Aurinkolämpö –
teknologia ja mahdollisuudet

Pro gradu- tutkielma

Jyväskylän yliopisto

Kemian laitos

Uusiutuvan energian koulutus- ja tutkimusohjelma

Katri Komulainen

8. toukokuuta 2006

Esipuhe

Osa pro gradu- työstäni on tehty Jyväskylän yliopiston Uusiutuvan energian (UE) koulutus- ja tutkimusohjelman ja Vapo Oy:n yhteistyöprojektissa (Biomassan kuivattaminen aurinkolämpöä hyödyntämällä) kesällä 2005. Kiitän tästä projektista Vapo Oy:n Timo Nyröstä, Kari Mutkaa, Juha Korpea ja Niko Nevalaista sekä Jaakko Lehtovaaraa.

Kiitos työtäni ohjanneille ja tarkastaneille prof. Jouko Korppi-Tommolalle ja FT Jussi Maunukselalle sekä Timo Jodatille, Arjo Heinsolalle ja Mohanlal Kolhelle, koko UE-ohjelman väelle.

Kiitos Lauri, siskot, ystävät, isä, äiti, mummut ja ukit.

Jyväskylässä 8.5.2006

Katri Komulainen

Tiivistelmä

Maailman energiantuotannon rakennetta voidaan kehittää kestävämpään suuntaan uusiutuvien energiamuotojen laajamittaisella käyttöönotolla. Lämmöntuotannossa uusiutuvia vaihtoehtoja ovat aurinkolämpö, lämpöpumput ja biomassan poltto. Tässä työssä keskityttiin aurinkolämpöteknologiaan ja sen tarjoamiin mahdollisuuksiin.

Työn ensimmäisessä osassa selvitettiin auringon mukaan kääntyvän ja kiinteästi etelään suunnatun aurinkolämpökeräimen kuukausittaiset optimaaliset kaltevuuskulmat Kihniön Aitonevan koordinaateilla (62.2° P ja 23.3° I). Havaittiin, että suurin ero etelään suunnatun keräimen ja kääntyvän keräimen optimaalisessa kaltevuudessa on kesäaikana. Touko-elokuussa etelään suunnatun keräimen kaltevuus on noin 20 astetta ja kääntyvän keräimen noin 50 astetta. Kääntyvän keräimen kuukausittainen säteilyannos voi kesäaikana olla noin 1,4 kertaa etelään suunnatun keräimen säteilyannosta suurempi.

Seuraavaksi esiteltiin yleisimmät aurinkolämpökeräimet: taso- ja tyhjiöputkikeräimet sekä katteettomat keräimet. Erityisesti keräinten esittelyn yhteydessä perehdyttiin selektiivisiin absorptiopinnoitteisiin, niiden valmistusmenetelmiin ja optisiin ominaisuuksiin. Tasokeräinten selektiivisistä pinnoitteista tarkasteltiin mustaa nikkeli- ja kromipinnoitetta, nikkeli-alumiinioksidipinnoitetta, titaanioksinitridipinnoitetta, nikkeli-nikkelioksidipinnoitetta ja krominitridi-kromioksidipinnoitetta. Näiden pinnoitteiden auringonsäteilyn absorptiokerroin vaihtelee välillä 0,93–0,96 ja lämpösäteilyn emissiokerroin välillä 0,05–0,17. Lisäksi esiteltiin tyhjiöputkikeräimiin soveltuvia pinnoitteita (SS–C, Al–N ja M–AlN), joiden lämpösäteilyn emissio-ominaisuudet (0,06–0,07) ovat hieman edellä mainittuja paremmat. Esiteltiin myös kaksi selektiivistä maalipinnoitetta, joiden absorptiokertoimet ovat luokkaa 0,90 ja emissiokertoimet noin 0,30.

Työn jälkimmäisessä osiossa tehtiin katsaus aurinkolämmön markkinoihin ja arvioitiin aurinkolämmön mahdollisuuksia Euroopan unionissa ja etenkin Suomessa. Tarkasteltiin

aurinkolämpömarkkinoiden kehittymistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Esiteltiin markkinoilla olevien keräintyyppien ominaisuuksia ja hintatasoa koskeva selvitys, joka tehtiin lähettämällä kysely 25 eurooppalaiselle keräinvalmistajalle. Kyselyyn vastanneiden valmistajien tasokeräinten hintaluokka oli noin 200 €/m^2.

Lopuksi arvioitiin aurinkolämmön mahdollisuuksia suomalaisten pientalojen täydentävänä lämmöntuotantomuotona. Määritettiin aurinkolämmöllä korvattava osuus pientalon käyttöveden lämmöntarpeesta, aurinkolämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika ja aikaansaadut hiilidioksidipäästövähennykset. Tarkasteltiin kahta erikokoista aurinkolämpöjärjestelmää, joiden keräinpinta-alat ovat 6 m^2 ja 12 m^2 ja vuotuiset lämmöntuotot noin 1,8 MWh ja 3,8 MWh. Pienempi järjestelmä (6 m^2) tuottaa neljän hengen perheen käyttöveden lämmitykseen tarvittavasta energiasta noin puolet. Suurempi järjestelmä kattaa käyttöveden lämmitykseen tarvittavasta energiasta noin 70 % ja lisäksi se tuottaa energiaa tilojen lämmitykseen touko-syyskuussa. Aurinkolämpöjärjestelmän takaisinmaksuaikaan vaikuttavat investoinnin hinta, korvattavan energian hinta ja energian hinnan nousu. Nykyisellä öljyn hinnan nousulla aurinkolämpöjärjestelmä maksaa itsensä takaisin noin 6 – 10 vuodessa, riippuen siitä, ostetaanko järjestelmä rakennussarjana ja uusitaanko varaaja. Suomalaisten pientalojen hiilidioksidipäästöjä (noin 7 – 8 miljoonaa tonnia vuodessa) voidaan kymmenen vuoden aikana leikata yli 1 000 000 tonnilla, jos puolet sähkö- ja öljylämmitteisistä taloista varustettaisiin lisäksi aurinkolämpöjärjestelmällä.

Sisältö

Esipuhe **3**

Tiivistelmä **5**

1 Johdanto **11**

2 Auringonsäteily **17**

2.1 Auringonsäteily horisontaalitasolle 18

2.1.1 Avaruusgeometriaa 18

2.1.2 Aurinkoaika ja standardiaika 21

2.1.3 Auringon nousuajat, auringon laskuajat ja päivän pituus 23

2.1.4 Ilmakehän ulkopuolinen auringonsäteily 25

2.1.5 Päivittäinen kirkkausaste, hajasäteilyn ja suoran säteilyn määrät 26

2.2 Auringonsäteily etelään suunnatulle keräimelle 30

2.2.1 Kokonaissäteilyn riippuvuus kaltevuuskulmasta 30

2.2.2 Kuukausittainen optimaalinen kaltevuuskulma 31

2.3 Auringonsäteily kääntyvälle keräimelle 32

2.3.1 Kokonaissäteilyn riippuvuus kaltevuuskulmasta 32

2.3.2 Kuukausittainen optimaalinen kaltevuuskulma 32

2.4 Tulosten tarkastelu 33

3 Aurinkolämpökeräimet **41**

3.1 Keräintyypit 41

3.1.1 Tasokeräimet 42

3.1.2 Tyhjiöputkikeräimet 43

3.1.3 Katteettomat aurinkokeräimet 46

3.2 Keräimen absorptiopinnan ominaisuudet 46

3.2.1 Tasokeräimen optiset ominaisuudet ja tehokkuus 47

3.2.2 Auringonsäteily ja lämpösäteily – pinnoitteen selektiivisyys 52

3.3 Selektiiviset absorptiopinnoitteet ... 55
3.3.1 Musta kromi- ja musta nikkelipinnnoite ... 56
3.3.2 Nikkeli-alumiinioksidi ($Ni-Al_2O_3$)- pinnoite ... 58
3.3.3 Titaanioksinitridi (TiN_xO_y) - pinnoite ... 59
3.3.4 Nikkeli-nikkelioksidi (Ni-NiO) - pinnoite ... 60
3.3.5 Krominitridi-kromioksidipinnoite ($CrN-Cr_xO_y$) ... 61
3.3.6 Tyhjiöputkien selektiiviset pinnoitteet ... 62
3.3.7 Selektiiviset maalipinnoitteet ... 66
3.3.8 Yhteenveto selektiivisistä pinnoitteista ... 69

4 Aurinkolämpökeräinten markkinaselvitys ... 71

4.1 Katsaus Euroopan unionin aurinkolämpömarkkinoihin ... 71

4.2 Keräinten markkinaselvitys ... 74
4.2.1 Selvityksen taustaa ... 74
4.2.2 Selvityksen sisältö ... 75

4.3 Markkinaselvityksen tulokset ... 78
4.3.1 Tasokeräimet ... 79
4.3.2 Tyhjiöputkikeräimet ... 81
4.3.3 Katteettomat keräimet ... 83

5 Aurinkolämmön mahdollisuudet Euroopan unionissa ja Suomessa ... 85

5.1 Tavoitteet ja potentiaali ... 85
5.1.1 Euroopan unionissa ... 85
5.1.2 Suomessa ... 86

5.2 Markkinoiden kasvuun vaikuttavat tekijät ... 87
5.2.1 Suomen aurinkolämpömarkkinoiden tilanne ... 89

5.4 Aurinkolämmön tarjoamat edut ... 89
5.4.1 Euroopan unionissa ja Suomessa ... 89
5.4.2 Saatava hyöty suomalaisessa pientalossa ... 90

6 Yhteenveto ... 101

Symboliluettelo **107**

Lähdeluettelo **111**

Liite 1 Aurinkolämpökeräinten markkinaselvitys – Valmistajat ja jälleenmyyjät

Liite 2 Aurinkolämpökeräinten markkinaselvitys – Keräinten teknisten tietojen kyselylomake valmistajille

Liite 3 Aurinkolämpökeräinten markkinaselvityksen tuloksia - Tasokeräimet

Liite 4 Aurinkolämpökeräinten markkinaselvityksen tuloksia - Tyhjiöputkikeräimet

Liite 5 Aurinkolämmön teknistaloudellinen potentiaali EU15- jäsenvaltioissa

Liite 6 Aurinkolämpömarkkinat EU25- jäsenvaltioissa

Liite 7 Aurinkolämpömarkkinat EU25- jäsenvaltioissa

1 Johdanto

Energiankulutus maailmassa on jatkuvassa kasvussa. Vuonna 1973 primäärienergian kokonaistuotanto maailmassa oli 6 034 Mtoe (Kuva 1.1) ja kokonaiskulutus 4 606 Mtoe (Kuva 1.2). Vuoteen 2003 mennessä maailman energiantuotanto oli lisääntynyt 75 % vuoden 1973 tasosta ja oli yhteensä 10 579 Mtoe. Vastaavasti energiankulutus kasvoi 58 % ja oli 7 287 Mtoe vuonna 2003. Tuotannon ja kysynnän kasvun lisäksi ongelmia aiheuttaa energiantuotannon fossiilisiin polttoaineisiin perustuva rakenne. Öljyn, kivihiilen ja maakaasun osuus maailman energiantuotannosta vuonna 2003 oli 80 %. Kiihtyvän energiantuotannon kestämättömyyttä kuvaavat siitä aiheutuvat vakavat ympäristöongelmat sekä varantojen riittävyyttä ja valtioiden välisiä suhteita koskevat kysymykset. [1]

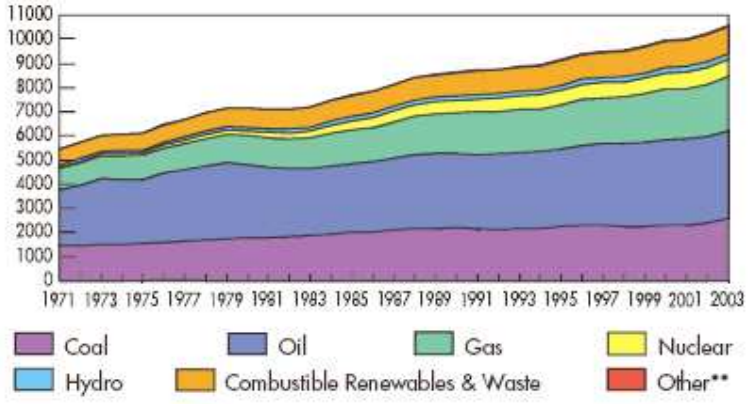
Etenkin öljyn ja maakaasun osalta varannot ovat keskittyneet maapallon tietyille alueille. Öljyvarannoista 60 % sijaitsee Lähi-idässä ja maakaasuvarannoista 40 % entisen Neuvostoliiton alueella. Muiden valtioiden riippuvuus tuontienergiasta vaikeuttaa turvatun energian saannin toteuttamista ja aiheuttaa valtioiden välisiä konflikteja. Usein energiavarannoista, kuten öljystä aiheutuu ongelmia (sisäistä levottomuutta ja epätasa-arvoa) myös viejävaltiolle. Varantojen epätasaisen sijoittuneisuuden lisäksi fossiilisten polttoaineiden ja uraanin varannot ovat rajalliset. Kaikki lupaavimmat ja helpoiten hyödynnettävät varannot ovat jo käytössä. Maailman öljyn varanto/tuotanto- suhde vuoden 2003 lopussa oli noin 40 vuotta, mikä tarkoittaa, että sen hetkiset varannot riittäisivät samalla tuotantovauhdilla 40 vuodeksi eteenpäin. Maailman maakaasuvarannoille vastaava luku oli noin 60 vuotta ja kivihiilivarannoille noin 200 vuotta. [2]

Fossiilisten polttoaineiden yhteisenä ongelmana ovat niiden poltosta vapautuvat, ilmaston lämpenemistä aiheuttavat hiilidioksidipäästöt. Vuonna 2003 maailman hiilidoksidipäästöt (Kuva 1.3) olivat kasvaneet 60 % vuoden 1973 tasosta (15 662 Mtoe CO_2) ja olivat 24 983 Mt [1]. Hiilidioksipäästöjen hillitsemiseksi ja ilmastonmuutoksen torjumiseksi

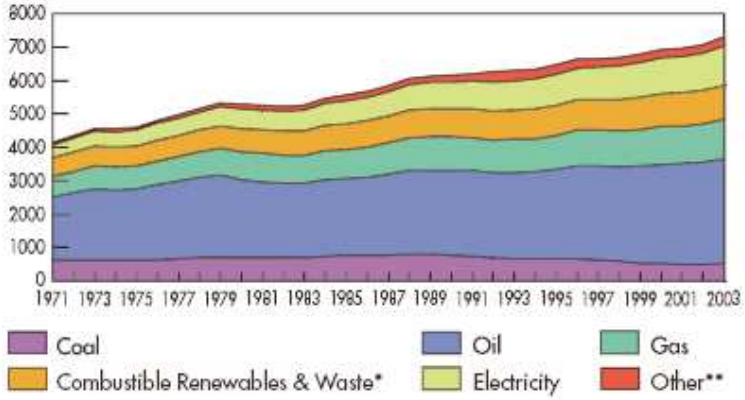
tehdään kansainvälistä yhteistyötä. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia on kuitenkin jo nähtävissä. Näitä ovat toistuvat, äärimmäiset sääilmiöt ja luonnonmullistukset, kuten hirmumyrskyt, mutavyöryt ja kuivuus, jäätiköiden ja ikirouta-alueiden sulaminen ja merenpinnan nousu. Ilmastonmuutoksen lisäksi energiantuotannosta aiheutuvia ympäristöongelmia ovat mm. happosateet, merien öljyvahingot ja ydinvoiman radioaktiiviset jätteet.

On selvää, että nykyinen kehitys energiantuotannon ja – kulutuksen sektoreilla ei ole kestävää. Maapallon tulevaisuuden turvaamiseksi ihmisen on pystyttävä hillitsemään energiankulutusta ja otettava käyttöön uusia tuotantoratkaisuja. Uusiutuvilla energiamuodoilla on merkittävä osa tässä kehityksessä ja niiden käyttöönotolla voidaan vaikuttaa kaikkiin edellä mainittuihin, energiantuotannosta aiheutuviin ongelmiin. Uusiutuvan energian ensimmäinen etu on sen paikallisuus, jolla lisätään alueiden energiaomavaraisuutta ja edistetään paikallista kehitystä. Toisena etuna on tuotanto-muotojen monipuolisuus, joka takaa hajautetun ja varman energiantuotantoketjun. Kolmantena etuna on uusiutuvien energiamuotojen saasteettomuus ja niiden merkittävä potentiaali ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Uusiutuvien energiamuotojen lähteenä (geotermistä energiaa ja vuorovesivoimaa lukuunottamatta) on aurinko, joka paistaa kaikkiin maapallon osiin ja jonka arvioidaan säteilevän energiaa vielä miljardeja vuosia.

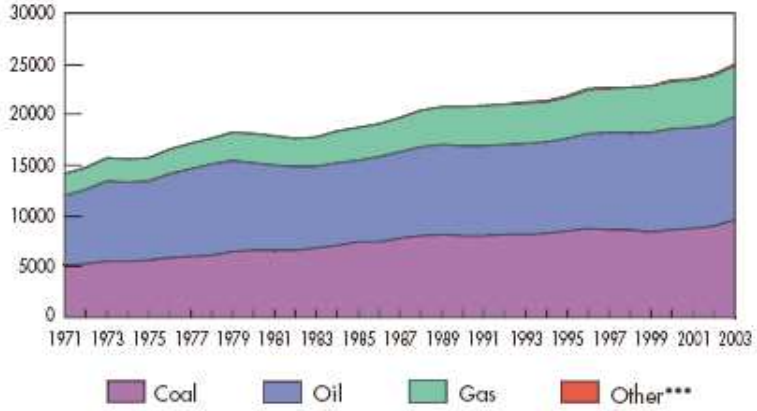
Aurinko on valtavan kokoinen fuusioreaktori, joka muuttaa vetyä heliumiksi 4 miljoonaa tonnia sekunnissa. Maahan saapuvan auringon säteilyenergian määrä vuodessa on enemmän kuin 15 000 kertaa maailman fossiilisten polttoaineiden, ydinvoiman ja vesivoiman vuosittainen kokonaiskulutus. Tästä energiamäärästä 47 % muuttuu lämmöksi ilmassa, vedessä ja maassa, 30 % heijastuu ilmakehästä takaisin avaruuteen ja 23 % kuluu veden höyrystymiseen. Vain pieni osa energiasta kuluu tuulien ja aaltojen muodostumiseen sekä kasvien fotosynteesiin. Auringon energiaa käytetään välillisesti hyödyksi mm. vesivoiman, biomassaenergian ja tuulivoiman muodossa. Suoraan auringon energiaa voidaan hyödyntää passiivisen aurinkoenergian huomioivalla rakennusten suunnittelulla, auringonsäteilystä sähköä tuottavilla aurinkokennoilla ja lämpöä tuottavilla aurinkolämpökeräimillä. [2]



Kuva 1.1 Primäärienergian kokonaistuotanto [Mtoe] maailmassa energialähteittäin vuodesta 1971 vuoteen 2003 [1]



Kuva 1.2 Energiankokonaiskulutus [Mtoe] maailmassa energialähteittäin vuodesta 1971 vuoteen 2003 [1]



Kuva 1.3 Maailman hiilidioksidipäästöt [Mt CO_2] vuodesta 1971 vuoteen 2003 [1]

Tässä työssä keskitytään aurinkolämmöntuotantoon käsittelemällä auringonsäteilyä ja aurinkolämpökeräimiä sekä aurinkolämmön markkinoita ja mahdollisuuksia. Katsaus aurinkolämpöalaan aloitetaan luvussa kaksi tarkastelemalla maan ilmakehän ulkopuolista ja maan pinnalle saapuvaa auringonsäteilyä. Tarkastelun perustana käytetään kokonaissäteilyn mittaustuloksia horisontaalitasoon ajalta 1.1 – 4.5.2005 ja 5.5.–31.12.2004 Kihniön Aitonevalla. Esiteltävän teorian avulla selvitetään päivän pituuden ja ilmakehän ulkopuolisen säteilyn vaihtelut sekä suoran säteilyn ja hajasäteilyn osuudet kokonaissäteilyn mittaustuloksista. Lasketaan etelään suunnatulle aurinkokeräimelle ja aurinkoa kohti kääntyvälle keräimelle saapuvat päivittäiset kokonaissäteilyn määrät. Lopuksi määritetään keräinten kuukausikohtaiset optimaaliset kaltevuuskulmat, jolloin kuukauden keskimääräinen päivittäinen kokonaissäteily keräimille on suurin.

Seuraavassa luvussa perehdytään aurinkolämpökeräinten rakenteeseen ja toimintaan. Esitellään tasokeräimet ja tyhjiöputkikeräimet, jotka ovat tyypillisimmät aurinkolämpökeräimet ja joita käytetään yleisimmin asuinrakennuksissa käyttöveden ja tilojen lämmitykseen tarvittavan energian tuottamiseen. Lisäksi kerrotaan lyhyesti ns. katteettomista keräimistä, joiden käyttökohteita ovat mm. uima-altaat. Tarkastellaan tasokeräimen hyötysuhdetta ja siihen vaikuttavia tekijöitä, joista merkittävimmät ovat keräimen absorptiopinnan ja katteen ominaisuudet. Näissä osissa tapahtuvia optisia häviöitä voidaan pienentää käyttämällä oikeita materiaaleja. Luvun viimeisessä osiossa esitellään yleisimpiä, kaupallisia, selektiivisiä pinnoitteita. Kerrotaan lyhyesti pinnoitteiden valmistusmenetelmistä ja vertaillaan niiden optisia ominaisuuksia.

Aurinkolämpöteknologiaan perehtymisen jälkeen tehdään katsaus aurinkolämmön markkinoihin. Kiina on maailman aurinkolämmön selvä johtaja, jonka markkinat kattoivat 78 % maailman aurinkolämpömarkkinoista vuonna 2004. Euroopan unionissa aurinkolämpömarkkinoiden kasvusta vastaavat suurelta osin vain kolme valtiota: Saksa, Kreikka ja Itävalta. Neljännessä luvussa esitellyllä markkinaselvityksellä on pyritty saamaan kuva Euroopan aurinkolämpömarkkinoiden keräintyypeistä ja hintatasosta. Selvityksessä esitellään kuudelta eurooppalaiselta aurinkokeräinvalmistajalta saatuja

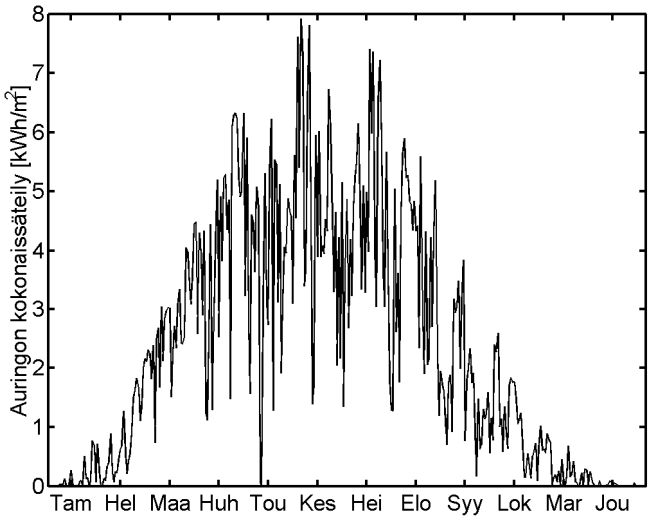
tietoja taso- ja tyhjiöputkikeräinten sekä katteettomien keräinten teknisistä ominaisuuksista ja hintatasosta.

Viimeisessä luvussa keskitytään aurinkolämmön mahdollisuuksiin. Esitetään ESTIF:n (European Solar Thermal Industry Federation) arviot EU:n ja sen jäsenvaltioiden aurinkolämmön teknisestä potentiaalista sekä EU:n ja Suomen aurinkolämmön kasvulle asettamat tavoitteet. EU:n asettaman tavoitteen (100 000 000 m^2 kapasiteetti vuoteen 2010 mennessä) saavuttaminen vaatii aktiivisia, aurinkolämmön käyttöönottoa tukevia toimenpiteitä jokaiselta jäsenvaltiolta. Tyypillisimpiä esteitä aurinkolämmön kasvulle ovat investoinnin korkea hinta, tavanomaisten lämmitysmuotojen edullisuus ja tiedon puute sekä päättäjien että kansalaisten keskuudessa.

Lopuksi tarkastellaan pientalojen aurinkolämmön käytön mahdollisuuksia Suomessa ja sen tarjoamia etuja. Arvioidaan aurinkolämmöllä korvattava osuus 100 m^2:n kokoisessa pientalossa asuvan nelihenkisen perheen lämmönkulutuksesta. Lasketaan tyypillisen pientalon aurinkolämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika ja vuotuiset energiansäästöllä aikaansaadut hiilidioksidipäästövähennykset öljy- ja sähkölämmitystä korvattaessa. Lisäksi arvioidaan pientalojen aurinkolämpöjärjestelmillä saatavat CO_2-päästövähennykset koko maassa.

2 Auringonsäteily

Tässä luvussa tarkastellaan auringonsäteilyä sekä teoreettiselta että kokeelliselta pohjalta. Tarkastelun avulla voidaan arvioida hajasäteilyn ja suoran säteilyn osuudet kokonaissäteilyn mittaustuloksista. Hajasäteilyn ja suoran säteilyn osuuksien selvittämiseksi on käytetty *Collares-Pereira-Rabl-* menetelmää, joka esitellään luvussa 2.1.3. Kun hajasäteilyn ja suoran säteilyn osuudet tiedetään, voidaan horisontaalitasoon tulevan kokonaissäteilyn mittaustuloksista lähtien määrittää sekä etelään suunnatulle että kääntyvälle pinnalle tulevan kokonaissäteilyn määrä kaltevuuskulman funktiona (Luvut 2.1.3 – 2.1.4). Kokonaissäteilytiedostona käytetään Kihniön Aitonevan sääaseman mittaustuloksia vuosilta 2004 ja 2005 (Kuva 2.1). Kaikki laskut ja kuvat on tehty Matlab-ohjelmalla ja ne pätevät Aitonevan koordinaateilla (62.2° P ja 23.3° I). Ilmakehän ulkopuolisen auringonsäteilyn (engl. *extraterrestrial solar radiation*) kuvaamiseen tarvitaan avaruusgeometrisia käsitteitä ja kulmia, jotka esitellään luvussa 2.1.1.



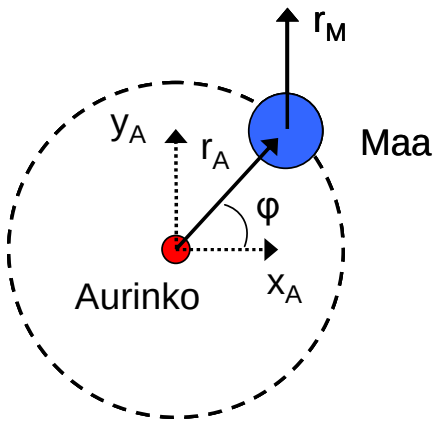
Kuva 2.1 Auringon kokonaissäteily maan pinnan horisontaalitasoon Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)

2.1 Auringonsäteily horisontaalitasolle

2.1.1 Avaruusgeometriaa

Ilmakehän ulkopuolisen auringonsäteilyn määrityksessä on ymmärrettävä geometriaa, joka kuvaa maan sijainnin aurinkoon nähden ja tarkastelupaikan sijainnin maan pinnalla. Tarkastelussa tarvittavat kulmat ovat säteilyn tulokulma θ, deklinaatiokulma δ, leveysaste ϕ ja tuntikulma ω.

Maa kiertää aurinkoa radallaan siten, että maan pyörimisakselin ja sen ratatasoa vastaan kohtisuoran pinnan välinen kulma on $\varepsilon = 23{,}45^{\circ}$. Maan kallistuskulma ja maan sijainti kiertoradallaan määrittelevät deklinaatiokulman, jolla tarkoitetaan maan ja auringon keskipisteet yhdistävän janan ja sen päiväntasaajalle tehdyn projektion välistä kulmaa. Deklinaatiokulma saa arvoja väliltä $-\varepsilon \leq \delta \leq \varepsilon$ ja sille voidaan johtaa lauseke auringon säteilyvektorin r_A ja maan akselivektorin r_M (projektio xy- tasoon) pistetulosta (Kuva 2.2).



Kuva 2.2 Deklinaatiokulman lausekkeen johtaminen auringon säteilyvektorin r_A ja maan akselivektorin r_M (projektio x, y- tasoon) avulla

Päivänä n maa on pyörähtänyt auringon ympäri kulman $\varphi = \Omega(\Delta + n)$ verran, missä $\Omega = 360^\circ / 365$ on maan kulmanopeus auringon ympäri ja Δ saa arvon 284, joka asettaa deklinaatiokulmalle arvon nolla syys- ja kevätpäivän tasauksille (x- akselilla) ja ääriarvot kesä- ja talvipäivän seisauksille (y- akselilla).

Auringon säteilyvektorin komponentit x- ja y- akselien suuntaan ovat

$x_A = \cos[\Omega(\Delta + n)]$ ja

$y_A = \sin[\Omega(\Delta + n)]$.

Vastaavat komponentit maan akselivektorille ovat

$x_M = 0$ ja

$y_M = 1$.

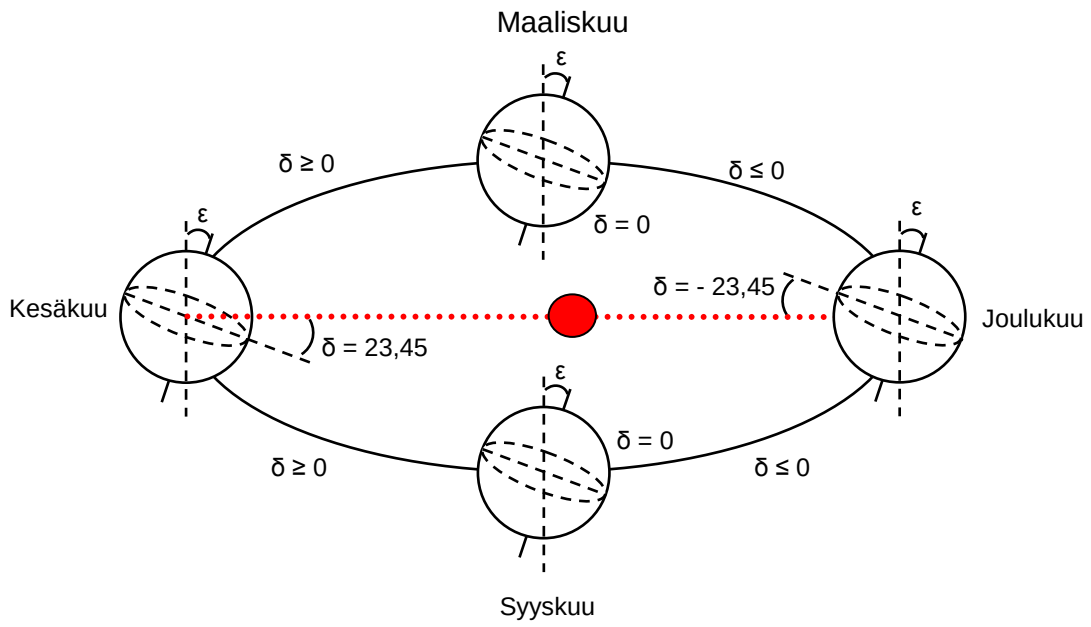
Auringon säteilyvektorin ja maan akselivektorin pistetulo on

$$\vec{r}_A \cdot \vec{r}_M = x_A \cdot x_M + y_A \cdot y_M = \sin[\Omega(\Delta + n)].$$

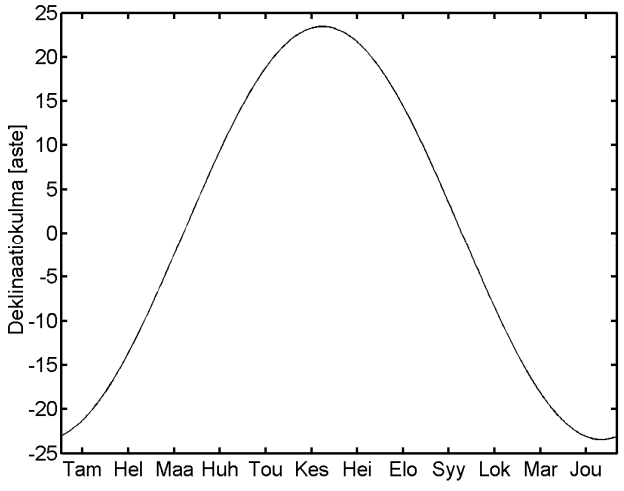
Tällöin deklinaatiokulma vuodenpäivänä n on [3]

(2.1) $$\delta = \delta_{\max} \sin(\Omega(\Delta + n)) = 23{,}45^\circ \sin(\frac{360^\circ}{365}(284 + n)).$$

Kuvasta 2.3 nähdään maan kiertorata auringon ympäri ja maan sijaintia vastaavat deklinaatiokulmat tai niiden suuruusluokat. Kuvassa 2.4 on esitetty deklinaatiokulman riippuvuus vuodenpäivästä n yhtälön (2.1) mukaisesti.



