

Timo Kakriainen

# AURINKOENERGIAN KANNATTAVUUS KASARMIN KAMPUKSELLA

Opinnäytetyö  
Talotekniikka

Toukokuu




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

## KUVAILULEHTI

 <b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkelin University of Applied Sciences	<b>Opinnäytetyön päivämäärä</b>  26.5.2011				
<b>Tekijä(t)</b>  Timo Kakriainen	<b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b>  Talotekniikka				
<b>Nimeke</b>  Aurinkoenergian kannattavuus Kasarmin Kampuksella					
<b>Tiivistelmä</b>  <p>Tässä työssä tarkasteltiin eri aurinkoenergian hyödyntämismuotojen kannattavuutta Mikkelin Ammattikorkeakoulun Kasarmin Kampuksella, koska tulevaisuudessa tulee energian hinta nousemaan ja sitä myöten rakennusten käyttökustannukset kasvavat. Aurinkoenergiaa voidaan hyödyntää sähköinä, lämpönä tai uusimpana jäähdytyksenä. Aurinkoenergian taloudellista kannattavuutta arvioitiin annuiteettimenetelmällä.</p> <p>Aurinkosähkön kannattavuutta tarkasteltiin C- ja E-rakennuksien katoille mahdollisesti rakennettavan aurinkosähköjärjestelmän avulla. Ensiksi laskettiin, paljonko C- ja E-rakennuksien katoille rakennettavat aurinkosähköjärjestelmät tuottavat sähköenergiaa käyttöaikanaan, joka on aurinkosähköjärjestelmille 25 vuotta. Tämän jälkeen laskettiin aurinkosähköjärjestelmän rahallista tuottoa eri sähköhinnoilla ja verrattiin sitä investointikustannuksiin.</p> <p>Aurinkolämmön kannattavuutta tarkasteltiin B-rakennukseen kuvitellun aurinkolämpöjärjestelmän avulla. Ensiksi laskettiin, kuinka paljon aurinkolämpöjärjestelmä tuottaa lämpöenergiaa käyttöaikanaan, joka on aurinkolämpöjärjestelmille 20 vuotta. Sen avulla verrattiin aurinkolämpöjärjestelmän rahallista tuottoa investointikustannuksiin.</p> <p>Aurinkojäähdytyksen osalta tarkasteltiin teknologian sopivuutta Mikkelin Ammattikorkeakoulun Kasarmin Kampuksen jo jäähdytysjärjestelmän omaaviin.</p> <p>Aurinkosähkön ja -lämmön rakentaminen osoittautui kannattamattomaksi käyttöaikojensa aikana, koska investointikustannukset osoittautuivat suuremmiksi kuin käyttöaikanaan saadut tuotot. Aurinkojäähdytyksen käyttö todettiin sopimattomaksi Kasarmin Kampukselle, koska se tarvitsisi pilvisinä aikoina jonkin toisen varalämmönlähteen kuin kaukolämpö. Kaukolämmön lämpötilataso kesällä ei ole riittävän korkea.</p>					
<b>Asiasanat (avainsanat)</b>  Aurinkoenergia, aurinkolämmitys, aurinkopaneelit, kannattavuus					
<b>Sivumäärä</b>  65	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><b>Kieli</b></td> <td style="width: 50%;"><b>URN</b></td> </tr> <tr> <td>Suomi</td> <td></td> </tr> </table>	<b>Kieli</b>	<b>URN</b>	Suomi	
<b>Kieli</b>	<b>URN</b>				
Suomi					
<b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b>					
<b>Ohjaavan opettajan nimi</b>  Aki Valkeapää	<b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b>  MAMK				

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Date of the bachelor's thesis</b>  26.5.2011	
<b>Author(s)</b>  Timo Kakriainen		<b>Degree programme and option</b>  Building Services	
<b>Name of the bachelor's thesis</b>  Solar energy profitability at the Kasarmin Kampus			
<b>Abstract</b>  <p>This Bachelor's thesis discusses the feasibility of different solar energy solutions at Kasarmin Kampus of Mikkeli University of Applied Sciences. In the future the price of energy will rise and therefore the operating costs of buildings will increase. Solar energy can be exploited to provide electricity, heat and cooling.</p> <p>The feasibility of a solar electric system was studied using a system which will probably be built on the roof of buildings C and E. At first I calculated how much it will produce electricity during its life time, which is 25 years for solar electric systems. After that I calculated the operating costs of solar electric system with different electricity prices and they were compared with investment costs.</p> <p>The effect of the solar system on heating costs was studied with help of imaginary solar heat system to building B. At first I calculated how much solar heat system produce heat energy during its life time, which is 20 years for solar heat systems. After that I compared the operating costs with the investment costs.</p> <p>For cooling I studied if the existing systems could be supplemented with a solar system.</p> <p>Solar electric or solar heat systems proved unfeasible during its life time because investment costs turned out bigger than the profit during the life time. Solar cooling system is also unfeasible because it requires an additional heat source for cloudy days.</p>			
<b>Subject headings, (keywords)</b>  Solar energy, solar heating, solar panels, profitability			
<b>Pages</b> 65	<b>Language</b> English	<b>URN</b>	
<b>Remarks, notes on appendices</b>			
<b>Tutor</b>  Aki Valkeapää		<b>Bachelor's thesis assigned by</b>  MAMK	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	AURINGONSÄTEILY .....	2
2.1	Auringon säteilyteho maapallolle .....	2
2.2	Paikan sijainnin ja vuodenajan vaikutus säteilytehon saantiin .....	3
2.3	Keräimien suuntauksen ja kallistuskulman vaikutus säteilytehon saantiin... 4	
2.4	Sään vaikutus säteilytehon saantiin.....	5
2.5	Auringon säteilyenergia Suomessa .....	5
2.6	Auringon säteilyenergia Mikkelissä.....	7
3	AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄT .....	8
3.1	Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä .....	8
3.1.1	Aurinkopaneelit .....	9
3.1.2	Aurinkopaneelien toimintaperiaate .....	11
3.1.3	Aurinkopaneelien ominaiskäyrät eli I-V –käyrät ja lämpökertoimet 11	
3.1.4	Aurinkopaneelin hyötysuhde.....	13
3.1.5	Eri tyyppisten aurinkopaneelien hyötysuhteet .....	15
3.1.6	Vaihtosuuntaaja .....	15
3.1.7	MPPT – Maximum Power Point Tracker.....	16
3.2	Verkkoon kytkemätön aurinkosähköjärjestelmä .....	16
3.2.1	Akusto .....	17
3.2.2	Lataussäädin .....	17
3.3	Suomessa toteutetut ja rakenteilla olevat aurinkosähköjärjestelmät.....	18
3.3.1	Helsingin Viik .....	18
3.3.2	Porin Uimahalli.....	19
4	AURINKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄT .....	19
4.1	Aurinkokeräimet .....	20
4.1.1	Tasokeräin ja sen toimintaperiaate .....	20
4.1.2	Tyhjiöputkikeräin ja sen toimintaperiaate.....	21
4.2	Aurinkokeräimen hyötysuhde.....	23
4.3	Pumppuryhmä ja ohjausyksikkö .....	26
4.4	Suomessa toiminnassa olevat aurinkolämpöjärjestelmät tai tekeillä olevat 26	
5	AURINKOJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT .....	27

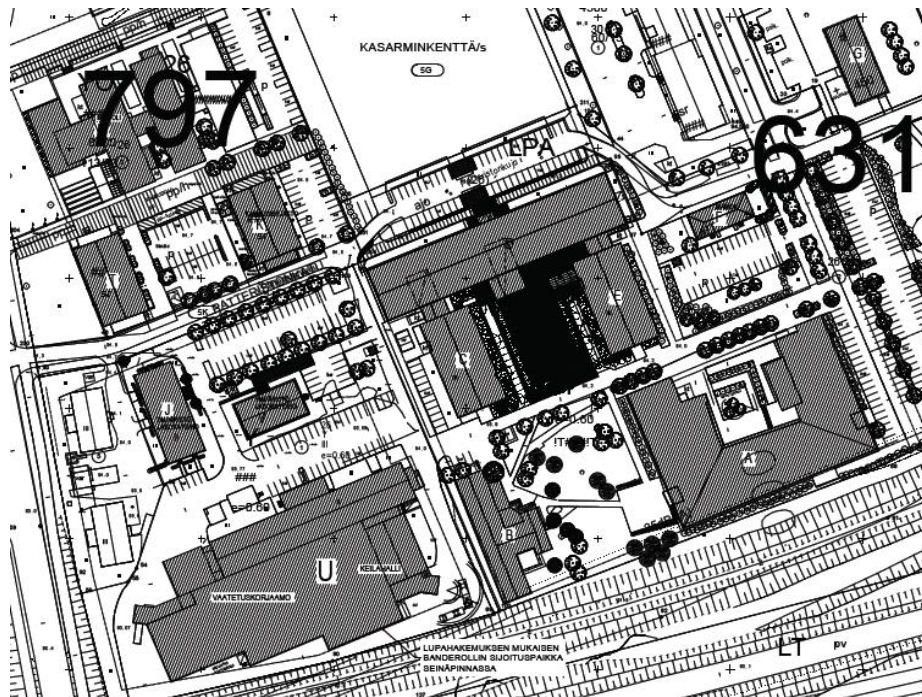
5.1	Aurinkoavusteinen absorptiojäähdytys .....	28
5.1.1	Absorptiojäähdytin.....	29
5.1.2	Absorptiojäähdytysprosessi.....	30
5.1.3	Lämmönlähde .....	31
5.2	Aurinkoavusteinen adsorptiojäähdytys .....	31
5.2.1	Adsorptiojäähdytin.....	32
5.2.2	Adsorptiojäähdytysprosessi.....	32
5.2.3	Lämmönlähde .....	33
5.3	Absorptiojäähdytyksen ja adsorptiojäähdytyksen suorituskykykerroin.....	34
5.4	Aurinkoavusteinen kiinteä kuivainjäähdytysjärjestelmä.....	34
5.5	Aurinkoavusteinen nestekuivainjäähdytysjärjestelmä .....	36
5.5.1	Aurinkoavusteisen nestekuivainjäähdytysjärjestelmän osat .....	36
5.5.2	Aurinkoavusteisessa nestekuivainjäähdytysjärjestelmässä tapahtuva prosessi .....	37
5.5.3	Lämmönlähde .....	38
5.6	Kiinteän ja nestemäisen kuivainjäähdytysjärjestelmän suorituskykykerroin	39
5.7	Maailmalla toteutetut aurinkoavusteiset jäähdytysjärjestelmät .....	39
6	AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄT KASARMIN KAMPUKSELLE.....	42
6.1	Eri paneelityypeillä saatava kuukausittainen sähköenergia Kasarmin Kampuksella .....	42
6.2	C- ja E-rakennukseen rakennettava aurinkosähköjärjestelmä .....	47
6.2.1	C –ja E-rakennuksen mahdollinen aurinkosähköjärjestelmä .....	48
6.2.2	C –ja E-rakennuksen aurinkosähköpaneeliston pinta-ala .....	48
6.2.3	C –ja E-rakennuksen aurinkosähköjärjestelmän energiantuotto .....	49
6.2.4	C- ja E -rakennuksen aurinkopaneeliston kannattavuuslaskelma....	50
7	AURINKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄT KASARMIN KAMPUKSELLE .....	54
7.1	Nykytilanne.....	54
7.2	Kynnysintensiiteetti.....	54
7.3	Arvioitu aurinkolämpökeräimen tuottama lämpöenergia Kasarmin Kampuksella .....	56
7.4	B-rakennuksen lämpimän käyttöveden lämpöenergian kulutus .....	59
7.5	B –rakennuksen aurinkolämpöjärjestelmän pinta-ala ja tuotto .....	60
7.6	B –rakennuksen aurinkolämpöjärjestelmän kannattavuuslaskelma.....	61
8	AURINKOJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT KASARMIN KAMPUKSELLE ..	63

8.1	Nykytilanne.....	63
8.2	Mahdolliset aurinkojäähdytysjärjestelmät Kasarmin Kampukselle.....	63
9	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	65
	LÄHTEET .....	67

## 1 JOHDANTO

Tässä työssä on tarkoitus arvioida aurinkoenergian hyödyntämisen kannattavuutta Mikkelin Ammattikorkeakoulun Kasarmin Kampuksella. Aurinkosähkön kannattavuuden osalta otetaan tarkasteluun C – ja E –rakennuksien katot. C- ja E-rakennuksien katot tullaan muuttamaan tulevaisuudessa harjakatoista tasakatoiksi, jolloin on tarkoitus pohtia, onko tasakatoille samassa rakentamisvaiheessa taloudellisesti järkevää rakentaa aurinkosähköjärjestelmä. Aurinkolämmön osalta otetaan tarkasteluun, onko taloudellisesti järkevää aurinkolämpöjärjestelmän rakentaminen B-rakennuksen katolle, jolla olisi tarkoitus lämmittää B-rakennuksessa käytettävää lämmintä käyttövettä. Aurinkojäähdytyksen osalta on tarkoitus esitellä eri teknologiat ja pohtia, onko teknisesti järkevää edes ajatella jäähdytyksen tuottaminen aurinkojäähdytyksen avulla.

Mikkelin Ammattikorkeakoulun Kasarmin Kampus kattaa 11 kiinteistöä sisältävän alueen. Kiinteistöillä on eri käyttötarkoituksia, mikä lisää niiden erityisvaatimuksia. Rakennukset A, CDEX ja M ovat pääasiassa opetus- ja toimistokäytössä. Rakennus B ja T ovat ruokaloita. Rakennukset J ja V ovat laboratorio käytössä. Rakennus K on kirjasto.



**KUVA 1. Mikkelin Ammattikorkeakoulun Kasarmin Kampuksen asemakuva**  
[49]

## 2 AURINGONSÄTEILY

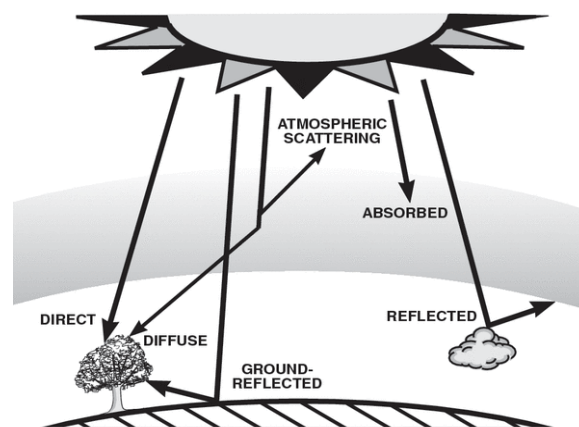
### 2.1 Auringon säteilyteho maapallolle

Maapallon ilmakehän reunalle säteilyä vastaan kohtisuorassa olevalle  $1 \text{ m}^2$  kokoiselle pinnalle lankeaa auringonsäteilytehoa  $1.35 - 1.39 \text{ kW}$ . Edellä mainittua arvoa kutsutaan kirjallisuudessa myös aurinkovakioksi. Ilmakehän vaikutuksesta aurinkovakion arvo alenee noin  $60 \%$ . [1.]

Välittömällä aurinkovakiolla tarkoitetaan auringosta lähtöisin olevaa energiamäärää, joka kohtaa ilmakehän vaikutuksen jälkeen maan pinnan. Välittömän aurinkovakion arvo vaihtelee  $0.8 - 1.0 \text{ kW/m}^2$  keskellä kirkasta päivää. [1.]

Ilmakehä koostuu lähinnä erilaisista molekyyleistä ja vesihöyrystä. Myös saasteet ja pöly pienentävät merkittävästi auringonsäteilyn kulkua maanpinnalle. Mitä suuremman matkan säteily joutuu kulkemaan ilmakehässä, sitä pienempi on säteilyn teho sen kohdatessa maanpinnan. [1.]

Maanpinnalle tuleva säteily jaetaan kolmeen ryhmään, joita ovat suora auringonsäteily, haja-auringsäteily ja heijastuva säteily. Suora auringonsäteily tarkoittaa suoraan ilmakehän läpi saapunutta auringonsäteilyä. Hajasäteily tarkoittaa ilmakehän molekyyleistä ja pilvestä heijastunutta säteilyä. Heijastunut säteily tarkoittaa maanpinnalta heijastunutta säteilyä. [1.]



**KUVA 2. Auringon säteilyn komponentit [3]**



## 2.2 Paikan sijainnin ja vuodenaajan vaikutus säteilytehon saantiin

Paikan sijainnilla maapallolla on olennainen merkitys säteilytehon saantiin. Mitä lähempänä päiväntasaajaa tarkasteltava paikka sijaitsee, sitä voimakkaampaa on auringon säteilyteho.

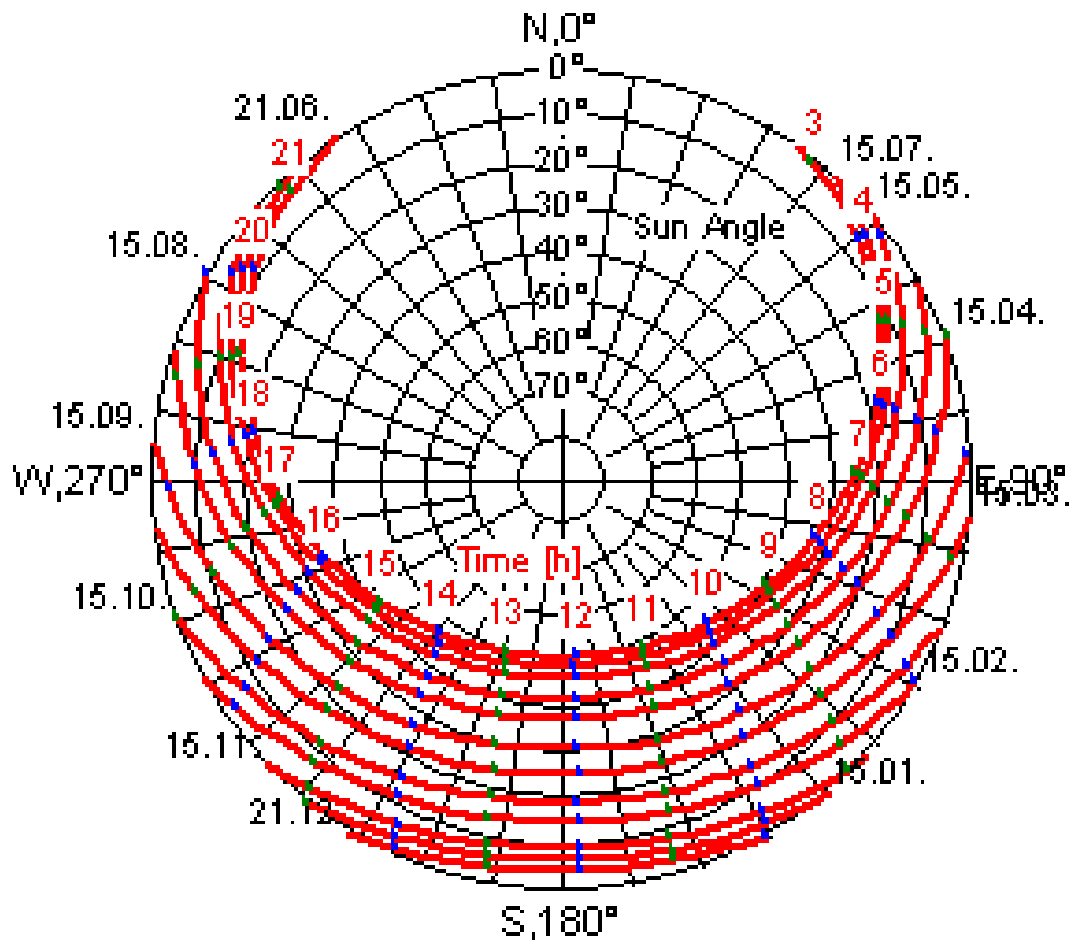
**TAULUKKO 1. Aurinkoenergian vuotuinen saanti vaakatasoon eri paikkakunnille maailmassa [1]**

Paikkakunta	Leveyspiiri	kWh/m <sup>2</sup> a
Mikkeli	61° 41' N	888
Lontoo	51° 31' N	1023
Rooma	41° 48' N	1435
El Paso	31° 48' N	2309
Aden	12° 24' N	2708

Maapallo kiertää auringon ympäri kerran vuodessa, jolloin eri vuodenaikoina maapallo on aurinkoon nähden kohdassa eri kohdassa. Kuvasta 3 voidaan nähdä, miten kesällä auringonpaisteen kesto on huomattavasti pidempi kuin talvella ja syksyllä sekä keväällä auringonpaisteen kesto on suurin piirtein yhtä suuri.

Näin ollen kesäaikana aurinko paistaa korkealla horisontissa ja talvella aurinko paistaa matalammalta. Myös auringon paisteen kesto riippuu vuodenajasta. Kesäaikana aurinko paistaa noin 19 h vuorokaudesta ja talviaikana noin 5 h vuorokaudesta. Kuva 3 näyttää auringon liikkumisen taivaanrannassa, ympyrät ulkoa sisään tarkoittavat auringon korkeus kulmaa horisontista katsottuna ja punaiset viivat kuvaavat auringon kulkua taivaalla.

Mikkeli, 22.01.2011



(C) 2007 Lohmeyer GmbH & Co. KG, Karlsruhe Ver. 2.2 29.08.07 tf  
Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklima

**KUVA 3. Auringon liikkuminen horisontissa mainittuina päivinä ja auringon absoluuttisen paisteen kesto sekä kellonaika [4]**

### 2.3 Keräimien suuntauksen ja kallistuskulman vaikutus säteilytehon saantiin

Keräimen suuntauksella on vaikutusta kokonaisenergian saantiin, kuten kuvasta 3 voi nähdä. Aurinko nousee idän suunnasta ja laskee länteen. Mikäli järjestelmän kulutus- huippu on aamulla, kannattaa keräimet suunnata kohti itää tai kaakkoa. Mikäli järjestelmän kulutushuippu on illalla, kannattaa keräimet suunnata kohti länttä. Jos haluaa järjestelmästä optimaalisen tuoton, kannattaa keräimet suunnata kohti etelää. [1.]

Saadakseen aurinkoenergiajärjestelmästä parhaan tehon irti on säteilyn tultava kohtisuoraan paneelin pintaan kohti eli tulokulman on oltava  $0^\circ$ . Jotta tulokulma olisi aina  $0^\circ$ , tulisi keräimiä säätää jatkuvasti, koska auringon korkeus horisontissa vaihtelee

vuodenajan ja kellonajan mukaan, mikä on nähtävissä kuvassa 3. Kesäkuun 21 päivänä käy aurinko Mikkelissä korkeimmillaan n.  $50^\circ$  kulmassa horisontista. Joulukuun 21 päivänä on aurinko Mikkelissä matalimmillaan n.  $5^\circ$  kulmassa horisontista. Optimikulma Mikkelissä on n.  $42^\circ$ . Kyseisen optimikulman saadaan selainpohjaisen laskentaohjelman tietosivulta eli lähteestä 2. Se ilmoittaa kulloisenkin paikan optimikulman riippuen niiden leveys- ja pituusasteesta. [1.]

