



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Pekka Vikman

AURINKOVOIMALOIDEN TOIMINTA

Paneeli- ja CSP-voimalaitokset

Teknikka
2018

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Pekka Vikman
Opinnäytetyön nimi	AURINKOVOIMALOIDEN TOIMINTA Paneeli- ja CSP-voimalaitokset
Vuosi	2018
Kieli	suomi
Sivumäärä	63 + Lähteet
Ohjaaja	Vesa-Matti Honkanen

Tämä opinnäytetyö on selvitys aurinkoenergian peruseriaatteista ja pääteknologioista. Tavoitteena on antaa käsitys käytössä olevista aurinkoenergian tuotantomuodoista sekä perehdyttää tulevan kehityksen lähtökohtiin. Selvitys soveltuu käytettäväksi aurinkoenergian perusteiden tietolähteenä.

Opinäytetyö on kirjallisuustutkimus joka perustuu energia-alaa käsitteleviin tietolähteisiin. Siinä keskitytään aurinkoenergian hyödyntämistapoihin, käytössä oleviin teknologioihin, niiden vaatimuksiin, edellytyksiin sekä tulevan kehityksen suuntaviivoihin. Työstä on jätetty taloudellinen tarkastelu pois eikä työssä käsitellä kaavoja, lasketa energialähteelle tunnusomaisia laskelmia, eikä verrata aurinkoenergian kannattavuutta muihin energiamuotoihin.

Aurinkoenergiasta on muodostumassa yksi tärkeimmistä, ellei jopa tärkein energiamuoto tulevaisuudessa. Teknologian kehitys ja laajuus on ollut hyvin nopeaa viimeisen vuosikymmen aikana. Vielä teknologia ei ole joka suhteessa, kuten energian varastoinnin osalta, täysin valmista täysimittaiseen energiavallankumoukseen, vaikka voimakas positiivinen muutos aurinkoenergian hyödyntämiseen ja käyttöön on jo nähtävissä.

Avainsanat	Aurinkovoima, aurinkokenno, keskittävä aurinkovoima, energian varastointi
------------	---

ABSTRACT

Author	Pekka Vikman
Title	Functionality of Solar Power Plants Panel and CSP Power Plants
Year	2018
Language	Finnish
Pages	63 + Sources
Name of Supervisor	Vesa-Matti Honkanen

This thesis is a study of the basic principles and main technologies of solar energy. The aim is to give an idea of the existing solar energy production patterns and to familiarize them with the basics of future development. The survey is suitable for use as a data source for solar energy.

The thesis is a literature study based on data sources in the energy sector. It focuses on solar energy utilization methods, existing technologies, requirements, prerequisites and future development guidelines. Financial scrutiny has been excluded from thesis and does not consider formulas or calculate energy-specific calculations, nor compare the profitability of solar energy with other energy forms.

Solar energy is becoming one of the most important, if not the most important, energy form in the future. Technology development and scale have been very fast over the last decade. Still technology, in terms of energy storage, is not fully prepared in all respects for a full-fledged energy revolution, though a powerful positive change in solar energy utilization and usage is already evident.

Keywords	Solar power, solar cells, concentrated solar power and energy storage
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	AURINKOENERGIA	9
2.1	Aurinkoenergian muodostuminen.....	9
2.2	Aurinkoenergian historiaa.....	11
3	AURINKOENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN	13
3.1	Aurinkopaneelit.....	13
3.2	Keskittävä aurinkovoima	15
4	AURINKOPANEELIT.....	18
4.1	Aurinkokennojen tekniset ratkaisut	18
4.1.1	Ensimmäisen sukupolven kennot.....	19
4.1.2	Toisen sukupolven kennot	20
4.1.3	Kolmannen sukupolven kennot.....	21
4.2	Aurinkokennon sähköntuotanto	22
4.2.1	Lämpötila	23
4.2.2	Säteilyn intensiteetti	24
4.2.3	Sijainti ja käyttöympäristö	25
4.2.4	Kennojen optimaalinen suuntaus	26
4.3	Aurinkosähkön varastointi	27
4.4	Aurinkopaneelijärjestelmän hyödyt ja haitat	29
5	KESKITTÄVÄ AURINKOVOIMA.....	31
5.1	Parabolinen kouru	32
5.2	Levyjärjestelmät eli Parabolinen lautanen	36
5.3	Aurinkotorni.....	38
5.4	Lineaarinen Fresnelin peilirakenne.....	43
5.5	Energian varastointi ja sähkön tuotanto.....	47
5.5.1	Tuntuvan sisäenergian varastointi.....	49
5.5.2	Latenttilämmön varastointi	50

5.5.3	Termokemiallinen lämmön varastointi	51
5.5.4	Aktiiviset ja passiiviset varastoinnit.....	52
5.6	Jäähdytys.....	53
5.7	Keskittävän aurinkoenergian hyödyt ja haitat.....	54
6	AURINKOENERGIAN KEHITYSNÄKYMÄT	55
6.1	Aurinkopaneelien kehitysnäkymät.....	56
6.2	Keskittävän aurinkoenergian kehitysnäkymät	58
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	61
8	LÄHTEET	64

Kuvaluettelo

Kuva 1. Maapallolle saapuva auringon säteilyn hajautuminen/63/.....	10
Kuva 2. Aurinkopaneelin toimintaperiaate /10/	14
Kuva 3. Suoran säteilyn (DNI) määrät maailmassa pitkän aikavälin keskiarvona/64/	17
Kuva 4. Yksittäinen PV-kenno, PV-paneeli sekä ryhmä paneeleja, jotka muodostavat aurinkosähköjärjestelmän /13/	18
Kuva 5. Yleisimmin käytetyt aurinkokennotyypit/17/	21
Kuva 6. Lämpötilan vaikutus kennon jännitteeseen ja virtaan./25 s. 37/	24
Kuva 7. Auringon säteilyn vaikutus paneelin tuottamaan jännitteeseen ja virtaan. (muokattu)/25 s. 38/	25
Kuva 8. Aurinkokennoon tulevan auringon säteilyn erilaisia tulokulmia /26/.....	26
Kuva 9. Sähkön varastointiteknologioiden purkausajat ja tehot./28/	28
Kuva 10. Neljä pää- CSP-teknologiaa kuvattuna. 1.parabolinen kouru, 2.Levyjärjestemät, 3.Aurinkotorni ja 4.Lineaarinen Fresnelin peilirakenne/7/	32
Kuva 11. Parabolisen kourun rakenne./34/ (muokattu).....	33
Kuva 12. Yksittäisen kollektori- eli keräinsilmukan rakenne./36 s. 67/(muokattu)	35
Kuva 13. Yleisin käytössä oleva malli, atsimuutti -elevaatio seuranta käyttävä parabolinen lautanen./37/ (Muokattu).....	37
Kuva 14. Pelkistetty kuva aurinkotornin toiminnasta, jossa auringonsäteet kohdistetaan tornin huipulla olevaan keräimeen./40/.....	39
Kuva 15. Neljä tyypillisintä aurinkotornitekniologiaa. Ylhäällä vasemmalla ulkoinen sylinterikeräin, ylhäällä oikealla litteä keräin, alhaalla vasemmalla volymetrinen sekä oikealla tyhjiökeräin. /43/, /44/, /45/, /46/	42
Kuva 16. Tornin alaosassa olevan keräimen toimintaperiaate, jossa auringonsäteet keskitetään tornin huipulla olevalla sekundäärisellä peilillä alaspäin keskittimeen./35 s. 242/ (muokattu).....	43
Kuva 17. Linearisessa Fresnelin peilirakenteessa pitkät tasomaiset peilit keskittävät auringon säteilyn niiden yläpuolella olevaan keräimeen./49/.....	44

Kuva 18. Kompaktin Lineaarisen Fresnelin peilirakenteen toiminta./51/ (muokattu).....	45
Kuva 19. Lineaarinen fresnel peilirakenne, yhden absorptioputken keräimen toiminta./35 s. 164/ (muokattu).....	46
Kuva 20. Useamman absorptioputken keräinmalli./35 s. 182/ (muokattu).....	46
Kuva 21. Lämmön varastointi tasaa sähkön tuotantoa vuorokauden aikana./35 s. 363/.....	47
Kuva 22. Perinteinen sähköntuotanto ja varastointimalli CSP -voimalaitoksessa käyttäen aktiivista epäsuoraa varastointimenetelmää./52/ (muokattu)	49
Kuva 23. Hyödyntämällä varastointiaineen faasimuutosta, saadaan varastoitua enemmän lämpöä samalla lämpötilaerolla./11 s. 27/ (muokattu)	50
Kuva 24. Aurinkoenergiakapasiteetin kasvu maailmassa vuodesta 2006 - 2016. Kasvutrendi on selkeästi nousujohteinen./55/ (muokattu).....	55

1 JOHDANTO

Lähes kaikki käytetyt energianmuodot perustuvat aurinkoon, ydin- ja geotermistä energiaa lukuun ottamatta. Vesi-, tuuli- ja bioenergiassa, aurinkoenergia kulkee pitkiä matkoja eri välivaiheiden kautta, ennen kuin sitä voidaan hyödyntää sähkönä. Aurinkokennoteknologiaan pohjautuva aurinkoenergia onkin ainoa, jossa auringon energiaa voidaan muuntaa suoraan sähköenergiaksi. Keskittävän aurinkovoiman tuottama lämpö taas siirretään jonkin lämmönsiirtonesteen kautta sähkövoimaa tuottavaan turbiinijärjestelmään.

Tässä työssä käydään läpi näiden kahden aurinkoenergiaa hyödyntävien voimalaitostyyppien perusteknologioita sekä tulevaa kehitystä. Ajatuksena on ollut, että tämä työ on kyseisen aiheen perusasioihin nojautuva sekä sisällöltään opasmainen, asiaan johdatteleva, jolloin lukijalle syntyy vahva peruskäsitys siitä, mitä aurinkoenergiatuotanto ja siinä käytetyt perustekniikat ovat.

2 AURINKOENERGIA

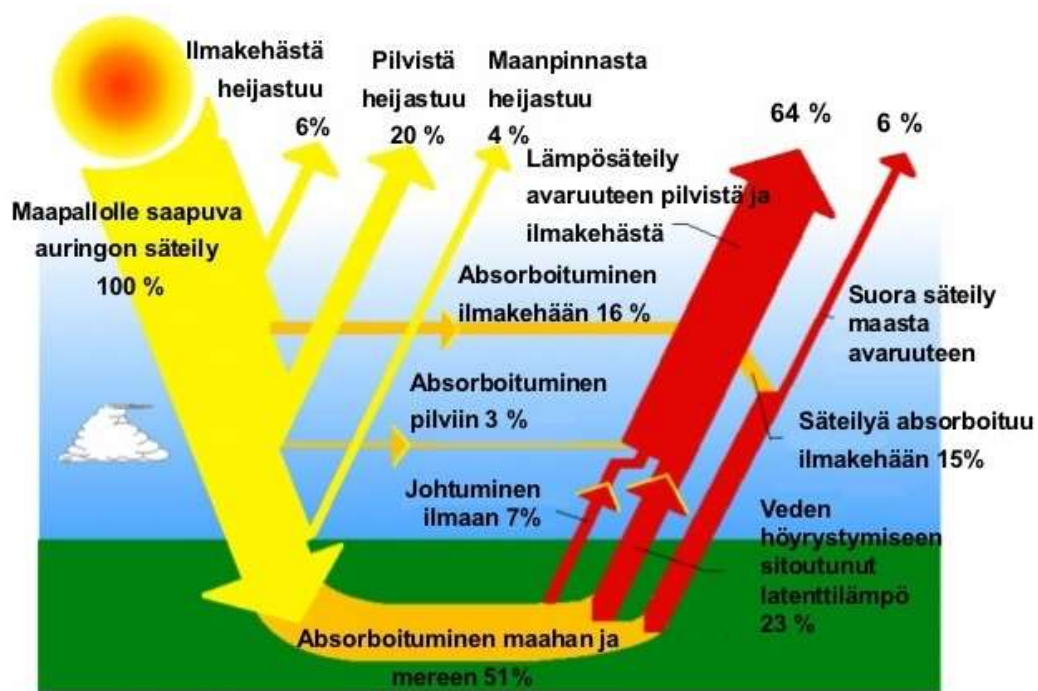
Säteilyenergia, jota auringosta hyödynnetään, on aurinkoenergiaa. Tällä energiamuodolla on paljon etuja, sitä ei voida monopolisoida muutamien valtioiden toimesta, käyttö- ja huoltokustannukset ovat vähäisiä eikä se tuota haitallisia päästöjä tai jätettä. Säteilyenergiaa hyödynnetään tavallisesti aurinkokennojen, aurinkokeräimien tai keskitettävien aurinkovoimaloiden avulla. Aurinkokennoilla muunnetaan Auringon säteilyä sähköenergiaksi valosähköisen ilmiön avulla. Aurinkokeräimillä sekä keskittävillä aurinkovoimaloilla säteily muutetaan käyttökelpoiseksi lämmöksi, joka voidaan hyödyntää sellaisenaan tai muuttaa sähköenergiaksi./1/

2.1 Aurinkoenergian muodostuminen

Aurinko on tähti, joka tiivistyi noin viisi miljardia vuotta sitten tähtienvälisen aineen pilvistä. Sen jäljellä oleva elinikä on arviolta toiset viisi miljardia vuotta. Aurinko on kaasupallo, jonka pintakerroksissa on vetyä (71 %), heliumia (27 %) ja muita aineita (2 %). /2/

Auringon energia tulee fuusiosta eli lämpöydinreaktiosta, kun neljästä vetyatomista muodostuu yksi heliumatomi. Fuusioista yli jäänyt massa muuttuu osittain energiaksi. 13 miljoonan asteen lämpötilassa tapahtuvat fuusiot tuottavat auringolle $3,8 \times 10^{23}$ kW:n kokonaistehon. Tästä säteilee maapallolle $1,7 \times 10^{14}$ kW, joka on 20 000 kertaa enemmän kuin ihmiskunnan tämänhetkinen energiankulutus. /3/

Auringon energia on säteilyn lämpö- ja valoenergiaa. Säteily sisältää koko sähkömagneettisen säteilyn spektrin. Energiasta noin 19 prosenttia imeytyy ilmakehään. Lisäksi pilvet estävät säteilyn pääsyä maahan./3/ K Kuva 2 havainnollistaa auringon säteilyn maahan. Esimerkiksi Suomessa maahan asti pääsee keskimäärin vajaa 200 W/m². /4/ Kaikki maapallolla käytettävä energia, lukuun ottamatta ydinerugia ja geotermistä energiaa, on lähtöisin auringosta./3/



Kuva 1. Maapallolle saapuva auringon säteilyn hajautuminen/63/

Aurinkoenergia on siis auringon säteilemän energian hyödyntämistä sähkö- tai lämpöenergiana aurinkokennon tai aurinkokeräimen avulla. Aurinkoenergia on uusiutuvaa energiaa, jota energiamuotona eivät rasita polttoainekustannukset. Siitä ei myöskään synny hiilidioksidipäästöjä eikä jätteitä, lukuun ottamatta energian sähköksi tai lämmöksi muuttamiseen tai varastointiin tarvittavien laitteiden valmistukseen, huoltoon tai kierrätykseen liittyviä päästöjä. /3/

2.2 Aurinkoenergian historiaa

Aurinkoenergia ei ole aikamme uusi ilmiö vaan sen juuret ulottuvat hyvin kauas historiaan. Perinteisesti aurinkoenergiaa on hyödynnetty muun muassa rakennusten sijoittelulla ja rakennusmateriaalien valinnalla.

Aurinkoenergian keskeisimpiä kehitysvaiheita Finlumon mukaan voidaan pitää seuraavia kohtia.

Renesanssin aikaan Galileo ja hänen aikalaisensa keksivät käyttää aurinkoa ja peilejä tulen aikaansaamiseksi ja näin saatiin tehokas ase polttaa vihollisten laivat ja kaupungit.

Paljon myöhemmin, teollisen vallankumouksen aikaan, syntyi idea aurinkoenergialla toimivista höyrykoneista. Vuonna 1839 ranskalainen Becquerel havaitsi, että elektrolyyttin upotettujen elektrodien välinen jännite riippuu valon määrästä. Tätä havaintoa pidetään yleisesti aurinkoenergian syntymämerkkinä. Ranskalainen matematiikan opettaja Auguste Mouchout kehitti ja patentoi vuonna 1861 ensimmäisen aurinkoenergialla toimivan koneen. Mouchoutin aurinkovoimakoneessa oli kahden ja puolen metrin levyinen peili ja kone pystyi pumppaamaan kaivosta noin 2000 litraa vettä minuutissa. Keskittämällä auringonsäteitä peilien avulla hän sai laitteen toimimaan kuten perinteisen höyrykoneen.

Ensimmäisen käyttöveden lämmitykseen tarkoitetut aurinkolämpöjärjestelmän asensi omalle katolleen ranskalainen Charles Tellier vuonna 1885.

1904 Henry Willsie oli ensimmäinen, joka osasi onnistuneesti varastoida aurinkoenergialla tuotettua sähköä ja käyttää sitä yökäytössä.

1906 – 1914 amerikkalaisen Frank Shumanin yhtiö rakensi siihen asti laajimman ja taloudellisimman aurinkosähköjärjestelmän Egyptiin. Järjestelmässä oli viisi 60 metrin pituista ja 8 metrin levyistä, voimakkaasti heijastavalla materiaalilla päällystettyä aurinkokourua. Voimala tuotti 55 hevosvoiman tehon ja pumppasi Niilin joesta pelloille kasteluvettä 24 000 litraa minuutissa.

Vuonna 1954 teki aurinkopaneelin kehittäminen harppauksen, kun Calvin Fuller, Gerald Pearson ja Daryl Chaplin keksivät käyttää piitä (Si) puolijohteena. Keksinnön avulla pystyttiin rakentamaan aurinkosähköpaneeli, jonka hyötysuhde oli 6 prosenttia.

Vuonna 1956 esiteltiin ensimmäinen kaupalliseen käyttöön suunniteltu aurinkokenno. Aurinkokennon hinta oli 300 dollaria watile ja sitä käytettiin radioissa ja leluissa.

Vuonna 1958 laukaistiin ensimmäinen satelliitti, joka käytti aurinkoenergiaa sähköntuotantoon. 60-luvulla käytettiin avaruusohjelmissa useita aurinkoenergiateknologioita. 70-luvun energiakriisi johti uusien energialähteiden etsimiseen ja aurinkosähköpaneelien hinta putosi noin 20 dollariin tuotettua wattia kohti./5/

Toisen maailmansodan jälkeen aina 70-luvun öljykriisiin asti öljy nousi tärkeimmäksi energian tuotantotavaksi ja aurinkosähkön kehitys jäi taka-alalle. Energiakriisi kuitenkin herätti uudelleen kiinnostuksen uusiutuviin energianmuotoihin.

Vuonna 1983 maailmanlaajuinen aurinkosähkön tuotantokapasiteetti ylitti 21,3 MW. Aurinkosähkön myynti ylitti tuona vuonna 250 miljoonaa dollarin rajan. Aurinkoteknologia on kehittynyt huimasti 1990- ja 2000-luvuilla./5/

Intiassa saavutettiin huomattava merkkipaalu vuonna 2016, kun aurinkokennoilla tuotetun sähkön hinta laski ensimmäistä kertaa kivihieillä tuotetun sähkön hinnan alapuolelle. Huhtikuussa 2016 aurinkosähkön hinta oli 33 €/MWh ja kivihieillä tuotetun sähkön hinta oli 38 €/MWh. /6/

3 AURINKOENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN

Aurinkoenergia on uusiutuvaa energiaa ilman polttoainekustannuksia ja joka ei tuota primäärisiä hiilidioksidipäästöjä tai jätteitä.

Pääsyyt aurinkoenergian, kuten muidenkin uusiutuvien energiamuotojen kasvun lisääntymiseen, ovat kasvavat CO₂- ja muut kasvihuonekaasupäästöt maailmanlaajuisesti. Nostamalla fossiilisten polttoaineiden hintoja ja tarpeella vähentää fossiilisten polttoaineiden kulutusta, lisätään painetta ottaa enemmän uusiutuvia teknologioita käyttöön. /7/

3.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelin peruskomponentin muodostavat puolijohdetekniikalla valmistetut aurinkokennot. Puolijohdemateriaalit ovat normaalisti eristäviä, mutta alkavat johtaa sähköä, kun niihin osuu energiaa./8/ Materiaalin eristävyys tarkoittaa materiaalin suurta resistiivisyyttä ja vastaavasti alhaista sähkönjohtavuutta.

