

# Sähkön tuotanto aurinkoenergialla

Tämä teos on lisensoitu [Creative Commons Nimeä-JaaSamoin 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä](#).

Kari Iltanen  
24.10.2004  
kari.iltanen@smail.fi

Tekijänoikeudellinen kuva poistettu julkaisua varten 10.3.2020

## Sähkön tuotanto aurinkoenergialla

Sähköä voi tuottaa aurinkoenergialla ainakin kolmella eri tekniikalla; aion käsitellä aurinkokennoja sekä kertoa hieman ”aurinkolämpövoimalasta”; kolmas tapa on ”aurinkolämpökenno”, mutta sitä en aio käsitellä. Eri tyyppiset aurinkokennot ovat yleisin tapa tuottaa aurinkosähköä, sillä niiden avulla toteutettujen ratkaisujen mukautettavuus on omaa luokkaansa. Aurinkokennojen fysikaalinen perusta on valosähköilmiö, josta lisää myöhemmin. Aurinkokennojen ongelmina ovat toistaiseksi korkea hinta, huono hyötysuhde ja epävarmuus, mutta teknologia kehittyä vauhtia.

”Aurinkolämpövoimala” on oikeastaan jättimäinen kasvihuone, jossa auringon lämmittämä ilma nousee ylöspäin ja pyörittää generaattoreita. Voimalatyyppin hyvänä puolena on yksinkertaisuus, mutta ongelmana on tehokkaan voimalan vaatimien rakenteiden suuri koko, joten näitä voimaloita ei voi rakentaa kuin autiomaahan. Australia aikoo pystyttää ”aurinkolämpövoimalan”, jonka kasvihuoneen halkaisija olisi 7 km ja voimalatornin leveys 130 m sekä korkeus 1 km, kertoi NewScientist.com (2) syksyllä 2002. Japani ja USA ovat suunnitelleet lähettävänsä avaruuteen aurinkovoimaloita eli satelliitteja, joihin on kiinnitetty kilometrien pituisia aurinkopaneelijoita. Tuotettu sähkö siirrettäisiin maahan ilmeisesti mikroaalloilla tai IR-laserilla.

Aurinkokennot voidaan jakaa tyyppiltään kahteen luokkaan: piipohjaisiin ja ohutkalvotekniikkaan perustuviin kennoihin, jotka jakautuvat edelleen alaluokkiin. Piipohjaiset (toiminnallinen osa 100-300  $\mu\text{m}$ ) kennot eivät ole teollisuuden kannalta yhtä kiintoisia kuin ohutkalvotekniikkaan (toiminnallisen osan paksuus 1-10  $\mu\text{m}$ ) pohjautuvat kennot, sillä ohutkalvotekniikka vaatii vähemmän raaka-aineita ja on helpommin sovellettavissa massatuotantoon (4, s.241). Piitä, kuten muitakin aurinkokennojen puolijohteita, on olemassa useaa eri tyyppiä: yksi- ja monikiteistä sekä amorfista. Puolijohteen ominaisuudet, kuten kiteen koko ja rakenne riippuvat aineen tyyppistä. Yksikiteisen piin atomit muodostavat erittäin säännöllisen kiderakenteen, jossa kiteen kokoon yli 10 cm. Niiden materiaalien, jotka koostuvat useista pienemmistä kiteistä, kiderakenne ei ole yhtä säännöllinen kuin yksikiteisten materiaalien, sillä kiteiden pienuuden vuoksi kiteissä olevien atomien tai molekyylien väliset vetovoimat tulevat merkityksellisiksi. (3)

Piiatomien elektronien käyttäytyminen piikiteissä on merkittävä tekijä tarkasteltaessa piikiteissä tapahtuvaa valosähköilmiötä, sillä kiteiden muodostumisperiaate on omalaatuinen. Joitakin ohutkalvokennoja voidaan kuvata n-i-p-rakenteella, missä n ja p ovat erityyppisiä puolijohteita, n-tyypin puolijohdteessa on ylimääräisiä elektroneja ja p-tyypissä on ylimääräisiä aukkoja. P/n-liitoksen yli muodostuu sähkökenttä, koska aukot ja elektronit vaihtavat jatkuvasti puolta eli kaksi puolijohdetta käyttäytyy pariston tavoin, joten niitä voidaan käyttää erilaisissa piireissä. Aurinkokennoahan voidaan pitää diodina. Amorfisen pii on erittäin mielenkiintoinen materiaali ohutkalvotekniikan kannalta ja sitä tutkitaan nykyisin erittäin paljon, sillä sen ominaisuudet tekevät siitä johtavan ohutkalvo-materiaalin. Amorfisen piin korvaajiksi ovat ehdolla nanokiteinen ja ”pienijyväinen” monikiteinen pii. (3)