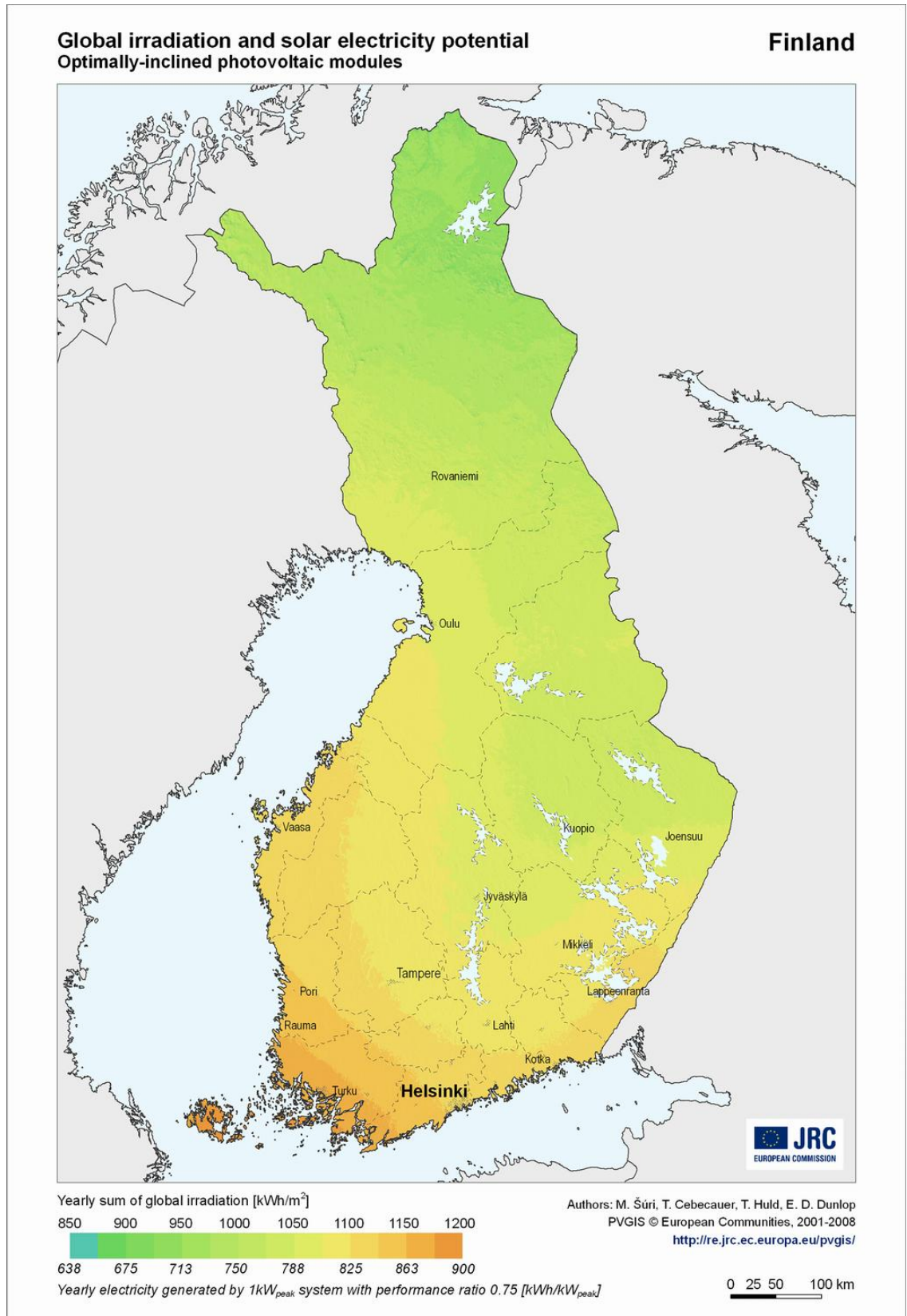
#### **2.4 Sään vaikutus säteilytehon saantiin**

Aurinkovakiosta saadaan maan pinnalle kirkkaana päivänä suorana säteilyä noin 70 %. Tässä tapauksessa hajasäteilyn osuus nostaa kokonaissäteilyn 80 %. Suomessa ilman sameus kesäisin lisääntyy vähentäen suoran säteilyn määrää 10-15 %. [1.]

Pilvien tyyppin lisäksi myös pilvien määrä ja paksuus vähentävät suoraa säteilyä. Suora säteily vähenee huomattavasti jo yläpilvikerroksessa, keskipilvet päästävät lävitseen osan säteilystä ja alapilvet ovat täysin läpäisemättömiä. [1.]

#### **2.5 Auringon säteilyenergia Suomessa**

Etelä-Suomessa aurinkosäteilyenergia vaakatasolla ja vuositasolla on noin  $1000 \text{ kWh/m}^2$  ja Keski-Suomessa noin  $900 \text{ kWh/m}^2$ . Seuraavalla sivulla olevasta kuvasta 4 käy ilmi auringonsäteilyenergian määrä eri puolilla Suomea.



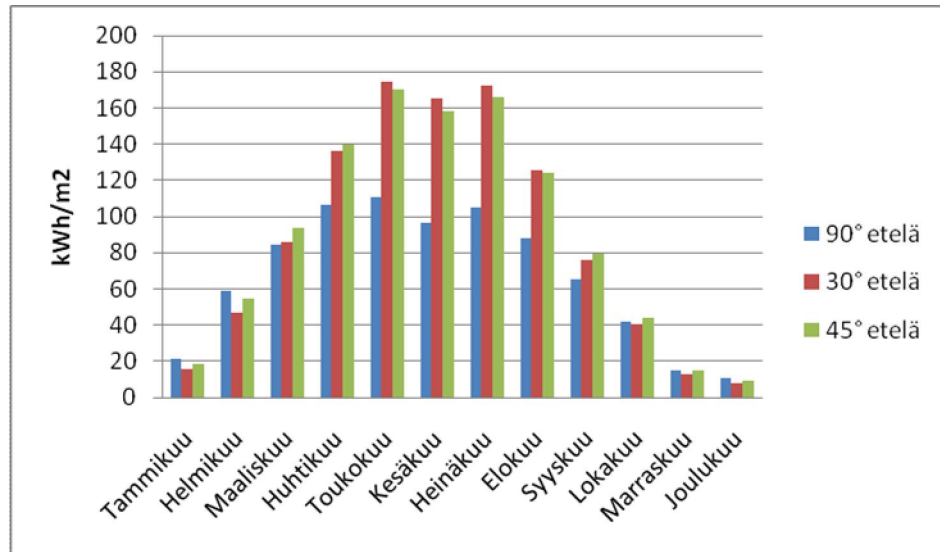
**KUVA 4. Auringon säteilyenergian vuotuinen jakautuminen Suomessa ja optimaalisessa kallistuskulmassa toimivien aurinkopaneelien sähköenergianvuosituotto 1 kW huipputehoisella aurinkosähköjärjestelmällä hyötysuhteen ollessa 75 % [16]**

## 2.6 Auringon säteilyenergia Mikkelissä

Mikkeliin tulevan auringon säteilyenergian kuukausikohtaiset arvot taulukossa 2 on saatu selainpohjaisesta laskentaohjelmasta. Laskentaohjelmaan määritetään paikan sijainti, paneelien suuntaus ja kallistuskulma. Ohjelmasta on mahdollisuus saada PDF-muodossa keskimääräinen päiväkohtainen aurinkoenergian säteily vaakatasoon, keskimääräinen kuukausikohtainen auringon säteily vaakatasoon sekä keskimääräinen päivä- ja kuukausikohtainen auringon säteily optimaaliselle kulmalle, että halutulle kulmalle. Ohjelma antaa myös kuukauden keskimääräisen ulkolämpötilan. Tulokset perustuvat mittauksin todettuihin toteutuneisiin arvoihin. Alla on taulukoitu Mikkelin kuukausittainen auringonsäteilyenergian määrä kolmelle eri paneelin kallistuskulmalla ja yhdelle suuntaukselle. [2.]

**TAULUKKO 2. Kuukauden keskilämpötila  $T_u$  ja kuukausikohtainen aurinkoenergia ( $\text{kWh/m}^2$ ), kolmella eri kallistuskulmalla  $\alpha$  ja suuntauksella etelään**

Kuukausi	$T_u$ (°C)	Suuntaus	$\alpha = 90^\circ$ ( $\text{kWh/m}^2$ )	$\alpha = 45^\circ$ ( $\text{kWh/m}^2$ )	$\alpha = 30^\circ$ ( $\text{kWh/m}^2$ )
Tammikuu	-6.6	Etelä	21.2	18.6	15.3
Helmikuu	-7.4	Etelä	59.1	54.9	46.8
Maaliskuu	-4.1	Etelä	84.6	93.3	85.9
Huhtikuu	2.6	Etelä	106.2	139.5	135.9
Toukokuu	8.7	Etelä	111.0	170.2	174.2
Kesäkuu	14.7	Etelä	96.3	158.4	165.6
Heinäkuu	17.7	Etelä	104.8	166.2	172.4
Elokuu	16.1	Etelä	87.7	124.3	125.2
Syyskuu	10.9	Etelä	65.4	79.2	76.2
Lokakuu	5.1	Etelä	42.2	44.3	40.3
Marraskuu	-0.6	Etelä	15.1	14.7	12.9
Joulukuu	-5.2	Etelä	10.8	9.3	7.8
Vuosi	4.3	Etelä	804.4	1072.9	1058.5



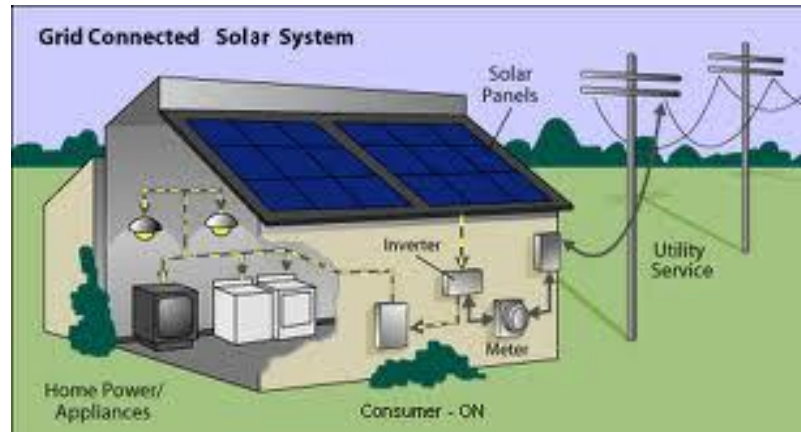
**KUVA 5. Auringon säteilyenergia (kWh/m<sup>2</sup>) eri kallistuskulmilla ja suuntauksella etelään**

### 3 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄT

Aurinkosähköjärjestelmä voidaan rakentaa joko liittämällä rakennettu aurinkopaneelientä yleiseen sähköverkkoon tai rakentamalla täysin omavarainen aurinkosähköjärjestelmä eli saarekeverkko. Molemmissa toteutustavoissa lisäenergia, kun aurinko ei paista tuodaan eri tavalla. Yleiseen verkkoon kytketyssä järjestelmässä tarvittu lisäenergia otetaan yleisestä sähköverkosta, kun taas omavaraisessa järjestelmässä lisäenergia otetaan esimerkiksi akuista tai se tuotetaan esimerkiksi tuulivoimalla tai aggregaatilla. Lisäenergian tarve syntyy, kun aurinkoenergiaa ei ole hyödynnettävissä riittävästi.

#### 3.1 Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä

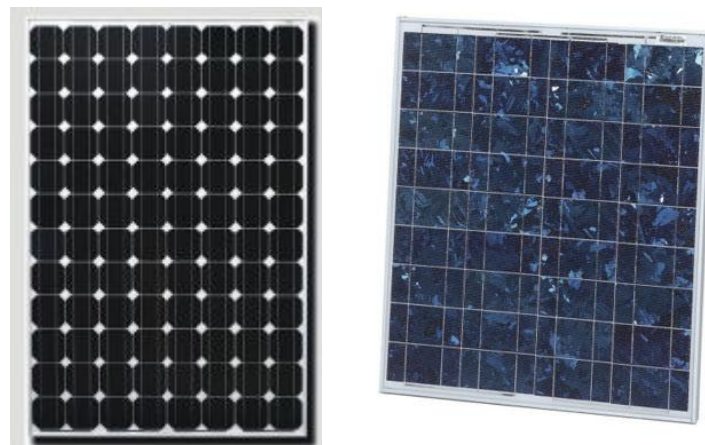
Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä muodostuu yksinkertaisimmillaan yhteen kytketyistä aurinkosähköpaneelista, vaihtosuuntaajasta ja sähkön kulutusverkosta. Aurinkosähköpaneelilla tuotetaan tasasähköä, jonka vaihtosuuntaaja muuntaa kulutusverkon vaatimaan vaihtosähköön. Ylimääräinen tuotettu vaihtosähkö syötetään yleiseen sähköverkkoon.



**KUVA 6. Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä [41]**

### 3.1.1 Aurinkopaneelit

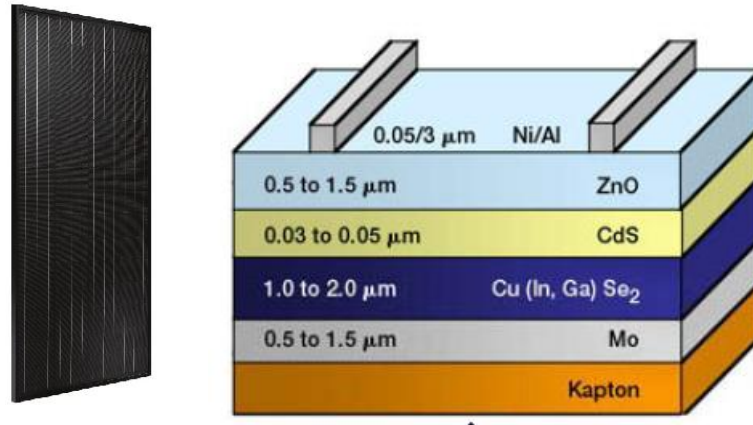
Aurinkopaneelit muodostuvat sarjaan kytketyistä kennoista. Aurinkopaneeleissa kennoja voi olla 36 tai 48 tai 96 jne. Kristallisoidusta piistä tehdyt kennot valmistetaan ohuista paloista, joko yksikiteisestä pii palasta (Mono) tai monikiteisestä pii palasta (Poly). Kennojen hyötysuhde on 11 – 19 %. Kristallisoidun piistä valmistetut kennot voidaan jakaa yksikiteisiin piikennoihin ja monikiteisiin piikennoihin. [11; 16].



**KUVA 7. Yksikiteisestä piistä tehty aurinkopaneeli ja monikiteisestä piistä tehty aurinkopaneeli [7]**

Ohutkalvotekniikalla valmistetut aurinkopaneelit valmistetaan asettamalla erittäin ohuita kerroksia valoherkkää materiaalia halvan materiaalin pinnalle kuten ruostumattomalle teräkselle, lasille tai muoville. Ohutkalvotekniikalla toteutetun aurinkopaneelin hyötysuhde on 4 – 11 %:ia. Ohutkalvotekniikalla valmistetut aurinkopaneelit voi-

daan jakaa neljään eri ryhmään perustuen auringon kanssa aktiiviseen materiaaliin seuraavasti: Amorfinen pii (a-Si), Kadmium-Tellurium (CdTe), Kupari-Indium/Gallium Diselenide/disulphide (CIS, CIGS) ja Amorfinen ja Mikro pii (a-Si(m-SI)). [11.]



**KUVA 8. Ohutkalvoaurinkopaneeli ja rakenne [17]**

Aurinkopaneelien valmistajat ilmoittavat aurinkopaneelien tuottaman sähkötehon standardiolosuhteissa (STC), jotta eri valmistajien aurinkopaneelien hyvyttä pystytään vertailemaan keskenään. Standardiolosuhteissa aurinkosäteily  $I$  on  $1000 \text{ W/m}^2$ , ilman massa  $AM = 1,5$  ja ympäristön lämpötila  $\vartheta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . [16.]

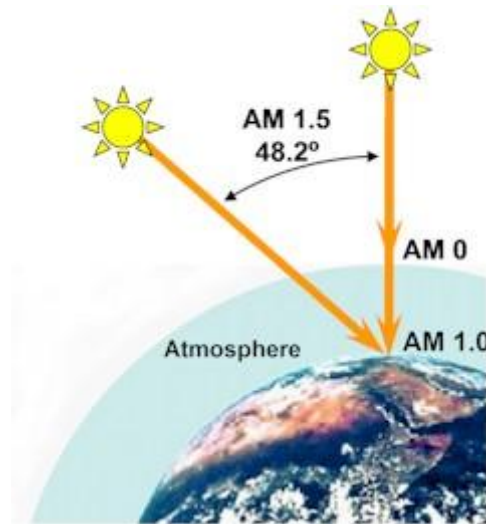
Ilman massa on määritetty auringon säteilytehon matkan pituuden suhteen auringonsäteilyn matkan pituuteen, kun aurinko on zenitissä eli kohtisuorassa tarkastelijaa kohti. Ilman massa määritellään kaavalla 1 [35]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

$\theta$  on tulokulma zenitistä,  $^\circ$

Ilman massa  $AM = 1,5$  tarkoittaa tulokulmana noin  $48^\circ$ :tta. Mitä suuremmassa tulokulmassa zenitistä auringonsäteily kohtaa ilmakehän, sitä enemmän ilmakehän eri epäpuhtauksiin siroutuu ja heijastuu säteilytehoa. [35.]





**KUVA 6. Ilman massa määrittäminen [40]**

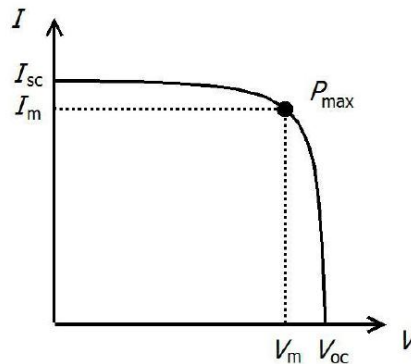
### 3.1.2 Aurinkopaneelien toimintaperiaate

Aurinkopaneelissa muunnetaan auringonenergian valo suoraan sähköenergiaksi valosähköisen ilmiön avulla. Aurinkopaneelissa on aina p- ja n-liitos. Valosähköinen ilmiö on pohjimmiltaan auringonsähkömagneettisen säteilyn fotonien ja aineen elektronien välistä vuorovaikutusta. Auringon valon kohdistuessa aurinkopaneeliin on osalla fotoneista riittävän suuri energia, että ne pääsevät ohuen pintakerroksen läpi pn-liitokseen muodostaen elektroni-aukopareja. Lähellä pn-liittoa muodostuvista pareista elektronit siirtyvät n-puolelle ja aukot p-puolelle. Rajapinnan läheisyyteen muodostuvan sähkökentän takia elektronit eivät voi siirtyä kuin vain yhteen suuntaan. Elektronien on kulkeuduttava ulkoisen johtimen kautta p-tyyppin puolijohteeseen, jossa ne voivat liittyä sinne kulkeutuviin aukkojen kanssa. Valaistun liitoksen eri puolilla on vastakkaismerkkiset varauksenkuljettajat, jolloin liitos voi toimia ulkoisen piirin jännitelähteenä. [22.]

### 3.1.3 Aurinkopaneelien ominaiskäyrät eli I-V -käyrät ja lämpökertoimet

Aurinkopaneelien ominaiskäyrien avulla pystytään tarkastelemaan aurinkopaneelille ominaisella I-V -käyrällä, joka kuvaa syntyneen virran ja aurinkopaneelin napojen välisen jännitteen suhdetta. Kun paneelia valaistaan ja siihen ei ole kytketty kuormaa, niin navoilla on maksimijännite ja virta on nolla. Tällöin puhutaan tyhjäkäyntijännitteestä  $V_{oc}$ . Kun paneelia valaistaan ja navat on oikosuljettu, niin jännite on nolla ja

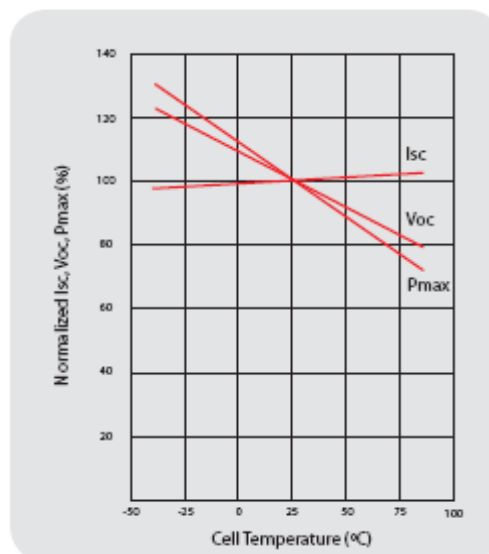
virta saavuttaa maksimiarvonsa. Tällöin puhutaan oikosulkuvirrasta  $I_{sc}$ . Kun paneeli kytketään kuormaan niin kuorman vaikutuksesta virta ja jännite seuraavat ominaiskäyrää (kuva 9). Paneelissa esiintyy resistiivisiä häviöitä ja rekombinaatiota, jonka seurauksena maksimiteho  $P_{max}$  on  $I_m$  ja  $V_m$  muodostama tulo. Jos resistiivisiä häviöitä ja rekombinaatiota ei esiintyisi, niin maksimiteho olisi  $I_{sc}$  ja  $V_{oc}$  muodostama tulo. [23.]



**KUVA 9. Periaatteellinen aurinkosähköpaneelin I-V-käyrä [27]**

Lämpötilakerroin kuvaa aurinkopaneelin ympäristön lämpötilan vaikutusta aurinkopaneelin sähköntuottoon. Valmistajat ilmoittavat aurinkopaneeleilleen lämpötilakerroimet, jotka on määritetty standardin mukaan. Lämpötilakerroimet ovat muotoa esimerkiksi  $-0,45 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  ja ne annetaan oikosulkuvirralla  $I_{oc}$  ja tyhjäkäyntijännitteelle  $V_{sc}$ . Jotkut valmistajat antavat myös maksimitehon tuotolle  $P_{max}$  lämpötilakerroimen. [27.]

**Temperature Dependence of  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$**



**KUVA 10. Erään aurinkosähköpaneelin lämpötilasuorat oikosulkuvirralla  $I_{sc}$ , tyhjäkäyntijännitteelle  $V_{oc}$  ja maksimiteholla  $P_{max}$  [48]**

Kuvassa 10 x-akselilla on aurinkokennon lämpötila, joka vastaa myös aurinkopaneelin lämpötilaa. Kennon lämpötilan ollessa 25°C, tuottaa paneeli nimellistehonsa verran sähkötehoa. Kennon lämpötilan noustessa yli 25°C, laskee  $V_{oc}$  huomattavasti, kun taas vastaavasti  $I_{sc}$  nousee hieman.  $I_{sc}$  kasvulla ei ole käytännön merkitystä kennon toiminnan kannalta.  $V_{oc}$  vähenemisestä johtuen aurinkokenno tuottaa nimellistehoa vähemmän sähkötehoa. Kennon lämpötilan laskiessa alle 25°C, kasvaa  $V_{oc}$  huomattavasti, kun taas vastaavasti  $I_{sc}$  laskee hieman.  $I_{sc}$  laskemisella ei ole käytännön merkitystä kennon toiminnan kannalta.  $V_{oc}$  kasvamisella on merkitystä kennon toiminnan kannalta, koska kenno pystyy tuottamaan nimellistehoa enemmän sähkötehoa. Toisin sanoen kenno tuottaa alle 25°C nimellistehoaan enemmän sähkötehoa, kun taas lämpötilan noustessa kenno tuottaa nimellistehoaan vähemmän sähkötehoa. [27.]

### 3.1.4 Aurinkopaneelin hyötysuhde

Aurinkopaneelin hyötysuhde on paneelin tuottaman sähkötehon ja paneelille tulevan auringonsäteilytehon suhde. Aurinkopaneelin hyötysuhde standardiolosuhteissa (normiolosuhteissa) määritellään kaavalla 2 [27.]:

$$\eta_{norm} = \frac{f \times V_{oc} \times I_{sc}}{G \times A} \quad (2)$$

$\eta_{norm}$	on aurinkopaneelin hyötysuhde, -
$f$	on täyttökerroin, tyypillinen arvo 0,71 – 0,74
$V_{oc}$	on tyhjäkäyntijännite, V
$I_{sc}$	on oikosulkuvirta, A
$G$	on auringonsäteilyteho, W/m <sup>2</sup>
$A_p$	on aurinkopaneelin pinta-ala, m <sup>2</sup>

Täyttökerroin  $f$  kuvaa todellisen sähkötehon tuoton tietyissä olosuhteissa suhdetta teoreettiseen maksimiin ja määritellään kaavalla 3.

$$f = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (3)$$

$V_{oc}$	on tyhjäkäyntijännite, V
$I_{sc}$	on oikosulkuvirta, A
$I_m$	on todellinen maksimivirta, A
$V_m$	on todellinen maksimijännite, V

Aurinkopaneelin hyötysuhteeseen vaikuttaa aurinkopaneelin ympäristön lämpötila ja useat muut tekijät. Muitakin aurinkopaneelin hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä kerrotaan seuraavaksi. Fotonien ylimääräinen energia muuttuu paneelissa lämmöksi ja osalla fotoneista ei ole tarvittavan suurta energiaa sähkövirran aikaansaamiseksi. Resisttiivisten häviöiden vuoksi osa sähköenergiasta muuttuu siis lämmöksi paneelissa ja johtimissa. Kaikki auringonsäteilyn synnyttämät sähkövarauksen kuljettajat eivät saavuta paneelin virtakontakteja. Kyseisestä ilmiöstä käytetään nimitystä keruuhäviöt. Osa auringonsäteilystä heijastuu pinnalta ja kidevirheissä sekä puolijohde-metalliitoksissa tapahtuu rekombinaatiota. [27.]

