

SELVITYS TYHJIÖPUTKIKERÄIMIEN KÄYTÖSTÄ KASVIHUONEIDEN LÄM- MITTÄMISEEN

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Salla Peltola	
Työn nimi Selvitys tyhjiöputkikeräimien käytöstä kasvihuoneiden lämmittämiseen	
Päiväys 28.9.2022	Sivumäärä/Liitteet 29
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Famifarm Oy	
Tiivistelmä Tämän opinnäytetyön tilaajana toimi Famifarm Oy, joka on tunnettu Järvikylä merkkisistä salaateista ja yrteistä. Famifarm Oy tuottaa lämpöenergian kasvihuoneita varten hakkeella ja turpeella toimivalla lämpölaitoksellaan. Haasteena tilaajalla on ollut saada tuotettua kesällä tarvittava lämpöenergia energiatehokkaasti. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, missä määrin tyhjiöputkikeräimiä voitaisiin käyttää kasvihuoneiden lämmittämiseen ja millaisia säästöjä niillä saataisiin aikaan. Opinnäytetyössä perehdyttiin aurinkolämmön aktiiviseen hyödyntämiseen erityisesti tyhjiöputkikeräimien osalta, mutta työssä käytiin läpi myös muiden aurinkokeräimien toimintaa. Työssä perehdyttiin myös aurinkolämpöjärjestelmän suuntaukseen ja mitoittamiseen. Mitoittamisessa huomioitiin erityisesti teollisuudessa mahdollisesti käytössä olevia ratkaisuja, jotka saattaisivat kiinnostaa työn tilaajaa. Työn tulokseksi saatiin, että jos tilaaja haluaisi korvata koko kesän aikaisen lämmöntuotannon tyhjiöputkikeräimistä muodostetulla aurinkolämpöjärjestelmällä, vaatisi se noin 11000 m² keräinpinta-alaa. Investointina aurinkolämpöjärjestelmän hankinta on merkittävä, mutta sillä saataisiin tuotettua noin 26 % yrityksen vuotuisesta lämmöntarpeesta. Tämä työ toimii suuntaa antavana mitoituksena, jonka perusteella tilaaja voi arvioida aurinkolämpöjärjestelmän kannattavuutta. Mikäli tilaaja päättää edetä projektin kanssa, on järjestelmää mitoitettava vielä tarkemmilla lähtötiedoilla.	
Avainsanat Aurinkokeräimet, aurinkolämmitys, aurinkoenergia, tyhjiöputkikeräimet	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author(s) Salla Peltola	
Title of Thesis A Study on Heating Greenhouses with Evacuated Tube Collectors	
Date 29 September 2022	Pages/Appendices 29
Client Organisation /Partners Famifarm Oy	
Abstract The client of this thesis was Famifarm Oy which is known for its Järvikylä branded salads and herbs. Famifarm Oy produces thermal energy for greenhouses with its heating plant using wood chips and peat. The client's challenge has been to produce thermal energy needed in the summer in an energy-efficient way. The purpose of this thesis was to find out to what extent evacuated tube collectors could be used for heating greenhouses and what kind of savings could be achieved. The thesis focused on the active utilization of solar heat, especially on the evacuated tube collector, but the thesis also reviewed the operation of other solar collectors. This thesis also discusses the orientation and dimensioning of the solar heating system. In the dimensioning, solutions that might be in use in industry and which might be of interest to the client, were taken into account. The result of the work was that if the client wanted to replace the entire summer's heat production with a solar heating system made from evacuated tube collectors, it would require approximately 11,000 m² of collector surface area. As an investment, the purchase of a solar heating system is significant, but it would produce approximately 26 % of the company's annual heat needs. This thesis serves as a dimensioning guideline, based on which the client can evaluate the profitability of the solar heating system. If the client decides to proceed with the project, the system must be dimensioned with even more detailed initial data.	
Keywords Solar collectors, Solar heating, Solar energy, evacuated tube collectors	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	AURINGON SÄTEILY	8
2.1	Auringon säteily Suomessa	8
3	AURINKOLÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN	10
3.1	Aurinkokeräimet.....	10
3.1.1	Ilmakeräimet.....	11
3.1.2	Tasokeräimet	11
3.1.3	Tyhjiöputkikeräimet	12
3.2	Aurinkokeräimien hyötysuhde	14
4	LÄMMÖN VARASTOINTI	17
4.1	Vesivaraaja.....	17
5	AURINKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN MITOITTAMINEN	18
5.1	Aurinkolämpöjärjestelmän kytkentä muihin lämmitysjärjestelmiin.....	18
5.1.1	Puu- tai muun biomassalämmityksen ja aurinkolämmön yhdistäminen	18
5.1.2	Öljylämmityksen ja aurinkolämmön yhdistäminen	18
5.2	Prosessiveden lämmittäminen aurinkoenergialla	19
6	ENERGIAN KUSTANNUKSET	20
6.1	Muiden energia polttoaineiden kustannukset.....	20
7	FAMIFARM OY.....	22
8	AURINKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN MITOITUS FAMIFARM OY:LLE	23
8.1	Aurinkolämpöjärjestelmän apulaitteiden sähkönkulutus	27
9	POHDINTA.....	28
	LÄHTEET	29

KUVALUETTELO

KUVA 1.	Aurinkojärjestelmän toimintaperiaate (Peltola 2022, CC BY).....	10
KUVA 2.	Tasokeräimen rakenne (Motiva C 2020).....	12
KUVA 3.	Tyhjiöputkikeräin (Kalogirou 2014).....	12
KUVA 4.	Tyhjiöputkikeräimen läpileikkaus (Peltola 2022, CC BY)	13
KUVA 5.	Tyhjiöputkien heijastava pinta a) Tasomainen heijastava pinta b) CPC heijastava pinta (Kalogirou 2014).....	14

KUVA 6. Aurinkokeräinten hyötysuhteet (Tahkokorpi ym. 2016)	15
KUVA 7. Aurinkolämmön yhdistäminen öljylämmitykseen (mukaillen Tahkokorpi ym. 2016)	19
KUVA 8. Yksinkertainen prosessihöyryjärjestelmä rinnankytketyllä apuhöyrykattilalla (Kalogirou 2014)	19
KUVA 9. Polttoaineiden hintakehitys (Tilastokeskus, Energian hinnat 2022)	20
KUVA 10. Polttonesteiden hintakehitys (Tilastokeskus, Energian hinnat, Kuluttajahintaindeksi 2022)	21

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii Famifarm Oy, joka on tunnettu Järvikylä merkkisistä salaateistaan sekä yrteistään. Famifarm Oy:llä sijaitsee Joroisissa noin 55000 m² kasvihuoneita, joiden energian tarve tuotetaan tällä hetkellä heidän omalla, hakkeella ja turpeella toimivalla lämpölaitoksella sekä noin 700 käytössä olevalla aurinkopaneelilla. Yrityksen tavoitteena on puolittaa turpeen käyttö vuonna 2023 sekä päästä varapolttoaineena toimivasta kevyt polttoöljystä eroon. Aihe on saatu Savonia-ammattikorkeakoulun toimesta.

Jatkuva polttoaineiden kallistuminen sekä tarve hiilidioksidipäästöjen alentamiseen saavat yritykset etsimään uusia puhtaampia ja tehokkaampia tapoja tuottaa energiaa. Famifarm Oy:n haasteena on ollut saada tuotettua kesäisin tarvittava energia mahdollisimman tehokkaasta. Yrityksen energian tarve kesäisin on noin 1 MW luokkaa.

Opinnäytetyö toteutetaan selvityksenä. Sen tarkoituksena on selvittää, missä määrin tyhjiöputkieräimillä voitaisiin tuottaa kasvihuoneiden tarvitsema lämpö ja millaisia säästöjä sillä saataisiin aikaan. Työssä esitellään yleisesti mitä auringon säteily on ja miten säteilyä voidaan hyödyntää aurinkolämpöjärjestelmissä. Työssä käydään läpi myös aurinkolämpöjärjestelmien toiminta ja perehdytään aurinkokeräimien suuntaukseen ja mitoittamiseen. Työn lopussa mitoitetaan Famifarm Oy:lle aurinkolämpöjärjestelmä, jolla yritys saisi korvattua koko kesän lämmitystarpeen aurinkolämmöllä.

2 AURINGON SÄTEILY

Aurinko on kaasupallo, jonka ulkokuori koostuu pääasiassa vedystä 75 % ja heliumista 23 %. Loput 2 % Auringon kuoresta koostuu muista aineista. Spektrianalyysin mukaan muita aineita ovat muun muassa natrium, rauta, kalsium, magnesium, nikkeli, barium, kupari, typpi ja hiili. Spektrianalyysin mukaan Auringossa on myös maapallolla tuntemattomiksi jääneitä kemiallisia yhdisteitä. (Tahkokorpi ym. 2016, 11).

Auringon ytimessä tapahtuu fuusioreaktio, jossa kaksi vetyatomin ydintä yhdistyy heliumatomiksi synnyttäen suuren määrän energiaa. Fuusioprosessissa yhden heliumkilon syntyminen vedystä vapauttaa noin 180 miljoonaa kilowattituntia energiaa. Auringon ytimessä fuusioreaktio tarvitsee onnistuakseen noin 10 miljoonan asteen lämpötilan. Auringon pinnalla lämpötila on noin 5500 astetta celsiusta. (Tahkokorpi ym. 2016, 11).

Auringon fuusioreaktiosta saama kokonaisteho on $3,8 \times 10^{23}$ kilowattia. Maapallolle tästä määrästä tulee $1,7 \times 10^{14}$ kilowattia. Kohtisuoran säteilyn määrä ilmakehän ulkopuolella on noin 1,35–1,39 kilowattia neliometriä kohti, riippuen Maapallon ja Auringon etäisyydestä toisistaan. Kyseistä arvoa kutsutaan aurinkovakioksi ja se on keskimäärin $1,368 \text{ kW/m}^2$. Ilmakehä suodattaa säteilyä päästäten läpi parhaimmillaan noin $1,0 \text{ kW/m}^2$. (Tahkokorpi ym. 2016, 12–13).

