



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HARRI HOIPO
SELEKTIIVISET PINNAT AURINKOKERÄIMISSÄ

Kandidaatintyö

Tarkastaja:
yliopistonlehtori Seppo Syrjälä

TIIVISTELMÄ

HARRI HOIPO: Selektiiviset pinnat aurinkokeräimissä

Solar selective coatings on solar collectors

Tampereen Teknillinen Yliopisto

Teknis-luonnontieteellinen tiedekunta

Kandidaatintyö, 21 sivua

Syyskuu 2018

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: Seppo Syrjälä

Avainsanat: Absorptio, aurinkoenergia, aurinkokeräimet, emissio, selektiiviset pinnat

Jatkuvasti kasvava energiantarve, ilmastonmuutos ja fossiilisten polttoaineiden vääjämätön loppuminen ovat muutamia monista syistä uusiutuvien energianlähteiden tarpeiden kasvamiselle. Yksi lukuisista uusiutuvista energianlähteistä on aurinkoenergia, jonka hyödyntämispotentiaali on suuri. Tässä työssä keskitytään aurinkolämpöön.

Aurinkolämmön hyödyntämiseen käytetyt aurinkokeräimet voidaan jakaa stationääriin keräimiin ja seurantakeräimiin, jotka voidaan jakaa vielä tarkemmin yhden ja kahden akselin seurantakeräimiin. Työssä käydään lyhyesti läpi jokainen näistä ryhmistä ja niiden yleisimpiä malleja. Lisäksi tutustutaan hieman Suomen aurinkokeräimien tilastoihin.

Selektiivisiä pintoja tutkitaan teoriatasolla ja paneudutaan sen jälkeen selektiivisten pintojen materiaaliryhmiin: luontaisiin materiaaleihin, tandemkasoihin ja käänteisiin tandemkasoihin, monikerroksisiin kasoihin, cermetteihin, pintakarheuteen sekä kvanttikoon vaikutuksiin. Jokaisesta materiaaliryhmästä tarkastellaan myös muutamia siihen kuuluvia materiaaleja ja valmistusmenetelmiä.

Työn lopussa todetaan Suomeen parhaiten sopiviksi aurinkokeräinmalleiksi yhden akselin seurantakeräimistä paraboliset kaukalokeräimet ja lineaariset Fresnelin heijastimet. Stationääriset keräimet ovat keskenään hyvin samankaltaisia, joten niistä ei valita yksittäisiä malleja. Kahden akselin seurantakeräimet eivät ole kannattavia Suomen olosuhteissa, minkä vuoksi niistä ei eritellä parasta mallia. Selektiivisistä pinnoista interferenssikasat, cermetit ja pintakarheus valikoituvat parhaiksi materiaaliryhmiksi.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	AURINKOKERÄIMIEN TOIMINTAPERIAATE.....	2
2.1	Erilaisia aurinkokeräimiä	2
2.1.1	Stationääriset keräimet.....	2
2.1.2	Seurantakeräimet.....	5
2.2	Aurinkokeräimet Suomessa.....	8
3.	SELEKTIIVISTEN PINTOJEN TEORIA.....	10
4.	SELEKTIIVISTEN PINTOJEN MATERIAALIT JA VALMISTUSMENETELMÄT	13
4.1	Luontaiset materiaalit.....	13
4.2	Tandemkasat ja käänteiset tandemkasat.....	14
4.3	Monikerroksiset kasat (interferenssikasat).....	15
4.4	Cermetit.....	16
4.5	Pintakarheus	16
4.6	Kvanttikoon vaikutukset (QSEs).....	17
5.	SELEKTIIVISTEN PINTOJEN AURINKOKERÄIMET SUOMESSA.....	18
6.	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	20
	LÄHTEET.....	21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CFL	<i>Circular Fresnel lens</i> suom. pyöreä Fresnelin linssi
CPC	<i>Compound parabolic collector</i> suom. parabolinen yhdistelmäkeräin
CTR	<i>Central tower receiver</i> suom. keskustornivastaanotin
ESTIF	<i>European Solar Thermal Industry Federation</i>
ITO	<i>Indium Tin Oxide</i> suom. indiumtinaoksidi
Luke	Luonnonvarakeskus
QSEs	<i>Quantum Size Effects</i>
PDSC	<i>Paraboloidal dish solar concentrator</i> suom. paraboloidinen lautaskeskitin
SAMs	<i>Selective Absorbing Materials</i> suom. selektiiviset absorboivat materiaalit
STMs	<i>Selective Transmitting Materials</i> suom. selektiiviset lähettävät materiaalit
c	valonnopeus
E	säteilyenergia
f	taajuus
h	Planckin vakio
s	selektiivisyys
T	lämpötila
α	absorptio
ε	emissio
λ	aallonpituus
ρ	heijastussuhde
σ	Stefan-Boltzmannin vakio
τ	läpäisysuhde

1. JOHDANTO

Uusiutuviin luonnonvaroihin perustuvat energiantuotantomenetelmät ovat enenevässä määrin tärkeämpiä ilmastonmuutoksesta johtuen [1, s. 10–11]. Tämä tiedostetaan myös Suomessa, jonka tavoitteena on hiilineutraali yhteiskunta [2]. Aurinkoenergia on yksi monista mahdollisista uusiutuvan energian lähteistä. Aurinkoenergia on energiaosuudeltaan kasvanut muun muassa vähenevien fossiilisten polttoaineiden ja edellä mainitun ilmastonmuutoksen takia. Auringon energiaa hyödyntäville sovelluksille on kuitenkin vielä paljon mahdollisia sijoituspaikkoja, joten sen osuuden energiantuotantomuodoista voidaan olettaa kasvavan tulevaisuudessa entistä enemmän.

Energiantuottamiseen liittyy oleellisesti sähkön lisäksi lämpö. Aurinkoenergialla voidaan täyttää molempia tarpeita. Sähköä voidaan tuottaa esimerkiksi valosähköisellä ilmiöllä aurinkokennojen avulla. Lämpöä tuotetaan aurinkokeräimillä lämmittämällä siinä olevaa väliainetta, jota voidaan hyödyntää muun muassa asunnon tai käyttöveden lämmitykseen. [1, s. 11–12]

Aurinkokeräimissä halutaan luonnollisesti absorboida mahdollisimman paljon auringon säteilyä, jotta siitä voidaan hyödyntää mahdollisimman suuri osa. Samaan aikaan aurinkokeräimen häviöt halutaan minimoida, erityisesti sen emittoima lämpösäteily. Näiden molempien ominaisuuksien saavuttamiseksi tarvitaan selektiivisiä pintoja.

Työn tarkoituksena on tarkastella erilaisia selektiivisiä pintoja sekä aurinkokeräimiä ja näiden tietojen pohjalta arvioida parhaat selektiivisten pintojen aurinkokeräimet Suomeen. Aluksi luvussa 2 perehdytään aurinkokeräimiin yleisellä tasolla. Tämän jälkeen selvennetään selektiivisten pintojen toimintaa teoriatasolla luvussa 3. Erilaisia selektiivisten pintojen materiaaleja ja niiden valmistusmenetelmiä käsitellään 4. luvussa. Suomeen parhaiten sopivia selektiivisten pintojen aurinkokeräimiä tarkastellaan luvussa 5. Luvussa 6 on työn aikana tehdyt päätelmät ja yhteenveto tärkeimmistä aiheista.