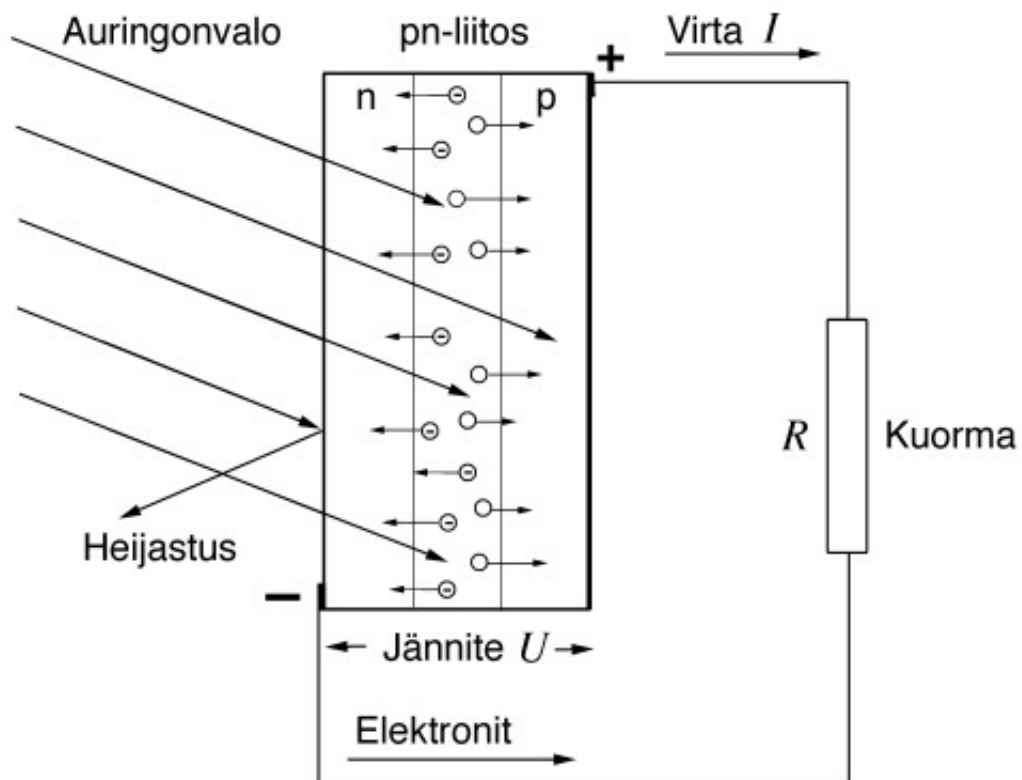
Tässä tapauksessa energiana on auringon säteily. Aurinkokenno on puolijohdekomponentti, jolla auringon säteily muunnetaan sähköenergiaksi valosähköisen ilmiön avulla. Valosähköisessä ilmiössä puolijohteen elektronit saavat niin paljon energiaa sähkömagneettisesta säteilystä, että ne irtautuvat atomiytimen vetovoimasta. /8/

Aurinkopaneelien käyttöä on hidastanut niiden korkea hinta, kuitenkin kehityksen trendinä on ollut kustannuksien aleneminen, hyötysuhteen paraneminen ja materiaalien kehitys. Aurinkokennojen valmistuskustannukset alenevat 2–4 prosenttia vuosittain teknisen kehitystyön ja suurtuotannon etujen ansiosta. /9/

Tärkein aurinkokennoissa käytetty puolijohdemateriaali on pii, koska sen hyötysuhde ja saatavuus ovat hyvät. /8/ Aurinkokennoja kohtaan osoitettu kritiikki kohdistuu useimmiten pieneen hyötysuhteeseen ja valmistuksesta aiheutuviin

päästöihin. Valmistuksesta aiheutuvat päästöt ovat yhä melko korkeita, mutta tekniikan edelleen kehittyessä päästöt pienenevät. /10/

Aurinkokennojen hyötysuhde riippuu kennon valmistusmateriaalien ja -tekniikoiden lisäksi osittain kennoon tulevan säteilyn spektristä. Osa säteilystä heijastuu jo kennon pinnasta, minkä merkitystä pyritään vähentämään valitsemalla mahdollisimman vähän heijastava materiaali kennon pintaan. Myös säteilyn absorboituminen pintakerrokseen heikentää hyötysuhdetta, minkä merkitys vähenee sopivilla materiaalivalinnoilla. /10/



Kuva 2. Aurinkopaneelin toimintaperiaate /10/

Auringon säteilyn ajatellaan koostuvan pienistä massattomista hiukkasista, fotoneista, jotka sisältävät tietyn määrän energiaa. Kuva 2 esitetään kuinka aurinkokennoissa fotonit absorboituvat p-tyyppin puolijohteeseen vapauttaen elektroneja valosähköisessä ilmiössä, kuljettuaan ensin n-tyyppin kerroksen ja n/p-liitoksen läpi. Tästä tulee nimitys pn-liitokselle. /9/

Hyötysuhteen maksimoimiseksi pyritään säätämään p-tyypin materiaalin ominaisuudet siten, että suurin osa elektroneista vapautuu mahdollisimman lähellä liitosta, jotta sähkökenttä kykenisi auttamaan elektroneita kennon yläosan läpi ulkoiseen piiriin. Luonnollisesti fotonien absorptio pyritään saamaan mahdollisimman suureksi, ja siten vapauttamaan mahdollisimman paljon elektroneja. Ja kaiken lisäksi elektronien yhtyminen aukkojen kanssa on estettävä mahdollisimman tehokkaasti. Näiden vaatimusten toteuttamiseksi äärimmäisen puhtaaseen puolijohdeteraaka-aineeseen lisätään tarkasti määriteltyihin paikkoihin epäpuhtauksia eli muita atomeja. Pinnasta tapahtuvia heijastuksia vähennetään ainakin kahdella eri tavalla: peittämällä pinta monella kerroksella sopivaa materiaalia esimerkiksi piimonoksidia tai käsittelemällä kennon pinta kemikaalein sellaiseksi, että se heijastaa pintaheijastukset takaisin kennon./9/

3.2 Keskittävä aurinkovoima

Auringon säteilyä on keskitetty eri tarkoituksissa jo satoja vuosia, mutta ensimmäiset kaupalliset sähköntuotantoon tarkoitetut voimalaitokset rakennettiin vasta 1980-luvulla Yhdysvalloissa. 1990-luvulla öljyn ja kaasun hintojen pudotukset vähensivät kiinnostusta keskittävään aurinkovoimaan eikä uusia voimalaitoksia rakennettu. Kiinnostus heräsi uudelleen 2000-luvulla ja uusien laitoksien rakentaminen alkoi 2006. Aiemmin lähes kaikki keskittävän aurinkovoiman voimalaitokset oli rakennettu Yhdysvaltoihin ja Espanjaan, mutta nykyään voimalaitoksia on rakennettu ja suunniteltu myös Kiinassa, Intiassa, Chilessä, Etelä-Afrikassa, Marokossa ja Lähi-idän ja Pohjois-Afrikan alueella.
/11/

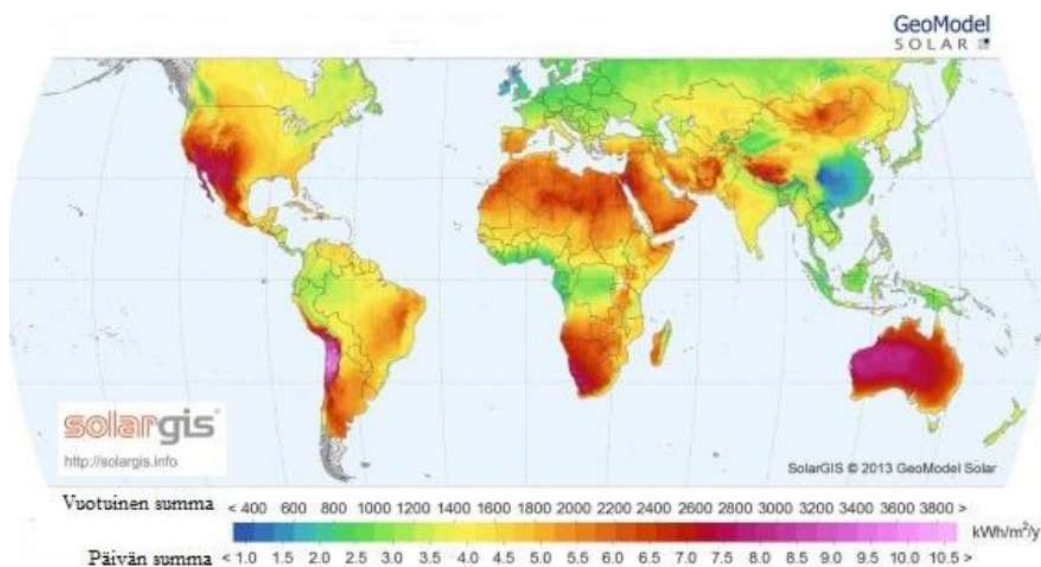
Keskittävän aurinkovoimateknologian (CSP, Concentrating Solar Power). kehitys on vielä varhaisessa vaiheessa, ja investointien sekä sähköntuotannon kustannukset (LCOE, Levelized Cost of Energy, tasoitetut energiantuotantokustannukset) ovat korkeat verrattuna perinteisiin voimalaitoksiin ja muihin uusiutuviin teknologioihin. Kustannusten odotetaan laskevan jo lähitulevaisuudessa kysynnän kasvaessa, uudemman tekniikan tullessa käyttöön,

parempien valmistustapojen ja menetelmien sekä suorituskyvyn kasvun vuoksi./11/

Kokonais-hyötysuhde koostuu monesta eri osasta, joita ovat keräimen optinen hyötysuhde, lämpöhäviöiden määrä keräimessä, siirtoputkissa ja lämmönsiirtimissä, lämmön varastoinnin hyötysuhde ja kiertoprosessin terminen hyötysuhde. Hyötysuhteeseen vaikuttaa myös laitoksen mitoitus. Laitos voidaan mitoittaa joko korkealle tai matalalle DNI-arvolle (DNI, Direct Normal Irradiation, auringon suora säteily). Pienelle arvolle mitoittaessa peilikentästä tulee todella iso, jolloin investointikustannus kasvaa eikä kaikkea tuotettua lämpöä voida käyttää hyväksi. Suurelle DNI-arvolle mitoittaessa laitos toimii usein osakuormalla, mikä huonontaa hyötysuhdetta./7/

Järjestelmät perustuvat CSP-teknologiaa hyödyntävään auringon suoraan säteilyyn. Tyypillisesti 2,000 kWh auringonvalon säteilyä neliometriä kohden vuodessa käytetään raja-arvona arvioitaessa soveltuvuutta tietyn alueen CSP-tuotantoon. Keskittävän aurinkovoiman rakentamista rajoittavia tekijöitä ovat vaatimukset korkeasta suoran säteilyn määrästä (DNI) ja laajoista tasaisista alueista sekä taloudellinen ja poliittinen epävarmuus korkean DNI:n alueilla. CSP-voimalaitoksissa auringon säteilystä voidaan hyödyntää vain suoran säteilyn osuus toisin kuin aurinkokennoissa, joissa myös hajasäteilyä voidaan hyödyntää./11/

Korkean DNI:n lisäksi hyvillä rakennusalueilla sataa tai on pilvistä harvoin ja asutus on vähäistä. Tämä tarkoittaa yleensä laajoja aavikkoalueita, joille on mahdollista rakentaa suuren kokoluokan CSP-voimalaitoksia. Aavikko-olosuhteet aiheuttavat myös ongelmia. Vettä tarvitaan jäähdyttämiseen ja peilien pesemiseen, mutta sitä on yleensä niukasti saatavilla. Aavikoiden hiekka kertyy peilien pinnoille ja voi myös naarmuttaa niitä heikentäen niiden optista hyötysuhdetta.
/11/



Kuva 3. Suoran säteilyn (DNI) määrät maailmassa pitkän aikavälin keskiarvona/64/

Kuvassa 3, nähdään sopivimmat alueet CSP-tekniikan käyttöön, joita ovat aurikovyöhykealueet Etelä-Euroopassa, Pohjois-Afrikassa, Lähi-idässä, osassa Intiasta, Kiinassa, Etelä-USA:ssa, Pohjois-Chilessä ja Australiassa. Parhaat alueet vastaanottavat DNItä voimakkuudeltaan yli 2800 kWh / m². Paras potentiaali CSP-tekniikan käyttöön maailmassa, suhteessa DNI:n, ovat aavikot Etelä-Afrikassa ja Chilessä, joissa vuotuinen DNI voi saavuttaa lähes 3000 kWh / m². /7/

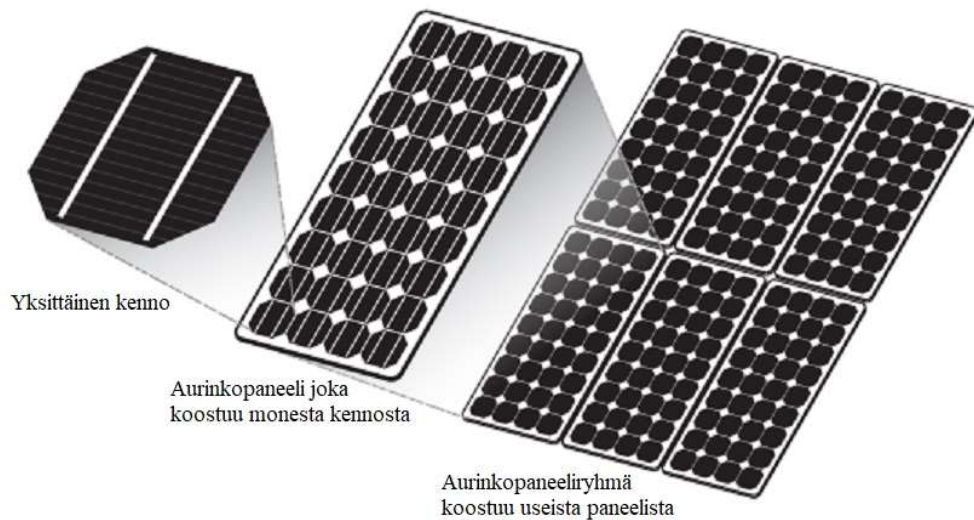
Alueellisten vaatimusten täytyessä, täytyy CSP-voimalaitoksen rakentamiselle löytyä vielä taloudellista ja poliittista tukea. CSP-laitosten investointikustannus on suuri ja se muodostaakin suurimman osan voimalaitoksen kokonaiskustannuksista. Suuri investointikustannus on sijoittajalle riski, jota ei kannata ottaa, jos kohdevaltio ei tue keskittävän aurinkovoiman rakentamista. CSP-kapasiteetti on kasvanut nopeasti maissa kuten esimerkiksi Algeria, Egypti, USA, Kiina ja Intia, joissa valtio tukee aurinkovoimaa syöttötariffeilla, verohelpotuksilla ja valtionavulla pääomakustannuksia. Tämä on tärkeää, jotta keskittävän aurinkovoiman kustannukset ja sillä tuotetun energian hinta alenee. /11/

4 AURINKOPANEELIT

Aurinkokennoja on pääosin kolmea eri tyyppiä: Ensimmäisen sukupolven aurinkokennoja, jotka perustuvat piiaurinkokennoihin, toisen sukupolven ohutkalvoteknologiaan perustuvia aurinkokennoja sekä kolmannen sukupolven nanotekniikkaan perustuvia aurinkokennoja.

4.1 Aurinkokennojen tekniset ratkaisut

Kaikissa erikokoisissa PV-voimaloissa (PV, Photo Voltaic, Aurinkosähkö) on samoja rakenteita: PV-paneelit, asennustelineet, invertterit, kaapeloinnit sekä mahdolliset akustot. PV-paneelit ovat yleensä rakennettu seinään, kattoon tai maahan ankkuroituun alumiiniseen kehykseen, missä on taustalevyn ja karkaistun lasilevyn välissä aurinkokennoja ja johtimia sarjassa./12/ Kuva 4 esitetään kuinka yksittäinen kenno on osana aurinkopaneelia ja paneelijärjestelmää.



Kuva 4. Yksittäinen PV-kenno, PV-paneeli sekä ryhmä paneeleja, jotka muodostavat aurinkosähköjärjestelmän /13/

Paneelin tuottama teho riippuu monesta tekijästä. Tärkeimmät niistä ovat auringon säteilyn voimakkuus ja kennon lämpötila. Paneelin hyötysuhteeseen vaikuttaa mm. kennoissa käytetty materiaali ja kennojen lukumäärä. Yleisin kennomateriaali on ollut yksi- tai monikiteinen pii. Lisäksi viimevuosina osuutta on jonkin verran kasvattanut ohutkalvo-pohjainen teknologia. Hyötysuhde PV-paneeleilla on ollut jo usean vuoden ajan 12 – 15 % luokkaa ja hyötysuhteen kasvattaminen on edelleen yksi keskeisiä tavoitteita PV-paneelien valmistajilla. /12/

Sähköjärjestelmärakenne voidaan toteuttaa joko keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetyssä ratkaisussa aurinkopaneelirivit eli stringit koonneet kenttäkotelot yhdistyvät kaikki yhdelle, joissain tapauksissa myös muutamalle, satojen kilowattien vaihtosuuntaajalle eli invertterille. Hajautetussa ratkaisussa jokainen kenttäkotelo yhdistyy omalle muutamana kymmenen kilowatin invertterilleen. /14/

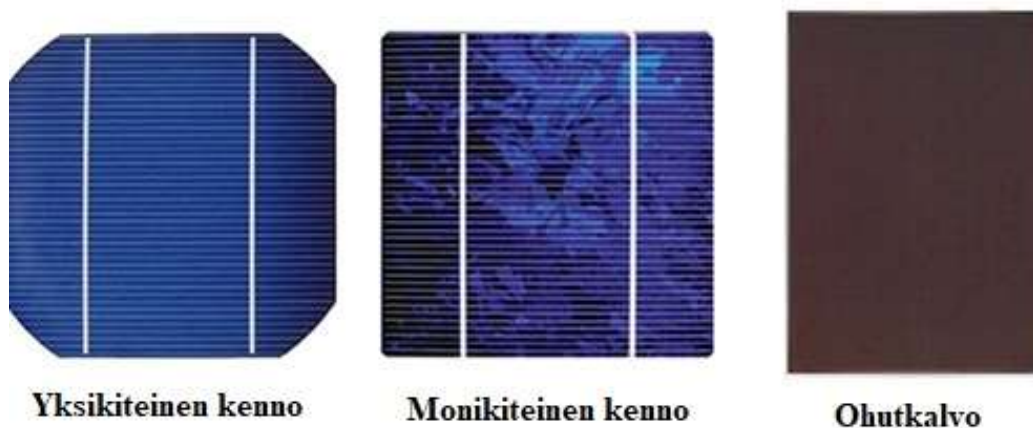
4.1.1 Ensimmäisen sukupolven kennot

Ensimmäisen sukupolven kennoihin kuuluva yksikiteinen aurinkokenno valmistetaan jalostamalla luonnossa esiintyvää piitä. Piikide kasvatetaan tankomuotoon siten että kiderakenteen atomit ovat tietyssä järjestyksessä. Piitangosta sahataan piikiekkoja, joiden paksuus on noin 0,2 mm. Pyöreistä kiekkoista leikataan palat pois, jotta aktiivinen pinta-ala aurinkopaneelissa saadaan suuremmaksi. Koska raaka-aine on hyvin kallista, pyöreistä kiekkoista ei kannata tehdä neliskulmaisia. Tämän vuoksi yksikidepaneelissa on aukot kennojen kulmissa. Yksikiteisen aurinkokennon tunnistaa pyöristetyistä reunoista ja tummansinisestä, tasaisesta väristä. Yksikiteinen piikkenno on kallis, koska valmistustapa on hidas ja vaatii huolellista työtä. Raaka-aineen tulee olla erittäin puhdasta ja sen valmistus on teknisesti haastavaa, joten tuotantokustannukset ovat suhteellisen suuret. Yksikiteisen piikennon hyvänä puolena on korkeampi hyötysuhde./8/

Monikiteinen aurinkokenno, joka on myös ensimmäisen sukupolven tekniikkaa, on teknisiltä ominaisuuksiltaan hyvinkin samanlainen kuin yksikiteinen kenno. Monikiteinen piikkenno on kuitenkin edullisempi, sillä se ei vaadi yhtä huolellista valmistusprosessia. Monikiteisen paneelin kennot valmistetaan sulattamalla joukko erilaisia piin sirpaleita yhdeksi palkiksi ja leikkaamalla siitä kennoihin tulevia levyjä. Nimensä mukaisesti näissä kiekkoissa on useita kiderakenteita ja täten kiderajoja. Monikiteisyys vähentää valmistuskustannuksia, mutta heikentää hyötysuhdetta. Valmistajasta ja mallista riippuen monikiteisten paneelien hyötysuhde on alle 20 %. Kuva 5 on nähtävissä ensimmäisen ja toisen sukupolven kennojen tyypilliset värit ja tunnusomaiset muodot. /15 s. 69/

4.1.2 Toisen sukupolven kennot

Toisen sukupolven aurinkokennotekniikkaa oleva ohutkalvokenno eli amorfisen piin kenno koostuu piistä, joka on kristallisen rakenteen sijasta amorfisessa muodossa. Ohutkalvokennot ovat hyötysuhteeltaan heikompia, tyypillisesti 6 – 8 % auringonvalosta saadaan sähköksi, mutta niiden tuotto osittaisen varjostuksen alla on parempaa verrattuna kidekennoihin. Myös se että ohutkalvokennot ovat edullisempia valmistaa, ja että ne voidaan muokata kidekennoja helpommin erilaisiin muotoihin, antaa hyvin erilaisia mahdollisuuksia tekniikan sovelluksille. Ohutkalvokennoja tarvitaan pinta-alaltaan enemmän tuottamaan yksi- tai monikiteisiä paneeleja vastaava teho, joten tästä aiheutuvat rakennuskulut voivat mitätöidä edut, jotka saavutetaan alentuneista tuotantokustannuksista./15 s. 67/ Ohutkalvokennot voidaan valmistaa monista eri materiaaleista, kuten amorfisesta piistä (a-Si), kadmium-telluridista (CdTe) tai kupari-indium-diselenidista (CIS)./16/