2.1 Auringon säteily Suomessa

Auringon kokonaissäteily muodostuu suorasta auringon säteilystä ja hajasäteilystä. Hajasäteilyyn sisällytetään myös joissain lähteissä mainittu ilmakehän vastasäteily, jota aiheuttaa ilmakehän vesihöyry, hiilidioksidi ja otsoni (Tahkokorpi ym. 2016, 14). Suoralla auringonsäteilyllä tarkoitetaan suoraan ilmakehän läpi tulevaa säteilyä. Hajasäteily on puolestaan ilmakehän, pilvien ja maan heijastamaa säteilyä. Sen osuus Suomessa tapahtuvasta kokonaissäteilystä on merkittävä. Etelä-Suomessa hajasäteilyn osuus on jopa puolet kokonaissäteilystä. (Motiva A 2022).

Säteilyyn vaikuttaa myös kohteen leveyspiiri ja vuoden- ja vuorokaudenaika. Suomi sijaitsee etelä-pohjoissuunnassa leveysasteelta 60° N melkein leveysasteelle 70° N . Tämän takia Suomen sisälläkin säteilyenergioiden määrät vaihtelevat paljon. Joulukuussa, talvipäivänseisauksen aikana, Helsingissä päivän pituus on vajaat kuusi tuntia ja auringon korkeuskulma vain noin seitsemän astetta. Rovaniemen pohjoispuolella puolestaan aurinko ei nouse lainkaan. Suurimmat säteilyenergiat Suomessa saadaan huhtikuusta syyskuuhun. (Tahkokorpi ym. 2016, 23).

Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty säteilyenergioiden määrät kuukausittain. Taulukossa säteilyenergia kohdistuu vaakasuoralle pinnalle (kallistuskulma 0°) ja eri paikkakunnille on omat sarakkeensa.

TAULUKKO 1. Vaakasuoralle pinnalle kohdistuva säteily (Heimonen 2011)

Kuukausi	Säteilyenergiat vaakasuoralle pinnalle (kallistuskulma 0°) paikkakunnittain, (kWh/m ² ,kk)		
	Helsinki	Jyväskylä	Sodankylä
Tammikuu	6	5	1
Helmikuu	22	20	14
Maaliskuu	64	52	48
Huhtikuu	120	103	121
Toukokuu	166	171	128
Kesäkuu	169	159	154
Heinäkuu	181	158	146
Elokuu	127	114	95
Syyskuu	82	71	64
Lokakuu	26	25	17
Marraskuu	8	7	3
Joulukuu	4	3	0
Vuosi	975	890	791

Muuttamalla keräimen asennuskulmaa, saadaan auringosta säteilyenergiaa paremmin talteen. Alla olevassa taulukossa 2 nähdään kallistuskulmien vaikutus säteilyenergian määrään Keski-Suomen korkeudella. Kertomalla säteilyenergian määrä korjauskertoimella saadaan säteilyenergian määrä kallistetulla kulmalla. Oletuksena taulukon 2 käytössä on, että ympäristön varjostuskulma on 0°. (Heimonen 2011, 14-16).

TAULUKKO 2. Korjauskertoimet (Heimonen 2011)

Kuukausi	Korjauskertoimet etelään suunnatulle keräimelle eri kallistuskulmilla, paikkakunta Jyväskylä				
	0°	30°	45°	60°	90°
Tammikuu	1,00	1,50	1,75	1,75	1,75
Helmikuu	1,00	1,95	2,27	2,50	2,55
Maaliskuu	1,00	1,57	1,75	1,85	1,75
Huhtikuu	1,00	1,25	1,30	1,29	1,13
Toukokuu	1,00	1,09	1,07	1,01	0,78
Kesäkuu	1,00	1,03	0,99	0,90	0,63
Heinäkuu	1,00	1,05	1,01	0,93	0,66
Elokuu	1,00	1,12	1,11	1,05	0,80
Syyskuu	1,00	1,28	1,33	1,33	1,11
Lokakuu	1,00	1,46	1,62	1,65	1,54
Marraskuu	1,00	1,33	1,33	1,50	1,33
Joulukuu	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50
Vuosi	1,00	1,21	1,26	1,27	1,13

Aurinkokeräimille parhaaksi todettu asennussuunta on etelä, koska auringon säteet osuvat sinne pisin. Kaakko ja Lounas ovat hyviä asennus suuntia, mikäli etelänpuoleisessa asennuksessa auringon säteet estyvät.

Keski-Suomessa auringon kokonaissäteilyenergian määrä vaakatasolle on noin 890 kWh/m² ilmatieteen laitoksen testivuoden mukaan. Suuntaamalla paneelit oikein, voidaan hyödynnettävän säteilyn määrää lisätä 20–30 prosenttia vuositasolla (Motiva A 2022).

3 AURINKOLÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

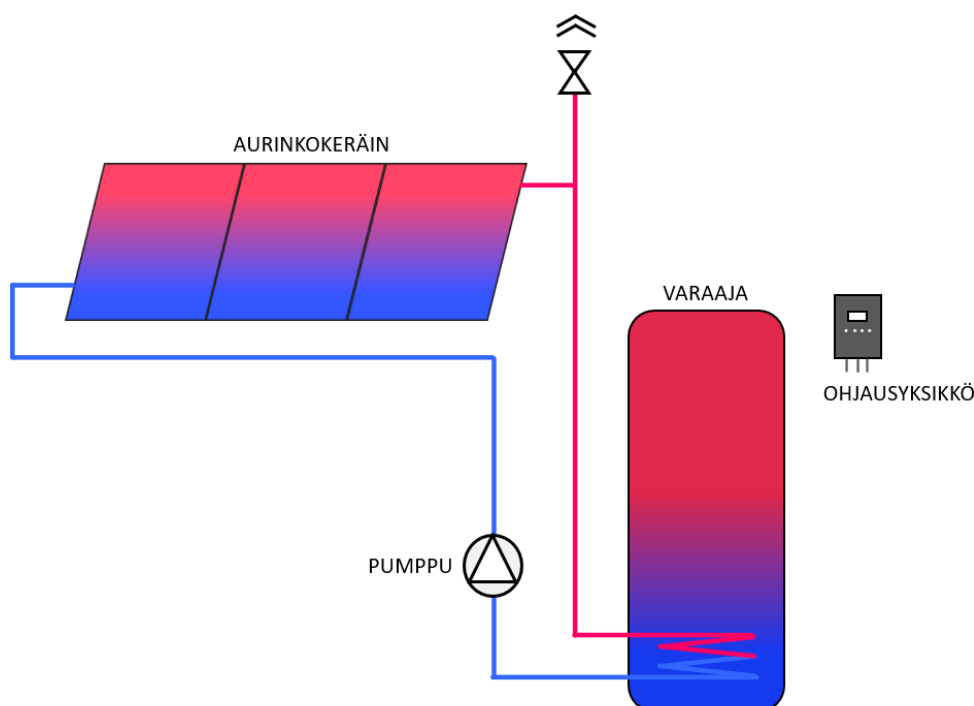
Aurinkolämpöjärjestelmät voidaan luokitella kokonsa puolesta kolmeen eri kategoriaan. Lämpimän käyttöveden kotijärjestelmiksi eli DHW (domestic hot water) luokitellaan järjestelmät, joiden keräinpinta-ala on alle 50 m². Teollisia prosessivesijärjestelmiä (industrial process heat) ovat aurinkolämpöjärjestelmät, joiden keräinpinta-ala on 50–500 m². Suurimpia aurinkolämpöjärjestelmiä kutsutaan aurinkokaukolämmöksi eli SDH (solar district heating) ja ne ovat keräinpinta-alaltaan yli 500 m². (Tahkokorpi. 2016, 79).

Aurinkoenergiaa voidaan hyödyntää joko aktiivisesti tai passiivisesti. Passiiviseksi aurinkoenergian hyödyntämiseksi kutsutaan tilannetta, jossa auringon säteilyenergiaa hyödynnetään ilman erillistä laitetta. Passiivista aurinkolämmön hyödyntämistä on esimerkiksi, kun rakennus varastoi auringon lämpöä sen rakenteisiin (Duffie & Beckman 2013, 545). Rakennuksen suunnittelulla ja sen sijoittamisella voidaan vaikuttaa passiivisen aurinkolämmön hyödyntämiseen. (Tahkokorpi ym. 2016, 55).

Tässä opinnäytetyössä perehdytään tarkemmin aurinkolämmön aktiiviseen hyödyntämiseen. Aktiiviseksi aurinkolämmön hyödyntämiseksi kutsutaan tilannetta, jossa auringon säteilyenergia muunnetaan aurinkokeräimillä lämpöenergiaksi.

3.1 Aurinkokeräimet

Aurinkokeräin on lämmönsiirrin, jolla auringon säteily muutetaan lämmöksi. Aurinkokeräimiä käytetään niin käyttöveden ja rakennusten lämmittämiseen kuin myös ilmastointiin ja teollisuuden prosessilämpöön (Duffie & Beckman 2013, 236). Aurinkolämpöjärjestelmät koostuvat tavallisesti lämmönkeruulaitteistosta, lämpövarastosta sekä lämmönsiirtoputkistosta. Kuvassa 1 on kuvattu aurinkolämpöjärjestelmän toimintaperiaate. Keräimien lämmönsiirtoaineena toimii joko neste tai ilma, useimmiten lämmönsiirtoneste. (Motiva B 2020).



KUVA 1. Aurinkojärjestelmän toimintaperiaate (Peltola 2022, CC BY)

Nestekiertoisissa aurinkokeräimissä keräinpiiri on suljettu nestejärjestelmä. Lämpö siirtyy keräimistä lämpövaraajaan joko aurinkolämpökierukan tai ulkoisen lämmönsiirtimen avulla. Lämpövaraajasta lämpönsä luovuttanut lämmönsiirtoneste ohjataan pumpulla takaisin aurinkokeräimeen. Lämmönsiirtoneste koostuu vedestä ja glykolista, joka estää nesteen jäätyksen. Putkiston suojaamiseksi nesteeseen on lisätty myös korroosionestoaineita. Nestekiertoisia aurinkolämpökeräimiä ovat tasokeräimet ja tyhjiöputkikeräimet. (Motiva B 2020).