2. AURINKOKERÄIMIEN TOIMINTAPERIAATE

2.1 Erilaisia aurinkokeräimiä

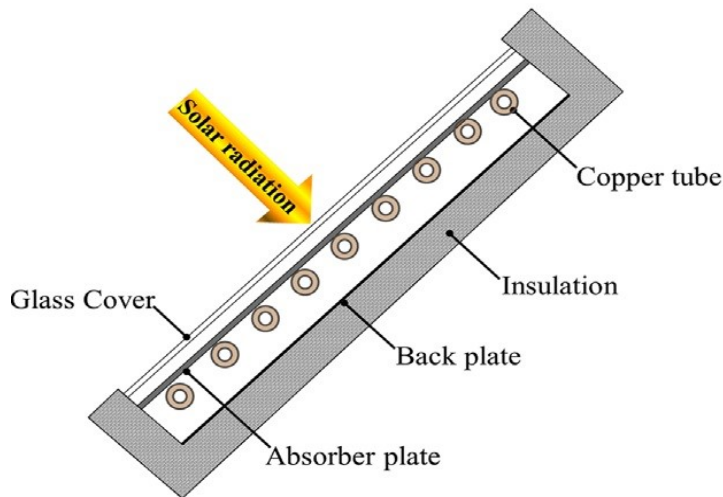
Tarkastellaan aluksi aurinkokeräimiä yleisesti. Aurinkokeräimien tarkoituksena on absorboida auringon säteilyä ja muuttaa se termiseksi energiaksi. Terminen energia varastoidaan aurinkokeräimessä olevaan väliaineeseen, joka kuljetetaan käyttökohteeseen, jossa sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi lämmitykseen tai sähköntuotantoon. Väliaineena voidaan käyttää esimerkiksi vettä tai ilmaa. Lämmönsiirto halutaan luonnollisesti maksimoida, joten väliaineiksi on kehitetty esimerkiksi nanofluideja [3, s. 206]. Nanofluideja ei käsitellä tässä työssä tämän enempää.

Aurinkokeräimiä on kahta eri tyyppiä: seurantakeräimet ja stationääriset eli liikkumattomat keräimet [3, s. 193]. Seurantakeräimet kääntyvät auringon säteilyä seuratessaan ja pyrkivät vastaanottamaan auringon säteilyn kohtisuorassa. Stationääriset keräimet asennetaan optimaaliseen kulmaan leveysasteista riippuen eikä niiden kulma siis muutu.

2.1.1 Stationääriset keräimet

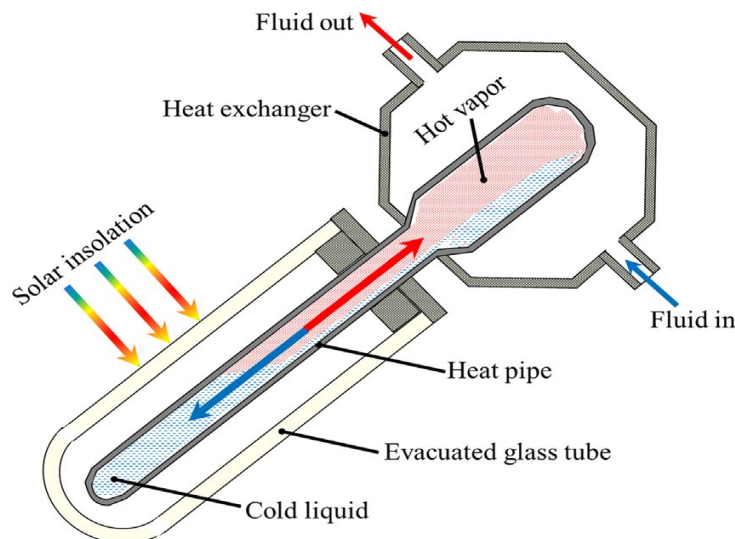
Kuten edellä mainittiin, stationääristen keräimien asento ei riipu auringon sijainnista taivaalla, vaan ne pysyvät ennalta määritetyssä asennossa. Keräimen täytyy olla optimaalisessa asennossa, joka riippuu maantieteellisestä sijainnista, jotta keräimeen tuleva säteily voidaan maksimoida. Stationääriset keräimet voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään: tasokeräimiin, tyhjiöputkikeräimiin ja parabolisiin yhdistelmäkeräimiin. [3, s. 194–195]

Tasokeräimet (kuva 2.1) ovat keskeisimpiä aurinkoenergian keräysjärjestelmistä. Ne keräävät auringon säteilystä suoran säteilyn ja hajasäteilyn eli diffuusin säteilyn. Tasokeräimet vaativat vähän huoltoa ja muita toimenpiteitä toimiakseen. Tasokeräimen keskimääräinen toimintalämpötila on 60 °C:n ja 100 °C:n välillä, joten se ei sovellu suuren lämpötilan sovelluksiin. [4, s. 172]



Kuva 2.1 Tasokeräimen rakenne ja toimintaperiaate [3, s. 195]

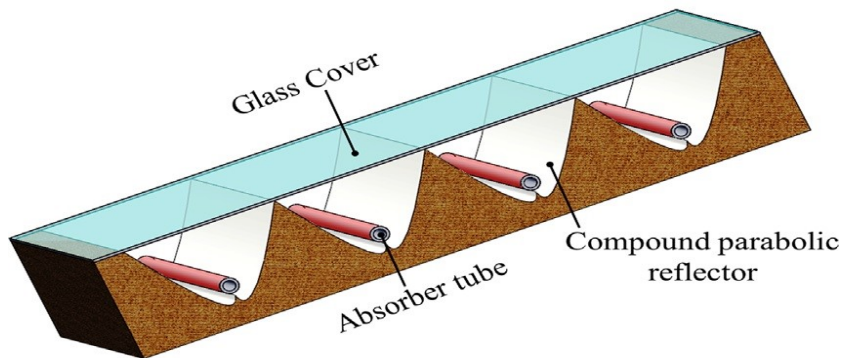
Tasokeräimet toimivat samalla periaatteella kuin aurinkokeräimet yleisesti. *Glass cover* eli lasite päästää lyhyen aallonpituuden (λ) eli 0,23–2,6 μm lävitseen, mutta pitkälle aallonpituudelle ($\lambda \geq 2,6 \mu\text{m}$) lasite on läpinäkymätön [4, s. 172]. Lasite auttaa myös vähentämään lämpöhäviöitä. *Absorber plate* eli absorbaattorilevy on mustattu lämpöä johtava levy, joka absorboi lyhyen aallonpituuden auringon säteilystä ja siirtää lämpöenergian esimerkiksi kuvassa 2.1 käytettäviin kupariputkiin (*copper tube*) ja sisällä olevaan väliaineeseen. Takalevy (*back plate*) ei ole tarpeellinen käytettäessä vettä väliaineena [3, s. 195]. *Insulation* eli eristys on käytössä, jotta lämpöhäviöt aurinkokeräimestä saataisiin minimoitua.



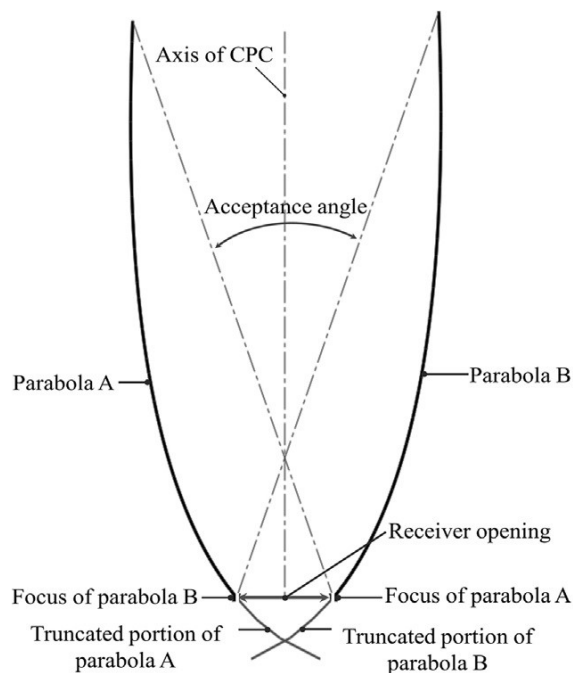
Kuva 2.2 Tyhjiöputkikeräimen rakenne ja toimintaperiaate [3, s. 196]