Muita monikiteisessä ohutkalvotekniikassa käytettyjä materiaaleja ovat kupari-indiumdiselenidi ja kadmiumtelliuri, jonka n-i-p on kemiallisin merkein kirjoitettuna CdS-CdTe-ZnTe. Molemmat edellä mainituista materiaaleista absorptoivat tehokkaasti fotoneja ja ovat valmistusteknillisesti edeltäjiään parempia. Yksikiteisessä ohutkalvotekniikassa käytetään galliumarsenidiä, jolla on laaja soveltuvuusalue, sillä galliumarsenidi kestää erittäin hyvin säteilyäkin, mikä tekee siitä ihanteellisen materiaalin avaruussovellutuksiin. Galliumarsenidiä voidaan kerrostaa hieman erilaisin koostumuksin, jolloin saadaan parannettua tehokkuutta ja vietyä tehokkuus aina vain lähemmäksi ja lähemmäksi teoreettista rajaa. Ohutkalvotekniikkaan perustuvien kennojen tuotanto on yleensä laaja-alaista eli tapahtuu suurella pinta-alalla ja voidaan automatisoida; ohutkalvotekniikkaan perustuvat kennot ovat myös taipuisia. (3)

Aurinkokennojen hyötysuhde riippuu kennon valmistusmateriaalien ja -tekniikoiden lisäksi osittain kennoon tulevan säteilyn spekristä. Osa säteilystä heijastuu jo kennon pinnasta, minkä merkitystä pyritään vähentämään valitsemalla mahdollisimman heikosti heijastava materiaali pintaan. Myös säteilyn absorptoituminen pintakerrokseen heikentää hyötysuhdetta, minkä merkitys vähenee sopivilla materiaalivalinnoilla. Fysiikassa auringon säteilyn ajatellaan koostuvan pienistä massattomista hiukkasista, fotoneista, jotka sisältävät tietyn määrän energiaa. Aurinkokennoissa fotonit absorptoituvat p-tyyppin puolijohdeeseen vapauttaen elektroneja valosähköisessä ilmiössä, kuljettuaan ensin n-tyyppin kerroksen ja n/p-liitoksen läpi. (3)

Hyötysuhteen maksimoimiseksi pyritään säätämään p-tyyppin materiaalin ominaisuudet siten, että suurin osa elektroneista vapautuu mahdollisimman lähellä liitosta, jotta sähkökenttä kykenisi auttamaan elektronit kennon yläosan läpi ulkoiseen piiriin. Luonnollisesti fotonien absorptio pyritään saamaan mahdollisimman suureksi, ja siten vapauttaa mahdollisimman paljon elektroneja. Ja kaiken lisäksi elektronien yhtyminen aukkojen kanssa on estettävä mahdollisimman tehokkaasti. Näiden vaatimusten toteuttamiseksi äärimmäisen puhtaaseen puolijohdeeraaka-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 kennoon. (3)

Los Alamosin laboratorion tutkijat ovat onnistuneet kokeellisesti osoittamaan, että käyttämällä nanokiteistä puolijohdetta voidaan aurinkokennojen tuottaman sähkömäärää nostaa jopa 35 prosenttia nykyisestä. Hyötysuhteen nousun taustalla se, että nanokiteinen puolijohde vapauttaa useita elektroneja kerralla ja käyttää kennoon tulevien fotonien energian tarkemmin kuin aiemmin. Kennon peruseriaate ei muutu miksikään, vaan keksinnössä on kyse kuljettajien moninkertaistumisesta kutsutun ilmiön, joka on tunnettu 50-luvulta lähtien, hyödyntämisestä: kennoon tuleva fotonin irrottaa yhden elektronin puolijohdeesta, mutta ylimääräinen energia ei muutukaan lämmöksi vaan se siirtyy törmäysionisaatioksi kutsutussa prosessissa toiselle elektronille. Hyötysuhteen huomattava nosto edellyttää nanoluokan puolijohdeita, sillä perinteisin menetelmin tehokkuus lisääntyisi vain noin prosentilla. Käytännössä edellä kuvattu ilmiö tarkoittaa fotonin osumasta irtoavien elektronien määrän tuplaantumista. (1)

Valosähköilmiö havaittiin ensimmäisen kerran 1830-luvulla, mutta vasta 1880-luvulla ilmiötä alettiin ymmärtää edes jollain tasolla. Tuolloin Hertz havaitsi, että pinnan valaiseminen helpotti jonkin pakoa (vuonna 1887), tunnemme nämä oliot elektroneina. Tämä ajatus ei ollut mitenkään vallankumouksellinen, sillä pinnan potentiaalienergiavyöhykkeen olemassaolo tiedettiin jo. Edison havaitsi vuonna 1883, että materiaalin kuumentaminen erittäin korkeaan lämpötilaan vapautti elektroneja (Edison ei tuntunut elektronia, nykytietoa). Pienintä energiaa, jolla elektroni irtoaa kappaleen pinnasta kutsutaan irroitustyöksi ( $\phi$ ) ja se on materiaalivakio. Hertzin käyttämät kappaleet eivät olleet riittävästi kuumia, jotta elektroni olisi irronnut lämpöenergialla. (5, s. 1447-1450)