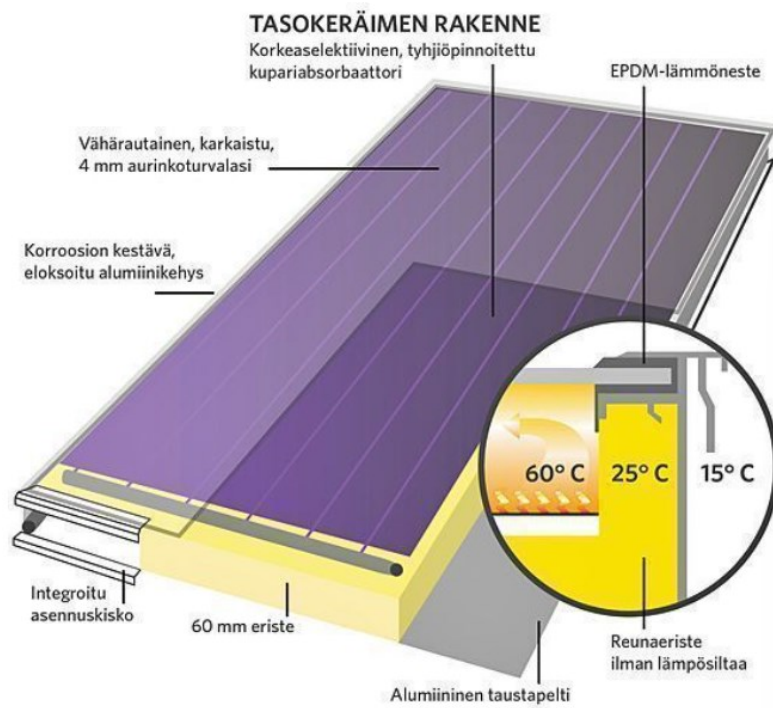
3.1.1 Ilmakeräimet

Ilmakeräin on ilmaa lämmönsiirtoaineena käyttävä lämmönsiirrin. Ilman hyviä puolia lämmönsiirtoaineena on, että se ei jäädy keräimissä eikä aiheuta ylikuumenemis- tai korroosio-ongelmia. Ilma myös lämpenee nestettä nopeammin ja ilmakeräimet ovat helpompia rakentaa. Ilman lämpövarastoina voivat toimia rakennuksen omat rakenteet kuten välipohjat ja alapohja, jolloin varastoinnin kustannukset ovat nestekeräintä edullisemmat. Ilmakeräimet soveltuvat kuitenkin nestekeräimiä huonommin esimerkiksi lämpimän käyttöveden lämmittämiseen ja niiden säädettävyys on nestekeräimiä huonompi. (Tahkokorpi ym. 2016, 90).

3.1.2 Tasokeräimet

Tasokeräimet ovat maailmalla suosituimpia aurinkokeräintyyppisiä asuinrakennusten käyttöveden lämmittämiseen. Tasokeräimet toimivat talvella tyhjiöputkikeräimiä paremmin. Niiden lämpimän pintalämpötilan ansiosta lumi sulaa keräimien päältä tehokkaammin kuin tyhjiöputkien päältä. Ne ovat myös tyhjiöputkikeräimiä edullisempia ja niiden hyötysuhde jää vain hieman pienemmäksi kotitalouskäytössä. Prosesseissa, joissa tavoitellaan korkeita toimintalämpötiloja, tyhjiöputkikeräimillä saavutetaan kuitenkin selvästi paremmat hyötysuhteet. (Motiva C 2020).

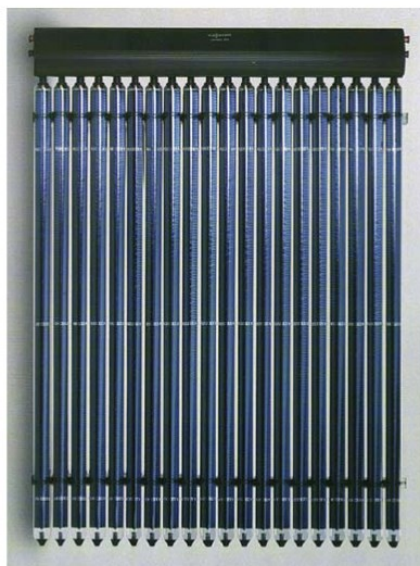
Auringon säteily kerätään tasokeräimellä sen tumman keräinelementin avulla. Sen lähes koko pinta vastaanottaa säteilyä. Tumma keräinelementti absorboi siihen kohdistuvasta auringon säteilystä suurimman osan. Tasokeräimet varustetaan usein läpinäkyvällä katteella lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Kuvassa 2 on esitetty tasokeräimen rakenne tarkemmin. Perinteinen aurinkokeräin on kooltaan noin 1,2 x 2,5 metriä ja massaltaan noin 50–60 kilogrammaa. Tasokeräimiä saa myös niin sanottuina suurkeräiminä, joiden pinta-ala on noin 10 m². Suurkeräimien hyötysuhde on normaalia tasokeräintä hieman parempi, sillä keräimen reunametrioiden määrä, vähenee suhteessa pinta-alaan, jolloin reunojen kautta tapahtuva lämpöhäviö pienenee. Suurkeräimet tulevat myös perinteisiä tasokeräimiä halvemmiksi, koska kehysmateriaalia on suhteessa vähemmän. Suurkeräimien hyötysuhdetta parantaa myös se, että putkilinjat virtauksen jakoa varten voidaan tehdä keräimen sisällä aktiivisella lämmöntuottoalueella. (Motiva C 2020; Tahkokorpi ym. 2016, 100–101).



KUVA 2. Tasokeräimen rakenne (Motiva C 2020)

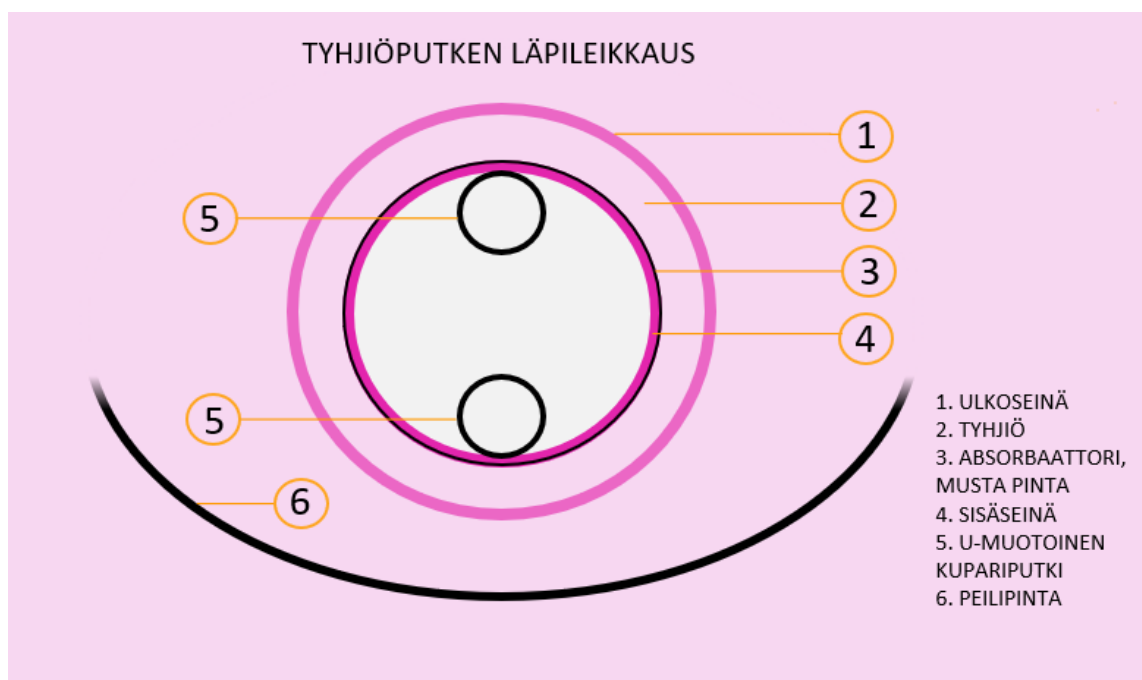
3.1.3 Tyhjiöputkikeräimet

Keräimien lämpöhäviöt kasvavat korkeisiin toimintalämpötiloihin pyrittäessä. Suurin lämpöhäviöistä on konvektion avulla tapahtuva lämmön siirtymisen lisääntyminen absorbaattoripinnasta katelasiin ja keräinten kehyksiin. Tyhjiöputkikeräimistä ilma on poistettu lähes kokonaan. Tällöin syntynyt tyhjiö toimii tehokkaana lämmöneristeenä ja estää absorboitua lämpöä karkaamasta takaisin ulkoilmaan, jolloin konvektion osuus lämpöhäviöistä laskee jyrkästi. Tästä syystä tyhjiöputkikeräimien hyötysuhde on parempi korkeissa toimintalämpötiloissa verrattuna tasokeräimiin. Tyhjiökeräimen tunnistaa sen poikkileikkaukseltaan pyöreästä lasiputkesta. Lasiputken pyöreä muoto auttaa lasia kestämään tyhjiön aiheuttaman paineen. Kuvassa 3 on esimerkki tyhjiöputkikeräimestä. (Tahkokorpi ym. 2016, 95).



KUVA 3. Tyhjiöputkikeräin (Kalogirou 2014)

Tyhjiöputkikeräimet on jaoteltu kahteen alatyyppiin riippuen niiden tavasta siirtää lämpö tyhjiöputkesta lämmönsiirtonesteeseen. Lämmön siirto tapahtuu joko läpivirtausperiaatteella tai lämpöputken (heat pipe) avulla. Läpivirtausperiaatteella toimivat tyhjiöputket on jaoteltu vielä kahteen riippuen niissä olevan nesteen tavasta liikkua putkessa. Neste virtaa joko u-muotoisessa putkessa tai sisäkein olevista putkista muodostetussa koaksiaaliputkessa. Tyhjiöputken rakennetta on kuvattu kuvassa 4. (Motiva D 2020).



