



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

LÄMPÖPUMPUN HYÖDYNTÄMINEN AURINKO- KAUKOLÄMMÖN TUOTANNOSSA

Kuopion Energia Oy

TEKIJÄ:

Petri Karjalainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Petri Karjalainen	
Työn nimi Lämpöpumpun hyödyntäminen aurinkokaukolämmön tuotannossa	
Päiväys	13.2.2022
Sivumäärä/Liitteet	34/2
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Kuopion Energia Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä opinnäytetyössä on tutkittu Kuopion Energian toimeksiannosta lämpöpumpun käytön kannattavuutta aurinkokaukolämpökentän tuotannon tehostamiseen. Kuopion Energia rakensi Iloharjuun tyhjiöputkitekniikkaa hyödyntävän aurinkokeräinkentän vuonna 2020. Keräinkenttä on teholliselta pinta-alaltaan 250 neliometriä. Kuopion Energian Iloharjun aurinkokeräinkenttä tuottaa vuorokaudessa lämpöä tietyllä aikavälillä, riippuen auringon lämpösäteilyn määrästä, joten lämpöpumppu mahdollistaa tasaisen kaukolämpötuotannon kaukolämpöverkkoon silloinkin, kun aurinkoenergiaa ei saada.</p> <p>Tutkimus aloitettiin tutustumalla Iloharjun aurinkokaukolämpölaitokseen ja valokuvaamalla prosessia ja laitteistoa. Aurinkokeräinkentän lämpötiladataa ja Ilmatieteenlaitoksen Savilahden mittausasemalta saatua aurinkonsäteilyvoimakkuus dataa analysoimalla saatiin selvitettyä prosessin tärkeimmät toiminnalliset suureet, joiden perusteella pystyttiin aloittamaan lämpöpumpun kartoitus. Lämpöpumpun valinnassa käytettiin yhteistyökumppanin Oilon Selection Tool:ia. Lämpöpumpun tärkeimmiksi valintakriteereiksi muodostuivat lämpöteho, lämpöpumpun hyötysuhde eli COP, laaja käyttölämpötila-alue, fyysinen koko sekä taloudellinen kannattavuus. Käyttökustannukset määritettiin eri sähköhinnoilla ja hyötysuhteilla.</p> <p>Aurinkokeräinkentän teholliseksi hyötysuhteeksi saatiin 63 %, tehoksi keskimäärin 120 kW. Sopiva lämpöpumppu käyttötarkoitusta varten on Oilon P60 sarjan pumppu, jossa toteutuu hyvä muunneltavuus niin komponenttien kuin kylmäaine valikoiman suhteen. Pumpulla saadaan hyvä COP-luku kyseisessä käyttötarkoituksessa ja se on myös fyysiseltä kooltaan sopiva teknisiin tiloihin. Lämpöpumpulla tuotettavan kaukolämmön kustannukset vaihtelevat suuresti sähkön hinnan mukaan. Ideaalitalanteessa pumpun ja prosessin oheislaitteiden tarvitsema sähköenergia kyetään tuottamaan itse.</p> <p>Aurinkokeräimillä ja sähköenergian avulla tuotetun kaukolämmön osuus tulee kasvamaan Suomessa tulevaisuudessa perinteisen polttamisen avulla tuotetun lämpöenergian osuuden vähentyessä hiilineutraaliutta kohti mentäessä. Aihealueessa riittää tutkimista mm. keräinjärjestelmien tehostamisessa, talviaikaisen käytön tehostamisessa.</p>	
Avainsanat Lämpöpumppu, COP, Aurinkokeräin, Kaukolämpö	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author(s) Petri Karjalainen	
Title of Thesis Utilization of heat pump in solar district heat production	
Date 13.2.2022	Pages/Appendices 34/2
Client Organisation /Partners Kuopion Energia Oy	
<p>Abstract</p> <p>This thesis has examined by Kuopion Energia's mandate for the profitability of the use of the heat pump to enhance the production of the solar district heat field. Kuopion Energia built a solar collector field utilizing vacuum tube technology in Iloharju in 2020. The collector field has an effective area of 250 square meters. Kuopion Energia's Iloharju solar collector field generates heat per day at a given time interval, depending on the amount of thermal radiation from the sun, so the heat pump allows for steady district heat production to the district heating network even when solar energy is not obtained.</p> <p>The research was started by exploring the solar district heating plant in Iloharju and photographing the process and equipment. The analysis of the solar collector field temperature data and the insolation intensity data obtained from the Savilahti Measurement Station of the Institute of Meteorology established the main operational majors of the process, which enabled the mapping of the heat pump. For the choosing of the heat pump was used collaborator Oilon` s selection tools. The main criteria for selecting the heat pump were thermal power, heat pump efficiency, or COP, wide operating temperature range, physical size, and economical profitability. Operating costs were determined by different electricity prices and efficiencies.</p> <p>The solar collector field had an effective efficiency of 63%, with an average power of 120 kW. Suitable for use is the Oilon P60 series pump, which realises good variability in terms of components as well as refrigerant range. The pump provides a good COP figure for that purpose and is also suitable for technical premises of physical size. The cost of long-distance heat produced by a heat pump varies greatly depending on the price of electricity. In an ideal situation the electrical energy required by the pump and process auxiliaries is generated.</p> <p>The proportion of district heating produced by solar collectors and electric energy will increase in Finland due to a decrease in the proportion of thermal energy produced through traditional burning when aiming towards to carbon neutrality. In the subject area, research is needed for enhancing collector systems, enhancing wintertime use.</p>	
<p>Keywords Heat pump, COP, Solar collector, District heat</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	KUOPION ENERGIA OYJ.....	8
3	AURINKOENERGIA.....	9
3.1	Aurinkoenergia	9
3.2	Aurinkolämmön tuotanto maailmanlaajuisesti	10
3.3	Aurinkokeräimen toimintaperiaate ja aurinkokeräinten luokittelu	12
3.4	Nestekiertoinen keräin.....	12
3.4.1	Nestekiertoinen tasokeräin.....	12
3.4.2	Nestekiertoinen tyhjiöputkikeräin	13
3.5	Ilmakiertoinen keräin	14
3.6	Aurinkokeräimen hyötysuhde.....	16
4	LÄMPÖPUMPPU	18
4.1	Lämpöpumpun toimintaperiaate ja pääkomponentit	18
4.1.1	Kompressori.....	19
4.1.2	Lauhdutin	20
4.1.3	Paisuntaventtiili.....	22
4.1.4	Höyrystin.....	22
4.2	Kylmäaineet.....	23
5	TUTKIMUS JA LASKENTA	25
6	TULOKSET	28
6.1	Lämpöpumpun valinta.....	28
6.2	Aurinkokeräinkentän hyötysuhde	29
6.3	Kustannuslaskenta	29
7	YHTEENVETO JA VISIOITA.....	30
	LÄHTEET	31
	LIITE 1: LÄMPÖPUMPUN OPTIMILÄMPÖTILA-ALUEET LÄMPÖTEHON JA COP:N KANNALTA	33
	LIITE 2: SÄHKÖN OSUUS LÄMPÖPUMPULLA TUOTETUN KAUKOLÄMMÖN HINNASTA	34

KUVALUETTELO

KUVA 1. Iloharjun aurinkokeräinkenttä (Karjalainen 2021)	8
KUVA 2. Aurinkosäteilyn määrä Suomessa (Motiva 2020).....	9
KUVA 3. Aurinkolämmön tuotanto vuoden 2020 lopussa (Kansainvälinen Energiajärjestö 2021)	10
KUVA 4. Uusiutuvan energian tuotanto vuoden 2020 lopussa (Kansainvälinen Energiajärjestö 2021)	11
KUVA 5. Aurinkokaukolämmön tuotanto 2020 vuoden lopussa (Kansainvälinen Energiajärjestö 2021)	12
KUVA 6. Aurinkolämpökeräinten luokittelu (Motiva 2020).....	12
KUVA 7. Nestekiertoinen tasokeräin (Motiva 2020)	13
KUVA 8. Heat pipe (Motiva 2020)	14
KUVA 9. Ilmakeräin (Motiva 2016)	15
KUVA 10. Kylmätekninen kiertoprosessi (Motiva 2014)	18
KUVA 11. Puolihermeettinen mäntäkompressori (Bitzer 2021).....	19
KUVA 12. Puolihermeettinen ruuvikompressori (Bitzer 2021).....	20
KUVA 13. Avo-mäntäkompressori (Bitzer 2021).....	20
KUVA 14. Ilmajäähdytteinen lauhdutin (AlfaLaval 2021)	21
KUVA 15. Levylämmönsiirrin- tyyppinen lauhdutin (AlfaLaval 2021).....	21
KUVA 16. Termostaattinen paisuntaventtiili (Danfoss 2003)	22
KUVA 17. Levylämmönsiirrin-tyyppinen höyrystin (AlfaLaval 2021)	23
KUVA 18. Log p, h-tilapiirros (Swep 2019)	24
KUVA 19. Kuopion Energia Iloharjun aurinkokeräinkenttä (Karjalainen 2021)	25
KUVA 20. Lämmönsiirrin ja aurinkolämpökentän lämmönvaraaja (Karjalainen 2021).....	25
KUVA 21. Kaukolämpöteho kesäkuu 2021 (Karjalainen 2021).....	26
KUVA 22. Oilon Selection Tool (Oilon 2021)	26
KUVA 23. Lämpöpumpun tärkeimmät tunnusluvut (Karjalainen, Oilon Selection Tool 2021)	28
KUVA 24. Aurinkokeräinten hyötysuhde (Motiva 2020)	29

KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET

A = keräimen tehollinen pinta-ala m^2

A_a = Absorptiopinta-ala m^2

G = auringon säteilyteho, W/m^2

$P_{\text{kaukolämpö}}$ = Kaukolämpöteho W

k_1 = keräinpinta-alaa vastaava keräimen lämpöhäviökerroin W/m^2K

k_2 = keräinpinta-alaa vastaava keräimen häviökerroin W/m^2K

P = keräimen lämpöteho W

P_a = Absorbointipinta-alan tuottama lämpöteho W/m^2

P_1 = Keräinkentän absorbointipinta-alan tuottama teho W/m^2

P_2 = Keräinkentälle tuleva auringonsäteilyteho W/m^2

T_m = keräimen lämpötila, K

T_a = ympäristön lämpötila, K

η = hyötysuhde

η_0 = lämpöhäviötön hyötysuhde

1 JOHDANTO

Käynnissä on suuri globaalin mittakaavan ilmastonmuutoksen torjuntataistelu, johon Suomi ottaa osaa Vähähiiliset tiekartat 2035-hankeellaan. Hankkeella tavoitellaan teollisuuden- ja yhteiskunnan toimialoille hiilineutraaliutta vuoden 2035 loppuun mennessä ja siitä eteenpäin hiilinegatiivisuutta. Energian- ja lämmöntuotanto on suuren muutoksen edessä polttoainevalintojen suhteen. Turpeesta on jo osittain luovuttu ja uusiutumattomien energialähteiden käyttö vähenee koko ajan. Polttoon perustuva energiantuotanto tulee vähenemään ja auringon- ja geotermisen lämmön osuus tulee kasvamaan. Omakotitalouksien lämmitysmuotona puunpolton ohella, lämpöpumpun eri variaatiot ovat selvä enemmistö Suomessa. Kerrostalo- ja rivitalokiinteistöt ovat yleisesti kaukolämpöverkossa.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan lämpöpumpun taloudellista kannattavuutta aurinkokeräimien avulla toimivan kaukolämpövoimalan hyötysuhteen parantamisessa. Työssä analysoidaan Ilmatieteenlaitoksen säteily- ja säädataa, Iloharjun aurinkokaukolämpölaitoksen prosessista saatua dataa ja näiden tietojen perusteella lämpöpumppu voidaan valita Oilon Selection Tool- valintaohjelmalla. Käyttökustannuslaskelmat tehdään käyttäen Kuopion Energian ilmoittamaa kaukolämmöhintaa vertailtuna useaan eri sähköhintatasoon.

2 KUOPION ENERGIA OYJ

Kuopion Energia perustettiin vuonna 1906 päätöksellä rakentaa kaupunkiin oma sähkölaitos vastamaan kasvavaan sähköenergian kysyntään. Kaukolämpöverkko aloitti toimintansa vuonna 1963. Haapaniemellä sijaitsevalla voimalaitoksella on kaksi voimalaitosyksikköä, joissa polttoaineena käytetään biopolttoainetta ja turvetta. Vuosituotanto on 300–350 GWh sähköä ja 900–1000 GWh lämpöä. Kaukolämmön riittävyys lämmityskauden kulutushuippuaikoina varmistetaan useilla lämpökeskuksilla, jotka sijaitsevat ympäri Kuopiota. (Kuopion Energia 2020.)