Kuva 2.3 Maan kiertorata auringon ympäri ja deklinaatiokulman muuttuminen



Kuva 2.4 Deklinaatiokulman riippuvuus vuodenpäivästä

Kun ilmakehän vaikutusta ei oteta huomioon, maan pinnan horisontaalitasolle tulevan suoran säteilyn määrä riippuu vain säteilyn tulokulmasta θ eli säteilyn ja säteilyä vastaanottavan tason normaalin välisestä kulmasta. Horisontaalitason suuntaisen pinnan tapauksessa säteilyn tulokulman suuruus riippuu ajankohdan lisäksi vain tarkastelupaikan leveysasteesta ϕ. Leveysaste määritellään maan pinnalla olevan tarkastelupisteen ja maan keskipisteen yhdistävän janan ja sen päiväntasaajalle tehdyn projektion välisenä kulmana siten, että pohjoisella pallonpuoliskolla leveysaste on positiivinen ja eteläisellä pallonpuoliskolla negatiivinen.

Kulman θ komplementtikulma $\alpha = 90^\circ - \theta$ on auringon korkeuskulma eli horisontaalitason ja auringonsäteilyn välinen kulma. Sen päivittäinen suurin arvo $\alpha_{\max}$ voidaan helposti laskea. Se määräytyy tarkastelupaikan leveysasteen ϕ ja deklinaatiokulman δ mukaan siten, että

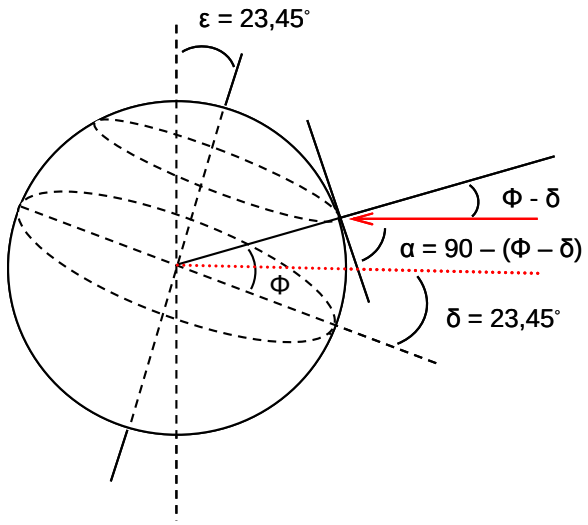
(2.2a) $\alpha_{\max} = 90^\circ - (\phi - \delta)$, kun $\phi \geq \delta$ ja

(2.2b) $\alpha_{\max} = 90^\circ - (\phi + \delta)$, kun $\phi \leq \delta$.

Kuvassa 2.5 havainnollistetaan tilannetta kesäkuun 21. päivänä, jolloin pohjoinen pallonpuolisko on kääntyneenä aurinkoon päin ja deklinaatiokulma ja maan kaltevuuskulma ovat samat.

2.1.2 Aurinkoaika ja standardiaika

Auringon sijainti paikallisen pituuspiirin suhteen muuttuu maan pyöriessä akselinsa ympäri 15° tunnissa ja se määritellään tuntikulman ω avulla. Tuntikulma ilmoittaa radiaaneina auringon poikkeaman itään tai länteen tarkastelijan pituuspiiristä. Kun aurinko on itäisellä puolella pituuspiiriä, tuntikulma on negatiivinen. Läntisellä pituuspiirin puolella tuntikulma saa positiivisia arvoja ja pituuspiirin kohdalla tuntikulma on nolla. [3]



Kuva 2.5 Auringon suurin korkeuskulma kesäkuun 21. päivänä leveyspiirillä ϕ

Aurinkoajan määritelmä perustuu tuntikulmaan siten, että auringon ollessa pituuspiirin kohdalla ja tuntikulman ollessa nolla on aurinkoajan keskipäivä. Negatiiviset tuntikulman arvot vastaavat aurinkoajan aamupäivää ja positiiviset tuntikulman arvot aurinkoajan iltapäivää. Kun tiedetään, että maa pyörii akselinsa ympäri nopeudella 15°/tunti, tuntikulmaa ω vastaava aurinkoaika on

(2.3) $$Aurinkoaika = t_{sl} = 12 + \frac{\omega}{15^{\circ}/h} .$$

Aurinkoaika on paikkaan sidottu ja vaihtelee aikavyöhykkeenkin sisällä riippuen tarkastelijan pituuspiiristä. Aurinkoaikaa vastaava paikallinen standardiaika määritetään kahden korjaustekijän avulla, joista toinen ottaa huomioon tarkastelijan sijainnin ja toinen maan pyörimisnopeudessa tapahtuvat häiriöt. Maa pyörähtää yhden asteen neljässä minuutissa, mikä tarkoittaa, että jos tarkastelija on pituuspiirillä L_{loc}, ja pituuspiiri, johon paikallinen aika perustuu, on L_{st}, niin pituuspiirien erotuksesta aiheutuva tarkastelupisteen aurinkoajan ja paikallisen standardiajan erotus on $4(L_{st} - L_{loc})$ minuuttia. Toinen korjaustermi ottaa huomioon maan pyörimisnopeudessa tapahtuvat

häiriöt. Sen suuruus eri vuodenpäivinä nähdään kuvasta 2.6 ja se voidaan kirjoittaa muotoon [3]

(2.4) $$E = 229{,}2 \cdot (0{,}000075 + 0{,}001868 \cos B - 0{,}032077 \sin B - 0{,}014615 \cos 2B - 0{,}04089 \sin 2B)$$, missä

(2.5) $$B = (n-1)\frac{360}{365}.$$

Nyt aurinkoajan t_{sl} ja standardiajan t_{st} erotus tarkastelijan pituuspiirillä on [3]

(2.6) $$t_{sl} - t_{st} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E.$$

2.1.3 Auringon nousuajat, auringon laskuajat ja päivän pituus

Säteilyn tulokulma voidaan kirjoittaa luvussa 2.1.1 esiteltyjen kulmien ja pallotrigonometrian avulla muotoon [4]

(2.7) $$\cos\theta = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta.$$

Auringon nousu- ja laskuhetkien tuntikulmat $\pm\omega_0$ saadaan sijoittamalla yhtälöön (2.7) säteilyn tulokulmalle arvo $\theta = 90^\circ$. Tällöin yhtälö (2.7) saadaan muotoon

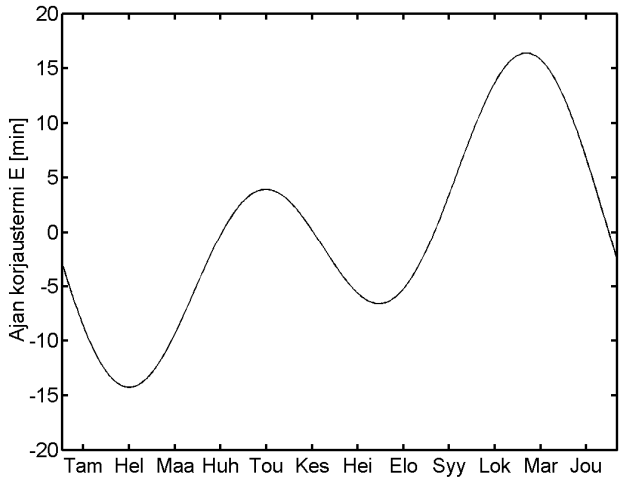
(2.8) $$\cos\omega_0 = -\frac{\sin\phi \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta} = -\tan\phi \tan\delta,$$

ja tuntikulmat voidaan lausua deklinaatiokulman ja leveysasteen funktiona

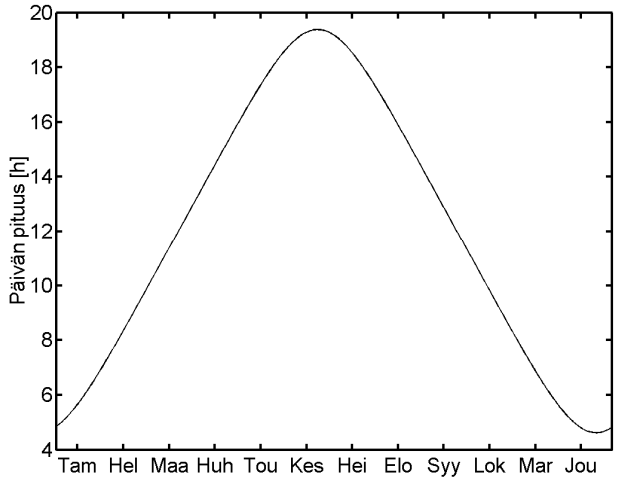
(2.9) $$\omega_0 = \arccos(-\tan\phi \tan\delta).$$

Auringon nousu- ja laskuhetkien tuntikulmia $\pm\omega_0$ vastaavat aurinkoajat voidaan laskea yhtälöstä (2.3) ja näitä vastaavat standardiajat yhtälöstä (2.6). Tuntikulman ω_0 avulla voidaan selvittää myös päivän pituus. Vuorokaudessa valoisan ajan osuus on $2|\omega_0|/360^\circ$, ja päivän pituus d tunteina (Kuva 2.7) on tällöin

$$d = \frac{2|\omega_0|}{360^\circ} \cdot 24\,h\,. \tag{2.10}$$



Kuva 2.6 Aurinkoajan korjaustermi E



Kuva 2.7 Päivän pituus Kihniön Aitonevalla

2.1.4 Ilmakehän ulkopuolinen auringonsäteily

Ilmakehän ulkopuolella säteilyä vastaan kohtisuoralle pinnalle tuleva auringonsäteily päivänä n on [3]

(2.11) $$G_{0n} = G_{sc}\left[1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right)\right],$$

missä $G_{sc} = 1367\ W/m^2$ on auringonsäteilyn määrä aikayksikössä säteilyä vastaan kohtisuoralle pinnalle ilmakehän ulkopuolella eli aurinkovakio, joka maan kiertoradan eksentrisyydestä johtuen muuttuu hieman ajan funktiona yllä osoitetulla tavalla.

Jos ilmakehän vaikutusta ei oteta huomioon, maan pinnan horisontaalitasolle tuleva suora auringonsäteily on

(2.12) $$G_0 = G_{0n}\cos\theta.$$

Yhtälöitä (2.7) ja (2.11) käyttäen saadaan

(2.13) $$G_o = G_{sc}\left[1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right)\right](\cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta),$$

josta integroimalla ajan suhteen auringonnousun tuntikulmasta auringonlaskun tuntikulmaan saadaan päivittäinen horisontaalitasolle tuleva ilmakehän ulkopuolinen auringonsäteily yksikössä Wh/m^2 [3]

(2.14) $$H_0 = \int_{-t_0}^{t_0} G_0\, dt = \frac{12}{\pi}\int_{-\omega_0}^{\omega_0} G_0\, d\omega$$

$$= \frac{12 G_{sc}}{\pi}\left[1+0{,}033\cos\left(\frac{360\,n}{365}\right)\right]\int_{-\omega_s}^{\omega_s}(\cos\phi\cos\delta\cos\omega+\sin\phi\sin\delta)\,d\omega$$

$$= \frac{24 G_{sc}}{\pi}\left[1+0{,}033\cos\left(\frac{360\,n}{365}\right)\right]\left(\omega_0\sin\delta\sin\phi+\cos\delta\cos\phi\sin\omega_0\right).$$

Kuvaan 2.8 on piirretty yhtälön (2.14) mukaisesti lasketun päivittäisen ilmakehän ulkopuolisen auringonsäteilyn ja mitatun, maan horisontaalitasoon tulevan auringonsäteilyn (Kuva 2.1) vaihtelu vuoden aikana Aitonevalla. Kokonaissäteilyn mittaustulokset on keskiarvostettu käyttäen seitsemän päivän painotettua keskiarvoa siten, että päivittäinen kokonaissäteily päivänä i on

(2.15) $$H_{ave,i} = \frac{1}{k}\left[k_1\cdot H_i + k_2\,(H_{i+1}+H_{i-1}) + k_3\,(H_{i+2}+H_{i-2}) + k_4\,(H_{i+3}+H_{i-3})\right],$$

missä $i = 4, 5, 6, \ldots 353$

$k_1 = 4,\ k_2 = 3,\ k_3 = 2,\ k_4 = 1$ ja

$k = k_1 + 2k_2 + 2k_3 + 2k_4 = 16$.

2.1.5 Päivittäinen kirkkausaste, hajasäteilyn ja suoran säteilyn määrät

Päivittäinen kirkkausaste [3]

(2.16) $$K_T = \frac{H}{H_0}$$

on maan pinnan horisontaalitasolle tulleen päivittäisen kokonaissäteilyn H osuus ilmakehän ulkopuolisesta päivittäisestä auringonsäteilystä H_0. Kuvassa 2.9 esitetään päivittäisen kirkkausasteen jakauma Aitonevalla. Ensimmäinen pylväs koostuu päivistä, jolloin auringonsäteily maan pinnalle on ollut nolla. Päivän kirkkausasteen avulla

voidaan arvioida hajasäteilyn osuutta päivittäisestä horisontaalitasoon tulevasta kokonaissäteilystä. Hajasäteily määritetään tässä *Collares-Pereira-Rabl-* menetelmällä, jonka mukaan päivittäinen hajasäteily on [3]

(2.17a) $H_d = 0{,}99\,H$, kun $K_T \leq 0{,}17$

(2.17b) $H_d = (1{,}188 - 2{,}272\,K_T + 9{,}473K_T^2 - 21{,}865K_T^3 + 14{,}648\,K_T^4)\,H$,

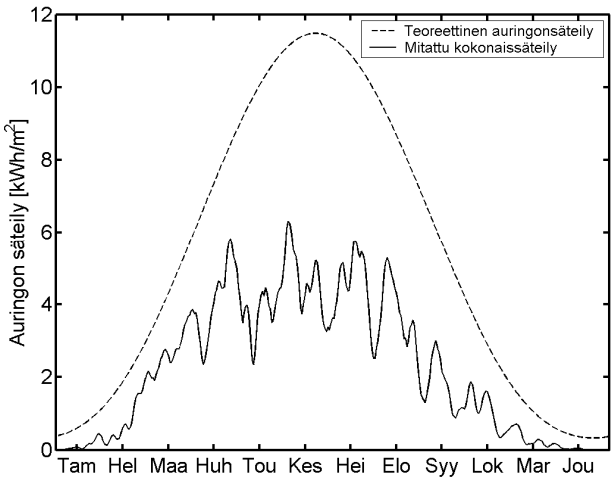
kun $0{,}17 < K_T < 0{,}75$

(2.17c) $H_d = (-0{,}54K_T + 0{,}632)H$, kun $0{,}75 < K_T < 0{,}80$

(2.17d) $H_d = 0{,}2\,H$, kun $K_T > 0{,}80$.

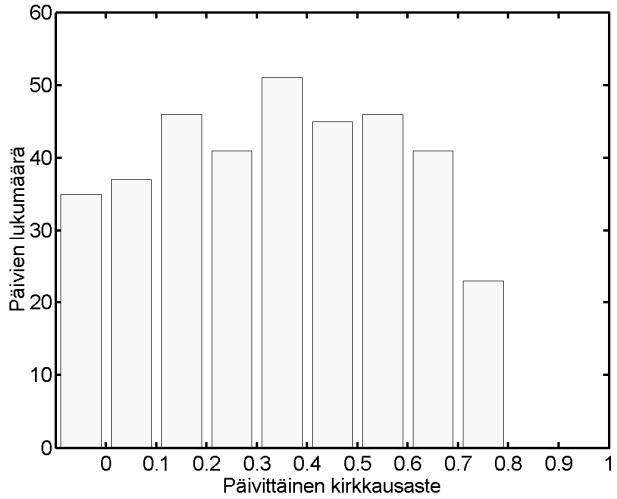
Kokonaissäteily horisontaalitasoon koostuu hajasäteilystä ja suorasta säteilystä, jolloin päivittäinen suoran säteilyn määrä on

(2.18) $H_b = H - H_d$.

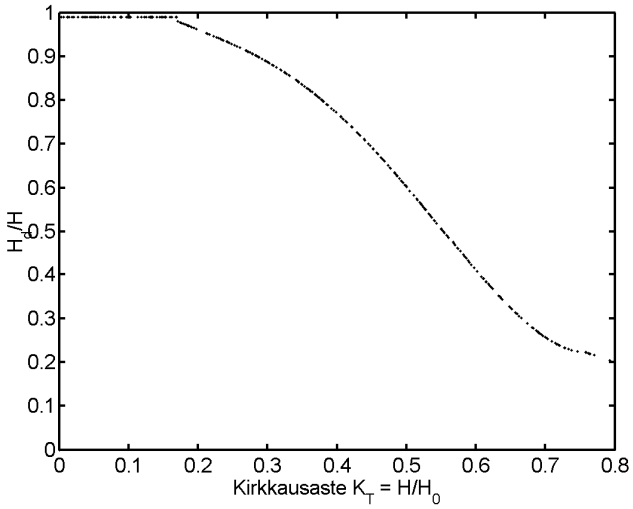


Kuva 2.8 Mitattu auringon kokonaissäteily maanpinnan horisontaalitasolle (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004) ja ilmakehän ulkopuolinen auringonsäteily Kihniön Aitonevalla

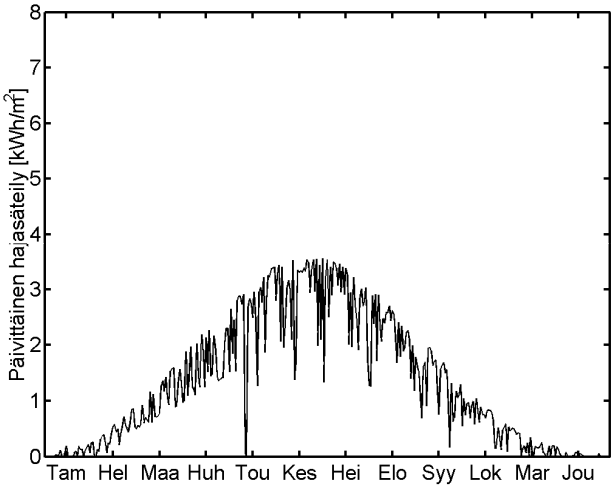
Hajasäteilyn ja suoran säteilyn osuudet vaihtelevat sään mukaan. Niiden päivittäiset määrät Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004) on esitetty kuvissa 2.11 ja 2.12. Päivän kirkkausaste ja päivittäisen hajasäteilyn määrä riippuvat toisistaan kuvassa 2.10 esitetyllä tavalla siten, että kirkkausasteen kasvaessa hajasäteilyn osuus päivittäisestä kokonaissäteilystä pienenee.



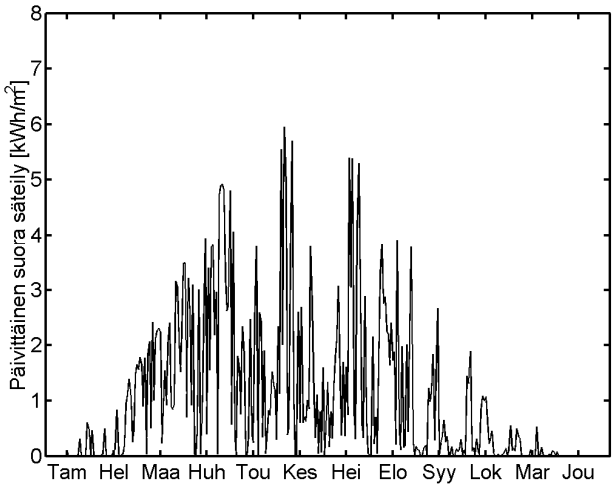
Kuva 2.9 Päivittäinen kirkkausaste Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)



Kuva 2.10 Päivittäisen hajasäteilyn määrän riippuvuus kirkkausasteesta



Kuva 2.11 Päivittäinen hajasäteily horisontaalitasoon Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)



Kuva 2.12 Päivittäinen suora säteily horisontaalitasoon Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)

2.2 Auringonsäteily etelään suunnatulle keräimelle

2.2.1 Kokonaissäteilyn riippuvuus kaltevuuskulmasta

Päivittäinen kokonaissäteily H_T etelään suunnatulle kaltevalle tasolle koostuu suorasta säteilystä $H_b R_{bd}$, hajasäteilystä $H_d R_d$ ja heijastuneesta säteilystä HR_r siten, että [3]

(2.19) $$H_T = H_b R_{bd} + H_d R_d + HR_r \text{, missä}$$

R_{bd} on päivittäisen suoran säteilyn kaltevuuskerroin,

R_d on päivittäisen hajasäteilyn kaltevuuskerroin ja

R_r on päivittäisen heijastuneen säteilyn kaltevuuskerroin.

Päivittäisen kokonaissäteilyn kaltevuuskerroin, joka riippuu päivästä, tarkastelupisteen sijainnista ja säteilyä vastaanottavan pinnan kaltevuuskulmasta on [3]

(2.20) $$R_{bd} = \frac{\cos(\phi-\beta)\cos\delta\sin\omega_{st} + \omega_{st}\sin(\phi-\beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\sin\omega_s + \omega_s\sin\phi\sin\delta},$$

missä auringonlaskun tuntikulma kaltevalle tasolle on [3]

(2.21) $$\omega_{st} = \arccos(-\tan\delta\tan(\phi-\beta)) .$$

Hajasäteilyn kaltevuuskerroin [3]

(2.22) $$R_d = \frac{1+\cos\beta}{2}$$

riippuu vain pinnan kaltevuuskulmasta.

Heijastuneen säteilyn kaltevuuskertoimeen [3]

$$R_r = \rho_g \frac{1-\cos\beta}{2} \tag{2.23}$$

vaikuttaa pinnan kaltevuuden lisäksi ympäristön heijastavuus ρ_g. Tässä työssä maan pinnan heijastavuudelle käytetään joulu-huhtikuun välisenä aikana, jolloin maan heijastavuus lumipeitteen vuoksi on suuri, arvoa 0,9. Kesäaikana (touko-elokuu) maan pinnan heijastavuus on pienimmillään ja sille käytetään arvoa 0,2. Syys-marraskuussa käytetään maan pinnan keskimääräistä heijastavuuden arvoa 0,36.

2.2.2 Kuukausittainen optimaalinen kaltevuuskulma

Päivittäisen kokonaissäteilyn määrä etelään suunnatulle keräimelle lasketaan yhtälön (2.19) mukaisesti kaltevuuskulmilla 0°, 5°, 10°, …, 85°, 90°. Määritetään jokaisen kuukauden keskimääräinen päivittäinen kokonaissäteily kunkin kaltevuuskulman arvolla (Kuva 2.13) ja valitaan kuukauden optimaaliseksi kaltevuuskulmaksi kulma, jolla keräimelle tuleva kokonaissäteilyn määrä on suurin. Optimaaliset kaltevuuskulmat on koottu taulukkoon 2.1. Optimaalisia kaltevuuskulmia käyttäen lasketaan kuukausikohtaiset, keskimääräiset päivittäisen suoran säteilyn (Kuva 2.18), hajasäteilyn (Kuva 2.19) ja heijastuneen säteilyn (Kuva 2.20) määrät etelään suunnatulle keräimelle.

2.3 Auringonsäteily kääntyvälle keräimelle

2.3.1 Kokonaissäteilyn riippuvuus kaltevuuskulmasta

Päivittäisen kokonaissäteilyn määrä kääntyvälle keräimelle määritetään samoin kuin etelään suunnatulle keräimelle käyttämällä suoran säteilyn kaltevuuskertoimena kääntyvän keräimen vastaavaa arvoa [3]

(2.24) $$R_{bd,track} = \frac{\int_{-\omega_s}^{\omega_s} \cos\theta}{\int_{-\omega_s}^{\omega_s} \cos\theta_z} = \frac{\int_{-\omega_s}^{\omega_s} \cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta}{\int_{-\omega_{st}}^{\omega_{st}} \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta} .$$

Päivittäinen kokonaissäteily kääntyvälle keräimelle on

(2.25) $$H_{T,track} = H_b R_{bd,track} + H_d R_d + HR_r .$$

2.3.2 Kuukausittainen optimaalinen kaltevuuskulma

Samoin kuin etelään suunnatulle keräimelle määritetään kääntyvän keräimen optimaalinen kaltevuuskulma jokaiselle kuukaudelle selvittämällä kulma, jolloin keräimelle tulevan kuukauden keskimääräisen päivittäisen kokonaissäteilyn määrä on suurin (Kuva 2.14). Optimaaliset kuukausittaiset kaltevuuskulmat on esitetty taulukossa 2.1. Lisäksi esitetään optimaalisia kaltevuuskulmia käyttäen lasketut kääntyvälle keräimelle saapuvat, kuukauden keskimääräiset suoran säteilyn (2.18), hajasäteilyn (2.19) ja heijastuneen säteilyn (2.20) päivittäiset määrät.

2.4 Tulosten tarkastelu

Taulukossa 2.1 ja kuvassa 2.15 esitetyistä etelään suunnatun ja kääntyvän keräimen optimaalisista kuukausittaisista kaltevuuskulmista nähdään, että ero keräinten kaltevuuskulmissa on suurin kesäaikaan. Jotta etelään suunnatun keräimen päivän aikana vastaanottama auringon kokonaissäteilyn määrä olisi mahdollisimman suuri, on kesäaikana, kun päivä on pitkä, kaltevuuskulman oltava 10–25 astetta. Keräimen matala kaltevuus mahdollistaa auringonsäteilyn hyödyntämisen aamun ja illan aikana ja maksimoi näin päivittäisen säteilyannoksen keräimelle, mutta pienentää keräimelle saapuvaa hetkittäisen säteilyn määrää keskipäivällä. Etelään suunnatun keräimen optimaalisten kuukausittaisten kaltevuuskulmien keskiarvo on 56 astetta.

Kääntyvän keräimen optimaalinen kaltevuuskulma kesäaikana (50–55 astetta) on huomattavasti suurempi kuin etelään suunnatun keräimen. Tässä tarkasteltu kääntyvä keräin liikkuu jatkuvasti niin, että se on koko ajan, auringonnoususta auringonlaskuun asti, kääntyneenä kohti aurinkoa. Aamun ja illan aikana tuleva auringonsäteily hyödynnetään kääntymismekanismin avulla ja lisäksi hetkittäinen keräimelle tuleva säteily voidaan maksimoida kaltevuuskulman avulla. Kääntyvän keräimen optimaalisten kaltevuuskulmien keskiarvo on 69 astetta.

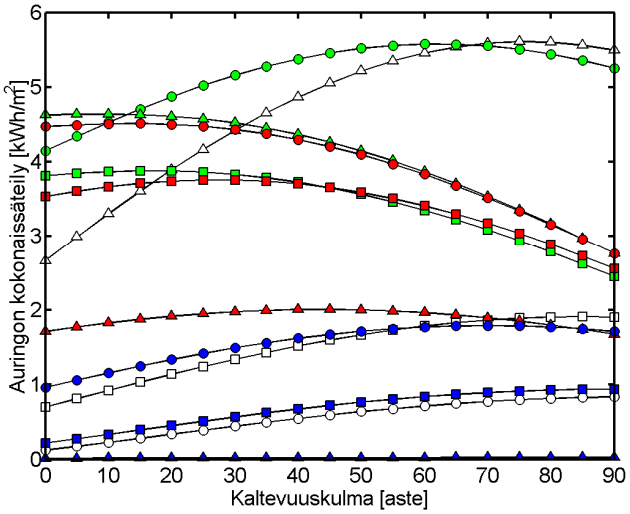
Taulukossa 2.1 esitetään lisäksi kunkin kuukauden keskimääräinen päivittäinen kokonaissäteily keräimille, jotka ovat optimaalisessa kaltevuuskulmassaan. Nähdään, että keräimet saavat suurimmat säteilyannokset maalis- ja huhtikuussa, jolloin myös kääntyvällä keräimellä saatu hyöty on suurin. Optimaalisessa kaltevuuskulmassa kääntyvän keräimen säteilyannos on kesäkuukausina noin 1,4 kertaa suurempi kuin optimaalisessa kaltevuuskulmassa etelään suunnatun keräimen säteilyannos.

Huhtikuussa on keskimääräinen päivittäinen kokonaissäteily horisontaalitasolle ollut erityisen suuri (Kuva 2.16). Lisäksi sekä maalis- että huhtikuussa on suoran säteilyn osuus kokonaissäteilystä ollut huomattava, jopa suurempi kuin kesä- ja heinäkuussa.

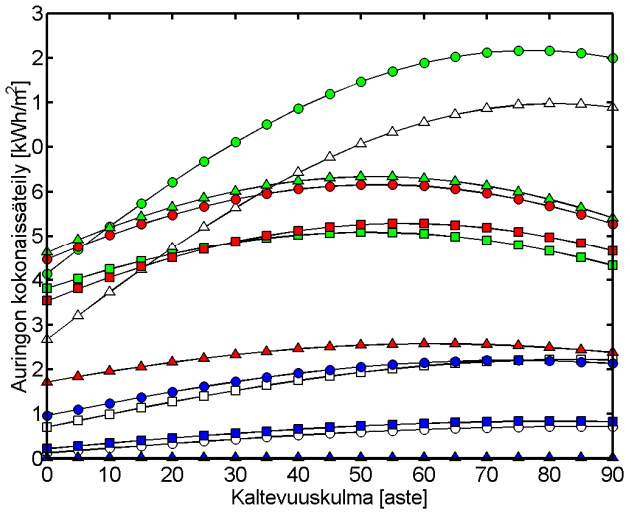
Maalis- ja huhtikuu ovat myös ainoat kuukaudet, jolloin suoran säteilyn osuus kokonaissäteilystä on ollut suurempi kuin hajasäteilyn osuus (Kuva 2.16).

Keskimääräisen keräinten vastaanottaman päivittäisen kokonaissäteilyn huippukohdat nähdään myös kuvasta 2.17. Kuvat 2.18, 2.19 ja 2.20 esittävät erikseen suoran säteilyn, hajasäteilyn ja heijastuneen säteilyn osuudet keräinten päivittäisestä säteilyannoksesta ja ne selittävät omalta osaltaan säteilyhuippujen muodostumisen maalis- ja huhtikuulle.

Keräin vastaanottaa ympäröivän maan pinnasta heijastunutta säteilyä sitä enemmän mitä suurempi on keräimen kaltevuuskulma. Keräimen kaltevuuskulman ollessa nolla on heijastunut säteily keräimelle nolla. Keräimelle tulevan hajasäteilyn määrä käyttäytyy päinvastoin, mikä nähdään myös luvussa 2.1 esitellystä teoriasta. Hajasäteilyn kaltevuuskerroin (Yhtälö 2.22) saa suurimman arvonsa, kun kaltevuuskulma on mahdollisimman pieni. Heijastuneen säteilyn kaltevuuskerroin (Yhtälö 2.23) pienenee kaltevuuskulman kasvaessa. Kuvassa 2.19 etelään suunnatun keräimen hajasäteilyannos on pienemmän kaltevuuskulmansa ansiosta kääntyvän keräimen säteilyannosta suurempi. Hajasäteilyn määrä keräimille on suurimmillaan kesäkuussa, jolloin hajasäteilyn määrä horisontaalitasoonkin on suurin ja keräinten kaltevuuskulmat ovat pienet. Kuvassa 2.20 nähtävä keräimille tulevan heijastuneen säteilyn huippu huhtikuussa johtuu keräinten suuresta kaltevuuskulmasta, huhtikuun suuresta kokonaissäteilyn määrästä sekä maan lumipeitteen heijastavuudesta.