KUVA 4. Tyhjiöputkikeräimen läpileikkaus (Peltola 2022, CC BY)

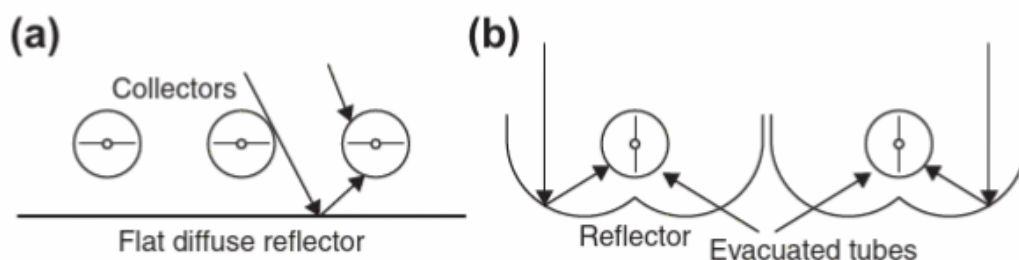
Yksilasisessa tyhjiöputkessa absorbaattorilevy on usein levymäinen ja se sijaitsee tyhjiön sisällä. Yksittäisiä tyhjiöputkia on mahdollista vaihtaa yksilasisissä tyhjiöputkissa, koska niiden lämmönsiirtoputkistoliitokset sijaitsevat putken yläosassa ja ne ovat helposti avattavia. (Tahkokorpi ym. 2016, 96).

Kaksilasisessa tyhjiöputkessa absorbaattoriin on yhteydessä sylinterimäinen lämmönsiirtolevy ja se on kosketuksissa sisimmässä lasissa olevaan absorbaattoripintaan eli absorbaattorilevy ei sijaitse tyhjiössä. Kaksilasisessa tyhjiöputkessa tyhjiö on ulomman ja sisemmän lasisylinterin välissä. Lämpö siirtyy sisimmässä lasissa olevasta absorbaattoripinnasta johtumalla sylinterimäiseen metallipintaan, joka on puolestaan kiinni lämmönsiirtoputkessa. Kaksilasisessa tyhjiöputkessa yksittäisiä putkia voidaan vaihtaa koskematta lämmönsiirtoputkiliitoksiin, sillä tyhjiö sijaitsee lasien välissä ja ne ovat ylhäältä avoimia. (Tahkokorpi ym. 2016, 96).

Heat pipe tyhjiöputkissa lämmönsiirtoliitos on aina kuiva. Sen lämpöputkessa oleva neste, alkoholi tai vesi, muodostaa lämmönsiirtopiirin. Neste höyrystyy tyhjiöputkessa ja nousee lämpöputken yläosaan, jossa se kondensoituu ja luovuttaa lämpönsä lämmönsiirtonesteeseen. Lämmönsiirtoneste liikkuu keräimen yläosassa lämpöeristetyn kotelon putkistossa. Lämpöputki voi olla tehty joko lasista

tai metallista. Lämpöputken ja kuivien liitosten ansiosta myös heat pipe -tyyppisissä tyhjiöputkissa yksittäisiä tyhjiöputkia voidaan vaihtaa. (Tahkokorpi ym. 2016, 97).

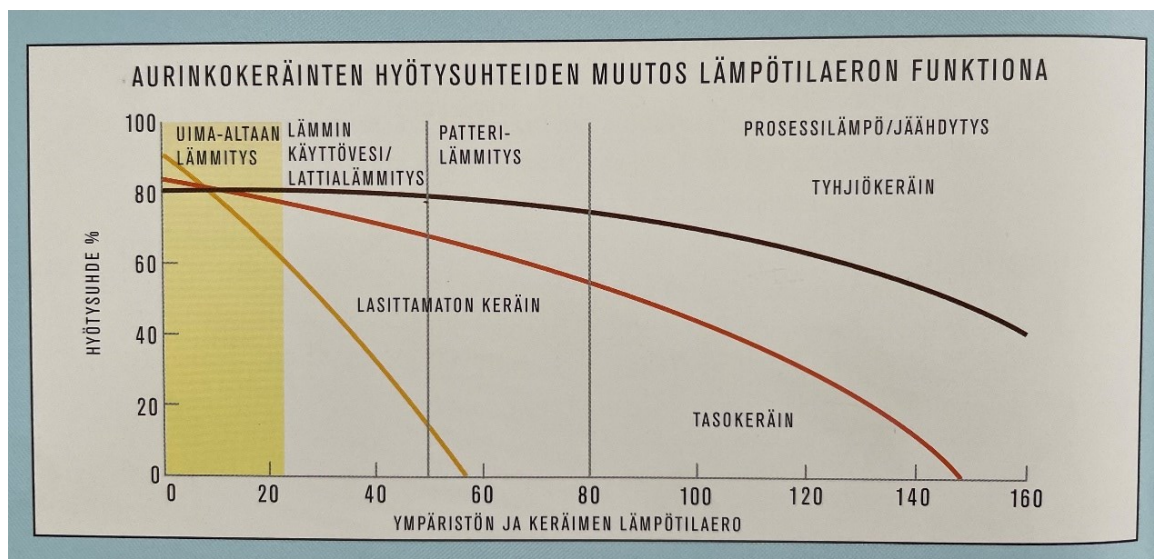
Tyhjiöputkia voidaan käyttää keskittävässä keräimissä, jolloin tyhjiöputkikeräimien taakse sijoitetaan heijastava pinta. Tällöin putkien määrää voidaan vähentää ja keräimen kustannuksia saadaan laskettua. Heijastavan pinnan avulla keräin käyttää sivuilta tulevaa säteilyä paremmin hyödyksi, jolloin keräimen hyötysuhdetta saadaan nostettua. Heijastava pinta voi olla joko tasomainen tai jokaisen yksittäisen putken taakse voidaan asentaa kaksi rinnakkaista parabolista pintaa, jolloin kaikki valonsäteet kulkevat samaan pisteeseen heijastavan pinnan kautta. Kahdesta heijastavasta rinnakkaisesta pinnasta käytetään lyhennettä CPC, joka muodostuu sanoista compound parabolic concentrator. Tasomainen ja CPC heijastava pinta on esitetty kuvassa 5. (Tahkokorpi ym. 2016, 97; Kalogirou 2014, 139).



KUVA 5. Tyhjiöputkien heijastava pinta a) Tasomainen heijastava pinta b) CPC heijastava pinta (Kalogirou 2014)

3.2 Aurinkokeräimien hyötysuhde

Aurinkoenergiajärjestelmien hyötysuhteisiin vaikuttaa niin keräimen ominaisuudet kuin myös asennuksen optimointi ja vallitsevat olosuhteet. Hyötysuhde ja lämpöteho voidaan laskea, keräimen pinta-alan, keskimääräisen lämpötilan, ympäristön lämpötilan ja säteilymäärän avulla. Paras hyötysuhde saavutetaan, kun lämpötilaero keräimen ja ympäristön välillä on pieni ja auringon säteilyteho on suuri. Vuositasolla tyhjiöputkikeräimet ovat vain vähän tasokeräimiä tehokkaampia kotitalouskäytössä, vaikka hinnaltaan ne ovat noin 30–50 prosenttia kalliimpia. Kuvassa 6 on esitetty aurinkokeräinten hyötysuhteiden muutos lämpötilaeron funktiona. (Motiva E 2022).



KUVA 6. Aurinkokeräinten hyötysuhteet (Tahkokorpi ym. 2016)

Taso- ja tyhjiöputkikeräimien välillä ei ole suuria eroja lämpiminä vuodenaikoina (Motiva D 2020). Tyhjiöputkikeräin on tasokeräintä parempi valinta, jos aurinkoenergiajärjestelmältä halutaan korkeampia toimintalämpötiloja.

Aurinkokeräimille on määritelty termiset parametrit, joiden avulla voidaan laskea keräimen tuottama lämpöenergian määrä. Laskenta voidaan suorittaa, kun tunnetaan keräimen keskimääräinen lämpötila sekä ympäristön lämpötila ja säteily määrä. Keräimestä tarvitaan seuraavat hyötysuhdeparametrit, lämpöhäviötön hyötysuhde η_0 , ensimmäisen kertaluokan lämpöhäviökerroin a_1 ja toisen kertaluokan lämpöhäviökerroin a_2 . Kyseiset arvot saadaan aurinkokeräimen valmistajalta. Alla esitetty kaava (1) keräimen hyötysuhteen laskemiseksi:

$$\eta = \eta_0 - a_1 * \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 * \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (1)$$

missä

η on hyötysuhde

η_0 on lämpöhäviötön hyötysuhde

T_m on keräimen lämpötila (celsiusta tai kelviniä)

T_a on ympäristön lämpötila (celsiusta tai kelviniä)

G on auringon säteilyteho (W/m^2)

Keräimen ja ympäristön lämpötilat voidaan ilmoittaa joko celsius tai kelvin asteina, mutta kummasakin lämpötilassa on käytettävä samaa yksikköä. Eri lähteissä voidaan käyttää η_0 , a_1 ja a_2 parametrien sijasta parametrejä η_0 , k_1 ja k_2 , joilla tarkoitetaan samoja lukuja. Tuotettu lämpöteho voidaan laskea kaavalla (2), kun edellisten parametrien lisäksi tiedetään keräimen tehollinen pinta-ala:

$$P = A * (\eta_0 * G - a_1 * (T_m - T_a) - a_2 * (T_m - T_a)^2) \quad (2)$$

missä

P on keräimen lämpöteho

A on keräimen tehollinen pinta-ala

Yllä olevalla kaavalla (2) laskettu lämpöteho pitää paikkaansa, kun mikään parametri ei olennaisesti muutu. Käytännössä parametrit vaihtelevat koko ajan. Kaavaa käytetään simuloitaessa järjestelmän toimintaa vähintään tuntitasolla. Suunnittelulaskelmat tehdään nykyisin tietokoneohjelmilla, jotka on kehitetty erityisesti keräimen vuosituoton laskemista varten. (Tahkokorpi ym. 2016, 93–94).

4 LÄMMÖN VARASTOINTI

Lämmön varastointi on tärkeä osa aurinkolämpöjärjestelmää. Tavallisesti lämpövarastoa voidaan käyttää muutamia vuorokausia tasaamaan vuorokauden ja sään aiheuttamia vaihteluita. Yleisin tapa varastoida lämpöenergiaa aurinkolämpöjärjestelmissä on vesivaraaja. Lämpöä voidaan varastoida myös talon rakenteisiin, kivivaraajaan ja faasimuutokseen perustuvaan varaajaan. (Tahkokorpi ym. 2016, 105).