Tyhjiöputkikeräimet (kuva 2.2) käyttävät toiminnassaan kahta fluidia: lämpöputkessa (*heat pipe*) olevaa nestettä ja lämmönsiirtimen (*heat exchanger*) sisältävää fluidia. Tyhjiölasiputkessa (*evacuated glass tube*) on tyhjiö, kuten on yleensä myös lämpöputkessa,

väliainetta lukuun ottamatta, lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Tyhjiöputkikeräimessä auringon säteily kuumentaa lämpöputkessa olevaa nestettä, joka höyrystyy ja nosteen vaikutuksesta siirtyy putken yläosaan, jossa se lämmönsiirtimen ympäröimänä luovuttaa lämpöenergiaansa lämmönsiirtimen väliaineelle. Lämpöputken väliaine tiivistyy takaisin nesteeksi ja gravitaation vaikutuksesta siirtyy putken alaosaan, jossa sykli alkaa alusta. Tyhjiöputkikeräimissä on yleensä käytössä enemmän kuin yksi putki, jotta lämmönsiirtimen fluidissa saavutettaisiin korkeampi lämpötila. [3, s. 196–197]



Kuva 2.3 CPC:n rakenne [3, s. 196]



Kuva 2.4 CPC:n paraabelien geometriset ominaisuudet [3, s. 196]

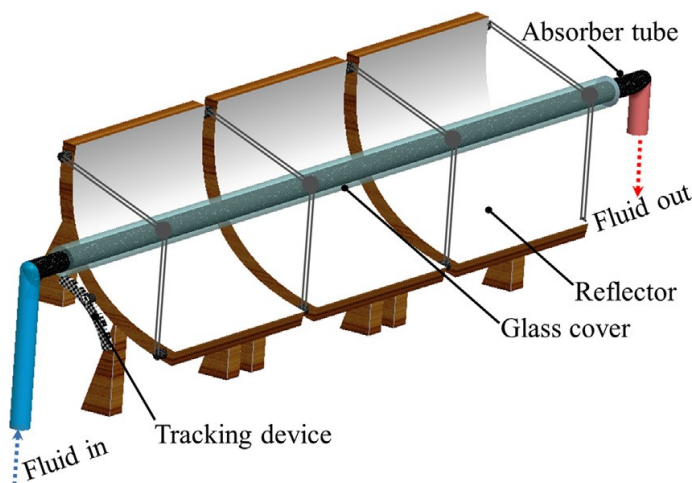
Paraboliset yhdistelmäkeräimet (CPC) absorboivat suoraan absorboimisputkeen (*absorber tube*) tulevan ja kahdesta parabolisesta yhdistelmäheijastimesta heijastuneen auringon säteilyn. Absorboimisputki on sijoitettu kuvien 2.3 ja 2.4 mukaisesti paraabelien A ja B polttopisteiden väliin pääleikkauksen kohdalle. Kuvan 2.4 alhaalla oleva *truncated portion of parabola* eli paraabelin katkaistu osa on paraabelista leikattu osa. Paraboliseen

yhdistelmäkeräimeen tulevan auringon säteilyn tulokulman ollessa pienempi kuin puolikas hyväksymiskulma (*acceptance angle*) auringon säteily menee vastaanottajareian (*receiver opening*) läpi. Jos tulokulma on suurempi kuin puolikas hyväksymiskulma, auringon säteily heijastuu takaisin ilmaan yläpuolella olevan reiän kautta. [3, s. 197]

2.1.2 Seurantakeräimet

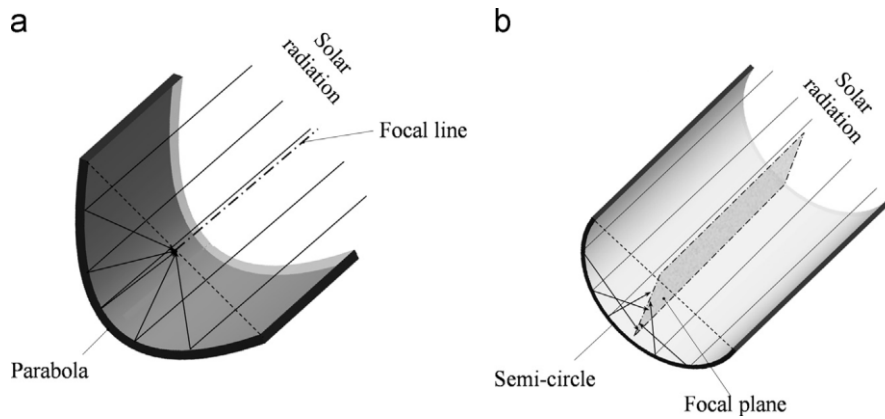
Seurantakeräimet voidaan jakaa kahteen ryhmään: yhden akselin ja kahden akselin seurantakeräimiin. Seurantalaitteiden käyttö aurinkokeräimien yhteydessä kasvattaa saadun tehon lisäksi niiden hintaa, joten seurantalaitteita ei yleensä käytetä pienen kapasiteetin aurinkokeräimissä. Seurantalaitteen käyttäminen parantaa keräimestä saatavaa energiaa 10–100 % ajasta ja maantieteellisestä sijainnista riippuen. [3, s. 197] Käsitellään ensin yhden akselin seurantakeräimiä.

Yhden akselin seurantakeräimet koostuvat pääasiassa parabolisista kaukalokeräimistä, sylinterimäisistä kaukalokeräimistä ja lineaarisista Fresnelin heijastimista. Kaikki kolme on ennen käyttöönottoa suunnattu pohjois–etelä-akselilla optimaaliseen kulmaan, ja päivän aikana keräimet itse seuraavat aurinkoa itä–länsi-akselilla.



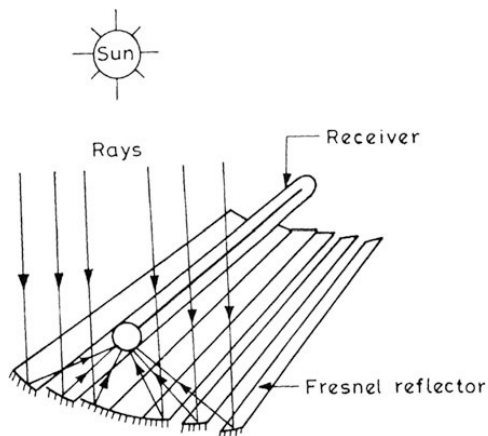
Kuva 2.5 Parabolinen kaukalokeräin [3, s. 197]

Parabolinen kaukalokeräin (kuva 2.5) toimii likimain samoin kuin CPC. Eroavaisuudet tulevat lähinnä parabolisen kaukalokeräimen liikkumisesta ja putken sijainnista. Parabolisia kaukalokeräimiä käytetään yleensä suuren kokoluokan tehon tuottamisessa. Sylinterimäiset kaukalokeräimet ovat muuten samanlaisia kuin paraboliset kaukalokeräimet, mutta polttotason sijasta niissä käytetään polttolinjaa (kuva 2.6). Sylinterimäiset kaukalokeräimet ovat käytössä harvoin. [3, s. 197–198]



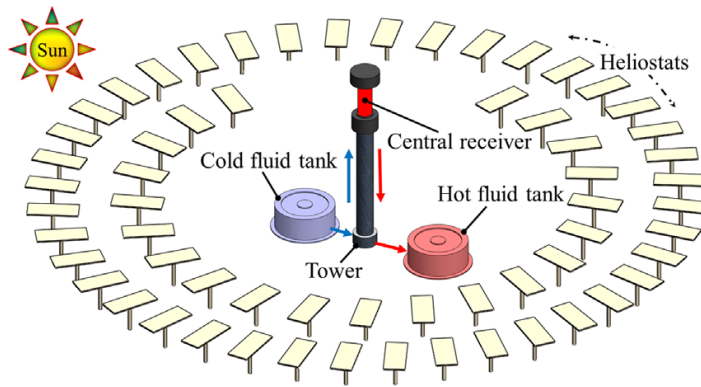
Kuva 2.6 Parabolisen (a) ja sylinterimäisen (b) kaukalokeräimen erot [3, s. 198]

Lineaarinen Fresnelin heijastin (kuva 2.7) toimii periaatteessa samalla tavalla kuin edellä mainitut kaukalokeräimet ja CPC. Siinä keskitetään Fresnelin heijastimien (*Fresnel reflector*) eli yleensä tasopeilien avulla auringonsäteet vastaanottoputkeen (*receiver*), jossa väliaine sijaitsee. Ideaalisin suorituskyky saadaan, kun peilit ovat paraabelin muotoisia. Yleisemmin käytetään kuitenkin tasopeilejä valmistamisen ja kokoamisen helpottamiseksi [4, s. 256].