Kuva 5. Yleisimmin käytetyt aurinkokennotyyppit/17/

4.1.3 Kolmannen sukupolven kennot

Kolmannen sukupolven aurinkokennot ovat vielä tutkimusasteella. Esimerkkinä voidaan mainita nanokidekennot (joita kutsutaan myös väriaineherkistetyiksi aurinkokennoiksi tai Grätzel-kennoiksi). /18/ Ohutkalvotekniikkaa hyödyntävien aurinkokennojen ohut rakenne, mikä on 10 – 100 kertaa pienempi kuin piipohjaisten aurinkokennojen rakenne, mahdollistaa raaka-aineiden vähäisemmän käytön ja sen vuoksi myös valmistuskustannukset ovat alhaisemmat. Lisäksi ohutkalvotekniikkaan perustuvista aurinkokennoista on rakenteellisesti mahdollista tehdä taipuisia, mikä laajentaa ohutkalvotekniikkaa hyödyntävien aurinkokennojen käyttömahdollisuuksia. Ohutkalvotekniikkaa hyödyntävien aurinkokennojen valmistuksessa on mahdollisuus käyttää edullisempia valmistustekniikoita verrattuna ensimmäisen sukupolven piikennopaneeleihin. Ohutkalvokennoissa käytetty kennomateriaali on amorfista piitä, kupari-indiumdiselenidiä, titaanioksidia, kadmiumtelluuria tai galliumarseniidiä./19/

Nanokidekennoissa ei ole pn-liitoksen aikaansaamaa sähkökenttää, vaan elektronien liike perustuu kemiallisiin reaktioihin. Kenno koostuu nanokokoisista hiukkasista, jotka on pinnoitettu säteilyä absorboivilla väriainehiukkasilla ja käsitelty elektrolyyttiliuoksella. Kun säteily saavuttaa väriainehiukkaset, kennolla

vapautuu elektroneja, jotka kulkeutuvat puolijohtavalta titaanidioksidikerrokselta ulkoiseen virtapiiriin./20/

Grätzelin kennot ovat osittain luonnon jäljittelyä. Grätzelin kennojen toimintaperiaate mukailee fotosynteesiä, vaikka perusperiaatteesta löytyy yhtymäkohtia myös perinteisiin piikkenoihin. Kasveissa valo imeytyy lehtivihreähiukkasiin ja muuttuu niissä hiilidioksidia ja vettä hapeksi ja glukoosiksi, kasvin energiaksi. Grätzelin kennossa lehden rakenne on korvattu huokoisen titaanioksidin nanohiukkasrakenteella ja lehtivihreä nanohiukkasrakenteen päälle kiinnittyneillä väriainemolekyyleillä. /18/

4.2 Aurinkokennon sähköntuotanto

Erilaisilla aurinkokennojen kytkennöillä saadaan muodostettua halutun suuruinen jännite ja virta. Aurinkopaneelin jännite on sarjaan kytkettyjen aurinkokennojen jännitteiden summa. Rinnan kytkennässä muodostuva kokonaisvirta on rinnan kytkettyjen kennojen yhteenlaskettu virta. Aurinkopaneelit tuottavat tasasähköä, kun taas sähköverkoissa virtaa vaihtosähkö. /21/

Sähköverkon haltijan tehtävä on toimittaa laadukasta sähköä asiakkailleen, joten sähkön laadunhallinta on erittäin tärkeää. Liitettäessä aurinkosähköjärjestelmää sähköverkkoon, on varmistettava järjestelmän turvallisuus ja se, ettei järjestelmä aiheuta häiriöitä jakeluverkkoon. Häiriöitä voivat olla esimerkiksi jännitteen muutokset, harmoniset yliaallot sekä verkkojännitteen muutokset. /22/ Sähkön syöttäminen verkkoon vaatii siis invertterin, joka muuttaa tasasähköä vaihtosähköksi ja syöttökelpoiseksi verkkoon. /21/

Esimerkiksi Suomessa Energiateollisuuden antama suositus verkkoon kytkettävistä sähköntuotankojärjestelmistä sanoo, että aurinkosähköjärjestelmä, joka rinnastetaan normaaliksi sähköntuotantolaitokseksi, ei saa aiheuttaa häiriöitä verkkoon eikä muihin verkon sähköasennuksiin. Järjestelmän vikaantuessa tulee laitoksen suojalaitteiden irrottaa aurinkosähköjärjestelmä verkosta ja rajoittaa vika pelkästään aurinkovoimalaan, ennen kuin jakeluverkon omat suojalaitteet

irrottavat koko verkonosan jännitteettömäksi. Aurinkosähköjärjestelmän haltija on vastuussa laitteiston tuottaman sähkön aiheuttamista vahingoista muille sähköverkon käyttäjille. Aurinkosähköjärjestelmän suojauksia määriteltäessä tulee ottaa jakeluverkon vaatimukset ja suojausperiaatteet huomioon. Tarvittaessa suojaukset tulee suunnitella yhteistyössä paikallisen jakeluverkkoyhtiön kanssa. /23/

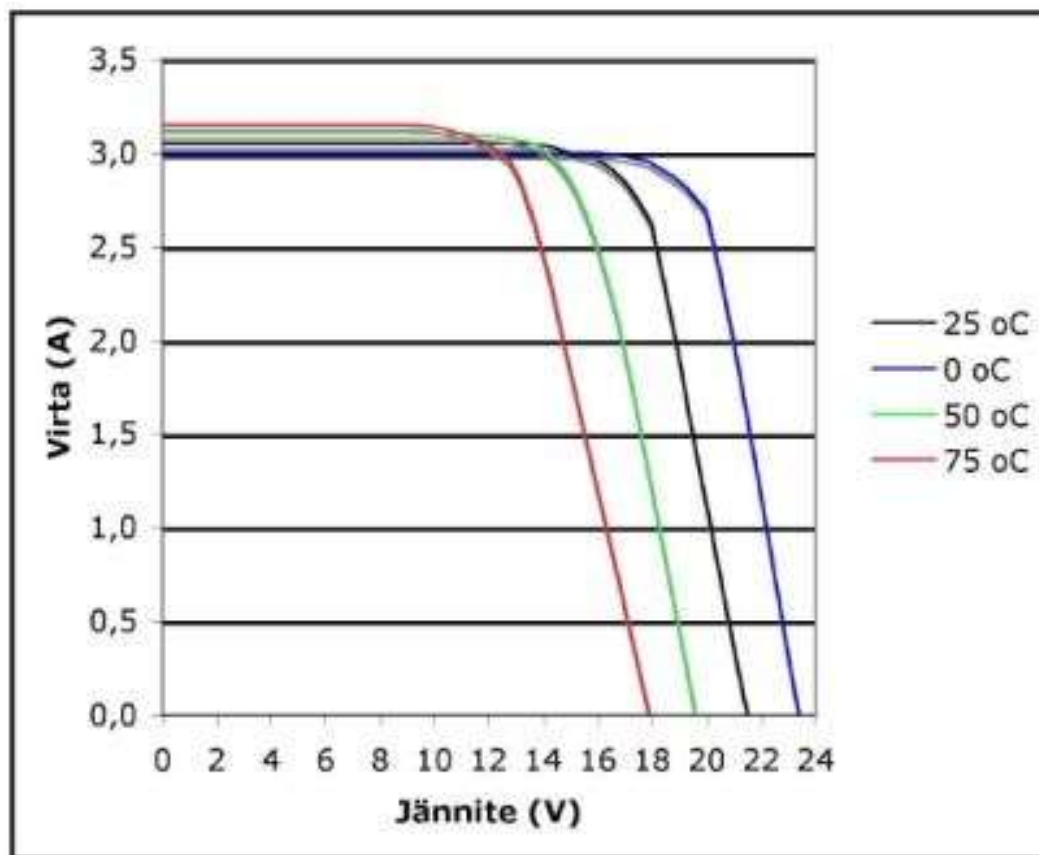
Myös verkon vikavirtataso on otettava huomioon järjestelmää suunnitellessa, sillä yksi tuotantolaitokseen kokoon vaikuttava tekijä on juuri verkon vikavirtataso. Aurinkosähköjärjestelmän aiheuttama oikosulkuvirtojen lisäys ei saa kasvattaa verkon oikosulkuvirtoja yli mittausarvojen. Vikavirran laukaisu tapahtuu yleensä nopeasti aurinkosähköjärjestelmissä, joten ongelmat ovat pienemmät kuin generaattorin välityksellä verkkoon kytketyissä voimaloissa. /24/

Aurinkokennon sähköntuottoon vaikuttavia tekijöitä ovat kennon ja käyttötilanteen lämpötila, säteilyn intensiteetti, paneelin sijainti ja käyttöympäristö sekä paneelin suuntaus. Näistä tarkemmin seuraavien alaotsikoiden mukana.

4.2.1 Lämpötila

Lämpötilan noustessa kennon tuottama jännite laskee ja vastaavasti virta kasvaa. Jännitteen lasku on kuitenkin suurempaa kuin virran kasvu ja näin ollen kennon tuottama teho pienenee. Paneelien suorituskyky ilmoitetaan tyypillisesti 25 °C lämpötilassa. Kennomateriaaleille on tyypillistä, että tehon tuotto heikkenee, jos

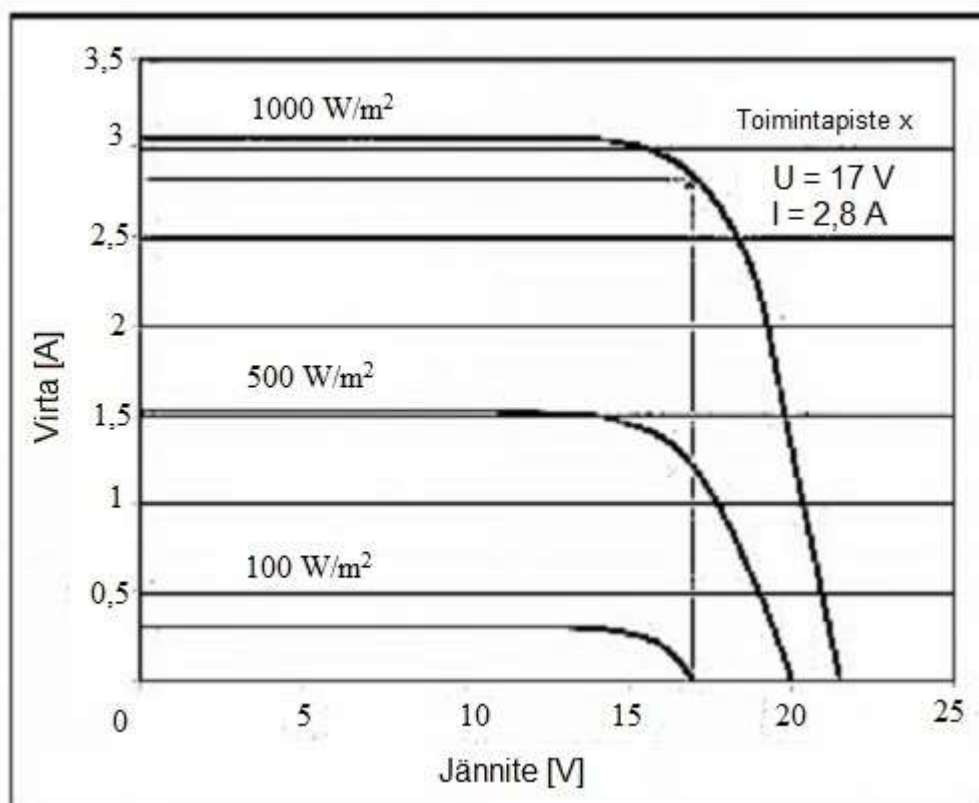
kennojen toimintälämpötila kohoaa yli 25 °C. (Kuva 6)./25/



Kuva 6. Lämpötilan vaikutus kennon jännitteeseen ja virtaan./25 s. 37/

4.2.2 Säteilyn intensiteetti

Aurinkopaneelien tehon tuottoon vaikuttaa paneeliin osuvan säteilyn intensiteetti. Säteilyintensiteetin muutos vaikuttaa erityisesti aurinkopaneelin kykyyn tuottaa virtaa. Säteilyn intensiteetin puolittuminen puolittaa myös paneelin tuottaman virran. Intensiteetin puolittuminen ei vaikuta paneelin jännitteeseen yhtä paljon (Kuva 7)./25/



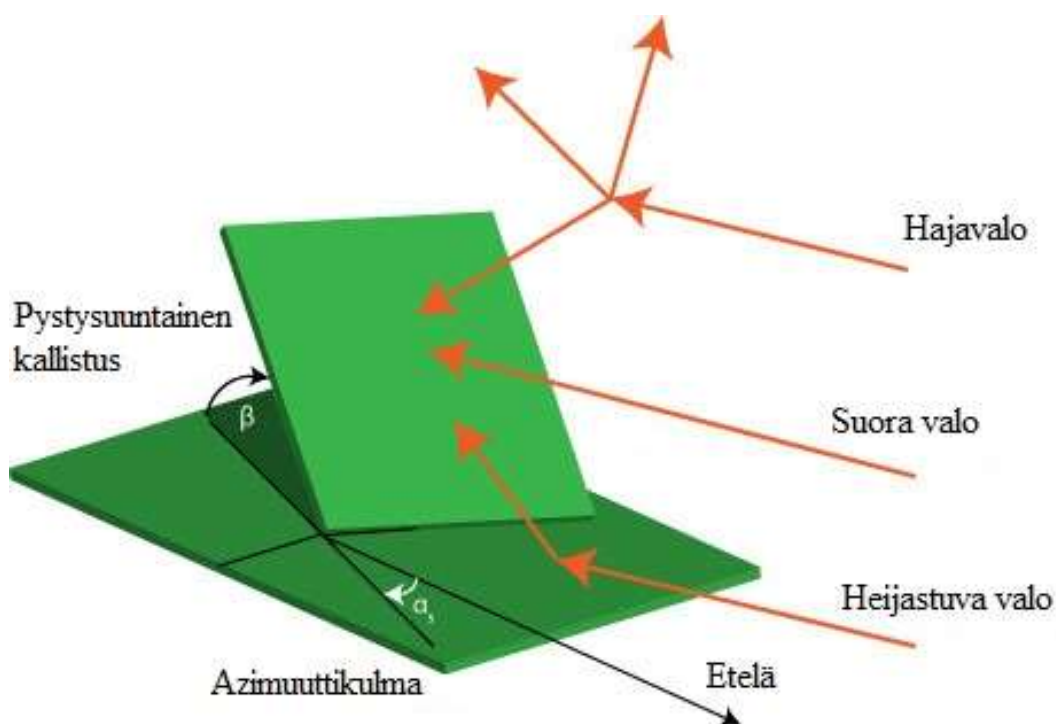
Kuva 7. Auringon säteilyn vaikutus paneelin tuottamaan jännitteeseen ja virtaan. (muokattu)/25 s. 38/

4.2.3 Sijainti ja käyttöympäristö

Paneeliin osuvan säteilyn määrään ja toimintalämpötilaan vaikuttaa olennaisesti paneelin sijainti ja käyttöympäristö. Aurinkokennovoimalan tehon tuotannon kannalta otollisin sää on kirkas ja kylmä. Aurinkopaneelien valmistusmateriaalista riippuu, miten niiden toiminta muuttuu eri käyttölämpötiloissa. Myös erilaisista lähteistä peräisin olevat varjot heikentää aurinkokennon sähkötehon tuottoa merkittävästi. Aurinkovoimalalle voi hetkellistä tai pysyvää varjostusta tuottaa esimerkiksi pilvet, fyysiset esteet kuten puut, ilman epäpuhtaudet ja paneelien pinnalle kertynyt pöly, lika tai lumi. Isoissa monirivisissä paneelientissä myös toiset paneelit voivat aiheuttaa varjostuksia, ellei sitä ole huomioitu tilan käytössä jo suunnitteluvaiheessa./25/

4.2.4 Kennojen optimaalinen suuntaus

Aurinkokennojen optimaalisella suuntauksella aurinkoon nähden on vaikutusta aurinkojärjestelmästä saatavaan sähkötehoon. Auringon säteily aurinkopaneeliin voi tulla suorana tai hajasäteilynä sironnan ja heijastuksien kautta. (Kuva 8) Aurinkokennojen tulisi olla aurinkoon nähden vähintäänkin sellaisessa kulmassa, ettei valon kokonaisheijastumista pääse tapahtumaan. Aurinkoa seuraavissa järjestelmissä on mahdollista kohdistaa kennot auringon vuotuisen kierron mukaan sekä myös päivittäisen kierron mukaan./25/



Kuva 8. Aurinkokennoon tulevan auringon säteilyn erilaisia tulokulmia /26/

Optimaalista kallistuskulmaa voidaan tavoitella joko automaattisilla tai muilla ratkaisuilla, jos käytävissä on siihen soveltuva aurinkoseuraajalaitteisto (tracker). Laitteisto voi seurata auringon optimaalisen aseman muutosta aurinkopaneeliin yhdessä tai kahdessa ulottuvuudessa. Auringon vuosittaista kiertoa voi seurata etelä-pohjoissuuntaisesti ja aamu-iltapäivänkiertoa itä-länsisuuntaisesti. Tarkemmalla kallistuskulman optimoinnilla saavutetaan parempi vuosittainen energian tuotto, mutta investointikustannukset kasvavat ja järjestelmän toiminnallisuus tulee monimutkaisemmaksi. Järjestelmän toiminnan

vikaantumisriski kasvaa erityisesti kylmään aikaan kääntymismekanismien mahdollisen jäätyksen vuoksi. /25/

4.3 Aurinkosähkön varastointi

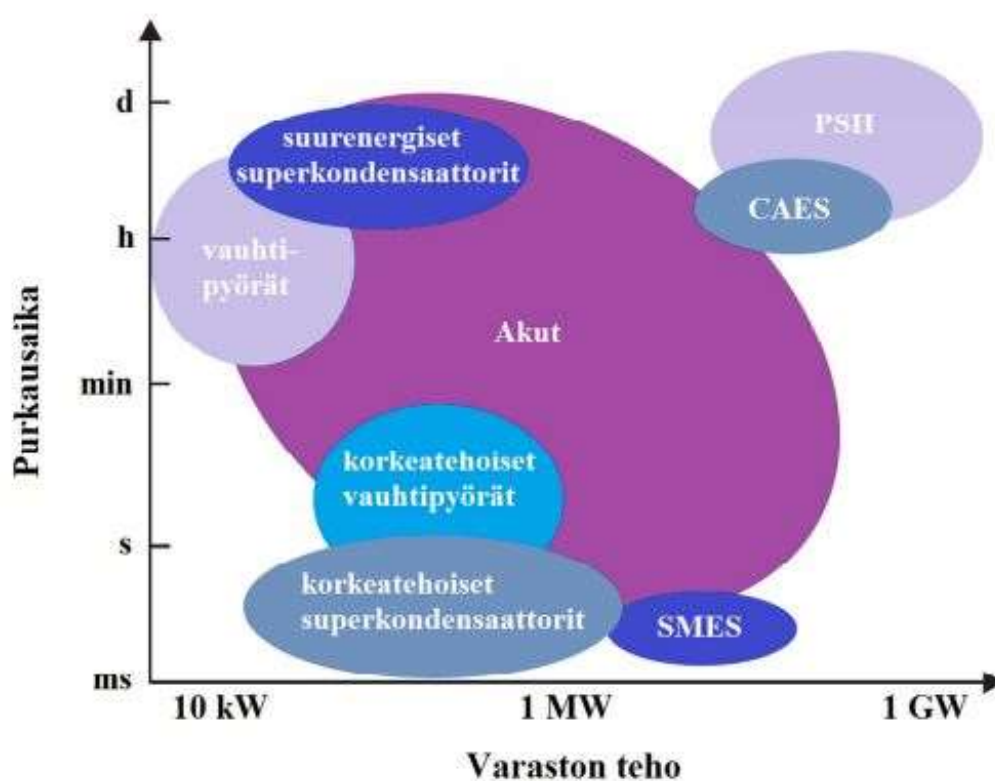
Sähköenergian varastointi myöhempää kulutusta varten on ollut haasteellista. Se on kallista ja joissain tapauksissa tarpeetonta, mutta kehittyvän varastointiteknologian myötä näyttää, että se olisi mahdollisesti ratkaistavissa. Aurinkovoimaloissa sähkövarasto voi kuitenkin auttaa tuotannon tasaamisessa ja toimia sen varavoimana silloin kun tuotannossa on häiriöitä esimerkiksi pilvisyyden takia.