Aurinkopaneelin hyötysuhde käyttöolosuhteissa määritellään kaavalla 4 [16]







$$\eta = k_1 \times \eta_{norm} \times [1 + k_2 \times (\vartheta - 25^\circ C)] \quad (4)$$

$\eta$	on aurinkopaneelin hyötysuhde käyttöolosuhteissa,
$k_1$	on häviökerroin, tyypillinen arvo 0,90 – 0,95
$\eta_{norm}$	on aurinkopaneelin hyötysuhde standardiolosuhteissa,
$k_2$	on maksimitehon lämpötilakerroin, esimerkiksi muotoa $-0.0005 / ^\circ C$
$\vartheta$	on ympäristön lämpötila, $^\circ C$

Kaava 4 ottaa huomioon käyttöolosuhteissa muuttuvan ympäristön lämpötilan, joka talvisin hieman parantaa aurinkopaneelin hyötysuhdetta ja kesäisin huonontaa.

### 3.1.5 Eri tyyppisten aurinkopaneelien hyötysuhteet

Yksikiteinen aurinkopaneeli ja monikiteinen aurinkopaneeli valmistetaan kiteisestä piistä. Yksikiteisen aurinkopaneelin hyötysuhde vaihtelee 13-19 % välillä. Monikiteisen aurinkopaneelin hyötysuhde vaihtelee 11-15 % välillä. Ohutfilmitekniikalla valmistettujen aurinkopaneelien hyötysuhde on hieman piipohjaisia aurinkopaneeleita huonompi. Amorfisesta piistä valmistetun aurinkopaneelin hyötysuhde vaihtelee 4-8 % välillä. Kadmium-Telluridistä valmistetun aurinkopaneelin hyötysuhde vaihtelee 10-11 % välillä. Kupari-Indium-Diselenidistä valmistetun aurinkopaneelin hyötysuhde vaihtelee 7-11 % välillä. Amorfisen piin ja mikrokiteisen piin yhdistelmästä valmistettu aurinkosähköpaneelin hyötysuhde vaihtelee 7-9 % välillä. Uusimpana kaupallisena tuotteena on väriherkistetyt aurinkokennot. Niiden hyötysuhde vaihtelee 2-4 % välillä. Väriherkistetyn aurinkokennon hyötysuhde on saavutettu vain laboratorio-oloissa. [11.]

Commercial Module Efficiency							
Technology	Thin Film					Crystalline Silicon	
	(a-Si)	(CdTe)	Cl(G)S	a-Si/ $\mu$ c-Si	Dye s. cells	Mono	Multi
							
Cell efficiency							
Module efficiency	4-8%	10-11%	7-11%	7-9%	2-4% (LAB)	13-19%	11-15%
Area Needed per KW (for modules)	~ 15 m <sup>2</sup>	~ 9m <sup>2</sup>	~ 10m <sup>2</sup>	~12m <sup>2</sup>		~7m <sup>2</sup>	~8m <sup>2</sup>
Source: EPIA 2010, Photon International, March 2010, EPIA analysis Efficiency based on Standard Test conditions.							

KUVA 11. Erilaisia aurinkosähköpaneeleita ja niiden hyötysuhteita [11]

### 3.1.6 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja eli invertteri muuttaa tasasähköä vaihtosähköksi. Vaihtosuuntaajan hyötysuhde vaihtelee välillä 80 – 90 % optimaalisessa tilanteessa, kun kuorma on 25-100 % vaihtosuuntaajan tehosta. Kun jännite laskee alle vaihtosuuntaajan optimaalisen alueen kasvaa häviöt. Tämän takia aurinkopaneeliston sähköinen kytkentä täytyy op-

timoida vaihtosuuntaajan kanssa ottaen huomioon aurinkosäteilytehon muuttuminen vuoden ajan mukaan. [20; 1].

Aurinkopaneelista liitetään vaihtosähköverkkoon vaihtosuuntaajalla. Vaihtosuuntaaja kytkee siihen tulevan tasajännitteen ohjaussignaalin avulla niin, että lähtöjännitteeksi saadaan taajuudeltaan ja aaltomuodoltaan haluttua vaihtosähköä. Kytkelementteinä toimivat tehopuolijohdekomponentit ja ohjaussignaali otetaan joko syötettävästä sähköverkosta tai se tuotetaan vaihtosuuntaajan sisäisessä oskillaattorissa. Aurinkosähkökäyttöön tarkoitetut vaihtosuuntaajat on nykyään varustettu MPPT -tekniikalla, joka mahdollistaa parhaimman tehon tuoton käyttöaikoina. [23; 1].

### **3.1.7 MPPT – Maximum Power Point Tracker**

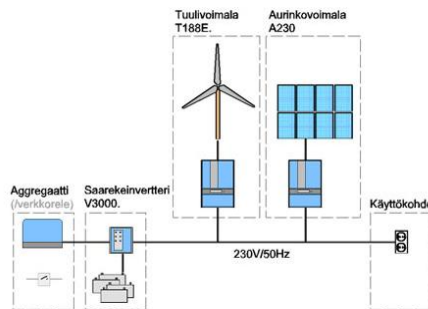
MPPT on täysin elektroninen säädin, joka säätelee paneelien sähkötehoa niin, että ne tuottavat joka hetkellä parhaan mahdollisen tehon. Esimerkiksi perinteisellä säätimellä yhdistetään paneeli ja 12 V akku. Tällöin säädin pakottaa paneelin toimimaan 12 V jännitteellä, vaikka paneeli pystyisi olosuhteidensa puolesta toimimaan korkeammalla jännitteellä. MPPT –säädin sen sijaan laskee koko ajan parhaimman tehon tuoton ja asettuu siihen. [24.]

MPPT –säätimen hyviä puolia ovat nopeus, tarkkuus ja maksimitehontuotto. Mitä nopeammin ja tarkemmin laite löytää maksimitehon pisteen niin sitä enemmän voidaan hyödyntää sähköenergiaa. Pilvisinä ja puolipilvisinä päivinä auringon säteilyteho paneeleille muuttuu nopeasti, jolloin MPPT:n nopeudesta on hyötyä. MPPT:n tarkkuudesta on hyötyä myös kirkkaina ja aurinkoisina päivinä, jolloin auringon säteilyteho on tasaista. [23.]

## **3.2 Verkkoon kytkemätön aurinkosähköjärjestelmä**

Verkkoon kytkemätöntä aurinkojärjestelmää voidaan myös kutsua nimellä saarekeverkko. Tavallisimmin saarekeverkkoa käytetään kesämökeillä ja paikoissa, joissa yleinen sähköverkko ei ole saatavilla. Saarekeverkossa voi olla useita eri sähköntuotantotapoja mm. tuulivoima, aurinkovoima tai aggregaatti jne. Käyttöverkossa voidaan käyttää tasasähköä hyödyntäviä sähkölaitteita. Käytettäessä vaihtosähköä tarvitsevia

sähkölaitteita joudutaan verkkoon kytkemättömässä aurinkosähköjärjestelmässä käyttämään myös vaihtosuuntaajaa eli invertteriä. [13.]



**KUVA 12. Periaatekuva verkkoon kytkemättömästä aurinkosähköjärjestelmästä [13]**

### 3.2.1 Akusto

Akkuja käytetään vain omavaraisissa järjestelmissä, joissa sähköenergiaa tarvitaan myös valoisan ajan ulkopuolella. Yleisimpänä akkutyypinä aurinkosähkösovelluksissa käytetään lyijyakkuja. Kuitenkin lyijyakun tehokaskäyttö rajoittuu lähinnä päivä- ja viikkotason energiavarastointiin. NykYTEKNIikka ei juuri esitä ratkaisuja kesästä talveen ulottuvaan kausivarastointiin. Aurinkosähköjärjestelmissä on yleensä käytettävä niihin erityisesti suunniteltuja akkuja, jotka kestävät toistuvaa syväpurkausta vahingoittumatta. Aurinkosähköjärjestelmä vaatii akustolta myös korkeaa lataushyötysuhdetta, alhaista itsepurkauskykyä, vähäistä huoltoa sekä erinomaisia sykliominaisuuksia tarkoittaen toimintaa tilanteissa, jolloin akkuja vuoroin ladataan ja vuoroin puretaan. Valittaessa akkuja aurinkosähköjärjestelmään tulisi sen perustua kokonaistaloudellisuuteen, joka muodostuu akun hankintahinnasta, hyödynnettävissä olevasta kapasiteetista, huollontarpeesta, lataushyötysuhteesta ja odotettavasta eliniästä. [1.]

### 3.2.2 Lataussäädin

Lataussäädin asennetaan aurinkopaneeliston ja akuston väliin. Sen tehtävänä on valvoa, että akusto latautuu optimaalisella tavalla. Akusto latautuu täydellä teholla, kun ne tarvitsevat varausta ja sen jälkeen absorptio- ja ylläpitolataus vakiojännitteellä, siten etteivät akut tule ylliladatuiksi. [21.]

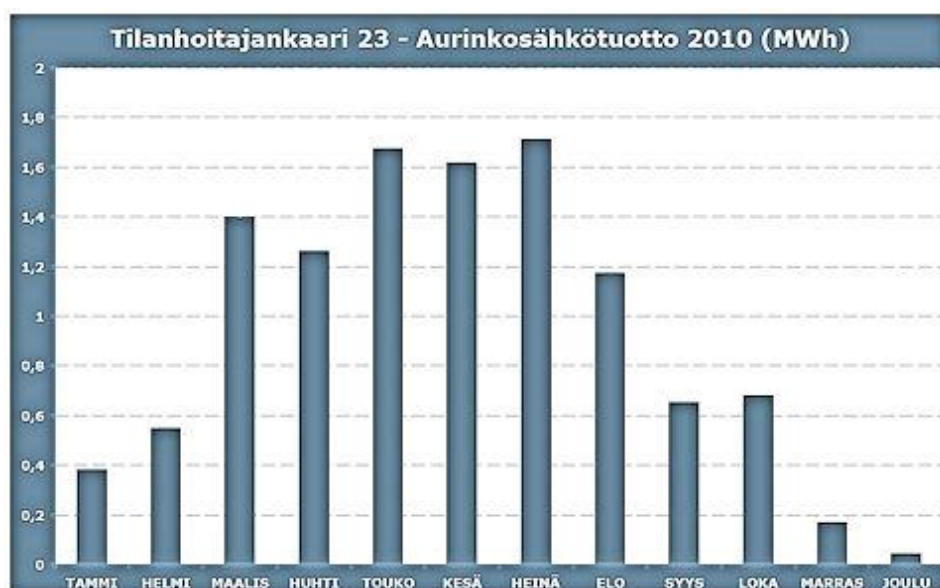
Säädintekniikka perustuu pulssileveyden modulaatioon (PWM). Tämän ansiosta akun varaustila pysyy mahdollisimman korkealla. Akku latautuu normaalisti päivän aikana. Kun haluttu jännitetaso saavutetaan, PWM-piiri kytkee aurinkoenergian lähteen jatkuvasti päälle ja pois jännitetason säilyttämiseksi halutulla tasolla. [1.]

### 3.3 Suomessa toteutetut ja rakenteilla olevat aurinkosähköjärjestelmät

Tarkasteluun on otettu kaksi hieman erityyppistä kohdetta. Toinen on jo useamman vuoden toiminnassa ollut kerrostaloon integroitu aurinkosähköjärjestelmä Helsingin Viikissä. Toinen on rakenteilla oleva Porin uimahalli, jossa aurinkoenergiaa hyödynnetään isolla mittakaavalla.

#### 3.3.1 Helsingin Viik

Viikissä on Suomen ensimmäinen aurinkosähköä tuottava kerrostalo. Se kattaa 39 asuntoa ja kerrostaloon on asennettu yhteensä 240 m<sup>2</sup> aurinkopaneelia, jotka ovat osana parvekejulkisivua. Aurinkopaneeleista puolet on suunnattu etelään ja puolet länteen. Aurinkosähköjärjestelmä on liitetty Helsingin Energian sähköverkkoon, jolloin ylimääräinen aurinkosähkö siirtyy yleiseen sähköverkkoon muiden kuluttajien käytettäväksi. [7.]

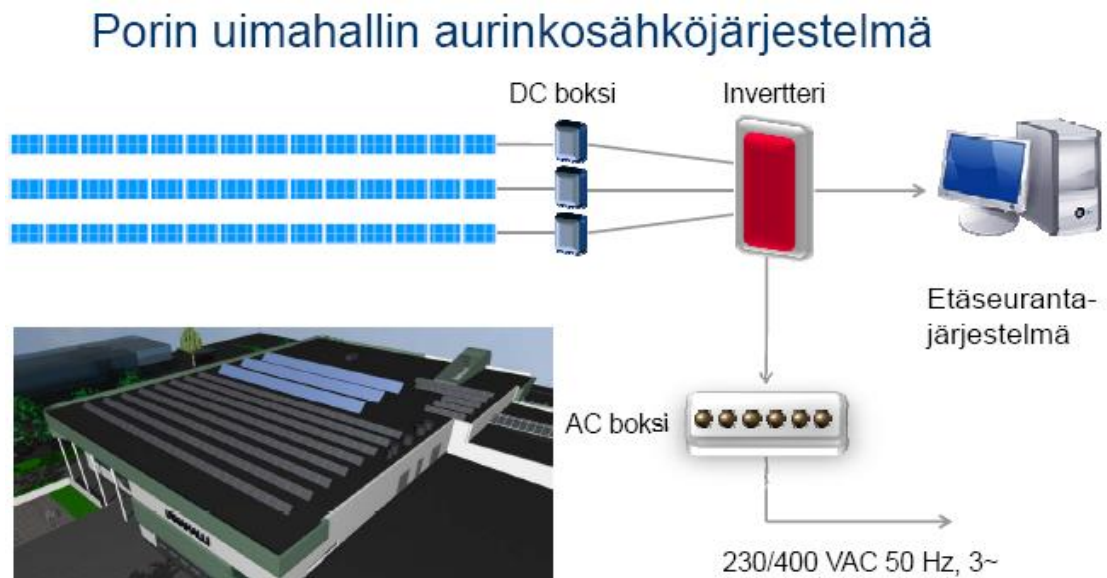


**KUVA 13.** Helsingin Viikissä sijaitsevan kiinteistön nimeltä Tilanhoitajankaari 23 aurinkosähkötuo vuonna 2010 [7]



### 3.3.2 Porin Uimahalli

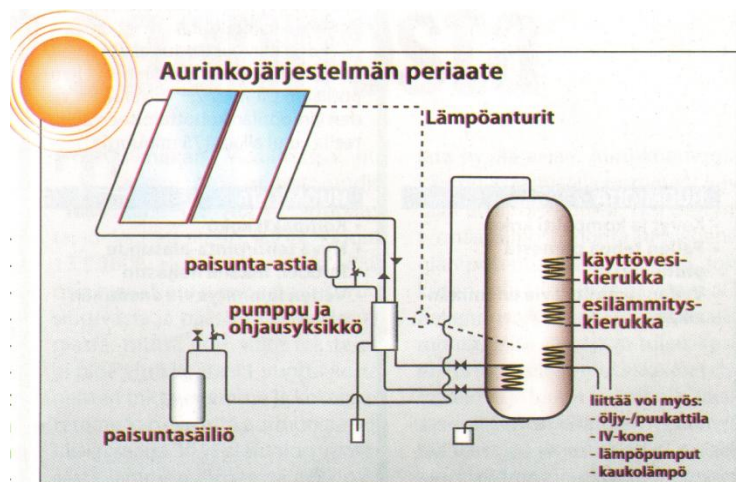
Porin rakennetaan uusi uimahalli, jossa on tarkoitus käyttää aurinkoenergiaa sähkön ja lämmön tuottamiseen. Kohde on ensimmäistä laatuaan Suomessa, missä hyödynnetään aurinkoenergiaa suuressa määrin. Aurinkopaneeleina käytetään yksikiteistä pii-aurinkopaneelia. Aurinkopaneeliston pinta-ala on yhteensä 360 m<sup>2</sup> ja huipputeho on 50 kW<sub>p</sub>. Aurinkopaneeliston on arvioitu tuottavan 45 000 kWh vuodessa, mikä kattaa uimahallin sähköenergiatarpeesta noin 5 %. [17; 18].



**KUVA 14. Havainnekuva Porin uimahallin aurinkosähköjärjestelmästä [17]**

## 4 AURINKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄT

Aurinkolämpöjärjestelmät koostuvat useasta komponentista. Keskeisimmät osat ovat aurinkokeräin, nestevaraaja, latauspumppu-yksikkö, putkisto, säätöyksikkö ja lämmönvaihdin. Aurinkolämpöjärjestelmä etenkin Suomessa on enemmänkin varalämpöjärjestelmä kuin päälämpöjärjestelmä johtuen lämmönsaannin jaksottaisuudesta. Lämmöntarpeen ollessa suurin on auringosta saatava lämpö pienemmillään ja toisinpäin. Aurinkolämmityksen voi liittää lisälämmönlähteeksi, minkä tahansa päälämmönlähteen rinnalle. Kuitenkin aurinkolämmityksen tehokkaassa käytössä tulisi päälämmönlähteessä olla nestevaraaja tai sitten hankkia nestevaraaja mikäli päälämmönlähde on esimerkiksi kaukolämpö. [6.]



**KUVA 15. Aurinkolämpöjärjestelmän periaatekuva. [10]**

#### 4.1 Aurinkokeräimet

Aurinkokeräimet ovat laitteita, jotka muuttavat auringon säteilyenergian lämpöenergiaksi. Aurinkokeräimissä energian muutos tapahtuu absorptiopinnalla, jonka tarkoitus on absorpoida mahdollisimman suuri osa auringosta tulevasta säteilystä. Iso osa absorpoidusta säteilyenergiasta muuttuu lämpöenergiaksi. Aurinkokeräintyyppejä ovat tasokeräin ja tyhjiöputkikeräin. [8.]

##### 4.1.1 Tasokeräin ja sen toimintaperiaate

Aurinkotasokeräin muodostuu tavallisesti kuparista tehdystä keruuputkistosta, joka on asennettu koteloituun rakenteeseen. Jokaiseen keräinputkeen on yhdistetty sivulevyt absorptiopinnan parantamiseksi. Levyt ja putket on pinnoitettu selektiivisellä absorptiopinnoitteella. Selektiivisellä pinnoitteella on erinomainen absorptiokyky ( $\alpha = 0,95$ ). Säteilyenergiasta vain murto-osa heijastuu takaisin. Tasokeräin voi olla varustettu joko 1-selektiivipinnoitetulla lasilla tai 2-selektiivipinnoitetulla lasilla. [8; 9].

Tasokeräimen toimintaperiaatteena on, että auringonpaiste lämmittää tasokeräimessä olevaa mustaa absorptiopintaa, johon on yhdistetty nesteen virtausputket. Absorptiopinnan lämmitessä auringonpaisteesta luovuttaa se lämpöä nesteeseen, joka kulkeutuu lämmentyneenä varaajaan.



**KUVA 16. Aurinkotasokeräin [8]**

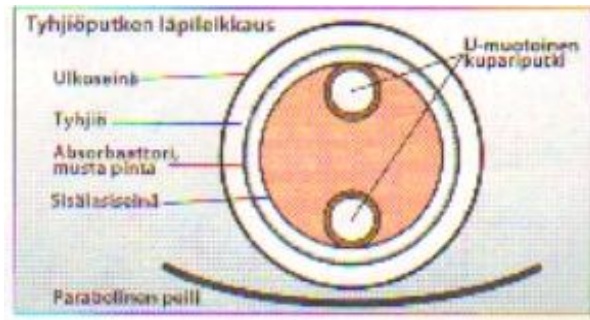
#### 4.1.2 Tyhjiöputkikeräin ja sen toimintaperiaate

Tyhjiöputket voidaan jakaa kahteen ryhmään toimintaperiaatteen mukaan. Tyhjiöputket, joissa lämmönsiirtoneste kiertää u-muotoisessa putkessa mustan absorptiopinnan alla ja tyhjiöputket, jotka toimivat sisäisellä heat-pipe periaatteella. [1.]

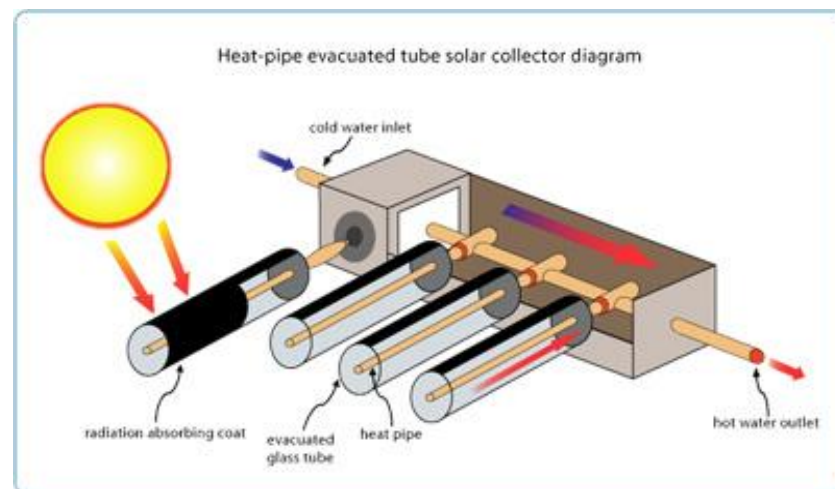


**KUVA 17. CPC-Tyhjiöputkikeräin ja Heat-pipe tyhjiöputkikeräin [42]**

CPC-tyhjiöputkikeräin koostuu tyhjiöidyistä lasiputkista, joiden sisällä on sylinterimäinen tai tasomainen absorptiopinta. Tyhjiöputken absorptiopinta lämpenee auringonsäteilystä. Absorptiopintaan liitettyssä putkessa oleva lämmönsiirtoneste höyrystyy ja nousee putken yläosaan, jossa lämpö siirtyy lämmönvaihtimen kautta varaajaan menevään nesteeseen. [10.]

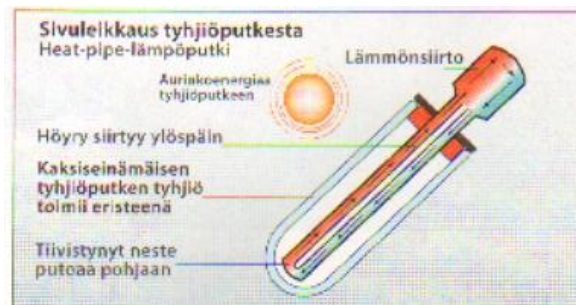


**KUVA 18. CPC-Tyhjiöputkikeräimen poikkileikkaus [10]**

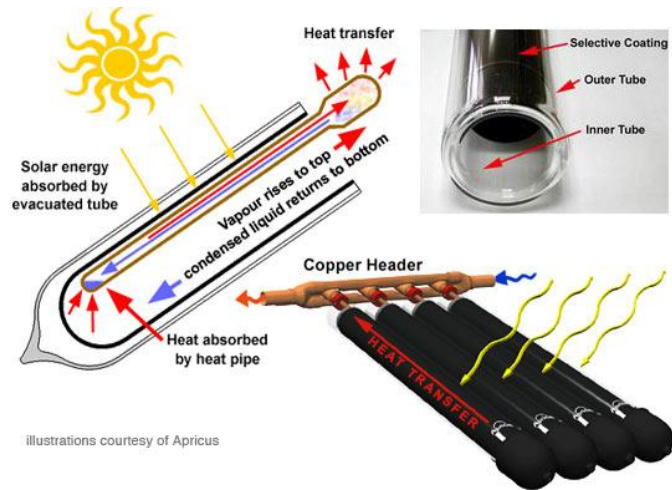


**KUVA 19. CPC-Tyhjiöputkikeräin ja lämmönsiirrin [38]**

Tyhjiöputket, joissa on erillinen suljettu ”heat-pipe” –periaatteella toimiva lämpöputki. Heat-pipe:ssa neste höyrystyy suhteellisen alhaisessa lämpötilassa ja nousee putken yläosaa pitkin kohti loppupäätä. Neste lauhtuu joutuessaan kosketuksiin lämmönsiirtonesteen kanssa luovuttaen lämpönsä varaajalle menevälle nesteelle. [1.]