Kuopion Energian tarjoama Kallan kylmä-lähijäähdytys on tarjolla Savilahden kaupunginosassa kiinteistöyhtiöille. Kaukokylmä tuotetaan Kallaveden syvänteistä pumpattavan veden avulla. Kierto-kylmä-kiinteistöjäähdytys on käytössä kaupunkialueella ja on tarkoitettu suurten rakennusten, kuten hotellien, toimistotalojen, kauppakeskusten ja arvokiinteistöjen jäähdyttämiseen. (Kuopion Energia 2020.)

Kuvassa 1 oleva Kuopion Energian Iloharjun aurinkokaukolämpökenttä on rakennettu vuonna 2020 ja on kokoluokaltaan Suomen suurimpia. Kentän keräimien pinta-ala on 452 neliometriä, josta lämpöä keräävää absorptiopinta-alaa on 250 neliometriä. Keräiminä käytetään 30-putkisia Heat pipe-tyhjiöputkikeräimiä, joita on 96 kappaletta. Kentän huipputeho on parhaimmillaan noin 200 kW, joka vastaa noin 30 nykyaikaisen talon lämmöntarvetta kovimmilla pakkasilla. (Kuopion Energia 2020.)



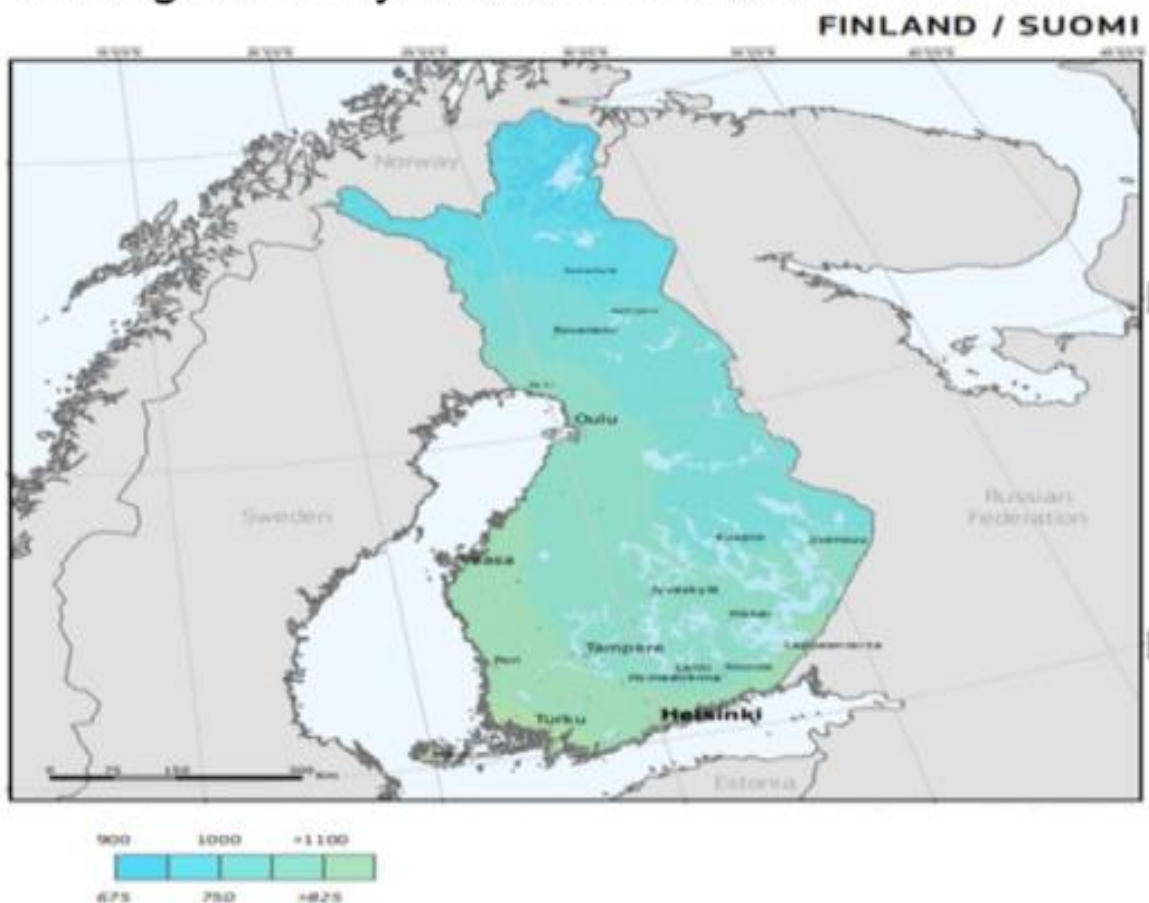
KUVA 1. Iloharjun aurinkokeräinkenttä (Karjalainen 2021)

3 AURINKOENERGIA

3.1 Aurinko

Aurinko on pääosin vedystä (75 %) ja heliumista (23 %) koostuva kaasupallo, joka sijaitsee aurinkokuntamme keskustassa. Auringon säteily on peräisin lämpöydinreaktiosta eli fuusiosta, jossa vetyatomien ytimet fuusioituvat heliumiksi. Fuusiossa vapautuu valtava määrä energiaa. Auringon kokonaisteho on $3,8 * 10^{23}$ kW, josta maapallon ilmakehän läpi tuleva säteilyteho optimiolosuhteissa on noin 1 kW/neliometri. Suomessa aurinkoenergian saantimahdollisuus optimiolosuhteissa on noin 800–1100 kWh/neliometri/vuosi. (Tahkokorpi, Erat, Hänninen, Nyman, Rasinkoski & Wiljander 2016, 11–15.)

Auringonsäteilyn määrä kWh/m² vuodessa



KUVA 2. Aurinkosäteilyn voimakkuus kilowattituntia neliometrille vuodessa (Motiva 2020)

3.2 Aurinkolämmön tuotanto maailmanlaajuisesti

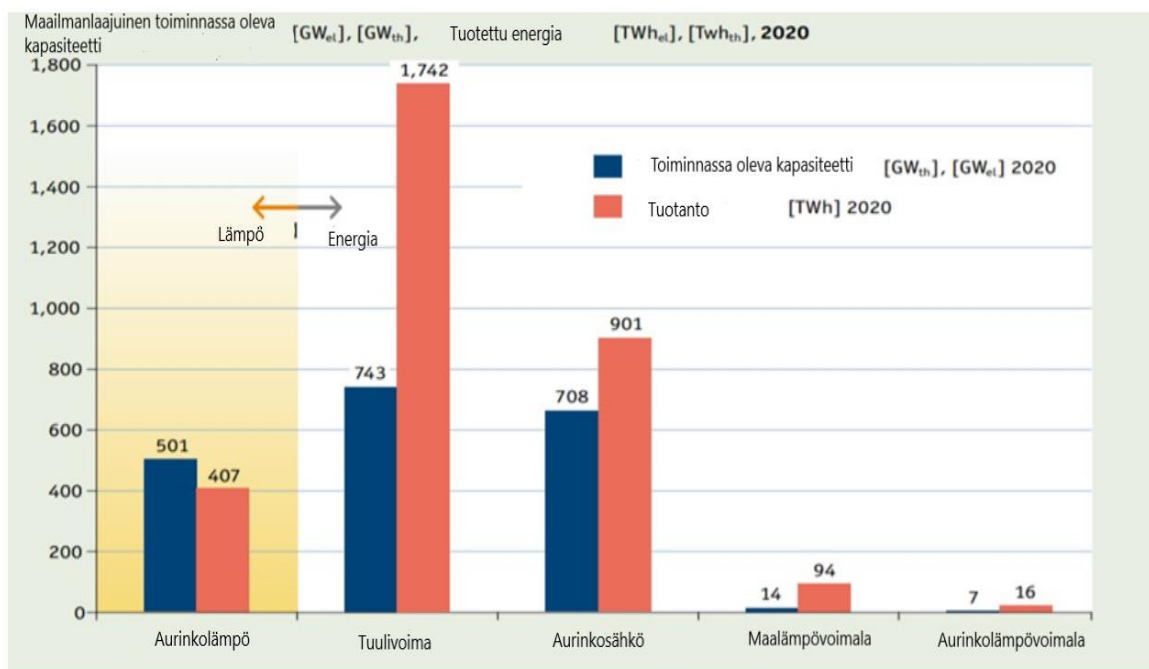
Maailmassa toiminnassa olevaa aurinkolämpökapasiteettia oli vuoden 2020 lopussa tehollisesti 501 GW, keräinpinta-alaltaan yhteensä 715 miljoonaa neliometriä ja yhteistuotoltaan 407 TWh. Aurinkolämmöllä tuotettu energia vähentää öljynkäyttöä 43.8 Mt/a ja hiilidioksidipäästöt pienenevät 141.3 Mt/a. Kuvassa 3 on esitetty aurinkolämpökapasiteetin kasvu 2000-luvulla. (Kansainvälinen Energiajärjestö 2021.)



KUVA 3. Aurinkolämmön tuotanto vuoden 2020 lopussa (Kansainvälinen Energiajärjestö 2021)

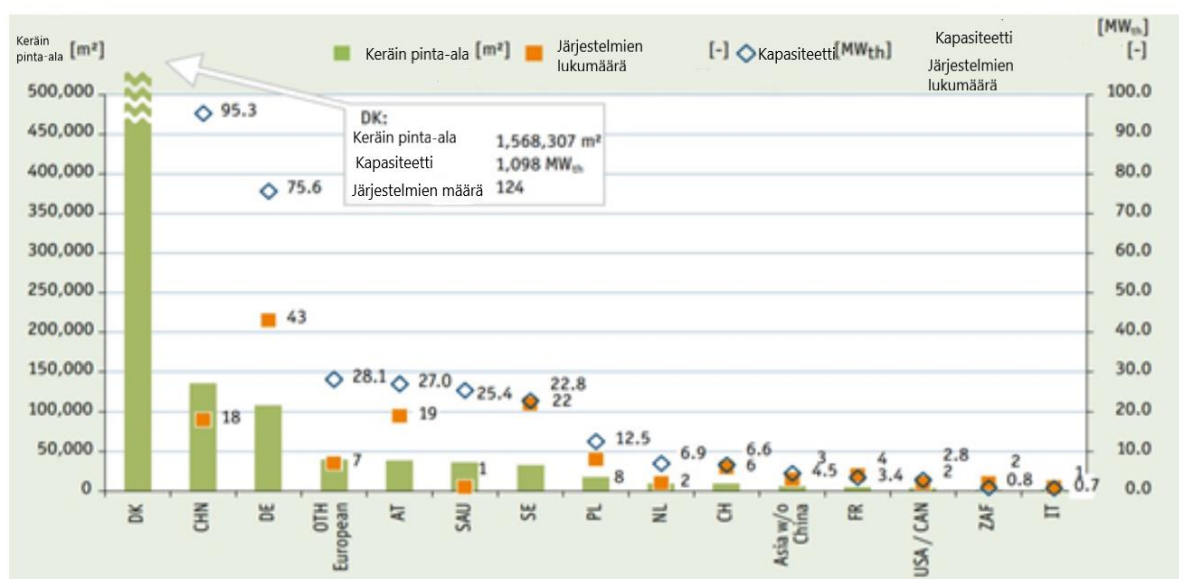
Kuvassa 4 on tarkasteltu uusituvan energiantuotannon asennetun kapasiteetin määrää, joka aurinkolämmön osalta oli vuoden 2020 lopussa 501 GW, kun taas tuulivoimalla asennettu kapasiteetti oli 743 GW ja aurinkosähköllä asennettua kapasiteettia oli 708 GW. Aurinkolämmön tuotanto oli 407

TWh, tuulivoimalla tuotettiin sähköä 1742 TWh ja aurinkosähköä tuotettiin 901 TWh. (Kansainvälinen energijärjestö 2021.)