Sähköenergian pienimuotoinen varastointi akkuihin on arkipäivää. Esimerkiksi kännyköissä on akku, joka kestää pari päivää, autoissa on akku, jolla moottori saadaan käyntiin. Kännykän akussa on energiaa muutaman wattitunnin verran, normaalissa auton akussa on energiaa korkeintaan yhden kilowattitunnin verran. Sähköauton akussa on energiaa tyypillisesti 20 – 30 kilowattituntia. /27/

Jos aurinkosähkön päivittäisiä vaihteluita halutaan tasoittaa sähköenergian varastoinnilla, energiaa pitää varastoida suuria määriä – tuhansia kilowattitunteja eli megawattitunteja. Tällä hetkellä tällainen varastointi on hyvin haasteellista. Vielä haasteellisempaa olisi tasoittaa vuotuisia sähkönkulutuksen vaihteluja varastoimalla sähköä. /27/

Maailmalla on jonkin verran käytössä ns. pumppuvoimalaitoksia. Ne ovat vesivoimalaitoksia, jotka toimivat suuren kulutuksen aikana normaalina vesivoimalaitoksena, mutta pienen kulutuksen aikana vesi pumpataan takaisin vesivoimalaitoksen ylä-altaaseen. Tällainen voimalaitos on kallis rakentaa ja se edellyttää isoa putouskorkeutta, ylä-allas voi olla esimerkiksi vuoristorajärvi. Tällaisen vuoristorajärven voimakas pinnankorkeuden vaihtelu aiheuttaa myös ympäristöongelmia. /27/

Sähkön varastointitekniikat voidaan jakaa toimintaperiaatteensa mukaan mekaanisiin, sähkökemiallisiin, kemiallisiin ja sähköisiin varastoteknologioihin. Mekaanisia varastoja ovat pumppuvoimalaitos (PSH), paineilmaparasto (CAES) ja vauhtipyörä. Sähkökemiallisiin varastoihin voidaan lukea erilaiset akut. Kemiallisia varastoja edustavat vetyvarastot. Suprajohtavan magneettisen energian varasto (SMES) ja superkondensaattorit ovat sähköisiä varastoteknologioita./28/ Kuva 9 on havainnollistettu erilaisten akkuteknologioiden tyypilliset purkausajat ja tehot.



Kuva 9. Sähkön varastointitekniikoiden purkausajat ja tehot./28/

Sähkön varastointitekniikoiden kehittäminen jatkuvasti ja taloudellinen sekä tieteellinen panostus on kasvanut ja kasvaa edelleen voimakkaasti. Joitain suuria akkuja on jo käytössä, mutta niiden rakentaminen on kallista ja niihin kuluu harvinaisia maametalleja kuten litiumia. On myös esitetty, että lataukseen kytettyjä sähköautojen akkuja voitaisiin käyttää tilapäisenä energiavarastona

lataamalla niitä matalan kuormituksen aikana ja syöttämällä tehoa takaisin verkkoon korkean kulutuksen aikana. Tämä vaatii kuitenkin vielä paljon lisäkehitystä etenkin sähköverkon osalta. /27/

On esitetty myös ajatuksia, jonka mukaan korkean sähköntuotannon aikana vedestä tehtäisiin vetyä tai metaania, jolla tuotettaisiin sähköä korkean kulutuksen aikana. Tällainen tuotanto vaatii vielä lisätutkimuksia. Joka tapauksessa energiamuodon vaihtaminen pienentää järjestelmän kokonaishyötysuhdetta. /27/

4.4 Aurinkopaneelijärjestelmän hyödyt ja haitat

Aurinkoenergia on uusiutuva energianlähde, jota riittää vielä noin 5 miljardiksi vuodeksi ja sitä ei voida kuluttamalla kuluttaa loppuun. Aurinkoenergia ei myöskään ole minkään yksittäisen valtion tai yhteisön hallinnoima, eli sitä ei voida omistaa tai yrittää monopolisoida. /29/

Aurinkopaneelien kunnossapito on käytännössä hyvin vähäistä, joten ylläpitokustannukset ovat pienet. Nykyisten aurinkopaneelien käyttöiäksi on arvioitu noin 20 – 30 vuotta. /29/

Aurinkoenergia-alalla otetaan jatkuvasti uusia teknisiä edistysaskeleita. Uudet innovaatiot nanoteknologiassa ja kvanttifysiikassa voivat kolminkertaistaa aurinkopaneelien sähköntuotannon. /29/

Aurinkosähkö ei tuota päästöjä käytön aikana. Sen pääasialliset ympäristövaikutukset tulevat aurinkopaneelien tuotantovaiheessa. Esimerkiksi onnettomuustilanteissa voi haitallisia kemikaaleja päästä ympäristöön, jolloin ympäristövaikutukset riippuvat paljolti aurinkokennoteknologiasta. /29/

Nykyisten aurinkokennojen valmistuksessa käytetään materiaaleja, jotka ovat kalliita ja harvinaisia, eli aurinkokennojen valmistus kuluttaa myös rajallisia resursseja ja aurinkokennojen valmistusmateriaalien kierrätys ei vielä ole ajankohtaista. /29/

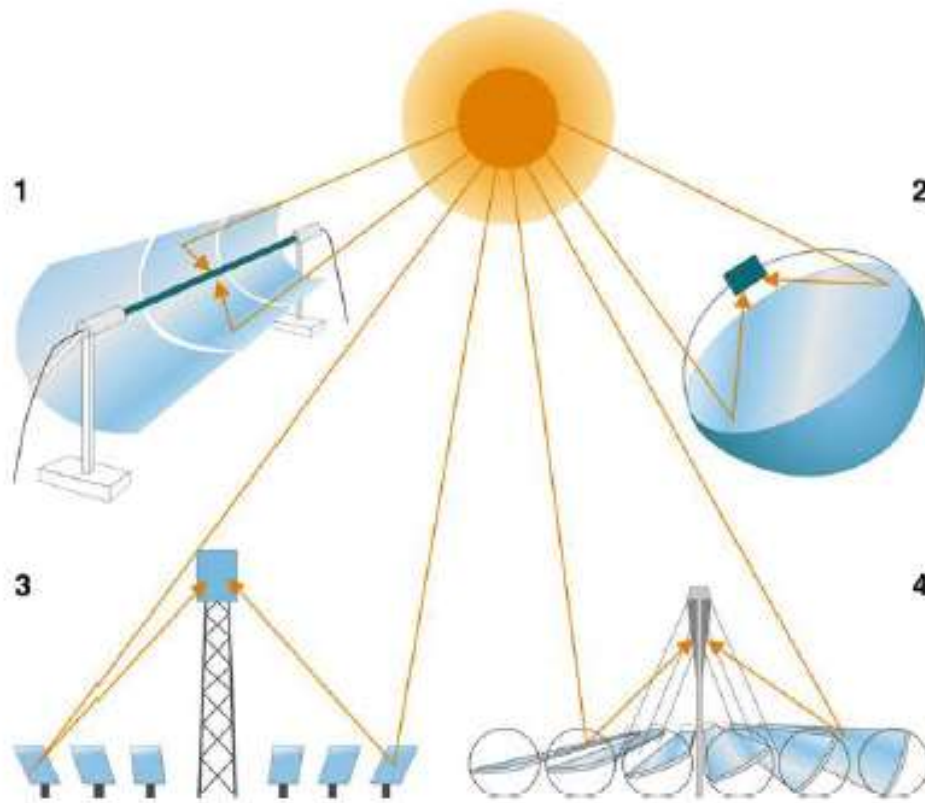
Aurinkoenergiaa voi tuottaa vain vuorokauden valoisina tunteina ja energian varastointi, ainakin vielä, on käytännössä hankalaa ja erittäin kallista. /29/

5 KESKITTÄVÄ AURINKOVOIMA

Keskittävä aurinkovoima (concentrated solar power; CSP) on eräs varteenotettava teknologia hiilidioksidittomaan energiantuotantoon. CSP-menetelmällä auringon säteilyenergiaa keskitetään lukuisien peilien avulla yksittäiseen pisteeseen, jonka sisällä oleva lämmönsiirtoaine kuumenee tekniikasta riippuen 200 – 1100 celsiusastetta. lämmönsiirtoaineella varastoidulla energialla tuotetaan vesihöyryä, joka puolestaan pyörittää höyryturbiinia. Sähköä saadaan turbiinin pyörittämästä generaattorista. Lämmönsiirtoaineen avulla aurinkoenergiaa voidaan varastoida yön yli tapahtuvaa sähköntuotantoa varten ja järjestelmä saadaan pidettyä käynnissä vuorokauden ympäri./7/ Eri arvioiden mukaan CSP-tekniikalla voitaisiin kattaa vuoden 2050 sähköntuotannosta jopa 15 – 25 prosenttia./30/

CSP-tekniikoita on neljä erilaista. (Kuva 10)

1. Paraboloidinen kouru
2. Levyjärjestelmät
3. Keskustorni
4. Lineaarinen Fresnelin peilirakenne.



Kuva 10. Neljä pää- CSP-tekniologiaa kuvattuna. 1.parabolinen kouru, 2.Levyjärjestemät, 3.Aurinkotorni ja 4.Lineaarinen Fresnelin peilirakenne/7/

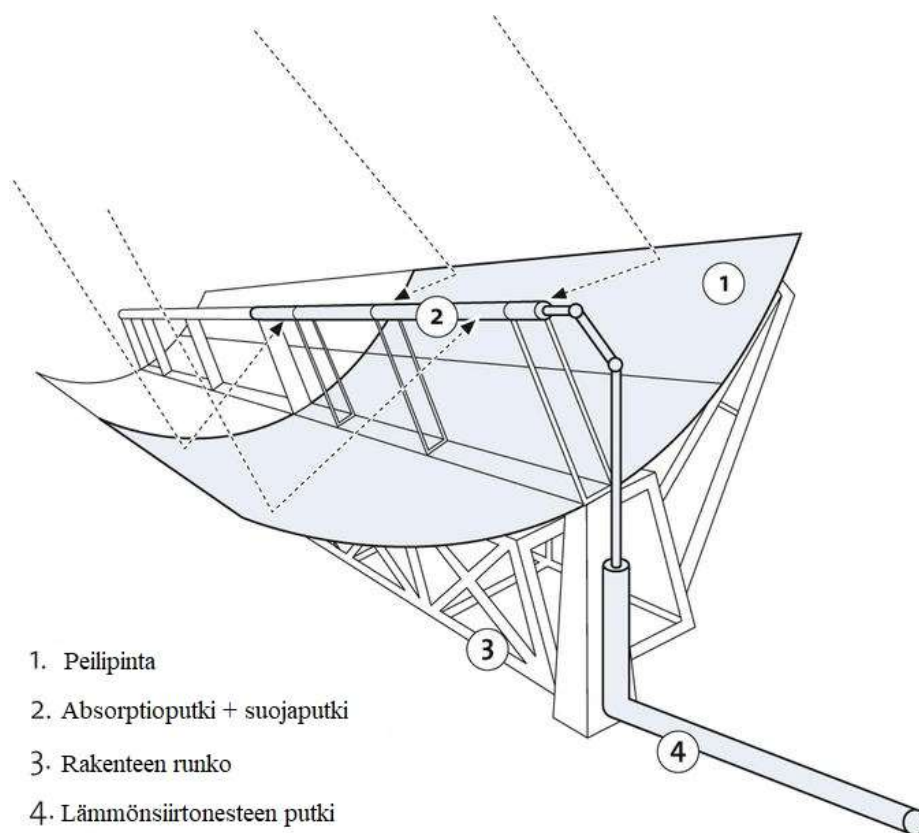
Tällä hetkellä keskitetyn aurinkoenergian käytetyin keräämismuoto on paraboloidinen kouru. CSP-tekniologia on runsaassa kasvussa ympäri maailman. /30/ Vuoden 2016 loppuun mennessä rakennettua kapasiteettia oli noin 5600 MW, josta suurin osa on 50 – 100 MW voimalaitoksia. CSP-tekniologia on runsaassa kasvussa ympäri maailman ja kapasiteetin uskotaan saavuttavan vuoteen 2023 loppuun mennessä 14.5 GW:n rajan./31/

5.1 Parabolinen kouru

Kourumalliseen aurinkokeräimeen eli paraboloidiseen kouruun (engl. parabolic through) perustuvat voimalat ovat menestyksekkäimpiä ja kustannustehokkaimpia

keskitettyyn auringon säteilyyn pohjautuvista voimaloista ja ovat selkeästi eniten käytetty tekniikka 72 % osuudellaan./32/

Sen hinta on muihin verrattuna alhainen, mutta kehityspotentiaali tällä hetkellä nähdään heikkona eikä suuria parannuksia nykyisistä toiminta-arvoista voida juurikaan tehdä. Kourujen geometriset keskityssuhteet, eli kollektorin pinta-alan suhde keräimen pinta-alaan, ovat vain 50 – 90. Melko alhaisten lämpötilojen (200 – 600 °C) takia vuotuinen kokonaishyötysuhde on välillä 10 – 16 %./11/



Kuva 11. Parabolisen kourun rakenne./34/ (muokattu)

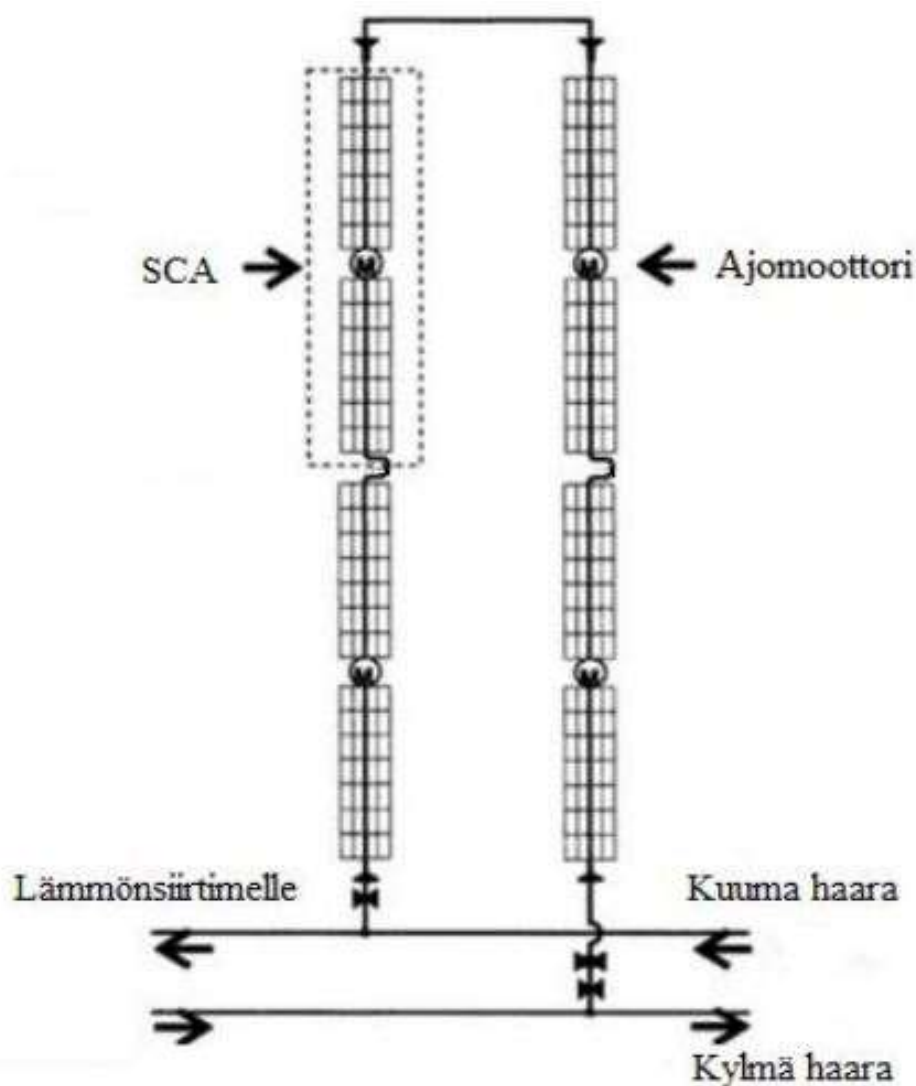
Parabolinen kouru toimii auringon säteiden kerääjänä ja keskittäjänä. Säteet heijastuvat kourun keskellä sijaitsevaan absorptioputkikeräimeen, jossa lämmönsiirtoaine virtaa. Kuumentunut siirtoaine kerätään useammasta kourusta lämmönsiirtimeen, jossa se lämmittää höyryä, joka muutetaan kineettiseksi

energiaksi perinteisessä höyryturbiinissa ja edelleen sähköksi generaattorissa. Kuva 11 esitetään parabolisen kourun rakenne. /33/

Paras teho saadaan asentamalla kouru pohjois-eteläsuuntaan, ja kääntämällä sitä koko ajan auringon vuorokausittaisen liikkeen mukaan, tällöin peilit ovat heliostaatteja, eli ne pysyvät suunnattuna aurinkoon päin koko päivän ajan.. Kouru voidaan myös asentaa Itä-länsisuuntaan, jolloin sen asentoa tarvitsee muuttaa kuin kausittain, mutta teho on tällöin huomattavasti huonompi. Kokonaisessa voimalassa näitä peilejä asetetaan useiksi pitkiksi riveiksi sopivin välimatkoin, jolloin ne kattavat suuren pinta-alan./7/

Lämmönsiirtoaine on usein lämpö-öljyä, jonka lämpötila on noin 400 °C, sen alhaisten hankintakustannusten, suhteellisen alhaisen haihtuvuuden sekä alemmasta absorbointiputkiin kohdistuvan rasituksen vuoksi, mutta myös sulaa suolaa, vettä ja ilmaa voidaan järjestelmässä käyttää. Sulasuolalla päästään lähes 600 °C lämpötiloihin ja vedellä voidaan tuottaa suoraan höyryä. Suolalla on kuitenkin korkea korroosioitusvaikutus, joten se vaatii kalliin korroosioitumisen estojärjestelmän. Veden höyrystyminen putkistossa taas vaatii monimutkaisen aurinkokentän hallinnan, jotta turbiinille menevän höyryn paine ja lämpötila pysyvät vakioina./35 ss. 197, 233/

Aurinkokenttä koostuu useista vierekkäisistä kollektori- eli keräinriveistä. Kenttä on yleensä suorakulmion muotoinen ja tuotantoyksikön tulisi sijaita mahdollisimman lähellä kentän keskustaa, jotta putkien lämpöhäviöt saataisiin minimoitua. Kaksi rinnakkaista kollektoririviä muodostavat luupin kuvan 11 mukaisesti. Rivit on kytketty sarjaan siten, että luupin toinen pää on kylmässä ja toinen kuumassa haarassa. Yksi rivi koostuu yleensä 100 – 200 metriä pitkistä kollektoriryhmistä (SCA, Solar Collector Assembly) ja kollektorimoduuleista, joita ohjaa sama ajomoottori. Rivien täytyy olla sopivalla etäisyydellä toisistaan, koska jos ne ovat liian lähellä toisiaan, ne voivat varjostaa toisiaan ja taas jos välit ovat liian pitkät, ne lisäävät putkien pituuksia ja siten lämpöhäviöitä. /11/



Kuva 12. Yksittäisen kollektori- eli keräinsilmukan rakenne./36 s. 67/(muokattu)

Yleensä keräin koostuu kahdesta sisäkkäisestä putkesta, joista sisemmän sisällä virtaa lämmönsiirtoaine. Sisempi, eli absorptioputki on valmistettu ruostumattomasta teräksestä ja se on päällystetty aineilla, joilla on korkea absorptiivisuus ja matala emissiivisyys. Päällyste voi olla monikerroksinen, jolloin lämpösäteilylle 400 °C lämpötilassa saadaan absorptiivisuudeksi 0,96 ja emissiivisyydeksi 0,09. Ulompi putki on yleensä valmistettu korkeita lämpötiloja kestävästä borosilikaattilasista, jonka läpäisevyyden täytyy olla vähintään 96 %. Absorptioputken täytyy olla myös tarpeeksi pieni, ettei lämpöhäviöt kasva liian suuriksi, mutta kuitenkin tarpeeksi iso, jotta suurin osa heijastetusta säteilystä

osuu siihen. Tyypillisesti absorptioputken halkaisija on 75 mm ja lämpöhäviöitä pienentävän lasiputken 125 mm. Lasiputki estää ilman virtauksen absorptioputken pinnalla vähentäen konvektiosta johtuvia lämpöhäviöitä. Häviöt pienenevät edelleen, jos putkien välissä on tyhjiö./35 ss. 208, 210/

5.2 Levyjärjestelmät eli parabolinen lautanen

Levyjärjestelmät, yleisemmin tunnettuna parabolisena lautasena, osuus kaikesta CSP-kapasiteetista on alle 1 %. Tekniikka on vielä kehitysvaiheessa tai oikeastaan jäänyt toteutukseltaan halvempien tekniikoiden varjoon ja siksi sen kehitystyö ei ole kovin aktiivista. Tekniikka on siis kallis verrattuna muihin CSP-tekniikoihin. Siinä on kuitenkin valtava kehityspotentiaali, koska sillä on huomattavasti korkeammat optiset hyötysuhteet, keskityssuhteet ja kokonaismuuntohyötysuhde. Potentiaali on pääasiassa hajautetussa tuotannossa ja itsenäisissä järjestelmissä. Parabolisten lautasten keskityssuhteet voivat olla jopa 1500 – 3000 kertaisia ja auringon energiasta sähköksi muuntohyötysuhde voi parhaimmillaan olla 29 %.

/7/

Parabolisista lautasista voidaan rakentaa pieniä tai isoja verkkoon kytkettyjä tai itsenäisiä voimalaitoksia, jotka antavat virtaa esimerkiksi vesipumpuille. /11/ Suurimpaan osaan on integroitu Stirling-moottori, joka on lämpövoimakone, jonka lämmönsiirtoaineena on kaasu, kuten Helium. Moottori tuottaa mekaanista energiaa lämpötilaerojen avulla, joka johdetaan moottorin yhteydessä olevaan generaattoriin, jossa se muutetaan sähköenergiaksi.