**KUVA 20. ”Heat-Pipe” –periaatteella toimiva tyhjiöputkikeräin [10]**



**KUVA 21.** ”Heat-Pipe” –periaatteella toimiva tyhjiöputkikeräimen lämmön siirtyminen tulevaan nesteeseen. [47]

#### 4.2 Aurinkokeräimen hyötysuhde

Aurinkokeräimen hyötysuhde kuvaa aurinkokeräimen kykyä muuntaa auringonsäteilyenergiaa lämpöenergiaksi. Mitä suurempi hyötysuhde on, sitä enemmän keräin pystyy muuntamaan auringonsäteilyenergiaa lämmöksi. Aurinkokeräimen hyötysuhteeseen vaikuttavat keräimelle tuleva auringon säteily, haluttu menoveden lämpötila ja keräintyyppi. [9.]

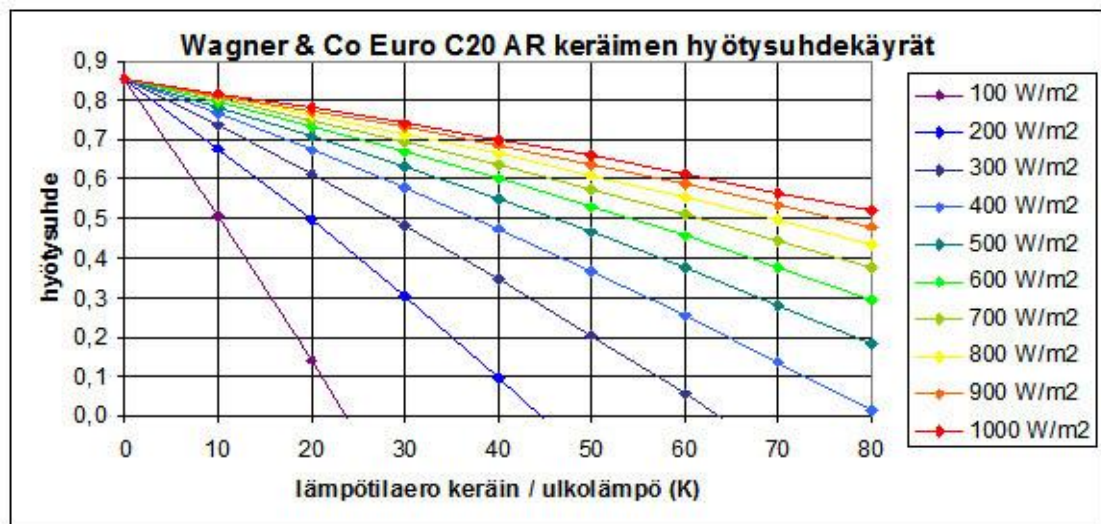
Tasokeräimissä hyötysuhteeseen vaikuttaa vielä, onko keräimessä yksi selektiivilasi vai kaksi selektiivilasia. Selektiivilasin käyttö vähentää säteilyä ja konvektiivista lämmönsiirtoa. Myös tuulen vaikutus tasokeräimissä on suurempaa kuin tyhjiöputkikeräimissä, koska konvektiivinen lämmönsiirtyminen voimistuu tuulen voimistuessa. Tyhjiöputkikeräimissä on tuulen vaikutus minimoitu asettamalla tyhjiökerros nesteen ja ulkoilman välille, jolloin ainoaksi lämmönsiirtomekanismiksi jää säteilylämmönsiirto. [9; 28].

Taso- sekä tyhjiöputkikeräimen hyötysuhde määritellään kaavalla 5.

$$\eta_h = \eta_o - k1 \times \frac{\Delta T}{G} - k2 \times \left(\frac{\Delta T}{G}\right)^2 \quad (5)$$

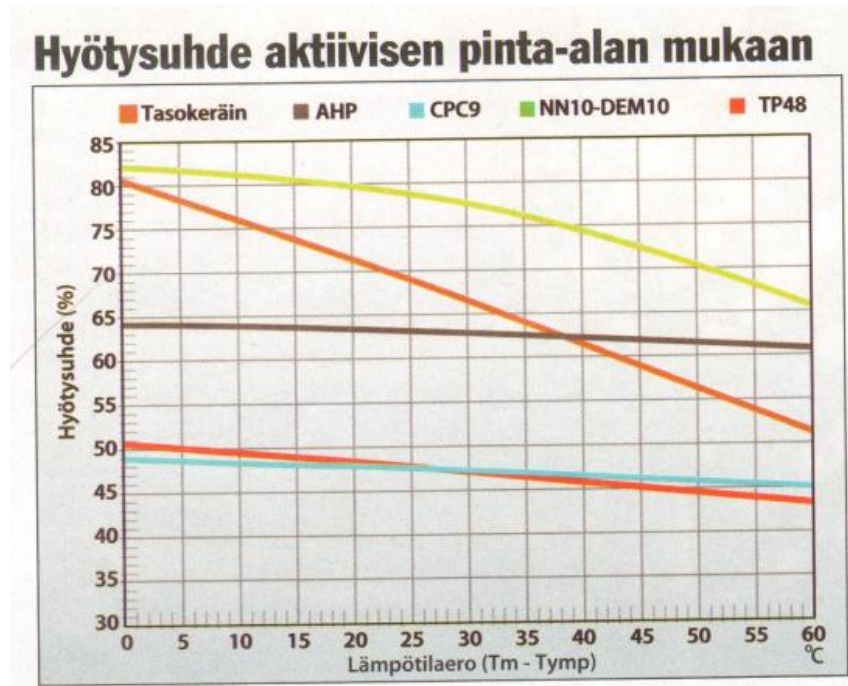
$\eta_h$	on keräimen hyötysuhde, %
$\eta_o$	on keräimen optinen hyötysuhde, %
$k1$	on keräinkohtainen häviötermi, W/(m <sup>2</sup> *K)
$k2$	on keräinkohtainen häviötermi, W/(m <sup>2</sup> *K)
$G$	on auringon säteilyteho, W/m <sup>2</sup>
$\Delta T$	on menoveden ja ympäristön lämpötilaero, °C

Termi  $\eta_o$  kuvaa tilannetta, jolloin keräimen keskimääräinen lämpötila on sama kuin ympäristön lämpötila. Termi  $k1$  kuvaa keräimen lämmönläpäisykykyä johtumisen osalta. Termi  $k2$  kuvaa keräimen lämmönläpäisykykyä säteilyn osalta. [15.]

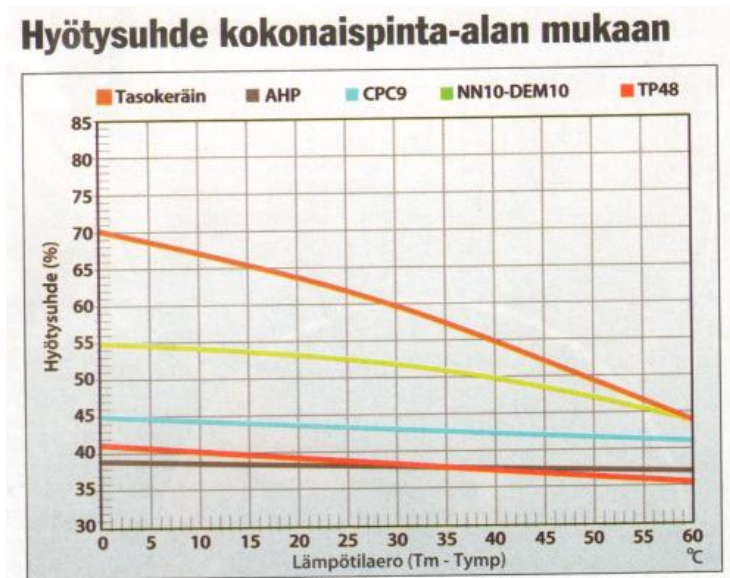


**KUVA 22. Tasokeräimen hyötysuhdekäyriä eri auringonsäteilytehon arvoilla [9]**

Kuvissa 23 ja 24 on eri tyhjiöputkikeräimille lasketut hyötysuhteet aktiivisen pinta-alan mukaan ja kokonaispinta-alan mukaan. Kuvan 23 yläosassa esitetyt lyhenteet ovat eri valmistajien tyhjiöputkikeräimille antamia tyyppinimiä. Esimerkiksi TP48 on RICA:n valmistama tyhjiöputkikeräin. Kokonaispinta-alalla tarkoitetaan pinta-alaa, jossa otetaan myös raamit huomioon, kun taas aktiivisella pinta-alalla tarkoitetaan ns. mustan pinnan pinta-alaa eli auringon säteilyä keräävää pinta-alaa. [9.]



**KUVA 23.** Tyhjiöputkikeräinten hyötysuhde aktiivipinta-alan mukaan vakioitu auringonsäteily teholle  $E = 850 \text{ W/m}^2$  ja eri lämpötilaeroille menoveden ja ympäristön välillä [9]



**KUVA 24.** Tyhjiöputkikeräinten hyötysuhde kokonaispinta-alan mukaan, jossa vakioitu auringonsäteily teholle  $E = 850 \text{ W/m}^2$  sekä eri lämpötilaeroille menoveden ja ympäristön välillä [9]

### 4.3 Pumppuryhmä ja ohjausyksikkö

Aurinkolämpöjärjestelmän toiminnan ytimenä toimii pumppuryhmä, johon on asetettu tarvittavat säätölaitteet aurinkopiirin ohjaamiseen ja säätöön. Pumppuryhmän voi hankkia valmiina tai rakentaa itse. Kiertovesipumpulle annetaan seuraava ehto eli sen pitää olla on/off –kytkennällä varustettu. Pumppu valitaan tilavuusvirran ja nostokorkeuden mukaan. Ohjausyksikön tehtävänä on säädellä virtausta aurinkokeräimiltä varaajaan. Ohjausyksikkö käynnistää pumpun, kun aurinkokeräinten ja varaajan välillä on riittävän suuri lämpötilaero. Nykypumppujen kiertonopeutta vaihdellaan aurinkokeräimen ja varaajan lämpötilaeron mukaan. Silloin aurinkolämpöjärjestelmä kykenee ottamaan huomioon sään vaihtelut. Esimerkiksi pilvisinä päivinä pumppu hidastaa virtausta, jotta tarvittava lämpötilaero saavutettaisiin aurinkokeräimissä. Säätopakettiin kuuluu 2-lämpötilaanturia, jotka asetetaan varaajan alaosaan ja keräimen yläosaan. [24; 9].

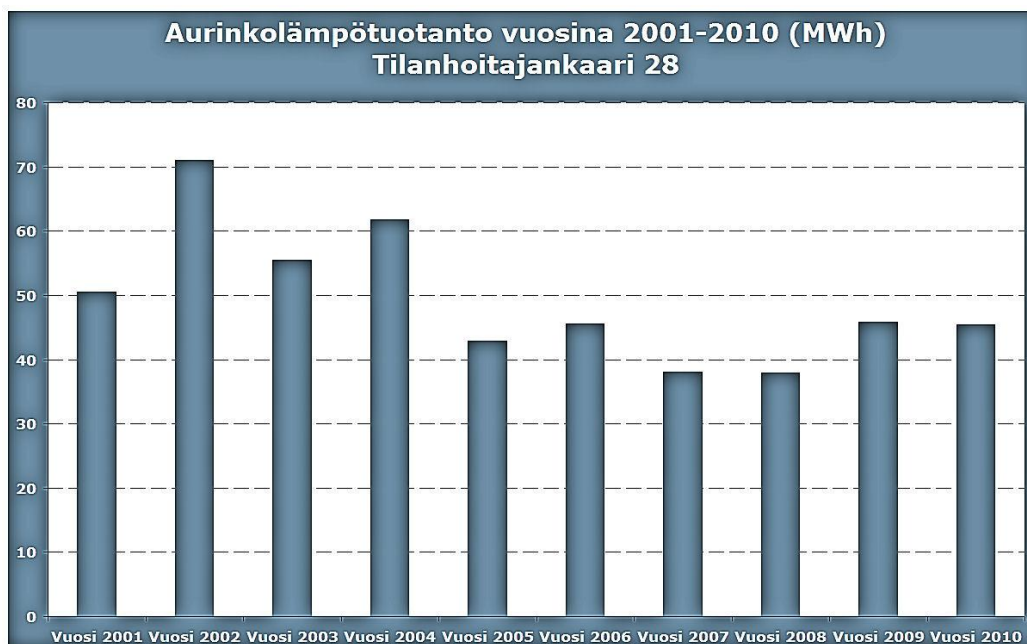


**KUVA 25. Resolin valmistamia ohjausyksiköitä. [9]**

### 4.4 Suomessa toiminnassa olevat aurinkolämpöjärjestelmät tai tekeillä olevat

Helsingin Eko-Viikkiin on rakennettu vuonna 2001 aurinkolämpöjärjestelmä, jonka piirissä on 412 asuntoa yhdeksässä kiinteistössä. Eko-Viikissä tuotetaan aurinkolämmöllä 15-20 % koko vuoden lämpimän veden tarvitsemasta energiasta ja 5-10 % kiinteistön vuotuisesta lämmöntarpeesta. Alla on aurinkolämmön vuosituotto 2001-2010 tarkastelujaksolta Tilahoitajankaari 28 –nimisestä kiinteistöstä Helsingin Viikistä. Aurinkokeräimiä on asennettu yhteensä 248 m<sup>2</sup>. Keräimet on asennettu 20° kallistuskulmalla. [7.]





**KUVA 26. Aurinkolämmön vuosituotto vuosilta 2001-2010 Helsingin Viikissä kiinteistössä nimeltä Tilanhoitajankaari 28 [7]**


## 5 AURINKOJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT

Aurinkojäähdytysjärjestelmissä käytetään auringon lämpöä jäähdytyskierron ylläpitämiseen. Lämpövoimalla käyviä jäähdytyskoneita kuten absorptio- ja adsorptiojäähdytyskoneita on käytetty vuosikymmeniä, mutta niiden jäähdytyskierron käyttövoimana on käytetty pääosin teollisuuden jätelämpöä tai kaukolämpöä. Viime aikoina pilotti-projektit ovat osoittaneet potentiaalia aurinkolämmöllä ajettuun jäähdytysprosessiin. [12.]

Tämän hetkiset aurinkojäähdytysjärjestelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään suljetun kierron järjestelmiin ja avoimen kierron järjestelmiin. Suljetun kierron järjestelmiin kuuluvat absorptio- ja adsorptiojäähdytys. Niillä tuotetaan kylmää vettä, jota voidaan käyttää missä tahansa jäähdytysmuodossa, kuten ilmastoinnin jäähdytyspatterissa, puhallinkonvektoreissa tai jäähdytyskatossa jne. [12.]

Avoimen kierron järjestelmiin kuuluvat kuivainkierokko tai nestekuivainjäähdytys. Niillä tuotetaan viileää ilmaa, jota johdetaan oleskelualueelle. Kylmäaineena käytetään aina vettä, koska kylmäaine on koko prosessin ajan kosketuksissa ilman kanssa. Kuivainjärjestelmien etu on, että niillä pystytään sekä lämmittämään ilmaa, että jäähdyt-

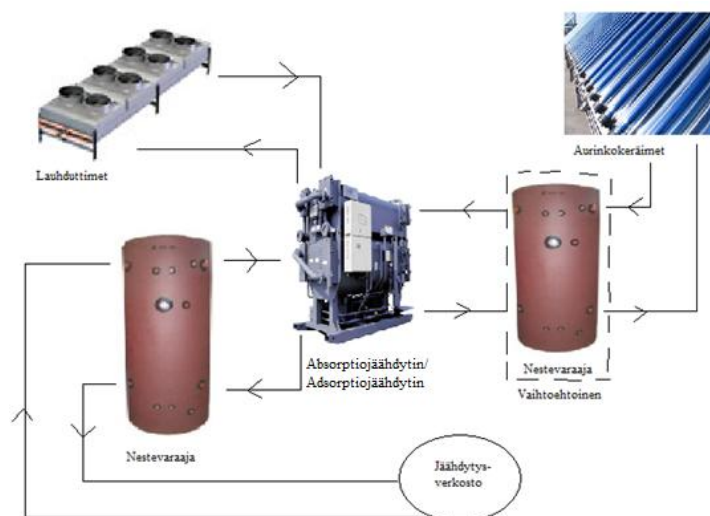
tämään ilmaa. Haittana on, että jäähdytystä pystytään tuottamaan vain ilmaan. Yleisimmät kuivaimella toteutetut järjestelmät käyttävät pyörivää kuivainkierroa. [12.]

method	closed cycle		open cycle	
	refrigerant cycle		refrigerant (water) is in contact to the atmosphere	
principle	chilled water		dehumidification of air and evaporative cooling	
phase of sorbent	solid	liquid	solid	liquid
				
typical material pairs	water - silica gel	water - water/ lithiumbromide, ammonia/water	water - silica gel, water - lithiumchloride	water - calcium chloride, water - lithium chloride
market available technology	adsorption chiller	absorption chiller	desiccant cooling	close to market introduction
typical cooling capacity [kW cold]	adsorption chiller: 50-430 kW	absorption chiller: 15 kW - 5 MW	20 kW - 360 kW (per Module)	-
typical COP	0.5-0.7	0.6-0.75 (single effect)	0.5->1	>1
driving temperature solar collectors	80-90°C	80-110°C	45-95°C	45-70°C
	vacuum tubes, flat plate collectors	vacuum tubes	flat plate collectors, solar air collectors	flat plate collectors, solar air collectors

**KUVA 27. Yleiskatsaus olemassa olevista aurinkojäähdytysteknologioista [12]**

### 5.1 Aurinkoavusteinen absorptiojäähdytys

Aurinkoavusteisen absorptiojäähdytyksen kokonaisuus koostuu seuraavista komponenteista: aurinkokeräimistä, absorptiojäähdyttimestä, nestevaraajasta, lauhduttimesta, putkistoista, pumpuista ja varusteista.



**KUVA 28. Aurinkoavusteisen absorptiojäähdytyksen ja adsorptiojäähdytyksen pääkomponentit**

Absorption ja adsorption erona on, että absorptiossa kylmäainekaasu liukenee nesteeseen, kun taas adsorptiossa kylmäainekaasu sitoutuu molekyylivoimien välityksellä kiinteään huokoiseen materiaaliin. [29.]

### 5.1.1 Absorptiojäähdytin

Absorptiojäähdyttimet ovat laajimmin käytössä edellä mainituista jäähdyttimistä ympäri maailmaa. Kylmäaineen lämpökomprimointi saavutetaan käyttämällä nestemäistä kylmäaine/sorbentti -liuosta ja lämpöä. Lämpökomprimoinnilla tarkoitetaan absorptiojäähdytystapauksessa kylmäaineena toimivan veden irrottamista liuoksesta. Tämä saavutetaan tuomalla lämpöä liuokseen, jolloin liuoksen kaasu-neste-tasapaino muuttuu liuoksen luovuttaessa veden pois, joka lauhtuu lauhduttimessa takaisin nesteeksi. Sorbentilla tarkoitetaan liuoksen osaa, joka sitoo kylmäainehöyryn itseensä kuljettaen kylmäainehöyryn lauhduttimelle ja lauhduttimelta kylmäainenesteen takaisin höyrystimelle uutta kiertoa varten. Absorptiojäähdyttimissä käytetään työaineparina joko LiBr/H<sub>2</sub>O tai NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O. Työainepareissa tulee ottaa huomioon niiden kiteytymisraja sekä niiden stabiilisuus. Työainepareilta vaaditaan stabiilisuutta, jotta ne toimivat kaikissa lämpötiloissa ja paineissa turvallisesti. Absorptiojäähdyttimiä on saatavilla kylmäteholtaan välillä 15 kW – 5 MW. [12; 29].

Absorptiojäähdyttimen pääkomponentit ovat keitin (Generator), imeytin (Absorber), lauhdutin (Condenser) ja höyrystin (Evaporator). Keittimen ja imeytimen välissä on sähköllä toimiva kiertovesipumppu ja paineenalennusventtiili. Höyrystimen ja lauhduttimen välissä on myös paineenalennusventtiili. Imeytin ja höyrystin sijaitsee useimmiten samassa säiliössä, jonka paine on tavallisesti noin 0,01 bar. Keitin ja lauhdutin sijaitsee useimmiten samassa säiliössä, jonka paine tavallisesti noin 0,07 bar. [12; 33].

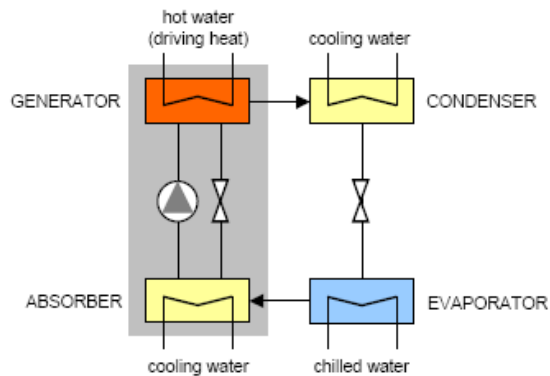


Figure 2: Principle of an absorption chiller



## KUVA 29. Absorptiojäähdyttimen rakenne [12; 43]

### 5.1.2 Absorptiojäähdytysprosessi

Absorptiojäähdytysprosessi perustuu jonkin tietyn liuoksen aineen, tässä tapauksessa liuottimen tai kylmäaineen eli absorbenttien ominaisuuksiin ja erityisesti toimintaan työaineparina. Tietyissä paineissa ja lämpötilassa vallitsee kaasun ja nesteen välillä tasapaino, mutta muuttaessa painetta tai lämpötilaa tasapaino muuttuu, jolloin kaasua (höyryä) vapautuu tai sitoutuu. [29.]

Kuvasta 30 voi nähdä yksivaiheisen absorptiojäähdytysprosessin toiminnan kuvauksen. Nestemäinen kylmäaine (11) siirtyy lauhduttimesta (3) paisuntaventtiiliin (6) kautta höyrystimelle (1). Osa kylmäaineesta (12) höyrystyy jo paisuntaventtiilissä (6), mutta loput kylmäaineesta höyrystyy vasta höyrystimessä (1) virtaavan jäähdytettävän veden (1,2) vaikutuksesta. Kylmäainehöyry (9) absorboidaan imeyttimelle (2). Höyrystin ja imeytin sijaitsevat samassa kammiossa, joten absorboinnilla tarkoitetaan tässä tapauksessa höyrystimessä syntyvän kylmäainehöyryn imeminen liuokseen. Imeyttiin siirtyy imukykyinen liuos (13) (vahva imukyky), joka laimenee kylmäainehöyrystä tilaan 14 (heikko imukyky). Imeyttimestä (2) poistuva liuos (14) pumpataan pumpulla (7) lämmönsiirtimen (5) kautta keittimelle (4). Keittimessä (4) palautetaan liuoksen (16) suuri absorptiokyky takaisin käyttäen aurinkolämpöä hyväksi. Keittimessä kylmäaine erottuu tuodun lämmön seurauksena liuoksesta tilaan (10). Keittimessä (4) on palautettu liuoksen vahva absorptiokyky, mistä liuos kulkee takaisin imeyttimelle (2) rekuperatiivisen lämmönsiirtimen (5) kautta. Lämmönsiirtimessä imeyttimelle palaava liuos esilämmittää keittimille menevän liuoksen. Tällöin keitti-

melle menevän liuoksen lämpötila ja paine nousevat. Irrotettu kylmäainehöyry tilassa (10) siirtyy lauhduttimelle (3), jossa se lauhdutetaan nesteeksi (11). Kylmäaineneste (11) aloittaa kierron uudestaan. Lauhdutinta ja imeytintä tulee jäähdyttää prosessin aikana, mikäli prosessista halutaan tehokas. [30; 12; 33].