4.1 Vesivaraaja

Vesivaraaja on kaikista yleisin tapa varastoida lämpöä aurinkolämpöjärjestelmässä. Sen avulla aurinkolämpöä voidaan käyttää myös, kun aurinko ei paista. Omakotitaloissa sen koko vaihtelee 300–1000 litran välillä. Varaajan koko tulisi olla noin 50–100 litraa keräinneliötä kohti, ellei järjestelmä vaadi muita, suurempaa tilavuutta vaativia komponentteja. Varaajatilavuus voi olla lähempänä alaraajaa, kun käytetään tasokeräimiä tai keräimien suuntaus ei ole suoraan etelään tai jos varaajan lämpöä puretaan paljon myös aurinkoisina päivinä. Tilavuuden olisi hyvä olla lähempänä ylärajaa, kun käytetään tyhjiöputkikeräimiä tai jos keräimet on suunnattu suoraan etelään ja ne ovat kaltevuudeltaan alle 45° tai jos varaajan lämmittämiseen halutaan käyttää ympäri vuoden myös jotakin muuta lämmönlähdettä kuin aurinkoa. Varaajan koon lisäksi myös lataus- ja purkauskytkennät vaikuttavat aurinkolämmön riittävyteen. (Tahkokorpi ym. 2016, 106).

Suomessa vesivaraajat ovat usein yhdistelmävaraajia eli ne lämmittävät sekä lämmintä käyttövetä, että sisätiloja. Mikäli halutaan lämmittää vain lämmintä käyttövetä, ovat tyhjiöputkikeräimet parempi vaihtoehto, sillä keräinten liittäminen pelkkään käyttövesivaraajaan johtaa helposti hyötysuhteen laskuun. Tämä johtuu siitä, että keräinten toimintalämpötila on lämpimän käyttöveden tasolla, tai jopa sen yli, suurimman osan ajasta. (Tahkokorpi ym. 2016, 107).

Lämmönsiirrin sijoitetaan vesivaraajissa useimmiten varaajan alaosaan. Näin saadaan tehokkaasti estettyä lämpötilan kerrostuminen varaajassa. Varaajan kesiosassa sijaitsee lämpimän käyttöveden esilämmityskierukka ja yläosassa lämpimän käyttöveden jälkilämmityskierukka. Paluuputki sijaitsee varaajan alaosassa pitäen veden alaosassa sopivan viileänä. Kehittyneissä varaajissa lämmönsiirtimet ovat joko pystysuoria lämmönsiirtimiä tai niiden ympärille on rakennettu virtauksenohjaimia. Varaajan ja sen liitosputkien eristäminen on tärkeää lämpöhäviöiden vähentämiseksi. Mikäli vanhaan varaajaan ei mahdu aurinkolämpökierukkaa, voidaan käyttää ulkopuolista lämmönsiirrintä. Ulkopuolista lämmönsiirrintä käytettäessä on lämmönsiirrin suojattava mahdolliselta jäätymiseltä. (Tahkokorpi ym. 2016, 108, 127; Kalogirou 2014, 298).

Vesivaraajissa on tärkeää huomioida myös lämmönsiirtonesteen myrkyttömyys, mikäli lämmönsiirrin on suoraan kosketuksissa lämpimään käyttöveteen. Näin mahdollisten vuotojen sattuessa lämmönsiirtoneste ei aiheuta vaaraa käyttöveden käyttäjälle. Käyttöveden lämpötilan tulee olla 55–65 asteista, jotta putkistoissa ei ala kasvamaan Legionella-bakteeria. Epäiltäessä auringon lämmön riittävyyttä pitämään varaaja riittävän kuumana, on varaaja lämmitettävä ajoittain yli 55-asteiseksi muulla tavoin. (Tahkokorpi ym. 2016, 108–109).

5 AURINKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN MITOITTAMINEN

Aurinkolämpöjärjestelmää mitoitettaessa ja valittaessa tulisi edetä seuraavassa järjestyksessä: kulutuksen selvittäminen, päälämmitysjärjestelmän toiminnan selvittäminen, varaajatilavuuden mitoittaminen, komponenttien sijoittelun selvittäminen, keräintyyppin valinta, keräinpinta-alan ja virtausnopeuden mitoittaminen, lämmönsiirtimen valinta, putkilinjojen mitoittaminen, pumpun valinta ja viimeisenä säätimen valinta. Samaa järjestystä käytetään sekä uudis- että korjausrakentamiskohteissa. Yksityiskohtaiset mitoitusohjeet saa keräinten toimittajilta. (Tahkokorpi ym. 2016, 112).

5.1 Aurinkolämpöjärjestelmän kytkentä muihin lämmitysjärjestelmiin

Suomessa aurinkolämpöjärjestelmä kytketään usein jonkin muun lämmitysjärjestelmän rinnalle. Tämä johtuu siitä, että lämmön tarve esiintyy ympäri vuoden, kun taas auringosta saatavan energian määrä painottuu kesäkuukausille. Tapa kytkeä aurinkolämpöjärjestelmä muuhun lämmitysjärjestelmään riippuu toisesta lämmönlähteestä, joka on yleensä päälämmönlähde. Päälämmönlähteitä voi olla esimerkiksi suora tai vesikiertoinen sähkölämmitys, öljylämmitys, puu- tai muu biomassalämmitys, lämpöpumput ja kaukolämpö. (Tahkokorpi ym. 2016, 115–117).

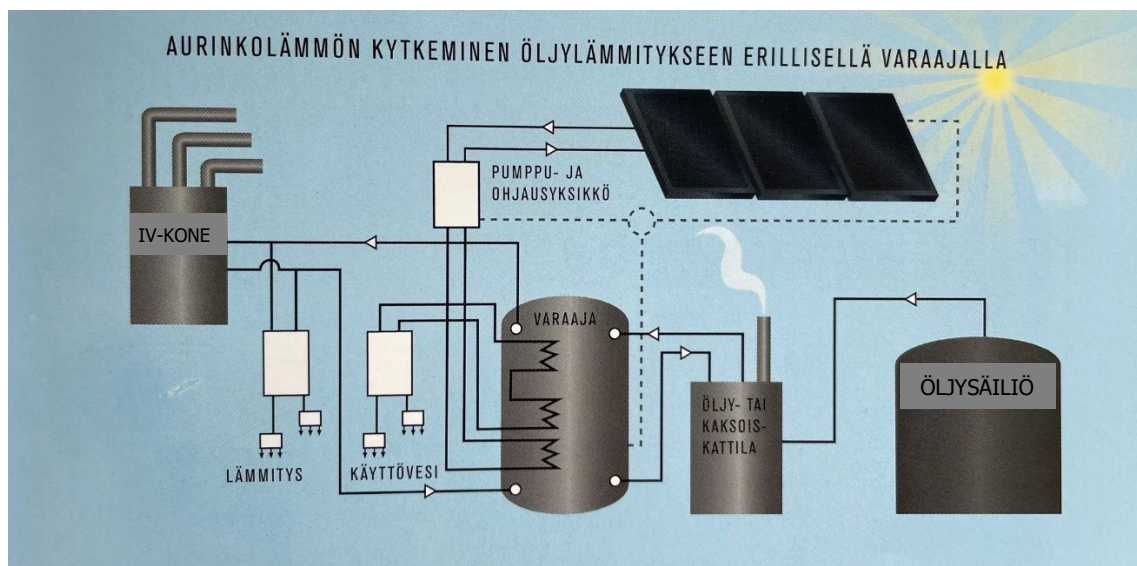
Tässä opinnäytetyössä perehdytään tarkemmin puuta tai muuta biomassalämmitystä tai öljylämmitystä aurinkolämmön ohella käyttäviin järjestelmiin.

5.1.1 Puu- tai muun biomassalämmityksen ja aurinkolämmön yhdistäminen

Puu- tai muu biomassalämmitys sopii hyvin yhdistettäväksi aurinkolämpöön. Aurinkolämpö lisätään usein jo olemassa olevaan puulämmitysjärjestelmään, jotta vapaudutaan kesänaikaisesta lämmitystyöstä. Vanha lämmitysjärjestelmä sisältää jo valmiiksi vesivaraajan, jota tarvitaan myös aurinkolämpöjärjestelmässä. Aurinkolämpöjärjestelmä voidaan liittää osaksi jo olemassa olevaa järjestelmää lisäämällä varaajaan ylimääräinen lämmönsiirrin keräinpiiriä varten. Täytyy kuitenkin muistaa, että varaaja on paineastia ja siitä syystä tarvittavat läpiviennit tulee tehdä jo sen valmistusvaiheessa. Mikäli vanhassa varaajassa ei ole tilaa aurinkokierukalle, voidaan varaajaan siirtää lämpöä ulkopuolisella lämmönsiirtimellä. Keräinten pinta-ala valitaan kesäkuukausien lämmöntarpeen perusteella. Keräinpinta-alaa voi hieman ylittää ilman, että siitä syntyisi suurempia ongelmia ja se on usein perusteltua, jotta kesäkuukausien lämmitystyöstä vapauduttaisiin mahdollisimman hyvin. Puu- tai muu biomassalämmitysjärjestelmä sisältää kattilan, energiavaraajan ja lämmönjakolaitteiston. Kun vanha toimiva lämmitysjärjestelmä on käytössä, voidaan aurinkolämmön mitoittamiseen käyttää vesivaraajan tilavuutta. (Tahkokorpi ym. 2016, 121–122, 126–127).

5.1.2 Öljylämmityksen ja aurinkolämmön yhdistäminen

Myös öljylämmitys ja aurinkolämpö voidaan yhdistää. Niiden yhdistäminen vaatii kuitenkin tavallista öljykattilaa suurempaa vesitilavuutta, joka toimii keräinten tuottaman energian välivarastona. Jo olemassa olevaan öljykattilaan ei saa tehdä uusia läpivientejä jälkikäteen, joten aurinkokeräimien liittäminen vanhaan kattilaan tehdään asentamalla erillinen varaaja aurinkolämmön tarpeisiin. Varaajan koko valitaan keräinpinta-alan mukaan ja se kytketään rinnan kattilan kanssa. Kuvassa 7 on esimerkki aurinkolämmön yhdistämisestä öljylämmitykseen. (Tahkokorpi ym. 2016, 120–121).