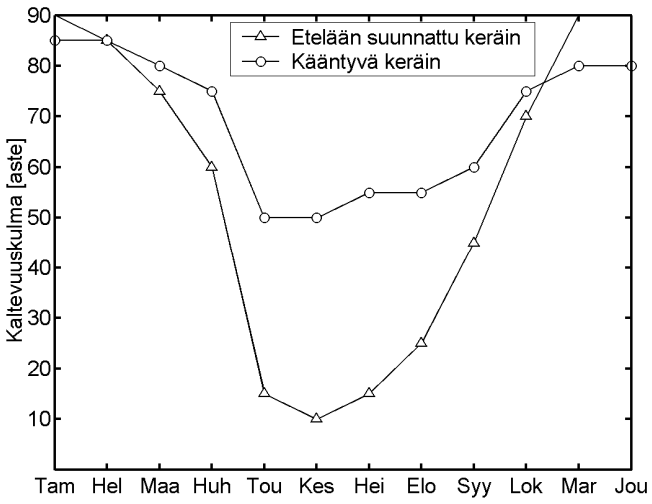
Kuva 2.13 Keskimääräinen päivittäinen auringon kokonaissäteily etelään suunnatulle keräimelle eri kaltevuuskulmilla Kihniön Aitonevalla (valk. pallo = tammi-, valk. neliö = helmi-, valk. kolmio = maaliskuu, vihreä pallo, neliö ja kolmio = huhti-, touko- ja kesäkuu, punaiset = heinä-, elo- ja syyskuu, siniset = loka-, marras- ja joulukuu)



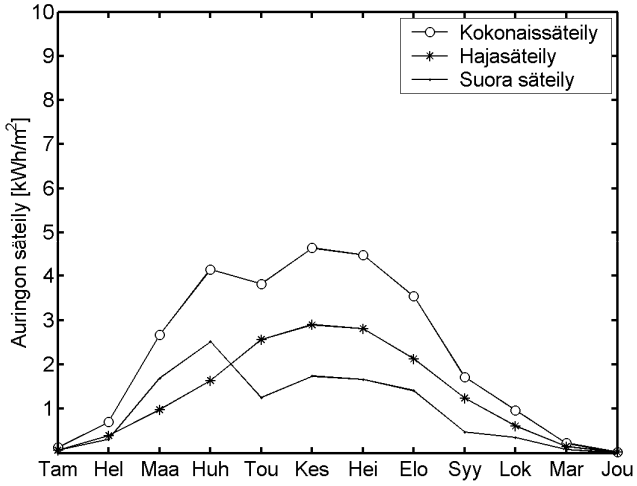
Kuva 2.14 Keskimääräinen päivittäinen auringon kokonaissäteily kääntyvälle keräimelle eri kaltevuuskulmilla Kihniön Aitonevalla (valk. pallo = tammi-, valk. neliö = helmi-, valk. kolmio = maaliskuu, vihreä pallo, neliö ja kolmio = huhti-, touko- ja kesäkuu, punaiset = heinä-, elo- ja syyskuu, siniset = loka-, marras- ja joulukuu)

Taulukko 2.1 Etelään suunnatun ja kääntyvän keräimen optimaaliset kaltevuuskulmat sekä keskimääräinen päivittäinen kokonaissäteily keräimille optimaalisessa kaltevuuskulmassaan Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)

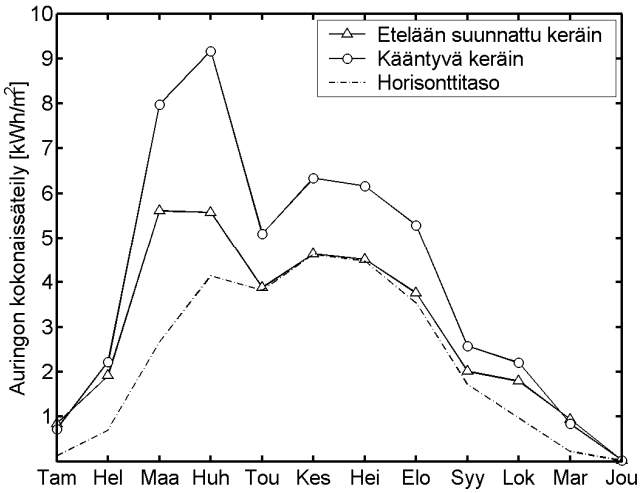
	Etelään suunnattu keräin		Kääntyvä keräin		
	β_t [aste]	**H_t [kWh/m^2]**	**β_{track} [aste]**	**H_{track} [kWh/m^2]**	**H_{track}/H_t**
Tammi	90	0,84	85	0,72	0,86
Helmi	85	1,91	85	2,22	1,16
Maalis	75	5,61	80	7,97	1,42
Huhti	60	5,58	75	9,17	1,64
Touko	15	3,88	50	5,09	1,31
Kesä	10	4,64	50	6,34	1,37
Heinä	15	4,51	55	6,16	1,37
Elo	25	3,76	55	5,29	1,41
Syys	45	2,01	60	2,57	1,28
Loka	70	1,79	75	2,20	1,23
Marras	90	0,94	80	0,84	0,89
Joulu	90	0,03	80	0,02	0,83
Keskiarvo	56	2,96	69	4,05	1,23



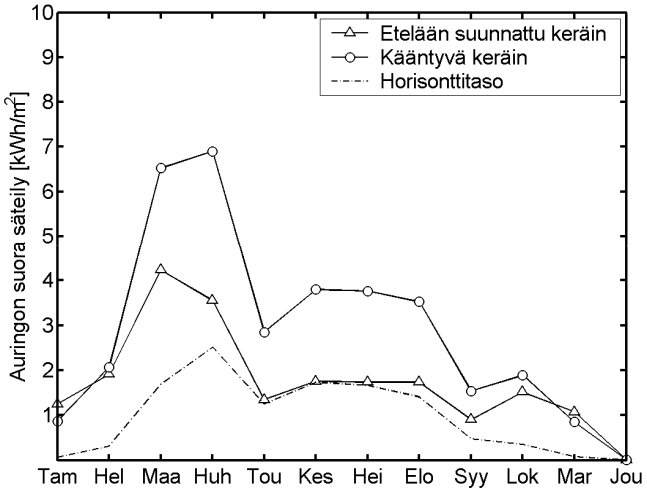
Kuva 2.15 Etelään suunnatun ja kääntyvän keräimen optimaaliset kaltevuuskulmat Kihniön Aitonevalla



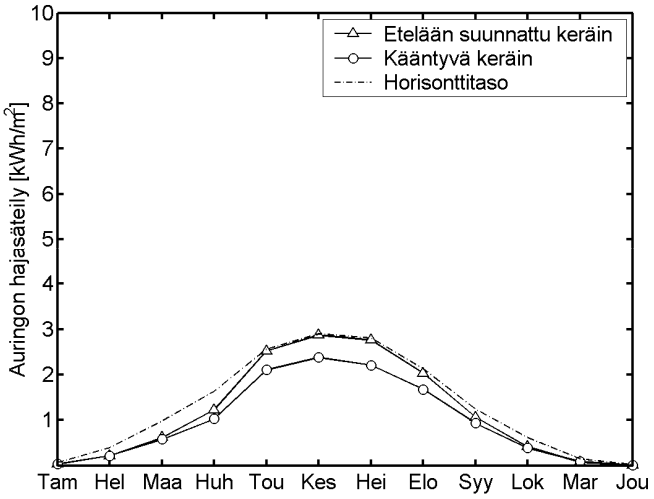
Kuva 2.16 Kuukauden keskimääräinen päivittäinen kokonaissäteily, hajasäteily ja heijastunut säteily horisontaalitasoon Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)



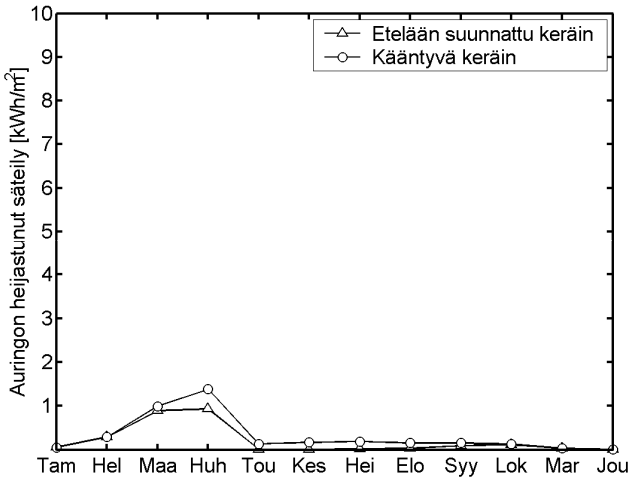
Kuva 2.17 Kuukauden keskimääräinen päivittäinen kokonaissäteily optimaalisessa kulmassa etelään suunnatulle ja kääntyvälle keräimelle Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)



Kuva 2.18 Kuukauden keskimääräinen päivittäinen suora säteily optimaalisessa kulmassa etelään suunnatulle ja kääntyvälle keräimelle Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)



Kuva 2.19 Kuukauden keskimääräinen päivittäinen hajasäteily optimaalisessa kulmassa etelään suunnatulle ja kääntyvälle keräimelle Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)



Kuva 2.20 Kuukauden keskimääräinen päivittäinen heijastunut säteily optimaalisessa kulmassa etelään suunnatulle ja kääntyvälle keräimelle Kihniön Aitonevalla (1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004)

3 Aurinkolämpökeräimet

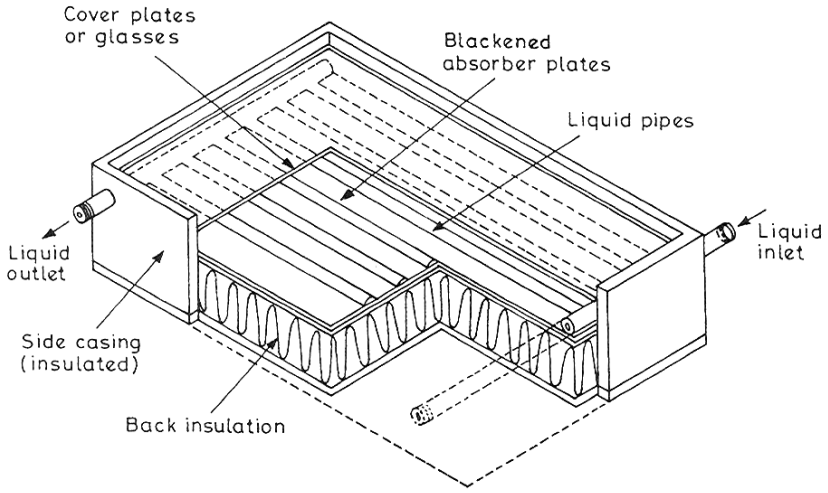
Tässä luvussa perehdytään kahteen yleiseen aurinkolämpökeräintyyppiin - taso- ja tyhjiöputkikeräimeen - sekä esitellään lyhyesti mm. uima-altaiden lämmitykseen soveltuvat katteettomat aurinkokeräimet. Keräinten yleisen esittelyn jälkeen keskitytään keräimen tärkeimpään osaan, sen absorptiopintaan (Luku 3.2). Tutustutaan tasokeräimen hyötysuhteeseen ja selvitetään sen riippuvuus absorptiopinnan ja katelasin optisista (heijastus- ja absorptio) ominaisuuksista sekä auringonsäteilyn että lämpösäteilyn aallonpituusalueilla. Luvussa 3.3 esitellään yleisesti ns. selektiivinen absorptiopinnoite, sen ominaisuudet ja rakennevaihtoehdot. Lopuksi perehdytään muutamiin kaupallisiin, selektiivisiin absorptiopinnoitteisiin, joiden valmistusmenetelmistä ja ominaisuuksista kerrotaan lyhyesti.

3.1 Keräintyypit

Aurinkolämpökeräin muuntaa auringon säteilyenergiaa lämmöksi. Keräimen on pystyttävä mahdollisimman tehokkaasti keräämään siihen saapuva auringon säteilyenergia, muuntamaan se lämpöenergiaksi ja siirtämään lämmönsiirtonesteeseen ilman merkittäviä hukkavirtoja. Lämmönsiirtonesteen sijaan voidaan lämpö siirtää myös keräimen läpi kiertävään ilmaan. Tuotetun lämmön käyttökohde riippuu keräintyypistä. Taso- ja tyhjiöputkikeräimen tuottama lämpö voidaan hyödyntää mm. käyttöveden tai rakennusten lämmityksessä, ilmastoinnissa tai teollisuuden prosessilämpönä. Keräimet voidaan myös integroida suureksi keräinkentäksi, joka tuottaa lämpöä kaukolämpöverkkoon. Matalan lämpötilan käyttökohteita ovat mm. uima-altaat. Korkeita lämpötiloja vaativissa kohteissä käytetään auringonsäteilyä keskittäviä keräimiä (engl. *concentrating collectors*), joissa säteilyä kerätään tehokkaasti heijastavien peilipintojen ja keräinten kääntymismekanismien avulla. Säteilyä keskittävät keräimet ja ilmakiertoiset keräimet on jätetty tämän selvityksen ulkopuolelle.

3.1.1 Tasokeräimet

Kuvassa 2.1 on esitetty tasokeräimen (engl. *flat plate collector*) perusrakenne ja sen tärkeimmät osat: keräimen runko, kate, eristekerros, absorptiopinta ja lämmönsiirtoputkisto. Runko ja kate suojaavat absorptiolevyä ja eristekerrosta estäen mm. niiden kostumisen. Rungon rakennemateriaalina käytetään yleisimmin alumiinia. Kate toimii suojauksen lisäksi myös lämpöeristeenä. Se läpäisee tehokkaasti auringon lyhytaaltoista säteilyä ja heijastaa absorptiopinnan säteilemän pitkäaaltoisen lämpösäteilyn mahdollisimman tehokkaasti takaisin keräimen sisään. Katemateriaalina käytetään yleensä vähärautaista lasia, joka vähentää merkittävästi keräimen optisia häviöitä. Muovikate voi olla myös käyttökelpoinen, mutta useimmat muovit eivät kuitenkaan ole kovin hyviä lämpöeristeitä. Rakenteena muovi voi myös aiheuttaa ongelmia lasiin verrattuna suuremman lämpölaajenemiskertoimensa vuoksi. Katteen ja keräimen rungon liitoskohdat sekä lämmönsiirtoputkiston suuaukot tiivistetään esimerkiksi EPDM- (propyleenidieeni) kumilla. [6]



Kuva 3.1 Tasokeräimen perusrakenne: runko (casing), kate (cover), eristekerros (insulation), absorptiopinta (absorption plates) ja lämmönsiirtoputkisto (liquid pipes) [5]

Eristemateriaalina keräimissä käytetään puhallusvillaa, lasivillaa ja polyuretaania, joiden eristysvaikutusta voidaan tehostaa alumiinipinnoitteella. Absorbaattori eristekerroksen päällä on yleisimmin kuparinen, alumiininen tai teräksinen levy. Säteilyn absorboitumisen tehostamiseksi absorptiolevy päällystetään tummalla, yleensä selektiivisellä pinnoitteella, joka absorboi auringonsäteilyä hyvin ja emittoi lämpösäteilyä vain vähän. Lämmönsiirtonesteenä käytetään vettä tai vesi-glykoliseosta, joka kulkee absorptiolevyyn kiinnitetyssä suorassa tai serpentiinimäisessä putkistossa tai kanavissa absorbaattorin sisällä. [6]

Tasokeräin hyödyntää sekä suoran että hajasäteilyn. Se suunnataan etelää kohti ja sen kaltevuuskulma säädetään maantieteellisen sijainnin mukaisesti siten, että kaltevuus vastaa paikallista leveysastetta. Suuren säteilyä vastaanottavan pinnan vuoksi lämpöhäviö tasokeräimestä on merkittävä varsinkin korkeissa lämpötiloissa. Tämä asettaa rajat tasokeräimen lämmöntuotolle. Keräimen käyttölämpötila on korkeimmillaan noin 100 $^{\circ}$C astetta ympäristön lämpötilaa korkeampi. Kohtuullisen yksinkertaisen rakenteensa ansiosta tasokeräin tarvitsee vain vähän huoltoa. [3]

3.1.2 Tyhjiöputkikeräimet

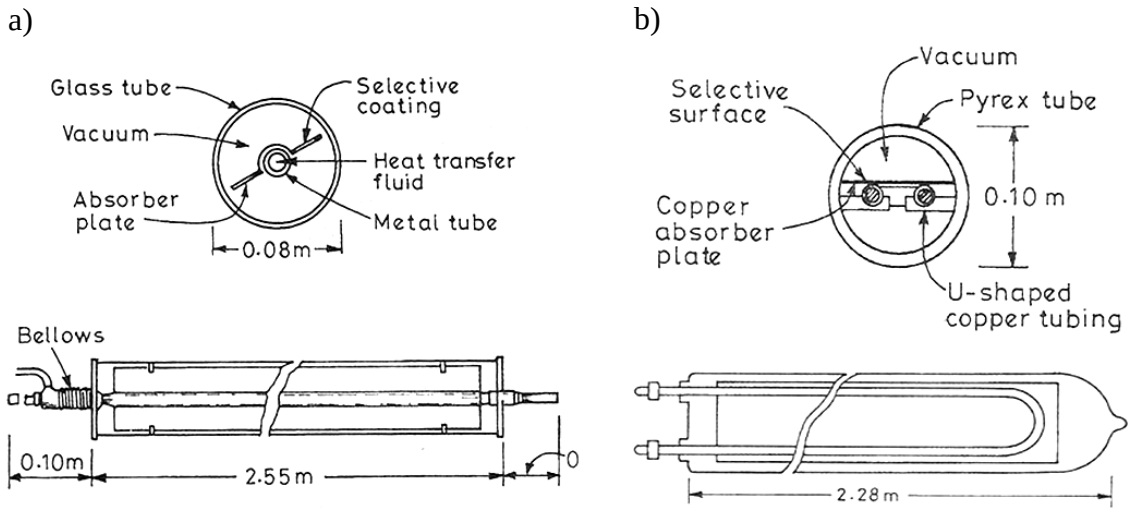
Tyhjiöputkikeräimissä (engl. *vacuum tube collectors*) konvektiosta aiheutuvaa lämpöhäviötä vähennetään tai se kokonaan estetään poistamalla ilma katteen ja absorptiopinnan välistä. Siten keräimen tehoa vähentävät vain optiset häviöt sekä johtumisesta ja säteilystä aiheutuvat vähäiset lämpöhäviöt. Tyhjiöputkikeräimissä käytetään yksinkertaisia tai kaksinkertaisia tyhjiöputkia. [5]

Yksinkertaiset tyhjiöputket

Yksinkertaisissa tyhjiöputkissa absorptiolevy on tyhjiössä lasiputken sisällä. Tyhjiöputkesta lämpöä siirretään absorptiolevyyn kiinnitetyssä suorassa (Kuva 3.2 a) tai U-muotoisessa (Kuva 3.2 b) lämmönsiirtoputkessa virtaavalla nesteellä. Suoraa lämmönsiirtoputkea käytettäessä tarvitaan haitariliittimet (engl. *bellows*), jotka antavat

tilaa putken lämpölaajenemiselle pituussuunnassa. Kolmas lämmönsiirtovaihtoehto perustuu veden höyrystymiseen ja tiivistymiseen lämpöputkessa (engl. *heat pipe*). Absorptiopintaan kiinnitetyssä lämpöputkessa on vain hieman vettä, joka höyrystyy ja nousee putken yläpäähän kondensaattoriin, jossa höyry tiivistyy ja lämpö siirtyy lämmönsiirtonesteeseen. Kondensaattorissa tiivistynyt vesi valuu takaisin absorptiopinnan lämpöputkeen. [7]

Yksinkertaisissa tyhjiöputkissa lämmönsiirtoputken ja lasin liitoskohtaa lukuunottamatta lasiputken lämpötila pysyy lähellä ympäristön lämpötilaa ja yleisimmin putket ovat natriumseosteista kalkkilasia. Absorptiopinnan materiaalien kaasuuntuminen tyhjiöön voi joskus aiheuttaa ongelmia. Ongelman ehkäisemiseksi tyhjiöputkissa käytetään kaasunsitojaa (engl. *getter*). [7]

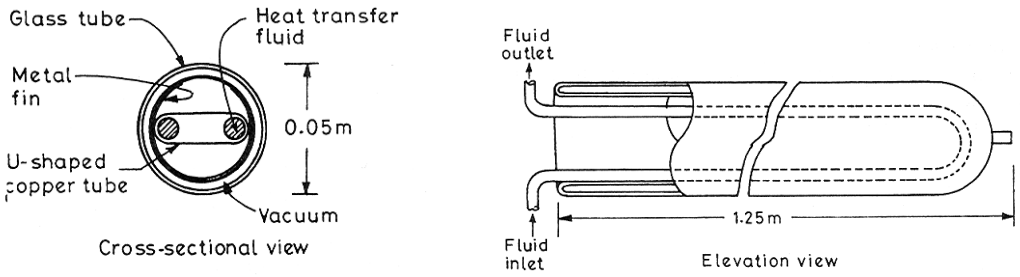


Kuva 3.2 Yksinkertainen tyhjiöputki a) suoralla b) U- muotoisella lämmönsiirtoputkella [5]

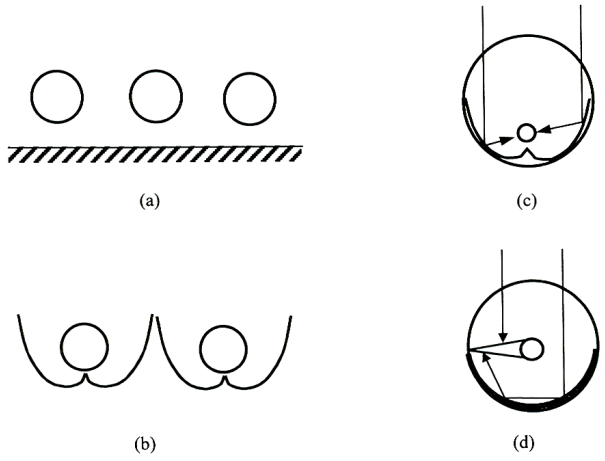
Kaksinkertaiset tyhjiöputket

Kaksinkertaisten tyhjiöputkien termospullomainen rakenne muodostetaan kahdesta sisäkkäisestä lasiputkesta (Kuva 3.3). Tyhjiö on lasiputkien välissä ja absorptiopinta on sisemmän lasiputken ulkopinnalla. Lämmönsiirtoneste kulkee U-muotoisessa

lämmönsiirtoputkessa lähellä sisäputken pintaa. Lämmönsiirtoa tehostetaan sisäputken sisäpinnan metallipäällysteellä. Vaihtoehtoisesti lämmönsiirtoneste voi olla suorassa kosketuksessa sisäputkeen tai käytetään yksinkertaisten tyhjiöputkien yhteydessä mainittua lämpöputkea. Kaksinkertaisessa tyhjiöputkimallissa ei ole lämmönsiirtoputken metalli-lasi läpivientiä, mikä helpottaa valmistamista ja tekee siitä yksinkertaista mallia edullisemman. Kaksinkertaisten tyhjiöputkien lasiputket ovat usein kovaa lasia, joka kestää paremmin korkeita lämpötiloja ja lämpöiskuja. [7]



Kuva 3.3 Kaksinkertainen tyhjiöputki U-muotoisella lämmönsiirtoputkella [5]



Kuva 3.4 Tyhjiöputkiin auringonsäteilyä keskittäviä heijastuspintoja [7]

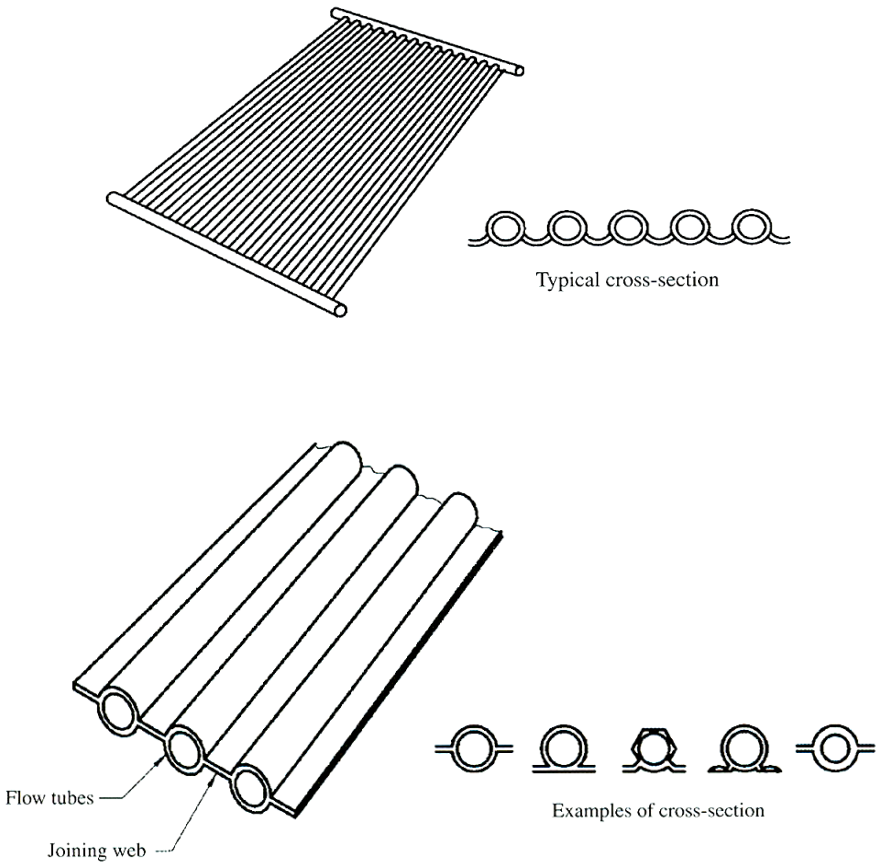
Tyhjiöputkien tehokkuutta voidaan edelleen parantaa heijastavilla pinnoilla, jotka keskittävät auringonsäteilyä tyhjiöputkiin. Heijastuspintojen käyttö parantaa myös tyhjiöputkien kustannustehokkuutta. Kuvan 3.4 a) tyhjiöputkiin keskitetään auringonsäteilyä putkien alle asennetulla heijastavalla tasopinnalla, joka lisää kuhunkin tyhjiöputkeen absorboituvan säteilyn määrää 25 %, kun säteily saapuu keräimeen kohtisuoraan ja putkien välimatka toisistaan on yhden putken halkaisijan suuruinen. Tasopintaa tehokkaampia heijastimia ovat mm. paraboliset ns. CPC (engl. *compound parabolic concentrator*)- heijastimet, jotka asennetaan joko tyhjiöputken sisään (Kuva 3.4 b) tai sen ulkopuolella (Kuva 3.4 c). Kuvassa 3.4 d) on yksinkertainen ja edullinen tyhjiöputken sisään asennettu heijastin. [7]

3.1.3 Katteettomat aurinkokeräimet

Katteettomat keräimet (engl. *unglazed collectors*) ovat aurinkokeräimistä yksinkertaisimpia ja edullisimpia. Keräin koostuu muovista tai kumista valmistetusta absorbaattorimatosta, jonka läpi kulkevat lämmönsiirtonesteen virtauskanavat. Katteettomat aurinkokeräimet soveltuvat veden lämmitykseen matalan lämpötilan käyttökohteissa, kuten uima-altaissa. Kuvan 3.5 yläosassa esitetyn keräinmallin leveä absorptiopinta valmistetaan polypropeenista, polyolefiinistä, polyetyleenistä, akryylista tai polykarbonaatista. Kuvan 3.5 toisen keräinmallin materiaaleina käytetään etyleeniä, propyleeni-dieeni kumia (EPDM) ja PVC:tä. Absorbaattorilevyjen poikkileikkauskuvat selventävät keräinten rakennetta. [7]

3.2 Keräimen absorptiopinnan ominaisuudet

Seuraavaksi käsitellään absorptiopinnan ominaisuuksia. Keräimen absorbtiopinnan ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi sekä keräimen auringonsäteilyn absorptiotehokkuuteen että lämpöhäviöihin ja ne ovat näin ollen tärkeimmät aurinkolämpökeräimen tehokkuuteen vaikuttavat tekijät.



Kuva 3.5 Katteettoman aurinkokeräimen rakennemalleja [7]

3.2.1 Tasokeräimen optiset ominaisuudet ja tehokkuus

Aurinkolämpökeräimen energiatase koostuu keräimen vastaanottamasta auringon säteilyenergiasta, optisista energiahäviöistä ja lämpöhäviöistä. Keräimen vastaanottamasta säteilystä osa menetetään säteilyn heijastuessa lasikatteen ja absorbaattorin pinnalta. Absorboituneesta säteilystä osa menetetään lämmönjohtumisen, konvektion ja säteilyn vuoksi. Lämpöhäviö voidaan määrittää lämmönsiirtokertoimen U_L (engl. *heat transfer coefficient*) sekä keräimen keskilämpötilan T_{cm} ja ympäristön lämpötilan T_a erotuksen avulla, jolloin lämpöhäviö on $U_L(T_{cm} - T_a)$. Vähentämällä

lämpöhäviö keräinneliömetriä kohti absorboituneesta säteilystä S saadaan tasokeräimen, jonka pinta-ala on A_C, hetkelliseksi lämmöntuotoksi [3]

$$Q_u = A_C \left[S - U_L (T_{cm} - T_a) \right]. \tag{3.1}$$

Keräimen lämmöntuottokerroin F_R (engl. *collector heat removal factor*) määritetään keräimen todellisen lämmöntuoton ja suurimman mahdollisimman lämmöntuoton suhteena. Lämmöntuotto on suurin mahdollinen, kun koko keräin on keräimeen tulevan lämmönsiirtonesteen lämpötilassa T_i, jolloin lämpöhäviöt ovat mahdollisimman pienet. Lämmöntuottokerrointa käyttämällä saadaan keräimen hetkellisen lämmöntuoton lauseke muotoon [3]

$$Q_u = A_C F_R \left[S - U_L (T_i - T_a) \right]. \tag{3.2}$$

Absorptiopintaan absorboitunut säteily S voidaan määrittää absorptiopinnan ja katteen optisten ominaisuuksien: katteen läpäisevyyden τ ja heijastavuuden ρ_d sekä absorptiopinnan absorbanssin α avulla. Kuva 3.6 esittää säteilyn absorption yksinkertaisella lasikatteella suojattuun absorptiopintaan. Osa katteen läpäisseestä säteilystä heijastuu takaisin absorptiopinnalta. Kate heijastaa tästä säteilystä taas osan takaisin absorptiopinnalle. Heijastuminen jatkuu lasikatteen ja absorbaattorin pinnalta ja lopulta keräimen vastaanottamasta säteilystä I absorboitunut osa on [3]

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} \left[(1-\alpha)\rho_d \right]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d}. \tag{3.3}$$

Keräimen hetkelliseksi lämmöntuotoksi saadaan nyt

$$Q_u = A_C F_R \left[(\tau\alpha) I - U_L (T_i - T_a) \right]. \tag{3.4}$$

Suhteuttamalla keräimen tuottama lämpö keräimen vastaanottamaan auringon säteilyenergiaan saadaan keräimen hetkellinen hyötysuhde [3]

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_C\, I} = \frac{F_R\left[(\tau\alpha)\, I - U_L(T_i - T_a)\right]}{I}. \tag{3.5}$$

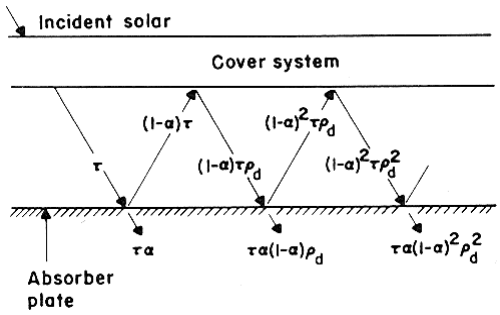
Mahdollisimman suuren tuoton ja hyvän hyötysuhteen aikaansaamiseksi on lämmöntuoton lausekkeen ensimmäisen tekijän $(\tau\alpha)\, I$ (absorboitunut säteily) oltava mahdollisimman suuri ja toisen tekijän $U_L(T_i - T_a)$ (lämmönhukka) mahdollisimman pieni. Absorboituneen säteilyn määrään voidaan vaikuttaa yhtälössä 3.3 esitellyn $(\tau\alpha)$-kertoimen avulla kasvattamalla absorptiokerrointa. Absorboituneen säteilyn määrän riippuvuus pinnan absorptiokertoimesta esitetään kuvassa 3.7 kolmessa tilanteessa, joista ensimmäisessä katelasin läpäisevyys on 0,9, toisessa 0,5 ja kolmannessa 0,1. Jos oletetaan, että lasi ei absorboi säteilyä, vaan lasipinnalle tuleva säteily joko läpäisee lasin tai heijastuu, on lasin heijastavuus edellisissä tilanteissa $\rho = 1 - \tau$ = 0,1; 0,5 ja 0,9. Kuvasta nähdään absorbanssin lineaarinen riippuvuus absorptiokertoimesta, kun lasin läpäisevyys on hyvä.

Säteilyn, konvektion ja johtumisen kautta tapahtuvaan lämmönhukkaan voidaan vaikuttaa mm. keräinrakenteiden (esim. eristeet, kate) avulla. Säteilystä aiheutuva häviö riippuu erityisesti absorptiopinnan emissiokertoimesta ε, joka on suoraan verrannollinen lämpösäteilyn määrään. Pieni emissiokerroin pienentää lämpösäteilyä pinnalta.

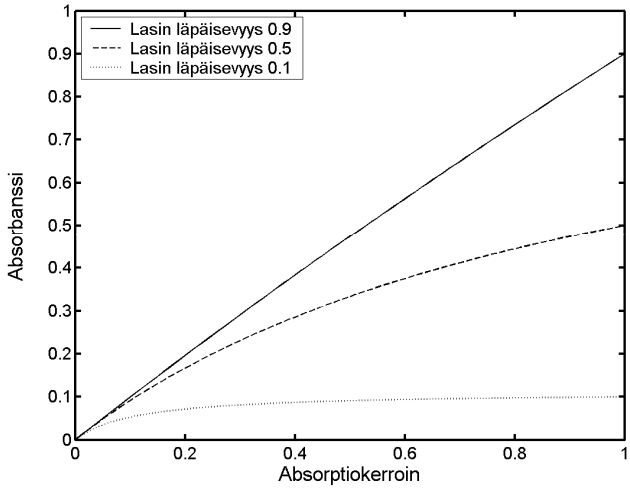
Säteilyn absorptio, emissio ja heijastuminen

Absorptio- ja emissiokerroin ovat tärkeimmät absorptiopintaa kuvaavat ominaisuudet. Absorbanssi kuvaa, kuinka suuri osa pinnan vastaanottamasta säteilystä absorboituu. Emissio on pinnan säteilemän lämmön suhde samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen säteilyyn. Ne voidaan ilmoittaa monella tavalla riippuen siitä, minkälainen aallonpituusalue ja mistä suunnasta saapuva säteily määritelmässä otetaan huomioon. Monokromaattinen suunnattu absorbanssi (engl. *monochromatic directional absorbtance*)

ottaa huomioon vain tietystä suunnasta saapuvan säteilyn, jonka aallonpituus on λ. Suunnattu absorbanssi (engl. *directional absorbtance*) kuvaa tietystä suunnasta saapuvan säteilyn absorption koko aallonpituusalueella. Monokromaattinen kokonaisabsorbanssi (engl. *monochromatic hemispherical absorbtance*) määrittelee kaikista suunnista saapuvan monokromaattisen (aallonpituus λ) säteilyn absorption. Kokonaisabsorbanssi (engl. *hemispherical absorbtance*) käsittää kaikista suunnista saapuvan säteilyn ja koko säteilyn aallonpituusalueen. Vastaavat määritelmät pätevät emissiolle. Säteilyn suunnan ja aallonpituuden lisäksi absorptioon ja emissioon vaikuttavat mm. pinnan lämpötila, karheus ja puhtaus. [3]

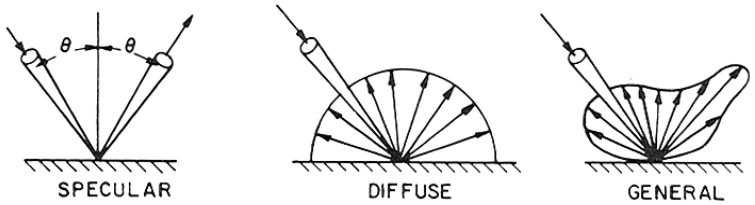


Kuva 3.6 Auringonsäteilyn absorboituminen absorptiopintaan yksinkertaisen lasikatteen läpi [3]



Kuva 3.7 Absorbanssin riippuvuus pinnan absorptiokertoimesta, kun yksinkertaisen lasikatteen läpäisevyys on 0,9; 0,5 ja 0,1.