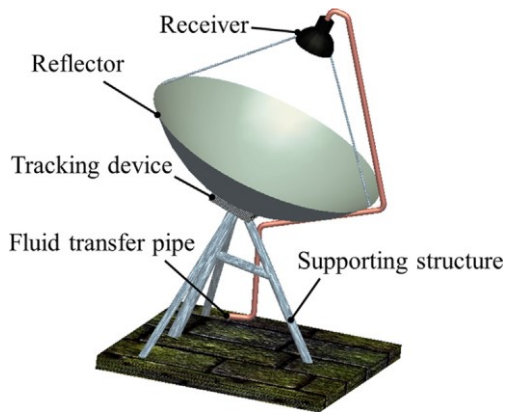
Kuva 2.7 Lineaarinen Fresnelin heijastin ja sen toimintaperiaate [4, s. 257]

Kahden akselin seurantakeräimet ovat luonnollisesti vielä yhden akselin seurantakeräimiä tehokkaampia, koska ne seuraavat auringon liikettä taivaalla vaaka- ja pystysuoraan. Kahden akselin seurantakeräimet jaetaan keskustornivastaanottimiin (CTR), paraboloidisiin lautaskeskittimiin (PDSC) ja pyöreisiin Fresnelin linssihin (CFL). [3, s. 198]



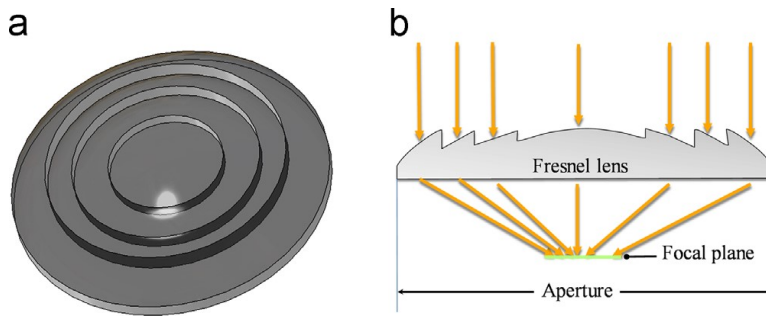
Kuva 2.8 CTR:n rakenne ja sen toimintaperiaate [3, s.198]

CTR (kuva 2.8) vastaanottaa heliostaateista (*heliostats*) heijastunutta auringon säteilyä tornissa (*tower*) sijaitsevassa keskusvastaanottimessa (*central receiver*), jossa lämpöenergia siirtyy tornissa kiertävään fluidiin. CTR:n fluideina käytetään yleisesti vettä, sulaa suolaa tai paineistettua ilmaa. Jokaisella heliostaatilla on myös seurantalaitte, jolla ne pysyvät optimaalisessa kulmassa aurinkoon nähden. [3, s. 198–199]



Kuva 2.9 PDSC [3, s.198]

PDSC (kuva 2.9) on satelliittiantennin näköinen kahden akselin seurantakeräin. Se keskittää heijastimeen (*reflector*) osuneet auringonsäteet keskellä sijaitsevaan vastaanottiin (*receiver*), joka voi olla mallista riippuen hieman erilainen [4, s. 258]. Vastaanottimessa lämmennyt fluidi siirtyy siirtoputkea (*fluid transfer pipe*) pitkin käyttökohteeseen. PDSC:ssä on luonnollisesti myös seurantalaitte (*tracking device*) ja tukirakenne (*supporting structure*). Suuret kaupalliset PDSC:t ovat kalliita valmistuksessa tarvittavan tarkkuuden takia [3, s. 199].



Kuva 2.10 CFL:n 3D kuva (a) ja 2D poikkileikkauskuva toimintaperiaatteesta (b) [3, s. 199]

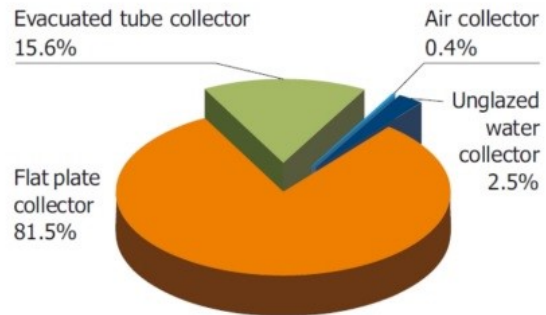
CFL (kuva 2.10) taittaa Fresnelin linssiin (*Fresnel lens*) osuneen auringon säteilyn linssin alla sijaitsevaan polttotasoon (*focal plane*), jossa se pystyy käyttämään myös epäsuoremman valon hyödyksi. CFL on lisäksi suhteellisen kevyt, koska se voidaan valmistaa erittäin ohuiksi litteiksi levyiksi. Sitä käytetään yleisesti majakoissa niiden kirkkaan valon takia. [3, s. 199]

2.2 Aurinkokeräimet Suomessa

Selvitetään vielä lyhyesti aurinkokeräimien käyttöä Suomessa ja Euroopassa. Vuosittainen auringon säteily on suuruudeltaan samaa luokkaa Suomessa ja Saksassa, joten aurinkokeräimille on potentiaalia Suomessa. Tekninen potentiaali aurinkoenergialle Suomessa on itse asiassa moninkertainen energiankulutukseen verrattuna. Vuodenaikojen ja vuorokauden vaihtuminen tuovat kuitenkin suurimmat tekniset haasteet, erityisesti pohjoisemmillä alueilla. [5, s. 6–7]

European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF) arvioi, että Suomessa vuoden 2012 lopussa termisen aurinkoenergian asennettu kapasiteetti oli 26 MW. Arvion mukaan aurinkokeräimiä olisi tuolloin ollut käytössä 36 723 m². [5, s. 13]

Luken ja Tilastokeskuksen yhteisprojektina tehdyn selvityksen mukaan pientaloissa aurinkokeräin tuottaa lämpöä vain 1 %. Tutkimuksessa pientaloiksi laskettiin maatilojen asuinrakennukset, erilliset pientalot, pari- ja rivitalot sekä vapaa-ajan asuinrakennukset, suurimpana ryhmänä omakotitalot (lähes miljoona). [6]

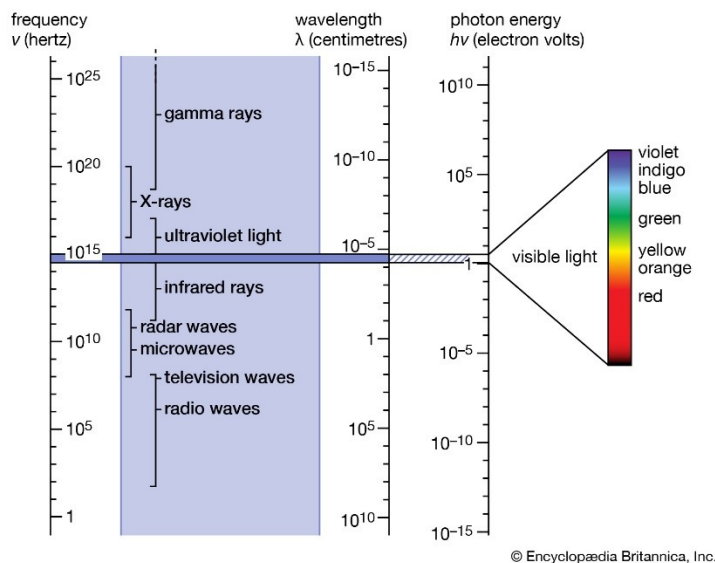


Kuva 2.11 Jakauma vasta asennettujen aurinkokeräimien kapasiteetista eri keräimien mukaan Euroopassa 2011 [5, s. 16]

Kuvassa 2.11 on vasta asennettujen aurinkokeräimien kapasiteetin jakauma eri keräimien mukaan. Selkeästi on havaittavissa tasokeräinten ylivoimainen osuus sekä tyhjiöputkikeräinten kohtuullisen suuri osuus. Jakaumasta huomataan myös seurantakeräinten puuttuminen.