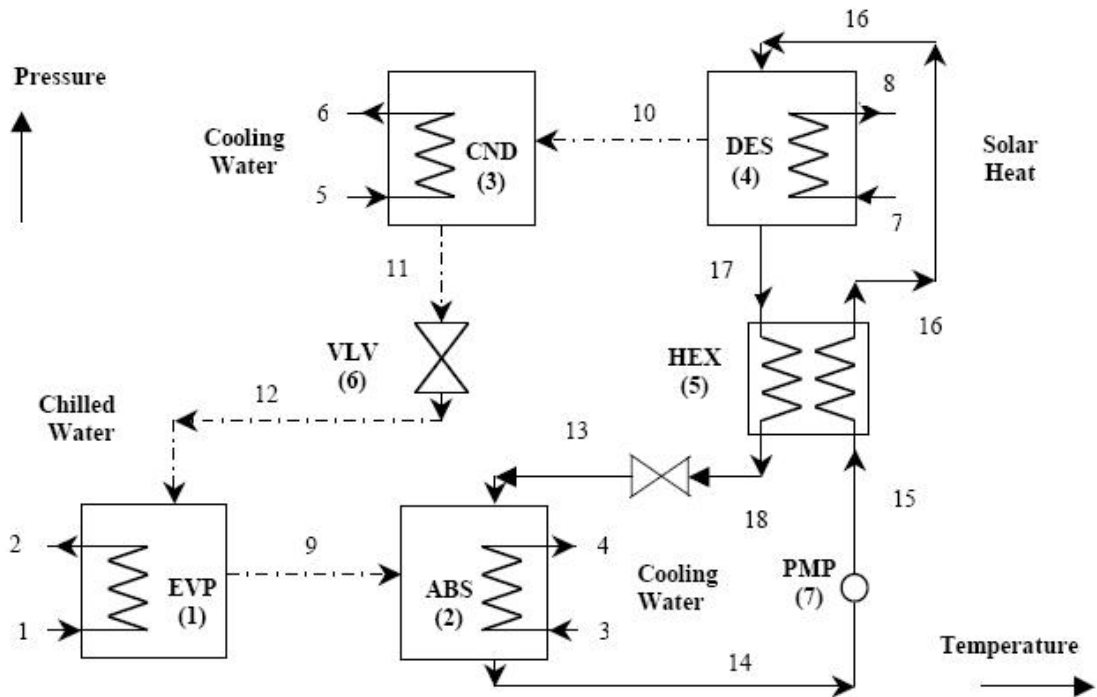


Figure 3.1: Schematic description of a single-effect absorption chiller.

### KUVA 30. Yksivaiheisen absorptioprosessin toimintaperiaate [30]

#### 5.1.3 Lämmönlähde

Imeyttimeen syötettävä lämpö tuotetaan tässä tapauksessa aurinkokeräimillä. Myös muita lämmönlähteitä on mahdollista käyttää kuten kaukolämpöä tai teollisuuden jäte-lämpöä. Aurinkokeräimiksi kuvan 27 mukaan lämmönlähteeksi sopisi vain tyhjiöput-kikeräimet, koska niillä päästään riittävän korkeisiin toimintalämpötiloihin. Yksivai-heinen absorptioprosessi vaatii toimintalämpötilan välillä 80-110 °C. Kaksivaiheista absorptioprosessia käytettäessä tarvitaan toimintalämpötilaksi noin 160 °C. [12.]

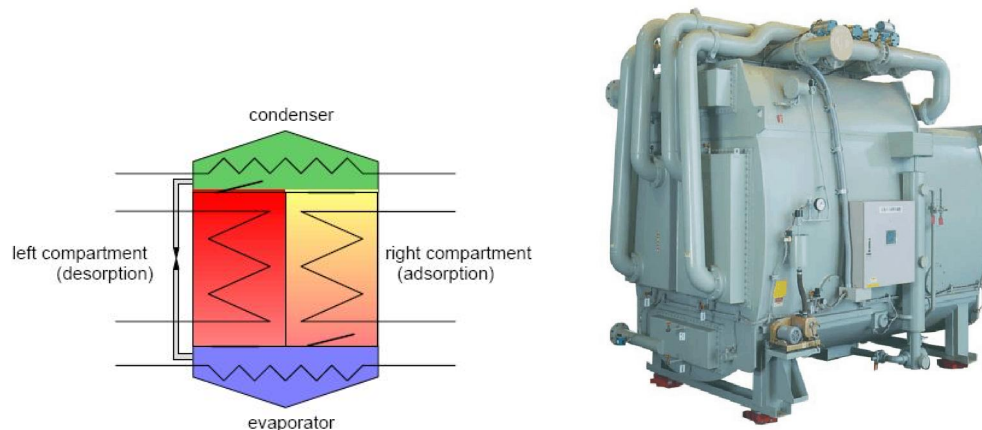
#### 5.2 Aurinkoavusteinen adsorptiojäähdytys

Kuten kuvasta 28 näkee, niin aurinkoavusteinen adsorptiojäähdytys koostuu aivan samoista komponenteista kuin absorptiojäähdytys paitsi, että absorptiojäähdytin on vaihtunut adsorptiojäähdyttimeen.

### 5.2.1 Adsorptiojäähdytin

Adsorptiojäähdyttimessä on muuten täysin samat komponentit kuin absorptiojäähdyttimessä eli lauhdutin (condenser), höyrystin (evaporator), mutta absorptiojäähdytyksestä tuttu imeytin ja keitin ovat vaihtuneet kiinteisiin sorbenttimateriaaleihin (1 ja 2). Sorbenttimateriaalina käytetään korkean huokoisuuden omaavaa kiinteää ainetta. Työaineparina ovat H<sub>2</sub>O/Silikaattigeeli, joka on ainut työainepari, jolla adsorptiojäähdytin on saatavilla. Adsorptiojäähdyttimen kylmäteho tyypillisesti on välillä 50 – 430 kW. [31.]

Tällä hetkellä vain muutama valmistaja valmistaa adsorptiojäähdyttimiä, minkä seurauksena niiden hinnat ovat säilyneet korkeina. [31].

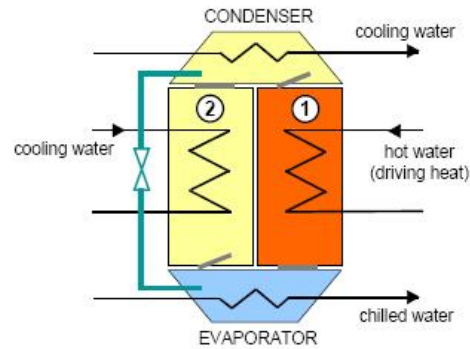


**KUVA 31. Adsorptiojäähdyttimen rakenne ja adsorptiojäähdytin [12; 44]**

### 5.2.2 Adsorptiojäähdytysprosessi

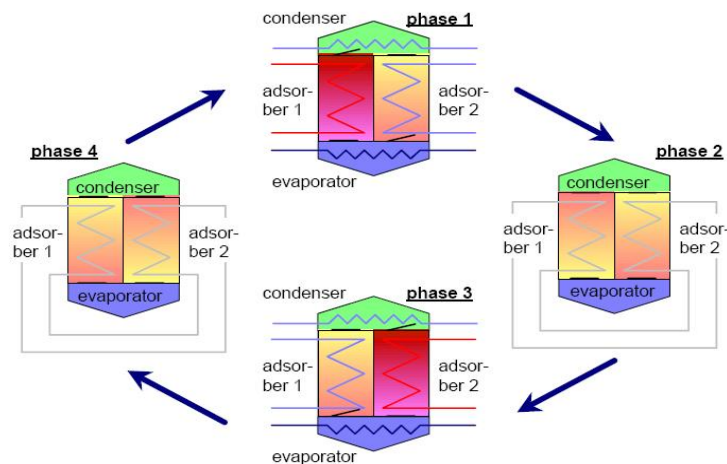
Adsorptiojäähdytysprosessissa kiinteää huokoista materiaalia pitää välillä jäähdyttää ja välillä lämmittää, jotta kylmäainehöyry sitoutuu molekyylivoimien avulla huokoisen aineen sisäosiin. Kuvassa 32 on kuvattu adsorptiojäähdytysprosessin toimintaa. Työparina on kuvassa 32 vesi/silikaatti. Vesi toimii kylmäaineena ja silikaatti kiinteänä aineena. Kiinteä huokoinen materiaali (1) lämmitetään ulkoisella lämmönlähteellä, tässä tapauksessa auringon lämmöllä. Samaan aikaan kiinteä huokoinen materiaali (2) sitoo höyrystimestä tulevan kylmäainehöyryn huokosiinsa. Höyrystimessä höyrystyvä kylmäaine tuottaa tarvittavaa kylmää vettä, jota käytetään jäähdytysverkostossa. Kiinteä huokoinen materiaali (2) tulee jäähdyttää, jotta jatkuva adsorptioprosessi voi toimia. Höyrystynyt kylmäaine kulkeutuu osan (2) kautta lauhduttimel-

le, jossa kylmäaine lauhtuu luovuttaen lauhtumislämpönsä jäähdytysveteen. Tämän jälkeen kylmäaineneste ruiskutetaan takaisin höyrystimelle, josta kierto voi alkaa uudestaan. [12; 31].



**KUVA 32. Adsorptioprosessi [12]**

Adsorptiojäähdytyksen erikoisuutena voidaan mainita, että osat 1 ja 2 vaihtelevat jaksottain, että toinen toimii adsorptio-osana ja toinen toimii desorptio-osana. Täysi kierros on esitetty neljässä vaiheessa kuvassa 31. Kuvassa 31 olevassa adsorptiojäähdytyksessä kestää 7 minuuttia kahden eri osan jaksottaisessa vaihdossa. [31.]



**KUVA 33. Adsorptioprosessin yhden kierron vaiheet [31]**

### 5.2.3 Lämmönlähde

Kiinteän huokoisen materiaalin lämmittämiseen tässä tapauksessa käytetään aurinkokeräimillä tuotettua lämpöä. Aurinkokeräin voi olla tyypiltään tasokeräin tai tyhjiöputkikeräin. On myös mahdollista käyttää muita lämmönlähteitä kuten kaukoläm-

pöä tai teollisuuden jätelämpöä. Lämmönlähteestä riippumatta toimintalämpötilan tulisi olla välillä 60 – 90 °C. [12.]

### 5.3 Absorptiojäähdytyksen ja adsorptiojäähdytyksen suorituskykykerroin

Absorptiojäähdytyksen ja adsorptiojäähdytyksessä suorituskykyä kuvataan COP – kertoimella, joka on eri asia kuin ”perinteisessä” kylmäteknikassa esiintyvä COP – kerroin, joka kertoo käytetyn sähkötehon suhdetta tuotettuun kylmätehoon. Absorptiojäähdytyksessä ja adsorptiojäähdytyksessä COP - kerroin kuvaa tuotetun jäähdytysenergian suhdetta käytettyyn lämpöenergiaan.

$$COP_a = \frac{Q_j}{Q_i} \quad (6)$$

$COP_a$  on absorptio- ja adsorptiojäähdytyksen suorituskykykerroin

$Q_j$  on tuotettu jäähdytysenergia, kWh

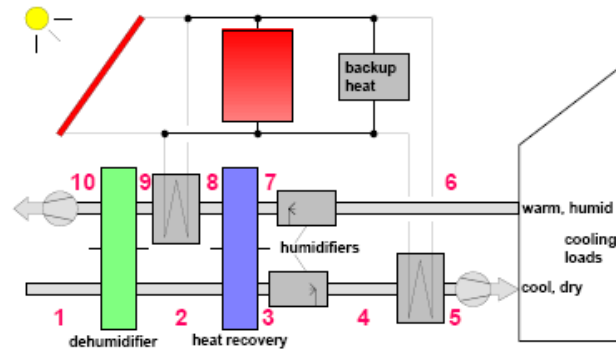
$Q_i$  on käytetty lämmitysenergia, kWh

Tavallisimmin yksivaiheisen absorptiojäähdytyksen COP -kerroin on 0,7. Kaksivaiheisen absorptiojäähdytysprosessin COP –kerroin on välillä 1,0 – 1,2. Adsorptiojäähdytysprosessin COP –kerroin on tyypillisesti 0,61. Adsorptiojäähdytyksen COP-kertoimen vaihteluvälinä on 0,55 – 0,65 riippuen lämpötilaolosuhteista. Absorptiojäähdytyksessä pumput kuluttavat sähköenergiaa noin 1 % verran käytetystä lämmitysenergiasta. Arvioimalla COP –kertoimen 0,7 avulla tuotetun jäähdytysenergian suhdetta käytettyyn lämpöenergiaan voidaan arvioida sähköenergian kulutus. [30; 31; 33.]

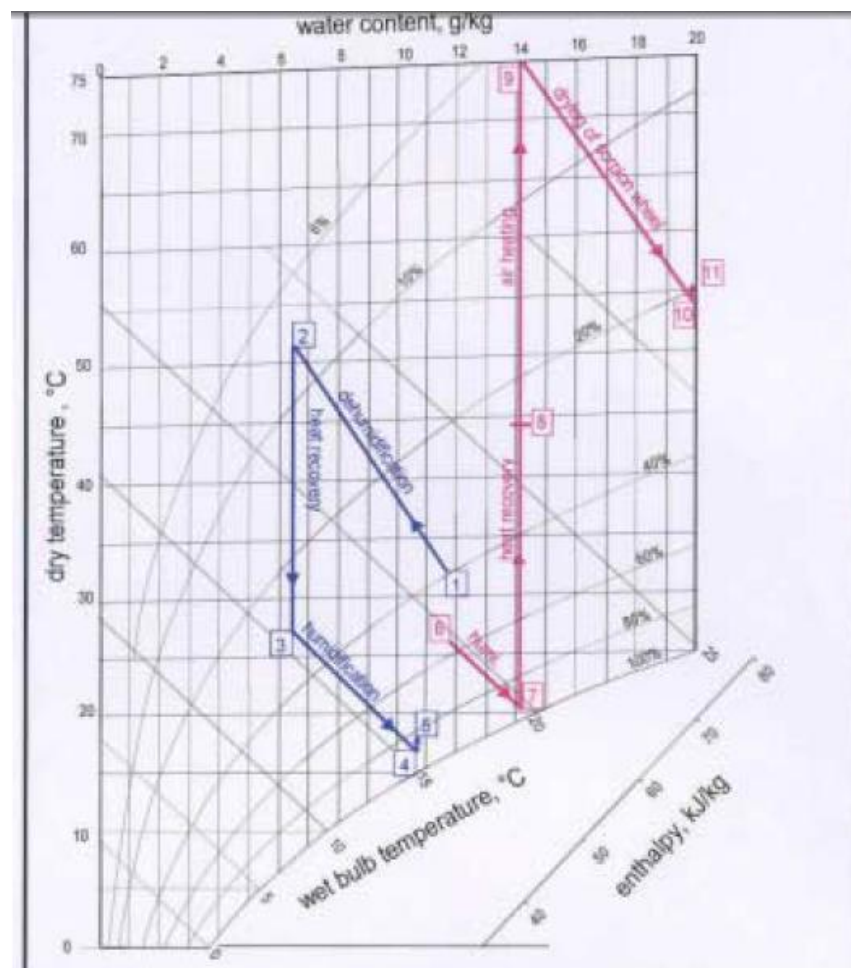
### 5.4 Aurinkoavusteinen kiinteä kuivainjäähdytysjärjestelmä

Pääosat aurinkoavusteiselle kiinteällä kuivainjäähdytysjärjestelmälle on esitetty kuvassa 34. Kuivainjäähdytysjärjestelmää voidaan käyttää talvella lämmitykseen ja kesällä jäähdytykseen. Kuivainjäähdytysjärjestelmien teho on 20 kW -350 kW. [12.]





KUVA 34. Kiinteän kuivainjäähdytysjärjestelmän osat [12]



KUVA 35. Ilman tilan muutosprosessi jäähdytystapauksessa [45]

Ilman käsittelyprosessi kiinteässä kuivainjäähdytyksessä on esitetty kuvassa 35. Jäähdytystapauksessa lämmin ja kostea ilma (1) etenee hitaasti pyörivää kuivainkierroa kohti, jossa se kuivataan sitomalla vesi kuivainkierroon siirtyen tilaan (2). Kuivauksen aikana ilma lämpenee. Lämmennyt ilma johdetaan lämmöntalteenottokieron lävitse, jossa se luovuttaa osan kuivauksessa keränneestä lämmöstä ja ilman tila siirtyy

pisteeseen (3). Tämän jälkeen ilmaa kostutetaan ohjatuilla kostuttimilla haluttuun lämpötilaan (4). [12.]

Poistoilmavirta (6) kostutetaan lähelle kastepistelämpötilaa (7), jotta sen maksimaalinen jäähdytyspotentialiaali voidaan hyödyntää tehokkaasti lämmöntalteenotossa. Poistoilma lämpiää lämmöntalteenottokiekossa tilasta (7) tilaan (8). Poistoilmavirta lämmitetään tilasta (8) tilaan (9), jotta voidaan palauttaa kuivainkierokko veden sitomismiskykyiseksi tuloilmasta. Poistoilmavirta (9) jäähtyy tilaan (10) luovuttaen lämpönsä kuivainkierokolle. [12.]

Lämmönlähteenä käytetään tässä tapauksessa aurinkokeräimiä. Aurinkokeräintyyppistä sopii niin tasokeräin kuin tyhjiöputkikeräin. Toimintalämpötila vaihtelee välillä 45 – 90°C. [12.]

## **5.5 Aurinkoavusteinen nestekuivainjäähdytysjärjestelmä**

Uusin kehitysaskel on aurinkoavusteinen nestekuivainjäähdytys, joka on vasta tulossa markkinoille. Aurinkoavusteiset nestekuivainjäähdytykset käyttävät nestemäistä Vesi/Litiumkloridi-seosta sorptiomateriaalina. Aurinkoavusteisessa nestekuivainjäähdytysjärjestelmässä on muutamia etuja kuten suurempi ilman kuivauskyky samalla toimintalämpötila-alueella kuin aurinkoavusteisessa kuivainkierokkojäähdytyksessä. [12.]

### **5.5.1 Aurinkoavusteisen nestekuivainjäähdytysjärjestelmän osat**

Tyypillisen nestekuivainjäähdytysjärjestelmän osat näkyvät kuvasta 36. Kaksi pääkomponenttia järjestelmässä ovat ilmankuivain (absorbentti) ja liuoksen regeneroija (desorbentti). Edellä mainitut ovat ilma-liuos lämpö- ja massavaihtimia, jotka on normaalisti kasattu torniksi, missä ilma ja liuos kohtaavat vasta- tai ristivirrassa. Järjestelmässä on lisäksi kaksi ilma-liuos –lämmönsiirrintä, liuos –liuos –lämmönsiirrin ja ilma –ilma –lämmönsiirrin.

### 5.5.2 Aurinkoavusteisessa nestekuivainjäähdytysjärjestelmässä tapahtuva prosessi

Aurinkoavusteisen nestekuivainjäähdytysjärjestelmän kaksi pääkomponenttia ovat ilman kuivain (absorber) ja liuoksen regeneroija (desorber). Kuvassa 36 on esitetty periaatekaavio nestekuivainjäähdytysjärjestelmästä ilman lämpöä tuottavaa aurinkolämpöjärjestelmää. [32.]

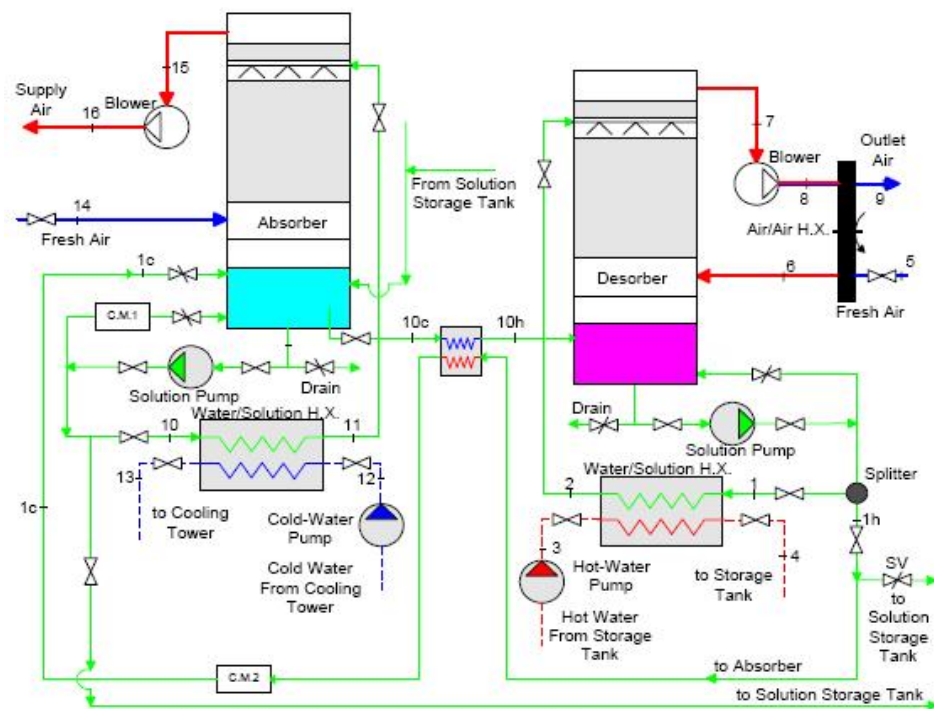


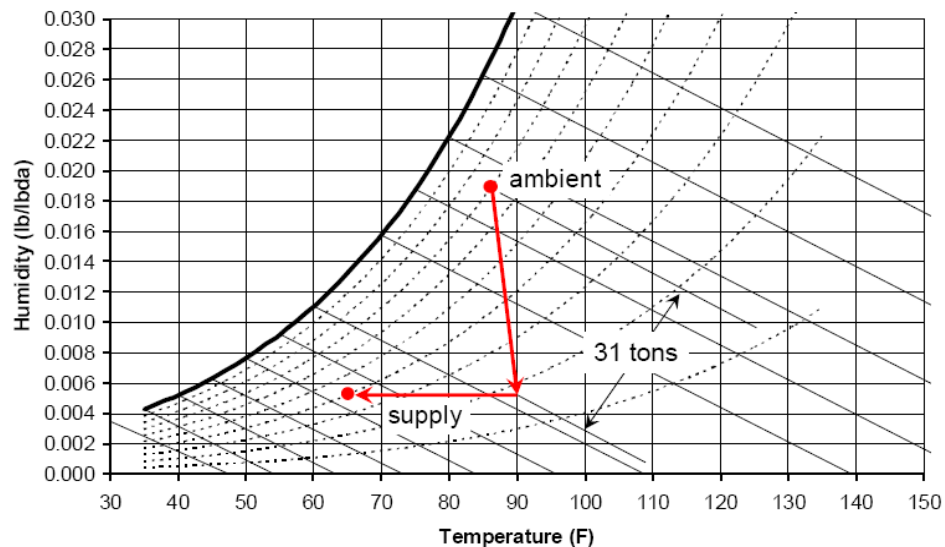
Figure 6.1: Schematic description of the open-cycle liquid desiccant system.

#### KUVA 36. Periaatekaavio nestekuivainjäähdytysjärjestelmästä [32]

Kuivain (absorber) muodostuu kasatusta tornista, joka toimii adiabaattisesti. Ulkoilmavirta (14) siirtyy kuivaintornin pohjalle, jossa ulkoilma joutuu kosketuksiin liuoksen (11) kanssa. Kuivaintornissa vesihöyry poistetaan ulkoilmavirrasta liuokseen. Kuivattu lämmin ilma (15) siirtyy pois kuivaintornista ohittaen puhaltimen ja liikkuen kohti ilmastoitavaa tilaa (16). Puhallin ohjaa ilmavirtaa korottaen hieman sen lämpötilaa. Liuos (10) pumpataan kuivaintornin pohjalta kohti vesi/liuos –lämmönsiirrintä, missä se jäähdytetään vedellä. Vesi/liuos –lämmönsiirrintimen jälkeen liuos (11) siirtyy kuivaintornin huipulle jakelusuuttimille, missä se tippuu alas vastavirtaan ulkoilman kanssa ja se kerääntyy kuivaintornin pohjalla olevaan altaaseen. Ohjattu liuosvirta

(10c) siirtyy kuivaintornin altaasta kohti regeneroijaa. Regeneroijalta palaava liuosvirta menee suoraan kuivaintornin pohjalle.

Regeneroija (desorber) on samanlainen laite kuin kuivain. Myös muut virtausjärjestelmät ja liitetyt komponentit ovat samoja. Liuos lämmitetään neste/neste – lämmönsiirtimessä auringon lämmittämällä vedellä (3->4). Ulkoilma (5) ilma/ilma – lämmönsiirtimessä jäteilmasta (8) saatavalla lämmöllä. Esilämmityksen jälkeen ilma-virta (6) etenee regeneroijaan, missä se uudelleen sekoittuu liuoksen (2) kanssa. Poistoilma (7) jättää regeneroijan ohittaen puhaltimen. Sitten poistoilmalla esilämmitetään ulkoilmaa ilma/ilma –lämmönsiirtimessä, jonka jälkeen poistoilma puhalletaan pihalle. Liuos/liuos –lämmönsiirtimen palvelee heikon liuoksen esilämmitystä, joka on siirtynyt kuivaimelta kohti regeneroijaa (10c -> 10h). Heikko liuos ottaa lämpöä talteen vahvalta liuokselta, joka on siirtymässä regenoijasta takaisin kuivaimeen (1h -> 1c). [32.]