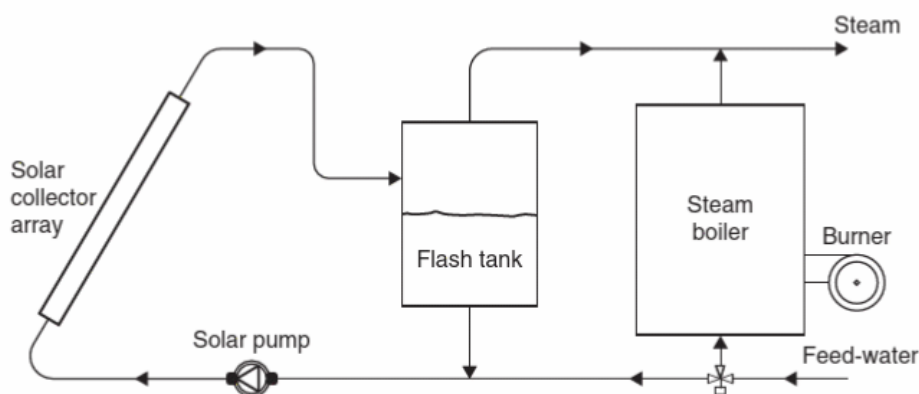


KUVA 7. Aurinkolämmön yhdistäminen öljylämmitykseen (mukaillen Tahkokorpi ym. 2016)

5.2 Prosessiveden lämmittäminen aurinkoenergialla

Prosessiveden lämmittämiseen voidaan käyttää joko läpivientijärjestelmää tai kiertovesijärjestelmää. Läpivientijärjestelmää käytetään elintarviketeollisuudessa siivouksessa, jotta veden kontaminaatiolta vältytään. Yksi tärkeimmistä asioista suunniteltaessa aurinkolämpöjärjestelmää teollisuuteen on saada aurinkoenergiaa käytettyä tasaisesti koko energiantarpeen ajan. Teollisuuden lämmöntarve on melko tasaista, kun taas auringosta saatava energian määrä vaihtelee päivästä ja vuorokauden ajasta riippuen. (Kalogirou 2014, 400–402).

Aurinkolämpöjärjestelmän ohelle voidaan liittää joko rinnan tai sarjaan apulämmitin, jolloin käyttövedtä voidaan lämmittää, mikäli aurinkoenergiasta saatava lämpö ei yksin riitä vastaamaan käyttöveden lämmityksen tarpeesta. Sarjaan liittäminen on rinnan liittämistä suositumpi tapa, sillä se tarjoaa alhaisemman käyttölämpötilan keskimääräiselle keräimelle, mikä puolestaan johtaa hyötysuhteen paranemiseen. Rinnankytkentä on kuitenkin yleistä, kun halutaan tuottaa höyryä. Matalalämpötilaista höyryä voidaan käyttää esimerkiksi sterilointiin tai suolanpoistoon. Mikäli aurinkoenergia lämmittää käyttövettä liikaa voidaan käyttää kolmitieventtiiliä tuomaan viileämpää vettä linjaan sekoittamaan käyttövettä sopivan lämpöiseksi. Apuhöyrykattilan rinnankytkentä prosessihöyryjärjestelmään on kuvattu kuvassa 8. (Kalogirou 2014, 400–402).



KUVA 8. Yksinkertainen prosessihöyryjärjestelmä rinnankytketyllä apuhöyrykattilalla (Kalogirou 2014)

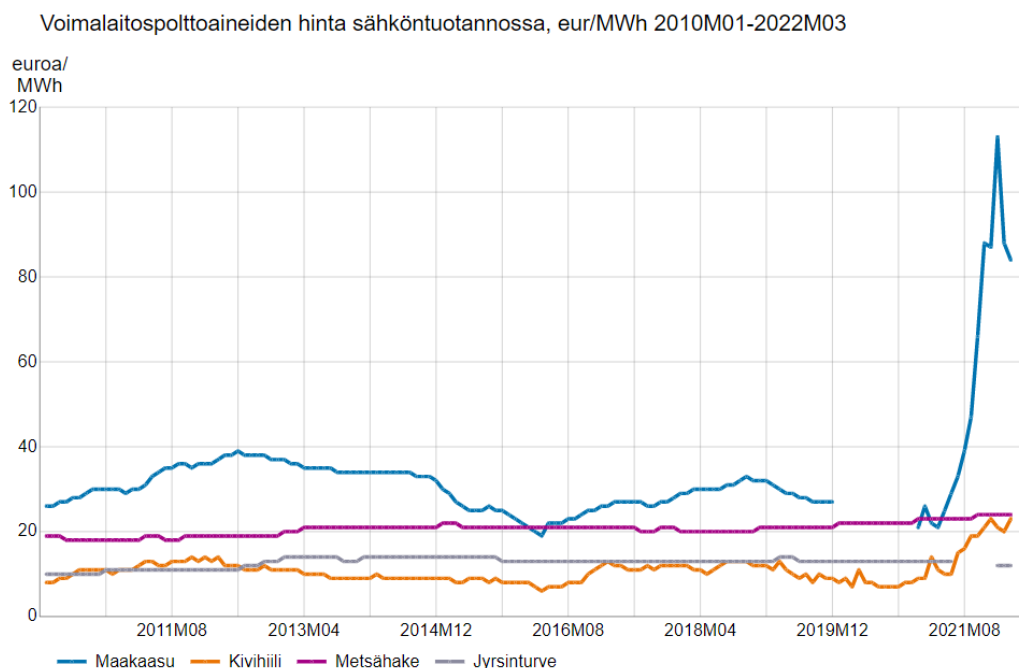
6 ENERGIAN KUSTANNUKSET

Aurinkoenergian suurimmat kustannukset syntyvät järjestelmän hankinnan ja valmistumisen aikana. Sen jälkeen se tuottaa lähes ilmaista energiaa. Jo valmiissa aurinkolämpöjärjestelmässä kustannuksia synnyttää mahdolliset rikkoutuneet osat, lämmönsiirtonesteen pumppaukseen tarvittava sähkö, joissakin tapauksissa paneelien puhdistus sekä lämmönsiirtonesteen vaihto. Aurinkolämpöjärjestelmän osien rikkoontuminen on epätodennäköistä ja lämmönsiirtoneste vaihdetaan keskimäärin kymmenen vuoden välein. Järjestelmän kokonaiskustannuksista ne ovat yhteensä vain pieni osa. (Tahkokorpi ym. 2016, 188).

Tarkkojen takaisinmaksuaikojen tai sisäisten korkokantojen laskeminen on haastavaa, sillä tuotettavan lämpöenergian määrää on vaikea arvioida pitkälle tulevaisuuteen. Yksinkertaistettuna takaisinmaksuaika voidaan kuitenkin laskea jakamalla investoinnin perushankintakustannus siitä saatavalla nettotuotolla. Investoinnin perushankintakustannusta varten tulee pyytää aurinkolämpöjärjestelmien toimittajilta tarjouksia aurinkolämpöjärjestelmistä. Aurinkolämpöjärjestelmien nettotuotot vaihtelevat riippuen saatavan lämpöenergian määrästä ja säästettävien polttoaineiden hinnoista.

6.1 Muiden energia polttoaineiden kustannukset

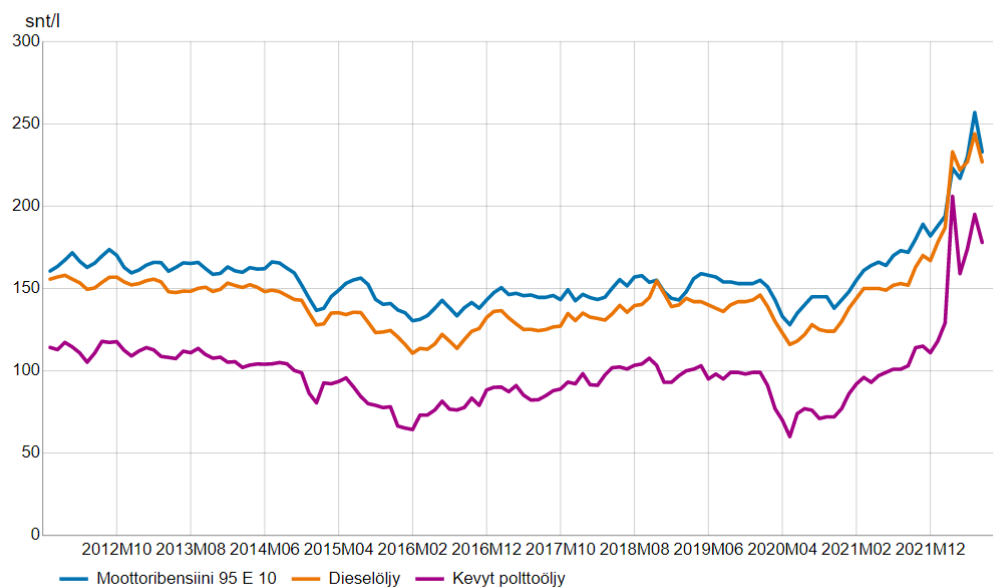
Aurinkoenergiaa käytettäessä saadaan vähennettyä muiden käytössä olevien polttoaineiden kuluista. Polttoaineiden hintojen nousu näkyy erityisesti fossiilisissa polttoaineissa kuten kivihiilessä, öljyssä ja maakaasussa. Tilastokeskuksen (Energian hinnat) mukaan maakaasun veroton hinta on nelinkertaistunut ja kivihiilen kaksinkertaistunut viimeisen vuoden aikana. Metsähakkeen ja jyrshinturpeen hintakehitys on ollut maltillisempaa kivihiileen ja maakaasuun verrattuna. Metsähakkeen hinta nousi 3 %, kun taas jyrshinturpeen hinta laski 7 %. Alla olevissa tilastokeskuksen kuvaajissa, kuva 9 ja kuva 10, on esitetty polttoaineiden hintakehitys.



Lähde: Tilastokeskus, Energian hinnat

KUVA 9. Polttoaineiden hintakehitys (Tilastokeskus, Energian hinnat 2022)

Polttoneiteiden kuluttajahinnat 2012M01-2022M07



Lähde: Tilastokeskus, Energian hinnat, Kuluttajahintaindeksi

KUVA 10. Polttoneiteiden hintakehitys (Tilastokeskus, Energian hinnat, Kuluttajahintaindeksi 2022)

Kevyen polttoöljyn hinta seuraa muiden polttoneiteiden hinnankehitystä. Kuvaajassa nähtävä jyrkkä hinnan nousu kertoo polttoaineiden arvaamattomista hinnan muutoksista. Aurinkolämpöjärjestelmään sijoitettaessa tuotetun lämpöenergian hinta on tasaisempaa, sillä hinta koostuu lähinnä aurinkolämpöjärjestelmän investoinnista.