3. SELEKTIIVISTEN PINTOJEN TEORIA

Tarkastellaan aluksi hieman sähkömagneettista spektriä (kuva 3.1). Aurinkokeräimien kohdalla erityisesti näkyvä valo ($\lambda=0,40\text{--}0,76\ \mu\text{m}$) ja infrapunasäteily ($\lambda=0,76\text{--}100\ \mu\text{m}$) ovat mielenkiinnon kohteena. Erityisesti siitä syystä, että auringon säteily osuu aallonpituuden alueelle $0,3\text{--}3\ \mu\text{m}$. Auringon säteily koostuu kokonaisuudessaan ultraviolettisäteilystä (*ultraviolet light*), infrapunasäteilystä (*infrared rays*) ja näkyvästä valosta (*visible light*), jonka osuus on melkein puolet. [7, s. 861–862]



Kuva 3.1 Sähkömagneettinen spektri [8]

Aurinkokeräimien pinnoitteet voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään: selektiivisiin ja epäselektiivisiin pintoihin. Epäselektiivisissä pinnoissa optiset ominaisuudet kuten heijastussuhde (ρ), absorptio (α) ja emissio (ε) ovat spektrisesti samanlaiset, eli ne ovat riippumattomia aallonpituudesta tietyllä aallonpituusalueella. Epäselektiivisillä pinnoilla on huono auringon säteilyn selektiivisyys (s) ja ne ovat termisesti epästabiileja korkeissa lämpötiloissa, mistä seuraa huono hyötysuhde aurinkokeräimessä. [3, s. 203]

Selektiivisissä pinnoissa absorptio ja emissio vaihtelevat aallonpituudesta riippuen [3, s.203]. Mustan kappaleen emittoimalle säteilyenergialle on olemassa Stefan-Boltzmannin laki

$$E_b(T) = \sigma T^4, \quad (1)$$

jossa σ =Stefan-Boltzmannin vakio= $5,670 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ ja T =lämpötila (K). Lisäksi tiedetään, että mustan kappaleen emittoima spektrinen säteilyvoimakkuus noudattaa Planckin lakia

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{(C_2/\lambda T)} - 1]}, \quad (2)$$

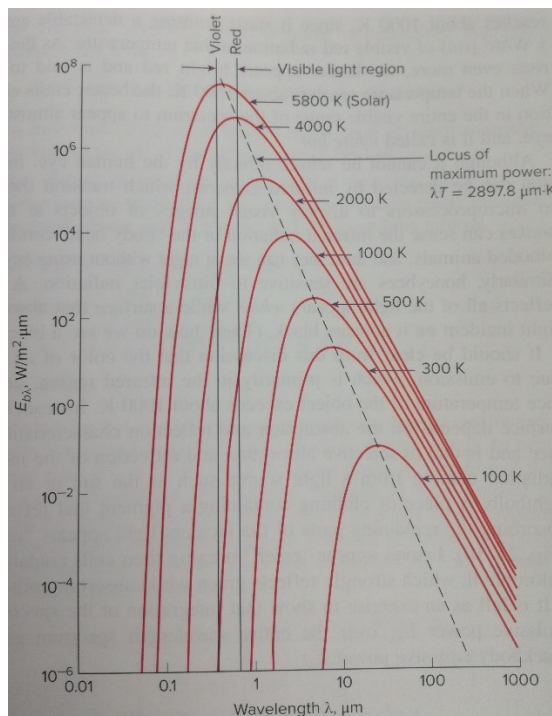
jossa λ =aallonpituus. Lisäksi kaavassa (2) esiintyvät vakiot C_1 ja C_2 voidaan ilmaista seuraavasti

$$C_1 = 2\pi hc^2 \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} \quad (4)$$

joille pätee $h=6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ =Planckin vakio, $c=2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ =valon nopeus tyhjiössä ja $k=1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ =Boltzmannin vakio.

Kaavojen (2), (3) ja (4) avulla piirretyt mustan kappaleen emittoiman spektrisen säteilyvoimakkuuden käyrät aallonpituuden eri arvoilla valituille lämpötiloille on esitetty kuvassa 3.2. Planckin laki (2) kuvaa siis yksittäistä käyrää, kun Stefan-Boltzmannin laki (1) kuvaa käyrän alle jäävää pinta-alaa. Kuvasta 3.2 voidaan huomata, kuinka lämpötilan kasvaessa käyrän huippu siirtyy vasemmalle eli pienemmille aallonpituuden arvoille. Tämä tarkoittaa siis sitä, että lämpötilan kasvaessa suurempi osa säteilystä emittoituu lyhyemmillä aallonpituuksilla. Luonnollisesti pienemmällä lämpötiloilla suurempi osa säteilystä emittoituu suuremmilla aallonpituuksilla. [7, s.864–865]



Kuva 3.2 Mustan kappaleen emittoiman spektrisen säteilyvoimakkuuden muuttuminen aallonpituuden eri arvoilla valituille lämpötiloille [7, s. 865]

Aurinkokeräimeen saapuvalla auringon säteilyllä on siis pienempi aallonpituus kuin sen emittoimalla lämpösäteilyllä. Selektiiviset pinnat perustuvatkin suuren absorptiokykynsä ohella emittoidun lämpösäteilyn suuremman aallonpituuden estämiseen. Eli ne auttavat säteilyenergian vangitsemisessa ja aiheuttavat suurempia lämpötiloja. Selektiivisten pintojen käyttö aurinkokeräimissä onkin tärkeää erityisesti suuren lämpötilan sovelluksissa. [9, s. 301].

Aurinkokeräimen spektrinen selektiivisyys on määritelty sen suurena absorptiona auringon säteilyn lyhyen aallonpituuden alueella ja matalana emissiona spektrin infrapunaa alueella, joka vastaa mustan kappaleen termistä emissiota keräimen toimintalämpötilassa ($\lambda=2-25 \mu\text{m}$). Selektiivisten pintojen tyypilliset arvot näille ominaisuuksille ovat $\alpha=0,90$ ja $\varepsilon=0,10$. Kokeellisesti on kuitenkin saatu absorptiolle arvoja välillä 0,8–0,99 ja emissiolle välillä 0,01–0,3. [9, s. 301]

On järkevää määritellä kuvaavampi termi selektiiviselle pinnalle, joka perustuu sen energettiseen suorituskäyttöön. Selektiivisyys määritellään yleensä absorption ja emission osamääränä eli

$$s = \frac{\alpha}{\varepsilon} \quad (4)$$

Tämä suhde voi vaihdella lämpötilan mukaan ja riippuu absorption ja emission tarkoista aallonpituuden funktioista. [9, s. 301–302] Selektiivisten pintojen haaste on kehittää pinta, joka on yhteensopiva keräimen oman pinnan kanssa ja lisäksi taloudellisesti kannattava sekä helppo valmistaa erissä [3, s. 205].

4. SELEKTIIVISTEN PINTOJEN MATERIAALIT JA VALMISTUSMENETELMÄT

4.1 Luontaiset materiaalit

Luontaisissa materiaaleissa käytetään yhtä materiaalia halutun selektiivisyyden saavuttamiseksi. Materiaaleja, joilla on halutut selektiiviset ominaisuudet, on erittäin rajallisesti. Kaksi eri materiaalityhmää nousee mielenkiintoisina erityisesti esille: *selective absorbing materials* (SAMs) eli selektiiviset absorboivat materiaalit ja *selective transmitting materials* (STMs) eli selektiiviset lähettävät materiaalit. [9, s. 304] Tutkitaan molempia ryhmiä hieman lisää.