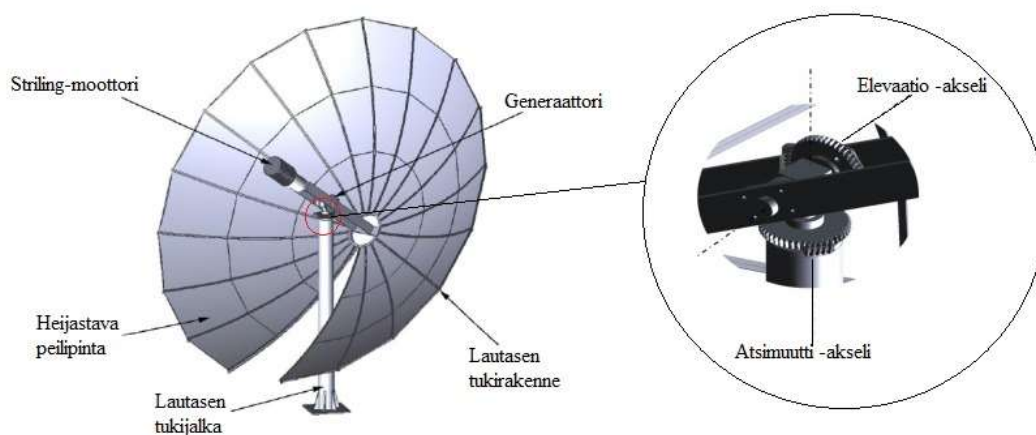
Tämän tyyppisten laitosten kokoluokka vaihtelee muutamista kilowateista muutamiin kymmeneen megawatteihin. Yli 10 MW:n kokoluokassa muut CSP-tekniikat voivat kuitenkin olla hyötysuhteeltaan tehokkaampia ja taloudellisesti kannattavampia./35 s. 284/

Paraboliset lautaset heijastavat auringon säteet polttopisteessä sijaitsevaan keräimeen, jossa lämpöenergia absorboituu lämpöenergiana kiertoaineeseen, joka voidaan käyttää turbiiniprosessissa tai keräimen yhteydessä olevassa

moottoriprosessissa. Auringon säteilyn keskittäjänä toimivan lautasen halkaisija on yleensä 1 – 25 m. Mahdollisena optimikokona pidetään kuitenkin 10 – 25 kWe, joka tarkoittaisi että lautasen pinta-ala olisi 50 – 120 m². Suurempia lautasia käytetään höyryntuotantoon turbiinille./35 s. 285/

Sähköntuotantoa tässä tekniikassa hankaloittaa se, että parabolisille lautasille ei ole vielä kehitetty järkevästi toimivaa energianvarastointia. Moottoriin asennettava varasto lisäisi lautasen painoa niin paljon, että tukirakenteita pitäisi merkittävästi lisätä, jolloin kustannukset ja järjestelmän paino karkaisi hallinnasta. Lisäksi pienessä paikallisessa varastossa olisi epäedullinen pinta-alasuhte tilavuuteen ja lämpöhäviöt kasvaisivat liian suuriksi. Koko systeemin keskitetyssä varastossa ongelmana olisi pitkistä etäisyyksistä johtuvan lämpöhäviöiden lisäksi liikkuvat lautaset, jotka vaatisivat liikuteltavat liitokset putkiin. /35 s. 286/

Parabolisen lautasen peili on heijastavaa, metallilla pinnoitettua lasia tai muovia. Se seuraa aurinkoa kahden akselin ympäri ja seuranta lasketaan joko algoritmeilla tai sädesensoreilla. Seurannan kaksi yleisintä toteutustapaa ovat atsimuuttielevaatioseuranta, jossa lautanen pyörii maanpinnan suuntaisella tasolla (atsimuutti) ja sitä kohtisuoraan olevan akselin ympäri (elevaatio) sekä napa-päivän-tasaajaseuranta, jossa lautanen pyörii maan pyörimisakselin kanssa samansuuntaisen akselin ympäri samaa vauhtia kuin Maa eli 15 °/t. /35 s. 288/



Kuva 13. Yleisin käytössä oleva malli, atsimuutti -elevaatioseurantaa käyttävä parabolinen lautanen./37/ (Muokattu)

Keräimen absorptiopinta voi koostua useista pienistä putkista, joiden sisällä virtaa kiertoaine ja jotka on asetettu polttopisteeseen. Toinen tapa on käyttää nestemäistä metallia siirtämään lämpö kiertoaineeseen. Sula metalli höyrystyy absorptiopinnalla ja kondensoituu kiertoaineen sisältävän putken pinnalle luovuttaen lämpöä. Lämpö tuottaa sähköä vastaanottimeen liitetyllä pienellä Stirling-moottorilla tai mikroturbiinilla (Rankine- tai Brayton-kierto)./35 ss. 299-305/

Stirling-moottori on yleisin valinta, sillä sen hyötysuhde on yli 40 % ja sillä on pitkä ja vähän huoltoa tai ylläpitoa vaativa käyttöikä. Stirling-moottorin kiertoaineena käytetään heliumia tai vetyä ja niillä päästään 600 – 800 °C lämpötiloihin. Rankine-kierrossa keräimessä oleva absorptiopinta koostuu yhdestä pitkästä putkesta, jonka sisällä virtaava vesi höyrystyy. Brayton-kierrossa ideana on korvata tai täydentää polttoaineesta saatavaa tehoa auringon lämpöenergialla. Näiden hyötysuhde on yli 30 % ja höyryn sisäänmenolämpötila turbiinille voi olla 850 °C./35 ss. 299-305/

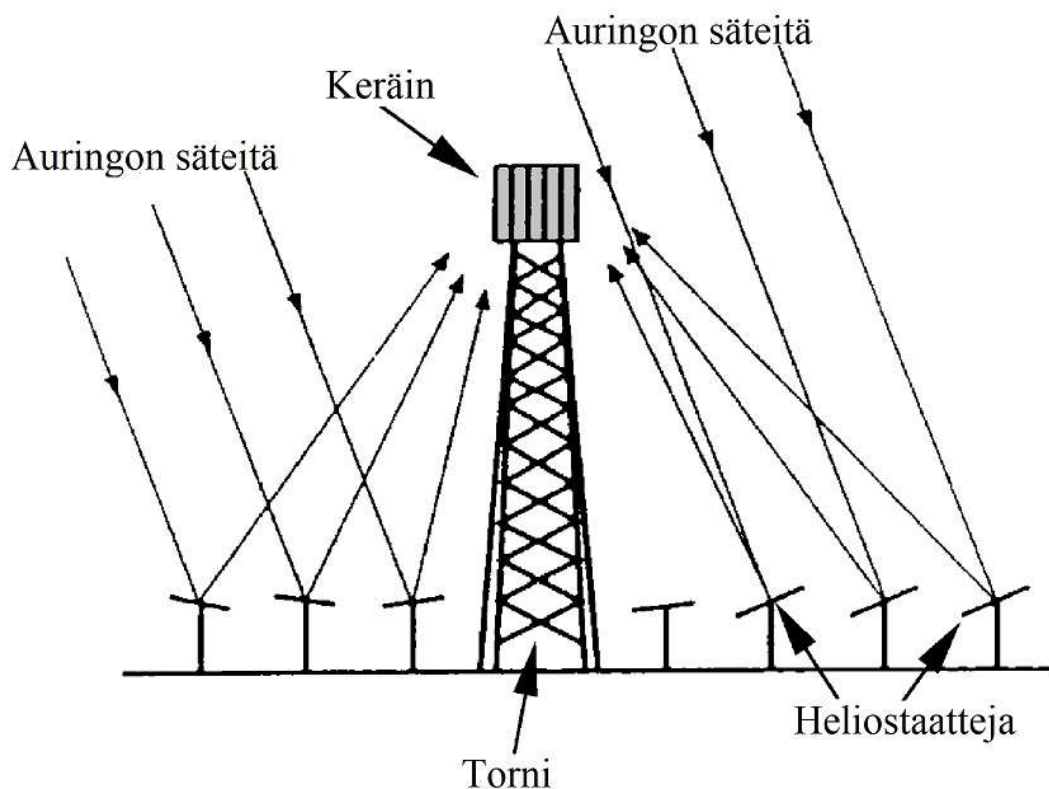
5.3 Aurinkotorni

Ensimmäinen suuren kokoluokan kaupallinen aurinkotornilaitos nimeltään Solar One 10, ja sen kapasiteetti oli 10 MW. Laitos sijaitsi Kaliforniassa ja se oli toiminnassa vuodesta 1982 vuoteen 1988. Vuonna 1995 Solar One -laitosta täydennettiin lisäämällä heliostaattien määrää sekä lämmönsiirtoainejärjestelmä, joka salli sulasuolan käytön. Laitoksen nimeksi tuli Solar Two ja teholtaan se oli 20 MW. /38/

Tällä hetkellä aurinkotornien asennettu kapasiteetti on 650 MW ja rakenteilla olevaa kapasiteettia on yli 800 MW. Lisäksi suunnitteilla olevaa kapasiteettia on 3550 MW. Asennettujen tornien teho on välillä 10 – 400 MW. Se on tällä hetkellä aktiivisin ja valmiista kapasiteetista toiseksi yleisin CSP-tekniikka noin 25 % osuudellaan. Rakenteilla ja suunnitteilla olevien voimalaitosten valmistuessa

osuus moninkertaistuu. Hinta on kuitenkin vielä esimerkiksi parabolisiin kouruihin verrattuna korkea. /39/

Aurinkotornijärjestelmät käyttävät useita pienistä tietokoneohjatuista palasista koostuvia peilejä, heliostaatteja, joiden koko rakennetuissa järjestelmissä on vaihdellut 12 – 320 m² välillä. Heliostaatit pystyvät seuraamaan aurinkoa koko päivän kahden (atsimuutti- ja elevaatiokulma), akselin ympäri. Tietokone laskee auringon sijainnin maahan nähden ja antaa peilin ohjausmoottorille komennon vaihtaa asentoa tarpeen mukaan. Heliostaattien täsmällinen säätö on erittäin tärkeää, sillä kaikkein kauimpana olevilla peileillä tapahtuva pienikin kohdistusvirhe aiheuttaa sen, että keskitetyn auringon säteily menee ohi aurinkokentän keskustornista olevasta keräimestä, jolloin järjestelmän hyötysuhde laskee. Heliostaattien kokonaismäärä riippuu laitoksen tehosta. /39/



Kuva 14. Pelkistetty kuva aurinkotornin toiminnasta, jossa auringonsäteet kohdistetaan tornin huipulla olevaan keräimeen. /40/

Tekniikan vahvuutena on 600 – 1000 kertaisista keskitysasteista johtuva kiertoaineen lämpötila, mikä johtaa parempaan hyötysuhteeseen, joka voi parhaimmillaan olla 25 % Nykyiset aurinkokennot käyttävät vettä, ilmaa tai sulaa suolaa lämmön siirtämiseksi lämmönvaihtimeen tai höyryturbiini-järjestelmään./41/

Riippuen vastaanottimen rakenteesta ja käytettävästä lämmönsiirtoaineesta, käyttölämpötila voi vaihdella 200°C – 1000 °C. Noin 600 °C lämpötilat ovat tyypillisiä nykyisten sulasuolajärjestelmien kanssa./11/

Keräimen absorptiopinta päällystetään mustaksi vain ei-selektiivisillä pinnoitteilla, koska korkeammissa lämpötiloissa auringon valospektri ja lämpöenergian emissiivisyyspiiri ovat osittain päällekkäisiä, joka vaikeuttaa selektiivisten pinnoitteiden suunnittelua. /41/

Aurinkotornissa sijaitseva keräin määrittelee heliostaattien sijoittelun ja tornin korkeuden, joka on yleensä 50 metristä ylöspäin. Tällä hetkellä korkein torni on 250 m (Negev desert, Israel, The Ashalim project)./42/

Jos keräimenä on ulkoinen sylinteri, absorptiopinta voidaan nähdä kaikista ilmansuunnista. Tällöin aurinkotorni voi olla lyhyempi ja sen rakentamiskustannukset ovat pienemmät. Käytettäessä ulkoista sylinteriä, heliostaatit sijoitetaan tornin ympärille, jolloin se tuottaa tasaisesti koko ajan kun, aurinko on näkyvillä. Kaikista keräimistä, sillä on selkeästi paras vuosittainen energiantuotanto. Haittapuolena on, että lämpöpinta altistuu ympäristölle, mikä aiheuttaa paljon lämpöhäviöitä, joten voimalaitoksen sijainti on erittäin tärkeä./35 ss. 241, 243/

Litteän keräimen vastaanottimen kulma voi olla enintään 180 astetta, mutta yleensä vähemmän. Heliostaattikentän keskipistettä kohti suunnattu 120 asteen litteä keräin toimii hyvin keskipäivällä, mutta aurinko laskiessa sen suorituskyky heikkenee nopeasti. Kuitenkin se on halvempi vaihtoehto pienemmille järjestelmille kuin tyhjiöllinen keräin./11/

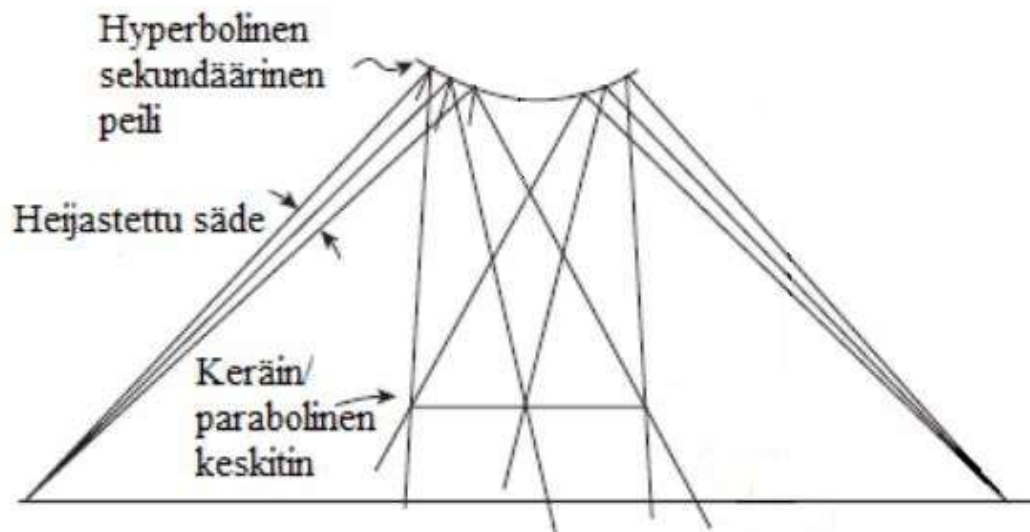
Yli 700 °C: n lämpötiloissa käytetään tyhjiökerääjää, jossa lämpöpinta on eristetyn kotelon sisällä. Tyhjiökerääjässä on apertuuriala, joka päästää auringon säteilyn keräimen absorptiopinnalle. Heliostaatit sijoitetaan tyypillisesti keräimen apertuurialan napapuolelle, eli pohjoisella pallonpuoliskolla pohjoisen ja eteläisellä pallonpuoliskolla eteläiselle puolelle. Näin se toimii tehokkaasti keskipäivällä, mutta heikommin auringon laskiessa alemmas. Tornin pitää olla selvästi korkeampi kuin sylinterimallissa, koska keräin voi nähdä vain rajoitetun alueen. Torniin voidaan myös asentaa useampia eri suuntiin osoittavia tyhjiökeräimiä, jolloin auringon säteilyä voidaan kerätä useammasta suunnasta ja järjestelmän tehokkuutta kasvatettua./35 ss. 241, 243/

Keräin voi olla myös tilavuudellinen eli volumetrinen, jolloin kiertoaineena toimii ilma. Se virtaa absorptiotilavuuden läpi ja kuumentuminen tapahtuu konvektiolla. Metallisella keräimellä voidaan saavuttaa 700 – 850 °C ja keraamisilla keräimillä jopa yli 1000 °C lämpötila. Ilma kiertoaineena on hyvä, koska sitä on helposti saatavilla, se ei jäädy, siinä ei tapahdu faasin muutosta eikä vaikuta ympäristöön./39/ Kuva 15 on esitetty tyypillisimmät käytössä olevat aurinkotornitekniikat.



Kuva 15. Neljä tyypillisintä aurinkotornitekniologiaa. Ylhäällä vasemmalla ulkoinen sylinterikeräin, ylhäällä oikealla litteä keräin, alhaalla vasemmalla volymetrinen sekä oikealla tyhjiökeräin. /43/, /44/, /45/, /46/

Keräin voidaan asentaa myös tornin alaosaan kuten Kuva 16 Kuva 16, jolloin hyötynä on se, että lämpöhäviöt pienenevät lämmönsiirtonesteen kulkeman matka lyhetessä. Heliostaatit keskittävät auringon säteet edelleenkin tornin huipulle, jossa sijaitseva sekundäärinen hyperbolinen peili suuntaa ne alaspäin tornin alaosaan, jossa on ylöspäin suunnattu keräin./35 ss. 241, 243/



Kuva 16. Tornin alaosassa olevan keräimen toimintaperiaate, jossa auringonsäteet keskitetään tornin huipulla olevalla sekundäärisellä peilillä alaspäin keskittimeen./35 s. 242/ (muokattu)

5.4 Lineaarinen Fresnelin peilirakenne

Lineaarinen Fresnelin peiliteknologia saa nimensä Fresnel-linsseistä, jonka kehitti Ranskalainen fyysikko Augustin-Jean Fresnel 1700-luvulla majakoiden valoa varten. /47/

Maailman CSP-kapasiteetista vajaa 3 % (n. 150 MW) on toteutettu Lineaarisella Fresnelin peilirakenteella. Tällä hetkellä rakennetut LFR-systeemit (LFR, Linear Fresnel Reflector, Lineaarinen Fresnelin peili) ovat kokoluokaltaan välillä 1 – 150 MW. Suunnitteilla on kuitenkin yli 200 MW uusia laitoksia pääasiassa Kiinaan, joka yli kaksinkertaistaa LFR kapasiteetin./48/

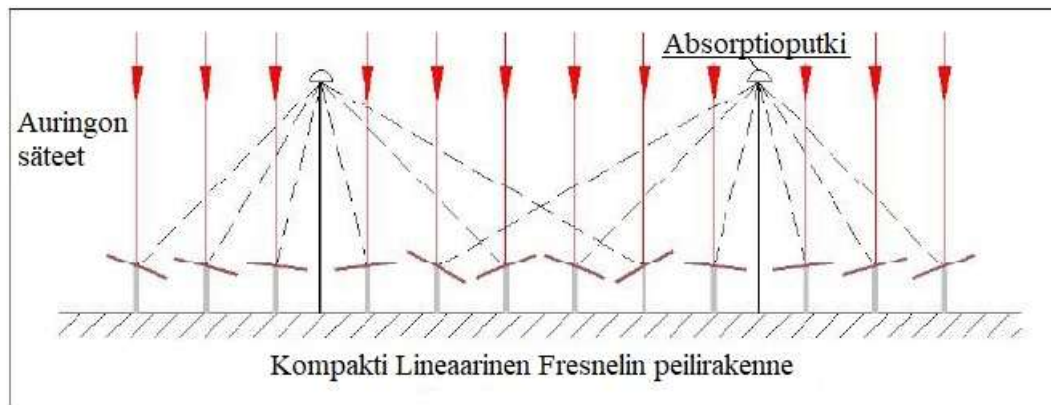


Kuva 17. Linearisessa Fresnelin peilirakenteessa pitkät tasomaiset peilit keskittävät auringon säteilyn niiden yläpuolella olevaan keräimeen./49/

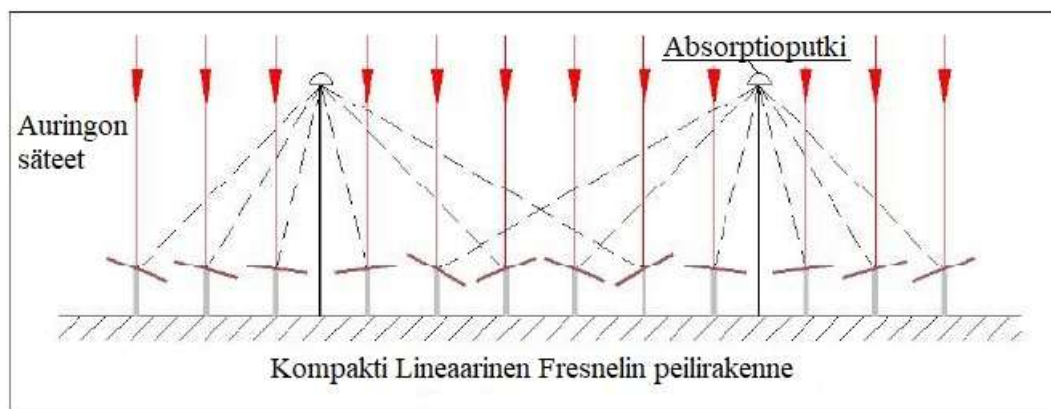
Lineaariset Fresnelin peilikeräimet ovat perustekniikaltaan samankaltaisia kuin paraboliset kourukeräimet mutta käyttävät pitkiä, jopa 800 metriä pitkiä, tasomaisia tai hieman kaarevia peilejä, jotka on sijoitettu eri kulmille auringonvalon keskittämiseksi kiinteän keräimen molemmille puolille, joka sijaitsee ensisijaisen peilikentän yläpuolella. Jokainen peilirivistö on varustettu yksiakselisella auringon seurantajärjestelmällä, ja se on yksilöllisesti optimoitu että auringon säteet osuisivat aina keräimeen (Kuva 17)./50/ Ideana tämäntyyppisessä peilirakenteessa on se, että yhteinäisen peilirakenteen sijaan peilejä on useita ja niiden välissä on raot, joka mahdollistaa rakenteen olevan mahdollisimman kevyt ja kustannustehokas sekä peilien optiikka olisi mahdollisimman hyvä. Keräin koostuu yhdestä tai useammasta pitkästä, selektiivisesti päällystetystä absorptioputkesta. /35 s. 153/