Pinnan heijastavuus kertoo, kuinka paljon pinnan vastaanottamasta säteilystä heijastuu takaisin ympäristöön. Pinnan karheudesta riippuen puhutaan peili- tai hajaheijastumisesta (engl. *specular and diffuse reflection*), jotka eivät kuitenkaan kuvaa todellista tilannetta (Kuva 3.8). Säteilyn heijastuminen hyvin sileältä pinnalta on lähellä peiliheijastumista, jossa säteilyn tulo- ja heijastuskulmat ovat yhtä suuret. Säteilyn heijastumista karhealta pinnalta verrataan hajaheijastumiseen, missä heijastuminen tapahtuu tasaisesti kaikkiin suuntiin. Heijastavuuden määritelmissä otetaan huomioon säteilyn aallonpituusalue (monokromaattinen vai ei), tulevan säteilyn suunta (rajattu tulokulma vai kaikki suunnat) ja heijastuneen säteilyn suunta. Kokonaisheijastavuus (engl. *hemispherical reflectance*) kuvaa, kuinka suuri osa kaikista suunnista tulleen koko aallonpituusalueen kattavasta säteilystä heijastuu kaikkiin suuntiin. [3]



Kuva 3.8 Säteilyn peiliheijastuminen (specular) ja hajaheijastuminen (diffuse) sekä todelliselta pinnalta tapahtuva heijastuminen (general) [8]

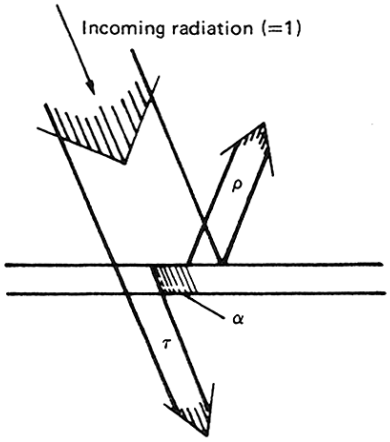
Pinnalle tuleva säteily joko absorboituu, heijastuu tai läpäisee pinnan (Kuva 3.9), jolloin energiaperiaatteen mukaisesti [8]

(3.5) $$\alpha + \tau + \rho = 1.$$

Läpinäkymättömille pinnoille läpäisevyys $\tau = 0$, jolloin $\alpha + \rho = 1$. Termisessä tasapainotilassa kappaleen lämpötila on vakio ja emittoituneen säteilyn määrä on yhtä suuri kuin absorboituneen, jolloin saadaan [3]

(3.6) $$\alpha = \varepsilon = 1 - \rho.$$

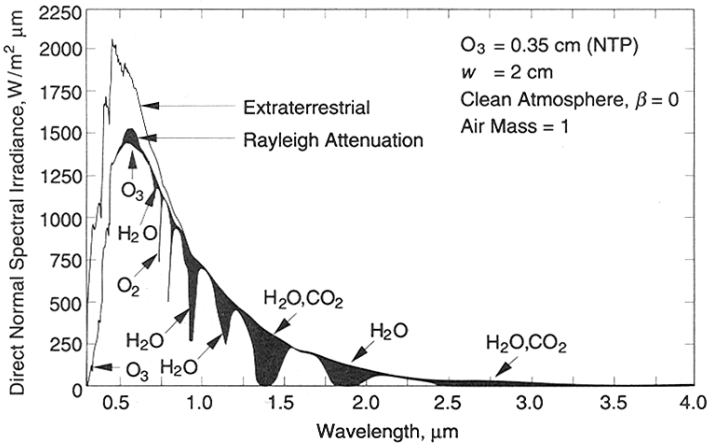
Usein pinnan optisia ominaisuuksia tutkittaessa määritetäänkin ensin pinnan heijastavuus, jonka avulla lasketaan pinnan absorptio- ja emissiokertoimet.



Kuva 3.9 Pinnalle tuleva säteily jakautuu absorboituneeseen, heijastuneeseen ja pinnan läpäisseeseen osaan [8]

3.2.2 Auringonsäteily ja lämpösäteily – pinnoitteen selektiivisyys

Maan pinnalle saapuvaan auringonsäteilyyn vaikuttaa ilmakehän ulkopuolisessa säteilyssä (noin G_{sc} =1367 W/m^2) tapahtuvaa vaihtelua (Luku 2.1) merkittävämmin ilmakehä. Auringonsäteilyn kulkiessa maan ilmakehän läpi osa säteilystä siroaa ilman molekyyleistä, vedestä ja pölyhiukkasista sekä absorboituu vesi-, hiilidioksidi- ja otsonimolekyyleihin. Ilmakehän ulkopuolisen ja maan pinnalle tulevan auringonsäteilyn intensiteettijakaumat esitetään kuvassa 3.10. Säteilyn sironta ilman molekyyleistä on merkittävää vain aallonpituusalueella $\lambda < 0.6$ µm (Rayleigh- sironta). Otsoni absorboi voimakkaasti ultravioletti (UV)- säteilyn alueella. Vesi ja hiilidioksidi taas absorboivat infrapuna (IR)- säteilyn alueella, minkä vuoksi ilmakehän säteilyn läpäisevyys on hyvin pieni aallonpituusalueella $\lambda > 2{,}5$ µm. [3]



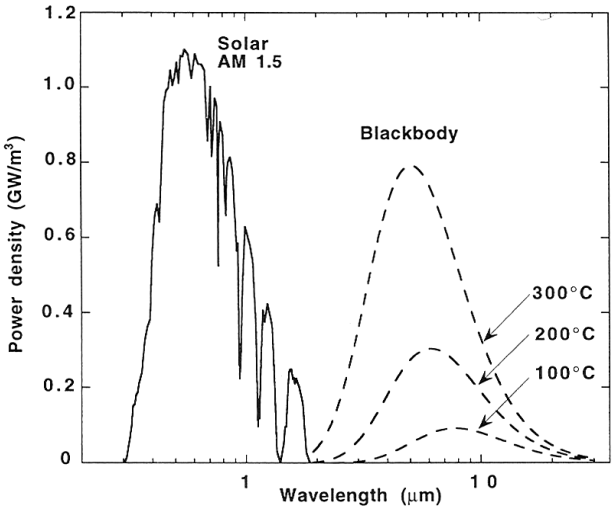
Kuva 3.10 Ilmakehän ulkopuolisen (extraterrestial) ja maan pinnalle saapuvan suoran auringonsäteilyn intensiteettijakaumat, kun aurinko on zeniitissä (Air Mass = 1) ja ilma on kirkas [3]

Maan pinnalle saapuvaan säteilyyn vaikuttaa merkittävästi myös säteilyn reitti ilmakehässä. Ilmamassa (engl. *air mass*, AM) on säteilyn läpäisemän ilmakehän massan suhde säteilyn läpäisemän ilmakehän massaan, kun aurinko on zeniitissä eli, kun säteily läpäisee ilmakehän kohtisuoraan maan pinnan horisontaalitasoa vastaan. Kuvassa 3.10 ilmamassa on 1, jolloin aurinko paistaa zeniitistä. Kun auringon zeniittikulma eli auringon korkeuskulman komplementtikulma on 60°, ilmamassa on 2. Ero maan pinnalle saapuvaan säteilyyn on merkittävä jo arvojen AM = 1 ja AM = 1,5 välillä. [3]

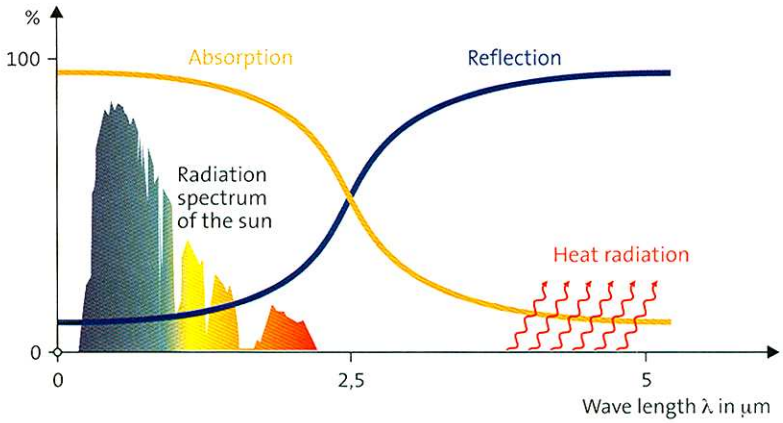
Kuva 3.11 esittää auringonsäteilyn (noin 0,3 – 2,5 µm) ja mustan kappaleen lämpösäteilyn (noin 2 – 50 µm) aallonpituusalueet. Alle 200°C lämpötilassa säteilyjen aallonpituusalueet eivät juuri leikkaa toisiaan. Lämpötilan noustessa lämpösäteilyn aallonpituusalue levenee hieman eikä lämpöhäviöiltä voida välttyä. [6]

Tehokas absorptiomateriaali käyttäytyy kuvan 3.12 esittämällä tavalla. Se absorboi tehokkaasti auringonsäteilyn aallonpituusalueella, jolloin sen absorbanssi on suuri ja heijastavuus pieni. Lämpösäteilyn aallonpituusalueella sen absorbanssi on pieni, heijastavuus on suuri ja lämpösäteilyn karkaaminen absorbaattorista estyy. Näin

käyttäytyviä absorptiomateriaaleja kutsutaan säteilyä valikoivan ominaisuutensa mukaan selektiivisiksi. [5]



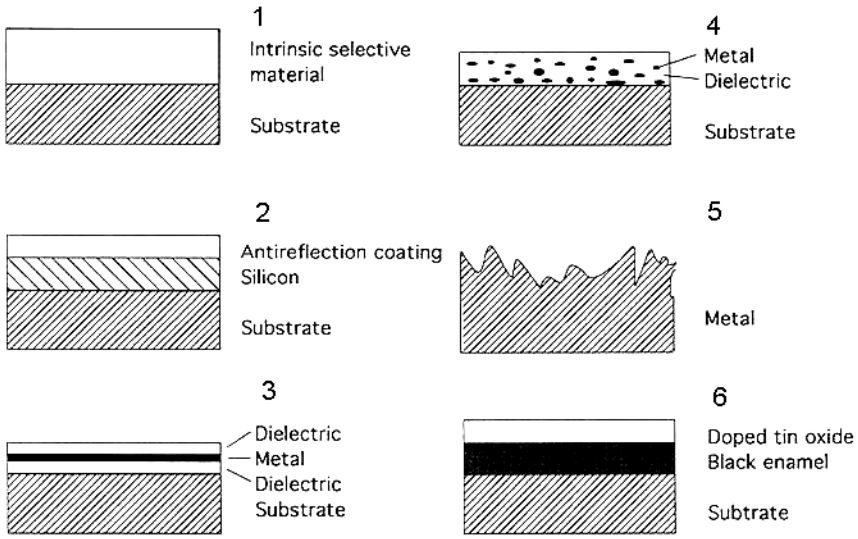
Kuva 3.11 Auringonsäteilyn ja mustan kappaleen lämpösäteilyn aallonpituusalueet [7]



Kuva 3.12 Tehokkaan absorptiomateriaalin säteilyn absorptio- ja heijastavuusominaisuudet auringonsäteilyn ja lämpösäteilyn aallonpituusalueilla [6]

3.3 Selektiiviset absorptiopinnoitteet

Pintarakenteita, joilla selektiivinen absorptio saadaan aikaan, on useita. Näistä kuusi on esitetty kuvassa 3.13. Ensimmäisessä pintarakenteessa alusta (engl. *substrate*) on pinnoitettu materiaalilla, jonka säteilyn absorptio- ja emissio-ominaisuudet itsessään ovat selektiiviset. Tämä malli ei ole osoittautunut kovin käyttökelpoiseksi. Toimivia ja tyypillisimpiä absorptiopinnoitteiden rakenneratkaisuja ovat ns. kaksoispinnoitteet (engl. *tandem absorbers*), jotka koostuvat kahdesta materiaalista, joiden optiset ominaisuudet ovat erilaiset (kuvan rakennemallit 2, 3 ja 4). Toisessa päällysteessä puolijohde tai eriste absorboi säteilyä ja lämpö siirtyy sen alla olevaan hyvin lämpöä johtavaan metalliin. Puolijohteiden päällä käytetään auringonsäteilyn heijastumista vähentävää pinnoitetta (engl. *antireflection coating*). Kolmannessa pintarakenteessa selektiivisyys saadaan aikaan vuorottelevilla eriste- ja metallikerroksilla. Neljäs vaihtoehto on ns. yhdistelmäpinnoite (engl. *composite coating*), jossa metallihiukkaset ovat levittäytyneet eristävään väliaineeseen. Viidennessä pinnoitteessa absorptiota tehostetaan metallin rikotulla pintarakenteella. (Kuudes pintarakenne ei ole osoittautunut käyttökelpoiseksi.) Kaksoispinnoitteiden lisäksi selektiiviset maalipinnoitteet ovat osoittautuneet toimivaksi ratkaisuksi. [7]



Kuva 3.13 Poikkileikkauskuvat kuudesta selektiivisestä absortiopinnoitteesta [7]

Useimpien kaupallisten absorptiopinnoitteiden rakenne on kuvan 3.13 neljännen rakennemallin mukainen yhdistelmäpinnoite. Yhdistelmäpinnoitteissa auringonsäteilyn heijastumista voidaan vähentää heijastusta estävän pintakerroksen lisäksi valmistamalla pinnoite siten, että metallipitoisuus pienenee asteittain metalli-pinnoiterajapinnalta ulkopintaa kohti. [7]

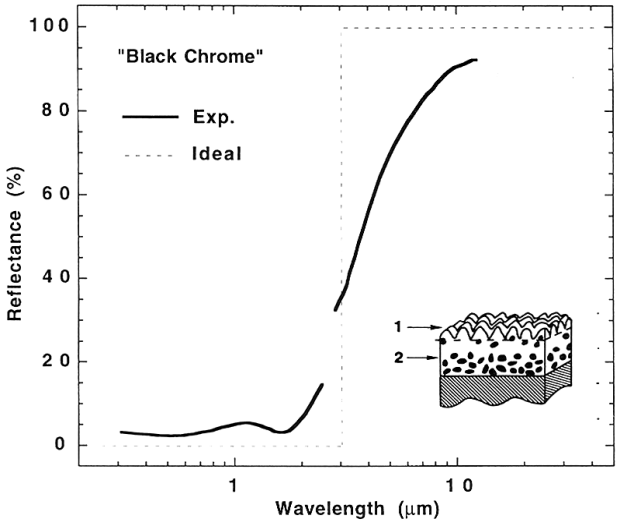
Absorptiopintojen valmistustapoja on myös useita erilaisia. Seuraavaksi esitellään yksityiskohtaisemmin muutamia yleisimpiä, kaupallisia (mustaa nikkelipinnoitetta lukuunottamatta) absorptiopinnoitteita, joita käytetään pääasiassa tasokeräimissä. Esimerkkejä tyhkiöputkikeräimiin soveltuvista selektiivisistä pinnoitteista on esitetty luvussa 3.3.6.

3.3.1 Musta kromi- ja musta nikkelipinnnoite

Selektiivisistä absorptiopinnoitteista yleisin on musta kromipinnoite. Sen selektiivisiä ominaisuuksia on tutkittu mm. NASA:n tutkimuskeskuksessa [9]. Pinnoite valmistetaan useita vuosikymmeniä tunnetulla ja käytössä olleella sähkökemiallisella tekniikalla. Pinnoite muodostuu kromimetallihiukkasista, jotka ovat levittäytyneet eristävään väliaineeseen, kromioksidiin (Cr_2O_3). Metallihiukkasten pitoisuus pienenee pintaa kohti, mikä nähdään rakenteen poikkileikkauskuvasta (Kuva 3.12). [7]

Kuvassa 3.14 on havainnollistettu mustan kromipinnoitteen selektiivisyyttä kuvaamalla pinnoitteen heijastavuus sekä auringonsäteilyn että lämpösäteilyn aallonpituusalueilla. Lampert *et al.* [10] mukaan parhaat selektiivisyystulokset saadaan pinnoitekerroksen paksuuden ollessa 1,0 μm kuparialustalla ja 0,7 μm nikkelialustalla.

Kromipinnoitetta valmistavat ainakin MTI Inc., Energie Solaire AS ja Batec A/S. MTI:n ja Batecin kuparialustalle valmistamien pinnoitteiden auringonsäteilyn absorptiokerroin on $0{,}95 \pm 0{,}02$ ja lämpösäteilyn emissiokerroin 100 °C lämpötilassa on $0{,}12 \pm 0{,}02$. Energie Solairen kromipinnoitteen alustana on ruostumaton teräs, absorptiokerroin on $0{,}94 \pm 0{,}02$ ja emissiokerroin 100 °C lämpötilassa on $0{,}18 \pm 0{,}04$. [6]



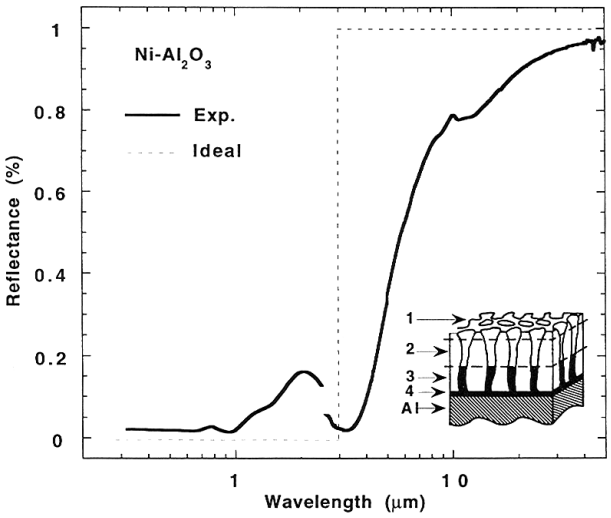
Kuva 3.14 Mustan kromipinnoitteen heijastavuus auringonsäteilyn ja lämpösäteilyn aallonpituusalueilla (ideaalinen käyttäytyminen on merkitty katkoviivalla) ja poikkileikkauskuva pinnoitteen rakenteesta [7]

Sähkökemiallista menetelmää käyttäen on valmistettu myös mustaa nikkelipinnoitetta [7]. Alkuperäisessä valmistusmenetelmässä metallilevy pinnoitettiin nikkelin ja sinkkisulfaatin vesiliuoksessa. Näin valmistettujen nikkeliä, sinkkiä ja niiden sulfideja sisältävien pinnoitteiden optiset ominaisuudet olivat hyvät, mutta ne eivät kestäneet suurta kosteuspitoisuutta korkeissa lämpötiloissa. [11]

Uudemmat kokeet mustan nikkelipinnoitteen valmistamisesta nikkeli-natriumkloridiliuoksessa ovat antaneet lupaavia tuloksia. Pinnoitteen absorptiokertoimeksi on saatu 0,96 ja emissiokertoimeksi 0,10. Lupaavia tuloksia on saatu myös pinnoitteen kestävyydestä korkeissa lämpötiloissa ja kosteissa olosuhteissa. Wäckelgård [11] havaitsi kuitenkin korkean lämpötilan laskevan pinnoitteen absorptiokerrointa testin alussa. Veden tiivistyminen korkeassa lämpötilassa heikensi pinnoitteen selektiivisyyttä ja aiheutti jopa rakenteen rikkoutumista. [11]

3.3.2 Nikkeli-alumiinioksidi (Ni-Al_2O_3)- pinnoite

Nikkeli-alumiinioksidipinnoitteen valmistus on kaksivaiheinen. Ensin alumiinilevyn pinnalle tehdään huokoinen alumiinioksidikerros asettamalla levy laimeaan fosforihappoon. Toisessa vaiheessa huokoset täytetään osittain nikkelillä elektrolysoimalla nikkelisulfaattiliuoksessa. Pinnoitteen hienorakenne ja pinnan heijastavuus on esitetty kuvassa 3.15. Alumiinilevyn ja huokoisen alumiinioksidin välissä on ohut, tiivis alumiinioksidikerros, joka on merkitty kuvaan numerolla neljä. Huokoisen alumiininioksidikerroksen, jonka alimman osan (kuvassa kerros kolme) huokoset on täytetty nikkelillä, paksuus on 0,7 µm. Nikkelihiukkasten määrä huokosten sisällä vaikuttaa merkittävästi pinnoitteen optisiin ominaisuuksiin, mikä nähdään taulukosta 3.1, jossa γ on metallipitoisuus yksikössä g/m^2, α on absorptiokerroin ja ε emissiokerroin. [12]



Kuva 3.15 Nikkeli-alumiinioksidipinnoitteen heijastavuus auringonsäteilyn ja lämpösäteilyn aallonpituusalueilla (ideaalinen käyttäytyminen on merkitty katkoviivalla) ja poikkileikkauskuva pinnoitteen rakenteesta [7]

Wäckelgård selvitti huokoisen alumiinioksidikerroksen paksuuden merkitystä pinnoitteen lämpötilan ja kosteuden kestävyyteen. Korkeissa lämpötiloissa pinnoitteen optisiin

ominaisuuksiin vaikuttaa nikkelin hapettuminen. Vesi taas reagoi alumiinioksidin kanssa muodostaen alumiinihydroksidia ja oksihydroksidia. Kestävyystestit osoittivat kuitenkin, ettei alumiinioksidikerroksen paksuudella ollut juurikaan merkitystä pinnoitteen lämpötilan ja kosteuden kestävyyteen. Jos alumiinioksidikerroksen paksuus ei vaikuta myöskään pinnoitteen korroosion kestävyyteen, voidaan valmistuskustannuksissa säästää pinnoittamalla ohuempi alumiinioksidikerros. [13]

Ni-Al_2O_3- pinnoitetta valmistavat ainakin Sunstrip Ruotsissa ja Showa Aluminum Co. Japanissa [5]. Sunstrip- pinnoitteen absorptiokerroin on 0,95 ± 0,02 ja emissiokerroin 100 °C lämpötilassa on 0,15 ± 0,02 [6].

Taulukko 3.1 Nikkelipitoisuuden (γ) vaikutus nikkeli- alumiinioksidipinnoitteen absorptio (α)- ja emissiokertoimeen (ε) [12]

γ [g/m^2]	α	ε (65 °C)
0,62	0,92	0,10
0,68	0,93	0,13
0,84	0,96	0,20
0,95	0,97	0,26

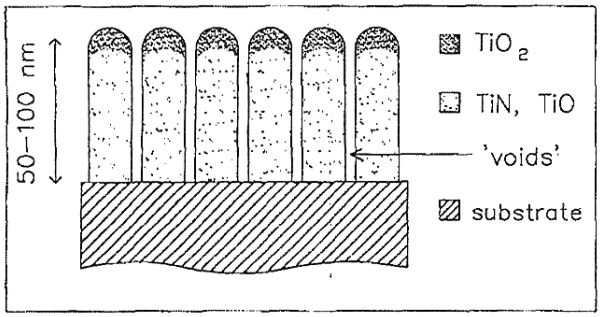
Kemiallisten pinnoitusmenetelmien käyttö tuottaa suuria määriä ympäristölle haitallista kemikaalijätettä, minkä vuoksi uusien valmistustekniikoiden kehittäminen on ollut välttämätöntä. Tyhjiötekniikkaan perustuvat pinnoitusmenetelmät ovatkin saamassa jalansijaa monien maiden markkinoilla. [14]

3.3.3 Titaanioksinitridi (TiN_xO_y) - pinnoite

Titaanioksinitridi- yhdistelmäpinnoitteen (Kuva 3.13, pinnoite neljä) alustana on kupari ja päällä heijastusta vähentävä pintakerros [7]. Pinnoite valmistetaan aktivoidulla reaktiivisella haihdutus- menetelmällä (engl. *activated reactive evaporation*). Valmistusmenetelmässä käytetään kaksiosaista tyhjiökammiota, jonka väliseinämässä

olevan reiän yläpuolelle asetetaan pinnoitusalusta. Elektronipommituksella kammion alaosassa haihdutettu titaani tarttuu alustan pintaan, minkä jälkeen kammion yläosan aktivoitu happi- ja typpikaasun seos reagoi titaanin kanssa muodostaen titaanioksinitridi (TiN_xO_y)- kerroksen. Aktivoidussa kaasuseoksessa osa typpi- ja happimolekyyleistä on ionisoitunut elektronien pommituksessa. Pinnoitteen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa typen ja hapen osittaispaineilla valmistusvaiheessa. Pinnoitteen pylväsmäinen hienorakenne on esitetty kuvassa 3.16. Titaaninitridistä (TiN) ja titaanioksidista (TiO) koostuvan pylväsrakenteen päällä on kerros titaanioksidia (TiO_2). [15]

Saksalaisen Tinox GmbH valmistaman TiN_xO_y – pinnoitteen auringonsäteilyn absorptiokerroin on 0,95 ja lämpösäteilyn emissiokerroin 100 °C lämpötilassa on 0,05. [7]

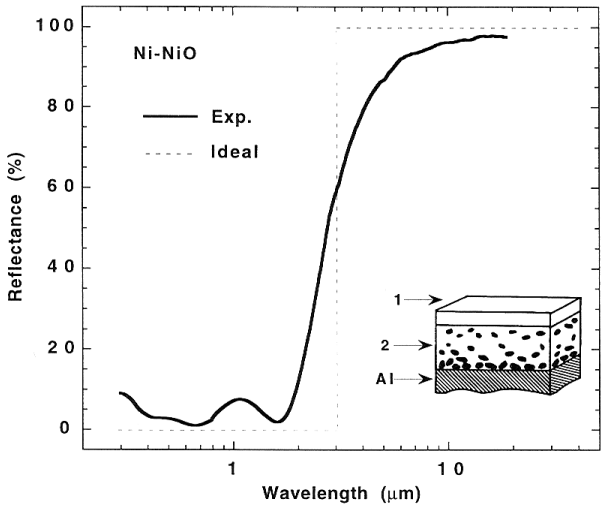


Kuva 3.16 Titaanioxynitridi- pinnoitteen pylväsmäinen rakenne [15]

3.3.4 Nikkeli-nikkelioksidi (Ni-NiO) - pinnoite

Ruotsalainen Tekno Term on valmistanut nikkeli-nikkelioksidi (Ni-NiO)- pinnoitettua alumiiniabsorbaattoria (Sunstrip-absorbaattorit) vuodesta 1996 lähtien [7]. Alumiini pinnoitetaan telapäällystimessä reaktiivisella tasavirta-magnetroniruiskutus-menetelmällä (engl. *reactive DC magnetron sputtering*). Wäckelgård *et al.* [16] käyttivät valmistusprosessissa kahta magnetronia, joista toinen ruiskutti Ni-NiO-absorptiokerroksen ja toinen heijastusta estävän pintakerroksen pyörivälle 0,15 m leveälle alumiininauhalle. Pinnoitusprosessi on automatisoitu ja sen toistettavuus on hyvä.

Pinnoitteen nikkelistä ja nikkelioksidista koostuva absorptiokerros on noin 160 nm paksu. Heijastusta estävän pintakerrosken paksuus on noin 50 nm. Absorptiokerroksessa nikkelioksidin määrä kasvaa ja metallisen nikkelin määrä vähenee siirryttäessä pintaa kohti niin, että kerroksen ylemmässä osassa nikkelihiukkasia ei enää esiinny. Nikkelipitoisuuden asteittainen muuttuminen absorptiokerroksessa lisää pinnoitteen selektiivisyyttä jyrkentäen heijastavuuskäyrää auringonsäteilyn ja lämpösäteilyn aallonpituusalueiden rajakohdassa. Pinnoitteen heijastavuuskäyrä ja poikkileikkauskuva pinnoitteen rakenteesta on esitetty kuvassa 3.15. Pinnoitteen auringonsäteilyn absorptiokerroin on 0,96 ja lämpösäteilyn emissiokerroin 100 °C lämpötilassa 0,10. [16]

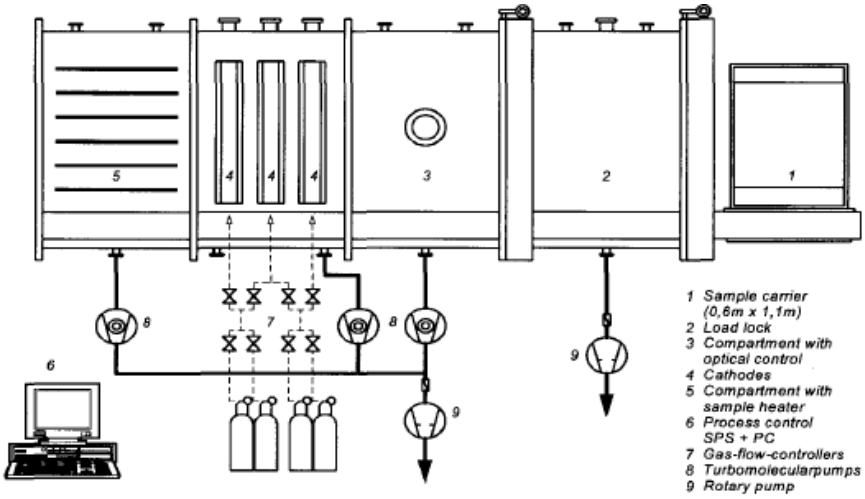


Kuva 3.17 Nikkeli-alumiinioksidipinnoitteen heijastavuus auringonsäteilyn ja lämpösäteilyn aallonpituusalueilla ja pinnoitteen poikkileikkauskuva [7]

3.3.5 Krominitridi-kromioksidipinnoite (CrN-Cr_xO_y)

Graf *et al*. [17] ovat tutkineet krominitridi-kromioksidipinnoitteen valmistusta kuparialustalle magnetroniruiskutus- menetelmällä. Pinnoitusprosessissa käytetty laitteisto on esitetty kuvassa 3.18. Automatisoidussa pinnoitusprosessissa alusta ohittaa kolme magnetronikatodia, jotka on merkitty kuvaan numerolla neljä. Kaksi katodeista voi toimia samanaikaisesti ja niiden kaasuvirtaamia voidaan säätää erikseen. Valmiin

pinnoitteen paksuus on noin 100 nm ja siinä kromimitridin pitoisuus kasvaa ja kromioksidin pitoisuus pienenee asteittain pintaa kohti. Pinnoitteen absorptiokerroin auringonsäteilyn aallonpituusalueella on 0,93 ja lämpösäteilyn emissiokerroin 100 °C lämpötilassa noin 0,07. Interpane aloitti Saksassa krominitridi-kromioksidipinnoitetun kupariabsorbaattorin valmistuksen ruiskutus-menetelmää (engl. *sputtering*) käyttäen vuonna 1998 [7].



Kuva 3.18 Magnetroniruiskutuspinnoituksessa käytetty laitteisto (1 Alusta, 4 Katodit, 5 Lämmitys, 6 Prosessin ohjaus, 7 Kaasuvirtojen ohjaus, 8 ja 9 Pumput) [17]

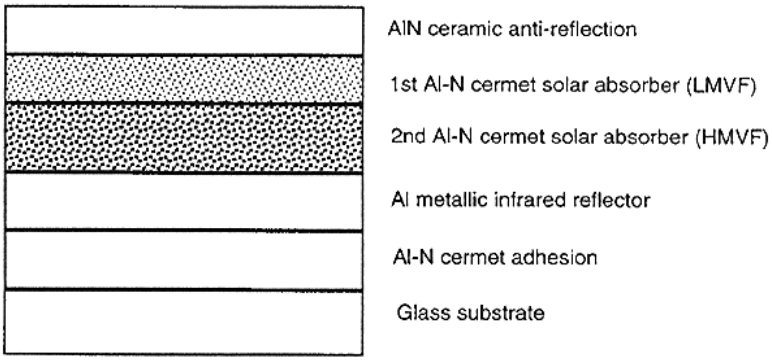
3.3.6 Tyhjiöputkien selektiiviset pinnoitteet

SS–C- pinnoite

Ruostumaton teräs-karbidi (engl. *stainless steel – carbide*, SS–C) yhdistelmäpinnoite kehitettiin 70-luvun lopussa Sydneyn yliopistossa Australiassa. Se valmistetaan magnetroniruiskutuksella kuparipäällysteisille lasiputkille. Harding *et al.* määrittivät [18] SS–C– pinnoitteen absorptiokertoimeksi 0,93 ja emissiokertoimeksi huoneenlämpötilassa 0,035. Lämpötilatesteissä pinnoite osoittautui kestäväksi ja soveltuvaksi tyhjiöputkikeräimiin, joiden käyttölämpötila on 150°C ja stagnaatiolämpötila 300°C. Shiroki on valmistanut SS–C – absorbaattoreita Japanissa vuodesta 1980 lähtien [7].