SAM-ryhmästä maininnan arvoinen on puolijohde hafniumkarbidi (HfC), jonka on pitkään tiedetty ilmentävän luonnollista selektiivisyyttä. Pitkän aallonpituuden alueen heijastussuhde $\rho \approx 0,9$ ja emissio $\varepsilon \approx 0,1$, jotka ovat molemmat erittäin hyviä arvoja. Absorption arvo lyhyen aallonpituuden alueella on kohtuullisen matala $\alpha \approx 0,7$. Absorptiota pitäisi pystyä kasvattamaan, jotta tätä materiaalia voitaisiin käyttää tuottavasti aurinkokeräimissä. HfC voidaan esimerkiksi yhdistää heijastamattoman pinnoitteen kanssa tai asetella keräin niin, että keräimeen tulevasta auringon säteilystä saadaan kaksi heijastusta. Korkean sulamispisteensä takia HfC on kuitenkin houkutteleva vaihtoehto korkean lämpötilan sovelluksille. [9, s. 304]

STM-ryhmän materiaalit ovat läpinäkyviä lyhyen aallonpituuden (eli auringon säteilyn) alueella ja heijastavia pitkän aallonpituuden alueella. Niiden tarkoituksena on päästää auringon säteily sisään, mutta rajoittaa lämpösäteilyhäviöt ympäristöön. Tinaoksidi (SnO_2) ja indium(III)oksidi (In_2O_3) ovat luonnollisesti selektiivisiä materiaaleja, joita voidaan käyttää STM-materiaaleina. SnO_2 :lle auringon läpäisysuhde $\tau = 0,75$ ja pitkän aallonpituuden alueen heijastussuhde $\rho = 0,7$. In_2O_3 :lle arvot ovat samankaltaisia. Arvot ovat erittäin vaatimattomia ja niiden käyttö keräimissä yksinään on melko rajallista. Pääasiallinen käyttö näille materiaaleille onkin ohutkalvoina ikkunoissa ja läpinäkyvinä johtavina päällysteinä. Johtavuuden parantamiseksi materiaaleja yleensä seostetaan. Esimerkiksi pieni määrä tinaoksidia seostettuna indium(III)oksidiin aiheuttaa hyviä tuloksia. Läpäisysuhde kasvaa arvoon $\tau \approx 0,9$ ja heijastussuhde arvoon $\rho \approx 0,85$. Houkutteleva ominaisuus tälle sekoitetulle oksidille on sen äkillinen muutos lyhyen aallonpituuden alueen läpäisystä pitkän aallonpituuden alueen heijastavuuteen, mikä tapahtuu noin $1,8 \mu\text{m}$ siirtymäaallonpituudella. Maininnan arvoisena on myös lantaaniheksaboridi (LaB_6), jolla on pitkän aallonpituuden alueella heijastussuhde $\rho = 0,9$ ja auringon läpäisysuhde $\tau = 0,85$. Näiden arvojen saavuttamiseksi keräimessä käytetään heijastamatonta pinnoitetta, joka vähentää heijastusta lyhyillä aallonpituuksilla. [9, s. 304]

Luontaiset materiaalit ovat siis materiaaleja, joissa selektiivisyys on materiaalin luonnollinen ominaisuus. Ne ovat rakenteellisesti vakaampia, mutta optisesti heikompia kuin monikerroksiset kasat. Mikään luonnollinen materiaali ei luonnollisesti osoita vaadittuja selektiivisiä ominaisuuksia, mutta jotkut niistä lähestyvät näitä ominaisuuksia. Näitä materiaaleja käytetäänkin korkean lämpötilan keräimien komposiittipinnoitteissa ja monikerroksisissa kasoissa. [9, s. 305]

4.2 Tandemkasat ja käänteiset tandemkasat

Tandemkasat koostuvat heijastavasta metallikalvosta ja sen päällä olevasta muutaman mikrometrin paksuisesta puolijohdekalvosta, joka absorboi lyhyen aallonpituuden säteilyn. Metallikalvo mahdollistaa matalan termisen emission ja on heijastava lyhyen aallonpituuden säteilylle. Tandemia voidaan kasvattaa uusilla kerroksilla, jotka toimivat heijastamattomina pinnoitteina. Tämä on hyödyllistä, koska monissa tapauksissa puolijohdeilla on suuret valontaitekertoimet, mistä seuraa suuret taittumishäviöt. Uusilla kerroksilla voidaan valmistaa tehokkaampia ja kestävämpiä tandemkasoja, vaikka peruskonsepti kahdesta kerroksesta säilyy. [9, s. 305]

Tandemkasojen valmistukseen on ideaalista käyttää yksinkertaisia menetelmiä. Menetelmänä käytetään kerroksien tyhjiöpinnoitusta, kemiallista kaasufaasipinnoitusta (CVD) ja lämmitystä ilmassa. Sähkökemiallisia selektiivisiä pintoja voidaan myös periaatteessa valmistaa. Menetelmän ongelmana on saada pinnat käyttäytymään yhtenäisesti. Peilin pintaa kevyesti savustamalla voidaan saavuttaa yksinkertainen tandemkasa. Pintaan syntyvä hiilikerros on läpinäkymätön lyhyille aallonpituuksille, mutta läpinäkyvä suurille. Hiilihiukkaset tosin irtoavat helposti eli pinta ei ole kovin stabiili. [9, s. 305]

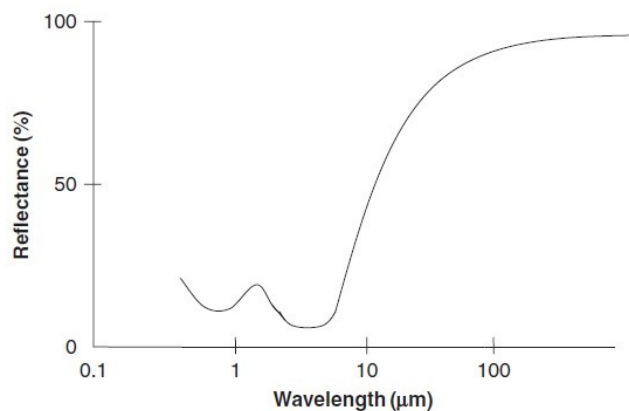
Ruostunut metallin pinta tarjoaa melko helpon tavan tandemkasojen valmistukseen. Materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi ruostumatonta terästä ja lämmittää sitä ilmassa 750 °C:ssa. Selektiivisyys $s=3$, rajoittaen mahdolliset sovellukset keskittäviin aurinkokeräimiin jotka vaativat vaatimattoman selektiivisyyden. Vaihtoehtoisena materiaalina voidaan käyttää titaania ja lämpötilana 425 °C:tta, selektiivisyys pysyy kuitenkin heikkona. [9, s. 305–306]

Käänteiset tandemkasat muodostuvat, kun pitkän aallonpituuden ehkäisykerros laitetaan päällimmäiseksi ja lyhyen aallonpituuden absorboiva materiaali pohjimmaiseksi. Päällimmäinen materiaali voi olla aiemmin mainittu STM, joka on läpinäkyvä lyhyen aallonpituuden alueella ja heijastava pitkällä. Aiemmin mainitut SnO₂, jolle käytetään usein seostusmateriaalina fluoria, ja In₂O₃ ovat sopivia materiaaleja, kuten myös niiden sekoitus indiumtinaoksidi ITO (*Indium Tin Oxide*). Absorboivana materiaalina voidaan käyttää piitä (Si), germaniumia (Ge) tai lyijysulfidia (PbS). [9, s. 306]

4.3 Monikerroksiset kasat (interferenssikasat)

Monikerroksisissa kasoissa kerroksien määrää ei ole rajattu eli halutun tuloksen saavuttamiseksi voidaan käyttää niin monta kerrosta metallia tai eristettä, kun on tarpeellista. Esimerkki yksinkertaisesta rakennelmasta on metallialusta, jonka päälle asetetaan heijastava metallikalvo, ensimmäinen eristemateriaali, ohut puoliläpäisevä metallikalvo, toinen eristemateriaali ja viimeisenä heijastamaton pinnoite. [9, s. 306] Käsitellään näitä kerroksia vielä hieman yksityiskohtaisemmin.