Yksi LFR- rakenteen ongelmista on se, että vierekkäiset peilit jäävät osittain toistensa varjoon, kun auringon säteet tulevat aamuin ja illoin tarpeeksi pienessä kulmassa suhteessa peiliin. Tämä voidaan estää kasvattamalla peilien väliin jäävää rakoa, kaventamalla peilejä tai nostamalla keräintä korkeammalle. Nämä

kuitenkin pienentävät järjestelmästä saatavaa hyötysuhdetta. Ratkaisuna tähän on kehitetty Kompakti Lineaarinen Fresnelin peilirakenne (CLFR, Compact Linear Fresnel Reflector)

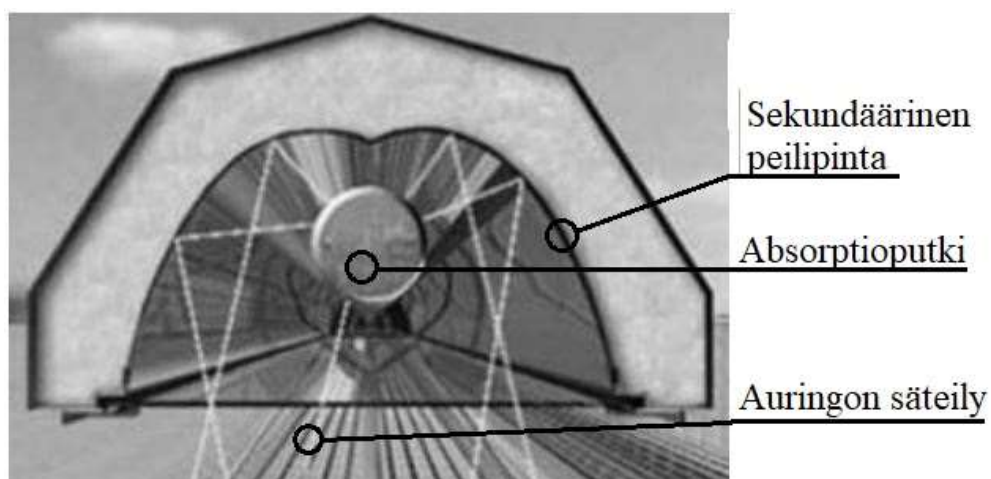


Kuva 18, jossa on lisätty peilirivistölle useampi keräin ja lomittaiset peilit voidaan suunnata vähintään kahteen eri keräimeen. Tämä mahdollistaa peilirivien tiivistämisen sekä sen johdosta myös maankäytön pienentämisen ja lämmönsiirrosta johtuvan hukkan. /35 ss. 158-159/



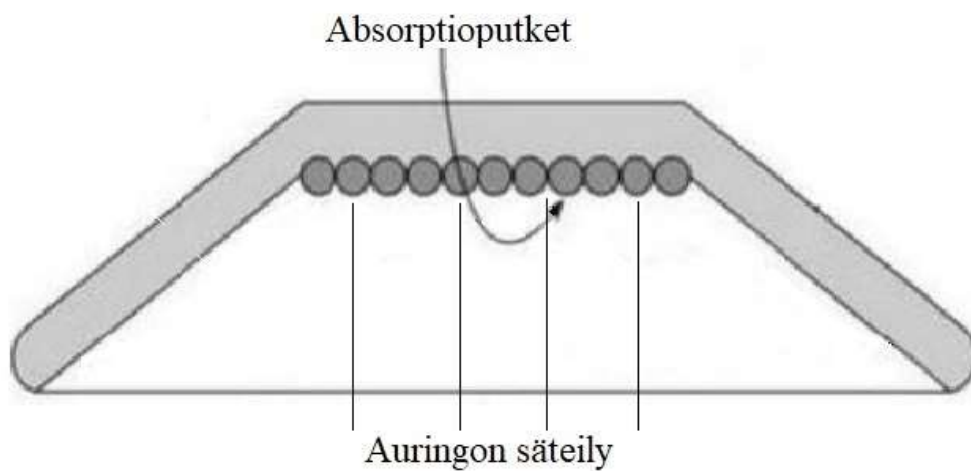
Kuva 18. Kompaktin Lineaarisen Fresnelin peilirakenteen toiminta./51/ (muokattu)

Toisin kuin paraboliset kourukeräimet, LFR-keräimien keskipiste hajottaa astigmatismiin (valontaittovirhe). Tämä vaatii absorptioputken yläpuolisen peilin, joka on esitetty kuvassa Kuva 19 (sekundaarinen peili).



Kuva 19. Lineaarinen Fresnel peilirakenne, yhden absorptioputken keräimen toiminta./35 s. 164/ (muokattu)

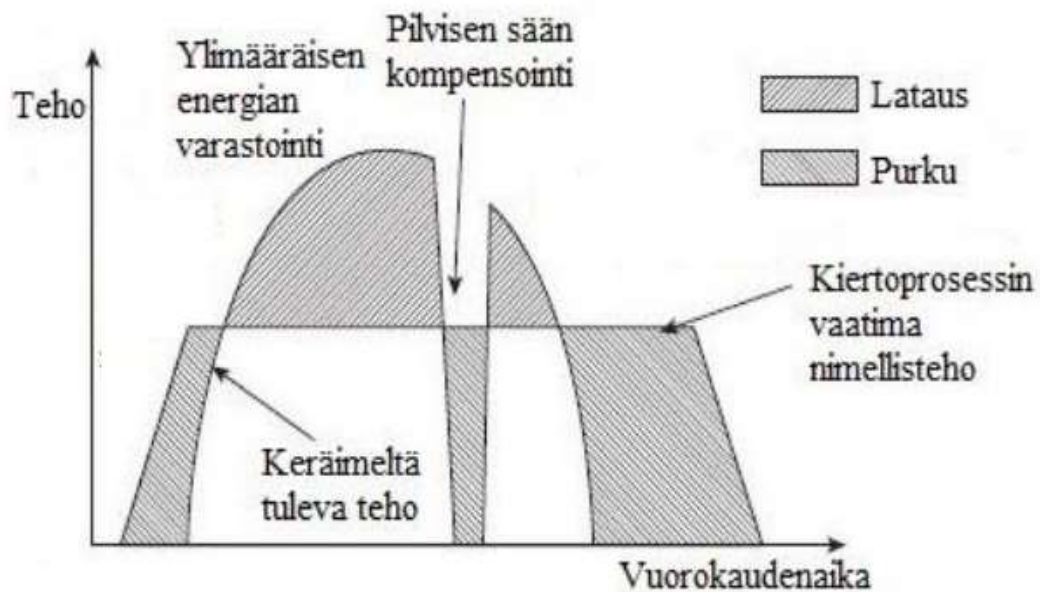
Se kohdistaa uudelleen säteet, jotka menisivät muuten absorptioputkesta ohi, tai useita rinnakkaisia absorptioputkia, jotka muodostavat monirivisen keräimen (kuva Kuva 20), joka on riittävän leveä, että suurin osa keskittyneestä auringonvalosta tulisi kerättyä ilman toissijaista heijastinta. /50/



Kuva 20. Useamman absorptioputken keräinmalli./35 s. 182/ (muokattu)

5.5 Energian varastointi ja sähkön tuotanto

Lämmön varastointi parantaa keskittävän aurinkovoiman hyötysuhdetta ja toimintavarmuutta sekä tasoittaa energiantuotantoa vuorokaudenaikojen välillä ja säätilojen vaihtuessa, mikä näkyy Kuva 21.



Kuva 21. Lämmön varastointi tasaa sähkön tuotantoa vuorokauden aikana./35 s. 363/

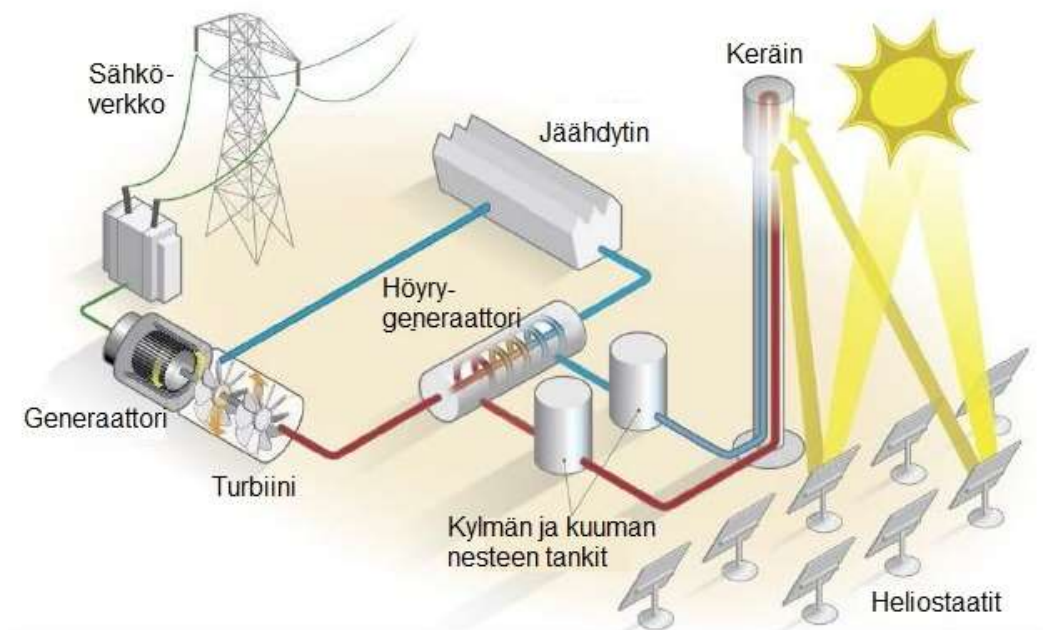
Lämpöenergiaa voidaan varastoida kolmella eri tekniikalla, joita ovat tuntuvan sisäenergian varastointi, latenttilämmön varastointi ja termokemiallinen lämmön varastointi. Lisäksi varastot voidaan jaotella aktiivisiin ja passiivisiin systeemeihin sekä suoriin ja epäsuoriin. Suorassa lämmön varastoinnissa varastointiaine on sama kuin lämmönsiirtoaine, jolloin ei tarvita erillistä lämmönsiirrintä. Epäsuorassa systeemissä lämmönsiirtoaine ja varastointiaine ovat erillisiä, joten niiden välille tarvitaan lämmönsiirrin./11/

Lämmön varastointia suunniteltaessa on varastointiaine valittava tarkkaan. Sen energiatiheys tulisi olla mahdollisimman korkea ja sen vaikutus ympäristöön pitäisi olla hyvin vähäistä sekä sen hinta tulisi olla mahdollisimman matala, sillä sen osuus voi olla jopa puolet koko varastoinnin hinnasta. Lisäksi sen tulisi olla

mekaanisesti ja kemiallisesti stabiili sekä sopia kemiallisesti yhteen kiertoaineen ja lämmönsiirtimen kanssa. Varastointiaineen täytyy myös palautua täydellisesti tuhansista lataus- ja purkukerroista. /11/

Lämmön varastoinnin ansiosta ylimääräistä energiaa ei tarvitse heittää hukkaan silloin, kun auringon säteily on normaalia korkeampi. Lämmön varastointi myös vähentää rasiutusta turbiineilla vähentämällä niiden käynnistyksiä ja sammutuksia esimerkiksi säätilojen vaihtelujen takia. Nämä ovat tärkeimmät syyt siihen, miksi lämpövarastot kasvattavat laitosten kokonaishyötysuhdetta./30/

Keskittävien aurinkovoimalaitosten lämmönsiirtoputkistossa virtaava neste on yleisimmin sulaa suolaa, lämpö-öljyä tai vettä, jota lämmitetään 200 – 600 °C lämpötilaan. Esimerkkinä sula suola on erinomainen väliaine säilyttää lämpöenergiaa, sillä se säilyttää nestemäisen olomuotonsa vielä 600 °C. Se mahdollistaa järjestelmän toimimisen alhaisella paineella sopivaan varastointiin. Lämmönsiirtoputkistosta suola virtaa lämpimän energian säilytystankkiin, jossa sitä säilytetään korkeapaineistettuna nestemäisenä suolana, kunnes sähköä tarvitaan. Kun sähköntuotantoa tarvitaan, johdetaan kuuma sula suola höyrygeneraattoriin, jonne pumpataan vesisäiliöstä vettä, joka höyrystyy. Kuumalla höyryllä pyöritetään turbiinia, joka tuottaa sähköä verkkoon. Kun höyryn tuottoon käytetty kuuma nestemäinen suola on ajettu höyrygeneraattorin läpi, se jäähtyy noin 250 °C lämpötilaan ja ajetaan kylmän suolan varastointitankkiin. Tankista se ajetaan takaisin aurinkokentän lämmönsiirtoputkistoon, ja prosessi jatkaa kiertoaan./30 s. 30/ Kuvassa Kuva 22 on esitetty edellä esitelty järjestelmä yksinkertaistaen.



Kuva 22. Perinteinen sähköntuotanto ja varastointimalli CSP-voimalaitoksessa käyttäen aktiivista epäsuoraa varastointimenetelmää./52/ (muokattu)

5.5.1 Tuntuvan sisäenergian varastointi

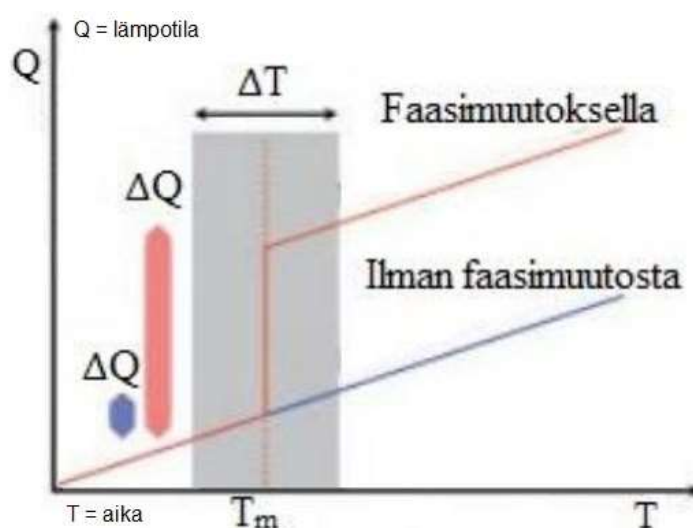
Suurin osa nykyisistä käytössä olevista varastoista CSP-voimalaitoksissa ovat tuntuvan sisäenergian varastoja, joka perustuu varastointiaineen lämpötilan nostamiseen. Varastoitu lämpöenergian määrä riippuu varastointiaineen massasta, ominaislämpökapasiteetista ja lämpötilaerosta. Mitä suurempi aurinkokentän lämpötilaero on, sitä enemmän saadaan varastoitua energiaa. Lämmön varastointiaineena on yleensä kiinteä tai nestemäinen aine ja yleisimmin käytetään sulaa suolaa, mutta myös lämpö-öljyä, vettä, keramiikkaa ja grafiittia käytetään. Näiden huono puoli on matalahko energiatiheys, jolloin tarpeeksi suuren kapasiteetin varmistamiseksi tarvitaan myös massiiviset suuret säiliöt, joiden kustannukset ovat tietenkin korkeammat. Esimerkkinä 50 MW aurinkovoimalaitos, jossa on yhdeksän tunnin lämpövarasto, tarvitsisi kaksi 24 000 m³ säiliötä./11 s. 26/

Sen lisäksi yleisimmin käytössä olevalla lämmönsiirtonesteellä, sulalla suolalla, on matala jähmettymislämpötila (noin 100 °C), joka saattaa aiheuttaa ongelmia

esimerkiksi yöaikaan, kun laitos ei ole käynnissä. Jähmettymisen estämiseksi tarvitaan kalliit jäätymisenestolaitteistot./11 s. 26/

5.5.2 Latenttilämmön varastointi

Latenttilämmön varastointi perustuu käytetyn varastointiaineen faasimuutokseen aurinkokentän lämmönkeruujärjestelmän ylä- ja alalämpötilojen välillä. Tällöin samalla lämpötilojen erolla saadaan tuntuvan sisäenergian lisäksi aineen faasimuutoksen entalpia talteen, kuten Kuva 23 asia havainnollistetaan. /11 s. 27/



Kuva 23. Hyödyntämällä varastointiaineen faasimuutosta, saadaan varastoitua enemmän lämpöä samalla lämpötilaerolla./11 s. 27/ (muokattu)

Tämän takia tällä tekniikalla voidaan tehdä pienempiä ja kustannustehokkaampia varastoja. Varastointiaine valitaan yleensä niin, että faasimuutos tapahtuu kiinteästä nesteeksi, sillä nesteestä kaasuksi muutoksessa aineen tilavuus muuttuu yleensä paljon enemmän, jolloin varastoina toimivien säiliöiden tulisi olla suhteessa paljon suurempia ja tekniikasta saatava hyöty olisi siten pienempi. Latenttilämmön varastoinnin hyvänä ominaisuutena on myös, että varaston purkautumislämpötila voidaan päättää, sillä sen määrittää faasimuutoksen lämpötila, joka pysyy koko ajan samana. Tekniikan heikkoutena on käytettyjen varastointiaineiden matalat lämmönjohtavuudet, joista johtuen varastot latautuvat ja purkautuvat hitaasti./11 ss. 26-27/

5.5.3 Termokemiallinen lämmön varastointi

Keskittävien aurinkovoimaloiden termokemiallinen lämmön varastointi on edelleen kehitysvaiheessa. Sillä on kuitenkin mahdollisuus varastoida enemmän lämpöenergiaa kuin kahdella muulla varastointimenetelmällä, koska tilavuuden energiatiheys on viisi kertaa suurempi kuin latenttilämmön varastoinnilla ja kymmenen kertaa suurempi kuin tuntuvan sisäenergian varastoinnilla./11 ss. 27-28/

Termokemiallinen lämpövarastointi voi perustua joko sorptioprosessiin tai lämmön aiheuttamiin kemiallisiin reaktioihin. Sorptioprosessia, joka voi olla kumpi tahansa tai molemmat, absorptio- tai adsorptioprosessi, käytetään alle 400 °C lämpötiloissa ja kemiallisia reaktioita voidaan käyttää korkeammissa lämpötiloissa. /11 ss. 27-28/

Varaston lataus on endoterminen reaktio, jossa lämpö aiheuttaa yhdisteen hajoamisen. Reaktiotuotteet varastoidaan erillisiin säiliöihin. Purku taas on eksoterminen reaktio, jossa yhdisteen uudelleen muodostumisessa vapautuu lämpöä./11 ss. 27-28/

Varastoitu lämpö riippuu aineen massasta, reaktiolämpötilasta ja reaktionopeudesta sekä toteutumisasasteesta. Tekniikka on edelleen kehitteillä, koska ongelma on reaktioiden täydellinen palautettavuus, lämmönsiirron rajoitukset ja teknologian hinta. Lisäksi käytetyt yhdisteet ovat usein suolaliuoksia, jotka aiheuttavat korroosiota säiliöissä ja lämmönvaihtimissa./11 ss. 27-28/

Tekniikan hyvänä puolena on paremman energiatiheyden lisäksi se, että reaktiotuotteet voitaisiin mahdollisesti varastoida ympäristön lämpötilassa, mikä vähentäisi lämpöhäviöitä ja mahdollistaisi pitkäaikaisen varaston./11 ss. 27-28/

5.5.4 Aktiiviset ja passiiviset varastoinnit

Aktiivisissa lämmön varastointijärjestelmässä varastointiaineena on neste, joka pääsee virtaamaan säiliöiden välillä. Aktiivisissa järjestelmissä ovat kahden ja yhden säiliön varastot sekä höyryakku./11 s. 28/

Kahden säiliön varasto on kaikkein käytetyin ja edistyneisin lämmön varastointitekniikka. Siinä on kuuma ja kylmä säiliö, jotka on yleensä valmistettu teräksestä ja ne on eristetty hyvin vähentämään lämpöhäviöitä./11 s. 28/

Yhden säiliön varastossa kuuma ja kylmä varastoidaan samaan säiliöön. Lämpökerrostuminen erottaa ne toisistaan ja kerrosten välissä voi olla pystysuunnassa liikkuva eristinjakolevy. Yhden säiliön varasto voi olla jopa 35 % halvempi kuin kahden säiliön./11 s. 28/

Höyryakku on paineistettu säiliö, jossa on kylläistä vettä ja höyryä. Se ladataan syöttämällä höyryä pinnan alle, mikä nostaa veden painetta ja lämpötilaa. Akku puretaan avaamalla venttiili, jolloin paine alenee ja kylläinen vesi höyrystyy. Höyryakkuja käytetään, kun tarvitaan vain pieni lämpövarasto, sillä veden energiatiheys on alhainen ja painesäiliöt kalliita. Ne sopivat puskurivarastoiksi pilviselle säälle, sillä niillä on erittäin nopeat reaktioajat./11 s. 29/

