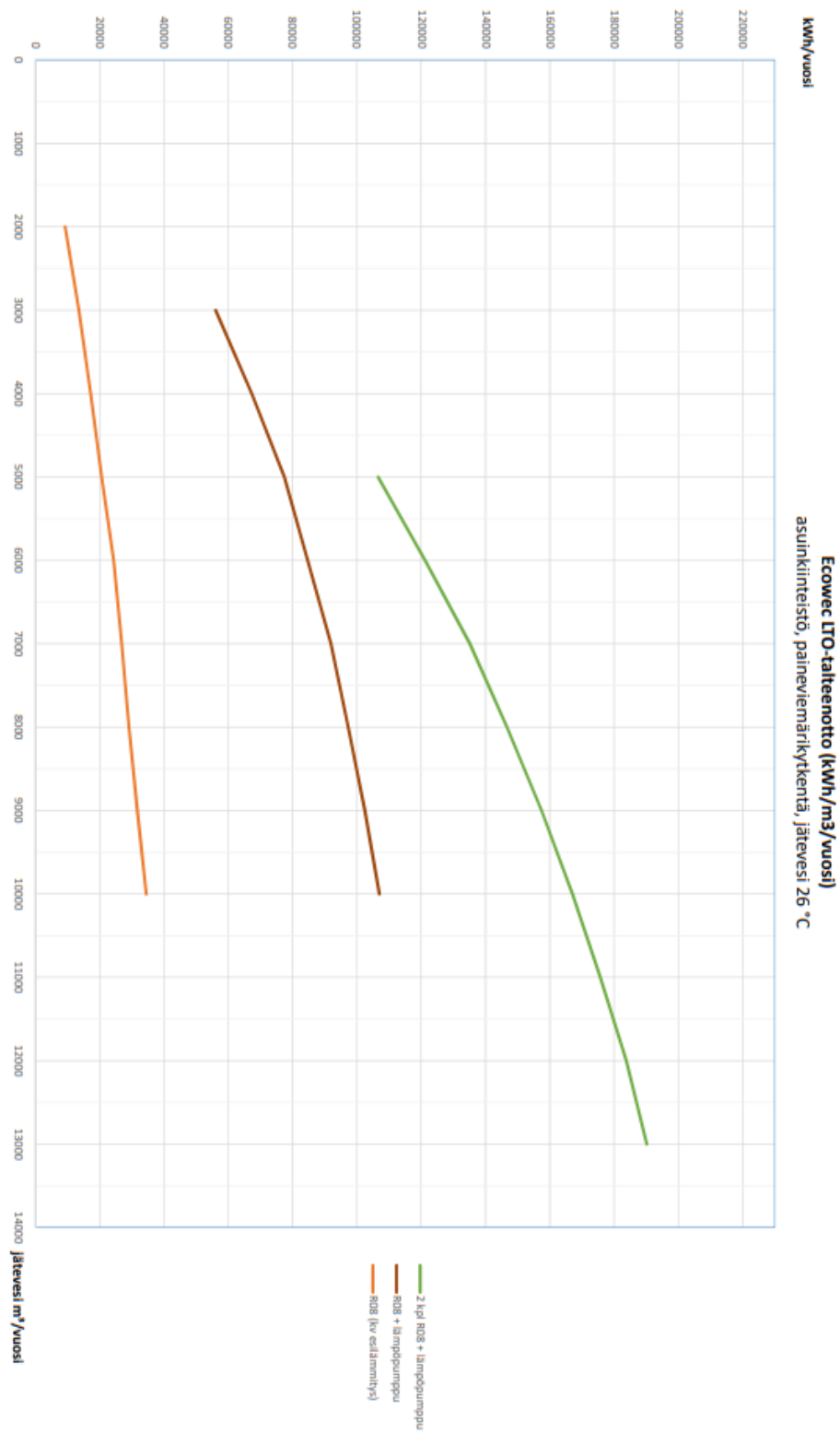
Liite 2. Maa- ja aurinkolämmön kytkentäkaavio 2