7 FAMIFARM OY

Famifarm Oy on Järvikylä merkkisistä salaateista ja yrteistään tunnettu elintarviketeollisuuden yritys. Yrityksen toimipaikka sijaitsee Joroisissa Pohjois-Savon maakunnassa. Famifarm Oy kasvattaa tuotteensa kasvihuoneissa, joita yrityksellä on yhteensä 55000 m² vuonna 2019. Tarvitsemansa energian yritys tuottaa heidän omalla haketta ja turvetta polttoaineena käyttävällä lämpölaitoksellaan sekä 700 aurinkopaneelilla. Lämpölaitos on 3 MW tehoinen ja vuonna 2019 hakkeella ja turpeella tuotettua lämpöenergiaa käytettiin 19450 MWh. Lämpölaitoksen seisokkien aikana yritys käyttää kevyttä polttoöljyä, jota kului vuonna 2019 51,5 T. Yrityksen tavoitteena on puolittaa turpeen käyttö vuonna 2023 ja pudottaa tuotteiden hiilijalanjälkeä 32 % samana vuonna. Tuotteiden hiilijalanjäljestä 59 % syntyy lämpöenergiasta. (Famifarm Oy 2019).

Famifarm Oy:n kuukausittainen lämmöntarve seuraa ulkolämpötilaa. Näin ollen talvisin lämmöntarve on suurempaa ja kesäisin pienempää. Haasteena yrityksellä on ollut tuottaa kesällä tarvittava lämmöntarve mahdollisimman tehokkaasti. Kesäisin lämpölaitoksen ajaminen minimiteholla on haastavaa ja siksi yritys toivoo tyhjiöputkikeräimistä ratkaisua ongelmaansa.

8 AURINKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN MITOITUS FAMIFARM OY:LLE

Tässä työssä aurinkolämpöjärjestelmän mitoittamiseen käytetään standardia SFS-EN 15316-4-3:2017 ja Aurinko-opasta 2012 (Heimonen 2011). Järjestelmän mitoittaminen aloitetaan selvittämällä laskennalle oleellisia lähtötietoja. Alla olevassa listassa on esitetty lähtötietoja laskennalle.

- Keräinpinta-ala 11000 m²
- Keräimet ovat tyhjiöputkikeräimiä, joissa on putkimainen absorptiopinta
- Keräinten hyötysuhde $\eta_0=90\%$ ja hyötysuhdekäyrän lämpöhäviökerroin $a_1=3\text{ W/m}^2\text{K}$ ja $a_2=0\text{ W/m}^2\text{K}$ (Nämä tiedot on arvioita ja tarkemmat tiedot ovat saatavilla keräinten toimittajalta) (Heimonen 2011).
- Keräinpiirin hyötysuhteena käytetään oletusarvoa $\eta_{\text{kierto}}=0,8$
- Keräimet ovat suunnattu etelään ja niitä on kallistettu 30°
- Lämmön tarve esitetty erillisellä taulukolla kuukausitasolla
- Lämpimälle käyttövedelle ei käytetä kiertojohtoa ja putkiston eristys on perustasoa
- Varaajien koko on 750m³ mihin on käytettävissä lisälämmitys biokattilalta

Famifarm Oy:n lämmöntarpeet on esitetty arvioina niin, että ne seuraavat ulkolämpötilaa. Pienin lämmöntarve on kesäisin ja se on merkattu 1 MW suuruisiksi Famifarm Oy:n toiveiden mukaisesti. Suurin lämmöntarve puolestaan on talvisin, jolloin lämpölaitosta käytetään maksimitheolla 3 MW. Loput lämmöntarpeet on jaettu eri kuukausille niin, että koko vuoden lämmöntarve vastaa vuonna 2019 tuotettua lämpöenergian määrää. Lämmöntarpeet ovat arvioita eivätkä ne välttämättä vastaa yrityksen todellista lämmön kulutusta.

TAULUKKO 3. Arvioitu lämmöntarve kuukausittain

	A	B
	Lämmöntarve kWh/kk	Lämmöntarve + jakeluhäviö kWh/kk
Tammikuu	2232000	2507865
Helmikuu	2016000	2265169
Maaliskuu	2157600	2424270
Huhtikuu	1944000	2184270
Toukokuu	1488000	1671910
Kesäkuu	720000	808989
Heinäkuu	744000	835955
Elokuu	744000	835955
Syyskuu	1368000	1537079
Lokakuu	1860000	2089888
Marraskuu	2016000	2265169
Joulukuu	2194800	2466067
Vuosi	19484400	21892584

Kun lämpimälle käyttövedelle ei käytetä kiertojohtoa ja putkiston eristys on perustasoa, kerrotaan häviötön lämmöntarve (taulukon 3 sarake A) luvulla 1/0,89. Saatu tulos on lämpimän käyttöveden tarve $Q_{tarve,A}$ (taulukon 3 sarake B).

Ilmatieteen laitoksen (2022a) ilmastollisen vertailukauden säteilytiedoilla saadaan muodostettua taulukko 4 kohteen säteilytiedoista. Famifarm Oy sijaitsee Keski-Suomessa, joten laskennassa käytetään Jyväskylän säteily- ja säätietoja. Taulukon 4 sarakkeessa C on esitetty ilmatieteen laitoksen vertailukauden keskimääräinen säteily vuosilta 1991–2020. Sarakkeessa D on käytetty taulukon 2 korjauskertoimia. Sarakkeeseen H on laskettu keskimääräinen teho pinnalle. Tulos saadaan kertomalla sarakkeen E arvo tuhannella ja jakamalla saatu tulos sarakkeen G arvolla.

TAULUKKO 4. Keskimääräinen säteilyteho

	C	D	E	F	G	H
	Jyväskylä	Korjauskerroin 30° etelään	Säteily kallistulle pinnalle	Päiviä/kk	Tunteja/kk	Keskimääräinen säteilyteho/kk
	kWh/m ²		kWh/m ² /kk	d	h	W/m ²
Tammikuu	5,83	1,5	8,75	31	744	11,75
Helmikuu	20,28	1,95	39,55	28	672	58,85
Maaliskuu	62,5	1,57	98,13	31	744	131,89
Huhtikuu	104,72	1,25	130,90	30	720	181,81
Toukokuu	150,83	1,09	164,4	31	744	220,97
Kesäkuu	155	1,03	159,65	30	720	221,74
Heinäkuu	155	1,05	162,75	31	744	218,75
Elokuu	118,06	1,12	132,23	31	744	177,72
Syyskuu	64,44	1,28	82,48	30	720	144,56
Lokakuu	25,27	1,46	36,89	31	744	49,59
Marraskuu	6,67	1,33	8,87	30	720	12,32
Joulukuu	2,5	1	2,5	31	744	3,36
Vuosi	870,83	1,21	1053,7	365	8760	

Taulukossa 5 esitetään kuukausittaiset keskimääräiset lämpötilat Jyväskylässä (sarake I), jotka ovat ilmatieteen laitoksen (2022b) ilmastollisen vertailukauden keskiarvolämpötiloja. Taulukkoon on laskettu tarvittava referenssilämpötila alla esitetyllä kaavalla (3)

$$\theta_{ref} = 11,6 + 1,180 \theta_{hw} + 3,86 \theta_{cw} - 1,32 \theta_e \quad (3)$$

missä

θ_e on keskimääräinen ulkolämpötila (°C)

θ_{hw} on kuumen käyttöveden minimilämpötila (40 °C)

θ_{cw} on kylmän käyttöveden lämpötila (vakio 5 °C)

Lämpötilan muutos saadaan vähentämällä keskimääräinen ulkolämpötila θ_e referenssilämpötilasta θ_{ref} . Alla toimenpide esitettynä yhtälönä (4).

$$\Delta T = \theta_{ref} - \theta_e \quad (4)$$

TAULUKKO 5. Lämpötilat

	I	J	K
	θ_e	θ_{ref}	ΔT
Tammikuu	-7,3	87,74	95,04
Helmikuu	-7,6	88,13	95,73
Maaliskuu	-3,5	82,72	86,22
Huhtikuu	2,5	74,8	72,3
Toukokuu	9,1	66,09	56,99
Kesäkuu	14	59,62	45,62
Heinäkuu	16,7	56,06	39,36
Elokuu	14,6	58,83	44,23
Syyskuu	9,4	65,69	56,29
Lokakuu	3,6	73,35	69,75
Marraskuu	-0,9	79,29	80,19
Joulukuu	-4,5	84,04	88,54

Kun keräinpiirin putkiston eristystasoa ei tunneta, käytetään lämpöhäviökertoimen laskentaan kaavaa (5) ja koko keräinpiirin laskentaan kaavaa (6).

$$U_L = 5 + 0,5 A \quad (5)$$

$$U_C = a_1 + 40 a_2 + U_L / A \quad (6)$$

missä

U_L on putkiston lämpöhäviökerroin (W/K)

U_C on koko keräinpiirin lämpöhäviökerroin (W/m²K)

a_1 on lämpöhäviökerroin (W/m²K)

a_2 on toinen lämpöhäviökerroin (W/m²K)

A on keräinpinta-ala (m²)

Tuotettu aurinkolämpö varastoidaan 750m³ vesivaraajiin, joita käytetään myös nykyisen biolämpölaitoksen varaajina. Jos vesivaraajan tilavuus poikkeaa referenssitilavuudesta (75 dm³/keräin-m²), kuten tässä tapauksessa, lasketaan korjaava kerroin C_{cap} , jonka avulla voidaan huomioida poikkeava varaajakapasiteetti. Korjauskerroin lasketaan käyttämällä kaavaa (7).

$$C_{cap} = \left(\frac{V_{tod}}{V_{ref}} \right)^{-0,25} \quad (7)$$

missä

V_{tod} on varaajan suunniteltu ominaistilavuus (dm³/keräin-m²)

V_{ref} on referenssitilavuus 75 dm³/keräin-m²

Jos varaajassa käytetään lisälämmitystä, korjataan kaavan (7) tilavuutta kertoimella $(1 - f_{apu})$ käyttäen kaavoja (8) ja (9)

$$V_{tod} = V_{nim}(1 - f_{apu}) \quad (8)$$

$$f_{apu} = x * V_{LL}/V_{nim} \quad (9)$$

missä

V_{nim} on varaajan nimellistilavuus (dm^3)

V_{LL} on varaajassa käytetyn lisälämmitysosien tilavuus (dm^3)

f_{apu} on varaajan osuus, jossa lisälämmitys on käytössä

x on lisälämmityksen käyttötavasta riippuva kerroin

Lisälämmitys mitoitetaan tässä tapauksessa niin, että sen käyttö on vain hätätapauksissa, jolloin käytetään kerrointa 0,3. Mikäli varaajassa ei käytetä lisälämmitystä f_{apu} on nolla.