Metallialustan materiaalina voidaan käyttää ruostumatonta terästä, molybdeenia (Mo), kuparia (Cu), alumiinia (Al) ja muita metalleja. Seuraavaksi tuleva metallikalvo voidaan jättää pois, jos metallialustan pinta on valmistettu tarpeeksi heijastavaksi esimerkiksi kiillottamalla. Paras tulos saadaan kuitenkin, jos heijastava metallikalvo asetetaan tyhjiöpinnoituksella metallialustan päälle. Kalvon päälle tuleva ensimmäinen eristemateriaali eli puolijohde aiheuttaa heijastussuhteen laskemisen lyhyen aallonpituuden alueella, kuten kuvasta 4.1 näkyy (vasemmanpuoleinen minimi). Jotta heijastussuhde saataisiin laskemaan mahdollisimman paljon ja leveästi kuvassa 4.1, ensimmäisen eristeen päälle asetetaan erittäin ohut, yleensä ohuempi kuin 10 μm , puoliläpäisevä metallikalvo. Tämä aiheuttaa siis heijastuneen aallon voimistumista ja interferenssin maksimoimista ensimmäisessä eristekerroksessa. Seuraavaksi asetettava toinen eristekerros minimoi heijastumisen ja maksimoi absorptioon lyhyen aallonpituuden alueella, huomataan myös toinen heijastussuhteen minimi kuvassa 4.1. Heijastavan metallikalvon ja puoliläpäisevän metallikalvon tarkoituksena on vahvistaa heijastunutta aaltoa ja maksimoida sisäinen interferenssi ensimmäisessä eristeessä. Toinen eristekerros on välttämätön kuvan 4.1 mukaisen tuloksen saamiseksi. Viimeisenä interferenssikasan päälle voidaan asettaa heijastamaton pinnoite, joka minimoi heijastumishäviöt kasan päältä, kun auringon valo osuu selektiiviseen pintaan. Edellä mainittu kerroksien sarja voidaan toistaa parempien tulosten aikaansaamiseksi. Huomioon täytyy kuitenkin ottaa taloudellinen näkökulma, sarjojen toistaminen on kannattavaa vain harvoissa sovelluksissa. [9, s. 306]



Kuva 4.1 Heijastussuhde prosentteina aallonpituuden (μm) funktiona tyypilliselle monikerroksiselle interferenssikasakeräimelle [9, s. 307]

Eristekerroksina voidaan käyttää muun muassa Al_2O_3 , SiO_2 , CeO , ZnS , Cu_2O ja Cu_2S materiaaleja ja metallikerroksissa esimerkiksi Al , Mo , Ag , Cu , Ni , W ja Cr ovat käytössä. On todettu, että erinomainen valinta kasaksi on hopeapohja, jonka päällä on Cu_2S eristeenä ja sen päällä toinen hopeakalvo. Siirtymäaallonpituus on 1,4–1,8 μm spektrisellä alueella. Siirtymä on äkillinen ja selektiivisyys on erittäin hyvä. [9, s. 307]

4.4 Cermetit

Cermeteiksi kutsutaan hienoja metallihiukkasia eristeessä tai keraamisessa matriisissa, tai ne voivat olla metallilla kyllästettyjä huokoisia oksideja. Cermetit ovat läpinäkyviä pitkän aallonpituuden spektrisellä alueella ($\lambda=3\text{--}25 \mu\text{m}$) ja voimakkaasti absorboivia auringon aallonpituuden alueella. Kun cermet asetetaan voimakkaasti heijastavan peilin päälle, se muodostaa selektiivisen pinnan, jolla on suuri auringonvalon absorptio ja matala termien emissio. [9, s. 307–308]

Cermettien materiaaleina voidaan käyttää esimerkiksi $\text{Mo-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Pt-Al}_2\text{O}_3$, W-AlN , Au-MgO ja $\text{Cr-Cr}_2\text{O}_3$. Valmistusmenetelminä käytetään hyvin tunnettuja menetelmiä: metallin ja eristeen yhteissaostaminen fysikaalisella kaasufaasipinnoituksella (PVD), CVD, galvanointi, anodisointi, anodisoidun alumiinin epäorgaaninen pigmentointi. [9, s. 308]

4.5 Pintakarheus

Pinta käyttäytyy peilin tavoin, kun sillä on karheusdimensio, joka on pienempi kuin pintaan tulevan valon aallonpituus. Se saattaa jopa aiheuttaa lyhyen aallonpituuden valon voimakkaan absorboitumisen, jota tässä sovelluksessa parannetaan moninkertaisilla heijastuksilla pyramidin muotoisen, havumaisen kiteen tai puutteellisen mikrorakenteen avulla. Pintakarheudella voidaan tuottaa erilaisia vaikutuksia näkyvällä ja pitkällä aallonpituudella. Jotkut pinnat voidaan tehdä näyttämään karheilta spektrisen selektiivisyyden aikaansaamiseksi auringonvaloa optisesti vangitsemalla. Muissa tapauksissa voidaan käyttää luonnollisesti esiintyviä karheita pintoja samoin tuloksin. [9, s. 308]

Pintakarheutta voidaan valmistaa etsaamalla rakennetta kunnollisella hapolla. Menetelmää kutsutaan pintakarheutukseksi. Oikein tehtynä tällä tavalla valmistettu pinta vaikuttaa karhealta ja absorboi auringon valoa sekä samalla toimii termiselle energialle voimakkaasti heijastavana ja peilimäisenä. Hienohiontaa ja hiekkapuhallusta voidaan myös käyttää pintakarheuden valmistamiseen. Valmistusmenetelminä voidaan käyttää lisäksi optista litografiaa yksinään. Optista litografiaa voidaan käyttää edelleen reaktiivisen sputteroinnin tai ionietsauksen kanssa, kaasuna käytetään hiilifluorideja. Metallialustan pinnoitus kuparioksidilla (CuO) tuottaa pinnankarheutta ja parantaa selektiivisyyttä. Alumiinin (Al) pinnoitus lyijysulfidilla (PbS) toimii myös hyvin. Lisäksi tinaseostetun In_2O_3 kalvon etsausta käytetään mikroverkon muodostamiseen. [9, s. 308–309]

4.6 Kvanttikoon vaikutukset (QSEs)

Kvanttikoon vaikutukset vaativat luonnollisesti merkittävät rajoitukset koossa, että niitä pystytään edes havaitsemaan. Niitä on havaittu olevan äärimmäisen ohuissa kalvoissa ja pisteissä. QSE:lle kriittinen paksuus on 2–3 nm metallikalvoissa ja degeneroituneissa puolijohteissa 10–50 nm. Itse selektiivinen pinta voidaan rakentaa yhdistämällä metallialusta ja QSE materiaali. Esimerkkinä hopean tai alumiinin tyhjiöpinnoitus InSb:llä. [9, s. 309]

QSE:n käyttö todellisissa aurinkokeräimissä tuo mukanaan ongelmia stabiilisuuden ja pinnoituksen koostumuksen jatkuvuuden osalta syklisessä lämmityksessä ja ilmalle altistumisessa. Agglomerointi on ohuen kiinteän metallikalvon asettamisen yksi ongelmista. Ongelma on erittäin vakava, kun kalvo lämmitetään erittäin suuressa lämpötilassa. Kalvo saattaa tämän seurauksena kutistua saariksi. Cr_2O_3 :a käytetäänkin erittäin ohuena kalvona toimimaan suojaavana kerroksena agglomerointia vastaan sekä diffuusioesteenä ionisekoittumisen estämiseksi. Lisää tutkimusta tarvitaan lukuisten metallien ja puolijohteiden osalta QSE:n ymmärtämiseksi ja hyödyntämiseksi. [9, s. 309]

5. SELEKTIIVISTEN PINTOJEN AURINKOKERÄI-MET SUOMESSA

Arvioidaan vielä parhaita selektiivisen pintojen omaavia aurinkokeräimiä Suomen olo-suhteisiin. Yleisesti Suomessa aurinkokeräimiä hyödynnetään lähinnä oman talouden käyttöön, joten stationääriset keräimet soveltuvat parhaiten näihin pieniin mittakaavoihin. Teolliseen käyttöön voisi kuitenkin soveltua paremmin seurantakeräimet niiden paremman tehonsa vuoksi. Koska stationääriset keräimet ja seurantakeräimet soveltuvat selkeästi eri tilanteisiin, tarkastellaan molempia erikseen.