**KUVA 37. Ilman tilan muutos aurinkoavusteisessa nestekuivainjäähdytyksessä ( $H_{amb} = 8.6\text{g/kg}$ ,  $T_{amb} = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $H_{sup} = 2.5\text{g/kg}$ ,  $T_{sup} = 18.3\text{ }^\circ\text{C}$ ) [46]**

### 5.5.3 Lämmönlähde

Regeneroijan lämmönlähteenä tässä tapauksessa käytettiin aurinkokeräimiä. Aurinkokeräintyypeistä sopii niin tasokeräin kuin tyhjiöputkikeräin. Myös muut lämmönlähteet käyvät käyttötarkoitukseen esimerkiksi kaukolämpö tai jätelämpö. Toimintalämpötila vaihtelee välillä 45 – 75 °C. [32 ;12].

## 5.6 Kiinteän ja nestemäisen kuivainjäähdytysjärjestelmän suorituskykykerroin

Suorituskykykerroin määritellään kaavalla 7.

$$COP_k = \frac{\Delta h_a}{Q_h} \quad (7)$$

$COP_k$  on kiinteän ja nestemäisen kuivaimen suorituskykykerroin

$\Delta h_a$  on prosessoitavan ilman entalpian muutos, kJ/kg

$Q_h$  on regeneroijaan syötetty lämpö, kWh

Kuivainjärjestelmissä COP –kerroin riippuu suuresti ulkoilman, tuloilman ja poistoilman olotilasta. [14].

## 5.7 Maailmalla toteutetut aurinkoavusteiset jäähdytysjärjestelmät

Euroopassa on toteutettu jo useita kymmeniä eri aurinkoavusteisia jäähdytysjärjestelmiä, jotka valta osin ovat aurinkoavusteisia absorptiojäähdytyksiä. Muutamia on toteutettu myös kuivainperiaatteella. Pohjoisimmat kohteet löytyvät Saksasta, mutta tarkkaa sijaintia ei artikkeli kerro, joten uskoisin kohteiden löytyvän pääosin Etelä-Saksasta.

**TAULUKKO 4. Esimerkkejä Euroopassa toteutetuista aurinkoavusteisista jäähdytysjärjestelmistä ja niiden jäähdytystehoista  $\phi$  [14]**

Maa	Rakennustyyppi	Rakennusvuosi	Teknologia	Keräintyyppi	Aurinkokeräin kokonaisala (m <sup>2</sup> )	$\phi$ (kW/m <sup>2</sup> )
Saksa	Toimisto	1996	Adsorptio	Tasokeräin	80	0,9
Saksa	Toimisto, LAB	1999	Absorptio	Tyhjiöputki-keräin	300	0,5
Saksa	Toimisto	2003	Kuivain	Tasokeräin	70	1,1
Saksa	Toimisto	2002	Absorptio	Tyhjiökeräin	108	0,5
Kroatia	Toimisto	1979	Absorptio	Tasokeräin	60	0,2
Ranska	Viinitehdas	1991	Absorptio	Tyhjiökeräin	215	0,2
Saksa	Toimisto	2000	Adsorptio	Tasokeräin	2000	0,2

Keskimääräinen aurinkokeräin pinta-ala absorptio, adsorptio ja kuivain teknologialla ASHRAE Journal lehdessä taulukoiduissa kohteissa oli 3.6 m<sup>2</sup>/kW (Jäähdytysteho). Vaihteluväli aurinkokeräinpinta-aloilla vaihteli 0.5 ja 5.6 m<sup>2</sup>/kW (Jäähdytysteho) välillä. Absorptiojäähdytyksen ja adsorptiojäähdytyksen toteutetulla järjestelmällä aurinkokeräin pinta-ala oli enemmän kuin 2 m<sup>2</sup>/kW (Jäähdytysteho) ja vähemmän kuin 5 m<sup>2</sup>/kW (Jäähdytysteho). [14.]

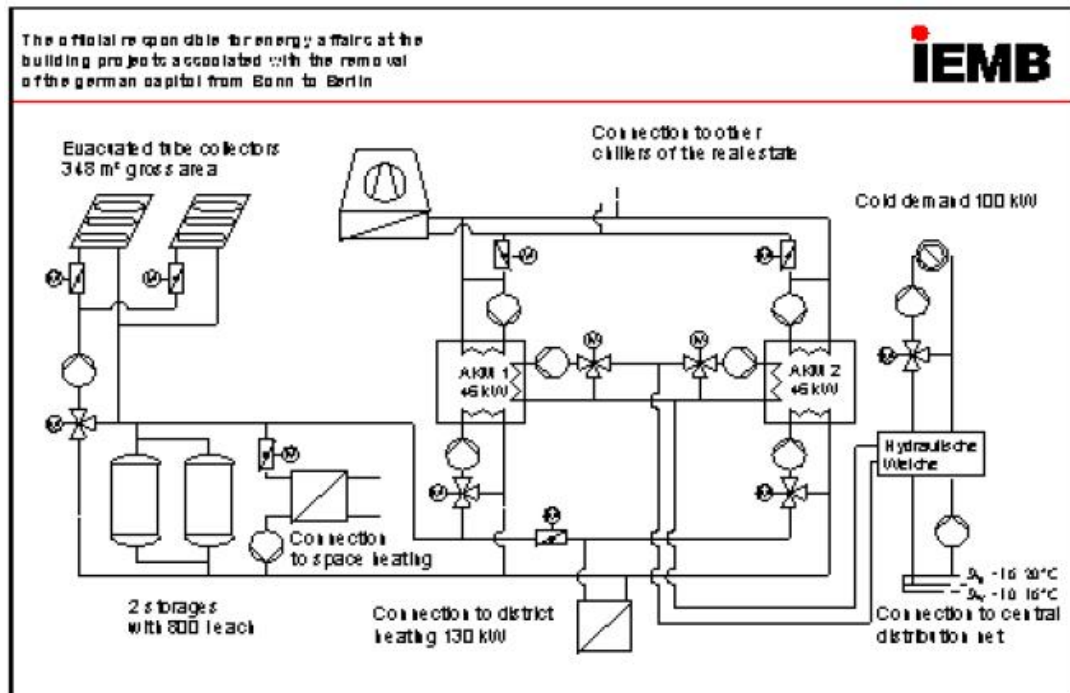
Alkuperäiset kokonaiskustannukset ASHRAE Journal lehdessä taulukoiduissa kohteissa oli 4000 €/kW (asennettu jäähdytysteho). Hinta sisältää kaikki osat kuten putkiston, laitteet ja jäähdytysyksikön jne. [14.]

Saksan Berliinissä olevaan toimistorakennukseen on asennettu aurinkoavusteisella absorptiojäähdytyksellä toimiva jäähdytyslaitos. Se on osa EU:n rahoittama SACE –projektiä, jonka tarkoituksena on edistää aurinkoavusteisten jäähdytyslaitteiden käyttöä ja kehitystä. Laitos on ollut toiminnassa vuodesta 2000 lähtien. [25.]

Kohteen jäähdytystehontarve on 100 kW. Jäähdytystehontarve on katettu käyttämällä 2 absorptiojäähdytintä, jotka ovat teholtaan 44 kW. Absorptiojäähdyttimessä käytettiin

työaineparina H<sub>2</sub>O-LiBr -liuosta. Suunnittelussa ulko-olosuhteissa käytettiin kesätilanteessa 32°C/40% ja talvitilanteessa -14°C/80%. Sisäolosuhteissa käytettiin kesätilanteessa <26°C/vapaa ja talvitilanteessa 20°C/vapaa. Jäähdytyspatterin meno- ja paluuvien lämpötilana käytettiin normaalia korkeampia lämpötiloja eli meno- ja paluuvien lämpötila 10°C/16°C. [25.]

Käyttölämmönlähteenä käytetään 348 m<sup>2</sup> kattavaa aurinkokeräinalaa. Aurinkokeräimet ovat tyypiltään tyhjiöputkikeräimiä. Varakäyttölämmönlähteenä käytetään kaukolämpöä, jonka teho on 120 kW. Ensisijaisesti käytetään aurinkokeräimillä tuotettua lämpöä, mutta kun auringosta ei ole tarpeeksi lämpöä saatavilla käytetään kaukolämpöä. [25.]



**KUVA 38. Rakennekaavio Berliinin toimistorakennuksen absorptiojäähdytyslaitteistosta [25]**

## 6 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄT KASARMIN KAMPUKSELLE

### 6.1 Eri paneelityypeillä saatava kuukausittainen sähköenergia Kasarmin Kampuksella

Vuotuista eri paneelityypeiltä saatavaa sähköenergiaa neliötä kohden arvioidaan kuvassa 11 esitetyillä paneeleilla. Paneelien hyötysuhteeksi standardiolosuhteissa on oletettu yksikiteiselle piipaneelille 16 %, monikiteiselle 13 % ja ohutkalvotekniikalla toteutetulle 10,5 % (CdTe) tai 8 % (Si/ $\mu$ -Si).

Lämpötilakertoimena huipputeholle  $P_{\max}$  yksikiteiselle piipaneelille on käytetty arvoa  $-0,0048$  /K, monikiteisellä piipaneelilla arvoa  $-0,0047$  /K ja ohutkalvotekniikalla toteutetulle paneelille arvoa  $-0,003$  /K. Lämpötilakertoimet on otettu aurinkopaneeli valmistajien teknisistä tiedoista ja ne kuvaavat paneelityypille ominaista arvoa. Ympäristön keskimääräinen lämpötila päivällä on otettu lähteestä 2 saatavista auringonsäteilytiedoista. Kuukausikohtainen hyötysuhde on laskettu kaavalla 4.



**TAULUKKO 5. Erityyppisten paneelien kuukausikohtainen hyötysuhde ja kuukauden keskimääräinen lämpötila  $T_{up}$  päivällä**

Kuukausi	$T_{up}$ (°C)	Yksikiteinen pii (Mono- Si) (%)	Monikiteinen pii (Poly-Si) (%)	Ohutkalvo (CdTe) (%)	Ohutkalvo (a-Si/ $\mu$ - Si) (%)
$k_2$ (%/K)		-0,48	-0,47	-0,3	-0,3
Tammikuu	-6,4	17	13,8	10,6	8,1
Helmikuu	-7,0	17	13,8	10,6	8,1
Maaliskuu	-3,2	16,8	13,6	10,5	8,0
Huhtikuu	3,9	16,3	13,2	10,3	7,9
Toukokuu	10,4	15,8	12,9	10,1	7,7
Kesäkuu	16,3	15,4	12,5	10,0	7,6
Heinäkuu	19,3	15,2	12,3	10,0	7,5
Elokuu	13,1	15,6	12,7	10,1	7,7
Syyskuu	11,9	15,7	12,8	10,1	7,7
Lokakuu	3,5	16,3	13,2	10,3	7,9
Marraskuu	-0,3	16,6	13,5	10,4	8,0
Joulukuu	-5,0	16,9	13,7	10,6	8,1

Taulukosta 5 näkee, että mitä kylmempi ympäristön lämpötila on, sitä paremmalla hyötysuhteella eri tyyppien paneelit toimivat. Taulukosta 3 näkee myös, että yksikiteinen piipaneeli on hyötysuhteeltaan muita parempi, eritoten ohutkalvotekniikalla toteutettua a-Si/ $\mu$ -Si-paneeliin verrattuna.

Taulukoissa 6-9 on esitetty erityyppisten paneelien kuukausitasolla tuottama sähköenergia neliötä kohti edellä laskettujen hyötysuhteiden avulla, kahdella eri kallistuskulmalla (45 ° ja 90°) sekä kahdella eri suuntauksella (etelä ja atsimuuttikulma -20°). Atsimuuttikulmalla tarkoitetaan horisontaalisessa suunnassa poikkeamaa etelästä. Etelän atsimuuttikulma on 0°, lännen 90° ja idän -90°. Suuntausta atsimuuttikulma -20° käytetään, koska A-, CDEX- ja M-rakennuksen etelänpuoleinen julkisivu on kohdittuoraan kaakkoon. A-, CDEX- ja M-rakennuksien katot ovat tasakattoja, jolloin paneelit on helppo suunnata kohti etelää tai atsimuuttikulmaan -20°.

**TAULUKKO 6. Aurinkopaneelien kuukausikohtainen sähköenergian tuotto ne-  
liötä kohti kallistuskulmalla 45° ja suuntauksella etelä**

Kuukausi	Mono-Si (kWh/m <sup>2</sup> )	Poly-Si (kWh/m <sup>2</sup> )	CdTe (kWh/m <sup>2</sup> )	a-Si/μ-Si (kWh/m <sup>2</sup> )
Tammikuu	3,2	2,6	2,0	1,5
Helmikuu	9,3	7,6	5,8	4,5
Maaliskuu	15,7	12,7	9,8	7,5
Huhtikuu	22,7	18,4	14,4	11,0
Toukokuu	26,9	22,0	17,2	13,1
Kesäkuu	24,4	19,8	15,9	12,1
Heinäkuu	25,3	20,4	16,6	12,5
Elokuu	19,4	15,8	12,6	9,6
Syyskuu	12,4	10,1	8,0	6,1
Lokakuu	7,2	5,9	4,6	3,5
Marraskuu	2,4	2,0	1,5	1,2
Joulukuu	1,6	1,3	1,0	0,8
Vuosi	170,5	138,6	109,4	83,4

**TAULUKKO 7. Aurinkopaneelien kuukausikohtainen sähköenergian tuotto ne-  
liötä kohti kallistuskulmalla 90° ja suuntauksella etelä**

Kuukausi	Mono-Si (kWh/m <sup>2</sup> )	Poly-Si (kWh/m <sup>2</sup> )	CdTe (kWh/m <sup>2</sup> )	a-Si/μ-Si (kWh/m <sup>2</sup> )
Tammikuu	3,6	2,9	2,3	1,7
Helmikuu	10,0	8,2	6,3	4,8
Maaliskuu	14,2	11,5	8,9	6,8
Huhtikuu	17,3	14,0	10,9	8,4
Toukokuu	17,5	14,3	11,2	8,6
Kesäkuu	14,8	12,0	9,6	7,3
Heinäkuu	15,9	12,9	10,5	7,9
Elokuu	13,7	11,1	8,9	6,8
Syyskuu	10,3	8,4	6,6	5,0
Lokakuu	6,6	5,6	4,3	3,3
Marraskuu	2,5	2,0	1,6	1,2
Joulukuu	1,8	1,5	1,2	0,9
Vuosi	128,2	104,4	82,3	62,7

**TAULUKKO 8. Aurinkopaneelien kuukausikohtainen sähköenergian tuotto ne-  
liötä kohti kallistuskulmalla 45° ja suuntauksena atsimuuttikulma -20°**

Kuukausi	Mono-Si (kWh/m <sup>2</sup> )	Poly-Si (kWh/m <sup>2</sup> )	CdTe (kWh/m <sup>2</sup> )	a-Si/μ-Si (kWh/m <sup>2</sup> )
Tammikuu	3,0	2,4	1,9	1,4
Helmikuu	9,0	7,3	5,6	4,3
Maaliskuu	15,2	12,3	9,5	7,3
Huhtikuu	22,5	18,2	14,2	10,9
Toukokuu	26,9	21,9	17,2	13,1
Kesäkuu	24,3	19,8	15,8	12,0
Heinäkuu	25,2	20,4	16,6	12,5
Elokuu	19,3	15,8	12,5	9,6
Syyskuu	12,2	10,0	7,9	6,0
Lokakuu	7,0	5,7	4,4	3,4
Marraskuu	2,3	1,9	1,5	1,1
Joulukuu	1,5	1,2	1,0	0,7
Vuosi	168,4	136,9	108,1	82,3

**TAULUKKO 9. Aurinkopaneelien kuukausikohtainen sähköenergian tuotto ne-  
liötä kohti kallistuskulmalla 90° ja suuntauksena atsimuuttikulma -20°**

Kuukausi	Mono-Si (kWh/m <sup>2</sup> )	Poly-Si (kWh/m <sup>2</sup> )	CdTe (kWh/m <sup>2</sup> )	a-Si/μ-Si (kWh/m <sup>2</sup> )
Tammikuu	3,4	2,8	2,1	1,6
Helmikuu	9,5	7,7	5,9	4,5
Maaliskuu	13,6	11,0	8,5	6,5
Huhtikuu	17,3	14,0	10,9	8,4
Toukokuu	17,9	14,6	11,4	8,7
Kesäkuu	15,1	12,3	9,8	7,5
Heinäkuu	16,1	13,0	10,6	8,0
Elokuu	13,7	11,1	8,7	6,8
Syyskuu	9,9	8,1	6,4	4,9
Lokakuu	6,6	5,3	4,2	3,2
Marraskuu	2,4	1,9	1,5	1,2
Joulukuu	1,7	1,4	1,1	0,8
Vuosi	127,2	103,2	81,1	62,1

Kuten taulukoista 6-9 huomaa, niin aurinkosähköenergian tuoton kannalta ei ole kovinkaan isoa merkitystä, onko paneelit suunnattu suoraan etelään vai atsimuuttikulma -20°. Tietenkin suurilla aurinkopaneelipinta-aloilla suuntauksella saavutetaan usean tuhannen kilowattitunnin ero, mikä on jo merkittävä.

## 6.2 C- ja E-rakennukseen rakennettava aurinkosähköjärjestelmä

C- ja E-rakennuksen kattoprofiilit ovat samanlaiset eli tällä hetkellä ne ovat harjakattoisia, joiden harjalinjan suuntaus on epäedullinen aurinkoenergian hyödyntämisen kannalta. Tulevaisuuden suunnitelmissa on tarkoitus muuttaa C- ja E-rakennusten kattoprofiilit harjakatoista tasakatoiksi. Samassa toimenpiteessä olisi mahdollista rakentaa aurinkosähköjärjestelmä rakennusten katoille.

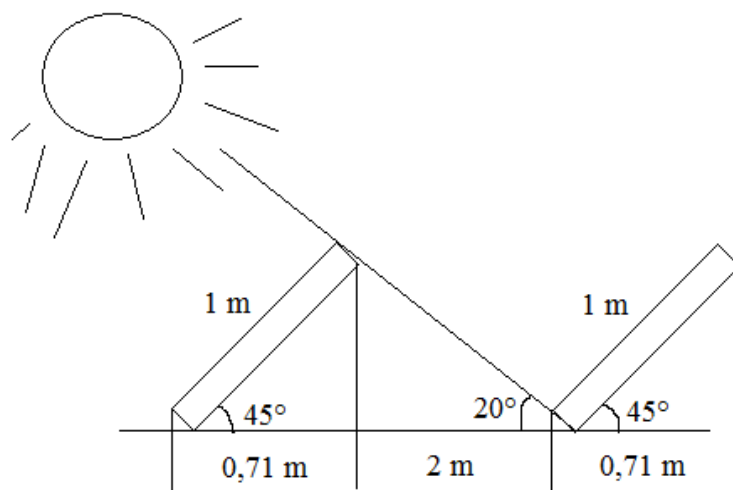
### 6.2.1 C –ja E-rakennuksen mahdollinen aurinkosähköjärjestelmä

C- ja E-rakennus ovat pituudeltaan 38 metriä ja leveydeltään 20 metriä. Tällä hetkellä molemmissa rakennuksissa on harjakatto, jonka suuntaukset ovat epäedulliset aurinkosähköjärjestelmää ajatellen. Muutettaessa C- ja E-rakennuksien katot tasakatoiksi olisi mahdollista käyttää suurinta osaa tasakaton pinta-alasta aurinkosähköjärjestelmän alustana.

Asettaessa aurinkopaneelit  $45^\circ$  tarvitsee  $1 \text{ m}^2$  aurinkopaneelia kattopinta-alaa noin  $0,71 \text{ m}^2$  kattopinta-alaa. Tällöin aina kun auringon korkeusasema on yli  $20^\circ$ , saa jokainen paneelirivistö vielä suoraa säteilyä. Kun auringon korkeusasema on matalammalla kuin  $20^\circ$ , saa ensimmäinen paneelirivistö suoraa auringon säteilyä, mutta ensimmäisen paneelirivistön takana olevat paneelit saavat vain osittain suoraa auringon säteilyä ja vain osittain hajasäteilyä.

### 6.2.2 C –ja E-rakennuksen aurinkosähköpaneeliston pinta-ala

Valitaan paneelirivistöjen etäisyys siten, että auringon korkeuskulman ollessa yli  $20^\circ$  jokainen paneelirivistö saa täydeltä terältä suoraa auringon säteilyä. Aurinkopaneelien asennuskulmaksi valitaan  $45^\circ$  ja atsimuuttikulmaksi on  $-20^\circ$ . Tällöin paneelirivistöjen väliseksi etäisyydeksi tulee 2 metriä (kuva 39).



**KUVA 39.** Aurinkopaneeliston etäisyyden määrittäminen, kun auringon säteilykulma on  $20^\circ$

Aurinkopaneeliston pinta-alaa määritettäessä varataan huoltotilaa päädyissä 1,5 metriä ja katon toiselta laidalta 1,5 metriä, jolloin yhden paneelirivin leveydeksi tulee 18,5 metriä. Aurinkosähköpaneelistot ovat melko huoltovapaita invertteriä lukuunottamatta. Aurinkosähköpaneelien huolto on lähinnä lumen poistamista niiden päältä. C- ja E-rakennuksen katoille mahtuu molempiin yhteensä noin 13 riviä aurinkosähköpaneeleita, kun yhdessä rivissä on 18,5 m<sup>2</sup> saadaan C- ja E-rakennuksien katoille kokonaispinta-alaksi 481 m<sup>2</sup> eli 240,5 m<sup>2</sup>/rakennuksen katto.

### 6.2.3 C –ja E-rakennuksen aurinkosähköjärjestelmän energiantuotto

C –ja E-rakennukselle aurinkosähköjärjestelmän energiantuotto kuukausitasolla saadaan taulukossa 8 lasketusta yksikiteisen piin aurinkosähkötuotosta käyttämällä kuukausikohtaisena aurinkosähköjärjestelmän hyötysuhteena 90 %. Aurinkosähköjärjestelmän hyötysuhteeseen sisältyy invertteri- ja kaapelihäviöt kaavassa 8.

$$Q_s = Q_k \times A_{pto} \times \eta_j \quad (8)$$

$Q_s$  on sähköenergian kuukausituotto, kWh

$Q_k$  on sähköenergian kuukausituotto yksikiteisellä piipaneelilla, kWh/m<sup>2</sup>

$A_{pto}$  on aurinkopaneeliston pinta-ala, m<sup>2</sup>

$\eta_j$  on aurinkosähköjärjestelmän hyötysuhde, -

**TAULUKKO 9. C- ja E-rakennuksen aurinkopaneeliston kuukausikohtainen sähköenergian tuotto kallistuskulmalla 45° ja suuntauksena atsimuuttikulma - 20°**

Kuukausi	C- rakennuksen aurinkopaneeliston tuottoarvio (kWh)	E- rakennuksen aurinkopaneeliston tuottoarvio (kWh)	C-D-E –rakennuksen sähkön kulutus vuonna 2009 (kWh)
Tammikuu	649	649	74 276
Helmikuu	1948	1948	72 118
Maaliskuu	3290	3290	89 248
Huhtikuu	4870	4870	79 086
Toukokuu	5823	5823	48 322
Kesäkuu	5260	5260	35 192
Heinäkuu	5455	5455	40 350
Elokuu	4178	4178	58 116
Syyskuu	2641	2641	73 476
Lokakuu	1515	1515	73 806
Marraskuu	498	498	91 918
Joulukuu	325	325	73 443
Vuosi	36452	36452	809 352

C – ja E –rakennuksiin on ajateltu tehtävän 240,5 m<sup>2</sup> aurinkopaneelikentät, joiden yhteistuottoarvio vuodessa olisi 72 904 kWh. Edellä mainittu tuottoarvio ei ota huomioon, että osa paneeleista saa osan aika vuotta vain hajasäteilyä, joka tiputtaa vain hajasäteilyä saavien paneelien sähkötehon tuoton puoleen. 72 904 kWh vastaa C-D-E –rakennuksen vuosittaisesta sähköenergian kulutuksesta noin 9 %.

#### **6.2.4 C- ja E -rakennuksen aurinkopaneeliston kannattavuuslaskelma**

C– ja E- rakennuksen suunniteltu aurinkopaneelistolle taloudelliseksi elinajaksi valmistaa 25 vuotta. Aurinkopaneelivalmistajat lupaavat, että ensimmäiset 10 vuotta paneelit toimivat täydellä teholla, seuraavat 10 vuotta paneelit toimivat 90 % teholla ja viimeiset 5 vuotta paneelit toimivat 85 % teholla. Tällöin aurinkopaneelisto tuottaa sähköenergiaa elinkaarensa aikana yhteensä 851 392 kWh.