KUVA 4. Uusiutuvan energian tuotanto vuoden 2020 lopussa (Kansainvälinen Energijärjestö 2021)

Suurin osa-alue tuotetusta aurinkolämmön määrästä kuuluu aurinkokaukolämmön tuotannolle. Vuoden 2020 lopussa maailmassa oli toiminnassa 262 suuren mittaluokan, keräinteholtaan yli 350 kilowattia ja keräinpinta-alaltaan yli 500 neliometriä, aurinkokaukolämpölaitosta, joiden kapasiteetti oli yhteensä 1410 MW ja keräinpinta-alaltaan yhteensä 2.01 miljoonaa neliometriä. Kuvassa 5 on esitetty suurimmat aurinkokaukolämmöntuottajamaat, joista ylivoimaisesti suurin on Tanska, 124 aurinkokaukolämpölaitoksellaan, yhteistuotantokapasiteetiltaan 1098 MW ja keräinpinta-alaltaan noin 1.6 miljoonaa neliometriä. (Kansainvälinen Energijärjestö 2021.)



KUVA 5. Aurinkokaukolämmön tuotanto 2020 vuoden lopussa (Kansainvälinen Energiajärjestö 2021)

3.3 Aurinkokeräimen toimintaperiaate ja aurinkokeräinten luokittelu

Aurinkokeräin muuttaa auringon säteilyenergiaa lämpöenergiaksi, joka siirretään lämmönsiirtoväliaineen avulla keruuputkistoa pitkin, joko lämpövarastoon tai suoraan kulutukseen riippuen käytettävästä prosessista ja käyttökohteesta. Lämmönsiirtoväliaineena käytetään tavallisesti vesi-propyleeniglykoliseosta, joka alentaa veden jäätymispistettä ja nostaa kiehumispistettä. Ilmaa käytetään myös väliaineena, mutta huonomman lämpökapasiteetin ja lämmönsiirtokyvyn takia käyttötarkoitus rajoittuu lähinnä ilmakiertoiseen lämmitykseen. (Tahkokorpi ym. 2015, 77–90.)

Kuvassa 6 on esitetty keräimien luokittelu käytettävän lämmönsiirtoväliaineen mukaan.



KUVA 6. Aurinkolämpökeräinten luokittelu (Motiva 2020)

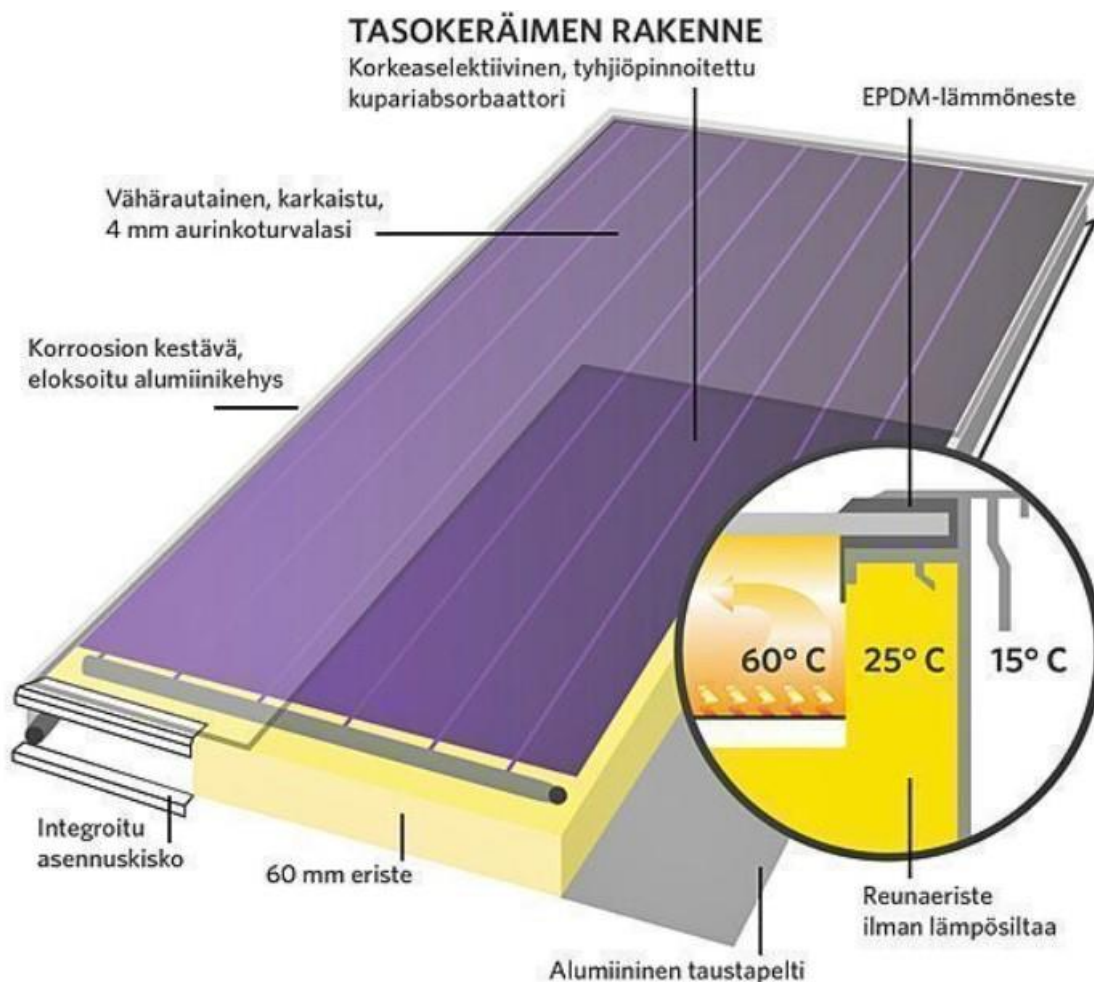
3.4 Nestekiertoinen keräin

Nestekiertoisessa keräimessä säteilyenergia siirtyy absorptioelementistä lämmönsiirtoväliaineeseen, joka kuljettaa sen joko varastoon tai suoraan käyttökohteeseen. Nestekiertoisessa keräimessä käytetään väliaineena vettä, jos käyttö on pelkästään kesäkauteen painottuvaa ja läpivuoden olevassa käytössä väliaineena on yleensä vesi-propyleeniglykoliseos. (Tahkokorpi ym. 2015, 77–90.)

3.4.1 Nestekiertoinen tasokeräin

Tasokeräimessä lämpö absorboituu lämmönkeräyselementtiin, josta se johtuu lämmönkeruuputkissa virtaavaan lämmönsiirtoväliaineeseen. Tasokeräimistä on katettuja- ja kattamattomia variaatioita.

Kuvassa 7 on esitetty karkaistulla lasilla katettu keräin, jolla saadaan säteilyenergiasta hyödynnettyä suurin osa, johtuen keräimen suuresta keräyspinta-alasta, suhteessa keräimen kokoon. Absorptioelementti valmistetaan yleensä kuparista, alumiinista tai ruostumattomasta teräksestä, mutta myös lämmönkestävää muovia voidaan käyttää matalamman lämmöntuoton kattamattomissa keräimissä. Aurinkokeräinelementin koko vaihtelee kotitalouskäyttöön tarkoitetusta n. 2–4 neliömetrin kokoisesta, aina teollisuuskäyttöön tarkoitettuun noin 10 neliömetrin kokoiseen elementtiin. Elementin paino on n. 50–300 kg. (Tahkokorpi ym. 2015, 84.)



KUVA 7. Nestekiertoinen tasokeräin (Motiva 2020)

3.4.2 Nestekiertoinen tyhjiöputkikeräin

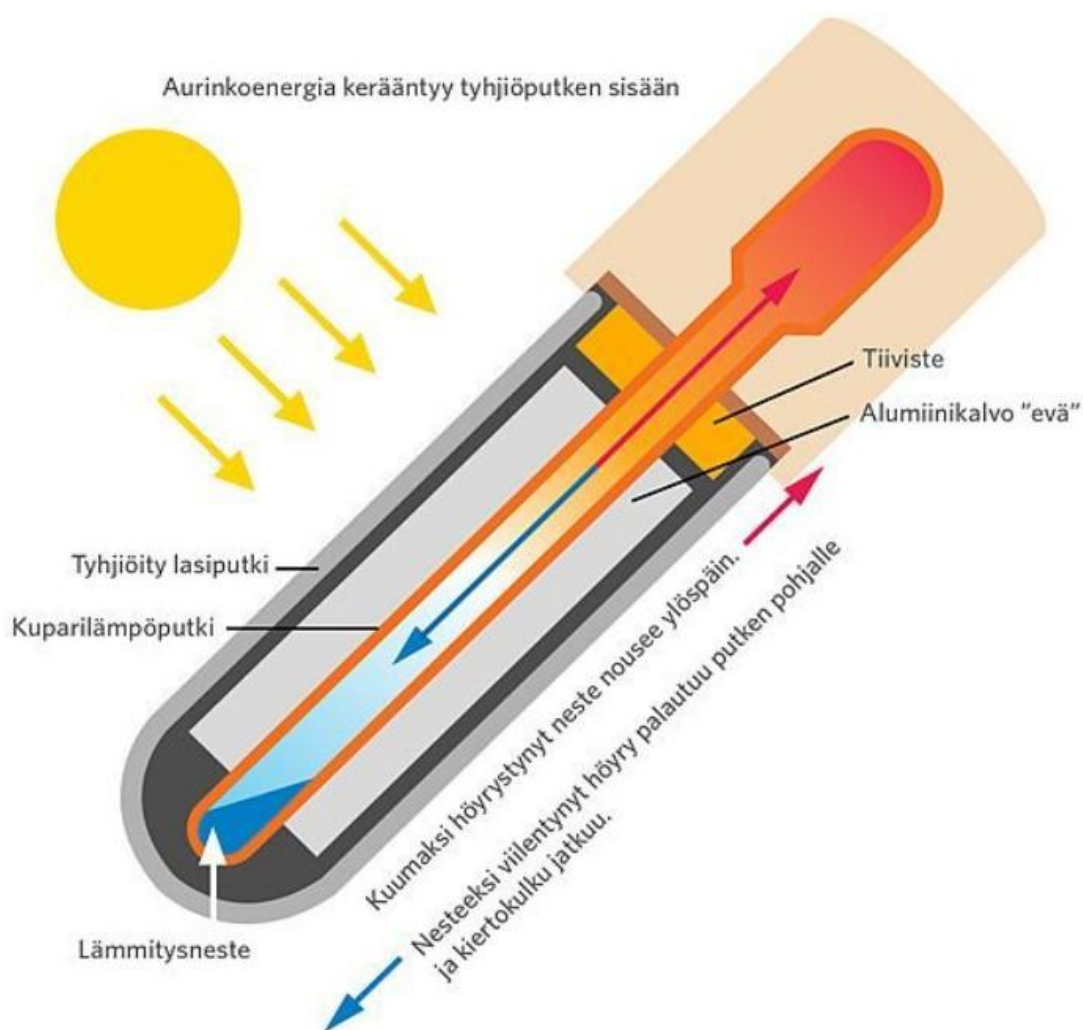
Tyhjiöputkikeräimessä absorboivan pinnan ja lämmönsiirtopiirin välillä on lähes tyhjä, ilmanpaineen ollessa 0,00001 millibaaria. Tyhjä alentaa nesteen kiehumispistettä ja on myös tehokas eriste, joten lämmönsiirtoväliaineesta tapahtuvaa lämpöenergian konvektiota systeemin ulkopuolelle ei juurikaan tapahdu. Tyhjiöputkikeräimiä on sekä yksilasiputkisia että kaksilasiputkisia keräimiä. Yksilasiputkikeräimessä nesteputken liitetty absorptiopinta on useasti levymäinen ja sijaitsee tyhjiössä lasiputken sisällä. Kaksilasiputkikeräimessä tyhjä on kahden lasiputken välissä ja absorptiopinta, joka on sylinterimäinen, sijaitsee sisemmän lasiputken keskellä. Nestekiertoisilla tyhjiöputkikeräimillä on tasokeräimiä parempi hyötysuhde, erityisesti tuottaessa korkeita lämpötiloja, yli 50°C. Lämmönsiirtyminen tyhjiöputkesta lämmönsiirtoväliaineeseen tapahtuu läpivirtausperiaatteella tai lämpöputken (Heat Pipe) avulla. Tyhjiöputkien takana voidaan käyttää joko tasomaista heijastavaa pintaa tai rinnakkain olevia

parabolisia pintoja. Näiden avulla keräimen tyhjöputkien määrää pystytään vähentämään, ja hyödyntämään sivulta tuleva lämpösäteily tehokkaammin. (Motiva 2020.)

Tyhjöputkikeräimet jaetaan kahteen luokkaan:

Tyhjöputki, jossa lämmönsiirtoväliaine kiertää läpivirtausperiaatteella U-mallisessa putkessa tai sisäkkäin olevissa koaksiaaliputkissa, mustan absorbointipinnan alla.