Seurantakeräimistä tarkastelun kohteiksi valitaan paraboliset kaukalokeräimet, lineaariset Fresnelin heijastimet, keskustornivastaanottimet ja PDSC:t. Kuten aiemmin mainittu, kahden akselin seurantakeräimet ovat yhden akselin seurantakeräimiä tehokkaampia. Tästä syystä termodynaaminen teho on keskustornivastaanottimessa ja PDSC:ssä korkea, kun parabolisessa kaukalokeräimessä ja lineaarisessa Fresnelin heijastimessa se on matala. Suurempi teho näkyy luonnollisesti kuitenkin suurempana hintana. Suuri hinta selittyy myös toisaalta kahden akselin keräinten teknologisenä uutuutena, joten ajan myötä näiden hinta todennäköisesti laskee. Keskityssuhteissa ollaan eri kokoluokassa, yhden akselin seurantakeräimillä saavutetaan 10–45 W/m² keskityssuhteet ja kahden akselin seurantakeräimillä 100–1500 W/m². Tämä huomataan myös toimintalämpötiloissa. Parabolisella kaukalokeräimellä saadaan 50–400 °C toimintalämpötila, lineaarisella Fresnelin heijastimella 50–300 °C, keskustornivastaanottimella 300–2000 °C ja PDSC:llä 150–1500 °C. Yhden akselin toimintalämpötilat ovat useimmissa sovelluksissa riittäviä ja ottaen huomioon Suomen vähäisen auringonpaisteen vuodessa, verrattuna esimerkiksi Etelä-Euroopan maihin, yhden akselin aurinkokeräimet eli paraboliset kaukalokeräimet ja lineaariset Fresnelin heijastimet ovat varmasti järkevimät vaihtoehdot seurantakeräimien osalta. [10, s. 2704]

Luvussa 2.1.1 esitellyt stationääriset keräimet ovat toiminnaltaan keskenään samanlaisia. Lämmön tuottamisen tehokkuudessa ei siis ole merkittäviä eroja. Suuremmat erot tulevat käytetyistä materiaaleista ja muista ulkoisista tekijöistä. Stationäärisistä keräimistä onkin vaikea valita yhtä parasta ratkaisua, joka sopisi yleisesti jokaiseen kohteeseen.

Tarkastellaan lopuksi selektiivisiä materiaaleja, jotka sopivat Suomen ilmastoon ja olo-suhteisiin. Luontaiset materiaalit itsessään voidaan käytännössä jättää huomiotta, kuten aiemmin todettiin niiden selektiivisyys ei ole samaa tasoa kuin muilla selektiivisillä materiaaleilla. Kvanttikoon vaikutukset ovat teknologialtaan vielä kehittelyasteella, joten nekin eivät ole optimaalisin ratkaisu. Tandemkasoissa yksinkertaisimmat valmistusmenetelmät eivät tarjoa erityisen hyvää selektiivisyyttä. Hankalimmat menetelmät ja monet ylimääräiset materiaalikerrokset tekisivät tandemkasoista kalliin ratkaisun. Loput ryhmät

eli interferenssikasat, cermetit ja pintakarheus ovat yleisesti hyviä vaihtoehtoja selektiivisiksi pinnoiksi. Tarkempi materiaalianalyysi vaatisi aiheeseen perehtymistä tarkemmin ja laajemmin, jota tässä työssä ei tehdä.

6. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Aurinkoenergia ja muut uusiutuvat energiat tulevat olemaan tulevaisuudessa suuressa roolissa maailman energiankulutuksessa, kun fossiilisista polttoaineista joudutaan luopumaan joko niiden loppumisen tai liiallisten päästöjen takia. Aurinkoenergia on sen hyödyntämiseen tarvittavien laitteiden valmistusta lukuun ottamatta täysin päästötöntä. Aurinkoenergialla ei ole myöskään monien fossiilisten polttoaineiden saatavuusongelmia, auringosta riittää energiaa melkein rajattomasti.

Aurinkokeräimistä esiteltiin työssä yleisimpiä ja hyviksi todettuja malleja. Jokaisella aurinkokeräimellä on omia sovelluskohteita, joissa ne toimivat paremmin kuin muut mallit. Stationääriset keräimet sopivat erityisesti vähäiseen lämmitystarpeeseen ja niitä käytetäänkin lähinnä omakotitalojen ja muiden pienten asuinrakennusten katoilla. Seurantakeräimet sopivat isomman kokoluokan ja toimintalämpötilojen käyttöön, niillä onkin potentiaali toimia voimaloina ja tuottaa lämpöä tai mahdollisesti sähköä esimerkiksi kaupunkiympäristöön. Suomen vähäinen aurinkolämpökapasiteetti painottuu lähinnä oman talouden käyttötarpeisiin, missä olisi parannettavaa tulevaisuutta ajatellen. Kaupunkiympäristössä olisi paljon potentiaalia aurinkolämmölle ja myös aurinkosähkölle. Erityisesti yhden akselin seurantakeräimet voisivat olla erittäin potentiaalinen hyödyntämismahdollisuus esimerkiksi kerrostalojen katoille. Niiden soveltaminen tähän tarkoitukseen vaatii lisätutkimusta.

Suuri absorptio ja matala lämpösäteilyn emissio ovat kaksi merkittävintä ominaisuutta selektiivisillä pinnoilla. Tämä saavutetaan asettamalla aurinkokeräimen pinnalle mahdollisimman hyvin auringon säteilyä läpipäästävä ja mahdollisimman paljon lämpösäteilyä estävä pinta. Selektiivisiä pintoja on kehitelty runsaasti ja työssä perehdyttiin niiden eri materiaaliryhmiin. Materiaaliryhmiä tarkasteltiin yleisellä tasolla muutamien esimerkkien ja tuotantotapojen ohella. Suomessa hyödynnettävistä selektiivisistä pinnoista sopiviksi ratkaisuiksi todettiin interferenssikasat, cermetit ja pintakarheus. Kvanttikoon vaikutukset voisivat olla tulevaisuudessa merkittävä selektiivisen pinnan materiaali, mutta ne vaativat vielä lisätutkimuksia ennen laajempaa hyödyntämistä.

Todennäköisin skenaario aurinkokeräimille tulevaisuudessa on niiden hyödyntäminen uudenaikaisissa ympäristöissä ja sovelluksissa yhä useimmissa käyttökohteissa. Selektiiviset pinnat tulevat varmasti pysymään aurinkokeräimissä, muiden aurinkokeräinten tehokkuutta parantavien menetelmien ohella. Suuremman kokoluokan aurinkokeräimet korvaavat hyvin todennäköisesti lähivuosisikymmeninä perinteiset fossiiliset polttolaitokset, muiden uusiutuvien energiamuotojen ohella.

LÄHTEET

- [1] G. Boyle, Renewable energy, 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 2004, pp. 10–12
- [2] Energia- ja ilmastostrategia, Työ- ja elinkeinoministeriö.
Saatavissa (viitattu 26.9.2018): <https://tem.fi/energia-ja-ilmastostrategia>
- [3] S. Suman, M.K. Khan, M. Pathak, Performance enhancement of solar collectors – A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 49, 2015, pp. 192–210
- [4] G.N. Tiwari, A. Tiwari, Shyam, Handbook of Solar Energy: Theory, Analysis and Applications, Springer, Singapore, 2016, pp. 172–258
- [5] T. Hakkarainen, E. Tsupari, E. Hakkarainen, J. Ikäheimo, The role and opportunities for solar energy in Finland and Europe, VTT Technology 217, VTT, Espoo, 2015, pp. 6–16
- [6] V. Rouhiainen, Uusiutuva energia valtaa alaa pientalojen lämmityksessä, Tieto&trendit, Tilastokeskus, 2018
- [7] Y.A. Çengel, J. Cimbala, R.H. Turner, Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences, 5th ed. McGraw-Hill Education, 2017, pp.
- [8] Electromagnetic spectrum, in: Encyclopædia Britannica Online, Encyclopædia Britannica Inc, 2018
- [9] P. Yianoulis, M. Giannouli, S.A. Kalogirou, 3.09 – Solar Selective Coatings, Elsevier Ltd, 2012, pp. 301–312
- [10] D. Barlev, R. Vidu, P. Stroeve, Innovation in concentrated solar power, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 95, Iss. 10, 2011, pp. 2703–2725