Vuonna 2010 asennettujen aurinkosähköjärjestelmien investointikustannukset olivat keskimäärin 5700 €/kW [36.] C- ja E- rakennukseen suunniteltavan aurinkosähköjärjestelmän yhteispinta-ala on 481 m<sup>2</sup>. Aurinkosähköjärjestelmän huipputeho lasketaan huipputehokerroin kerrottuna aurinkopaneeliston pinta-alalla. Huipputehokertoimena käytetään 0,15 kW/m<sup>2</sup>, joka vastaa nykypäivänä normaalia yksikiteisellä piillä toteutettua aurinkosähköpaneelia. Huipputehoksi tulisi molemmille erillisille aurinkosähköjärjestelmille 36 kW, joten yhteishuipputeho olisi 72 kW. Aurinkosähköjärjestelmän investointikustannukseksi tulisi yhteensä 414 000 € eli 207 000 €/aurinkosähköjärjestelmä.

Tämän hetkinen sähkön hinta on Mikkelin Ammattikorkeakoululle poikkeuksellisen edullinen eli 9,6 senttiä/kWh. Sähkön hinta sisältää myös siirron Sähköenergian hinnan oletetaan nousevan vuodessa 2 %, 4 %, 6 % ja 8 %. Sähköenergian hinnan nousu lasketaan 25 vuoden tarkastelujaksolle

Kannattavuuslaskelma tehdään annuiteettimenetelmällä, jossa investointikustannukset jaetaan tasaeriksi aurinkosähköjärjestelmän pitoajalle ja tässä tapauksessa 25 vuoden ajanjaksolle. Annuiteettitekijä lasketaan seuraavalla kaavalla 9. [37.]

$$C_{\frac{n}{i}} = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (9)$$

$C_{n/i}$  on annuiteettitekijä

$i$  on korkotaso

$n$  on vuosi

Korkotasoksi laskuissa oletetaan kolme eri arvoa eli 6 %, 4 % ja 2 %. Annuiteettitekijäksi 6 % saadaan 0,078; 4 % saadaan 0,064 ja 2 % saadaan 0,051. Vuotuiseksi investointikustannukseksi P saadaan 6 % 32 292 €, 4 % 26 496 € ja 2 % 21 114 €

Investointi on kannattava, jos vuotuinen nettotuotto on suurempi kuin investointikustannusten annuiteetti. Kannattavuus lasketaan kaavalla 10. [37.]

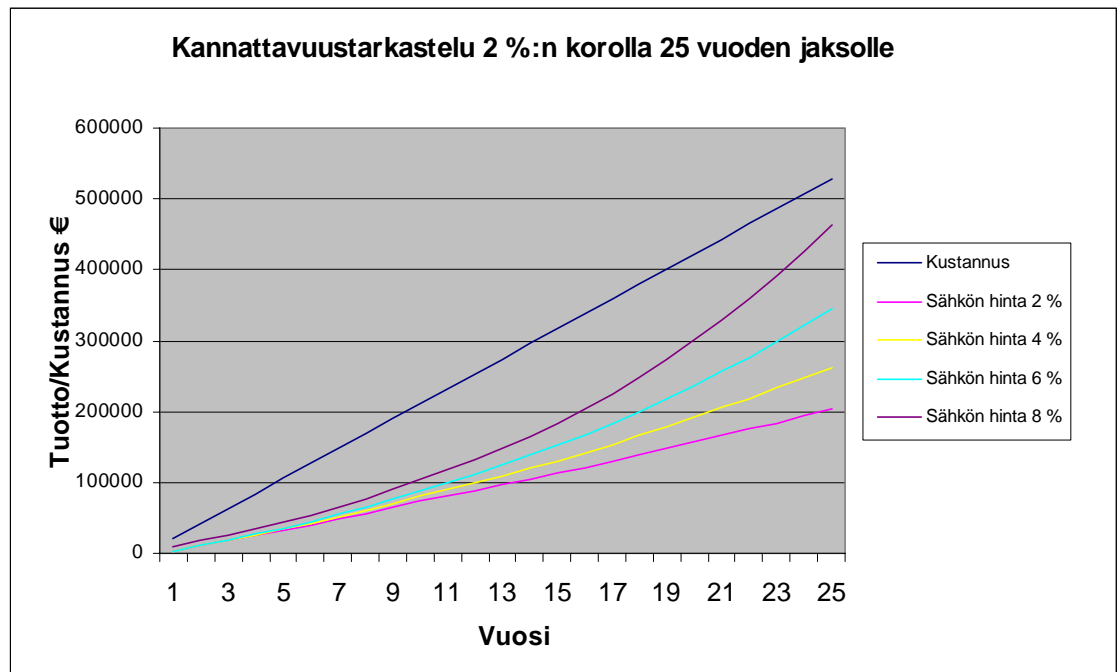
$$K - \frac{c_n}{i} \times P > 0 \quad (10)$$

K vuotuinen nettotuotto, €

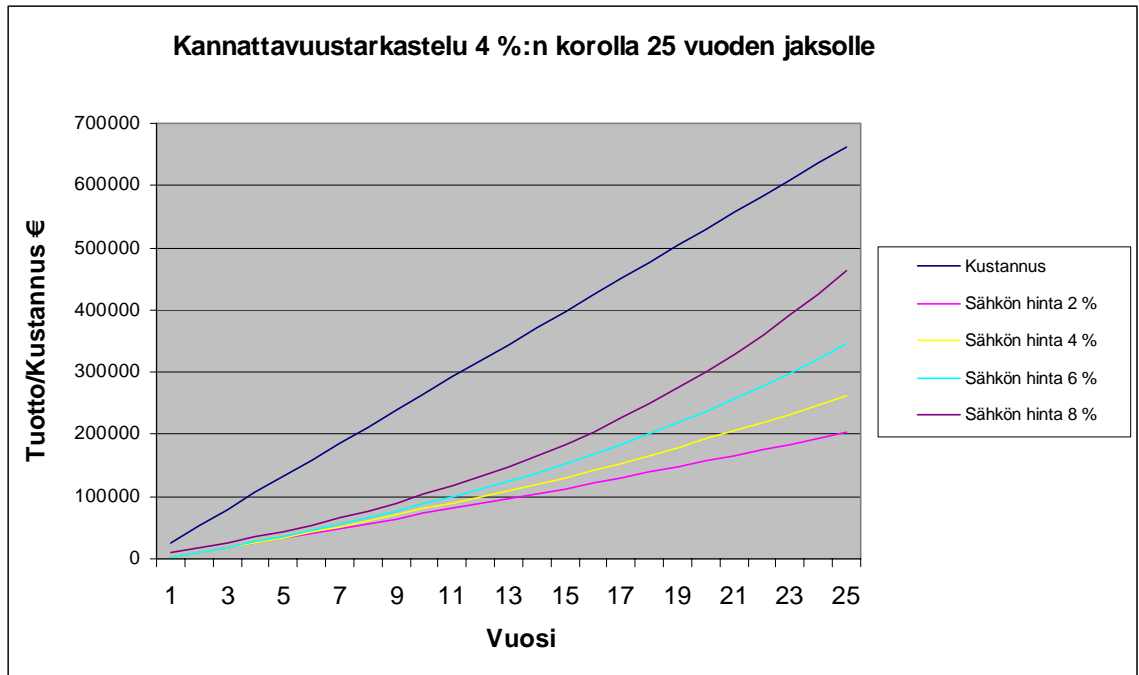
$c_{n/i}$  annuiteettitekijä

P vuotuinen investointikustannus, €

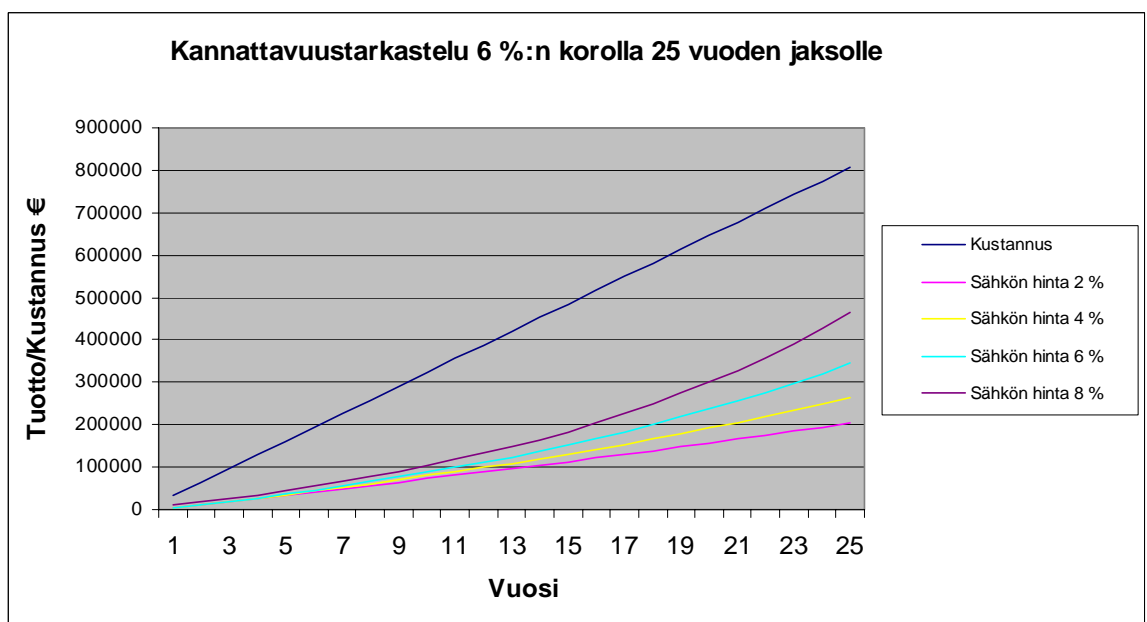
Seuraavaksi on kuvissa 40 - 42 esitetty graafeina kannattavuuslaskelmat 25 vuoden tarkastelujaksolle, jossa on käytetty edellä mainittuja korkotasoja sekä sähkön vuotuista hinnan nousua. Mikäli aurinkolämpöjärjestelmän vuotuinen tuotto jollakin sähköenergian hinnan nousulla ylittää investointikustannukset osoittavan viivan niin sen jälkeiseltä osalta aurinkosähköjärjestelmä on edullisempi kuin verkosta ostettu sähkö.



**KUVA 40. Investointikustannus 2 %:n laskentakorolla vertailu sähköntuottoon eri sähkön vuotuisilla hinnan nousuilla**



**KUVA 41. Investointikustannus 4 %:n laskentakorolla vertailu sähköntuottoon eri sähkön vuotuisilla hinnan nousuilla**



**KUVA 42. Investointikustannus 6 %:n laskentakorolla vertailu sähköntuottoon eri sähkön vuotuisilla hinnan nousuilla**

Kuvista 40 – 42 voi nähdä, että aurinkosähköjärjestelmän rakentamisella C- ja E-rakennuksen katoille ei saa säästöjä aikaan, koska investointikustannus on huomatta-

van paljon suurempi kuin aurinkosähköjärjestelmä pystyy vuositasolla tuottamaan riippumatta eri sähkön hinnan nousuilla.

## 7 AURINKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄT KASARMIN KAMPUKSELLE

### 7.1 Nykytilanne

Rakennuksien A-, CDE- ja M käyttö vähenee kesäksi merkittävästi, koska lukukaudet loppuvat ja oppilaat lähtevät kesätöihin tai kuka mihinkin. B- ja T –rakennus sen sijaan toimivat normaalisti koko kesän, koska ruokailijoita riittää jonkin verran myös kesän aikana. Tässä työssä tarkastellaan aurinkolämpöjärjestelmäratkaisua vain B-rakennuksen osalta. Aurinkolämpöjärjestelmällä on tarkoitus lämmittää vain lämmintä käyttövettä, koska lämmintä käyttövettä tarvitaan myös kesäisin, jolloin aurinkolämpöjärjestelmä ajaa erinomaisesti asiansa.

### 7.2 Kynnysintensiteetti

Kynnysintensiteetillä tarkoitetaan sitä auringonsäteilyintensiteetin tasoa, jolla aurinkokeräimen häviöt ovat yhtä suuret kuin auringonsäteilyintensiteetti vaadittavassa nesteen lämpötilassa. Kun keräimeen tuleva auringonintensiteetti ylittää kynnysintensiteetin, tuottaa keräin lämpöä. Kynnysintensiteetti lasketaan kaavalla 11. [34.]

$$G_{th} = \frac{U_l \times (T_{f,i} - T_u)}{(\tau\alpha)} \quad (11)$$

$G_{th}$	on kynnysintensiteetti, $W/m^2$
$U_l$	on keräinkohtainen k-arvo, $W/m^2 \cdot K$
$T_{f,i}$	on nesteen meno- ja paluuveden keskilämpötila, $^{\circ}C$
$T_u$	on ulkoilman keskilämpötila, $^{\circ}C$
$\tau\alpha$	on efektiivinen absorptiokerroin (transmissio – absorptio-tulo)

**TAULUKKO 10. Erityyppisten aurinkokeräinten ominaistietoja [34]**

Keräintyyppi	$U_1$ (W/m <sup>2</sup> *K)	$\tau\alpha$	$F_r$
Yksinkertainen tasokeräin	7-15	0.85-0.9	0.7-1 0.8.1
1-lasinen selektiivinen tai 2-lasinen tavallinen tasokeräin	3-6	0.7-0.85	0.8-1 0.9-1
2-lasinen selektiivinen tai tyhjiöputkikeräin	1-3	0.5-0.75	0.8-1

Kynnysintensiteetin laskennassa menoveden ja paluueden keskilämpötilana käytetään 30 °C. 1-lasiselektiiviselle tai 2-lasiselektiiviselle tavalliselle tasokeräimelle laskennassa on käytetty arvoja  $U_1 = 4,5$  ja  $\tau\alpha = 0,75$  ja 2-lasiselektiiviselle tai tyhjiöputkikeräimelle  $U_1 = 1,5$  ja  $\tau\alpha = 0,65$ .

**TAULUKKO 11. Keskimääräinen kynnysintensiteetti erityyppisille aurinkokeräimille kuukausitasolla**

Kuukausi	$T_u$ (°C)	$G_{\text{thtak}}$ (W/m <sup>2</sup> )	$G_{\text{thtyh}}$ (W/m <sup>2</sup> )
Tammikuu	-6,6	220	84
Helmikuu	-7,4	224	86
Maaliskuu	-4,1	205	79
Huhtikuu	2,6	164	63
Toukokuu	8,7	129	49
Kesäkuu	14,7	92	35
Heinäkuu	17,7	74	28
Elokuu	16,1	83	32
Syyskuu	10,9	115	44
Lokakuu	5,1	149	57
Marraskuu	-0,6	184	71
Joulukuu	-5,2	211	81

Kynnysintensiteetti kertoo minkä auringon intensiteettitason jälkeen saadaan lämpöenergiaa hyödyksi. Aurinkolämpökeräimen tuotot on laskettu vain 2-lasiselle selektiiviselle tasokeräimelle tai tyhjiöputkikeräimelle, koska kynnysintensiteetti niillä on muita matalampi.

### **7.3 Arvioitu aurinkolämpökeräimen tuottama lämpöenergia Kasarmin Kampuksella**

Aurinkokeräimien lämpöenergian tuotto lasketaan HWB-kaavalla eli esityksessä kaavalla 12. HWB-kaavan avulla laskettu keräimen energiantuotto perustuu, että pinnalle absorboituneesta energiasta vähennetään keräimelle ominaiset lämpöhäviöt. Haluttuna nesteen lämpötilana käytetään 30 °C, kuten kynnysintensiteetin laskennassa. [34.]

$$Q_k = [A_c \times F_r \times [(G_k \times \tau \alpha) - [U_l] (T_{f,i} - T_u)]] \times t \times d \quad (12)$$

$Q_k$	on keräimen energian tuotto, Wh
$A_c$	on keräimen aktiivinen pinta-ala, m <sup>2</sup>
$F_r$	on lämmönsiirtymiskerroin
$G_k$	on keskimääräinen auringonsäteilyintensiteetti keräintasossa, W/m <sup>2</sup>
$\tau \alpha$	on transmissio – absorptiokerroin
$U_l$	on keräimen k-arvo, W/m <sup>2</sup> *°C
$T_{f,i}$	on nesteen meno- ja paluuveden keskilämpötila, °C
$T_u$	on ulkoilman lämpötila, °C
$t$	on auringon säteilyintensiteetin keskimääräinen esiintymisaika/d, h
$d$	on päivien lukumäärä kuukaudessa

Lämmönsiirtymiskertoimen  $F_r$  käytetään laskennassa arvoa 0,8. Aurinkokeräimen kallistuskulmaksi on valittu 90° ja 45°, jotta voidaan vertailla tuottoja eri kallistuskulmalla. Suuntaukseksi on valittu atsimuuttikulma -20°, koska B-rakennuksen kabinetti-osan harjan suunta on sama. Kallistuskulmalla 90° aurinkokeräimet sijoitetaan harjalle ja kallistuskulmalla 45° aurinkokeräimet sijoitetaan katon harjan ja räystäään väliin.

**TAULUKKO 12. Kuukausittain saatava lämpöenergia kahdesta eri aurinkoke-  
räintyytystä kallistuskulmalla 90° ja suuntauksella atsimuuttikulma -20**

Kuukausi	$T_u$ (°C)	t (h)	$G_{\text{thtyh}}$ (W/m <sup>2</sup> )	$G_k$ (W/m <sup>2</sup> )	$Q_k$ (kWh/m <sup>2</sup> )
Tammikuu	-6,6	5,5	84	112	2
Helmikuu	-7,4	8,0	86	276	22
Maaliskuu	-4,1	11,0	79	299	39
Huhtikuu	2,6	14,0	63	349	62
Toukokuu	8,7	16,5	49	330	75
Kesäkuu	14,7	18,5	35	287	73
Heinäkuu	17,7	17,5	28	302	77
Elokuu	16,1	15,0	32	269	57
Syyskuu	10,9	12,0	44	233	35
Lokakuu	5,1	9,5	57	180	19
Marraskuu	-0,6	6,5	71	74	0
Joulukuu	-5,2	4,5	81	70	0
Vuosi	-	-	-	Yhteensä	461



**TAULUKKO 13. Kuukausittain saatava lämpöenergia kahdesta eri aurinkoke-  
räintyyteistä kallistuskulmalla 45° ja suuntauksella atsimuuttikulma -20**

Kuukausi	$T_u$ (°C)	t (h)	$G_{\text{thtyh}}$ (W/m <sup>2</sup> )	$G_k$ (W/m <sup>2</sup> )	$Q_k$ (kWh/m <sup>2</sup> )
Tammikuu	-6,6	5,5	84	99	1
Helmikuu	-7,4	8,0	86	269	21
Maaliskuu	-4,1	11,0	79	318	42
Huhtikuu	2,6	14,0	63	406	75
Toukokuu	8,7	16,5	49	430	101
Kesäkuu	14,7	18,5	35	379	99
Heinäkuu	17,7	17,5	28	385	101
Elokuu	16,1	15,0	32	327	71
Syyskuu	10,9	12,0	44	260	40
Lokakuu	5,1	9,5	57	187	20
Marraskuu	-0,6	6,5	71	69	0
Joulukuu	-5,2	4,5	81	60	0
Vuosi	-	-	-	Yhteensä	571

Vuotuinen arvioitu lämpöenergian tuotto 90° kallistuskulmalla on 461 kWh/m<sup>2</sup> ja 45° kallistuskulmalla on 571 kWh/m<sup>2</sup>. Näin ollen 45° kallistuskulmaan asennetut aurinkokeräimet tuottavat noin 24 % enemmän lämpöenergiaa kuin 90° kallistuskulmaan asennetut aurinkokeräimet.

#### 7.4 B-rakennuksen lämpimän käyttöveden lämpöenergian kulutus

B –rakennuksen lämpimän käyttöveden energiankulutus on määritetty Mikkelin Ammattikorkeakoulun rakennusautomaatiosta saatujen lämmitysenergian kulutustietojen avulla. Lämmitysenergian kulutustiedoista lasketaan lämpimän käyttövedeen tarvittava lämmitysenergia määrittäen ensiksi kokonaisveden kulutuksesta lämpimän käyttöveden osuus. Muille kuin asuinrakennuksille käytetään arvoa 0,3, jolla kerrotaan kokonaisveden kulutus. Näin ollen lämpimän veden kulutus on 379 m<sup>3</sup>/vuosi (Vuonna 2009). Lämpimän käyttöveden vuotuinen energiankulutus lasketaan kaavalla 13.

$$Q_{lkv} = 58 \times V_{lkv} \quad (13)$$

- $Q_{lkv}$  on vuotuinen lämpimän käyttöveden energiankulutus, kWh  
 58 on lämpimän veden lämmittämiseen tarvittava energiamäärä vesikuutiota kohden, kWh/m<sup>3</sup>  
 $V_{lkv}$  on vuotuinen lämpimän veden kulutus, m<sup>3</sup>

Vuotuiseksi lämpimän käyttöveden energiankulutukseksi saadaan 21 985 kWh. Lämpimän käyttöveden energiankulutus jaetaan kuukausille niiden päivien lukumäärän mukaan. Tulokset löytyvät taulukosta 14.

### 7.5 B –rakennuksen aurinkolämpöjärjestelmän pinta-ala ja tuotto

B –rakennuksen kabinetti osan harjakaton sivun pituus on 15 metriä. Laskennassa käytetään NN10 tyhjiöputkikeräintä, jonka kokonaispinta-ala on 1,628 m<sup>2</sup> ja aktiivipinta-ala on 0,931 m<sup>2</sup>. NN10 tyhjiöputkikeräimen lyhyemmän sivun pituus on 0,775 m. Näin ollen 15 metriä pitkälle katolle pystyy asentamaan noin 11 kappaletta tyhjiöputkikeräimiä. Tällöin aktiivipinta-alaksi tulee 10,2 m<sup>2</sup>. Kokonaispinta-alaksi tulee 17,9 m<sup>2</sup>. Tässä esityksessä lasketaan suuntaa antavat lämpöenergian tuotot, jolloin saadaan lämpöenergian tuotosta jonkinlaista osviittaa. Laskennassa käytetään kalliskulmalle 45° laskettua lämpöenergiaa johtuen sen suuremmasta energiantuotosta.

**TAULUKKO 14. B-rakennuksen aurinkokeräinkentästä saatava lämpöenergia kuukausittain kallistuskulmalla 45° ja suuntauksella atsimuuttikulma -20**

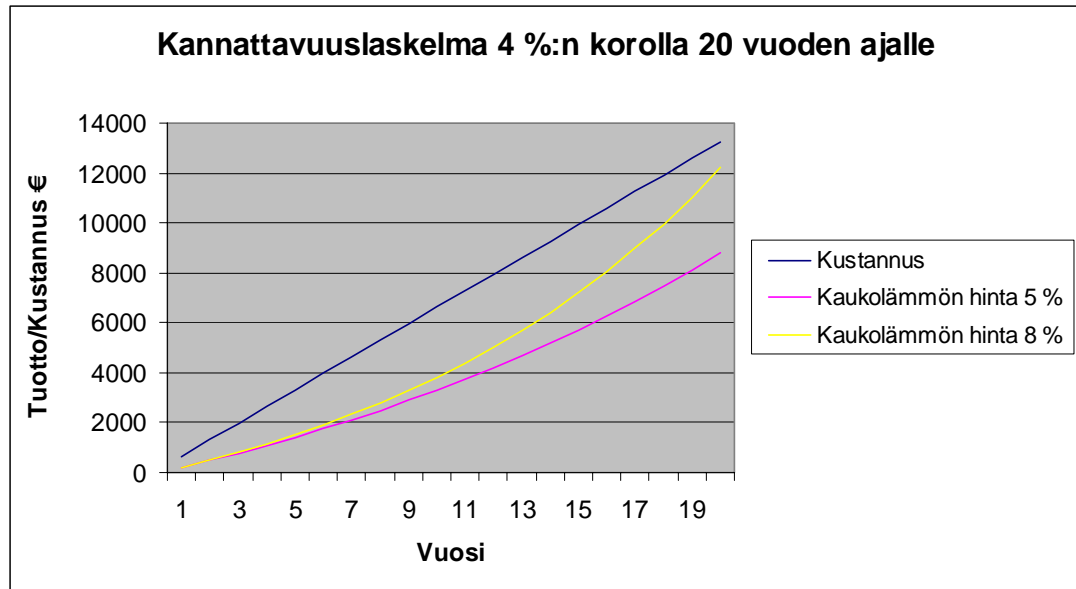
Kuukausi	B-rakennuksen lämpimän käyttöveden energian kulutus (kWh)	Aurinkokeräin pinta-alan lämpöenergian tuotto (kWh)	Osuus lämpimän käyttöveden energiasta (%)
Tammikuu	1 867	10	1
Helmikuu	1 686	214	13
Maaliskuu	1 867	428	23
Huhtikuu	1 807	765	42
Toukokuu	1 867	1030	55
Kesäkuu	1 807	1010	56
Heinäkuu	1 867	1030	55
Elokuu	1 867	724	39
Syyskuu	1 807	408	23
Lokakuu	1 867	204	11
Marraskuu	1 807	0	0
Joulukuu	1 867	0	0
Vuosi	21 984	5 823	26

10,2 m<sup>2</sup> kokoisella aurinkokeräimen aktiivipinta-alalla olisi mahdollista saada noin 26 % koko lämpimän käyttöveden lämpöenergian kulutuksesta. Jos halutaan kattaa kesäkuukaudet tarkoittaen touko-elokuun aikana, vaadittaisiin aktiivista aurinkokeräinpinta-alaa noin 26 m<sup>2</sup>.