Kuvassa 8 on esitetty tyhjöputki, jonka sisällä on Heat Pipe -lämpöputki. Heat Pipen alaosassa neste höyrystyy alhaisessa lämpötilassa ja kuljettaa lämpöenergiaa putken yläosaan, jossa höyry lauhtuu luovuttaen lämpöenergiaa keräimen yläosassa olevan eristetyn lämmönsiirtopiirin nesteeseen. Heat Pipe:ssä käytetään lämmitysnesteenä yleisimmin alkoholia, sen alhaisen kiehumispisteen ja korkean jäätymispisteen vuoksi. (Motiva 2020.)



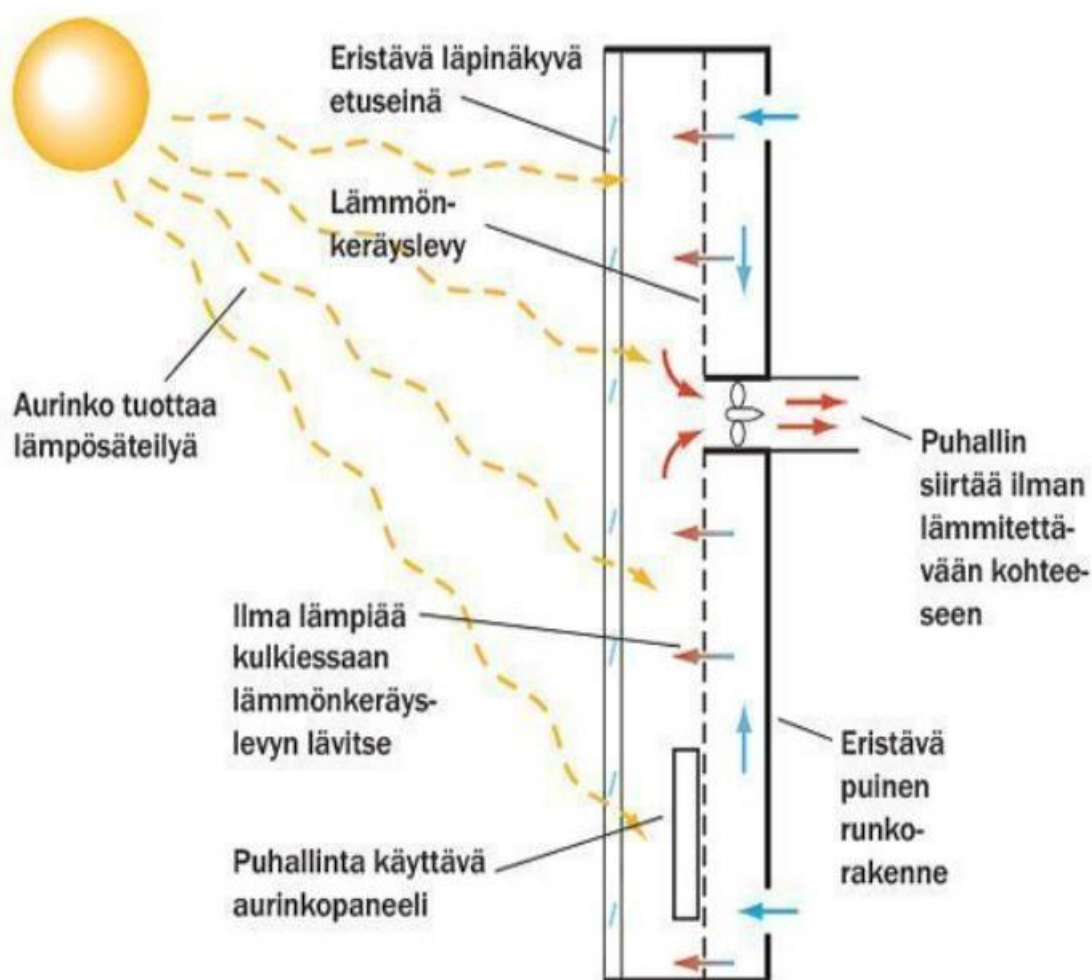
KUVA 8. Heat pipe (Motiva 2020)

3.5 Ilmakiertoinen keräin

Ilmakeräin käyttää lämmönsiirtoväliaineena ilmaa. Ilman kyky vastaanottaa ja siirtää lämpöä on huomattavasti huonompi kuin nesteellä. Tämä huono puoli voidaan kuitenkin kompensoida rakentamalla suuripinta-alaisia absorptioelementtejä. Ilmakeräimiä käytetään pääasiallisesti kohteen sisäilman lämmittämiseen.

Kuvassa 9 on esitetty ilmakeräin, jonka etuja verrattuna nestekeräimeen ovat (Motiva 2016):

Ilmakeräin on halvempi ja helpompi valmistaa yksinkertaisen rakenteensa vuoksi. Keräin on varmatoiminen, eikä korroosio-ongelmia ole vuodon sattuessa. Väliaine ei aiheuta lämpöongelmia eikä jäädy. Ilmakiertoisella keräimellä voidaan varastoida lämpöä rakennuksen omiin rakenteisiin, kuten välipohjaan ja alapohjaan.



KUVA 9. Ilmakeräin (Motiva 2016)

3.6 Aurinkokeräimen hyötysuhde

Aurinkokeräimeen tulevasta lämpösäteilystä pystytään hyödyntämään vain tietty osa. Hyödynnettävän energiamäärän suhdetta maanpinnalle säteilevän lämpöenergian määrään kutsutaan hyötysuhteeksi. Hyötysuhteeseen vaikuttavat useat tekijät (Motiva 2016):

Aurinkokeräimen kaltevuuskulma ja suuntaus eteläakselilla (atsimuutti) vaikuttavat hyötysuhteeseen merkittävästi, kuten myös, onko keräin katettu vai kattamaton. Merkitystä on myös katetun pinnan absorptio- ja lämmönsiirto-ominaisuuksilla sekä heijastinpinnan muotoilun kautta saavutettavilla ominaisuuksilla ja pinnan materiaalilla. Suuri vaikutus on myös lämmönsiirtoväliaineena käytettävän liuoksen fysikaalisilla, johtumiseen perustuvilla lämmönsiirto-ominaisuuksilla. Tärkeää on myös aurinkokeräimen käyttölämpötila ja lämmönkeruupinnan ominaisuudet, esimerkkinä absorptiopinnan tummuusaste. Lämmönsiirtoon käytettävän putkiston eristysluokka on oltava hyvä ja putkiston pituus tarkoitukseen sopiva, jotta lämpöhäviöt saadaan minimoitua. Järjestelmässä käytettävän varaa-ajan/lämpöakun lämpötilan tulee olla optimaalinen. Ulkoilmassa vallitsevat sääolosuhteet ovat merkittävät; lämpötila, tuulisuus, auringonsäteilyn tulokulma, puista tai rakennuksista johtuvat varjostukset. Katteen-, absorptio- ja heijastinpinnat tulee olla puhtaita maksimaalisen hyötysuhteen saavuttamiseksi.

Hyötysuhde lasketaan seuraavan kaavan (kaava 1) avulla:

$$\eta = \eta_0 - k_1 * \left(\frac{T_m - T_a}{G - k_2}\right) * \left(\frac{T_m - T_a}{G}\right)^2 \quad (1)$$

missä:

η = hyötysuhde

η_0 = lämpöhäviötön hyötysuhde

T_m = keräimen lämpötila, K

T_a = ympäristön lämpötila, K

G = auringon säteilyteho, W/m^2

k_1 = keräinpinta-alaa vastaava keräimen lämpöhäviökerroin W/m^2K

k_2 = keräinpinta-alaa vastaava keräimen häviökerroin W/m^2K

Tuotetun lämpöenergian määrä lasketaan seuraavan kaavan (kaava 2) avulla:

$$P = A * (\eta_0 * G - k_1 * (T_m - T_a) - k_2 * (T_m - T_a)^2) \quad (2)$$

missä:

P = keräimen lämpöteho W

A = keräimen tehollinen pinta-ala m^2

η_0 = lämpöhäviötön hyötysuhde

T_m = keräimen lämpötila, K

T_a = ympäristön lämpötila, K

G = auringon säteilyteho, W/m^2

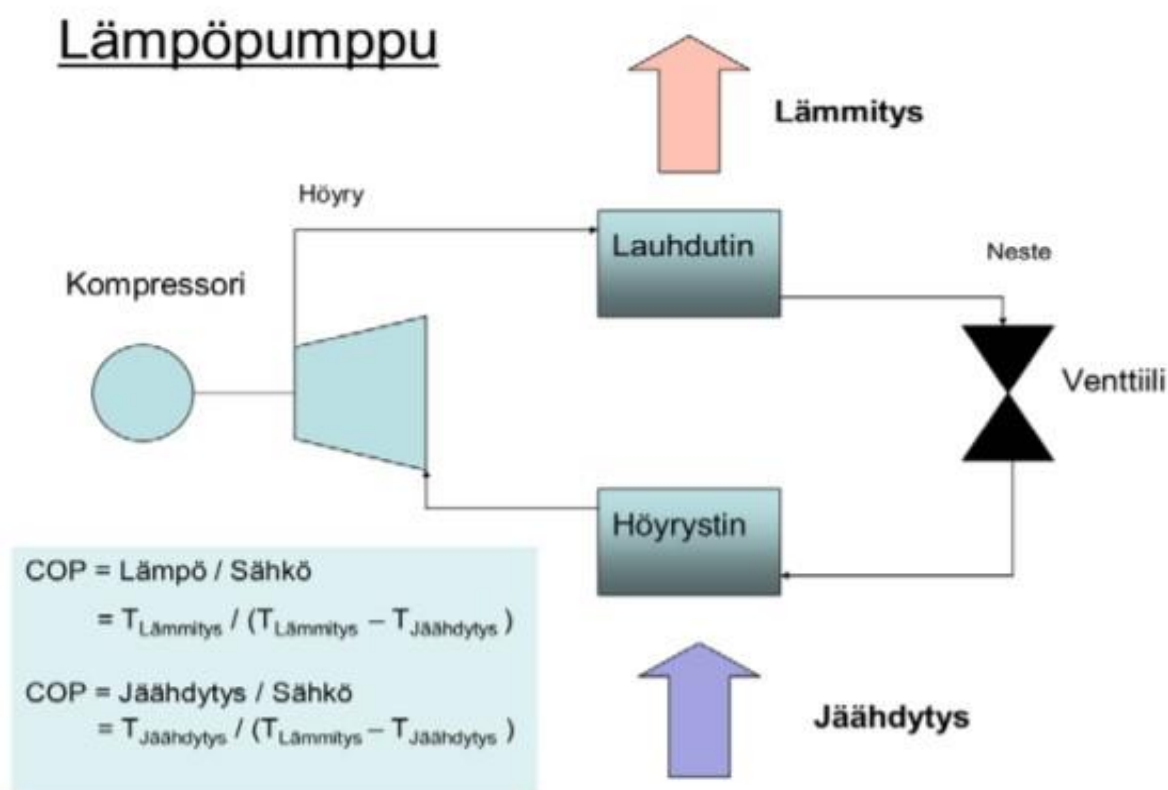
k_1 = keräinpinta-alaa vastaava keräimen lämpöhäviökerroin W/m^2K

k_2 = keräinpinta-alaa vastaava keräimen häviökerroin W/m^2K

4 LÄMPÖPUMPPU

4.1 Toimintaperiaate ja pääkomponentit

Lämpöpumpun kylmäteknisessä kiertoprosessissa siirretään tehdyn työn avulla prosessiin lämpöä matalammasta korkeampaan lämpötilaan. Kiertoprosessin väliaineena toimii kylmäaine, jonka höyrystymiseen ja lauhtumiseen erisuuruissa paineissa perustuu koko kiertoprosessin toiminta. (Kaappola, Hirvelä, Jokela, Kianta 2012, 17.)



KUVA 10. Kylmätekniinen kiertoprosessi (Motiva 2014)

Kuvassa 10 tarkastellaan kylmätekniisen kiertoprosessin toimintaperiaatetta, sekä kylmäaineen olotilan muutoksia prosessin eri vaiheissa.

Höyrystimessä matalapaineinen ja -lämpötilainen kylmäaine sitoo itseensä lämpöä ympäristöstään ja höyrystyy. Seuraavassa vaiheessa kompressor puristaa kylmäaineen korkeampaan paineeseen aiheuttaen kylmäaineen tulistumisen ja huomattavan lämpötilan nousun. Kompressorista tulistunut, korkealämpötilainen ja -paineinen höyry johdetaan lauhtuttimelle, jossa höyrystä vapautuu suuri määrä lämpöenergiaa sen lauhtuessa. (Kaappola ym. 2012, 17.)