Al–N- pinnoite

Kuvassa 3.19 esitetään Al–N- yhdistelmäpinnoitteen tyypillinen rakenne, joka koostuu Al-N- adheesiokerroksesta, lämpösäteilyä heijastavasta alumiinikerroksesta, Al–N-kaksoiskerroksesta ja heijastusta estävästä Al–N- kerroksesta. Al–N- kaksoiskerroksen alimmassa osassa metallipitoisuus on suuri (engl. *high metal volume fraction*, HMVF) ja yläosassa metallipitoisuus on pieni (engl. *low metal volume fraction*, LMVF). [19]



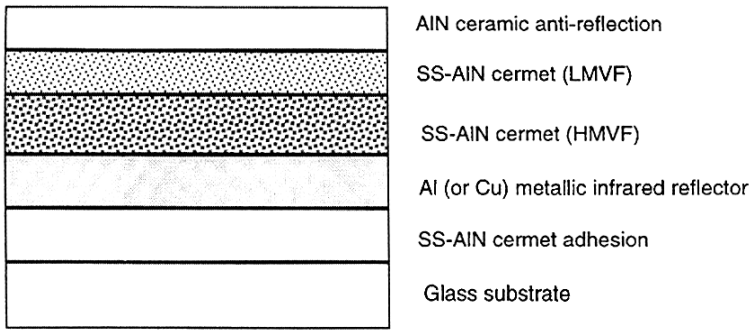
Kuva 3.19 Kaksikerroksisen Al–N- pinnoitteen rakennekuva [19]

Zhang *et al.* [19] tutkivat pinnoitteen valmistamista lasiputkille magnetroni-ruiskutuksella sylinterimäisessä tyhjiökammiossa (Kuva 3.21). Pitkä sylinterimäinen alumiinikatodi sijoitetaan kammion keskiosaan ja lasiputket kammion reunaosaan, jossa ne ovat pinnoituksen aikana pyörivässä liikkeessä sekä kammion keskiakselin että oman akselinsa suhteen. Katodin sisällä on kuudesta pylväsmagneetista koostuva magneetti, jonka magneettikentän vaikutuksesta katodin pinnalla on kuusi pitkittäissuuntaista plasmapylvästä. Magneettikenttä katodin pinnalla on noin 0,04 T. Pinnoituksen aikana magneetti on katodin sisällä pyörivässä liikkeessä akselinsa ympäri, katodiputki on paikoillaan ja plasmapylväät sen pinnalla seuraavat pyörivää magneettikenttää. Siten katodimateriaalin ruiskutus sen pinnalta on tasaista. Reaktiivinen typpikaasu ja argonkaasu ruiskutetaan kammioon lähellä sen seinämää olevista suuaukoista.

Al–N- kerrokset valmistetaan magntroniruiskutuksella argon- ja typpikaasun seoksessa. Alumiinikerros ruiskutetaan puhtaassa argonkaasussa. Zhang *et al.* määrittivät pinnoitteen absorbtiokertoimeksi 0,96 ja emissiokertoimeksi 80°C lämpötilassa 0,08. Al-N- yhdistelmäpinnoitetta valmistetaan Kiinassa. [7]

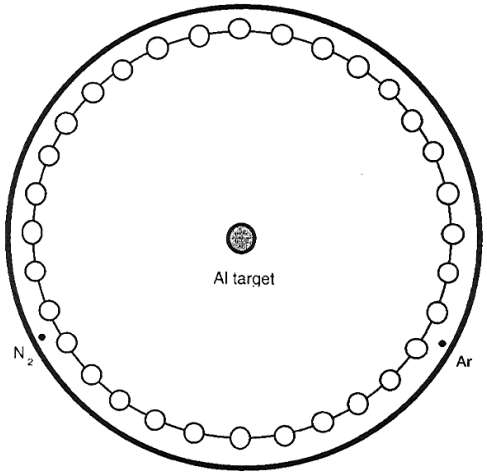
M–AlN- pinnoite

Sydneyn yliopistossa kehitetyssä [20] M–AlN- pinnoitteessa metalli (M) yhdistetään eristävän materiaalin (AlN) kanssa kerrosrakenteeksi. Metalliksi pinnoitteeseen soveltuvat mm. ruostumaton teräs, volframi, NiCr tai molybdeeni pohjainen metalliseoste (TZM), joiden reaktiivisuus typen kanssa on vähäinen. Kuvassa 3.20 esitetään kaksikerroksisen SS – AlN pinnoitteen kerrosrakenne. Pinnoite valmistetaan lasiputkille magnetroni-ruiskutuksella sylinterimäisessä tyhjiökammiossa (Kuva 3.22). Kammion keskiosassa on kolme katodia (alumiini-, metalli- (kuvassa ruostumaton teräs, SS) ja kuparikatodi), jotka on erotettu toisistaan väliseinillä. Katodimateriaalien ruiskutus aikaansaadaan Al–N- pinnoitteen yhteydessä esitellyllä tavalla, katodien sisällä olevien pyörivien magneettien avulla. Typpikaasu ruiskutetaan kammion alumiinikatodi-osaan lähellä kammion seinämää olevista suuaukoista. Argonkaasun ruiskutusaukot ovat kammion SS- katodin osassa. Pinnoitteen SS–AlN- kerrokset valmistetaan Al- ja SS-katodien yhtäaikaisella ruiskutuksella typpi- ja argonkaasujen seoksessa.

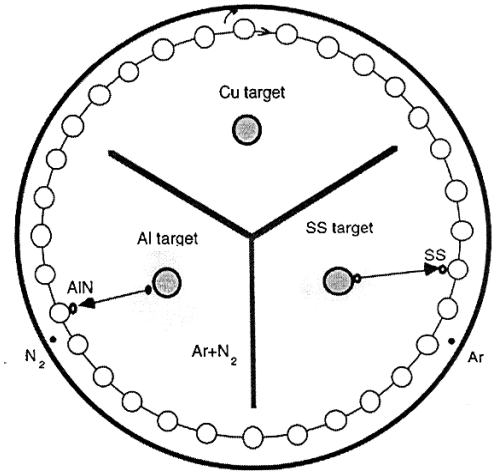


Kuva 3.20 Kaksikerroksisen Al–N- pinnoitteen rakennekuva [20]

Zhang *et al*. määrittävät [20] pinnoitteen asorptiokertoimeksi 0,94–0,95, emissiokertoimeksi 0,04–0,05 huoneenlämpötilassa, 0,06–0,07 lämpötilassa 100°C ja 0,12–0,14 lämpötilassa 350°C. Kokeissa pinnoite osoitti kestävän tyhjiössä korkeita lämpötiloja aina 330–400 °C asti. SS–AlN- pinnoite on kaupallistettu Sydneyn ja Pekingin yliopistojen sekä Beijing TurboSun Co. yhteistyön tuloksena [7].



Kuva 3.21 Poikkileikkauskuva lasiputkien Al–N- pinnoituksen sylinterimäisestä tyhjiökammiosta, jonka korkeus on 1,9 m ja sisähalkaisija 0,83 m [19]



Kuva 3.22 Poikkileikkauskuva lasiputkien M–AlN- pinnoituksen sylinterimäisestä tyhjiökammiosta [20]

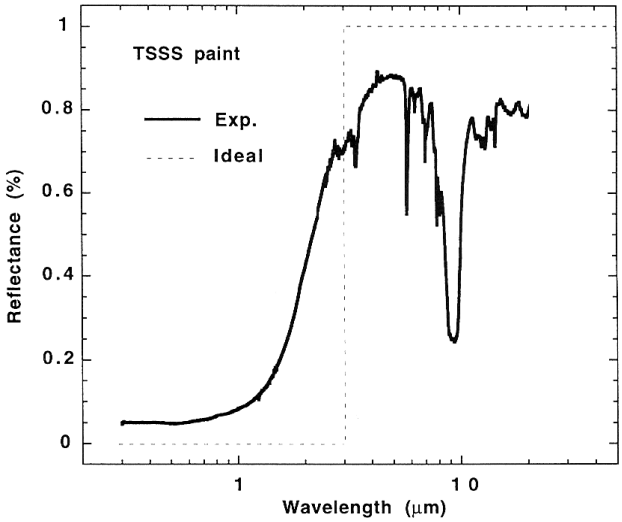
3.3.7 Selektiiviset maalipinnoitteet

Selektiiviset maalipinnoitteet ovat aurinkolämpökeräinten absorptiomateriaaleista hinnaltaan edullisimpia [6]. Maalipinnoite koostuu auringonvaloa absorboivasta epäorgaanisesta väriaineesta, joka on sekoitettu lämpösäteilyn läpipäästävään polymeeriseen sidosaineeseen kuten silikoniin tai siloksaaniin. Maali levitetään 2-3 µm paksuiseksi kerrokseksi metallipinnalle, jonka lämpösäteilyn emissiokerroin on pieni. Selektiivisten maalipinnoitteiden auringonsäteilyn absorptiokerroin on yleensä noin 0,90 ja lämpösäteilyn emissiokerroin 100 °C lämpötilassa noin 0,30. [21]

Markkinoilla on ainakin kaksi selektiivistä maalipinnoitetta. Ne ovat Solarect-Z™ pinnoite, joka on kehitetty Sloveniassa (National Institute of Chemistry, Ljubljana), ja SolkoteHI/SORB-II™- pinnoite, jota myy yhdysvaltalainen SOLEC (Solar Energy Corporation). Solarect- pinnoitteessa sidosaineena on fenyylimetyyli-polysiloksaanihartsi ja väriaineena epäorgaaninen $FeMnCuO_x$. Väriaineen pitoisuus pinnoitteessa on 20 %. Aluminilevyllä maalipinnoitteen absorptiokerroin on 0,90 – 0,92 ja lämpösäteilyn emissiokerroin 0,20 – 0,25 [22]. Alumiinipinnalla pinnoite kestää 300 °C lämpötilan [22]. Siloksaanihartsin lämpösäteilyn absorptiokerroin on pienempi kuin useimpien muiden sidosaineiden. Kuvasta 3.23 nähdään, että suurin osa IR- säteilyn absorptiosta tapahtuu allonpituusalueella 8-10 µm (Si-O-Si sidosten vibraatio). Solkote- pinnoitteessa sidosaineena on silikonipolymeeri, joka kestää korkeita lämpötiloja aina 530 °C asti. Pinnoitteen absorptiokerroin on 0,88 – 0,94 ja emissiokerroin 0,28 - 0,49 riippuen pinnoitekerrosten paksuudesta ja pinnoitteen aluslevystä. [7]

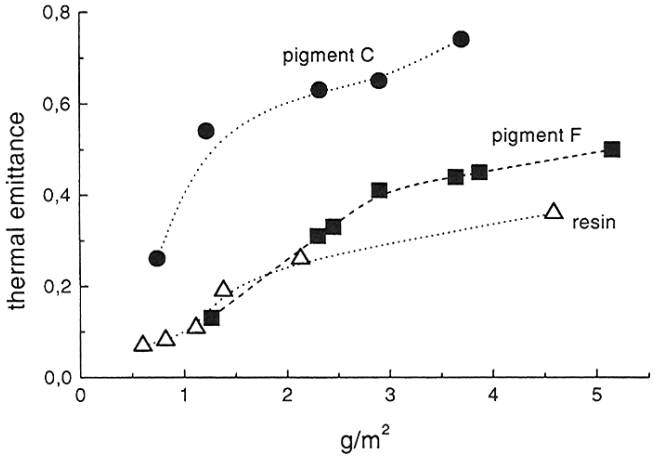
Molemmat pinnoitteet ovat ns. TSSS – maaleja (engl. *thickness sensitive spectrally selective paints*), joiden optiset ominaisuudet riippuvat pinnoitekerrosten paksuudesta [7]. Kuvassa 3.24 esitetään pinnoitekerroksen paksuuden vaikutus kolmen eri pinnoitteen lämpösäteilyn emissioon. Yhdessä pinnoitteista väriaineena (pigment C) on $FeMnCuO_x$, toisen pinnoitteen väriaine (pigment F) on orgaaninen musta hiili. Kolmas pinnoite on värjäämätön hartsi. Kussakin tapauksessa pinnoitekerroksen paksuuntuminen lisää lämpösäteilyn emissiota [23]. Auringonsäteilyn aallonpituusalueella pinnoitekerroksen

paksuuden lisääminen vähentää säteilyn heijastumista [24]. Kuvassa 3.25 asiaa havainnollistetaan kahdelle pinnoitteelle; $FeMnCuO_x$ silikonissa ja musta hiili fenoxyhartsissa.

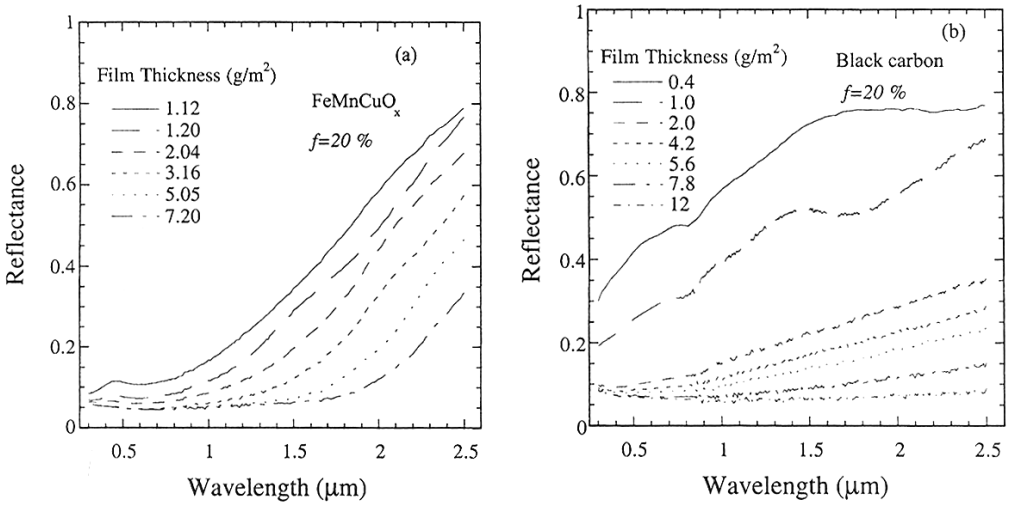


Kuva 3.23 Selektiivisen Solarect- maalipinnoitteen heijastavuus auringonsäteilyn ja lämpösäteilyn aallonpituusalueilla [7]

Sidosaineen ja alusmetallin ominaisuuksien sekä pinnoitekerroksen paksuuden lisäksi maalipinnoitteiden selektiivisyys riippuu väriaineen ominaisuuksista. Pinnoitteiden optisiin ominaisuuksiin vaikuttaa mm. väriaineen konsentraatio ja sen jakauma pinnoitekerroksessa, väriainehiukkasten kokojakuma ja dispersion aste. Myös maalin levitystekniikka metallialustalle vaikuttaa pinnoitteen lopullisiin ominaisuuksiin. Väriaineen hiukkaskoon merkitys on huomattava, jos maali levitetään metallialustalle ruiskuttamalla. Tällöin hiukkaskoon tulee olla mahdollisimman pieni. [25]



Kuva 3.24 Pinnoitekerroksen paksuuden vaikutus $FeMnCuO_x$ (pigment C) ja mustalla hiilellä (pigment F) värjättyjen pinnoitteiden sekä värjäämättömän hartsin lämpösäteilyn emissioon [23]



Kuva 3.25 Pinnoitekerroksen paksuuden vaikutus TSS-pinnoitteiden heijastavuuteen auringonsäteilyn aallonpituusalueella, (a) $FeMnCuO_x$- väriaine silikonissa, (b) musta hiili fenoxyhartsissa (väriainepitoisuudet 20 %) [24]

3.3.8 Yhteenveto selektiivisistä pinnoitteista

Taulukkoon 3.2 on koottu edellä esitellyt tasokeräinten ja tyhjiöputkikeräinten selektiiviset absorptiopinnoitteet, niiden valmistusmenetelmät, valmistajat ja optiset ominaisuudet. Tasokeräinten absorptiopinnoitteiden valmistuksessa sähkökemiallisten menetelmien käyttö on ollut yleistä, mutta sen haittapuolena ovat jätekemikaalit. Uudemmilla valmistustekniikoilla (reaktiivinen haihdutus- ja magnetroniruiskutusmenetelmä) valmistettujen pinnoitteiden lämpösäteilyn emissokertoimet (0,05–0,10) ovat paremmat kuin kemiallisesti valmistettujen pinnoitteiden emissiokertoimet (0,10–0,17). Maalipinnoitteet ovat optisilta ominaisuuksiltaan huonoimpia (absorptio noin 0,90 ja emissio noin 0,30), mutta hinnaltaan ne ovat tasokeräinten absorptiopinnoitteista edullisimpia. Tyhjiöputkikeräinten pinnoitteet valmistetaan magnetroniruiskutuksella tyhjiökammiossa, niiden lämpösäteilyn emissiokertoimet ovat luokkaa 0,06–0,07.

Taulukko 3.2 Yhteenveto luvussa 3.3 esiteltyjen selektiiivisten absorptiopinnoitteiden valmistusmenetelmistä, valmistajista ja absorptio (α)- ja emissiokertoimista (ε)

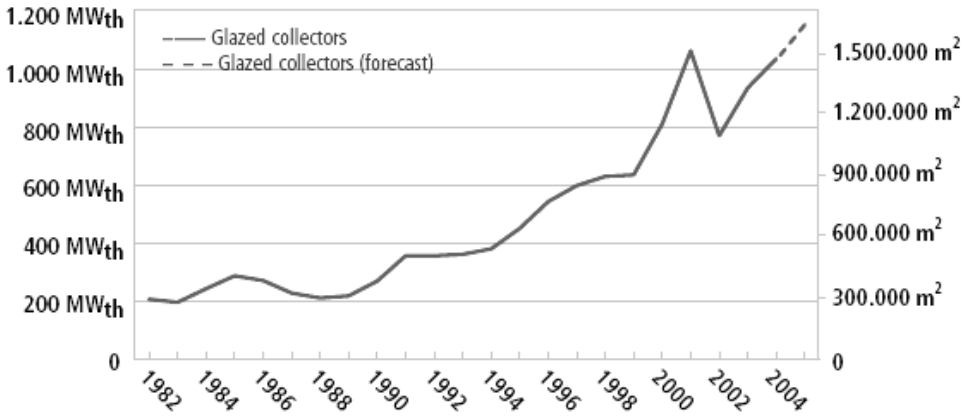
Pinnoite	**Valmistusmenetelmä**	**Valmistaja**	**α**	**ε** (100℃)
Tasokeräimet				
Musta kromi	Sähkökemiallinen	Batec A/S	0,95 ± 0,02	0,12 ± 0,02
Nikkeli-alumiinioksidi	Kemiallinen/ Sähkökemiallinen	Sunstrip	0,95 ± 0,02	0,15 ± 0,02
Titaanioksinitridi (TiO_xN_y)	Reaktiivinen haihdutus	Tinox GmbH	0,95	0,05
Nikkeli-nikkelioksidi (Ni-NiO)	Magnetroniruiskutus	Sunstrip	0,96	0,10
Kromioksi-krominitridi ($CrO-Cr_xN_y$)	Magnetroniruiskutus	Interpane	0,93	0,07
Solarect-Z™	Maalipinnoite	-	0,90 – 0,92	0,20 – 0,25
SolkoteHI/SORB-II™	Maalipinnoite	-	0,88 – 0,94	0,28 – 0,49
Tyhjiöputkikeräimet				
SS - C	Magnetroniruiskutus	-	0,93	0,035 (20℃)
Al – N	Magnetroniruiskutus	-	0,96	0,06 (100℃) 0,08 (80℃)
M – AlN	Magnetroniruiskutus	-	0,94 – 0,95	0,04–0,05 (20℃) 0,06–0,07 (100℃) 0,12–0,14 (350℃)

4 Aurinkolämpökeräinten markkinaselvitys

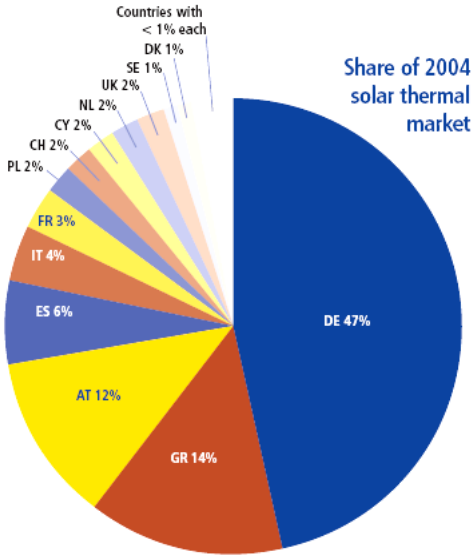
4.1 Katsaus Euroopan unionin aurinkolämpömarkkinoihin

Euroopan unionin aurinkolämpökeräinten markkinat ovat kasvaneet tasaisesti. Kuva 4.1 esittää EU:n aurinkolämpökapasiteetin vuotuisen lisäyksen (teho- ja pinta-alayksiköissä) 80-luvulta vuoteen 2004 ja ennustetun kapasiteetin lisäyksen vuotena 2005. Vuodesta 2000 lähtien uusia aurinkokeräimiä on asennettu joka vuosi selvästi yli miljoona neliömetriä. Vähäisempi kapasiteetin lisäys vuonna 2002 johtui lähinnä Saksan aurinkolämpömarkkinoiden kutistumisesta [27]. Vuonna 2004 käytössä olevien aurinkolämpökeräinten kokonaispinta-ala EU:ssa oli 13 959 245 m^2, mikä vastaa 9 771 MW. [26]

Jäsenvaltioiden kesken aurinkolämpömarkkinat ovat kuitenkin kehittyneet epätasaisesti. EU:n aurinkolämpömarkkinoiden kasvu on pääasiassa kolmen maan - Saksan, Kreikan ja Itävallan - ansiota. Kuvasta 4.2 nähdään jäsenvaltioiden osuudet EU:n aurinkolämpömarkkinoista vuonna 2004. Saksa on selvä markkinoiden johtaja ja yhdessä Kreikan ja Itävallan kanssa se kattaa lähes kolme neljännestä kokonaismarkkinoista. [26]



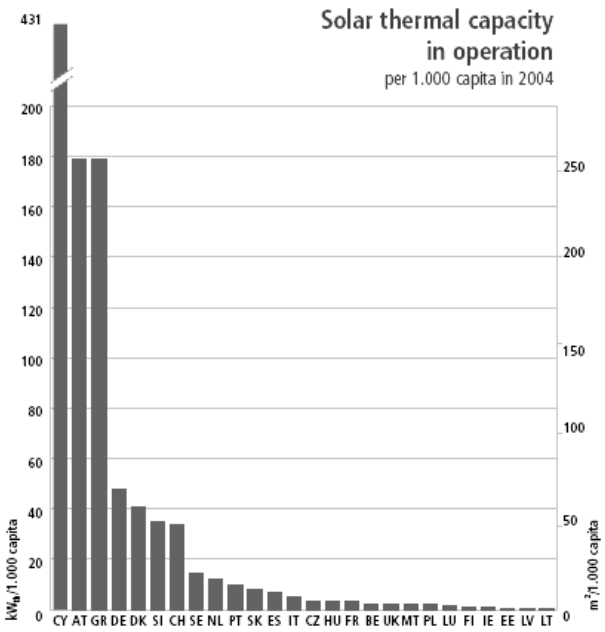
Kuva 4.1 EU:n aurinkolämpökeräinkapasiteetin vuotuinen kasvu teho- ja pinta-alayksiköissä [26]



Kuva 4.2 EU:n aurinkolämpömarkkinoiden jakautuminen jäsenmaiden[1] kesken vuonna 2004 [26]

Erot jäsenmaiden välillä tulevat vielä selvemmin esille, kun otetaan huomioon maiden asukasluvut ja vertaillaan aurinkolämpökapasiteetteja 1000 asukasta kohti (Kuva 4.3). Kypros, jossa 90 % rakennuksista on varustettu aurinkolämpöjärjestelmällä, johtaa tätä tilastoa selvästi. Kyproksessa aurinkolämpökapasiteetti tuhatta asukasta kohti vuonna 2004 oli 431 kW, mikä on yli kaksi kertaa enemmän kuin Itävallassa ja Kreikassa, joiden kapasiteetti oli 179 kW tuhatta asukasta kohti. Saksassa vastaava luku oli noin 48 kW, Tanskassa hieman yli 40 kW ja Sloveniassa 34 kW. Suuret maat Italia, Espanja, Ranska ja Iso-Britannia ovat selvästi kärkimaita jäljessä. Vertailu jäsenmaiden välillä osoittaa, että ilmasto-olosuhteet eivät ole päätekijänä aurinkolämpömarkkinoiden kasvulle. Tämä nähdään verrattaessa esimerkiksi Italian ja Ruotsin tai Ranskan ja Saksan kapasiteetteja keskenään. Suuret erot jäsenmaiden aurinkolämpökapasiteettien välillä osoittavat myös, että aurinkolämmön kasvupotentiaali Euroopassa on merkittävä. [26]

[1] *AT = Itävalta, BE = Belgia, CH = Sveitsi, CY = Kypros, CZ = Tšekin tasavalta, DE = Saksa, DK = Tanska, EE = Viro, ES = Espanja, FI = Suomi, FR = Ranska, GR = Kreikka, HU =Unkari, IE =Irlanti, IT = Italia, , LT = Liettua, LU = Luxemburg, LV =Latvia, MT = Malta, NL = Alankomaat, PL = Puola, PT = Portugali, SI = Slovenia, , SE = Ruotsi, SK = Slovakia, UK = Yhdistynyt kuningaskunta*



Kuva 4.3 Aurinkolämpökapasiteetti EU:n jäsenmaissa 1000 asukasta kohti (kW/1000 asukasta) vuonna 2004 [26]

Koko maailman aurinkolämpömarkkinoiden johdossa on Kiina, jossa vuotuinen kapasiteetin lisäys on yli 10 000 000 m^2 (vrt. EU:ssa 1 000 000 m^2) ja jonka markkinat kattoivat vuonna 2004 78 % maailman aurinkolämpömarkkinoista. Turkin ja Israelin yhteisosuus maailmanmarkkinoista vuonna 2004 oli lähes yhtä suuri kuin EU:n. Jo vuonna 2002 Israelissa 80 % rakennuksista oli varustettu aurinkolämpöjärjestelmällä. USA:ssa aurinkolämpömarkkinat ovat merkittävät vain katteettomien, uima-altaiden lämmitykseen käytettyjen keräinten osalta. Katteettomien keräinten markkinat USA:ssa vuonna 2002 olivat 15–20 kertaa suuremmat kuin EU:ssa. [27]

4.2 Keräinten markkinaselvitys

4.2.1 Selvityksen taustaa

Markkinaselvityksen tarkoituksena oli saada kuva EU:n aurinkolämpömarkkinoista kokoamalla tietoa Eurooppalaisista aurinkolämpökeräinten valmistajista sekä keräinten ominaisuuksista ja hintatasosta. Selvitys kohdennettiin maihin, joissa ilmasto on samankaltainen kuin Suomessa ja valmistetut aurinkolämpökeräimet soveltuvat käyttöön maamme olosuhteissa.

Selvityksen lähtökohtana käytettiin ESTIF:n (European Solar Thermal Industry Federation) vuonna 2003 julkaisemaa raporttia Sun In Action II [28], jossa esitellään yksityiskohtaisesti jokaisen EU15- jäsenmaan[2] aurinkolämpömarkkinat. Raportin avulla valittiin maat, joihin markkinaselvitys rajataan ja saatiin tietoa näiden maiden aurinkolämpöyrityksistä.

EU:n aurinkolämpömarkkinoiden johtajista selvityksessä ovat mukana Saksa ja Itävalta. Kolmas markkinajohtaja, Kreikka jätettiin selvityksen ulkopuolelle. Kreikassa asennetuista aurinkolämpöjärjestelmistä 99 % on ns. passiivisia järjestelmiä, joissa varaaja sijaitsee keräimen yläpuolella, yleensä katolla [28]. Passiivinen aurinkolämpöjärjestelmä ei sovellu Suomen ilmastoon. Lisäksi mukana ovat Iso-Britannia ja pohjoismaiset aurinkolämmön edelläkävijät Ruotsi ja Tanska.

Taso- ja tyhjiöputkikeräimiä sekä katteettomia keräimiä koskeva selvitys tehtiin sähköpostikyselyllä, joka lähetettiin 25 valmistajalle ja jälleenmyyjälle (Liite 1) edellä mainittuihin Euroopan maihin. Vastauksia saatiin 10 valmistajalta seitsemästä taso-, neljästä tyhjiöputki- ja kahdesta katteettomasta keräinmallista. Yhtenäisyyden vuoksi ja vertailun mahdollistamiseksi tiedot on koottu vain keräimistä, joiden valmistajat

[2] Euroopan unionin 15 jäsenvaltiota ennen laajentumista vuonna 2004 olivat Alankomaat, Belgia, Espanja, Irlanti, Italia, Itävalta, Kreikka, Luxemburg, Portugali, Ranska, Ruotsi, Saksa, Suomi, Tanska ja Yhdistynyt kuningaskunta.

vastasivat kyselyyn kattavasti. Keräimiä, joista saadut tiedot ovat puutteellisia, ei esitellä. Taulukkoon 4.1 on listattu kaikki vastanneet valmistajat ja heidän keräintyyppinsä.

Taulukko 4.1 Keräinten markkinaselvityksessä kyselyyn vastanneet keräinvalmistajat.

Valmistaja	Maa	Keräintyyppi
Arcon Solvarme *	Tanska	Tasokeräin
Arnes Plåtslageri AB *	Ruotsi	Tasokeräin/Katteeton keräin
Aquasol Solartechnik GmbH *	Saksa	Tasokeräin
Batec Solvarme *	Tanska	Tasokeräin/ Katteeton keräin
Filsol Solar	UK	Tasokeräin
Ritter Solar GmbH *	Saksa	Tyhjiöputkikeräin
S.O.L.I.D GmbH *	Itävalta	Tasokeräin
Sunda Solartechnik GmbH *	Saksa	Tyhjiöputkikeräin
Thermomax Ltd *	UK	Tyhjiöputkikeräin
Viessmann Värmeteknik AB	Ruotsi	Tasokeräin/ Tyhjiöputkikeräin

* Valmistajan keräintiedot esitellään tässä raportissa

Kaikki tässä selvityksessä esiteltävät keräinvalmistajat toteuttavat myös suuria aurinkolämpöprojekteja. Ainakin Arcon Solvarme A/S, Aquasol Solartechnik GmbH ja S.O.L.I.D. GmbH ovat rakentaneet isoja keräinkenttiä, jotka tuottavat lämpöä kaukolämpöverkkoon. Arcon Solvarme A/S on ollut toteuttamassa mm. 17 081 m^2:n aurinkokeräinkenttää Marstallissa Tanskassa ja 10 000 m^2:n keräinkenttää Kungälvissä Ruotsissa.

4.2.2 Selvityksen sisältö

Tekniset tiedot

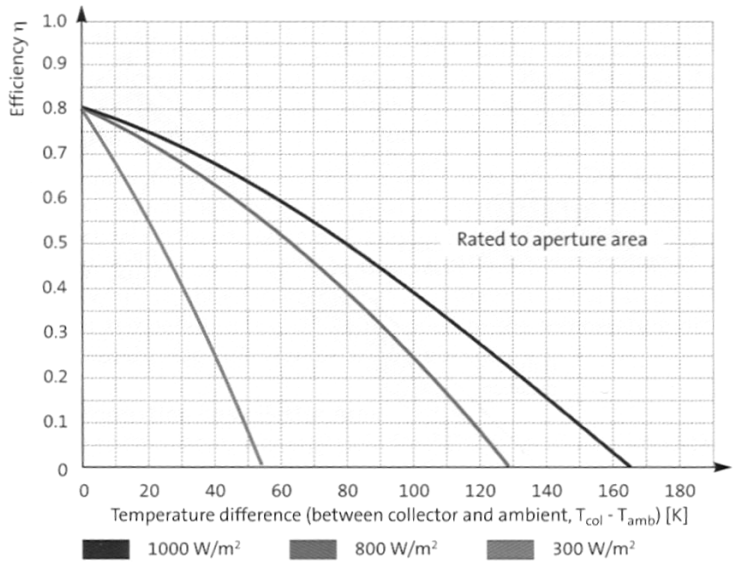
Kyselyssä selvitettiin keräinten teknisiä tietoja (Liite 2), jotka antavat kuvan keräimen koosta, rakenteesta, käytetyistä materiaaleista, keräimen toiminnasta, lämmöntuotosta ja

tehokkuudesta. Keräimen kokoa kuvailevat tiedot ovat keräimen ulkomitat (leveys x korkeus x paksuus), paino, kokonaispinta-ala, absorptiopinta-ala ja nestetilavuus. Keräimen rakenteesta antavat tietoa keräimen tärkeimpien osien (runko, kate, eristekerros, absorptiopinta, lämmönsiirtoputkisto) rakennemateriaalit. Lisäksi selvitettiin keräimelle suositeltu virtaama, suurin käyttöpaine, stagnaatiolämpötila, keräimen optinen tehokkuus ja arvio vuotuisesta lämmöntuotosta.