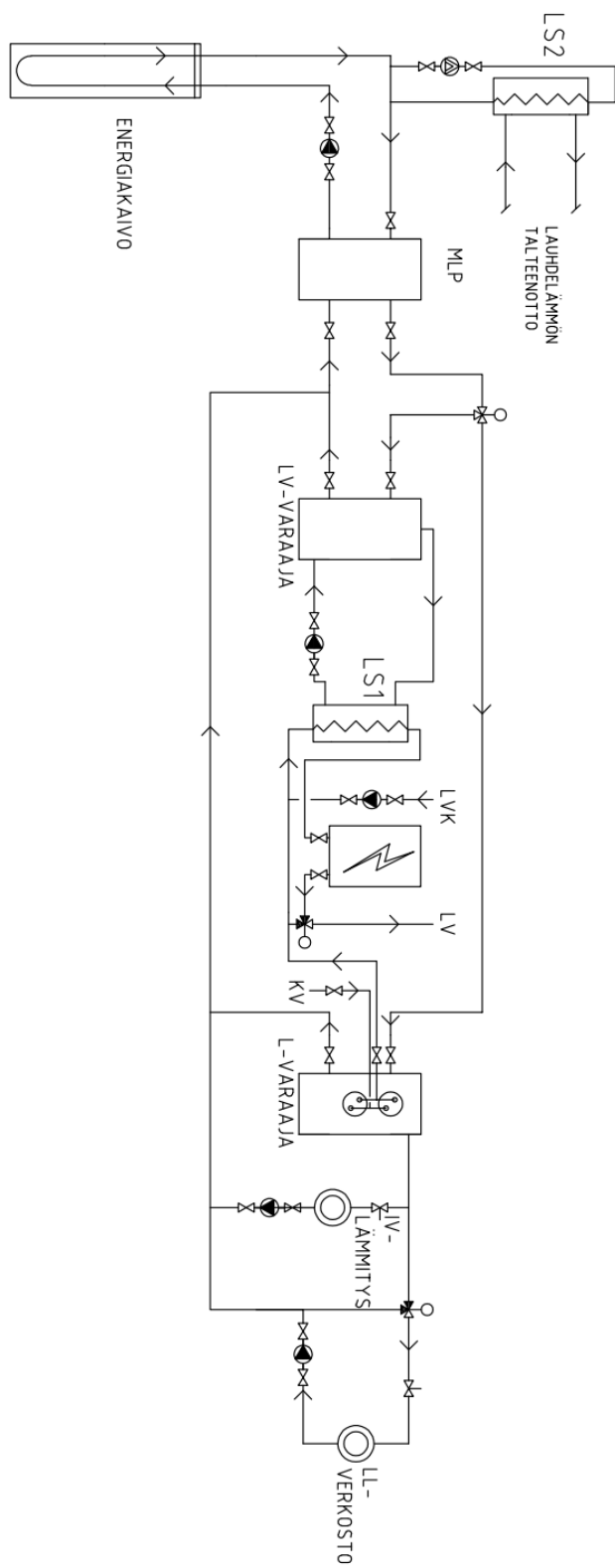
Liite 3. Maa- ja aurinkolämmön kytkentäkaavio 3



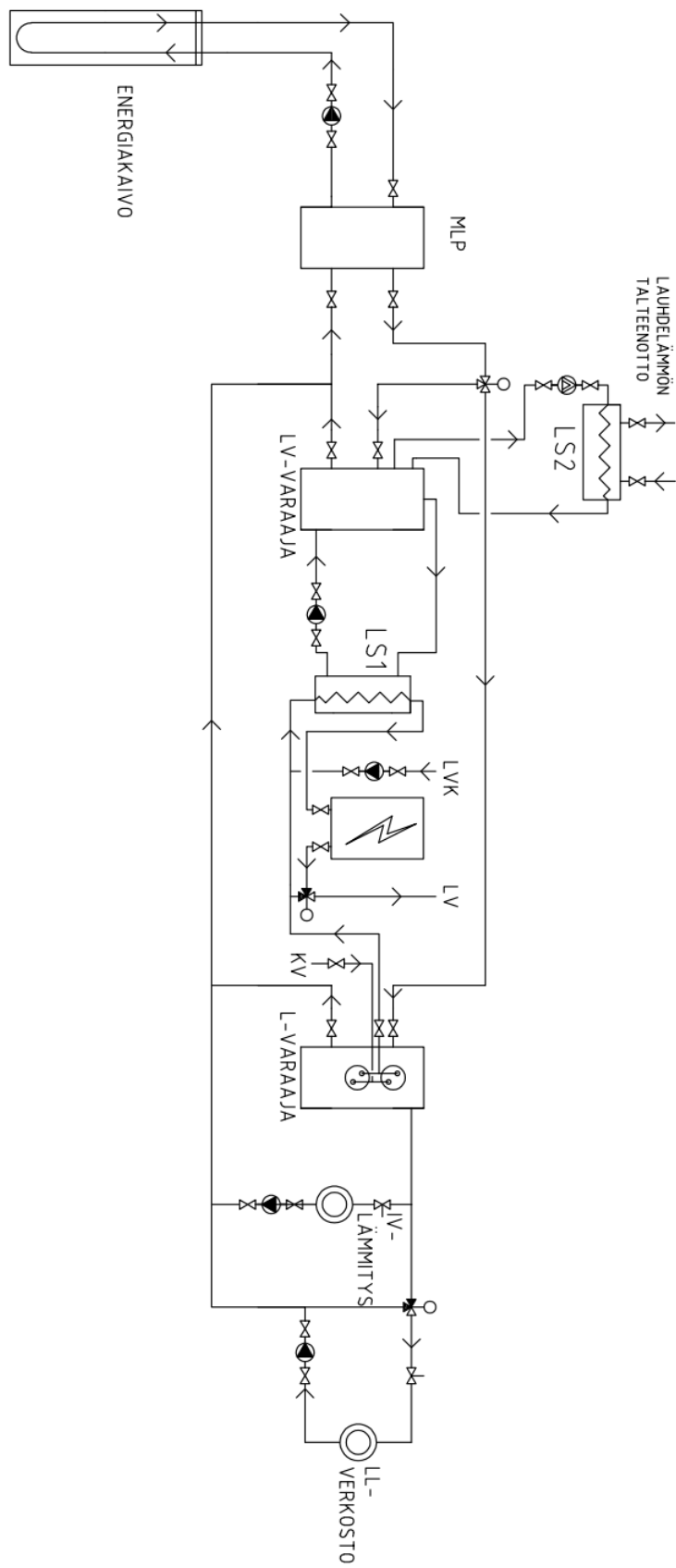
Liite 4. Ecowec R08-hybridivaihdin tuottotaulukko (Ecowec a N.d.)



Liite 6. Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentäkaavio 1



Liite 7. Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentäkaavio 2



Liite 7. Maa- ja lauhdelämmön talteenoton kytkentäkaavio 3