Lauhtuttimen jälkeen kylmäaine menee paisuntaventtiilille, jossa tapahtuu kylmäaineen lämpötilan ja paineen lasku, aiheuttaen kylmäaineen höyrystymisen. Osittain höyrystynyt matalapaineinen ja -

lämpötilainen kylmäaine saapuu jälleen höyrystimelle ja kiertoprosessi alkaa alusta. (Kaappola ym. 2012, 18.)

4.1.1 Kompressori

Kompressorilla korotetaan kylmäaineen paine höyrystymislämpötilasta lauhtumislämpötilaan sekä aiheutetaan paine-ero lauhduttimen ja höyrystimen välille, joka mahdollistaa prosessin toimivuuden. Kompressorit jaotellaan rakenteen mukaan avokompressoreihin, puolihhermeettisiin- tai hermeettisiin kompressoreihin. Yleisin kompressorityyppi on hermeettinen mäntäkompressori, jota käytetään mm. kotitalouksien jääkaapeissa ja pakastimissa, pienissä kylmlaitteissa, lämpöpumpuissa ja ilmastointilaitteissa. Hermeettinen kompressori sähkömoottoreineen on rakennettu hitsatun metallikuoren sisälle, eikä yleensä ole purettavissa, joten laitteen vikaantuessa se vaihdetaan uuteen. (Kaappola ym. 2012, 51–52.)

Kuvassa 11 esitetty puolihhermeettinen mäntäkompressori on huollettava kokonaisuus, jossa moottori ja kompressori sijaitsevat avattavan kuoren sisällä. Tätä kompressorityyppiä käytetään tyypillisesti paineluokaltaan suuremmissa lämpöprosesseissa mm. jäähdytyskeskukset, suuret lämpöpumput. Puolihhermeettinen mäntäkompressori on helppo huoltaa rakenteensa takia. (Kaappola ym. 2012, 52.)



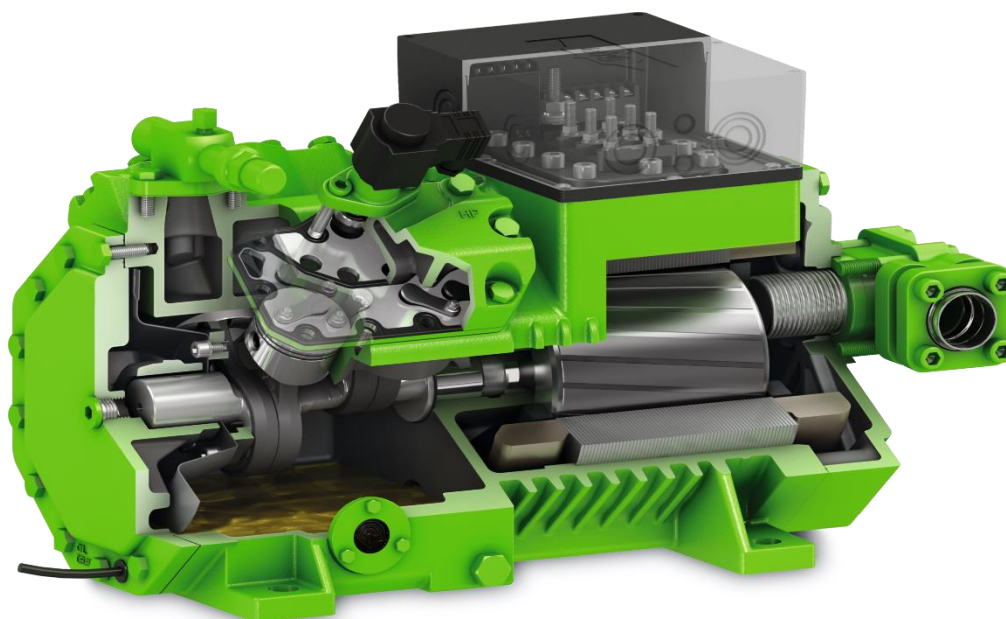
KUVA 11. Puolihhermeettinen mäntäkompressori (Bitzer 2021)

Puolihhermeettinen ruuvikompressori tuottaa suuren paineen, joka kehitetään ahtamalla kylmäainehöyryä kahden pyörivän roottorin avulla, joten sitä käytetään lähinnä teollisuuskokoluokan lämpöpumpuissa ja -prosesseissa. Kompressori on esitetty kuvassa 12. (Kaappola ym. 2012, 54.)



KUVA 12. Puolihermeettinen ruuvikompressori (Bitzer 2021)

Kuvassa 13 esitetyssä avo-mäntäkompressorissa ei ole integroitua moottoria, vaan kompressorin tarvitsema energia tuotetaan kompressoriin liitettävällä akselikytkinvälitteisellä sähkömoottorilla tai kiilahihnapyörävetoisena kuten raskaan kuljetuskaluston sovelluksissa. (Kaappola ym. 2012, 52–53.)



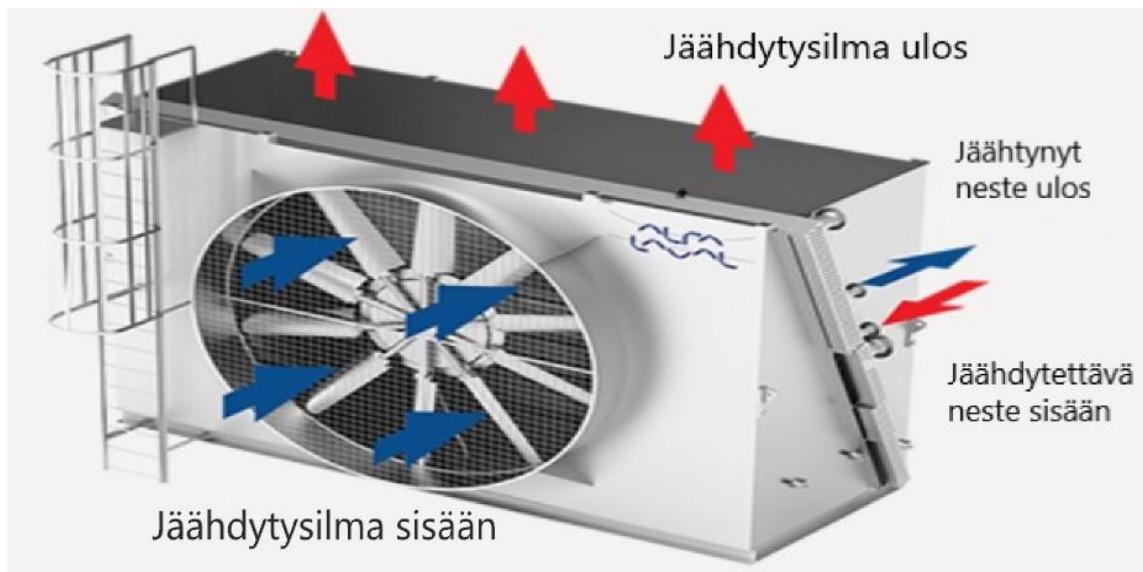
KUVA 13. Avo-mäntäkompressori (Bitzer 2021)

4.1.2

Lauhdutin

Lauhduttimessa nesteytetään kompressorin puristama, tulistunut kylmäainehöyry. Tavallisesti lauhduttimet ovat ilma- ja nestejäähdytteisiä, käyttötarpeen mukaan. Kuvassa 15 esitetyjä ilmalauhduttimia käytetään 1 MW:n tehoon saakka niiden edullisten käyttökustannusten, luotettavuuden, huollettavuuden ja jäätymättömyyden takia. Haittapuolina ovat suuri tilantarve, melu ja suuri kylmäaine-

täytös. Ilmalauhduttimen kennostot valmistetaan yleensä kupariputkista ja alumiinilamelleista. Teollisuuskäytössä lamellit yleensä valmistetaan kuparista tai pinnoitetaan epoksilla. Lamellien avulla lämmönsiirtopinta-ala kasvatetaan mahdollisimman suureksi. (Kaappola ym. 2012, 55–56.)



KUVA 14. Ilmajäähdytteinen lauhdutin (AlfaLaval 2021)

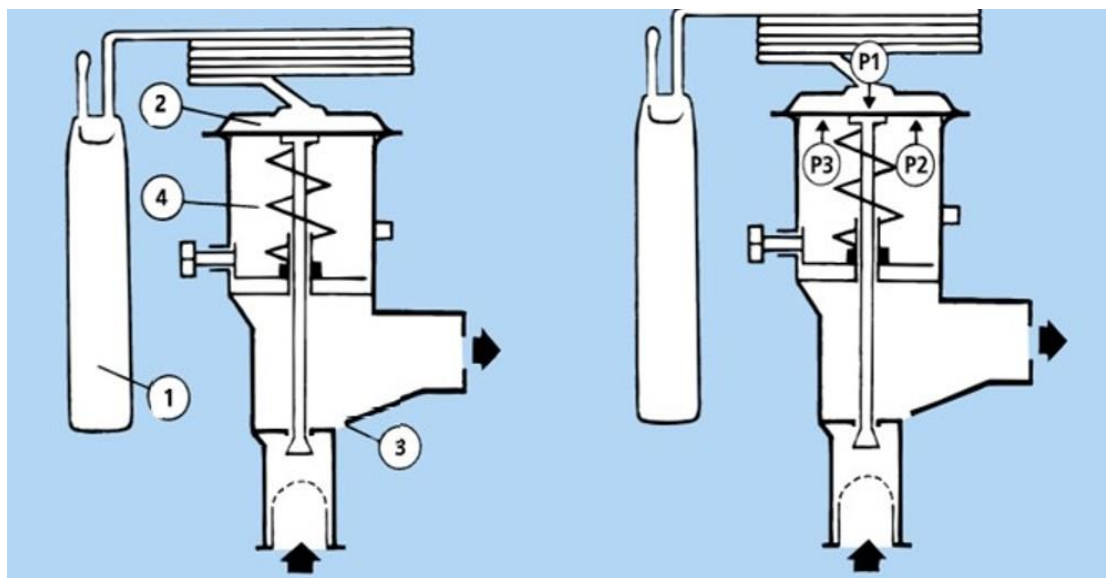
Nestejäähdytteinen lauhdutin voi olla malliltaan moniputki-, koaksiaali- tai usein teollisuudessa käytettävä levylämmönsiirrin-tyyppinen lauhdutin. Levylämmönsiirrin-tyyppinen lauhdutin koostuu toisiinsa kiinni juotetuista, lamellipoimutetuista levyistä. Joka toisessa levyvälissä virtaa lauhduttava neste ja joka toisessa lauhtutettava kylmäaine. Lauhdutettava kylmäainehöyry johdetaan lämmönsiirtimen yläosaan ja lauhtunut kylmäaine poistuu siirtimen alaosasta. Lauhduttava neste tulee lämmönsiirtimen alaosaan ja poistuu siirtimen yläosasta lämpöenergiaa sitoneena. Kuvassa 15 on esitetty yleisimpiä levylämmönsiirrin tyyppisiä lauhduttimia. (Kaappola ym. 2012, 56.)