Passiivisissa järjestelmissä varastointiaine on kiinteä ja lämmönsiirtoneste virtaa sen läpi vain latauksen ja purkamisen aikana. Tiiviit petisysteemit ja tehostetut lämmönsiirtorakenteet ovat osa passiivisia järjestelmiä. Petisysteemeissä voidaan käyttää huonosti johtavia aineita kuten kiviä, sillä lämmönsiirtoneste on suoraan kosketuksissa varastointiaineen kanssa. Yhden säiliön järjestelmä muuttuu passiiviseksi, jos täytämateriaaleja käytetään vähentämään kalliin sulan suolan tarvetta, sillä täyte toimii silloin ensisijaisena varastointiaineena. Hyviä ja halpoja materiaaleja ovat esimerkiksi betoni, kivi, tiili ja hiekka./11 s. 29/

5.6 Jäähdytys

Kaikki höyryturbiinilaitokset tarvitsevat jäähdytystä, jotta turbiinilta tuleva höyry saadaan lauhdutettua takaisin vedeksi. Mitä kylmempää jäähdyttävä neste on, sitä parempi hyötysuhde on sähköntuotannossa. Jäähdytys voidaan toteuttaa märkä-, kuiva- tai hybridijäähdytyksenä, joista märkäjäähdytyksellä päästään parhaaseen hyötysuhteeseen, joka on voimalaitoksilla ensisijainen vaihtoehto, sillä se on paljon halvempaa kuin kuivajäähdytys. CSP-laitosten vaatimuksena on kuitenkin korkea DNI, mikä yleensä tarkoittaa kuivia olosuhteita, jolloin vettä on niukasti saatavilla ja sen käyttöä voidaan rajoittaa. Siksi pääsääntöisesti uudet CSP-laitokset rakennetaan kuivajäähdytteisiksi. Kuivajäähdytteiset lauhduttimet edellyttävät jäähdytykseen suuremman massavirran, sillä ilmalla on vettä huonompi lämmönsiirtokerroin. Tämä kasvattaa vaadittua puhallustehoa verrattuna vesijäähdytteiseen ja siten lisää energian omakäyttöä. Voimalaitoksen jäähdytykseen voidaan käyttää myös hybridi- ja yötaivasjäähdytystä. Hybridijäähdytystä käytetään yleensä silloin, kun vettä on jonkin verran saatavilla, mutta ei kuitenkaan märkäjäähdytyksen tarpeisiin riittävästi. Hybridisysteemissä märkä- ja kuivajäähdytys toimivat rinnakkain./11 ss. 30-32/

Yötaivasjäähdytys on kehitteillä oleva teknologia, jonka ajatuksena on hyödyntää aavikoiden kylmiä yölämpötiloja ja kirkasta taivasta. Taivaan lämpötila on kirkkaassa säässä noin 20 astetta viileämpi kuin ympäristön lämpötila. Jäähdytysvesi varastoidaan kylmään ja kuumaan säiliöön. Kylmällä vedellä jäähdytetään turbiinilta tulevaa höyryä ja lämmennyt jäähdytysvesi ohjataan kuumaan säiliöön. Öisin lämmennyt jäähdytysvesi kiertää mustista säteilevistä paneeleista koostuvaa kenttää. Vesi jäähtyy säteilemällä yötaivaalle ja konvektiolla ympäröivään ilmaan. Yötaivasjäähdytyksen hyvänä puolena on se, että se ei kuluta vettä, vaikka se vaatiikin suuret vesisäiliöt. Teknologia on vielä kehitysvaiheessa, mutta simulointien mukaan talvella jäähdytyksestä voitaisiin toteuttaa 100 % ja kesällä 80 – 90 %./11 s. 32/

5.7 Keskitävän aurinkoenergian hyödyt ja haitat

Suurin hyöty CSP-tekniikasta, kuten kaikista muistakin uusiutuvista energiamuodoista on ilmastonmuutoksen hillintä. Energian tuotannon päästöt laskevat, kun polttoaineena toimii fossiilisten polttoaineiden sijaan aurinkoenergia, kuten CSP-voimalaitoksissa. CSP-tekniikalla voidaan tuottaa sähköä kulutuksen mukaan tai myöhempää tarvetta varten, erottamalla aurinkolämmön keräys ja sähkön tuotanto lämpövarastolla. Varastointiratkaisut ovat kuitenkin vielä taloudellisesti varsin iso investointi, ja kaikille CSP-tekniikoille ei vielä ole teknisesti järkeviä varastointiratkaisua./53/

Uudet tutkimuksien mukaan CSP-voimalaitoksilla voi olla jopa myönteinen vaikutus maaperän eroosioon. Tietokonesimulaatiolla saatu tulos osoitti että jos aurinkokentän rakenteet, kuten heliostaatit, toimisivat tuulen virtausten rikkojina, tämä voisi suojata maaperää eroosiolta, koska silloin ne hidastaisivat tuulen nopeutta niin paljon, ettei maaperän irtoainesten, kuten hiekan liikkeelle saamisen kynnyksarvo ylittyisi. Myös maaperän lämpötilan todettiin laskevan 0,5 – 4 °C aurinkokentän rakenteiden varjostuksen johdosta ja ilman virtauksesta niiden alla./54/

CSP-voimalaitokset tuovat myös runsaasti paikallisia hyötyjä mm. työllistämällä ihmisiä.

CSP-laitokset tarvitsevat valtavia maa-alueita, että laitoksen rakentaminen ja käyttäminen olisi kannattavaa. Lisäksi rakennettavien alueiden tulisi sijaita sellaisella leveysasteilla, että auringon suora säteilyarvo (DNI), olisi riittävän korkea ympäri vuoden. Usein nämä alueet ovat kuitenkin hiekka-aavikoita, aroja, vähäsateisia tai vesittömiä alueita, joilla ihmisen ei ole kelvollista asua. Tämä aiheuttaa sen, että laitosten sijainti on asuueilta alueilta niin syrjässä tai vaikeassa maastossa, että kustannukset sähköenergian siirtoon käytettäväksi kasvavat usein liian suuriksi.

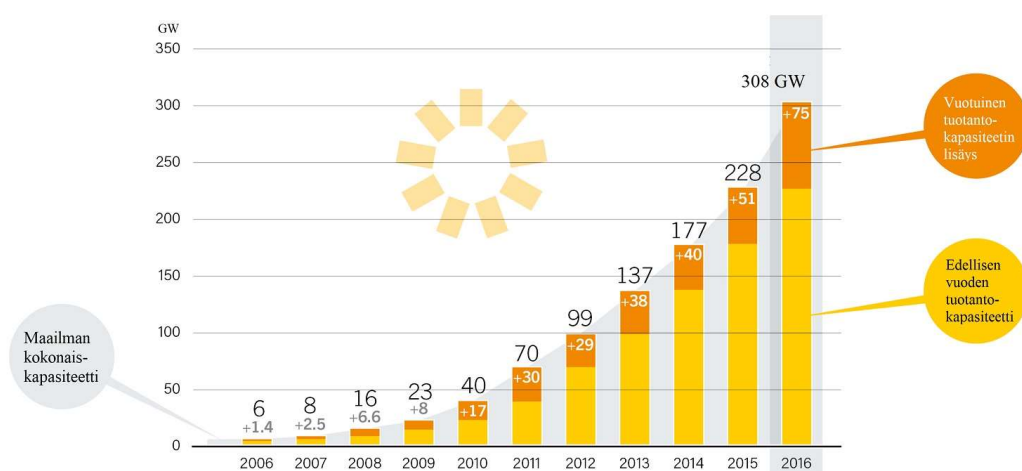
CSP-laitokset voivat aiheuttaa myös vaaraa eläimille, esimerkiksi linnuille, niiden lentäessä aurinkokentän poikki.

6 AURINKOENERGIAN KEHITYSNÄKYMÄT

Uusiutuvan energian käyttö korostuu jatkuvasti ja siihen vaikuttavia syitä on laajalti. Sähkön tuottaminen käy yhä kalliimmaksi, kun huomioidaan tiettyjen luonnonvarojen hidas, mutta väistämätön väheneminen. Ilmastonmuutos, ja niitä koskevat rajoitteet, tekevät yhä houkuttelevammaksi siirtyä hyödyntämään luonnon itsestään tarjoamia keinoja tuottaa sähköä, kuten aurinkoenergia.

Kansainvälisen energiajärjestön (IEA, International Energy Agency) mukaan aurinkoenergiatuotantoa oli maailmanlaajuisesti asennettuna 308 GW vuoden 2016 lopussa. Huomattava trendi on, että aurinkoenergian kasvu vielä edellisen vuoden ennätyskellisen kasvun jälkeen oli todella merkittävää. Asennetun aurinkoenergiakapasiteetin lisäys oli 75 GW, eli aurinkoenergian maailmanmarkkinoiden kasvu oli huima 25 % (Kuva 24). Kiina oli suurin aurinkoenergian tuottajamaa noin 80 GW energiantuotannolla./55/

Aurinkoenergian vuotuinen tuotantokapasiteetti maailmanlaajuisesti, 2006 - 2016



REN21 *Renewables 2017 Global Status Report*



Source: IEA PVPS.

Kuva 24. Aurinkoenergiakapasiteetin kasvu maailmassa vuodesta 2006 – 2016. Kasvutrendi on selkeästi nousujohteinen./55/ (muokattu)

Tällä hetkellä suurin osa aurinkoenergian tuotannosta tulee PV-voimalaitoksista. Vain noin 1,5 % kaikesta aurinkoenergiatuotannosta tulee CSP-laitoksista, mutta teollisuudenala on vasta kehittymässä ja pääsemässä kasvuvauhtiin. Vuodesta 2010 lähtien CSP-kapasiteetti on viisinkertaistunut vuoden 2016 loppuun mennessä, /55/ ja kasvutahti näyttää kiihtyvän edelleen. Tällä hetkellä rakenteilla ja suunnitteilla on 5 GW uutta kapasiteettia. /56/

6.1 Aurinkopaneelien kehitysnäkymät

Aurinkopaneelien teknologinen kehitys ja tuotannon kasvu on laskenut merkittävästi aurinkopaneelien hintoja viimeisten vuosien aikana. Kehitys tulee jatkumaan todennäköisesti saman suuntaisena vielä tulevinakin vuosina. Nykyisten aurinkopaneelien hyötysuhteet ovat jatkuvasti parantuneet ja uusia materiaaleja kehitetään lisää markkinoille, jotka kilpailevat kustannus- ja tuotto-suhteessa nykyisten tuotteiden kanssa. Aurinkopaneelijärjestelmän komponenttien hintojen jatkuva lasku ja hyötysuhteen positiivinen kehitys laskee myös tuotetun sähkön kilowattituntihintaa. Hajautettu tuotanto tulee myös lisääntymään ja se luo tarpeita kehittää uusia ansaintalogiikkoja ja liiketoimintamalleja. Uudet toimintatavat luovat usein myös tarpeita kehittää markkinoille uusia laiteratkaisuja ja palveluja. /25 ss. 102-103/

Sää on merkittävä asia aurinkopaneelien tuotannon kapasiteetin kannalta ja siksi se luo tarvetta varastointitekniikoiden kehittämiseen ja rakentamiseen sähköverkon toiminnan ja kapasiteetin kannalta. Sähkön varastointiin on olemassa monia erilaisia teknologioita. Yleinen ongelma varastoinnissa on kuitenkin sen kalleus, johon on pakko löytää edullisempia ja tehokkaampia ratkaisuja, jotta aurinkosähkön hyötysuhde ja ennen kaikkia toiminnallisuus säästä riippumatta, saataisiin nousemaan riittävän korkealle tasolle. /25 s. 103/

Energiaa varastoidaan tulevaisuudessa luultavasti monella eri tavalla, kyseessä voi olla hajautettu ratkaisu esimerkiksi sähköautojen akut tai

keskitetty ratkaisu esimerkiksi aurinkopaneelivoimalan akku tai jokin tulevaisuuden "superakku", lähellä voimalaitosta. /57/

Lisäksi tapa, jolla käytämme aurinkokennoilla tuotettua energiaa jokapäiväisessä elämässämme, laajenee teknologian ja sovellusten kehittymisen sekä uusien teknologioiden ja sovellusten myötä. Tälläkin hetkellä pieniä aurinkokennoja on käytössä hyvin yksinkertaisissa ja jokapäiväisissä ratkaisuissa kuten taskulampuissa, virtalähteissä tai vaatekappaleissa. Tulevaisuudessa saamme tottua aurinkoenergian tuotantoon teillä, vesialtaissa, yleisissä kulkuneuvoissa, tai jopa lentokoneissa. /57/

Tutkijat uskovat, että aurinkokennojen kokonaishyötysuhde voidaan nostaa viiden vuoden sisällä jopa 70 prosenttiin. Kennot muuttaisivat sähköksi yli 50 prosenttia niihin osuvasta auringon säteilystä. Loppu energia otettaisiin talteen lämpönä kennoja jäähdyttävästä vedestä. Vertailuna nykyiset kaupalliset piiaurinkokennot, jotka keräävät talteen ja muuttavat sähköksi 15 – 17 prosenttia pintaan osuneesta auringonpaisteesta. /58/

Hurjan hyötysuhteen salaisuutena ovat uudet, gallium – arsenidi -pohjaiset materiaalit, aurinkokennojen kerrostettu rakenne, keskittävä tekniikka ja lämmön talteenotto jäähdytysvedestä. Jotta auringon säteilystä saisi talteen mahdollisimman paljon, tarvitaan kerrosrakenne, jossa samaan kennoon kerrostetaan päällekkäin useampia eri materiaaleja ja pn-liitoksia. Eri kerrokset nappaavat talteen valon eri aallonpituuksia, jolloin kaikki fotonit, joiden energia on tiettyä raja-arvoa korkeampi, tulevat hyödynnetyksi. Suurienergiset ultravioletin säteilyn fotonit jäävät päällimmäiseen liitokseen, matalampienergiset jatkavat syvemmälle ja alin liitos nappaa infrapuna-alueen fotonit. Fotoneja, joiden energia-arvot ovat matalampia, ei ainakaan vielä pystytä hyödyntämään ja ne menevät hukkaan. Toistaiseksi tutkijat ovat onnistunut rakentamaan kolmiliitoskennoja, mutta suunnitteilla on jatkaa kehitystyötä useamman, jopa kahdeksan kerrosrakenteen aikaan saamiseksi. /58/

Toinen keino nostaa hyötysuhdetta on keskittäminen. Valo ohjataan linsseillä tai peileillä hyvin pienelle alueelle, tekniikka on käytännössä sama kuin keskittävässä

aurinkovoimassa, mutta lämpökeräimen sijaan säteet keskitetään aurinkopaneelisiin. Aurinkokenttä, jossa peilit tai heliostaatit sijaitsevat, voi olla suuri, mutta usean jalkapallokentän kokoinen aurinkokennoala supistuu muutamiiin kymmeniin neliömertreihin. Tämä vaikuttaa myös hintaan. Vaikka uudet materiaalit ovat kalliimpia kuin pii, kokonaishinta voi olla pienempi, koska tarvittavat raaka-ainemäärät ovat paljon pienempiä. Keskittämällä saadaan aurinko paistamaan kennolle jopa 1500-kertaisella teholla, tällöin kennon hyötysuhde voi nousta yli 40 prosenttiin. Osa auringon energiasta muuttuu väistämättä lämmöksi, jolloin kenno myös kuumenee. Tehokkaan jäähdytyksen tarve nousee silloin esille, mutta tutkijoiden mukaan passiivinen jäähdytys riittää. Se voitaisiin toteuttaa kennojen takana olevia metallirakenteita hyödyntäen, jolloin niihin johdettaisiin jäähdytysneste, esimerkiksi vesi. Samalla saataisiin kuumaa vettä, jonka lämpöenergia voidaan käyttää hyödyksi mm. varastoimalla myöhempään käyttöön tai höyryturbiinin kautta sähköntuotantoon. Näin kokonaishyötysuhde voi nousta 60 – 70 prosenttiin. Tämä hybriditekniikka on tällä hetkellä kaikkein eniten nousussa oleva tekniikka ja nykyisin sekä lähitulevaisuudessa lähes kaikki aurinkopaneelivoimalat tullaan rakentamaan kyseistä tekniikkaa hyödyntäen. /58/

6.2 Keskittävän aurinkoenergian kehitysnäkymät

Keskittävän aurinkoenergian teknologinen kehitys on jäänyt selkeästi aurinkokennojen kehityksen varjoon. Syinä ovat muun muassa CSP-voimalaitoshankkeiden suuret taloudelliset sijoitukset ja niistä odotettavat tuotot, jotka ovat CSP-teknologiassa huomattavasti pidemmälle aikavälille laskettavia kuin paneelivoimaloissa sekä teknologian aiheuttamat rajoitteet, jotka kohdistuvat alueellisiin ja poliittisiin syihin. CSP-laitosten optimaalisimmat sijainnit eivät alueellisesti tai poliittisesti ole kaikkein ihanteellisimpia ympäristöjä voimalaitosprojekteille. /11 ss. 7-8/

CSP-tekniikassa on kuitenkin paljon asioita, jotka puoltaa sen käyttöönottamista ja kehittämistä. Tärkeimpinä asioina voidaan pitää sen energian

varastointijärjestelmää, joka mahdollistaa laitosten ylhäälläoloajan jatkumisen myös pilvisellä säällä tai yöllä, sekä myös CSP-voimalaitoksen perusrakenteen sähköntuotannossa, joka mahdollistaa usean eri polttoainevaihtoehdon käytön turbiinin ja generaattorin pyörittämiseen. /59/ Tämä lisää hybridivoimaloiden rakentamisen kannattavuutta ja hyötysuhteen kasvamista. Sen takia moni uusista ja rakenteilla olevista laitoksista onkin hybridi-mallisia, jolloin laitoksen toisena mahdollisena energianlähteenä toimii jokin muu polttoaine, kuten esimerkiksi biodiesel tai biokaasu tai huonommassa vaihtoehdossa fossiilinen polttoaine kuten diesel./60/

Tärkeimmät tutkimus- ja tuotekehityskentät CSP-teknologiassa ovat oikeastaan kaikki osa-alueet, joita CSP-voimalaitoksissa voi olla, kuten keräilykentän järjestelmien hallinta, energian varastointijärjestelmät lämmönsiirtonesteelle, korkean tarkkuuden heliostaattiteknologia, korkean lämpötilan absorbointiteknologia, lauhduttimien suunnittelu ja valmistus, tyhjiöputken valmistusprosessi jne. Kaikkein tärkeimpänä yksittäisenä kehityskohteena on nähtävillä kuitenkin lämmönsiirtoneste ja sen ominaisuuksien saaminen mahdollisimman korkeiksi etenkin nesteen lämpöarvojen sekä varastoinnin osalta. /61/

CSP-laitosten lämmönsiirtonesteissä on lisääntynyt mielenkiinto hiilidioksidiin sen ylikriittisessä tilassa (sCO₂), koska sillä on erinomaiset lämpöominaisuudet, sitä löytyy runsaasti ja edullisesti sen normaalissa faasimuodossa, ja se on sekä ei-räjähtävä että ei-palava aine. Sen kriittinen tila saavutetaan helposti sen maltillisen kriittisen paineen (7,40 MPa) ja alhaisen kriittisen lämpötilan (31 °C) ansiosta. CSP-laitoksen korkeammat hyötysuhteet ovat mahdollisia käyttämällä ylikriittistä hiilidioksidia, koska se kestää korkeita lämpötiloja ilman hajoamista ja vaatii vähemmän paineen lisäystä lähellä kriittistä pistettä. Lisäksi nesteen ominaisuuksien muutos, kuten tiheys ja erityisesti lämpötila lähellä kriittistä faasimuutospistettä, tarjoaa mahdollisia etuja joidenkin CSP-järjestelmien kannalta. Tutkijat ovat tutkineet erilaisia analyysejä ylikriittisen hiilidioksidin tehosykleistä, joista saatiin selville että Rankine-järjestelmien, matalalämpöisten

lämmönlähteiden ja vakaan tilan olosuhteissa toimivien järjestelmien osalta voidaan kasvattaa hyötysuhdetta 5 – 10 %./62/

CSP-voimalaitosten hiljalleen lisääntyvä osuus kaikesta aurinkoenergiasta on hyvä signaali teknologiaan sijoittaville tahoille sekä kannustimena sen tutkijoille. Jo toiminnassa olevien ja rakenteilla sekä suunnitteilla olevien järjestelmien lisääntyessä se kasvattaa pakosta myös yhteistyötä eri kansojen kesken, saattaisi vähentää poliittisia jännitteitä sekä lisätä paikallisesti työllisyyttä. Koska CSP-voimalaitokset ovat luonteeltaan keskitetyn energian tuotantolaitoksia, niiden sijainti johtuen korkean auringonsäteilyn tarpeesta on usein kehittyvissä maissa, toisi se aurinkoenergian tuottajavaltiolle mahdollisia tuloja sähköenergian viennistä muihin valtioihin. Samalla vähäpäästöisen sähkön osuus maailmassa kasvaa kasvamistaan. /59/

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähköenergian tuotannossa on meneillään maailmanlaajuinen murros ensisijaisena tavoitteenaan ilmastonmuutoksen hidastaminen. Vaikka teknologia on edelleen voimakkaassa kehitysvaiheessa ja käyttöönotto sekä kapasiteetin kasvu ovat kasvaneet vuosi toisensa jälkeen, on aurinkosähköstä jo joissain tapauksissa, kuten Intiassa, tullut kannattavampi energiamuoto markkinaehtoisestikin.