### 7.6 B –rakennuksen aurinkolämpöjärjestelmän kannattavuuslaskelma

Kannattavuuslaskelma lasketaan annuiteettimenetelmää hyväksi käyttäen. Tarkasteluajanajaksoksi valitaan 20 vuotta, joka vastaa aurinkolämpöjärjestelmän teknistä käyttöikää lähteen 40 mukaan. Korkotasoksi valitaan 4 % ja lämpöenergian hinnan vuotuisiksi nousuksi valitaan 5 % ja 8 %. Tämän hetkinen kaukolämmön kilowattitunnin hinta on noin 4,6 senttiä/kWh. Edellä esitetyillä oletuksilla kaukolämmön hinnan nousu lasketaan viiden vuoden välein 20 vuoden ajanjaksolle.

Aurinkolämpöjärjestelmä tuottaisi käyttöajallaan yhteensä 89 160 kWh lämpöenergiaa eli 4 458 kWh/vuosi. Investointikustannuksen pohjana käytetään lähteestä 39 löytyvää referenssiarvoa eli 500 €/keräin-m<sup>2</sup>. Näin ollen aurinkolämpöjärjestelmän investointikustannukseksi muodostuisi 8 950 €



**KUVA 42. B-rakennuksen aurinkolämpöjärjestelmän investointikustannus verrattuna saatavaan tuottoon eri kaukolämmön vuotuisilla hinnannousuilla**

Kuten kuvasta 42 näkee niin aurinkolämpöjärjestelmän investointikustannukset muodostuvat suuremmiksi aurinkolämpöjärjestelmän käyttöaikana, joten kasarmien kampuksen alueella aurinkolämpöön investoiminen osoittautuu kannattamattomaksi. Investointikustannuksiin ei sisälly vaadittavat rakennustekniset työt, mitkä lisäävät investointikustannuksia ja näin ollen kannattamattomuutta. Kannattavuuslaskelmassa ei ole otettu huomioon tekijää, että kaikkea auringon tuottamaa lämpöä ei saada hyödyksi. Todellisuudessa kuukausikohtaisesta aurinkolämmön tuotosta saataisiin hyödyksi pienempi osa kuin lämmöntuottolaskelma osoittaa, koska nestevaraajassa olevaa lämmintä käyttövetä ei kierrätetä riittävällä vauhdilla kulutukseen. Tällöin syntyy hetkiä jolloin aurinkokeräin piirissä lämmennyt neste ei kierrä ollenkaan varaajan kautta. Myös varaajan lämpöhäviöt ympäristöön vähentävät hyödyksi saatavaa lämpöä.

## **8 AURINKOJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄT KASARMIN KAMPUKSELLE**

### **8.1 Nykytilanne**

Mikkelin Ammattikorkeakoulun Kasarmin Kampuksella on tällä hetkellä kolmessa eri rakennuksessa jäähdytysjärjestelmät. Jäähdytysjärjestelmät omaavia rakennuksia ovat M- , CDEX- ja H –rakennus. Jäähdytysjärjestelmillä tuotetaan kylmää vettä nesteva-raajaan, josta sitä jaellaan jäähdytysverkostoon tarpeen mukaan.

M –rakennuksessa on 2 eri vedenjäähdytinkoneistoa. Ensimmäinen vedenjäähdytyskoneisto on jäähdytysteholtaan 417 kW ja se palvelee M-rakennuksen osia A, B ja D. Vedenjäähdytyskoneisto on ruuvikompressorimallinen. Vedenjäähdytyskoneisto on asennettu vuonna 2005. Toisen vedenjäähdytyskoneiston jäähdytysteho tietoja ei ole saatavilla. Kuitenkin se palvelee M –rakennuksen C-osaa. Vedenjäähdytyskoneisto on scroll-kompressori mallinen. Vedenjäähdytyskoneisto on asennettu vuonna 2006. M-rakennuksen vedenjäähdytyskoneistoilla on vielä useita vuosia käyttöaikaa.

CDEX –rakennuksessa sijaitsee 2 eri vedenjäähdytyskoneistoa. Ensimmäinen vedenjäähdytyskoneisto on jäähdytysteholtaan 232 kW ja se palvelee tuloilmakoneiden (TK31) ja (TK51) jäähdytyspattereita sekä ATK-luokkien jäähdytyspalkkeja. Vedenjäähdytyskoneisto on scroll-kompressori mallinen. Vedenjäähdytyskoneisto on asennettu vuonna 2004. Toinen vedenjäähdytyskoneisto on jäähdytysteholtaan 110 kW ja se palvelee tuloilmakoneen (TK52) jäähdytyspatteria sekä E-rakennuksen jäähdytyspalkkeja ja puhallinkonvektoreita. Vedenjäähdytyskoneisto on mäntäkompressoritoiminen. Vedenjäähdytyskoneisto on asennettu vuonna 1997.

### **8.2 Mahdolliset aurinkojäähdytysjärjestelmät Kasarmin Kampukselle**

Kohdassa 5 esitetyistä aurinkojäähdytysjärjestelmistä ainoastaan absorptiojäähdytyksellä toteutettu järjestelmä olisi mahdollista toteuttaa. Adsorptiojäähdytyksellä toteutetun järjestelmän heikkoudeksi muodostuu huono saatavuus eli vain muutamia valmistajia maailmassa lähinnä Kiinassa, mistä johtuen adsorptiojäähdytyksellä toteutetun järjestelmän hinta on kalliimpi kuin absorptiojäähdytysjärjestelmän.

Kiinteän ja nestemäisellä kuivainperiaatteella toteutetut järjestelmät eivät sovellu koulun rakennuksiin, koska olemassa olevat jäähdytysjärjestelmät tuottavat kylmää vettä nestevaraajaan, josta sitä käytetään jäähdytysverkostossa olevissa puhallinkonvektoreissa ja jäähdytyspalkeissa.

Suomessa on tällä hetkellä markkinoilla ainoastaan yksi maahantuojaja, jolta saa aurinkoavusteisen absorptiojäähdytysjärjestelmän. Yhtäkään referenssikohdetta tosin ei ole vielä yrityksen sivuille ilmestynyt.

M –rakennuksessa olevat jäähdytyskoneistot ovat teholtaan 417 kW ja toinen on teholtaan tuntematon. Ajateltaessa, että olemassa olevat jäähdytyskoneet vaihdetaan niiden käyttöään loppumisen jälkeen absorptiojäähdyttimiin. Tarvittava aurinkokeräinkentän pinta-ala per absorptiojäähdytin lasketaan ASHRAE Journalin artikkelista löytyvästä keskimääräisestä keräin-m<sup>2</sup>/kW (Jäähdytysteho). Keskimääräinen arvo on 3,6 m<sup>2</sup>/kW (Jäähdytysteho). Absorptiojäähdyttimen vaadittavan aurinkokeräinkentän pinta-alaksi M-rakennuksen tapauksessa tulisi 1501 m<sup>2</sup>. Tässä tulisi myös huomioida, että pilvisinä päivinä tulisi olla mahdollisuus ajaa jostain lisälämmönlähteestä tarvittava määrä lämpöä. Kaukolämpövesi ei sovellu käytettäväksi lisälämmönlähteeksi, koska kesäaikaan kaukolämpöverkoston vesi on noin 70 °C. Absorptiojäähdytysprosessi vaatii 85°C, mutta silloinkin prosessin hyötysuhde pysyy huonona. Muutaman lämpötila-asteen nousu 85°C parantaa hyötysuhdetta merkittävästi.

CDEX –rakennuksessa olevat jäähdytyskoneistot ovat teholtaan 110 kW ja 232 kW. Samalla tavalla kuin M-rakennuksen tapauksessa eli ajateltaessa, että olemassa olevat jäähdytyskoneet vaihdetaan niiden käyttöään loppumisen jälkeen absorptiojäähdyttimiin. Niin tarvittava aurinkokeräinkentän pinta-ala molemmille eri jäähdytyskoneille lasketaan ASHRAE Journalin artikkelista löytyvästä keskimääräisestä keräin-m<sup>2</sup>/kW (Jäähdytysteho). Keskimääräinen arvo on 3,6 m<sup>2</sup>/kW (Jäähdytysteho). Absorptiojäähdyttimien kavereiksi vaadittavan aurinkokeräinkentän pinta-alaksi tulisi 396 m<sup>2</sup> ja 835 m<sup>2</sup>.

Molemmissa tapauksissa tulisi huomioida pilviset päivät, jolloin varalämmönlähteeksi ei sovellu kaukolämpö johtuen sen liian alhaisesta lämpötilatasosta kesäisin. Tämän takia koulun tulisi saada esimerkiksi teollisuuden jätelämpöä tai rakentaa oma kattila-

laitos, joilla olisi mahdollista taata riittävän korkea lämpötilataso absorptiojäähdyttimen toimintaan.

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

C – ja E –rakennuksen katoille ajatellut aurinkosähköjärjestelmät ovat taloudellisessa mielessä kannattamaton ratkaisu. Sähkön hinnan tulisi nousta ja aurinkosähköjärjestelmien investointikustannusten samalla laskea, jotta aurinkosähköjärjestelmän rakentaminen kasarmin kampukselle tulisi kannattavammaksi tai ylipäättään kannattavaksi.

Mahdollisilla valtion tukitoimilla olisi tilanne toinen, koska omakohtaiset investointikustannukset pienenisivät ja elinkaarensa aikana tuotetun kilowattitunnin hinta alenisi. Toisaalta valtio voisi asettaa aurinkosähkölle syöttötariffin, joka pakottaisi sähköyhtiöt ostamaan yli oman tarpeen tuotetun sähkön kiinteään hintaan.

Ikuinen ongelma tulee olemaan aurinkosähkön saannin jaksottaisuus. Kesällä tuotetaan reilusti yli oman tarpeen ja talvella ostetaan tarvitsema sähköenergia, koska aurinkolla tuotettua sähköä ei ole riittävästi tarjolla.

Aurinkolämpöjärjestelmää en suosittele rakennettavan, koska se ei ole taloudellisesti kannattavaa, kuten kannattavuuslaskelma osoittaa. Pitää muista, että kaikki saatavilla oleva lämpöenergia ei tule hyötykäyttöön, jolloin hyödyksi saatu lämpöenergian määrä laskee ja tuotetun kilowattitunnin hinta kasvaa. Kaikkea tarjolla olevaa lämpöenergiaa ei saada hyödyksi, koska on hetkiä, jolloin nestevaraajassa ei ole käyttöä ja vaa-dittu nestevaraajan lämpötilataso on saavutettu. Tällöin aurinkolämpöjärjestelmä pyörittää keräinnestettä vain aurinkokeräinpiirissä, jolloin ei saada energiaa hyödyksi.

Aurinkojäähdytysjärjestelmää absorptiojäähdytyksen avulla ei kannata kovinkaan nopeasti ajatella toteutettavan. Absorptiojäähdyttimen hinta on perinteistä kompressoritoimista jäähdytintä kovempi ja vielä lisäksi pitäisi rakentaa aurinkokeräinkenttä, jonka investointikustannukset ovat melko kalliit. Sähkön hinta saa nousta melkoisesti ennen kuin aurinkojäähdytys pystyy kappittamaan taloudellisessa mielessä kompressoritoimisen jäähdytyksen.

Absorptiojäähdytin tarvitsee aurinkokeräimien tuottaman lämmön lisäksi jonkin varalämmönlähteen pilvisien päivien varalle. Varalämmönlähteenä ei voi toimia kaukolämpö johtuen kaukolämmön liian alhaisesta lämpötilasta kesäaikana. Varalämmönlähteeksi joutuisi rakentamaan erillisen kattilan tai höyryn kehityslaitteen.

Tulevaisuudessa mahdollisesti panostetaan aurinkojäähdytysjärjestelmien teknologian kehitykseen etenkin maissa, joissa sähkön hinta on melko korkea ja aurinkoenergiaa on tarjolla reilusti. Suomessa sähkön hinta on kuitenkin melko halpa, joten kompressorikoneita vastaan kilpaillessa tulisi sähkön hinnan nousta moninkertaiseksi tai aurinkojäähdytysjärjestelmien investointikustannusten laskea hurjasti ennen kuin aurinkojäähdytysjärjestelmät Suomessa olisivat taloudellisesti kannattavaa.

Jos mahdollisesti haluaa tarkemmin tutkia aurinkojäähdytyksen sopivuutta Kasarmin Kampuksen rakennuksille, niin EU-projektin myötä tehty analyysiohjelma nimeltä SolarCoolingLight on oiva työkalu siihen tarkoitukseen. SolarCoolingLight –ohjelma löytyy sivustolta (<http://www.solair-project.eu/218.0.html#c1010>) ja se on täysin ilmainen. Ohjelman käytöstä löytyy samalta sivulta käyttöohjeet. Ennen ohjelman käyttöä tulisi haluttu kohde ajaa dynaamisen simuloinnin läpi, jolloin saadaan tuntitason tietoa jäähdytysenergiantarpeesta ja muista tarvittavista parametreista.



## LÄHTEET

[1] Erat, Bruno jne. 2008. Aurinko-opas: aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo: Painoyhtymä Oy.

[2] Institute of Energy, European Commission. Photovoltaic Geographical Information System. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

[3] Newport Corporation –yrityksen kotisivut  
<http://www.newport.com/store/genContent.aspx/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 13.3.2011]

[4]Lohmayer GmbH and KG. 2007. <http://cgi.stadtklima-stuttgart.de/mirror/sonnefre.exe>

[6]Lund, Peter. Aurinkolämmön itserakennusopas. WWW-dokumentti. Helsinki. 2000. SOLPROS. <http://www.kolumbus.fi/solpros/reports/SolarGuide.PDF>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 13.3.2011]

[7]Uusiutuva energia Viikissä.  
<http://www.viikinuusiutuvaenergia.net/aurinkolampo.htm>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 10.3.2010]

[8] Aurinkokauppa.fi –verkkoyrityksen kotisivut. <http://www.aurinkokerain.fi/>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 10.3.2010]

[9] Jodat Ympäristöenergia Oy. Aurinkokeräimen teho ja tuotto. 2007.<http://www.yenergia.com/aurinkolampo/aurinkokerain/aurinkokerain.html>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 7.3.2011]

[10] Tyhjiöputkikeräimet testissä. 2009. TM Rakennusmaailma. 25.2.2009, 12-16

[11]European Photovoltaic Industry Association. <http://www.epia.org/solar-pv/pv-technologies-cells-and-modules.html>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 7.3.2011]

- [12] Intelligent Energy Europe. Key issues for renewable heat in Europe. K4RES-H – project, Task 3.5. WWW-dokumentti.  
<http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/policies/downloads/D23-solar-assisted-cooling.pdf>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 14.5.2011]
- [13] Finnwind Oy. Saarekeverkot. <http://www.finnwind.fi/web-content/saarekeverkko/saarekeverkot.html> [Päivitetty 2.8.2010] [Viitattu 10.3.2010]
- [14] Solar cooling: An overview of European applications & design guidelines. 2006. ASHRAE Journal. June 2006. s. 14-21
- [15] Rohrbach, Prof. Thomas. Sonnenenergienutzung –luentomateriaali. Hochschule Esslingen. 2010.
- [16] Genergia Ky –yrityksen kotisivut. [www.genergia.fi](http://www.genergia.fi). Ei päivitystietoa. [Viitattu 10.3.2010]
- [17] Konttinen, Petri 2010. Aurinkoenergian trendejä. WWW-dokumentti.  
<http://hermia-fi-bin.directo.fi/@Bin/1474bc93b75268f608333a76c4d20169/1300727746/application/pdf/730453/Aurinkoenergian%20trendej%C3%A4%20Petri%20Konttinen%2020101013.pdf>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 10.3.2010]
- [18] Aurinko tehokäyttöön porin uimahallissa -artikkeli. WWW-dokumentti. YLE Satakunta.  
[http://yle.fi/alueet/satakunta/2009/09/aurinko\\_tehokayttoon\\_porin\\_uimahallissa\\_989380.html](http://yle.fi/alueet/satakunta/2009/09/aurinko_tehokayttoon_porin_uimahallissa_989380.html). [Viitattu 7.3.2011]
- [19] Aurinkoenergia Suomen olosuhteissa ja sen potentiaali ilmastonmuutoksen torjunnassa. WWW-dokumentti. TEKES-projekti. SOLPROS. 2001.  
[www.kolumbus.fi/solpros/reports/3rdeport\\_final.PDF](http://www.kolumbus.fi/solpros/reports/3rdeport_final.PDF). Ei päivitystietoa. [Viitattu 10.3.2010]

[20]Max Fordham & Partners In Association with Feilden Clegg Architects. Photo-voltaic in Buildings - A Design Guide. s.1 : Department of Trade and Industry, 1999

[21]Varkauden Huoltopalvelu Oy. Lataussäätimet.

<http://www.suntekno.fi/latauss%C3%A4%C3%A4timet>. Ei päivitystietoa.[Viitattu 10.3.2010]

[22]Varkauden Huoltopalvelu Oy. Aurinkopaneelit.

<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 10.3.2010]

[23]Diplomityö. Schneider Tom. Aurinkosähköjärjestelmien tuottaman tasavirran käyttö toimistorakennusten LED-valaistusjärjestelmiin. Teknillinen Korkeakoulu Espoo. 2009

[24]Cullen, Richard A. What is Maximum Power Point Tracking (MPPT)? s.1.:Blue Sky Energy Inc.

[25] Intelligent Energy Europe. SOLAIR-Project. 2007-2009. Case Studies GE01. <http://www.solair-project.eu/uploads/media/Ge01.pdf>. WWW-dokumentti. Ei päivitystietoa. [Viitattu 26.3.2011]

[26] Intelligent Energy Europe. SOLAIR-Project. 2007-2009. Case Studies GE09. <http://www.solair-project.eu/uploads/media/Ge09.pdf>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 26.3.2011]

[27] Korpela, Aki. Aurinkosähkön luentomateriaali. Tampereen Teknillinen Yliopisto. 2007. <https://webhotel2.tut.fi/units/msg/tp/kurssit/SMG-4450/luento3.pdf> . [Päivitetty 14.9.2010] [Viitattu 26.3.2011]

[28] Lund, Peter. Aurinkosähkötekniikan luentomateriaali. Teknillinen Korkeakoulu. Helsinki. 2010. <https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/tfy-56.4323/viikkoharjoitukset> [Luettu 11.1.2011] [Viitattu 26.3.2011]

- [29] Koljonen, Tiina. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. Espoo. 1998.
- [30] Intelligent Energy Europe. SOLAIR-Project. 2007-2009. Guidelines for absorption chiller. [http://www.solair-project.eu/uploads/media/Guidelines03\\_absorption\\_H2O\\_LiBr.pdf](http://www.solair-project.eu/uploads/media/Guidelines03_absorption_H2O_LiBr.pdf). WWW-dokumentti. Ei päivitystietoa. [Viitattu 26.3.2011]
- [31] Intelligent Energy Europe. SOLAIR-Project. 2007-2009. Guidelines for adsorption chiller. [http://www.solair-project.eu/uploads/media/Guidelines05\\_adsorption.pdf](http://www.solair-project.eu/uploads/media/Guidelines05_adsorption.pdf) WWW-dokumentti. Ei päivitystietoa.[Viitattu 26.3.2011]
- [32] Intelligent Energy Europe. SOLAIR-Project. 2007-2009. Guidelines for liquid desiccants. [http://www.solair-project.eu/uploads/media/Guidelines06\\_liq\\_desiccants.pdf](http://www.solair-project.eu/uploads/media/Guidelines06_liq_desiccants.pdf). WWW-dokumentti. Ei päivitystietoa. [Viitattu 26.3.2011]
- [33] Aittomäki, Antero. 1996. Kylmäteknikka. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy
- [34] Lund, Peter. 1999. Aurinkoenergiateknikka luentomateriaali. Luento 6 Tasokeräin – perusteoria. [https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/tfy-56.4323/luennot/Tfy-56\\_4323\\_luento\\_6.pdf](https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/tfy-56.4323/luennot/Tfy-56_4323_luento_6.pdf) . [Päivitetty 11.1.2011] [Viitattu 26.3.2011]
- [35] Boyle, Godfrey. 2004. Renewable Energy. Cambridge. The Open University.
- [36] Vehviläinen, Iiro. 2010. ERA-toimintaohjelman alustavat vaikutukset ja toimintarvio. Gaia Consulting.
- [37] Knuutila, Hanna. Energiatalouden luentomateriaali. Tampereen Teknillinen Yliopisto. 2010. <http://www.tut.fi/units/me/ener/kurssit/2504010/investointilaskut.pdf> [Päivitetty 25.4.2010] [Viitattu 14.5.2011]
- [38]DMD Solar Heating Systems. <http://www.dmdcsolar.com/prod04.htm> [Päivitetty 24.2.2009] [Viitattu 14.5.2011]

[39] Vartiainen, Juha. 2002. Hajautettu energiantuotanto. Gaia Consulting. Helsinki. Oy Edita Ab

[40] Eye Lightning International of North America –yrityksen kotisivut. <http://www.eyesolarlux.com/Solar-simulation-energy.htm>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 14.5.2011]

[41] Kwick, Pasi. Opinnäytetyö. Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä. Savonia Ammattikorkeakoulu. Varkaus. 2010

[42] JTV-energia Ky –yrityksen kotisivut. <http://www.jtv-energia.fi/index.html>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 14.5.2011]

[43] HIWTC - The Successful Place Of Manufacturers & Exporters –yrityksen kotisivut <http://www.hiwtc.com/products/lithium-bromide-absorption-chiller-6928-22046.htm>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 14.5.2011]

[44] Emissionless –yrityksen kotisivut. <http://www.emissionless.com/ADC.htm>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 14.5.2011]

[45] Intelligent Energy Europe. SOLAIR-Project. 2007-2009. Guidelines for solid desiccants. [http://www.solair-project.eu/uploads/media/Guidelines04\\_sol\\_desiccants.pdf](http://www.solair-project.eu/uploads/media/Guidelines04_sol_desiccants.pdf). WWW-dokumentti. Ei päivitystietoa. [Viitattu 26.3.2011]

[46] Lowenstein, Andrew 2010. Advanced Liquid Desiccant Technology. WWW-dokumentti. [http://www.iea-shc.org/task38/events/2010-01-27/presentations/07\\_Liquid-DEC\\_Lowenstein.pdf](http://www.iea-shc.org/task38/events/2010-01-27/presentations/07_Liquid-DEC_Lowenstein.pdf). [Päivitetty 27.1.2010] [Viitattu 14.5.2011]

[47] GreenSpec –yrityksen kotisivut. <http://www.greenspec.co.uk/solar-collectors.php>. Ei päivitystietoa. [Viitattu 14.5.2011]

[48]Genergia Ky –yrityksen kotisivut. Suntech STP200-18Ub –tekniset tiedot lehtinen. [www.genergia.fi](http://www.genergia.fi). Ei päivitystietoa. [Viitattu 10.3.2010]

[49] Sähköposti-keskustelu Tilauksen, Jonin kanssa. Sähköpostiviestit otsikoilla: Sähkön hinta ja Kasarmin Kampus. [Viitattu 14.5.2011]