KUVA 15. Levylämmönsiirrin- tyyppinen lauhdutin (AlfaLaval 2021)

4.1.3 Paisuntaventtiili

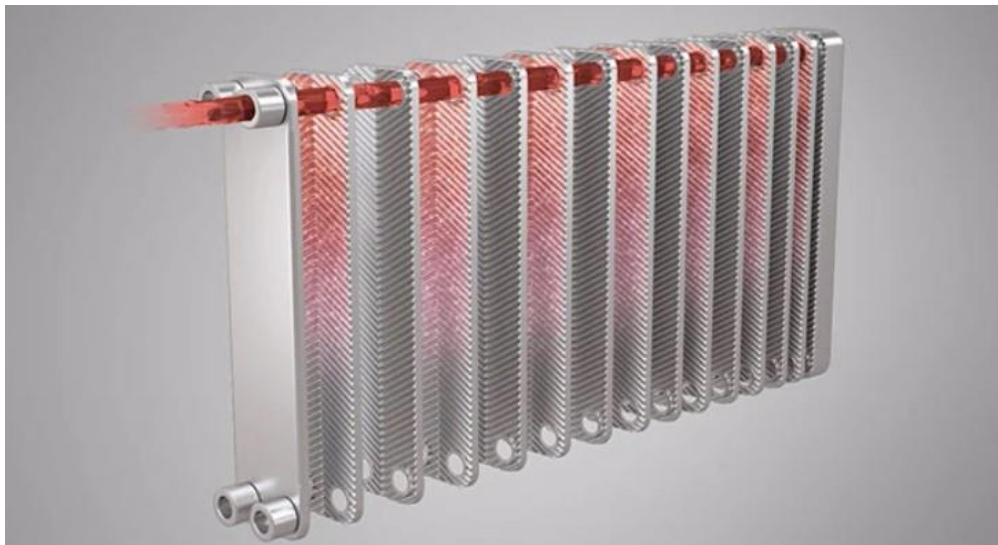
Kuvassa 16 esitetyn termostaattisen paisuntaventtiilin tehtävä on säätää kylmäaineen ruiskutusta höyrystimeen. Paisuntaventtiilin karan asento riippuu kylmäaineen tulistusasteesta. Tulistusasteen noustessa, lämpötila höyrystimestä lähtevässä imuputkessa nousee, jolloin höyrystimen jälkeen olevan paisuntaventtiilin tuntoelimen (1) lämpötila ja paine nousevat. Paine johtuu kapillaariputkea pitkän kalvon (2) yläpuoliseen tilaan ja siitä suuttimen neulaventtiiliin (3), jolloin venttiili avautuessaan lisää, päästää enemmän kylmäainetta höyrystimeen. Kalvon alapuolelle kohdistuu paisuntaventtiilin sisäinen paine. Tulistuksen määrä säädetään jousen (4) jäykkyyttä muuttamalla. Venttiilissä on myös sihti estämässä ylimääräisten partikkelien pääsy venttiiliin. Tuntoelimestä välittyvä paine (P1) avaa venttiiliä ja venttiilin sisäinen paine (P2) ja jousen aiheuttama voima (P3) pyrkivät sulkemaan sitä. Tulistuksen määrä on suoraan verrannollinen venttiilin asentoon. (Kaappola ym. 2012, 57–58.)



KUVA 16. Termostaattinen paisuntaventtiili (Danfoss 2003)

4.1.4 Höyrystin

Höyrystimessä kylmäaine höyrystyessään sitoo lämpöä itseensä ympäristöstä. Höyrystimen lohkot valmistetaan yleensä kupariputkista ja alumiinilamelleista. Lamellit voidaan pinnoittaa käyttötarkoituksen mukaan. Vaativiin olosuhteisiin valmistetaan ruostumattomasta teräksestä tehtyjä höyrystimiä. Höyrystimen lamellien ulkopintaan alkaa kehittyä jäätä matalissa lämpötiloissa, joka on mahdollista poistaa joko ilmasulatuksella tai sähkövastuksen avulla. Kuvassa 17 esitetty levylämmönsiirrin-tyyppinen höyrystin on teollisuuden käytössä yleinen, koska se on kooltaan huomattavasti pienempi kuin vastaavan tehoinen moniputkihöyrystin. Höyrystinmalleja löytyy jokaisen käyttötarkoituksen ja olosuhteen mukaan. (Kaappola ym. 2012, 59–60.)



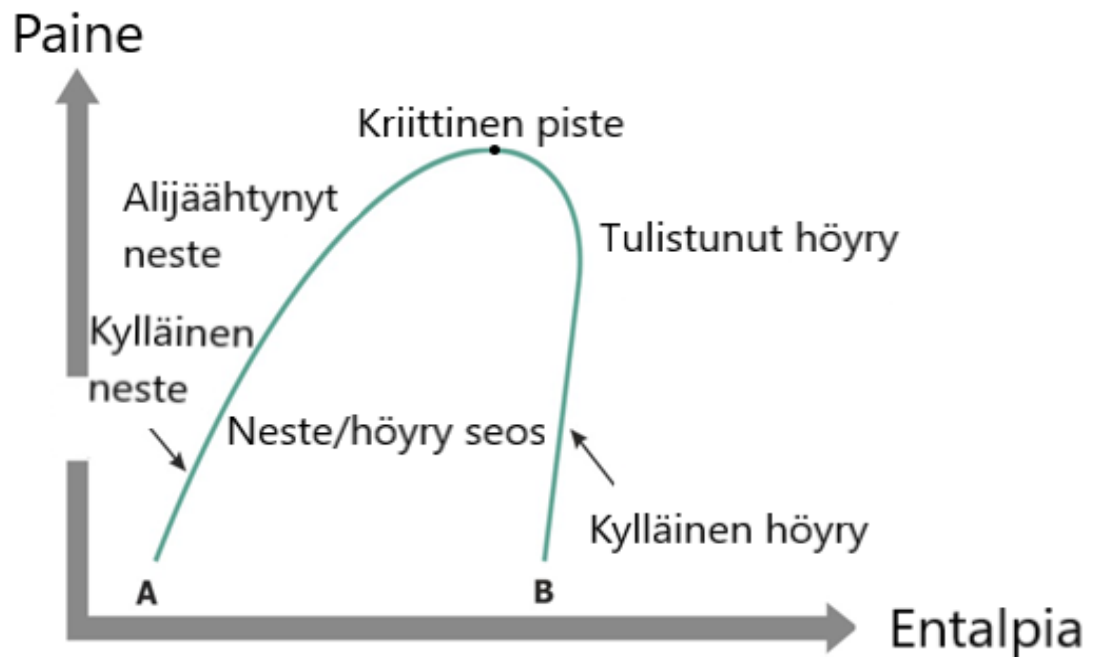
KUVA 17. Levylämmönsiirrin-tyyppinen höyrystin (AlfaLaval 2021)

4.2 Kylmäaineet

Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja, jotka toimivat lämmönsiirtoväliaineena lämpöpumpussa. Kylmäaineille on ominaista niiden kyky muuttaa olomuotoa nestemäisestä kaasuksi ottaessaan vastaan lämpöä ympäristöstä, tai kaasusta nestemäiseksi lämpöä ympäristöön luovuttaessaan. Tätä olomuodon muutosta hyväksikäyttämällä voidaan siirtää suuria lämpökuormia pienellä kylmäaineen massavirtauksella. Kylmäaineen ominaisuudet riippuvat siihen vaikuttavasta lämpötilasta ja paineesta. Jokaiselle kylmäaineelle on laadittu paine-entalpia-tilapiirros, josta selviää kylmäaineen olomuodon muutokset eri paineen- ja lämpötilan alaisena. Tilapiirrosta kutsutaan log-p, h tilapiirroksi. Kuvassa 18 esitetään kylmäaineen rajakäyrä, joka jakaa kylmäaineen eri olomuotoihin. Kylmäaineella oleva kriittinen piste jakaa rajakäyrän kahteen osaan: kylläisen nesteen- ja kylläisen höyryn tasapainokäyriin. (Kaappola ym. 2012, 19.)

Kylläisen nesteen tasapainokäyrän vasemmalla puolella kylmäaine on alijäähtynyttä nestettä ja vastaavasti kylläisen höyryn tasapainokäyrän oikealla puolella kylmäaine on tulistunutta höyryä. Tasapainokäyrien välissä olevalla alueella kylmäaine esiintyy seoksena, joka koostuu nesteestä ja höyrystä. (Kaappola ym. 2012, 19.)

Kiertoprosessia, jossa kylmäainehöyry puristetaan kompressorilla kriittistä pistettä korkeampaan paineeseen, kutsutaan ylikriittiseksi prosessiksi. Kriittisen pisteen yläpuolella kylmäaine on kaasuuntu- nut, eikä se palaudu enää nesteeksi lämpöä poistamalla. Kriittisen pisteen alapuolella tapahtuva kiertoprosessi on alikriittinen prosessi. (Kaappola ym. 2012, 19.)



KUVA 18. Log p, h-tilapiirros (Swep 2019)

Kylmäaineet jaotellaan kolmeen ryhmään, riippuen siitä onko kylmäaine yksikomponenttinen vai koostuuko se useammista seoksista (Kaappola ym. 2012, 33.):

Yksikomponenttinen kylmäaine koostuu yhdestä aineesta, jonka höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat vakioämpötilassa. Atseotrooppinen kylmäaine on kahden tai useamman yksikomponenttisen kylmäaineen seos, jonka höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat vakioämpötilassa.

Tseotrooppinen kylmäaine koostuu kahdesta tai useammasta yksikomponenttisestä kylmäaineesta, jonka höyrystymisen ja lauhtumisen yhteydessä tapahtuu kylmäaineessa lämpötilan muutos.

5 TUTKIMUS JA LASKENTA

Työ aloitettiin tutustumiskäynnillä Kuopion Energian Iloharjun aurinkokaukolämpölaitokseen. Aurinkokeräinkenttä sekä lämmönvaraus- sekä lämmönsiirtolaitteisto kuvattiin.



KUVA 19. Kuopion Energia Iloharjun aurinkokeräinkenttä (Karjalainen 2021)

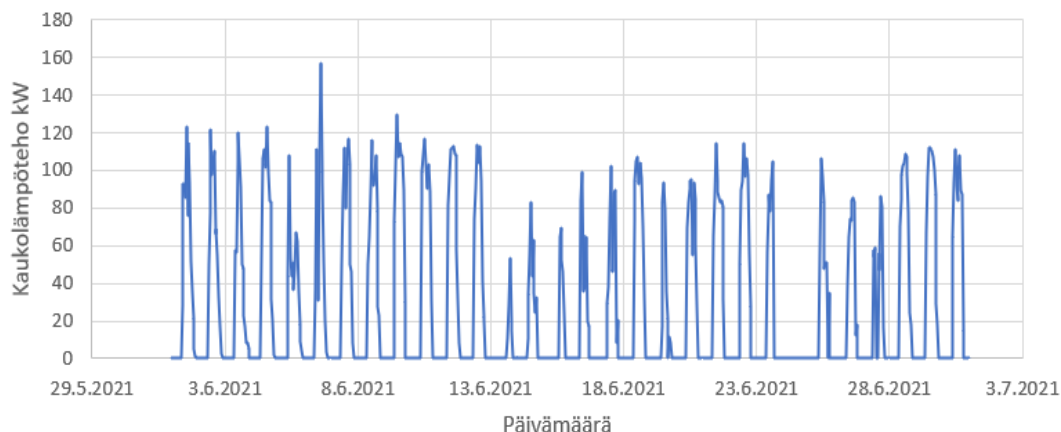


KUVA 20. Lämmönsiirrin ja aurinkolämpökentän lämmönvaraaja (Karjalainen 2021)

Ilmatieteenlaitoksella on Kuopion Savilahdessa mittausasema, jonka havaintodataa analysoimalla selvitettiin aurinkokeräinkentän säteily- ja sääolosuhteet tunnin tarkkuudella aurinkokeräinkentän tuottaman tehon laskentaa varten. Kuopion Energia toimitti tarvittavat mittaustulokset keräinkentän- ja kaukolämpöpiirin toiminnasta, joista analysoitiin mm. kaukolämpöpiiriin siirretty keskimääräinen

huipputeho kesäkauden aikana.

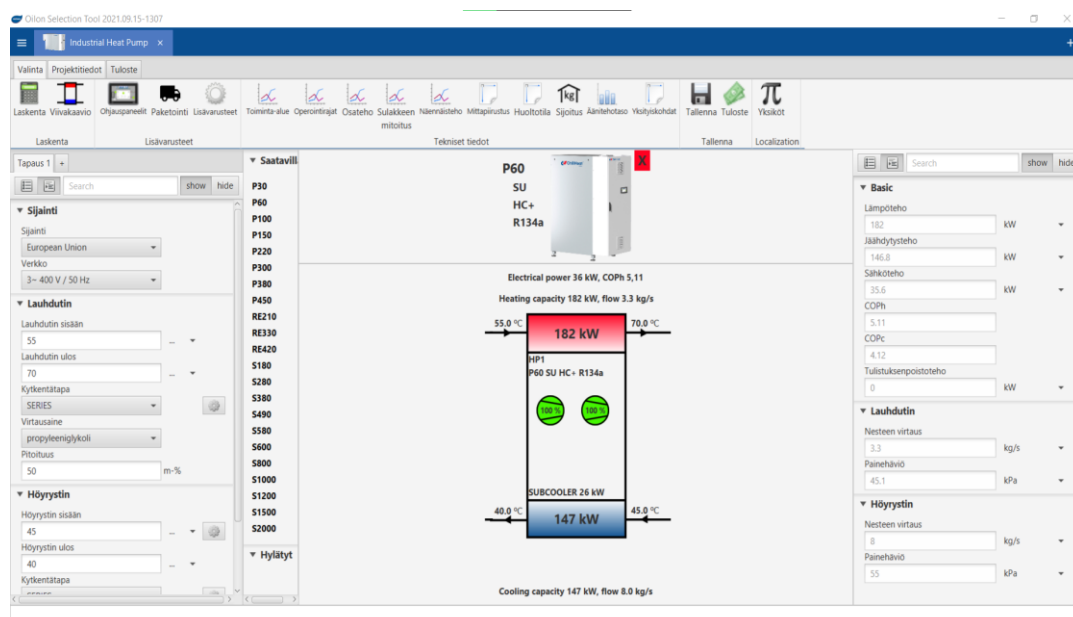
Kaukolämpöteho kesäkuu 2021



KUVA 21. Kaukolämpöteho kesäkuu 2021

Kuvan 21 perusteella aurinkokeräinkentän keskimääräiseksi huipputehoksi valittiin 120 kW, jota käytettiin perustana lämpöpumpun mitoittamisessa. Huipputeho valittiin kesäkuussa mitatun huipputehon tuoton mukaan ja lämpöpumppu mitoitettiin tuoltaan siten, että pumpulla kyetään tuottamaan vähintään keräinkentän huipputehon mukainen lämpöteho.