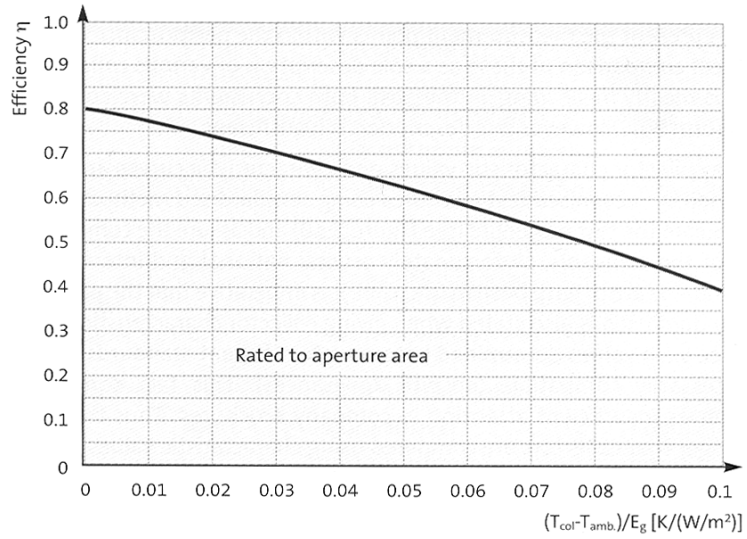
Kuvien 4.4 ja 4.5 kaltaisilla keräimen tehokkuutta kuvaavilla ominaiskäyrillä voidaan selvittää sekä keräimen optinen tehokkuus että stagnaatiolämpötila. Kun keräin on ympäristön lämpötilassa, lämpöhäviöitä ei ole vaan häviötä aiheuttavat pelkästään optiset tekijät. Tällöin tehokkuus saa suurimman arvonsa, jota kutsutaan optiseksi tehokkuudeksi ja voidaan määrittää kuvaajien (Kuvat 4.4. ja 4.5) y-akselien leikkauspisteistä. [6]

Kun auringon säteilyintensiteetti on vakio ja keräimen nestekierto ei ole päällä ($\eta = 0$), syntyy tasapainotilanne keräimen lämmönotossa ja -poistossa ja keräin saavuttaa sille ominaisen vakiolämpötilan, stagnaatiolämpötilan, joka voidaan määrittää kuvaajien x-akselien leikkauspisteiden avulla. Kuvassa 4.4 esitetään keräimen tehokkuuden riippuvuus keräimen keskimääräisen lämpötilan T_{cm} ja ympäristön lämpötilan T_a erotuksesta säteilyintensiteettien arvoilla 300, 800 ja 1.000 W/m^2. Stagnaatiolämpötila eri säteilyintensiteeteillä voidaan määrittää lisäämällä x-akselien leikkauspisteiden arvoihin ympäristön lämpötila.

Kuvassa 4.5 x-akselin muuttujana on $(T_{cm} - T_a)/E_g$, missä E_g on auringon säteilyintensiteetti. Stagnaatiolämpötila määritetään tällöin kertomalla x-akselin leikkauspisteen arvo säteilyintensiteetillä (esim. 1 000 W/m^2) ja lisäämällä saatuun arvoon ympäristön lämpötila.



Kuva 4.4 Keräimen tehokkuuden (efficiency, η) riippuvuus keräimen keskimääräisen lämpötilan (T_{col}) ja ympäristön lämpötilan (T_{amb}) erotuksesta auringon säteilyintensiteetin arvoilla 1 000 W/m^2, 800 W/m^2 ja 300 W/m^2 [6]



Kuva 4.5 Keräimen tehokkuuskäyrä, jossa x-akselin muuttujana on $(T_{col} - T_{amb})/E_g$ (T_{col} = keräimen keskimääräinen lämpötila, T_{amb} = ympäristön lämpötila ja E_g = auringon säteilyintensiteetti) [6]

Teknisten tietojen kyselylomaketta koottaessa ja tuloksia tarkasteltaessa käytettiin apuna Eurooppalaista aurinkolämpökeräinten standardia, EN 12975–2:2001 (Thermal solar systems and components - Solar collectors - Part 2: Test methods) [29]. Standardi määrää aurinkokeräinten eurooppalaisen testausmenetelmän. Se perustuu sen laatimisen aikaan voimassa olleisiin ISO- (International Organization for Standardization) ja kansallisiin standardeihin [6]. Standardi sisältää taso- ja tyhjiöputkikeräinten sekä katteettomien keräinten testausmenetelmien kuvaukset.

Keräimiä vertailtaessa tulee kiinnittää huomiota käytettyihin standardeihin. Esimerkiksi tehokkuustesteissä EN- standardi käyttää keräimen keskimääräisen lämpötilan ja ympäristön lämpötilan erotusta ja ISO- standardi keräimeen menevän veden ja ympäristön lämpötilan erotusta eivätkä tulokset tällöin ole täysin vertailukelpoisia. Referenssilämpötilan lisäksi tulee ottaa huomioon pinta-ala, johon määritykset perustuvat. EN- standardin mukaiset määritykset perustuvat keräimen läpinäkyvään pinta-alaan (engl. *aperture area*) ja absorptiopinta-alaan, kun ISO- standardin määritykset perustuvat keräimen absorptiopinta-alaan ja kokonaispinta-alaan. [29]

Eroa on myös standardien määräämissä testiolosuhteissa. EN- standardin mukaisessa keräimen tehokkuustestissä auringon säteilyintensiteetti keräimen tasoon on > 700 W/m^2 ja ISO- standardin mukaisessa testissä > 800 W/m^2. EN- standardin mukaisessa stagnaatiolämpötilan määrityksessä auringon säteilyintensiteetti keräimen tasoon > 1 000 W/m^2 ja lämpötila 20–40 $^\circ$C. ISO- standardin mukaan stagnaatiolämpötilaa määritettäessä auringon säteilyintensiteetti voi olla myös 1 100 W/m^2 tai 1 200 W/m^2 riippuen siitä, minkälaisessa ilmastossa keräintä tullaan käyttämään. [29]

4.3 Markkinaselvityksen tulokset

Selvityksen tulokset on koottu liitteiden 3 ja 4 taulukoihin. Seuraavassa tehdään yhteenveto tasokeräinten (Liite 3), tyhjiöputkikeräinten (Liite 4) ja katteettomien keräinten ominaisuuksista ja hintatiedoista.

4.3.1 Tasokeräimet

Keräinten rakennemateriaalit

Liitteessä 3 esitellyt tasokeräimet ovat kooltaan hyvin erilaisia kokonaispinta-alan vaihdellessa noin kahdesta neliömetristä 14 neliömetriin ja painon noin 23 kg:sta 344 kg:aan. Käytetyissä rakennemateriaaleissa sen sijaan ei ole suurta eroa vaan ne ovat yleisesti keräinten rakenteessa käytettyjä ja kestäviksi todettuja.

Keräinten kehysten rakennemateriaalina käytetään yleensä alumiinia [6]. SOLID-keräimen kehysrakenteessa on käytetty alumiinin lisäksi myös puuta. Aquasolin keräimen kehys on galvanoitua terästä.

Lasi on yleisin keräinten katemateriaali. Keräimissä suositaan vähärautaista lasia, jonka läpäisevyys on hyvä [6]. Keräinten säteilyn läpäisykyky vaihtelee Aquasolin keräimen 82 % läpäisevyydestä 98 prosenttiin, jonka Arnes Plåtslageri ilmoittaa keräimensä lasikatteen läpäisevyydeksi.

Tässä selvityksessä esiteltävien tasokeräinten lämmöneristeinä on kaikissa käytetty puhallusvillaa tai lasivillaa. Aquasolin keräimessä on käytetty lisäksi polyuretaania. Pohjan eristekerroksen paksuus vaihtelee Batecin keräimen 50 mm kerroksesta Arconin keräimen 75 mm kerrokseen. Sivuilla eristekerroksen paksuus on 15 - 30 mm.

Absorptiolevynä tasokeräimissä käytetään pääasiassa kuparia, joka on lämmönjohtavuusominaisuuksiltaan alumiinia parempi [6]. Esiteltävien keräinten absorptiolevyillä on selektiivinen pinnoite. Taulukossa 4.2 esitellään keräinten absorbaattorilevyjen materiaalit, selektiiviset pinnoitteet sekä absorbaattorin absorptio- ja emissiokertoimet.

Keräinten nestekiertoputkistot valmistetaan kuparista. Lämmönsiirtonesteenä käytetään vettä ja propyleeniglykolia. Lämmönsiirtonesteen glykolipitoisuus riippuu keräimen

maantieteellisestä sijainnista ja järjestelmästä. Keräinten nestetilavuus vaihtelee keräimen koosta riippuen 2,2 litrasta 9,8 litraan.

Taulukko 4.2 Tasokeräinten absorptiolevyjen materiaalit, selektiivinen pinnoite sekä absorptio- ja emissiokertoimet

Valmistaja	Absorptiolevy	Pinnoite	α	ε
Arcon Solvarme A/S	Sunstrip-absorbaattori (Tekno Term)		0,95 ± 0,02	0,15 ± 0,02
Batec A/S	Kupari	Musta kromi	0,95	0,10
Arnes Plåtslageri AB	Kupari	Musta kromi	0,96	0,12 ± 0,02
Aquasol Solartechnik GmbH	Kupari	Sunselect	0,96	0,05
S.O.L.I.D GmbH	Sunstrip- absorbaattori		0,96 ± 0,02	0,07

Keräinten ominaisuudet

Taulukossa 4.3 esitellään keräimiä testattaessa käytetyt standardit, keräinten optinen tehokkuus ja stagnaatiolämpötila sekä huomioita testiolosuhteisiin. Stagnaatiolämpötila, kun auringon säteilyintensiteetti on 1000 W/m^2 ja ympäristön lämpötila 30°C, on Batecin keräimellä 170–190 °C ja SOLID- keräimellä 208°C. Arnes Plåtslageri ilmoittaa keräimensä stagnaatiolämpötilaksi 210°C, mutta testissä säteilyintensiteetti on ollut 1 100 W/m^2. Keräinten optinen tehokkuus vaihtelee Arcon- keräimen 74,2 %:sta SOLID- ja Arnes Plåtslagerin keräimen noin 80 %:iin.

Keräimen vuotuinen lämmöntuotto riippuu monista tekijöistä kuten keräimen sijainnista ja aurinkolämpöjärjestelmän koosta. Tästä johtuen valmistajat ilmoittavat keräimen lämmöntuotolle vaihteluvälin tai yhden arvon, joka pätee tietyissä olosuhteissa. Batec ilmoittaa keräimen lämmöntuoton vaihtelevan käyttöveden lämpötilasta riippuen välillä 300–700 kWh/m^2, kun keräin on 45 asteen kaltevuuskulmassa ja auringon säteilyteho on noin 1 100 kWh/m^2 vuodessa. Arconin keräimen lämmöntuotto on 500–600 kWh/m^2 riippuen mm. keräimen sijainnista, lämmön kulutuksesta, varaajan koosta ja

lämmönhukasta systeemissä. Arnes Plåtslageri arvioi keräintensä lämmöntuoton olevan noin 408–444 kWh/m^2 ja Aquasol noin 525 kWh/m^2. Valmistajien keräimille suosittelema virtaama on keräimen koosta riippuen 0,2–2,8 l/min/m^2. Suurin käyttöpaine on 6–12 bar.

Taulukko 4.3 Tasokeräinten optinen tehokkuus, stagnaatiolämpötila ja käytetyt standardit

Valmistaja	Standardi	η_0 [%]	T_{stag} [°C]
Arcon Solvarme A/S	ISO 9806	74,2	189
Batec A/S	ISO 9806	76,3	170 – 190 (1 000 W/m^2, 30°C)
Arnes Plåtslageri AB	-	75,8	210 (1 100 W/m^2)
Aquasol Solartechnik GmbH	DIN 4757-4	80,0	200 (1 000 W/m^2, 30°C)
S.O.L.I.D GmbH	EN 12975-2	79,1	208 (1 000 W/m^2, 30°C)

Keräinten hintatiedot

Tässä selvityksessä vertailtavien tasokeräinten neliömetrihinta on laskettu keräinten kokonaispinta-alan suhteen ja se vaihtelee Arconin keräimen 180 €/m^2 Arnes Plåtslagerin 223 €/m^2. Keräinten keskimääräinen neliömetrihinta on 193 €.

4.3.2 Tyhjiöputkikeräimet

Keräinten rakenne ja materiaalit

Liitteeseen 4 on koottu kolmen tyhjiöputkikeräimen ominaisuudet ja hintatiedot. Thermomaxilta esitellään sekä yksinkertainen lämpöputkella varustettu keräinmalli (Mazdon 30) että yksinkertainen suoralla lämmönsiirtoputkella varustettu keräin. (Solamax 30). Ritter Solarin tyhjiöputkikeräimessä on kaksinkertaiset tyhjiöputket, lämmönsiirtoputki on U-muotoinen ja tyhjiöputkien alla on CPC- heijastajat.

Thermomax- keräimet ovat kokonaispinta-alaltaan 4,47 m^2 (Mazdon) ja 4,28 m^2 (Solamax) ja painavat 78 kg ja 84 kg. Ritter Solarin keräin on kooltaan hieman pienempi kokonaispinta-alan ollessa 3,41 m^2 ja painon 54 kg.

Thermomaxin keräinten runko on rakennettu ruostumattomasta teräksestä ja katemateriaalina on vähärautainen lasi. Ritter Solarin keräimen runko on alumiinia ja kate silikoboraatti- lasia. Thermomaxin keräimissä absorbaattoreina ovat selektiivisellä pinnoitteella päällystetyt kuparilevyt. Ritter Solarin keräimen sisäputken selektiivinen absorptiopinta on alumiininitriittiä.

Lämmönsiirtoputkisto on kuparia ja lämmönsiirtonesteenä käytetään vettä tai vesi-glykoliseosta. Thermomaxin Solamax- keräimen nestetilavuus on 5,91 l ja Ritter Solarin keräimen 2,4 l. Mazdon- lämpöputkikeräimen nestetilavuus on lämmönsiirtotekniikkansa vuoksi huomattavasti pienempi; 0,84 l.

Keräinten ominaisuudet

Ritter Solarin keräimelle suositeltu virtaamaväli on 0,2–1,0 l/m^2/min ja suurin käyttöpaine 10 bar. Thermomaxin keräimissä virtaama on noin 0,9 l/m^2/min ja suurin käyttöpaine 5 bar. Ritter Solarin keräimen stagnaatiolämpötila on suurin (295°C) ja Thermomaxin lämpöputkikeräimen pienin (184°C), kun taas Thermomax- keräinten optinen tehokkuus (n. 75 %) on parempi kuin Rittersolar- keräimen (n. 61 %). Thermomax keräinten vuotuinen lämmöntuotto voi parhaimmillaan olla 756 kWh/m^2. Ritter Solar- keräimen lämmöntuotto on noin 660 kWh/m^2 vuodessa.

Keräinten hintatiedot

Kolmen tyhjiöputkikeräintyypin hintavertailussa kaksinkertainen keräintyyppi U - muotoisella lämmönsiirtoputkella osoittautuu halvimmaksi (205 €/m^2) ja yksinkertainen lämpöputkikeräin kalleimmaksi (423 €/m^2). Solamax- keräimen

(yksinkertainen tyhjiöputki, suora lämmönsiirtoputki) neliömetrihinta on 324 €/m^2. Tasokeräinten hintatiedoista poiketen tyhjiöputkikeräinten kappale- ja neliömetrihinnat pätevät vain 500 m^2- keräinkentälle.

4.3.3 Katteettomat keräimet

Ruotsin Arnes Plåtslageri ja Tanskan Batec valmistavat tasokeräinten lisäksi myös katteettomia keräimiä. Arnes Plåtslagerin katteettoman keräimen absorbaattori on valmistettu EPDM- kumista, sen kokonaispinta-ala on 12,0 m^2 ja nestetilavuus 72,0 l. Batecin keräimen polypropyleeni- absorbaattorin kokonaispinta-ala on 4,8 m^2 ja nestetilavuus 19,5 l. Batecin katteettoman keräimen lämmöntuotto vuodessa on noin 250 - 300 kWh/m^2 ja sen neliömetrihinta on 59 €. Arnes Plåtslagerin katteettoman keräimen nelimömetrihinta on korkeampi (75 €/m^2) eikä lämmöntuoton arviota ole ilmoitettu.

Taulukko 4.5 Katteettomien keräinten tekniset tiedot ja hinnat

	Arnes Plåtslageri AB	**Batec A/S**
Mitat	0,2 x 60 m	1,25 x 3,85 m
Paino	60 kg	14 kg
Kokonaispinta-ala	12,0 m^2	4,8 m^2
Materiaali	EPDM kumi	Polypropyleeni
Nestetilavuus	72,0 l	19,5 l
Hinta €/kpl	900,00	281,40
Hinta €/m^2	75	59
Lämmöntuotto/vuosi	-	250–300 kWh/m^2
Takuu	10 vuotta	5 vuotta

5 Aurinkolämmön mahdollisuudet Euroopan unionissa ja Suomessa

5.1 Tavoitteet ja potentiaali

5.1.1 Euroopan unionissa

Euroopan komission uusiutuvien energiamuotojen valkoisessa kirjassa [30] vuonna 1997 asetettiin Euroopan unionin tavoitteeksi uusiutuvien energiamuotojen 12 % osuuden saavuttaminen kokonaisenergiakulutuksesta vuoteen 2010 mennessä. Vuonna 2003 oltiin edelleen vuoden 1997 lähtötasolla ja uusiutuvien energiamuotojen osuus oli noin 6 % kokonaisenergiakulutuksesta [31]. Uusiutuvan energian käytön lisääminen on jäänyt energiankulutuksen kasvun jalkoihin. Aurinkolämmön osalta tavoitellaan 100 miljoonan neliömetrin kapasiteettia (70 000 MW) vuoteen 2010 mennessä [30]. Tavoite on mahdollinen, jos aurinkolämpömarkkinat saadaan kasvuun kaikissa jäsenvaltioissa. Esimerkiksi, jos kaikissa EU:n 25 jäsenvaltioissa aurinkolämmön kapasiteetti henkeä kohti olisi sama kuin Itävallassa vuonna 2004 [26] vuosittaiset aurinkolämpömarkkinat EU:ssa olisivat nyt 10 000 000 m^2 ja käytössä olevien keräinten kapasiteetti 82 000 MW [26]. Euroopan unionin kokonaisenergiankulutuksesta[3] noin 50 % käytetään lämmitystarkoituksiin [32]. Lämmöntuotannossa uusiutuvien osuus vuonna 2000 oli 9,7 % [33].

ESTIF (European Solar Thermal Industry Federation) on arvioinut [27] kunkin EU15-jäsenvaltion aurinkolämmön teknistaloudellisen potentiaalin (Liite 5), joka ilmoitetaan keräinpinta-alana 1 000 asukasta kohti. Arviot perustuvat maakohtaisiin lämmöntuoton tarpeisiin, auringonsäteilyarvoihin ja asukaslukuihin. Ilmastotekijöiden vuoksi aurinkolämmön potentiaalit Pohjois- ja Etelä-Euroopassa ovat erilaiset. Teollisuuskäytössä ja jäähdytyksessä aurinkolämmöllä on suurempi potentiaali Etelä-Euroopassa kuin Pohjois-Euroopassa. Pohjois-Euroopassa lämmön tarve on kuitenkin

[3] EU:n kokonaisenergiankulutus vuonna 2003 oli 1 726 Mtoe [28]

huomattavasti suurempi kuin Etelä-Euroopassa ja aurinkolämmön kokonaispotentiaali henkeä kohti (m^2/asukas) on suurempi. Aurinkolämmön kokonaispotentiaaliksi Etelä-Euroopassa on arvioitu 2,7 m^2/asukas, josta kotitalouksien lämpimän veden tuoton osuus on 1,7 m^2, jäähdytyksen osuus 1,0 m^2 ja teollisuuden ja palveluiden käyttöön tuotetun lämmön osuus 1,0 m^2. Pohjois-Euroopassa vastaava arvio on 6,3 m^2/asukas, josta kotitalouksien lämpivän veden tuoton osuus on 1,3 m^2 ja lämmöntuoton osuus 5,0 m^2. Aurinkolämmön kokonaispotentiaali Euroopan union alueella on 1,4 miljardia m^2, mikä vastaa 682 TWh eli 58,7 Mtoe vuotuista energiantuottoa. Tämä on 6 % EU:n kokonaisenergiankulutuksesta, enemmän kuin kokonaisenergiankulutus Belgian kokoisessa maassa ja 30 % EU:n Lähi Idän tuontiöljystä vuonna 1999. [27]

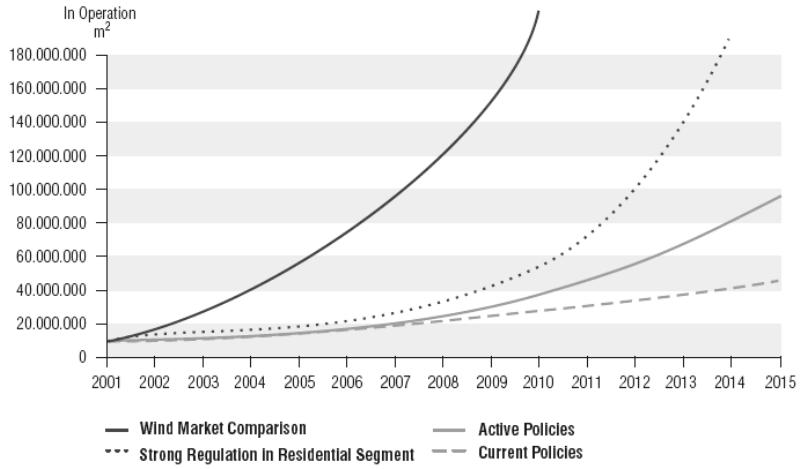
ESTIF esittää [27] neljä skenaariota aurinkolämmön kasvulle EU:ssa vuosina 2001 – 2015 (Kuva 5.1). Skenaarioissa tarkastellaan tärkeän tekijän, poliittisen tuen, vaikutusta aurinkolämpömarkkinoiden kasvuun. Ensimmäisessä skenaariossa tuet aurinkolämmölle pysyvät samalla tasolla ja Valkoisen kirjan tavoitteesta jäädään kauas vielä vuonna 2015. Toisessa skenaariossa aurinkolämpöä tuetaan koko EU:n alueella aktiivisella politiikalla ja tavoite saavutetaan vuonna 2015. Kolmannessa skenaariossa asetetaan sitovia velvoitteita aurinkolämmön käytölle kotitalouksissa, jolloin vuonna 2015 jo pelkästään kotitalouksissa käytössä olevien keräinten määrä on 199 miljoonaa m^2. Neljännessä skenaariossa aurinkolämmön markkinat kasvavat samaa vauhtia kuin tuulienergian markkinat vuosina 1990 – 2001. Tällöin keräinten koonaismäärä vuonna 2015 olisi enemmän kuin 1 miljardia m^2.

5.1.2 Suomessa

Suomessa energiankokonaiskulutus vuonna 2004 oli lähes 36 Mtoe. Teollisuus on suurin energiankuluttuja ja sen osuus energian loppukäytöstä[4] on puolet. Rakennusten lämmitykseen kuluu energian loppukäytöstä 22 % ja liikenteeseen 16 %. [31]

[4] Kokonaisenergiankulutus vähennettynä energian muunto- ja siirtohäviöt (1 124 PJ vuonna 2004)

Suomen uusiutuvan energian edistämisohjelmassa aurinkolämmön osalle on asetettu 0,004 Mtoe kapasiteetin lisäys vuodesta 1995 vuoteen 2010 [34]. Kansallisessa aurinkoenergian toimenpideohjelmassa tavoitteeksi on asetettu 120 000 m^2 kapasiteetti vuoteen 2010 mennessä [35]. Suomessa aurinkolämmön tekninen potentiaali ESTIF:n arvion [27] (Liite 5) mukaan on 6,3 m^2/asukas. Kokonaispotentiaali on 32 640 300 m^2, mikä vastaa 9 810 GWh eli 0,8 Mtoe.



Kuva 5.1 Neljä skenaariota EU:n aurinkolämpömarkkinoiden kasvulle [27]

5.2 Markkinoiden kasvuun vaikuttavat tekijät

Aurinkolämmön laajamittaiseen käyttöönottoon tarvitaan toimia niin Euroopan unionin tasolla kuin kansallisilla ja alueellisillakin tasoilla. Unionin tasolta kehitystä ohjataan oikeaan suuntaan yhteisillä tavoitteilla ja velvoittavilla direktiiveillä. Valkoisen kirjan uusiutuvia energiamuotoja koskevan tavoitteen saavuttamiseksi EU on laatinut mm. uusiutuvia sähköntuotantomuotoja [36] ja biopolttoaineita [37] koskevat direktiivit. Uusiutuville sähköntuotantomuodoille asetettiin tavoitteeksi 22 % osuus EU:n sähköntuotannosta ja biopolttoaineille 5,75 % osuus jokaisen jäsenvaltion liikennepolttoaineista vuoteen 2010 mennessä. Uusiutuvilta lämmöntuotantomuodoilta (aurinkolämpö, biomassa, geoterminen energia, lämpöpumput) vastaava direktiivi puuttuu. Niiden hyödyntäminen on sisällytetty rakennusten energiatehokkuus direktiiviin

[38] ja yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannon direktiiviin [39]. Oma direktiivi tarvittaisiin kuitenkin tavoitteiden asettamiseksi lämmöntuotantosektorille. ESTIF ja EREC (European Renewable Energy Council) kampanjoivat direktiivin puolesta ja ehdottavat [32] uusiutuvien lämmöntuotantomuotojen tavoitteeksi 25 % osuutta unionin lämmöntuotosta vuoteen 2020 mennessä.

Merkittävimmät esteet aurinkolämpömarkkinoiden käynnistymiselle ovat usein taloudellisia. Investoinnin hintaan ja takaisinmaksuaikaan voidaan vaikuttaa taloudellisilla tuilla, jotka ovat välttämättömiä uuden teknologian käyttöönottovaiheessa. Lisäksi aurinkolämmön (ja muiden uusiutuvien lämmöntuotantomuotojen) kilpailukykyä tavanomaisten lämmitysmuotojen kanssa voidaan parantaa lopettamalla fossiilisten polttoaineiden tukeminen ja toteuttamalla ulkoisten kustannusten[5] sisällyttäminen polttoaineiden hintaan. [27]

Tärkeä osa-alue markkinoiden käynnistämisessä on uudesta teknologiasta tiedottaminen potentiaalisille loppukäyttäjille ja päätöstentekijöille. Saksassa vuosien 1995 – 2001 välisen aurinkolämpömarkkinoiden ansiokkaan kehittymisen taustalla tärkeänä tekijänä oli yleisen aurinkolämpöä koskevan tietoisuuden lisääntyminen, jota edesauttoi aurinkolämpökampanja, ”Solar – na klar!”. Kolmivuotisen kampanjan aikana vuosina 1999 – 2001 tietoa levitettiin median välityksellä ja kiinnostuneille kansalaisille osoitetuilla tiedotuslehtisillä. [28]

Markkinoiden rakenteen kehittämisessä tärkeänä osana ovat tarvittavien ammattilaisten, kuten LVI- asentajien motivointi ja koulutus. Pitkän ajan tavoitteena olisi aurinkolämpöteknologian integroiminen osaksi lämpö- ja rakennusyritysten peruspalveluja. Luotettavat ja toimivat markkinat voidaan saavuttaa takaamalla tuotteiden laatu Eurooppalaisia standardeja (EN- standardit) ja laatumerkintää (Solar Keymark) noudattamalla. [27]

[5] Polttoaineen käytöstä aiheutuvat kulut ympäristölle ja koko yhteiskunnalle

5.2.1 Suomen aurinkolämpömarkkinoiden tilanne

Suomen aurinkolämpömarkkinat ovat hyvin pienet. Vuonna 2004 käytössä olevien aurinkolämpökeräinten määrä Suomessa oli 11 980 m^2 (Liite 6), mikä vastaa 8 386 kW (Liite 7) [26]. Vuosina 2003 ja 2004 uusia keräimiä asennettiin 2000 m^2/vuosi [26]. Aurinkolämpömarkkinoiden kasvun esteitä Suomessa on vielä monia. Tieto aurinkolämmöstä ja sen mahdollisuuksista sekä päättäjien että kansalaisten keskuudessa on vähäistä. Aurinkolämmön rakentamista ei juuri tueta taloudellisin keinoin eikä aurinkolämpö siten ole kilpailukykyinen tavanomaisten, toistaiseksi verrattain edullisten lämmitysmuotojen (öljy, sähkö, kaukolämpö) kanssa. Näistä pelkästään sähköön perustuvaa lämmitystä on pidettävä primäärienergian tehokkaan hyödyntämisen kannalta erityisen huonona ratkaisuna. [27]

5.4 Aurinkolämmön tarjoamat edut

5.4.1 Euroopan unionissa ja Suomessa

Uusiutuvilla energiamuodoilla on tärkeä osa energiantuotannon monipuolistamisessa ja hajauttamisessa sekä energiaomavaraisuuden lisäämisessä. Tässä aurinkolämmöllä on oma roolinsa uusiutuvien lämmöntuotantomuotojen osuuden lisäämisessä. EU kattaa energiantuotannostaan 50 % tuontienergialla. Tuontiriippuvuuden ennustetaan kasvavan 70 %:iin vuoteen 2020 mennessä, jos merkittäviin, uusiin toimenpiteisiin ei ryhdytä [30]. Suomen energian tuontiriippuvuus on 70 %. Vuoden 2005 tammi-syyskuun aikana tuontienergiasta 72 % oli peräisin Venäjältä (Tilastokeskus).

Uusiutuvien energiamuotojen edistämisestä saatava taloudellinen hyöty säästetyn tuontienergian, uusien työpaikkojen ja viennin kautta on merkittävä. Vuoden 2010 aurinkolämpömarkkinoiden tavoitteen saavuttamisen arvioidaan luovan Euroopan unionin alueelle 250 000 uutta työpaikkaa [30]. Polttoainekustannuksissa saatavan säästön arvioidaan olevan 0,6 miljardia €/vuosi vuonna 2010 [30]. Uusiutuvat

energiamuodot edistävät alueellista kehitystä lisäämällä paikallista työllisyyttä. Suomessa tässä kehityksessä tärkeässä osassa on harvaan asutettu maaseutu. Saksassa vuonna 2001 aurinkolämpöalalla työskentelevien ihmisten määrä oli noin 8 500 [28].

Vuonna 2003 EU:n 25 jäsenvaltion CO_2- päästöt olivat 4 925 miljoonaa tonnia [31]. Aurinkolämmöllä saatavat hiilidioksipäästövähennykset EU:ssa Valkoisen kirjan tavoitteen toteutuessa ovat 19 miljoonaa tonnia/vuosi vuonna 2010 [30]. Saksassa aurinkolämmöllä[6] saadut päästövähennykset vuonna 2001 olivat 729 979 t CO_2 ja Ruotsissa 11 564 t CO_2 [28]. Suomessa vastaavat päästövähennykset vuonna 2000 olivat 6 953 t CO_2 [28]. Suomessa polttoaineineiden energiakäytön hiilidoksidipäästöt vuonna 2004 olivat 67 miljoonaa tonnia [31].

5.4.2 Saatava hyöty suomalaisessa pientalossa

Pientalon energiankulutus ja lämmitysenergian lähteet

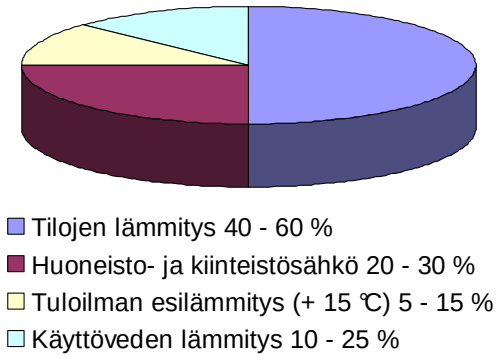
Vuonna 2004 pientalokanta Suomessa oli 1 037 714, mikä on 76,5 % kaikista rakennuksista [31]. Pientalojen lämmitykseen käytetyt energialähteet vuonna 2004 on esitetty taulukossa 5.1. Pientalojen lämmitykseen käytetty energia ko. vuonna oli 26,7 TWh, josta puun pienkäytön osuus oli noin 37 %, kevyen polttoöljyn osuus noin 27 % ja sähkölämmityksen osuus noin 25 %. Nämä kolme lämmitysmuotoa kattavat pientalojen lämmityksestä noin 89 %. Öljyn ja sähkön osuus on 52 %. Öljyn ja sähkön korvaaminen uusiutuvilla lämmitysmuodoilla (aurinkolämmöllä, lämpöpumpuilla, biomassalla) on järkevää sekä energiaomavaraisuuden että ympäristöllisten syiden kannalta.