Aurinkosähköjärjestelmien kehitys etenee tällä hetkellä erittäin nopeasti. Esimerkiksi Euroopassa, USA:ssa ja Kiinassa tehdään paljon tutkimustyötä. Jatkuvasti etsitään uusia aurinkokennoteknologioita. Ensimmäisen- ja toisen sukupolven kennoja kehitetään edelleen hyötysuhteen parantamiseksi ja kennojen tuotantoteknisiä ratkaisuja parannetaan valmistuskustannusten minimoimiseksi. Monet erilaiset rakennuksiin integroitavat aurinkosähköjärjestelmät ovat saavuttamassa yhä suurempaa suosiota. Yksi syy tähän on uusien materiaalien mukanaan tuoma monipuolisuus, joustavuus ja esteettisyys. Laitteet eivät ole enää pelkästään ankeita levyjä, jotka on kiinnitetty rakennuksen katolle. Nyt on saatavilla monia erityyppisiä aurinkopaneeleja ja löytyy joustavia ohutkalvopaneeleita, joita voidaan asentaa kaareville pinnoille. Perinteisten ikkunoiden tilalle voidaan asentaa aurinkosähköä kerääviä lasipintoja, joista näkee läpi yhtä hyvin kuin normaalistakin ikkunasta. Julkisilla paikoilla löytyy langattoman verkon tukiasemia tai mobiililaitteiden latauspisteitä jotka saavat energian aurinkopaneeleita hyödyntäen. Kulkuneuvoja voidaan päällystää aurinkosähköä keräävillä pinnoitteilla ja niin edelleen. Listaa voisi jatkaa loputtomiin ja koko ajan tulee uusia ja kehittyneempiä sovelluksia sekä teknologioita aurinkosähkön käyttöön. Tulevaisuuden näkymät tällä alueella ovatkin todella hyvät.

Suuret aurinkosähköpuistot tulevat olemaan tärkeässä roolissa tulevaisuudessa uusiutuvan energian lähteenä, vaikka hajautettu energiantuotanto varmasti on tulevaisuudessa tärkein energian tuotantotapa. Tutkimustyö keskittävien järjestelmien osalta on käynnissä monissa tutkimuslaitoksissa joka puolella

maailmaa, ja uusia järjestelmien hyötysuhdetta parantavia ratkaisuja otetaan käyttöön jatkuvasti.

Tulevaisuuden kehityssuunnista aurinkoenergiamarkkinoihin tulee vaikuttamaan myös digitalisaation kehittyminen, jolloin tiedon hankinta on entistä helpompaa, joka auttaa myös projektien sisäisessä viestinnässä. Lisäksi 3D-tulostus ja robotisaatio tuovat oman lisänsä komponenttien kehitykseen, asennukseen ja käyttöön.

Aurinkopaneelivoimalat tarvitsevat useimmiten suuret alueet käyttöönsä, että niiden kannattavuus olisi mahdollisimman hyvä. Tämä tarkoittaa paljon kustannuksia maapinta-alan ostamisen tai vuokraamisen sekä yleisen infran rakentamisen suhteen. Tämän takia esimerkit maailmalta puhuvat sen puolesta, että aurinkoenergian tuotantoalueiden suunnittelua kannattaisi mahdollisimman paljon ohjata alueille, jotka ovat aiemmin olleet muussa käytössä, tai mahdollisuuksien mukaan olisivat edelleen käytössä. Tämänkaltaiset ratkaisut helpottaisivat usein järjestelmien taloudellista ja osin myös teknistä puolta muun muassa infran rakentamisen suhteen.

Keskittävä aurinkovoima on muihin uusiutuviin energianlähteisiin nähden hyvä vaihtoehto, sillä sen kanssa voidaan käyttää lämmön varastointia ja siten vähentää energiantuotannon jaksottaisuutta. CSP-voimalaitos on myös hyvin helppo yhdistää toisen polttoaineen kanssa toimivaksi hybridiksi, jolloin sen toimintavarmuutta ja hyötysuhdetta saadaan edelleen kasvatettua. CSP-tekniikka on vielä nykyisellään melko kallis tuotantomuoto verrattuna esimerkiksi aurinkokennoihin ja fossiilisiin polttoaineisiin, mutta sen kustannukset tulevat kuitenkin alenemaan seuraavien vuosikymmenien aikana teknologian kehittymisen ja massatuotannon ansiosta.

CSP-voimalaitoksia voidaan kannattavasti rakentaa alueille, joilla auringon suoran säteilyn osuus on yli 2000 kWh/m²/v. Alueet ovatkin usein aavikkoa tai täysin asumaton ja erittäin vaikeakulkuista erämaata. Tämä asettaa luonnollisesti suuria rajoitteita ja haasteita voimalaitoksen rakentamiselle sekä kannattavuudelle.

Lisäksi juuri nämä alueet ovat usein ns. kehittyviä maita sekä poliittisesti ja taloudellisesti epävakaita.

Auringon säteilyä keskitetään neljällä eri tekniikalla, joista kehittynein sekä käytetyin tekniikka on paraboliset lautaset, joita käytetään suurimmalla osalla nykyisistä voimalaitoksista. Aurinkotornien osuus on kuitenkin lisääntymässä, sillä niillä päästään parempiin hyötysuhteisiin. Suurin osa nykyisistä CSP-voimalaitoksista on teholtaan 100 – 200 MW. Rakenteilla on kuitenkin yli 400 MW laitoksia ja todennäköisesti ne tulevat yleistymään tulevaisuudessa, tekniikan kehityksen ja kustannusten laskun myötä.

Kaikkien uusiutuvien energian tuotantomuotojen, ei pelkästään aurinkoenergian ongelmana on niiden riippuvuus säästä. Energian varastointi on ratkaisu tähän ongelmaan, joka tarkoittaa sitä, että energia saadaan varastoitua joka suhteessa tehokkaasti riittävän pitkäksi aikaa. Vielä tällä hetkellä ja lähitulevaisuudessa ongelmaan ei ole olemassa hyvää ratkaisua, mutta kun tähän saadaan teknologian, sovelluksen tai jonkin uuden ilmiön kautta ratkaisu, voidaan sanoa että energiavallankumous on tapahtunut.

Nähtäväksi jää, onko uusiutuvista energiantuotantomuodoista aurinkoenergian hyödyntäminen tulevaisuudessa eniten lisääntyvä energiantuotantomuoto vai ottaako sen paikan jokin muulla keinolla tuotettu uusiutuva energia.

LÄHTEET

/1/ Advantages & Disadvantages Of Solar Power. CleanTechnica. 08. 10. 2013. Viitattu: 03. 02. 2018. <https://cleantechnica.com/2013/10/08/advantages-disadvantages-solar-power/>.

/2/ Aurinko. Ursa. Viitattu: 03. 02. 2018. <https://www.ursa.fi/extra/kosmos/a/aurinko.html>.

/3/ Aurinko-opas. Aurinkoteknillinen yhdistys Ry. 2018. Viitattu: 02. 02. 2018. http://www.aurinkoteknillinenyhdistys.fi/?page_id=148.

/4/ Aurinkoenergiaa. Aurinkoenergiaa. 2017. Viitattu: 08. 02. 2018. <http://www.aurinkoenergiaa.fi/aurinkoenergiaa.html>.

/5/ Aurinkoenergian historiaa. Finlumo. 2016. Viitattu: 04. 02. 2018. <http://www.finlumo.fi/aurinkoenergian-historiaa/>.

/6/ Aurinkoenergialla tuotetaan Intiassa sähköä jo halvemmalla kuin hiilellä. Tiedebasaari. 29. 04. 2016. Viitattu: 05. 02. 2018. <https://tiedebasaari.com/2016/04/29/>.

/7/ Hakkarainen, Elina. Master Thesis of Elina hakkarainen Comparison of Different Concentrated Solar Power Collector Designs. Lappeenranta University of Technology. 2015. Viitattu: 15. 01. 2018. http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/103063/Master%E2%80%99s%20Thesis_Elina%20Hakkarainen.pdf?sequence=2.

/8/ Lindfors, Peter. Aurinkosähkövoimalaitosten kustannusrakenteet ja kehitystrendit. Theseus. Metropolia Ammattikorkeakoulu, 09. 05. 2017. Viitattu: 05. 02. 2018. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/127274/Lindfors_Peter.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

/9/ Aurinkokenno. Wikipedia. Viitattu: 05.02.2018 <https://fi.wikipedia.org/wiki/Aurinkokenno>.

- /10/ Paneelit. Suntekno. 15. 04. 2010. Viitattu: 01. 02. 2018.
<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>.
- /11/ Hakkarainen, Janika. Kiertoprosesseihin perustuvat aurinkovoimalat. Doria. 2017. Viitattu: 16. 02. 2018.
http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134029/Kandidaatinty%C3%B6_Hakkarainen_Janika.pdf?sequence=2.
- /12/ Mäkinen, Jukka. Aurinkosähkö osana energiamurrosta, PV-voimalan suunnittelijan opas, suunnittelu – toteutus - ylläpito. Jamk. Jamk, 05. 10. 2017. Viitattu: 06. 02. 2018. <https://www.jamk.fi/globalassets/tapahtumakalenteri--events/teknologian-tapahtumat/aurinkosahkojarjestelmat-5.10.2017/aurinkosahko-osana-energiaturrosta-pv-voimalan-suunnittelijan-opas-ii.pdf>.
- /13/ Solar cell, module and array. Samlexsolar. Viitattu: 23.. 04. 2018.
<http://www.samlexsolar.com/learning-center/solar-cell-module-array.aspx>.
- /14/ Jaatinen, Krista. Aurinkovoimaloiden rakentamisen tehostaminen. TUT. Tampereen teknillinen yliopisto, 20. 06. 2016. Viitattu: 10. 02. 2018.
<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/24192/Jaatinen.pdf?sequence=3>.
- /15/ Boxwell, M. P. Solar Electricity Handbook. Coventry, UK : Greenstream, 2012.
- /16/ Kiiveri, Janina. Aurinkosähkövoimalan suunnittelu. Theseus. Lapin AMK, 12. 11. 2014. Viitattu: 30. 03. 2018.
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/82405/Kiiveri_Janina.pdf?sequence=1.
- /17/ Cell types. Bigcommerce. Viitattu: 21. 02. 2018.
https://cdn3.bigcommerce.com/s-3yc5xwvk/product_images/uploaded_images/cell-types.jpg.

- /18/ Edulliset aurinkokennot tulevat kaikkialle – jopa vaatteisiin. Suomen akatemia. 12. 01. 2018. Viitattu: 30. 03. 2018. <http://www.aka.fi/fi/tietysti/teemat/teema-millennium-innovaatioista-elamanlaatua/edulliset-aurinkokennot-tulevat-kaikkialle--jopa-vaatteisiin/>.
- /19/ Aaltonen, Kari. Aurinkopaneelin käyttö julkisivumateriaalina. Theseus. Turun Ammattikorkeakoulu, 12. 06. 2017. Viitattu: 30. 03. 2018. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/132321/Aaltonen_Kari.pdf?sequence=1.
- /20/ Aurinkosähköteknologiat. Motiva. 19. 09. 2017. Viitattu: 02. 04. 2018. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat.
- /21/ Auringosta sähköä. Motiva. 23. 08. 2017. Viitattu: 02. 04. 2018. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa.
- /22/ Opas sähkön pientuottajalle. Motiva. 04. 2012. Viitattu: 02. 03. 2018. https://www.motiva.fi/files/5724/Opas_sahkon_pientuottajalle_2012.pdf.
- /23/ Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon. Energiateollisuus. 27. 04. 2016. Viitattu: 23. 04. 2018. https://energia.fi/files/1249/tekninen_liite_1_-_enintaan_100_kVA_PAIVITETTY_20160427.pdf.
- /24/ Paavola, Minna. Verkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien potentiaali Tampereella. Tampereen teknillinen yliopisto. 13. 05. 2013. Viitattu: 03. 04. 2018. <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21607/Paavola.pdf?sequence=1>.
- /25/ Ala-Myllymäki, Esko. Aurinkodemo. Merinova. 2016. Viitattu: 23. 03. 2018. https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2016/09/aurinkodemo_loppuraportti.pdf.

/26/ STilted Surface. Green Rhino Energy. 2016. Viitattu: 28. 03. 2018.
<http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/tiltedsurface.php>.

/27/ Sähköenergian varastointi. STEK. Sähköturvallisuuden edistämiskeskus ry.
Viitattu: 29. 03. 2018.
https://www.stek.fi/Perustietoa_sahkosta/fi_FI/Sahkoenergian_varastointi/.

/28/ Olli, Anu-Maria. Sähkön varastointi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto -
LUT. 27. 05. 2015. Viitattu: 29. 03. 2018.
https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/105117/Sahkon_varastointi_KANDI_AMO.pdf?sequence=2.

/29/ Aurinkovoima. Vattenfall. Viitattu: 29. 03. 2018.
<https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/aurinkovoima/>.

/30/ Lemmetti, Ville-Veikko. Uusiutuvan Energian Kausivarastointi. Theseus.
Satakunnan Ammattikorkeakoulu, 11. 2014. Viitattu: 19. 02 2018.
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/84395/Lemmetti_Ville-Veikko.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

/31/ Concentrated Solar Power (CSP) a Sustainable Green Energy Solution, to
Witness a CAGR of 15.3% during 2017-2023. Nasdaq globeNewswire. Viitattu:
09. 04. 2018. <https://globenewswire.com/news-release/2017/12/15/1262834/0/en/Concentrated-Solar-Power-CSP-a-Sustainable-Green-Energy-Solution-to-Witness-a-CAGR-of-15-3-during-2017-2023.html>.

/32/ Keskittävä aurinkovoima. Wikipedia. 09. 09. 2016. Viitattu: 29. 03. 2018.
https://fi.wikipedia.org/wiki/Keskitt%C3%A4v%C3%A4_aurinkovoima.

/33/ TSK Flagsol. Parabolic Troughs. Viitattu: 10. 03. 2018.
<http://www.flagsol.com/flagsol/english/alttechnology-alt/solar-thermal-power-plants-alt/parabolic-troughs-alt/parabolic-troughs.html>.

/34/ Energiavallankumous. Greenpeace.org. Greenpeace, 2013. Viitattu: 02. 04.
2018.

<http://www.greenpeace.org/finland/Global/finland/Dokumentit/2013/EnergiaVallankumous.pdf>.

/35/ Lovegrove Keith & Stein Wes. Concentrating solar power technology. Principles, developments and applications. s.l. : Woodhead Publishing, 2012.

/36/ Günther Matthias, Joemann Michael & Csambor Simon. Parabolic Trough Technology. StudyLib. Viitattu: 10. 03. 2018. <http://studylib.net/doc/18343577/parabolic-trough-technology>.

/37/ Sciencedirect. Viitattu: 02. 04. 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S111001681600034X#f0005>.

/38/ Ian Vincent Poole. Concentrating solar power in South Africa. Stellenbosch University. 03 2017. Viitattu: 23. 03. 2018. <http://www.crses.sun.ac.za/files/research/completed-research/eppei/IPoole.pdf>.

/39/ Helioscsp. Concentrated Solar Power tower installation costs drop on heliostat innovations. 2017. Viitattu: 23. 03. 2018. <http://helioscsp.com/concentrated-solar-power-tower-installation-costs-drop-on-heliostat-innovations-pre-assembly/>.

/40/ solar-energy-technology. eswrenewableenergystudy. Viitattu: 23. 03. 2018. <https://eswrenewableenergystudy.wordpress.com/2012/06/07/solar-energy-technology/>.

/41/ Operation and Monitoring of Parabolic Trough CSP Plant. scholarcommons. 11. 04 2015. Viitattu: 04. 04. 2018. <http://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=7087&context=etd>.

/42/ Israel to build world's tallest solar tower in symbol of renewable energy ambition. Independent. 05. 01. 2017. Viitattu: 02. 04. 2018. <https://www.independent.co.uk/news/world/middle-east/israel-solar-tower-power-energy-renewable-tech-ambitions-a7510901.html>.

/43/ Renewable. CSP tower. 07. 2017. Viitattu: 11. 04. 2018. <https://renewsable.net/wp-content/uploads/2017/07/1500382517csp-tower.jpg>.

/44/ The bright future of solar powered factories. Resilience. 26. 07. 2011. Viitattu: 10. 04. 2018. <http://www.resilience.org/stories/2011-07-26/bright-future-solar-powered-factories/>.

/45/ DLR Researchers Commission High Temperature Receiver with Ceramic Particle Storage. solarpaces. IEA, 14. 11. 2017. Viitattu: 10. 04. 2018. <http://www.solarpaces.org/dlr-researchers-commission-high-temperature-receiver-ceramic-particle-storage/>.

/46/ b4-site-22 jpeg. CSPWorld. Viitattu: 11. 04. 2018. <http://cspworld.org/sites/default/files/map/images/3-ed8380ec9b8ced9895-ed839cec9691ec97b4-site-22.jpeg>.

/47/ Linear Fresnel Technology. Energy-Science. 05. 2017. Viitattu: 10. 04. 2018. <http://www.energy-science.org/bibliotheque/cours/1361468614Chapter%2006%20Fresnel.pdf>.

/48/ National laboratory of the U.S. Department of Energy. Concentrating Solar Power Projects. Viitattu: 10. 04. 2018. https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_country_detail.cfm/country=CN.

/49/ Tistory. Viitattu: 11. 04. 2018. <http://cfile23.uf.tistory.com/image/151B1C3A50F700062BE66B>.

/50/ Concentrating solar power. IRENA - International Renewable Energy Agency. 06. 2012. Viitattu: 10. 04. 2018. [http://studylib.net/doc/18069518/concentrating-solar-power---the-international-renewable-e....](http://studylib.net/doc/18069518/concentrating-solar-power---the-international-renewable-e...)

/51/ Concentrated Solar Thermal Technology Part 1. PrashantKarhade. 2015. Viitattu: 11. 04. 2018. <http://prashantkarhade.com/concentrated-solar-thermal-technology-part-i/>.

/52/ A Review of Concentrated Solar Power in 2014. Engineering. 04. 01. 2015. Viitattu: 14. 04. 2018.

<https://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/9286/A-Review-of-Concentrated-Solar-Power-in-2014.aspx>.

/53/ Voimalaitosten päästöistä vähennettävissä kolmannes aurinkovoiman avulla. VTT. Valtion Teknologian Tutkimuskeskus, 09. 05. 2017. Viitattu: 23. 04. 2018. [http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/voimalaitosten-päästöistä-vähennettävissä-kolmannes-aurinkovoiman-avulla](http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/voimalaitosten-paastöistä-vähennettävissä-kolmannes-aurinkovoiman-avulla).

/54/ Science for Environment Policy. European Commission. 22. 01. 2015. Viitattu: 24. 04. 2018. http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/environmental_impact_of_large_scale_concentrated_solar_power_400na2_en.pdf.

/55/ Global Status Report 2017. Renewable Energy Network for the 21st Century. IAE - International Energy Agency, 2017. Viitattu: 25. 04. 2018. <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>.

/56/ CSP Projects around the world. Solarpaces. 11. 2017. Viitattu: 25. 04. 2018. <http://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>.

/57/ Aurinkoenergian tulevaisuus. Vattenfall. Vattenfall, 10. 05. 2017. Viitattu: 28. 04. 2018. <https://corporate.vattenfall.fi/tietoa-energiasta/sahkon-jalammontuotanto/aurinkoenergia/aurinkoenergian-tulevaisuus/>.

/58/ Hyötysuhde voi kasvaa jopa 70%:iin – TUT kehittää supraurinkokennoja. Tekniikka&Talous -lehti. TUT, 24. 10. 2016. Viitattu: 28. 04. 2018. <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/hyotysuhde-voi-kasvaa-jopa-70-iin-tut-kehittaa-superaurinkokennoja-6593265>.

/59/ ilmastouutisia. CO2-raportti. 01. 09. 2010. Viitattu: 29. 04. 2018. http://co2-raportti.fi/?page=ilmastouutisia&news_id=2572.

/60/ CSP hybrids: Optimizing renewable steam production. PEI - Power Engineering International. 12. 09. 2015. Viitattu: 29. 04. 2018.

<http://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-23/issue-12/features/csp-hybrids-optimizing-renewable-steam-production.html>.

/61/ Jun Wang, Song Yang, Chuan Jiang, Yaoming Zhang & Peter D. Lund. Status and future strategies for Concentrating Solar Power in China. Energy Science and Engineering. Key Laboratory of Solar Energy Science and Technology in Jiangsu Province + School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, China + School of Science, Aalto University, Espoo, Finland, 28. 02. 2017. Viitattu: 29. 04. 2018. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ese3.154>.

/62/ Julian D. Osorio, Rob Hovsopian, Juan C. Ordonez. Dynamic Analysis of Concentrated Solar Supercritical CO₂-based Power Generation Closed-Loop Cycle. INL - Idaho National Laboratory, 01. 2016. Viitattu: 29. 04. 2018. <https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1357496>.

/63/ Ilmastonmuutos ja energia. slideshare.net. Energiateollisuus Ry, 08. 09. 2010. Viitattu: 12. 02. 2018. <https://www.slideshare.net/energiateollisuus/ilmastonmuutos-ja-energia>.

/64/ Solar Power in Africa. Wikipedia. Solargis. Viitattu: 19. 02. 2018. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_in_Africa#/media/File:SolarGIS-Solar-map-World-map-en.png.