Lämpöpumpun mitoituksessa ja valinnassa käytettiin yhteistyökumppani Oilon Oy:n valintaohjelmaa. Valintaohjelmalla, esitetty kuvassa 22, kartoitettiin tarkoitukseen sopivaa pumppua ja vertailtiin eri pumppuja keskenään mm. COP:n ja lämpötehon perusteella. Sopivan lämpöpumpun löydyttyä tehtiin perusteellinen selvitys pumpun COP:sta eri lämpötiloissa. Lämpöpumpun valinnassa huomioitiin pumpulla saatava jatkuva lämpöteho, joka ylitti keräinkentän keskimääräisen huipputehon 120 kW.



KUVA 22. Oilon Selection Tool (Oilon 2021)

Kustannuslaskennassa selvitettiin lämpöpumpulla tuotettavan kaukolämmön kustannuksia vertaamalla lämpöpumpun hyötysuhdetta sähkön eri hintatasoihin.

Sähkön kulutus kWh / tuotettu MWh kaukolämpöä = (Pumpun sähkön kulutus kWh /tuotettu kaukolämpömäärä kWh/1000)

Lämpöpumpulla tuotetun kaukolämmön hinta €/MWh = Sähkönkulutus kWh/tuotettu kaukolämpö MWh) * sähkön hinta € / kWh

Lämpöpumpulla tuotetun kaukolämmön kustannuksiin on laskettu myös aurinkolämpökeräin kentän apulaitteiden vaatima sähköteho, noin 5 kW.

Tyhjiökeräinputkien valmistajalta ei saatu tarkkaa tietoa hyötysuhteesta, joten prosessista ja Ilmatieteenlaitokselta saatuja mittausarvoja käyttäen koko kentän hyötysuhde voitiin määrittää.

Tarkasteluajankohtana on käytetty ajanhetkeä 2.6.2021 klo. 11.18.48, jolloin keräinkentän tuottama kaukolämpöteho on ollut noin 121.9 kW. Vastaavalla ajanhetkellä Auringon kokonaislämpösäteilyn määrä on ollut 772,2 W/neliometri. Aurinkokeräinkentän tehollinen pinta-ala on noin 250 neliometriä, joten hyötysuhde lasketaan seuraavan kaavan (kaava 3) avulla:

$$\eta = P_1/P_2 \quad (3)$$

missä:

η = hyötysuhde

P_1 = Keräinkentän absorptiopinta-alan tuottama teho W/m^2

P_2 =Keräinkentälle tuleva auringonsäteilyteho W/m^2

Kentän absorptiopinta-alan tuottama lämpöteho lasketaan seuraavan (kaava 4) avulla:

$$P_a = P_{\text{kaukolämpö}} / A_a \quad (4)$$

missä:

P_a = Absorptiopinta-alan tuottama lämpömäärä W/m^2

A_a = Absorptiopinta-ala m^2

$P_{\text{kaukolämpö}}$ = Kaukolämpöteho W

6 TULOKSET

6.1 Lämpöpumpun valinta

Lämpöpumpuksi valikoitui Oilon P60-sarjan pumpppu, joka täyttää Kuopion Energian asettamat vaatimukset niin käyttölämpötila-alueen suhteen kuin COP:n ja fyysisen koon perusteella. Pumpulle asetetut tavoitteet olivat:

Taloudellisen kannattavuuden toteutumisen edellytykset kaukolämmön tuotantoon. Käyttölämpötilan tulee olla laaja. Pumpun tulee mahtua olemassa oleviin teknisiin tiloihin.

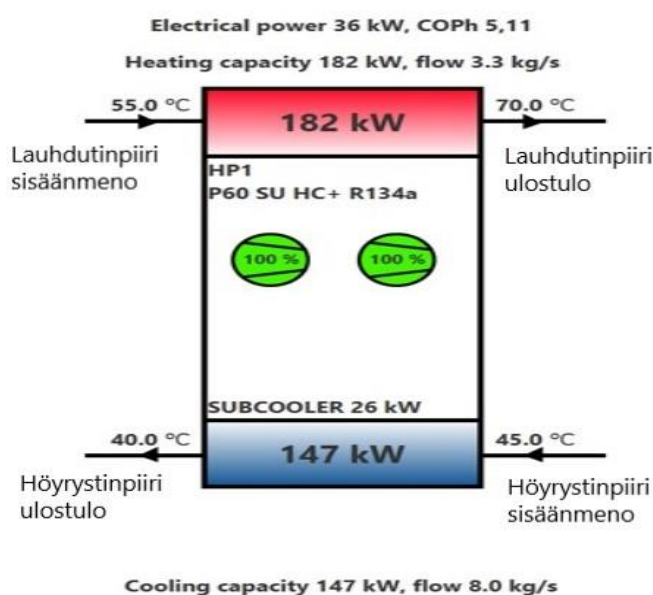
P60 pumpulla on tarkoitus lämmitää väliaine kaukolämpöpiiriin sopivaksi eli noin 70 °C. Kaukolämpöpiirin lämmönsiirtimen jäähtymä on noin 4 °C, eli pumpun lauhdutinpiirille hyvin optimaalinen lämpötilaero. Höyrystinpiirin sisään menevän väliaineen maksimilämpötila on 50°C ja jäähtymä tässäkin piirissä on optimi 5 °C. Höyrystinpiirin lämpötila-alue on laaja +50°C - +5°C, joskin matalimmilla sisäänmenolämpötiloilla COP tippuu rajusti. Liitteessä 1 on esitetty optimaalisia lämpötila-alueita lämpötehon ja hyötysuhteen kannalta laskettuna.

Perustietoa lämpöpumpusta:

-Merkki ja malli Oilon P60

-Käytettävä kylmäaine R134a. Kylmäaineita löytyy useita erilaisia riippuen käyttötarkoituksesta.

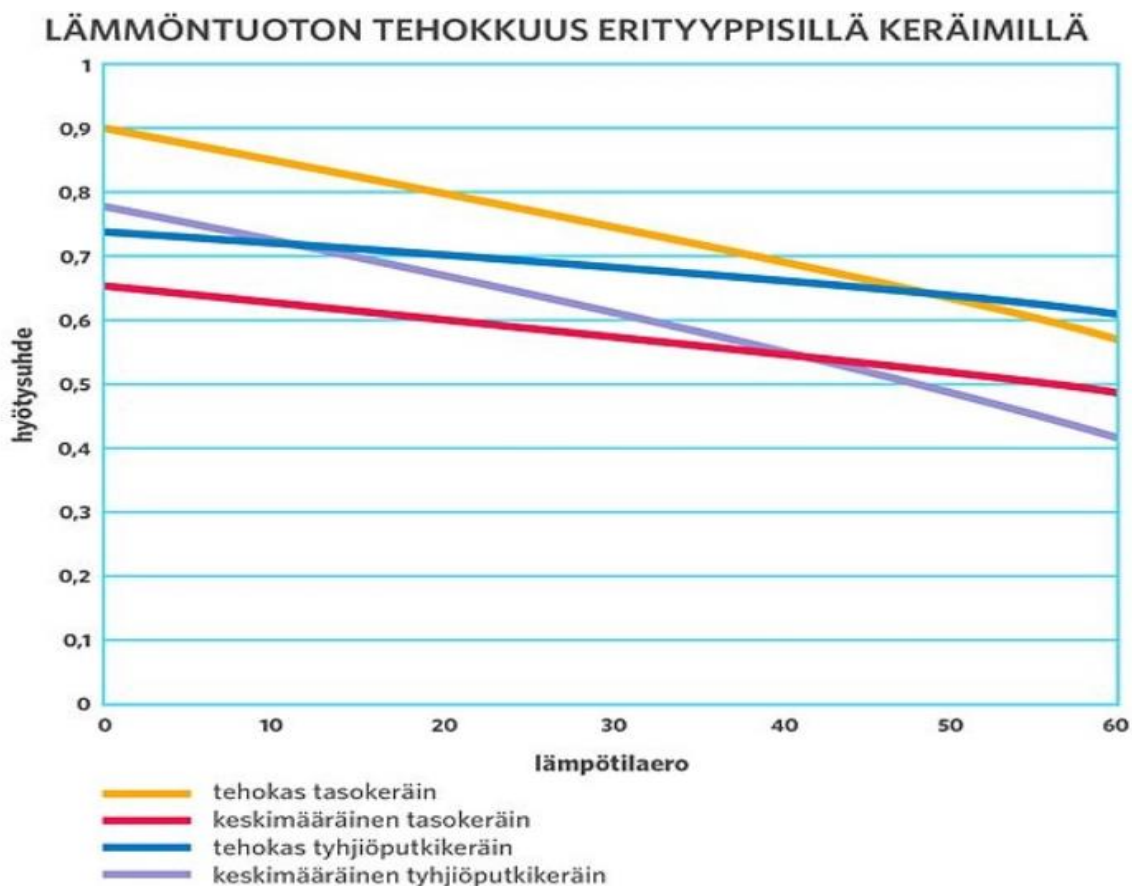
Kuvassa 23 esitetään virtauskaavio yhdestä mahdollisesta käyttölämpötila-alueesta lämmitys-/jäähdytystehoineen. COP-luku ja sähkönkulutus selviää myös kuvasta.



KUVA 23. Lämpöpumpun tärkeimmät tunnusluvut (Karjalainen, Oilon Selection Tool 2021)

6.2 Hyötysuhde

Laskennan perusteella koko aurinkokeräinkentän hyötysuhteeksi saatiin 63 %, mikä kuulostaa todennukaiselta verrattuna yksittäisen tyhjiöputken hyötysuhteeseen, joka on tyypillisesti laadukkaalla tyhjiöputkella 60–80 %. Oheisesta kuvasta 24 käy ilmi tyhjiöputken hyötysuhde erilaisilla lämpötilaeroilla. Kuvan hyötysuhdeluvut ovat optimiolosuhteissa laboratoriossa testattu yksittäisen tyhjiöputken arvoja, eikä niitä voi suoraan verrata tässä työssä esitettyyn tulokseen. Pitää myös huomioida, että esitetty tulos on laskettu kaukolämpöverkkoon siirtyneen tehon ja auringonsäteilytehon suhteesta.



KUVA 24. Aurinkokeräinten hyötysuhde (Motiva 2020)

6.3 Kustannuslaskenta

Lämpöpumpulla tuotetun kaukolämmön hinnassa on laaja skaala riippuen siitä, voidaanko pumpun tarvitsema sähkö tuottaa pääosin itse vai joudutaanko sähkö ostamaan. Liitteessä 2 esitetään sähköenergian osuus kustannuksista, kun valitulla lämpöpumpulla tuotetaan 1 MWh lämpöä kaukolämpöverkkoon. Sähkön hintana on käytetty 5–15 senttiä/kilowattitunti, 5 sentin porrastuksella. Liitteen 2 taulukossa esitetään, kuinka paljon lämpöpumppu kuluttaa sähköä, kun sillä tuotetaan kaukolämpöä. Vertailuarvona on käytetty sähkönkulutusta kWh / tuotettu MWh kaukolämpöä. Sähkönkulutukseen vaikuttaa olennaisesti pumpun senhetkinen COP-luku.