[6] Tasokeräimet, tyhjiöputkikeräimet ja katteettomat keräimet

Taulukko 5.1 Pientalojen lämmitysmuodot, tuotettu energia ja sen osuus pientalojen lämpöenergian kulutuksesta Suomessa vuonna 2004 [31]

Lämmitysmuoto	Energia [TWh/vuosi]	Osuus [%]
Puun pienkäyttö	9,83	36,9
Kevyt polttoöljy	7,17	26,9
Sähkölämmitys	6,70	25,1
Lämpöpumput	1,50	5,6
Kaukolämmitys	1,23	4,6
Turve	0,12	0,4
Maakaasu	0,08	0,3
Hiili	0,03	0,1
Lämmitysenergia yhteensä	26,66	100

Suomessa pientalon energiankulutuksesta tilojen lämmityksen osuus on 40 – 60 % (Kuva 5.2). Tilojen lämmitykseen tarvittava energia (sisältää tuloilman esilämmityksen) on normaalisti lämpöeristetyssä, nykyaikaisessa pientalossa noin 100 – 120 kWh/m^2 vuodessa (matalaenergiatalossa noin 60 kWh/m^2). Käyttöveden lämmityksen osuus energiankulutuksesta on 10 – 25 % (Kuva 5.2) ja siihen tarvittava energia vuodessa on 750 – 1000 kWh/asukas. [40]



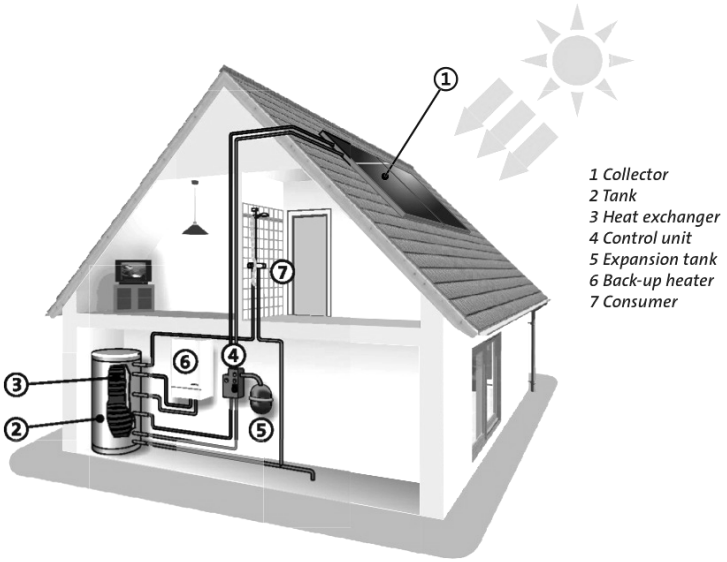
Kuva 5.2 Pientalon energiankulutus [40]

Aurinkolämpöjärjestelmällä korvattava osuus lämpöenergiantarpeesta

Pientalon aurinkolämpöjärjestelmä (Kuva 5.3) toimii täydentävänä lämmitysmuotona esimerkiksi öljy- tai sähkölämmityksen yhteydessä. Ekologisesti suunnitellussa talossa aurinkolämpöjärjestelmä täydentää toista uusiutuvaa lämmitysjärjestelmää, esimerkiksi pellettilämmitystä. Aurinkolämmöllä pientalossa saatavan hyödyn selvittämiseksi otetaan esimerkkitapaukseksi neljän hengen perhe 100 m^2:n pientalossa. Oletetaan energian kulutuksen vuodessa tilojen lämmityksen osalta olevan 110 kWh/m^2 (11 000 kWh/vuosi) ja käyttöveden lämmityksen osalta 900 kWh/asukas (3600 kWh/vuosi). Käyttöveden lämmitykseen tarvittava energia on vakio läpi vuoden, 300 kWh/kuukausi. Tilojen lämmitykseen tarvittava energia vaihtelee vuodenajan mukaan (Taulukko 5.2). Kuukausittainen tilojen lämmitysenergia on arvioitu painottamalla vuoden aikana tarvittava energia kuukauden keskimääräisen ulkolämpötilan[7] ja keskimääräisen sisälämpötilan (20 °C) erotuksella.

Aurinkolämpöjärjestelmän energiantuoton esimerkkiarvoina käytetään Viitasaaren ABC-liikennemyymälän tasokeräinten tuotantotietoja. Kuukausikohtainen lämmöntuotto sekä 6 m^2:n (keräinpinta-ala) että 12 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmällä esitetään taulukossa 5.2. Lämmöntuotto vuodessa 6 m^2:n järjestelmälle on noin 2 MWh ja 12 m^2:n noin 4 MWh. Taulukossa esitetyistä lämmöntuotoista on vähennetty järjestelmän pumpun kuluttama energia, joka pientalon aurinkolämpöjärjestelmässä on noin 100–170 kWh/vuosi [41]. Tässä järjestelmien sähkönkulutuksen oletettiin olevan 170 kWh/vuosi, joka on 8,5 % pienemmän järjestelmän (6 m^2) lämmöntuotosta ja 4,3 % suuremman järjestelmän tuotosta. Taulukossa 5.2 esitetään järjestelmien nettotuotot, joista on vähennetty pumpun kuluttama teho. Pienemmän järjestelmän vuotuinen nettotuotto on 1,8 MWh ja suuremman järjestemän 3,8 MWh. Kun suuremman järjestelmän nettotuotosta vähennetään vielä kesä- ja heinäkuun aikana tuotettu ylimäärälämpö (0,3 MWh), on sen tuottama vuotuinen hyödynnettävä lämpö 3,8 MWh – 0,3 MWh = 3,5 MWh.

[7] Kuopion lentoaseman kuukausittaiset keskilämpötilat ajalta 1971 – 2000 (Ilmatieteenlaitos)

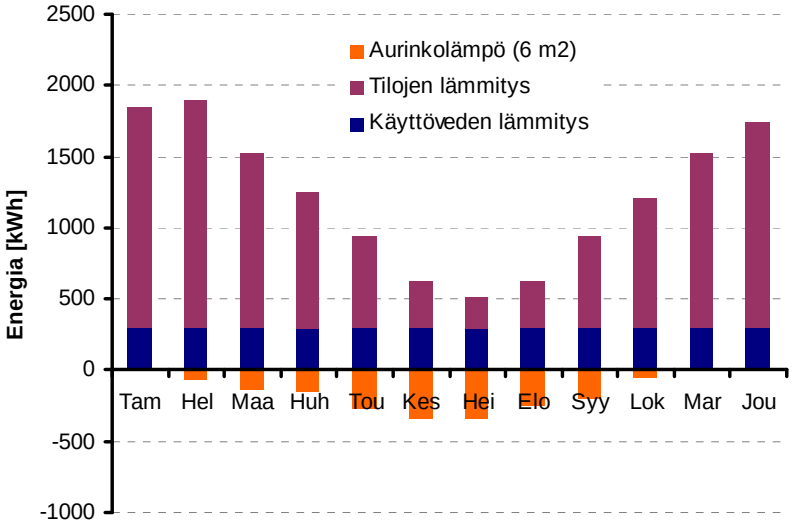


Kuva 5.3 Pientalon aurinkolämpöjärjestelmä (1 Aurinkolämpökeräin, 2 Varaaja, 3 Lämmönvaihdin, 4 Ohjausyksikkö, 5 Paisuntasäiliö, 6 Varalämmitin, 7 Kuluttaja) [27]

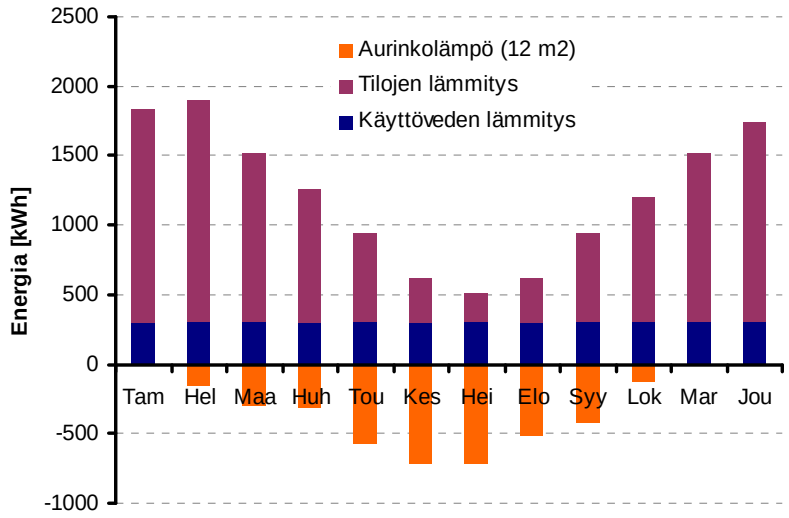
Aurinkolämpöjärjestelmällä saatavaa hyötyä havainnollistetaan kuvien 5.4 ja 5.5 pylväsdiagrammeissa. 6 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmä tuottaa käyttöveden lämmitykseen tarvittavan energian kesä- ja heinäkuussa, jolloin energiaa riittää myös tilojen lämmittämiseen. Toukokuussa aurinkolämmöllä tuotetaan 90 % käyttöveden lämmitykseen tarvittavasta energiasta, elokuussa 80 %, syyskuussa 70 %, huhti- ja maaliskuussa 50 % ja loka- ja helmikuussa 20 %. Aurinkolämmöllä tuotetaan koko vuoden käyttöveden lämmitysenergiasta noin 50 %. 12 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmä tuottaa käyttöveden lämmitykseen tarvittavan energian maalis – syyskuun ajalta. Helmikuussa aurinkolämmöllä lämmitetään puolet käyttövedestä ja lokakuussa 40 %. Koko vuoden käyttöveden lämmitysenergiasta aurinkolämpö kattaa noin 70 %. Lisäksi aurinkolämmöllä tuotetaan tilojen lämmitykseen tarvittavasta energiasta kesä- ja heinäkussa 100 %, elokuussa 70 %, toukokuussa 40 % ja syyskuussa 20 %.

Taulukko 5.2 Pientalon tilojen ja käyttöveden lämmitykseen kuluva energia sekä 6 m^2:n ja 12 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmällä tuotettu lämpö

	Tilojen lämmitys [kWh]	**Käyttöveden lämmitys [kWh]**	**Lämmitys yhteensä [kWh]**	**Aurinkolämpö (6 m^2) [kWh]**	**Aurinkolämpö (12 m^2) [kWh]**
Tammi	1 541	300	1 841	0	0
Helmi	1 594	300	1 894	72	151
Maalis	1 222	300	1 522	144	302
Huhti	956	300	1 256	148	310
Touko	638	300	938	272	570
Kesä	319	300	619	346	723
Heinä	213	300	513	344	721
Elo	319	300	619	246	514
Syys	638	300	938	203	424
Loka	903	300	1 203	60	125
Marras	1 222	300	1 522	1	2
Joulu	1 435	300	1 735	0	0
Yhteensä	11 000	3 600	14 600	1 837	3 845



Kuva 5.4 Pientalon tilojen (100 m^2) ja käyttöveden (4 henkeä) lämmitykseen kuluva energia ja 6 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmällä tuotettu lämpö



Kuva 5.5 Pientalon tilojen (100 m^2) ja käyttöveden (4 henkeä) lämmitykseen kuluva energia ja 12 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmällä tuotettu lämpö

Taloudellinen tarkastelu

Aurinkolämpöjärjestelmän taloudellista kannattavuutta voidaan arvioida määrittämällä sen takaisinmaksuaika. Takaisinmaksuaikaan vaikuttavat investoinnin hinta, järjestelmän tuotto, korvattavan energian hinta ja hinnan nousu. Arvioidaan edellä esiteltyjen aurinkolämpöjärjestelmien (6 m^2 ja 12 m^2) takaisinmaksuajat käyttäen yksinkertaisen takaisinmaksuajan laskukaavaa [3]

(5.1) $$n_{sp} = \frac{\log\left(\frac{i_f\, C}{c_f\, FE} + 1\right)}{\log(1 + i_f)}$$, missä

C = aurinkolämpöjärjestelmän hinta [€],

c_f = korvattavan energian hinta [€/MWh],

i_f = korvattavan energian vuotuinen hinnan nousu ja

FE = vuotuinen energian säästö [MWh].

Aurinkolämpöjärjestelmän voi ostaa joko valmiina tai edullisempana rakennussarjana. Valmiiksi asennettuna keräinten hinta on noin 400 €/m^2 ja pumppuyksikön 450 € (sisältää paisuntasäiliön). Rakennussarjana keräinten hinta on noin 200 €/m^2 ja pumppuyksikön 250 €. Käyttövesivaraajan (500 l) hinta on noin 2 000 € ja asennus- ja putkitöiden hinta noin 1 500 €. Muiden järjestelmään kuuluvien komponenttien (ohjausyksikkö, 20 m putkistot ja muut tarvikkeet) kokonaishinta on noin 850 €. Valmiiksi asennetun 6 m^2:n suuruisen aurinkolämpöjärjestelmän kokonaishinnaksi varaajineen tulee siis noin 7 200 €. Rakennussarjana ostettaessa koko järjestelmän hinnaksi tulee 4 300 €. Järjestelmän hinta laskee huomattavasti, jos aurinkolämpöjärjestelmä voidaan kytkeä vanhaan varaajaan. Tällöin 6 m^2:n järjestelmän hinta valmiiksi asennettuna on noin 5 200 ja rakennussarjana 2 300 €. Järjestelmien hinnat (6 m^2 ja 12 m^2) on esitetty taulukoissa 5.3 ja 5.4 ja 5.5. Tässä esitetyt hinta-arviot perustuvat T:mi Timo Jodat Ympäristöenergialta (www.y-energia.com) saatuihin tietoihin.

Aurinkolämpöjärjestelmällä korvattavaa energianmäärää laskettaessa on öljykattilan hyötysuhteena käytetty arvoa 85 % [42]. Tällöin 6 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmällä, jonka tuotto on 1,8 MWh/vuosi, saatava vuotuinen energiansäästö öljylämmitystä korvattaessa on 1,8 MWh/vuosi / 0,85 = 2,1 MWh/vuosi. Vastaavasti 12 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmällä saatava energiansäästö on 3,5 MWh/vuosi / 0,85 = 4,1 MWh/vuosi.

Takaisinmaksuaikoja laskettaessa on käytetty kahta skenaariota öljyn hinnan kehitykselle. Ensimmäisessä skenaariossa (Taulukko 5.3) öljyn hinnan nousu on 8,4 %, joka oli kevyen polttoöljyn kuluttajahinnan keskimääräinen vuotuinen kasvuprosentti vuosina 1995 – 2005. Toinen skenaario (Taulukko 5.4) kuvaa tämän hetkistä tilannetta, jossa öljyn hinta nousee vuodessa 30,7 %. Kasvuprosentti vastaa kevyen polttoöljyn keskimääräistä hintakehitystä vuosina 2004 ja 2005. Kevyen polttoöljyn hinta vuoden 2005 lopussa oli 68,0 €/MWh. Näiden kahden skenaarion lisäksi on laskettu sähkölämmitystä täydentävien aurinkolämpöjärjestelmien takaisinmaksuajat (Taulukko 5.5). Varaavassa sähkölämmityksessä käytetyn sähkön hinta on kasvanut vuosien 1995 - 2005 aikana keskimäärin 3,0 % vuodessa. Vuoden 2005 lopussa sähkön

kokonaishinta (varaava sähkölämmitys) oli 69,6 €/MWh. Järjestelmien takaisinmaksuajat sähkölämmitystä korvattaessa on laskettu olettaen tämä hintakehitys.

Vuosien 2004 ja 2005 öljyn hintakehityksen (30,7 % vuotuinen kasvuprosentti) jatkuessa on öljylämmityksen korvaaminen aurinkolämmöllä taloudellisesti kannattavaa. Pienemmän järjestelmän (6 m^2) takaisinmaksuaika on tällöin reilusta kuudesta vuodesta reiluun 10 vuoteen ja suuremman (12 m^2) noin kuudesta vuodesta noin yhdeksään vuoteen riippuen siitä, uusitaanko varaaja ja ostetaanko järjestelmä valmiina vai rakennussarjana (Taulukko 5.4). Öljyn hinnan nousun ollessa pienempi (8,4 % vuodessa) kasvaa aurinkolämpöjärjestelmien takaisinmaksuajat huomattavasti. Pienemmän järjestelmän takaisinmaksuaika on tällöin reilusta 10 vuodesta reiluun 20 vuoteen ja suuremman noin 9 vuodesta reiluun 16 vuoteen (Taulukko 5.3). Pisimmät takaisinmaksuajat aurinkolämpöjärjestelmillä on sähkölämmitystä korvattaessa johtuen sähkön hinnan pienestä kasvuprosentista (3,0 % vuodessa). Pienemmän järjestelmän takaisinmaksuaika on noin 15 - 34 vuotta ja suuremman 12 - 26 vuotta (Taulukko 5.5).

Taulukko 5.3 Aurinkolämpöjärjestelmien (6 m^2 ja 12 m^2) takaisinmaksuajat öljylämmitystä korvattaessa valmiina ja rakennussarjana ostettaessa (öljyn hinnan nousu 8,4 %)

Aurinkolämpöjärjestelmä 6 m^2				
	Valmis järjestelmä		**Rakennussarja**	
	Varaaja		**Varaaja**	
	Sisältyy	**Ilman**	**Sisältyy**	**Ilman**
Hinta [€]	7 200	5 200	4 300	2 300
	Takaisinmaksuaika [vuosi]			
Öljylämmitys	20,4	17,3	15,6	10,5
Aurinkolämpöjärjestelmä 12 m^2				
	Valmis järjestelmä		**Rakennussarja**	
	Varaaja		**Varaaja**	
	Sisältyy	**Ilman**	**Sisältyy**	**Ilman**
Hinta [€]	9 600	7 600	5 500	3 500
	Takaisinmaksuaika [vuosi]			
Öljylämmitys	16,8	14,7	12,1	8,9

Taulukko 5.4 Aurinkolämpöjärjestelmien (6 m^2 ja 12 m^2) takaisinmaksuajat öljylämmitystä korvattaessa valmiina ja rakennussarjana ostettaessa (öljyn hinnan nousu 30,7 %)

Aurinkolämpöjärjestelmä 6 m^2				
	Valmis järjestelmä		**Rakennussarja**	
	Varaaja		**Varaaja**	
	Sisältyy	**Ilman**	**Sisältyy**	**Ilman**
Hinta [€]	7 200	5 200	4 300	2 300
	Takaisinmaksuaika [vuosi]			
Öljylämmitys	10,4	9,3	8,7	6,6
Aurinkolämpöjärjestelmä 12 m^2				
	Valmis järjestelmä		**Rakennussarja**	
	Varaaja		**Varaaja**	
	Sisältyy	**Ilman**	**Sisältyy**	**Ilman**
Hinta [€]	9 600	7 600	5 500	3 500
	Takaisinmaksuaika [vuosi]			
Öljylämmitys	9,1	8,3	7,3	5,9

Taulukko 5.5 Aurinkolämpöjärjestelmien (6 m^2 ja 12 m^2) takaisinmaksuajat sähkölämmitystä korvattaessa valmiina ja rakennussarjana ostettaessa (sähkön hinnan nousu 3,0 %)

Aurinkolämpöjärjestelmä 6 m^2				
	Valmis järjestelmä		**Rakennussarja**	
	Varaaja		**Varaaja**	
	Sisältyy	**Ilman**	**Sisältyy**	**Ilman**
Hinta [€]	7 200	5 200	4 300	2 300
	Takaisinmaksuaika [vuosi]			
Sähkölämmitys	33,9	27,4	23,9	14,8
Aurinkolämpöjärjestelmä 12 m^2				
	Valmis järjestelmä		**Rakennussarja**	
	Varaaja		**Varaaja**	
	Sisältyy	**Ilman**	**Sisältyy**	**Ilman**
Hinta [€]	9 600	7 600	5 500	3 500
	Takaisinmaksuaika [vuosi]			
Sähkölämmitys	26,4	22,3	17,5	12,1

Hiilidioksidipäästövähennykset

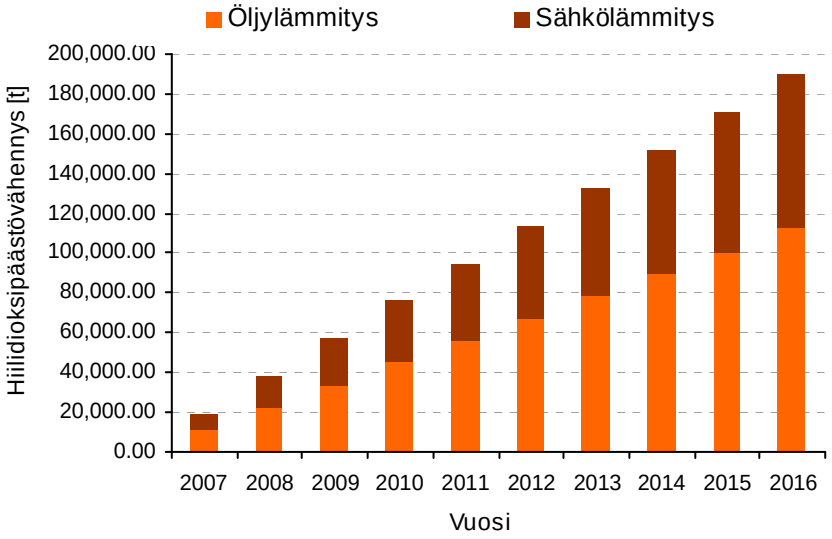
Miljoonan pientalon lämmittäminen tuottaa vuodessa noin 7 – 8 miljoonan tonnin hiilidioksidipäästöt [40], mikä on noin 11 % Suomen hiilidioksidipäästöistä (69,4 miljonaa tonnia vuonna 2004). Öljylämmityksessä hiilidioksidin ominaispäästöt ovat 300 kg/MWh ja sähkölämmityksessä 227 kg/MWh [42]. Aurinkolämmöllä (6 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmä) öljylämmitystä[8] korvattaessa pientalon hiilidioksidipäästövähennykset vuosittain ovat 2,1 MWh * 300 kg/MWh = 0,63 t ja sähkölämmitystä korvattaessa 1,8 MWh * 227 kg/MWh = 0,41 t. Vuotuiset CO_2-päästövähennykset 12 m^2:n järjestelmän tapauksessa ovat ölylämmitystä korvattaessa 4,1 MWh* 300 kg/MWh = 1,24 t ja sähkölämmitystä korvattaessa 3,5 MWh * 227 kg/MWh = 0,79 t. Arvioidaan nyt pientalojen öljy- ja sähkölämmitystä aurinkolämmöllä korvaamalla saatavat CO_2- päästövähennykset Suomessa kymmenen vuoden aikana. Oletetaan, että Suomeen asennettavista aurinkolämpöjärjestelmistä puolet olisi kokoa 6 m^2 ja puolet 12 m^2.

Pientalojen lämmitysmuotojen jakauman (Taulukko 5.1) perusteella Suomessa oli vuonna 2004 noin 0,27 * 1 037 714 ≈ 280 000 öljylämmitteistä pientaloa. Vuosittain noin 11 000 pientalon öljykattilaa vaihdetaan uuteen [42]. Lisäksi vuosittain myydään noin 1000 uutta öljykattilaa uudisrakennuksiin [42]. Jos kaikki vuosittain vaihdettavat ja myytävät öljykattilat (12 000) varustettaisiin lisäksi aurinkolämpöjärjestelmällä, saavutettaisiin 6 000 * 0,63 t/vuosi + 6 000 * 1,24 t/vuosi = 11 200 tonnin vuosittaiset hiilidioksidipäästövähennykset. Tällä menetelmällä 10 vuoden kuluttua 120 000 öljylämmitteisessä pientalossa olisi lisänä aurinkolämmitys ja vuosittaiset päästövähennykset olisivat 112 000 tonnia CO_2.

Sähkölämmitteisiä pientaloja Suomesssa on noin 0,25 * 1 037 714 ≈ 259 000 (Taulukko 5.1). Jos kymmenen vuoden aikana puolet näistä taloista varustettaisiin aurinkolämpöjärjestelmällä, hiilidoksidipäästövähennykset 10 vuoden kuluttua olisivat 64 750 * 0,41 t/vuosi + 64 750 * 0,79 t/vuosi = 77 600 tonnia CO_2 vuodessa.

[8] Öljykattilan vuotuinen hyötysuhde 85 % [42]

Tällä menetelmällä pientalojen CO_2- päästövähennykset Suomessa kymmenen vuoden kuluttua olisivat yhteensä 189 600 tonnia vuodessa (Kuva 5.1). Kymmenen vuoden aikana hiilidioksidipäästöjä vähennettäisiin yhteensä noin 1 044 000 tonnia. Potentiaali CO_2- päästövähennyksiin pientalosektorilla on kuitenkin suurempi. Asentamalla aurinkolämpöjärjestelmät kaikkiin öljy- ja sähkölämmitteisiin pientaloihin kymmenen vuoden aikana saavutetut päästövähennykset olisivat kaksinkertaiset, yhteensä noin 2 088 000 t CO_2 vuodessa. Lisäksi öljyn hinnan nousun vuoksi öljylämmityksestä luovutaan kokonaan todennäköisimmin jo 10 – 20 vuoden aikana. Korvaamalla öljy uusiutuvilla lämmitysmuodoilla (aurinkolämpö, lämpöpumput, biomassa) vähennetään pientalojen CO_2- pääästöjä edelleen.



Kuva 5.1 Vuotuiset hiilidioksidipäästövähennykset Suomen pientalosektorilla, kun kymmenen vuoden aikana (2007 – 2016) noin puolet öljylämmitteisistä ja puolet sähkölämmitteisistä pientaloista varustetaan aurinkolämpöjärjestelmällä

6 Yhteenveto

Uusiutuvat energiamuodot ovat yksi tärkeistä maailman energiantuotantoon tarvittavista kestävän kehityksen mukaisista uudistuksista, joilla vaikutetaan energiantuotannon ongelmakohtiin. Lämmöntuotantosektorilla kestäviä ratkaisuja ovat aurinkolämmön ja muiden uusiutuvien lämmöntuotantomuotojen käyttöönotto. Aurinkolämpökeräimiä voidaan käyttää asuinrakennusten lämmityksen ja jäähdytyksen lisäksi julkisten rakennusten ja teollisuuden tarpeisiin sekä kaukolämmön tuotantoon. Tässä työssä tehty aurinkolämpöön perehtyminen aloitettiin auringonsäteilyä tarkastelemalla. Seuraavaksi käytiin läpi tyypillisimmät aurinkolämpökeräimet ja niiden selektiiviset absorptiopinnoitteet. Lopuksi tutkittiin aurinkolämmön markkinoita ja mahdollisuuksia päätyen arvioon aurinkolämmön mahdollisuuksista suomalaisten pientalojen täydentävänä lämmitysmuotona.

Auringon kokonaissäteilyn kokeellisten mittaustietojen ja teoreettisesti määritetyn ilmakehän ulkopuolisen auringonsäteilyn yhdistävän tarkastelun (Luku 2) avulla selvitettiin etelään suunnatun keräimen ja kääntyvän keräimen *kuukausittaiset optimaaliset kaltevuuskulmat.* Käytetyt auringon kokonaissäteilyn arvot on määritetty horisontaalitasoon Kihniön Aitonevalla ajalla 1.1 – 4.5.2005 ja 5.5. – 31.12.2004. Kaikki määritetyt suureet pätevät Aitonevan koordinaateilla (62.2° P ja 23.3° I).

Ensin esiteltiin teoria ilmakehän ulkopuolisen auringonsäteilyn laskemiseksi. Ilmakehän ulkopuolisen säteilyn avulla laskettiin päivittäiset kirkkausasteet (yhtälö 2.16). Suoran säteilyn ja hajasäteilyn osuudet päivittäisestä kokonaissäteilystä määäritettiin *Collares-Pereira-Rabl-* menetelmällä (yhtälö 2.17). Käyttäen hajasäteilyn ja heijastuneen säteilyn kaltevuuskertoimia laskettiin etelään suunnatun ja kääntyvän keräimen vastaanottama päivittäinen kokonaissäteily kaltevuuskulman funktiona. Keräinten kuukausittaiset optimaaliset kaltevuuskulmat määritettiin selvittämällä kulma, jolla keräimen vastaanottama kuukausittainen kokonaissäteily on suurin. Tulokset osoittavat (Taulukko 2.1), että etelään suunnatun keräimen *optimaalinen kaltevuuskulma* kesäaikana (10 - 25 astetta) on huomattavasti pienempi kuin kääntyvän keräimen

(50 - 55 astetta). Etelään suunnattun keräimen matala kaltevuuskulma mahdollistaa auringonsäteilyn hyödyntämisen myös aamun ja illan aikana, mutta pienentää keräimelle saapuvaa hetkittäisen säteilyn määrää keskipäivän aikaan. Kääntyvä keräin on koko ajan suunnattuna suoraa säteilyä kohti ja hetkittäinen säteily keräimelle voidaan maksimoida kaltevuuskulman avulla. Kesäaikana optimaalisessa kulmassa kääntyvän keräimen vastaanottama kuukausittainen auringon kokonaissäteily on noin 1,4 kertaa suurempi kuin optimaalisessa kulmassa etelään suunnatun keräimen.

Aurinkolämmöntuotantoon perehdyttiin esittelemällä yleisimmät aurinkokeräintyypit: *taso- ja tyhjiöputkikeräimet* sekä *katteettomat keräimet* (Luku 3). Kuvattiin auringonsäteilyn heijastumisen, absorption ja emission vaikutusta tasokeräimen hyötysuhteeseen. Esiteltiin keräinten tehokkuutta merkittävästi lisäävät ns. *selektiiviset absorptiopinnoitteet*, joiden auringonsäteilyn absorptiokerroin on suuri ja lämpösäteilyn emissiokerroin pieni. Tasokeräinten kaupallisista, selektiivisistä absorptiopinnoitteista esiteltiin *musta kromipinnoite*, *nikkeli-alumiinioksidipinnoite* (Ni-Al_2O_3), *titaanioksynitridipinnoite* (TiN_xO_y), *nikkeli-nikkelioksidipinnoite* (Ni-NiO), *krominitridi-kromioksidipinnoite* (CrN-Cr_xO_y) ja kaksi *selektiivistä maalipinnnoitetta*. Mustan kromipinnoitteen ja Ni-Al_2O_3- pinnoitteen haittapuolena ovat niiden sähkökemiallisista ja kemiallisista valmistusmenetelmistä aiheutuvat jätekemikaalit. Lisäksi uudempia pinnoitustekniikoita (reaktiivinen haihdutus- ja magnetroniruiskutusmenetelmä) käyttäen valmistettujen TiN_xO_y-, Ni-NiO- ja CrN-Cr_xO_y- pinnoitteiden lämpösäteilyn emissio-ominaisuudet (0,05–0,10 lämpötilassa 100 °C) ovat hiukan ensin mainittuja paremmat. Selektiivisten maalipinnoitteiden auringonsäteilyn absorptiokerroin ovat tyypillisesti noin 0,90 ja lämpösäteilyn emissiokerroin noin 0,30. Ne ovat selektiivisistä absorptiopinnoitteista halvin vaihtoehto. Tyhjiöputkien selektiivisistä pinnoitteista esiteltiin SS-C- pinnoite, Al-N- pinnoite ja M-AlN- pinnoite, jotka valmistetaan magnetroniruiskutuksella sylinterimäisessä tyhjiökammiossa. Näiden pinnoitteiden lämpösäteilyn emissiokertoimet 100 °C lämpötilassa ovat noin 0,06–0,07. Sekä taso- että tyhjiöputkikeräinten selektiivisten pinnoitteiden (lukuun ottamatta maalipinnoitteita) auringon säteilyn absorptio-kertoimet ovat luokkaa 0,93–0,96.

Keräinten rakennemateriaaleja, teknisiä ominaisuuksia ja hintatasoa esiteltiin markkinaselvityksen yhteydessä luvussa neljä. Selvitys tehtiin lähettämällä kyselylomake (Liite 2) 25 keräinten valmistajalle Saksaan, Itävaltaan, Ruotsiin, Tanskaan ja Iso-Britanniaan. Vastauksia saatiin kymmenen, joista tässä työssä esiteltiin neljän tasokeräimen, kolmen tyhjiöputkikeräimen ja kahden katteettoman keräimen tiedot (Liitteet 3 ja 4). Esiteltyjen tasokeräinten optinen tehokkuus vaihtelee välillä 74–80 %. Keräinten stagnaatiolämpötila, kun ympäristön lämpötila on 30 °C ja auringon säteilyintensiteetti 1 000 W/m^2, on välillä 170–208 °C. Valmistajien arviot keräinten vuotuisesta lämmöntuotosta ovat välillä 300–700 kWh/m^2 riippuen mm. keräinten maantieteellisestä sijainnista. Tyhjiöputkikeräinten valmistajat arvioivat keräintensä lämmöntuoton olevan parhaimmillaan 660–750 kWh/m^2 vuodessa. Katteettoman keräimen tuotoksi on arvioitu 250–300 kWh/m^2 vuodessa. Tasokeräinten keskimääräinen neliömetrihinta (keräimen kokonaispinta-alaa kohden) on noin 190 €. Tyhjiöputkikeräinten hinta-arviot pätevät vain 500 m^2:n keräinkentälle. Tyhjiöputkikeräimistä edullisin on kaksinkertainen tyhjiöputkimalli U- muotoisella lämmönsiirtoputkella (205 €/m^2). Seuraavaksi edullisin on yksinkertainen tyhjiöputki suoralla lämmönsiirtoputkella (324 €/m^2). Kallein malli on yksinkertainen tyhjiöputki, jossa lämmönsiirto tapahtuu lämmönsiirtonesteen faasimuutoksiin perustuvan lämpöputken avulla (423 €/m^2). Katteettomien keräinten hinnat ovat 59 €/m^2 ja 75 €/m^2.