Dimensiottomat suureet X ja Y lasketaan käyttämällä kaavoja (10) ja (11) ja aurinkolämpöjärjestelmästä saatava tuotto lasketaan kaavalla (12).

$$X = \frac{A * U_c \eta_{kierto} \Delta T * t_h c_{cap}}{Q_{tarve,A}} \quad (10)$$

$$Y = \frac{A * IAM * \eta_o \eta_{kierto} Q_{keräin}}{Q_{tarve,A}} \quad (11)$$

$$Q_{tuotto} = c_{tyyppi}(aY + bX + cY^2 + dX^2 + eY^3 + fX^3) * Q_{tarve,A} \quad (12)$$

missä

X on häviöt/tarve -suhde

Y on tuotto/tarve – suhde

IAM on keräintyyppiin liittyvä kohtauskulmakerroin. Tyhjiöputkikeräimille, joiden absorptiopinta on putkimainen, käytetään oletusarvona 1,0

C_{tyyppi} on varaajatyypin korjauskerroin 1

a, b, c, d, e ja f ovat varaajatyypistä riippuvia korjauskertoimia, joille käytetään standardin SFS-EN 15316-4-3:2017 arvoja:

- $a = 1,029$
- $b = -0,065$
- $c = -0,245$
- $d = 0,0018$
- $e = 0,0215$
- $f = 0$

Mikäli laskennallinen Q_{tuotto} on vähemmän kuin nolla, merkitään $Q_{tuotto}=0$. Tilanteessa, jossa Q_{tuotto} on enemmän kuin Q_{tarve} (käyttöveden lämmityksen tarve), $Q_{tuotto}=Q_{tarve}$. Yllä esitettyjä kaavoja käyttämällä lasketaan joka kuukaudelle aurinkolämpöjärjestelmästä saatava tuotto.

Taulukossa 6 on esitetty laskenta aurinkolämpöjärjestelmästä saatavasta tuotosta. Kesällä järjestelmästä saatu tuotto ylittää lämmöntarpeen, jolloin saatu tuotto on yhtä suuri kuin lämmöntarve. Talvisin marraskuun ja tammikuun välillä järjestelmästä ei saada tuottoa. Järjestelmästä saatava tuotto kattaa noin 26 % vuotuisesta lämmöntarpeesta.

TAULUKKO 6. Aurinkolämpöjärjestelmästä saatava tuotto

	L	M	N	
	X	Y	Q	%
			kWh/kk	
Tammikuu	0,972	0,028	0	0
Helmikuu	0,980	0,138	171499	8
Maaliskuu	0,913	0,321	600196	25
Huhtikuu	0,822	0,475	837216	38
Toukokuu	0,875	0,779	1015632	61
Kesäkuu	1,400	1,563	812542	100
Heinäkuu	1,208	1,542	841864	101
Elokuu	1,358	1,253	720529	86
Syyskuu	0,909	0,425	518154	34
Lokakuu	0,856	0,140	177216	8
Marraskuu	0,879	0,031	0	0
Joulukuu	0,921	0,008	0	0
Vuosi			5685387	26

8.1 Aurinkolämpöjärjestelmän apulaitteiden sähkönkulutus

Aurinkoenergiajärjestelmän apulaitteet tarvitsevat toimiakseen energiaa. Alla on esitetty, miten aurinkolämpöjärjestelmässä käytettävien pumppujen energiantarve lasketaan. Järjestelmässä käytettävien pumppujen sähköenergian kulutus voidaan laskea kaavalla (13).

$$W_{aurinko,pumput} = \Sigma(P_{pumppu,i} t_{pumppu,i})/1000 \quad (13)$$

missä

$P_{pumppu,i}$ on yksittäisen pumpun i teho kilowatteina

$t_{pumppu,i}$ on pumpun i käyttöaika tunteina.

Jos suunnitteluarvoista ei ole yksityiskohtaisia tietoja, pumpun teho voidaan laskea kaavalla (14).

$$P = (50 + 5 * A_{aurinkokeräin})/1000 \quad (14)$$

missä

$A_{aurinkokeräin}$ on kiertooppiiriin kytkettyjen keräimien pinta-ala neliöinä

Pumpun käyttöajaksi voidaan käyttää arvoa 2000 h/a, mikäli tarkempaa tietoa käyttöajasta ei ole. Sen oletetaan jakautuvan ajallisesti kuukausittaisten säteilyenergioiden suhteessa, jolloin pumppua käytetään kesällä enemmän kuin talvella. (Heimonen 2011, 10).

9 POHDINTA

Mikäli Famifarm Oy rakentaisi 11000 m² kokoisen aurinkolämpöjärjestelmän käyttäen tyhjiöputkikeräimiä, saavuttaisi se noin 26 % säästön vuosittaisesta polttoaineen kulutuksesta. Suurin vähennys saataisiin kevyen polttoöljyn kulutukseen. Kevyttä polttoöljyä käytetään lämpölaitoksen revisiion aikana, jotta tarvittava lämpö saataisiin tuotettua, kun lämpölaitos ei ole käytössä. Mikäli revisio ajoitetaan kesäkuukausille, saadaan tarvittava lämpö tuotettua kokonaisuudessaan aurinkolämpöjärjestelmällä. Aurinkolämpöjärjestelmä on hieman ylimitoitettu niin, että se tuottaa varmasti kesä ja heinäkuussa kaiken tarvittavan lämmön ja lämpölaitosta ei tarvitse käyttää. Helmikuun ja lokakuun välillä (pois lukien kesä- ja heinäkuu) järjestelmä tuottaa 8–86 % lämmön tuotannosta, jonka ansiosta myös hakkeen ja turpeen käyttöä saadaan vähennettyä kiitettävästi. Marraskuun ja tammikuun välillä järjestelmä ei tuota lämpöä.

Aurinkolämpöjärjestelmän tavoitteena oli saada tuotettua kesän lämmöntarve niin ettei lämpölaitosta tarvitse käyttää. Koska järjestelmältä toivotaan kesälle mahdollisimman suurta lämmöntuotantoa, kannattaa aurinkokeräimet asentaa 30° kulmaan. Paneelien ollessa 30° kulmassa on kesäkuukausien säteilyn korjauskerroin suurempi kuin esimerkiksi 45° asennuskulmassa. Mikäli toiveessa olisi saada mahdollisimman suuri tuotto vuosi tasolla olisi 45° parempi vaihtoehto. 45° asennuskulmalla saadaan suurempi keskimääräinen säteilyteho kuutena kuukautena, kun puolestaan 30° asennuskulmalla suurempi keskimääräinen säteilyteho saadaan neljänä kuukautena. Kahtena kuukautena säteilyteho on sama asennuskulmasta riippumatta.

Suurimmat kustannukset tulevat aurinkolämpöjärjestelmän hankinnasta ja asennuksesta, joiden jälkeen lämmön tuotanto on lähes ilmaista. Järjestelmä on kooltaan kuitenkin yli hehtaarin kokoinen ja investointina se on merkittävä. Tämä opinnäytetyö toimii hyvänä pohjana työn tilaajalle aurinkolämpöjärjestelmän kannattavuutta pohdittaessa. Mikäli tilaaja päättäisi edetä tämän projektin kanssa, pitäisi järjestelmä mitoittaa vielä uudelleen tarkemmilla lähtötiedoilla.

LÄHTEET

Duffie, John A & Beckman, William A 2013. Solar engineering of thermal processes. Fourth edition. Hoboken, N.J.: Wiley 2013

Energian hinnat [verkkojulkaisu]. Viiteajankohta: 2022, 1. vuosineljännes. ISSN=1799-7984. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 23.9.2022]. Saantitapa: <https://stat.fi/julkaisu/cktydqubc244b0c58pl9g8qbh>

Energian hinnat [verkkojulkaisu]. Viiteajankohta: 2022. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu 23.9.2022] Saantitapa: <https://stat.fi/tilasto/ehi>

Famifarm Oy 2019. Vastuullisuusraportti. Verkkojulkaisu. https://jarvikyla.fi/wp-content/uploads/2020/07/jarvikyla_vastuullisuusraportti2019_verkko_v2.pdf. Viitattu 28.9.2022.

Heimonen, Ismo 2011. Aurinko-opas 2012. Aurinkolämmön ja -sähkön energiantuotannon laskennan opas. Sitra ja ympäristöministeriö.

Ilmatieteen laitos 2022a. Auringonpaiste- ja säteilytilastot. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/1991-2020-auringonpaiste-ja-sateilytilastot>. Viitattu 27.9.2022.

Ilmatieteen laitos 2022b. Lämpötilatilastot. Verkkojulkaisu. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/1991-2020-lampotilatilastot>. Viitattu 27.9.2022.

Kalogirou, Soteris A 2014. Solar energy engineering: processes and system. Second edition. Amsterdam: Elsevier/Academic Press 2014.

Motiva A 2022. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Verkkojulkaisu. Päivitetty 22.8.2022. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa. Viitattu 14.7.2022.

Motiva B 2020. Aurinkolämpöjärjestelmät. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.8.2020. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat. Viitattu 13.7.2022.

Motiva C 2020. Tasokeräimet. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.8.2020. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/nestekiertoiset_keraimet/tasokeraimet. Viitattu 13.7.2022.

Motiva D 2020. Tyhjiöputkikeräimet. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.8.2020. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/nestekiertoiset_keraimet/tyhjioputkikeraimet. Viitattu 13.7.2022.

Motiva E 2022. Aurinkokeräinten hyötysuhteet. Verkkojulkaisu. Päivitetty 25.3.2022. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/aurinkokerainten_hyotysuhteet. Viitattu 13.7.2022.

SFS-EN 15316-4-3:2017:en Energy performance of buildings. Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Part 4-3: Heat generation systems, thermal solar and photovoltaic systems, Module M3-8-3, M11-8-3. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Tahkokorpi, Markku, Erat, Bruno, Hänninen, Pekka, Nyman, Christer, Rasinkoski, Asko & Wiljander, Mats 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki: Into kustannus.