7 YHTEENVETO JA VISIOITA

Kuopion Energian Iloharjun aurinkokaukolämpölaitoksen keräinkentän tehollinen pinta-ala on noin 250 neliometriä ja keräinkentän hyötysuhde on varsin hyvä 63 %. Kentän keskimääräinen tuotto kesäkuukausina 2021 oli noin 120 kWh. Aurinkokeräinkenttä tuottaa lämpöenergiaa vain auringon lämpösäteilyn absorboituessa putkien keräinpintaan eli tuotantoaika on rajallinen riippuen vuodenaikasta, kellonajasta ja vallitsevasta säätilasta. Lämpöpumpun liittämällä prosessiin tavoitellaan jatkuvaa ja tasaista kaukolämmön tuotantoa myös silloin kun sitä ei ole saatavilla säteilyenergiana tai vaalta. Pumpulle asetetut vaatimukset olivat kaukolämmön tuottamisen kannattavuus, laaja käyttölämpötila ja hyvä hyötysuhde ja nykyisiin teknisiin tiloihin soveltaminen. Valitsin sopivaksi pumppehdokkaaksi Oilon P60- sarjan pumpun, joka on hyvin muunneltavissa niin komponenttien kuin kylmäaineenkin suhteen, täyttää COP-kriteerit sekä on mitoiltaan sopiva. Lämpöteholtaan pumppu tuottaa enemmän lämpötehoa kuin keräinkenttä, joten kaukolämpöä voidaan tuottaa myös talviaikaan.

Lämpöpumpulla tuotetun kaukolämmön kannattavuuteen tällä hetkellä en lähde ottamaan itse kantaa, mutta varmaa on se, että tulevaisuudessa kaukolämpöä tullaan tuottamaan enemmän aurinkokeräimillä ja lämpöpumpuilla kuin polttamisesta saadun energian avulla. Aihealue on todella laaja, kiinnostava ja tutkimista riittää varmasti pitkäksi aikaa. Mielestäni jatkotutkimuksia ajatellen hyvä tutkimusaihe olisi nykyisten aurinkokeräinkenttien toiminnan tehostaminen erityisesti talvikaudella ja lämpöpumpun tarvitseman sähkön tuottaminen omatoimisesti aurinkopaneelijärjestelmän avulla.

Opinnäytetyön aihe oli ajankohtainen ja todella kiinnostava, koska tämän mittaluokan keräinjärjestelmiä kaukolämmöntuotannossa ei Suomessa montaa ole. Sain tutustua laaja-alaisesti aiheeseen ja huomasin sen, että mahdollisuudet lämpöpumpulla tuotettuihin lämmitysratkaisuihin ovat todella laajat, jokaiseen käyttötarkoitukseen kyllä löytyy ratkaisu.

Mielestäni onnistuin työssäni hyvin, vaikka paljon analysoitua dataa piti jättää työn ulkopuolelle.

LÄHTEET

AlfaLaval 2021. Nestejäähdytteinen levylämmönsiirrin. Verkkojulkaisu. <https://www.alfalaval.com/industries/hvac/heating-and-cooling-hub/main/>. Viitattu 22.7.2021

AlfaLaval 2021. Ilmajäähdytteinen lämmönsiirrin. Verkkojulkaisu. <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/finned-tube-air-heat-exchangers/finned-tube-air-heat-exchangers/finned-tube-air-heat-exchangers/>. Viitattu 22.7.2021

Bitzer 2021. Avomäntäkompressori. Viitattu 23.9.2021

Bitzer 2021. Puolihermeettinen mäntäkompressori. Viitattu 23.9.2021

Bitzer 2021. Puolihermeettinen ruuvikompressori. Viitattu 23.9.2021

Danfoss 2021. Termostaattinen paisuntaventtiili. Verkkojulkaisu. <https://store.danfoss.com/fi/fi/Climate-Solutions-j%C3%A4%C3%A4hdytykseen/Venttiilit/Paisuntaventtiilit/Termostaattiset-paisuntaventtiilit-%28osaohjelma%29/Termostaattinen-paisuntaventtiili%2C-T-2%2C-R134a-R513A/p/068Z3346>. Viitattu 22.7.2021

Danfoss 2003. Termostaattinen paisuntaventtiili. Verkkojulkaisu. <https://docplayer.fi/3961340-Vihjeita-asentajille-termostaattiset-paisuntaventtiilit.html>. Viitattu 11.9.2021

Hvac specialist, 2021. Hermeettinen kompressori. Verkkojulkaisu. Päivitetty 10.1.2010. <https://www.hvacspecialists.info/compressors/hermetic-compressors.html>. Viitattu 21.7.2021

Kansainvälinen Energiajärjestö 2021. Aurinkolämpö maailmanlaajuisesti 2020. Verkkojulkaisu. Päivitetty 05.2021. <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2021.pdf>. Viitattu 26.08.2021

Kaappola, Esko, Hirvelä, Aulis, Jokela, Matti, Kianta, Jani 2012. Kylmätekniiikan perusteet. 2. painos. Helsinki: Opetushallitus

Karjalainen, Petri 2021. Kuopion Energia Iloharjun aurinkokeräinkenttä. Valokuva. 20.4.2021. Kuopio: Petri Karjalaisen kokoelmat.

Karjalainen, Petri 2021. Lämmönsiirrin ja aurinkolämpökentän lämmönvaraaja. Valokuva. 20.4.2021. Kuopio: Petri Karjalaisen kokoelmat.

Karjalainen, Petri 2021. Iloharjun aurinkokeräinkenttä. Valokuva. 20.4.2021. Kuopio: Petri Karjalaisen kokoelmat.

Kuopion Energia Oy 2020. Yritysesittely. Verkkojulkaisu. <https://www.kuopionenergia.fi/yritys/tuotanto-ja-jakelu/aurinkokaukolampokentta/>. Viitattu 17.7.2021

Motiva 2020. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.8.2020. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa. Viitattu 4.4.2021

Motiva 2020. Aurinkokeräintyyppit. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.8.2020. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat. Viitattu 5.4.2021

Motiva 2020. Aurinkokeräinten hyötysuhteet. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.8.2020. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/aurinkokerainten_hyotysuhteet. Viitattu 19.9.2021

Motiva 2020. Nestekiertoinen tasokeräin. Verkkojulkaisu. Päivitetty 5.8.2020. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/nestekiertoiset_keraimet/tasokeraimet. Viitattu 4.4.2021

Motiva 2014. Kylmätekninen kiertoprosessi. Verkkojulkaisu. https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijäämalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu-_ja_ORC-sovellukset.pdf. Viitattu 9.9.2021

Oilon 2021. Oilon Selection Tool. Lämpöpumpun valintaohjelma.

Swep 2019. Log p, h -tilapiirros. Verkkojulkaisu. <https://www.swep.de/refrigerant-handbook/2.-compression-cycle/zx4/>. Viitattu 15.9.2021

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

LIITE 1: LÄMPÖPUMPUN OPTIMILÄMPÖTILA-ALUEET LÄMPÖTEHON JA COP:N KANNALTA

Kaukolämpöpiiri					Keräinpiiri						
Laudutin It		Virtaus kg/s	Sähköteho kW	Lämpöteho kW	COP _H	Höyrysin It		Virtaus kg/s	Sähköteho kW	Jäähdytysteho kW	COP _c
Sisään	Ulos					Sisään	Ulos				
60	70	4,6	36	172,6	4,79	50	45	7,4	36	137	3,8
55	70	3,3	35,6	182	5,11	50	45	8	35,6	146,8	4,12
50	70	2,5	35,1	189,6	5,4	50	45	8,4	35,1	154,9	4,41
45	70	2,1	34,8	198	5,69	50	45	8,9	34,8	163,7	4,71
40	70	1,9	34,5	206,9	5,99	50	45	9,4	34,5	172,8	5,01
35	70	1,7	34,5	214,7	6,23	50	45	9,8	34,5	180,7	5,24
30	70	1,5	34,5	222,3	6,44	50	45	10,2	34,5	188,3	5,46
25	70	1,4	34,5	229,7	6,65	50	45	10,6	34,5	195,7	5,67
60	70	4,6	36	172,6	4,79	45	40	7,4	36	137	3,8
55	70	3,3	35,6	182	5,11	45	40	8	35,6	146,8	4,12
50	70	2,5	35,1	189,6	5,4	45	40	8,4	35,1	154,9	4,41
45	70	2,1	34,8	198	5,69	45	40	8,9	34,8	163,7	4,71
40	70	1,9	34,5	206,9	5,99	45	40	9,4	34,5	172,8	5,01
35	70	1,7	34,5	214,7	6,23	45	40	9,8	34,5	180,7	5,24
30	70	1,5	34,5	222,3	6,44	45	40	10,2	34,5	188,3	5,46
25	70	1,4	34,5	229,7	6,65	45	40	10,6	34,5	195,7	5,67
60	70	4,6	36	172,3	4,78	40	35	7,5	36	136,7	3,79
55	70	3,2	35,5	180,3	5,08	40	35	7,9	35,5	145,2	4,09
50	70	2,5	34,9	186,5	5,34	40	35	8,3	34,9	152	4,35
45	70	2,1	34,5	192,9	5,58	40	35	8,7	34,5	158,8	4,6
40	70	1,8	34,2	200,1	5,84	40	35	9,1	34,2	166,3	4,86
35	70	1,6	34,3	206,1	6	40	35	9,4	34,3	172,2	5,02
30	70	1,4	34,2	210,8	6,16	40	35	9,6	34,2	177,1	5,17
25	70	1,3	34	214,6	6,32	40	35	9,9	34	181,1	5,33
20	70	1,2	33,9	219	6,47	40	35	10,1	33,9	185,6	5,48
15	70	1,1	33,6	222,8	6,63	40	35	10,3	33,6	189,7	5,64
10	70	1	33,6	227,8	6,79	40	35	10,6	33,6	194,7	5,8

LIITE 2: SÄHKÖN OSUUS LÄMPÖPUMPULLA TUOTETUN KAUKOLÄMMÖN HINNASTA

Sähkön osuus lämpöpumpulla tuotetun kaukolämmön hinnasta											
Lauhdutin It		Höyrystin It		Lämpöpumpun ottoteho kW	Apulaitteet ottoteho kW	Sähkäteho yhteensä kW	Kaukolämpö teho kW	Sähkönkulutus kWh / tuotettu kaukolämpö MWh	Sähkön kustannus €/MWh		
Sisään	Ulos	Sisään	Ulos						Sähkö 5€/kWh	Sähkö 10 €/kWh	Sähkö 15 €/kWh
60	70	50	45	36	5	41	172,6	237,54	11,88	23,75	35,63
55	70	50	45	35,6	5	40,6	182	223,08	11,15	22,31	33,46
50	70	50	45	35,1	5	40,1	189,6	211,50	10,57	21,15	31,72
45	70	50	45	34,8	5	39,8	198	201,01	10,05	20,10	30,15
40	70	50	45	34,5	5	39,5	206,9	190,91	9,55	19,09	28,64
35	70	50	45	34,5	5	39,5	214,7	183,98	9,20	18,40	27,60
30	70	50	45	34,5	5	39,5	222,3	177,69	8,88	17,77	26,65
25	70	50	45	34,5	5	39,5	229,7	171,96	8,60	17,20	25,79
60	70	45	40	36	5	41	172,6	237,54	11,88	23,75	35,63
55	70	45	40	35,6	5	40,6	182	223,08	11,15	22,31	33,46
50	70	45	40	35,1	5	40,1	189,6	211,50	10,57	21,15	31,72
45	70	45	40	34,8	5	39,8	198	201,01	10,05	20,10	30,15
40	70	45	40	34,5	5	39,5	206,9	190,91	9,55	19,09	28,64
35	70	45	40	34,5	5	39,5	214,7	183,98	9,20	18,40	27,60
30	70	45	40	34,5	5	39,5	222,3	177,69	8,88	17,77	26,65
25	70	45	40	34,5	5	39,5	229,7	171,96	8,60	17,20	25,79
60	70	40	35	36	5	41	172,3	237,96	11,90	23,80	35,69
55	70	40	35	35,5	5	40,5	180,3	224,63	11,23	22,46	33,69
50	70	40	35	34,9	5	39,9	186,5	218,94	10,70	21,39	32,09
45	70	40	35	34,5	5	39,5	192,9	204,77	10,24	20,48	30,72
40	70	40	35	34,2	5	39,2	200,1	196,90	9,80	19,59	29,39
35	70	40	35	34,3	5	39,3	206,1	190,68	9,53	19,07	28,60
30	70	40	35	34,2	5	39,2	210,8	185,96	9,30	18,60	27,89
25	70	40	35	34	5	39	214,6	181,73	9,09	18,17	27,26
20	70	40	35	33,9	5	38,9	219	177,63	8,88	17,76	26,64
15	70	40	35	33,6	5	38,6	222,8	173,25	8,66	17,32	25,99
10	70	40	35	33,6	5	38,6	227,8	169,45	8,47	16,94	25,42