Euroopan unionin ja Suomen aurinkolämpömarkkinoiden kehittymistä kuvattiin luvun neljä markkinaselvityksen johdantona ja tarkastelua jatkettiin luvussa viisi. Vuodesta 2000 lähtien Euroopan unionin aurinkolämpömarkkinat ovat kasvaneet yli 1 000 000 m^2 vuodessa. Aurinkolämpökapasiteetti Euroopan unionissa vuonna 2004 oli 9 771 MW, mikä vastaa 13 959 000 m^2 käytössä olevaa keräinpinta-alaa. Tavoitteeksi on asetettu 100 000 000 m^2 (70 000 MW MW) kapasiteetti vuoteen 2010 mennessä. Tavoite on mahdollista saavuttaa, jos aurinkolämpömarkkinat kehittyvät jokaisessa jäsenvaltiossa Itävallan aurinkolämpökapasiteetin (179 kW/1000 asukasta vuonna 2004) tasolle. Suomen aurinkolämmön kokonaiskapasiteetti vuonna 2004 oli 11 980 m^2 (Liite 6), mikä vastaa 8 386 kW eli noin 1,6 kW 1000 asukasta kohden. Esteitä aurinkolämpömarkkinoiden kasvulle Suomessa ovat poliittisen ja taloudellisen tuen

puute, aurinkolämpöön liittyvän tiedon puute sekä päättäjien että kansalaisten keskuudessa ja tavanomaisten lämmitysmuotojen verrattain edullinen hinta etenkin sähkön osalta. Näihin ongelmakohtiin puuttumalla voidaan aurinkolämmön (samoin myös muiden uusiutuvien lämmitysmuotojen) hyödyntäminen tehdä kannattavaksi.

Lopuksi arvioitiin aurinkolämmön mahdollisuuksia suomalaisten pientalojen lämmityksessä. Aurinkolämmöllä saatavaa hyötyä arvioitiin käyttämällä esimerkkitapauksena nelihenkistä perhettä, joka asuu 100 m^2:n kokoisessa talossa. Tällaisen talon lämmityskulut ovat käyttöveden tuoton osalta noin 300 kWh/kuukausi. Tilojen lämmitykseen tarvittava energia vaihtelee kuukausittain ja on yhteensä noin 11 000 kWh/vuosi. Aurinkolämpöjärjestelmällä tuotettava hyötylämpö[9] vuodessa on noin 1,8 MWh, kun keräinpinta-ala on 6 m^2 ja noin 3,5 MWh, kun keräipinta-ala on 12 m^2. Nämä arvot perustuvat Jyväskylän yliopiston Viitasaaren ABC- liikennemyymälän demonstraatiohankkeen tasokeräinten tuotantotietoihin. Aurinkolämmöllä kuukausittain korvattava osuus pientalon lämmitysenergiasta esitetään taulukossa 5.2 ja kuvissa 5.4 ja 5.5. Pienemmällä aurinkolämpöjärjestelmällä (6 m^2) aurinkolämpö korvaa lämpivän veden tuottoon tarvittavasta energiasta kesä- ja heinäkuussa 100 % ja vielä loka- ja helmikuussakin 20 %. Koko vuoden aikana lämpivän veden tuottoon käytetystä energiasta aurinkolämpö korvaa puolet. Pienemmällä lämmitysjärjestelmällä tilojen lämmitykseen ei juuri jää energiaa. Suuremmalla aurinkolämpöjärjestelmällä (12 m^2) korvataan käyttöveden lämmitykseen tarvittavasta energiasta maalis-syyskuun ajalta 100 % ja helmi- ja lokakuussa 40 %. Koko vuoden aikana aurinkolämpö korvaa 70 % käyttöveden lämmitysenergiasta. Lisäksi aurinkolämpö korvaa tilojen lämmitykseen tarvittavasta energiasta kesä- ja heinäkussa 100 %, elokuussa 70 %, toukokuussa 40 % ja syyskuussa 20 %.

Pientalon aurinkolämpöjärjestelmän (6 m^2) hinta[10] on välillä 2 300–7 200 € (Taulukko 5.3) riippuen, ostetaanko järjestelmä valmiiksi asennettuna vai rakennussarjana ja hankitaanko järjestelmän mukana myös uusi käyttövesivaraaja. Järjestelmien

[9] Järjestelmän kokonaistuotosta vähennetään pumpun käyttämä energia ja mahdollinen kesäaikana tuotettu ylimäärälämpö
[10] Hinta-arviot: T:mi Timo Jodat Ympäristöenergia (http://www.y-energia.com/)

takaisinmaksuajat öljy- ja sähkölämmitystä korvattaessa laskettiin yksinkertaisen takaisinmaksuajan kaavaa käyttäen. Aurinkolämpöjärjestelmän (6 m^2 tai 12 m^2) takaisinmaksuaika öljylämmitystä korvattaessa on välillä 6–10 vuotta, kun kevyen polttoöljyn hinnan nousu on keskimäärin 30,7 % vuodessa (Taulukko 5.4).

Pientalon 6 m^2:n aurinkolämpöjärjestelmällä säästetty energia vuodessa on noin 2,1 MWh, jossa on otettu huomioon öjykattilan vuotuinen hyötysuhde (85 %). Säästö vastaa 630 kg hiilidioksidipäästövähennystä. Aurinkolämpöä hyödyntämällä saavutettavat CO_2- päästövähennykset arvioitiin tekemällä skenaario, jossa 10 vuoden aikana puolet öljy- ja sähkölämmitteisistä taloista varustettaisiin aurinkolämpöjärjestelmällä. Kymmenen vuoden kuluttua vuosittaiset CO_2-päästövähennykset olisivat 189 600 tonnia. Pientalosektorin CO_2- päästöjä vähennettäisiin kymmenen vuoden aikana yhteensä noin 1 044 000 tonnia. Ekologisemman ja energiaomavaraisemman pientalon lämmitysjärjestelmässä korvataan öljy tai sähkö kokonaan uusiutuvilla lämmitysmuodoilla, kuten aurinkolämmön ja pellettilämmityksen yhdistävällä järjestelmällä.

Suomessa rakennusten lämmitys on teollisuuden jälkeen suurin energian kuluttaja. Suuri osa rakennuksista on pientaloja, joiden yleisimmät lämmitysenergian lähteet ovat puu, öljy ja sähkö. Näistä öljyn ja sähkön osuus on noin puolet. Öljyn käytön ongelmia ovat siitä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ja sen Suomen energian tuontiriippuvuutta lisäävä vaikutus. Suomen sähköntuotossa merkittävässä osassa ovat tuontipolttoaineita käyttävät ydinvoima (25 % vuonna 2004) ja kivihiilivoima (19 % vuonna 2004) [31]. Lisäksi sähkön käyttö lämmityksessä edustaa primäärienergian erityisen tehotonta hyödyntämistä. Rakennusten lämmitys Suomessa ei siis nykyisessä tilassaan perustu kestäviin ratkaisuihin. Tilanteen korjaamiseksi tarvitaan järkevää, kestävän kehityksen suuntaan ohjaavaa poltitiikkaa, joka antaa mahdollisuuden uusiutuvien lämmitysmuotojen hyödyntämiselle. Korvaamalla tavanomaisia lämmitysmuotoja aurinkolämmöllä ja muilla uusiutuvilla energiamuodoilla edistetään Suomen energiaomavaraisuutta, puhdasta energiantuotantoa ja rakennusten energiatehokkuutta.

Symboliluettelo

H	Päivittäinen auringon kokonaissäteily maan pinnan horisontaalitasolle	[kWh/m^2]
H_0	Päivittäinen ilmakehän ulkopuolinen auringonsäteily säteilyä vastaan kohtisuoralle pinnalle	[Wh/m^2]
G_{0n}	Ilmakehän ulkopuolinen auringonsäteily säteilyä vastaan kohtisuoralle pinnalle	[W/m^2]
G_{sc}	Aurinkovakio	[W/m^2]
G_0	Teoreettinen auringonsäteily maan pinnan horisontaalitasolle	[W/m^2]
θ	Säteilyn tulokulma	[rad]
δ	Deklinaatiokulma	[rad]
ϕ	Leveysaste	[rad]
ω	Tuntikulma	[rad]
ε	Maan kallistuskulma	[rad]
n	Päivän järjestysnumero	
$-\omega_s$	Auringon nousun tuntikulma horisontaalitasolle	[rad]
ω_s	Auringon laskun tuntikulma horisontaalitasolle	[rad]
t_{sl}	Aurinkoaika	[min]
t_{st}	Standardiaika	[min]
L_{loc}	Tarkastelijan pituuspiiri	
L_{st}	Pituuspiiri, johon paikallinen standardiaika perustuu	
E	Aurinkoajan korjaustermi	
d	Päivän pituus	[h]
$-t_0$	Auringon nousuaika	
t_0	Auringon laskuaika	
K_T	Päivittäinen kirkkausaste	

H_d	Päivittäinen hajasäteily maan pinnan horisontaalitasolle	[kWh/m^2]
H_b	Päivittäinen suora säteily maan pinnan horisonttitasolle	[kWh/m^2]
R_{bd}	Päivittäisen kokonaissäteilyn kaltevuuskerroin etelään suunnatulle keräimelle	
$R_{bd,track}$	Päivittäisen kokonaissäteilyn kaltevuuskerroin kääntyvälle keräimelle	
R_d	Päivittäisen hajasäteilyn kaltevuuskerroin	
R_r	Päivittäisen heijastuneen säteilyn kaltevuuskerroin	
β	Keräimen kaltevuuskulma	[rad]
ω_{st}	Auringon laskun tuntikulma kaltevalle pinnalle	
ρ_g	Maan pinnan heijastavuus	
U_l	Tasokeräimen lämmönsiirtokerroin	
T_a	Ympäristön lämpötila	
T_{cm}	Keräimen keskimääräinen lämpötila	
T_i	Keräimeen tulevan lämmönsiirtonesteen lämpötila	
Q_u	Tasokeräimen hetkellinen lämmöntuotto	
A_c	Keräimen pinta-ala	
S	Absorboituneen säteilyn määrä keräinpinta-alaa kohden	
F_r	Tasokeräimen lämmöntuottokerroin	
τ	Pinnan säteilyn läpäisevyys	
ρ_d	Pinnan heijastavuus	
α	Absorptiokerroin	
ε	Emissiokerroin	
E_g	Auringon säteilyintensiteetti	[W/m^2]
η_0	Keräimen optinen tehokkuus	
T_{stag}	Keräimen stagnaatiolampötila	[°C]

n_{sp}	Yksinkertainen takaisinmaksuaika	[vuosi]
C	Investoinnin hinta	[€]
c_f	Korvattavan energian hinta	[€/MWh]
i_f	Korvattavan energian hinnan nousu	
FE	Vuotuinen energiansäästö	[MWh]

Lähdeluettelo

[1] Key World Energy Statistics, IEA, 2005

[2] Renewable Energy – Power for a Sustainable Future, Godfrey Boyle (toim.), Oxford University Press, Oxford, 1996 & 2004

[3] J.A Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991

[4] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, Tähtitieteen perusteet, Tähtitieteellinen yhdistys Ursa, Valtion painatuskeskus, 1984

[5] G. N. Tiwari, Solar Energy – Fundamentals, Design, Modeling and Applications, Alpha Science International Ltd., Pangbourne England, 2002

[6] F. A. Peuser, K. - H. Remmers, M. Schnauss, Solar Thermal Systems – Succesful Planning and Construction, Solarpraxis Ag, Berlin, 2002

[7] J. Gordon, Solar Energy – The State of the Art, ISES position papers, James & James, Lontoo, 2001

[8] D. Y. Goswami, F. Kreith, J. F. Kreider, Principles of Solar Engineering, Second Edition, Taylor & Francis, 2000

[9] G. E. McDonald, Spectral reflectance properties of black chrome for use as a solar selective coating, Solar Energy **17** (1975) 119-122

[10] C. M. Lampert, J. Washburn, Microstructure of a black chrome solar selective absorber, Solar Energy Materials **1** (1979) 81-92

[11] E. Wäckelgård, Characterization of black nickel solar absorber coatings electroplated in a nickel chlorine aqueous solution, Solar Energy Materials & Solar Cells **56** (1998) 35-44

[12] Å. Andersson, O. Hunderi, C.G. Granqvist, Nickel pigmented anodic aluminum oxide for selective absorption of solar energy, Journal of Applied Physics **51** (1980) 754 – 764

[13] E. Wäckelgård, A comparative study of the optical properties of nickel pigmented alumina films of different thicknesses exposed to elevated temperature and humidity, Solar Energy Materials & Solar Cells **54** (1998) 171-179

[14] P. Konttinen, Characterization and aging studies of selective $C/Al_2O_3/Al$ absorber surfaces, Teknillisen korkeakoulun teknillisen fysiikan julkaisuja, Espoo, 2004

[15] M. Lazarov, P. Raths, H. Metzger, W. Spirkl, Optical constants and film density of TiN_xO_y solar selective absorbers, Journal of Applied Physics **77** (1995) 2133-2137

[16] E. Wäckelgård, G. Hultmark, Industrially sputtered solar absorber surface, Solar Energy Materials & Solar Cells **54** (1998) 165-170

[17] W. Graf, F. Brucker, M. Köhl, T. Tröscher, V. Wittwer, L. Herlitze, Development of large area sputtered solar absorber coatings, Journal of Non-Crystalline Solids **218** (1997) 380-387

[18] G. L. Harding, S. Craig, Magnetron-sputtered metal carbide solar selective absorbing surfaces, Journal of Vacuum Science and Technology **16** (1979) 857 - 862

[19] Q. – C. Zhang, K. Zhao, B. – C. Zhang, L. – F. Wang, Z. – L. Shen, D. – Q. Lu, D. – L. Xie, B. – F. Li, High performance Al – N cermet solar coatings deposited by a cylindrical direct current magnetron sputter coater, Journal of Vacuum Science and Technology A **17** (1999) 2885 - 2890

[20] Q. – C. Zhang, K. Zhao, B. – C. Zhang, L. – F. Wang, Z. – L. Shen, Z. – J. Zhou, D. – Q. Lu, D. – L. Xie, B. – F. Li, New cermet solar coatings for solar thermal electricity applications, Solar Energy **64** (1998) 109 - 114

[21] C. G. Cranqvist, Solar Energy Materials, Advanced Materials **15** (2003) 1789 - 1803

[22] Z. C. Orel, Characterization of high-temperature-resistant spectrally selective paints for solar absorbers, Solar Energy Materials & Solar Cells **57** (1999) 291 – 301

[23] Z. C. Orel, M. K. Gunde, Spectrally selective paint coatings: Preparation and characterization, Solar Energy Materials & Solar Cells **68** (2001) 337 – 353

[24] T. Tesfamichael, A. Hoel, E. Wäckelgård, G. A. Niklasson, M. K. Gunde, Z. C. Orel, Optical characterization and modeling of black pigments used in thickness-sensitive absorbing paints, Solar Energy **69** (2000) 35 - 43

[25] M. K. Gunde, Z. C. Orel, M. G. Hutchins, The influence of paint dispersion parameters on the spectral selectivity of black-pigmented coatings, Solar Energy Materials & Solar Cells **80** (2003) 239 - 245

[26] Solar Thermal Markets in Europe 2004, ESTIF, June 2005

[27] Sun in Action I – A Solar Thermal Strategy for Europe, Volume 1, April 2003

[28] Sun in Action II – A Solar Thermal Strategy for Europe, Volume 2, The Solar Thermal Sector Country by Country, 21 National Reports, April 2003

[29] EN 12975-2:2001, Thermal solar systems and components - Solar collectors - Part 2: Test methods

[30] COM (97)599 final (26/11/1997), Energy for the Future: Renewable Sources of Energy, White Paper for a Community Strategy and Action Plan

[31] Energiatilasto 2004, Tilastokeskus, Yliopistopaino, Helsinki, 2005

[32] Joint Declaration for a European Directive to Promote Renewable Heating and Cooling, EREC

[33] Renewable Energy target for Europe 20% by 2020, EREC

[34] Uusiutuvan energian edistämisohjelma 2003 – 2006. Työryhmän ehdotus, Kauppa- ja teollisuusministeriö, 5/2003

[35] Kansallinen aurinkoenergian toimenpideohjelma, Tekes-projekti 594/480/00, SOLPROS, 2001

[36] Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market

[37] Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport

[38] Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings

[39] Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC

[40] Pientalon lämmitysjärjestelmät, 3. painos, Motiva Oy, Miktor 2006

[41] Aurinkoenergia Suomen olosuhteissa ja sen potentiaali ilmastonmuutoksen torjunnassa, Tekes-projekti 594/480/00, SOLPROS, 2001

[42] Höylä II Oil Roadmap, Strategia uusiutuvien energialähteiden käytön lisäämiseksi öljylämmityksen yhteydessä, Loppuraportti, SOLPROS, 2004

LIITE 1 Keräinten markkinaselvitys – Valmistajat ja jälleenmyyjät

Valmistaja/jälleenmyyjä	Maa	Keräintyyppi	Internet- osoite
AES Solar Limited AES Building	UK	Tasokeräin	www.aessolar.co.uk
Arcon Solvarme A/S	Tanska	Tasokeräin	http://www.arcon.dk
Arnes Plåtslageri AB	Ruotsi	Tasokeräin/Katteeton keräin	http://www.aquasol.nu
Aquasol Solartechnik GmbH	Saksa	Tasokeräin	http://www.aquasol-solartechnik.de
Batec A/S	Tanska	Tasokeräin/ Katteeton keräin	http://www.batec.dk
Boröpannan AB	Ruotsi	Tasokeräin	http://www.boroe.com
Christeva Sonnenenergie-Technik GmbH	Saksa	Tasokeräin/Tyhjiöputkikeräin	http://www.christeva.de
Effecta AB	Ruotsi	Tasokeräin/ Katteeton keräin	http://www.effectapannan.se
EURONOM AB	Ruotsi	Tyhjiöputkikeräin	http://www.euronom.se
Filsol Solar Ltd	UK	Tasokeräin/ Katteeton keräin	http://www.filsol.co.uk
Gasokol Solartechnik GmbH	Itävalta	Tasokeräin	http://www.gasokol.at
KBB Kollektorbau GmbH	Saksa	Tasokeräin	http://www.kollektorbau.de
MEA Solar	Itävalta	Tasokeräin	http://www.mea-solar.at
Ritter Solar GmbH	Saksa	Tyhjiöputkikeräin	http://www.rittersolar.de
Solentek AB	Ruotsi	Tasokeräin	http://www.solentek.se
S.O.L.I.D. GesmbH	Itävalta	Tasokeräin	http://www.solid.at
Sonnenkraft UK Ltd	UK	Tasokeräin/ Tyhjiöputkikeräin	http://england.sonnenkraft.com
Sunda Solartechnik GmbH	Saksa	Tyhjiöputkikeräin	http://www.sunda.de
Svenska Solgruppen	Ruotsi	Tasokeräin	http://www.solgruppen.se
Thermomax Ltd	UK	Tyhjiöputkikeräin	http://www.thermomax-group.com
Thermo-Sol ApS	Tanska	Tasokeräin/ Tyhjiöputkikeräin	http://www.thermosol.dk
UFE Solar GmbH	Saksa	Tasokeräin	http://www.ufesolar.de
Uponor AB	Ruotsi	Katteeton keräin	http://www.uponor.se
Vaillant GmbH	Saksa	Tasokeräin/ Tyhjiöputkikeräin	http://www.vaillant.de
Viessmann Värmeteknik AB	Ruotsi	Tasokeräin/ Tyhjiöputkikeräin	http://www.viessmann.se

LIITE 2 Aurinkolämpökeräinten markkinaselvitys – Kyselylomake valmistajille

Technical data and other information of the solar collectors

Collector type:

Manufacturer:

Dimensions of the collector: *length x height x width*

Weight:

Gross area:

Aperture area:

Absorber area:

Absorber plate: *Structure of the absorber plate, materials, surface layer of the plate, absorber and emission coefficients of the surface layer*

Glass cover: *material, thickness, light transmittance*

Collector box: *materials, dimensions*

Insulation: *materials, dimensions*

Piping: *materials, dimensions*

Heat transfer fluid:

Fluid volume:

Recommended flow rate/range:

Maximum operating pressure:

Stagnation temperature at 1000 W/m^2 and 30 C° ambient temperature:

Efficiency: η_0

Power output in a year: kWh/m^2

Expected lifetime:

Prize of the collector:

Guarantee:

LIITE 3 Aurinkolämpökeräinten markkinaselvityksen tuloksia - Tasokeräimet

	Arcon Solvarme A/S Tanska	**Batec A/S Tanska**
Keräin	Arcon HT-SA	BA22Sel
Valmistaja	Arcon Solvarme	BATEC A/S
Tyyppi	Tasokeräin	Tasokeräin
Mitat (leveys x korkeus x paksuus)	596 x 227 cm	112 x 207 x 9 cm
Paino	300 kg	40 kg
Kokonaispinta-ala	13,53 m^2	2,32 m^2
Absorptioala	12,27 m^2	2,11 m^2
Absorptiopinta (materiaali/pinnoite) (absorptio/emissio)	Kupari/Alumiini/ Sun Strip	Kupari/Musta kromi (0,95 / 0,10)
Kate (materiaali/paksuus/ säteilyn läpaisevyys)	Raudaton lasi (4mm)	Raudaton, karkaistu lasi (4 mm/0,91)
Keräinlaatikko	Alumiini	Alumiini
Eristys (pohjalla/sivuilla)	Puhallusvilla (75 mm) EPDM tiivisteet	Puhallusvilla 50 mm / 15 mm
Putkisto (materiaali/vahvuus/ halkaisija)	-	Kupari / - /22 mm
Lämmönsiirtoneste	Vesi/Propyleeniglykoli	Propyleeniglykoli
Nestetilavuus	7,0 l	2,2 l
Virtaama	2,8 l/m^2/min	0,2 - 1,0 l/m^2/min
Suurin käyttöpaine	6 bar	12 bar
Stagnaatiolämpötila (1000 W/m^2, 30 °C)	189 °C	170–190 °C
Optinen tehokkuus	74,2 %	76,3 %
Lämmön tuotto/vuosi	500 – 600 kWh/m^2	300 – 700 kWh/m^2
Testi-instituutti	Danish Technological Institute	Danish Technological Institute
Käytetty standardi	ISO 9806-1	ISO 9806
Käyttöikä	-	30 vuotta
Hinta €/m^2	179,20	198,30
Hinta €/kpl	2 425,00 (brutto)	460,10
Takuu	5 vuotta	5 vuotta

Aquasol **Saksa**	**SOLID** **Itävalta**	**Arnes Plåtslageri** **Ruotsi**
AS 14	Gluatmugl	Aquasol Big AR 13
AQUASOL Solartechnik GmbH	S.O.L.I.D.GmbH	Arnes Plåtslageri AB
Tasokeräin	Tasokeräin	Tasokeräin
700 x 198 x 12 cm	205 x 513 x 13 cm	232 x 571 cm
280 kg	252 kg	344 kg
14 m^2	10,5 m^2	13,24 m^2
12,6 m^2	9,5 m^2	12,8 m^2
Kupari/Sun Select 0,96 / 0,05	Sunstrip 0,96 ± 0,02 / 0,07	Kupari/Musta kromi 0,96 / 0,12 ± 0,02
Lasi (4 mm / 0,82)	Vähärautainen lasi (4 mm / 0,90)	Lasi (4 mm / 0,98)
Alumiini	Puu/Alumiini EPDM tiivisteet	Maalattu, galvanoitu teräs
Polyuretaani 30 mm, Puhallusvilla 40mm /Polyuretaani15 mm	Lasivilla 70 mm	Alumiinilla pinnoitettu lasivilla 60 mm / 30 mm
Kupari / 1 mm / 22 mm	Kupari / - / 28 mm	Kupari / 0,8 mm / 10 mm
Tyfocor L + vesi	Vesi-propyleeniglykoli	Propyleeniglykoli
9,8 l	7,3 l	5,5 l
0,33 l/m^2/min	0,17 – 1,33 l/m^2/min	0,5 l/min
10 bar	6 bar (tai10 bar)	-
200 °C	208 °C	210 °C (1100 W/m^2)
80 %	79,1 %	75,8 %
525 kWh/m^2	-	408 – 444 kWh/m^2
TÜV Bayern – Sachsen Technical inspection authority	Austrian Research and Testing institute, Arsenal Research GmbH	SP Swedish National Testing and Research Institute
DIN* 4757-4 (1995)	EN 12975-2	SP:n P- merkki
30 vuotta	-	30 – 50 vuotta
200,00	-	222,50
2 800,00	-	2 945,40
10 vuotta	-	5-10

* DIN Deutsches Institut für Normung

LIITE 4 Aurinkolämpökeräinten markkinaselvityksen tuloksia - Tyhjiöputkikeräimet

	ThermoMax Ltd UK		**Ritter Solar Saksa**
Keräin	Mazdon 30	Solamax 30	CPC 18 OEM
Tyyppi	Tyhjiöputkikeräin	Tyhjiöputkikeräin	Tyhjiöputkikeräin (CPC- heijastimet)
Lämmönsiirto-tekniikka	Lämpöputki	Suora lämmön-siirtoputki	U- muotoinen lämmönsiirtoputki
Mitat (leveys x korkeus x paksuus)	202 x 221 x 14 cm	201,3 x 212,5 cm	208 x 164 x 10 cm
Paino	78 kg	84 kg	54 kg
Kokonaispinta-ala	4,47 m^2	4,28 m^2	3,41 m^2
Absorptioala	3,040 m^2	3,047 m^2	-
Absorptiopinta (alusta/pinnoite) (absorptio/emissio)	Kupari/ Selektiivinen (0,95 / 0,05)	Kupari / Selektiivinen	Alumiininitriitti-pinnoite
Tyhjiöputket (tyyppi/materiaali / läpaisevyys)	Yksinkertainen Vähärautainen lasi	Yksinkertainen Vähärautainen lasi 0,92	Kaksinkertainen Silikoboraatti- lasi
Keräinlaatikko	Ruostumaton teräs	Ruostumaton teräs	Alumiini
Putkisto (materiaali/vah-vuus/halkaisija)	Kupari / - / 22 mm	Kupari / - /22 mm	Kupari / - /15 mm
Lämmönsiirto-neste	Vesi/Glykoli	Vesi/Glykoli	Tyfocor LS
Nestetilavuus	0,84 l	5,91 l	2,4 l
Virtaama	0,9 l/m^2/min	0,9 l/m^2/min	0,2 – 1,0 l/m^2/min
Suurin käyttöpaine	5 bar	5 bar	10 bar
Stagnaatio-lämpötila (1000 W/m^2, 30°C)	184 °C	245 °C	295 °C
Optinen tehokkuus ηo	75,5 %	75,0 %	66,1 %
Lämmön tuotto/vuosi	756 kWh/m^2 (max)	743 kWh/m^2 (max)	660 kWh/m^2
Testi-instituutti	SPF *, Rapperswil	SPF *, Rapperswil	ITW **, TÜV ***
Käytetty standardi	EN 12975 - 2	EN 12975 - 2	DIN EN 12975- 2
Käyttöikä	> 20 vuotta	> 20 vuotta	30 vuotta
Hinta €/kpl	1269,90	971,35	699,00
Hinta €/m^2	423,20	323,78	205,00
Takuu	-	-	5 vuotta

* Institut für Solartechnik, HSR Hochsvhule für Technik, Rapperswil, Switzerland
** Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Stuttgart, Germany
*** Immissionsschutz und Energiesysteme, Köln, Germany

LIITE 5 Aurinkolämmön teknistaloudellinen potentiaali EU15- jäsenvaltioissa [25]

Technical - economical potential for solar thermal in the EU					
Country	Population	Potential (per 1.000 Capita)	Potential (absolute)	Annual Energy Output	
		m^2	m^2	GWh	Mtoe
AT	8.121.000	3.900	31.671.900	11.193	1,0
BE	10.262.000	3.900	40.021.800	16.827	1,4
DE	82.193.000	3.900	320.552.700	130.607	11,2
DK	5.349.000	6.300	33.698.700	13.483	1,2
ES	39.490.000	2.700	106.623.000	64.448	5,5
FI	5.181.000	6.300	32.640.300	9.810	0,8
FR	59.521.000	3.900	232.131.900	139.279	12,0
GR	10.565.000	2.700	28.525.500	11.068	1,0
IE	3.820.000	3.900	14.898.000	6.704	0,6
IT	57.844.000	3.300	190.885.200	116.543	10,0
LU	441.000	3.900	1.719.900	723	0,1
NL	15.983.000	3.900	62.333.700	26.180	2,3
PT	10.023.000	2.700	27.062.100	16.237	1,4
SE	8.883.000	6.300	55.962.900	16.849	1,4
UK	59.823.000	3.900	233.309.700	102.196	8,8
Total	**377.499.000**	**3.740**	**1.412.037.300**	**682.149**	**58,7**

LIITE 6 Aurinkolämpömarkkinat EU25- jäsenvaltioissa [24]

	In Operation[2]	Market (=Newly Installed)					Market Growth	Market Forecast
	2004	2002	2003	2004			2004/2003	2005
	Total Glazed (m²)	Total Glazed (m²)	Total Glazed (m²)	Total Glazed (m²)	*Flat Plate (m²)*	*Vacuum Collectors (m²)*	Total Glazed (%)	Total Glazed (m²)
AT	2.085.488	153.050	166.920	182.594	*180.000*	*2.594*	9%	200.000
BE	48.249	4.943	9.047	14.700	-	-	62%	18.000
CH	352.460	26.431	26.820	31.067	*29.903*	*1.164*	16%	35.000
CY	450.200	30.000	30.000	30.000	-	-	0%	30.000
CZ	43.400	6.000	7.000	8.500	*8.100*	*400*	21%	10.000
DE	5.604.000	540.000	720.000	750.000	*675.000*	*75.000*	4%	850.000
DK	315.730	13.000	19.000	20.000	*19.000*	*1.000*	5%	22.000
EE	570	50	150	250	-	-	67%	300
ES	420.366	66.000	70.000	90.000	-	-	29%	150.000
FI	11.980	1.110	2.000	2.000	-	-	0%	2.000
FR[3]	274.100	27.000	38.900	52.000	-	-	34%	75.000
GR	2.826.700	152.000	161.000	215.000	-	-	34%	170.000
HU	4.250	500	1.000	1.500	-	-	50%	1.500
IE	7.290	875	1.200	2.000	*1.200*	*800*	67%	3.000
IT	444.285	45.000	50.000	58.000	-	-	16%	70.000
LT	1.650	300	400	500	-	-	25%	600
LU	11.500	1.200	1.500	1.700	-	-	13%	2.000
LV	1.650	300	400	500	-	-	25%	600
MT	15.360	2.500	3.000	4.215	*4.083*	*132*	41%	5.700
NL	283.508	30.000	27.686	26.300	-	-	-5%	27.000
PL	102.520	18.000	26.220	33.000	-	-	26%	35.000
PT	144.950	5.500	6.000	10.000	-	-	67%	13.500
SE	185.769	15.260	19.255	20.058	*17.498*	*2.560*	4%	25.000
SI	97.600	1.200	1.100	1.800	-	-	64%	2.000
SK	56.750	4.500	5.000	5.500	*4.950*	*550*	10%	6.000
UK	168.920	17.500	22.000	25.000	-	-	14%	30.000
SUM	13.959.245	1.162.219	1.415.598	1.586.184	-	-	12%	1.784.200

LIITE 7 Aurinkolämpömarkkinat EU25- jäsenvaltioissa [24]

	In Operation[2]	Market (=Newly Installed)					Market Growth	Market Forecast
	2004	2002	2003	2004			2004/2003	2005
	Total Glazed (kW_{th})	Total Glazed (kW_{th})	Total Glazed (kW_{th})	Total Glazed (kW_{th})	*Flat Plate* (kW_{th})	*Vacuum Collectors* (kW_{th})	Total Glazed (%)	Total Glazed (kW_{th})
AT	1.459.842	107.135	116.844	127.816	*126.000*	*1.816*	9%	140.000
BE	33.774	3.460	6.333	10.290	-	-	62%	12.600
CH	246.722	18.502	18.774	21.747	*20.932*	*815*	16%	24.500
CY	315.140	21.000	21.000	21.000	-	-	0%	21.000
CZ	30.380	4.200	4.900	5.950	*5.670*	*280*	21%	7.000
DE	3.922.800	378.000	504.000	525.000	*472.500*	*52.500*	4%	595.000
DK	221.011	9.100	13.300	14.000	*13.300*	*700*	5%	15.400
EE	399	35	105	175	-	-	67%	210
ES	294.256	46.200	49.000	63.000	-	-	29%	105.000
FI	8.386	777	1.400	1.400	-	-	0%	1.400
FR[3]	191.870	18.900	27.230	36.400	-	-	34%	52.500
GR	1.978.690	106.400	112.700	150.500	-	-	34%	119.000
HU	2.975	350	700	1.050	-	-	50%	1.050
IE	5.103	613	840	1.400	*840*	*560*	67%	2.100
IT	311.000	31.500	35.000	40.600	-	-	16%	49.000
LT	1.155	210	280	350	-	-	25%	420
LU	8.050	840	1.050	1.190	-	-	13%	1.400
LV	1.155	210	280	350	-	-	25%	420
MT	10.752	1.750	2.100	2.951	*2.858*	*92*	41%	3.990
NL	198.456	21.000	19.380	18.410	-	-	-5%	18.900
PL	71.764	12.600	18.354	23.100	-	-	26%	24.500
PT	101.465	3.850	4.200	7.000	-	-	67%	9.450
SE	130.038	10.682	13.479	14.041	*12.249*	*1.792*	4%	17.500
SI	68.320	840	770	1.260	-	-	64%	1.400
SK	39.725	3.150	3.500	3.850	*3.465*	*385*	10%	4.200
UK	118.944	12.250	15.400	17.500	-	-	14%	21.000
SUM	9.771.471	813.553	990.918	1.110.329	-	-	12%	1.248.940