Vuosina 1886-1900 saksalaiset fyysikot Wilhelm Hallwachs ja Philipp Lenard tutkivat yksityiskohdallisesti valosähköilmiötä ja saivat melko odottamattomia tuloksia: monokromaattisen valon osuessa kennoon elektroneja ei irtoa ellei käytetyn valon taajuus ollut korkeampi kuin rajataajuus; käytetyn valon intensiteetti ei vaikuta pysäytysjännitteeseen (jännite, jolla elektronien kulku katodilta anodille saadaan estettyä). Klassinen fysiikka ei kyennyt selittämään valosähköilmiön ominaisuuksia, vaan siihen vaadittiin elektronia ja Planckin kvanttihypoteesia. Vuonna 1905 Einstein kehitti valosähköilmiölle tarkan analyysin olettamalla, että valon säde koostuu pienistä energiapaketeista, joita hän kutsui fotoneiksi tai kvanteiksi. Osuessaan kappaleen pintaan fotonit absorptoituu elektroniin, mutta vastoin klassisen fysiikan käsitystä energian siirtymisestä elektroni saa joko koko fotonin energian tai ei mitään. Jos absorptoituvan fotonin energia on suurempi kuin irroitustyö, elektroni voi paeta pinnalta. Suurempi intensiteetti taajuuden pysyessä samana tarkoittaa

sekunnissa emittoituvien elektronien määrän kasvua eli suurempaa jännitettä. Suurimmalla osalla metalleista rajataajuus on UV-alueella, mutta kaliumin ja cesiumin oksideilla rajataajuus on näkyvän valon alueella. (5, s. 1447-1450)

Useimmilla tehokkailla aurinkokennomateriaaleilla irroitustyön suuruus on välillä 1,0-1,6 eV. Fotonit, joiden energia on tällä välillä vapauttavat elektroneja tuottamatta ylimääräistä lämpöä. Useimmat aurinkokennot eivät pysty hyödyntämään viittäkymmentäviittä prosenttia auringon säteilyn energias-ta, sillä joko irroitustyö tai kuljettajien vaatima energia on suurempi kuin tulevien fotonien energia. Kennoissa käytettävät puolijohteet pyritään optimoimaan käyttämään hyödykseen mahdollisimman suurta osaa kennoihin osuvan säteilyn energiasta. 25 %:lla tulevista fotoneista on irroitustyötä pie-nempi energia, 30 % tulevasta energiasta kuluu kennon sisäisissä prosesseissa (syntyy esimerkiksi lämpöä ja valoa). Kennon tehokkuuteen vaikuttaa siis valmistustekniikan ja -materiaalien lisäksi käyttöolosuhteet. Aurinkokennon tuottaman sähkömäärää voidaan lisätä käyttämällä keskittimiä, jotka kohdistavat laajemmalle alueelle osuvan auringon säteilyn kennoihin, jolloin kennoon osuvan säteilyn intensiteetti kasvaa. Kyse on siis eräänlaisesta vippaskonstista, jonka ongelmana on tosin kennon ja muidenkin rakenteiden normaalia voimakkaampi lämpeneminen. Keskitysjärjestelmiin eli linseihin ja peileihin liittyy häviöitä ja myös heijastuminen keskittimisestä on merkittävä tekijä. (3)

Aurinkokennossa vapautuvien elektronien saaminen ulkoiseen piiriin on tärkeä osa aurinkoenergia-tekniologiaa, sillä elektronien siirtämiseen tarvittavat kontaktit eivät saisi peittää kuin korkeintaan muutaman prosentin kennon pinnasta ja niiden pitäisi johtaa hyvin kaikissa suunnissa. Se mitä materiaaleja kontakteissa käytetään ja miten ne asennetaan kennon pinnalle, on merkittävä tekijä kennon hyötysuhteen ja hinnan kannalta. Aurinkokennoja kootaan yleensä suuremmiksi kokonaisuuksiksi, joita kutsutaan moduleiksi ja taulukoiksi. Kokonaisen aurinkoenergiajärjestelmän voi ajatella koostuvan kolmesta osasta: tehontuotto eli aurinkokennot, jotka tuottavat tasavirtaa, kuorma, joka voi olla tasa- tai vaihtovirtaa käyttävä; näiden välissä on erittäin merkittävä, järjestelmän tasapainoksi kutsuttu, osajärjestelmä, joka muuntaa kennon tuottaman sähkömäärän käyttökelpoiseksi kuormalle. Tämä osajärjestelmä sisältää modulien kiinnitysjärjestelmän, virran ja jännitteen suodatuskomponentit sekä tarvittaessa vaihtosuuntauksen, myös varastointi kuuluu tähän järjestelmään. (3)

Aurinkokennojen kiinnitysjärjestelmien on oltava kestäviä ja pitkäikäisiä, sillä ne ovat jatkuvasti sään armoilla. Itsenäisiin aurinkoenergiajärjestelmiin usein kuuluvat akut on vaihdettava joka viides tai kymmenes vuosi, näihin järjestelmiin saattaa kuulua myös dieselgeneraattori tai pieni tuulivoimala. Isommissa aurinkovoimaloissa käytetään jäljitysjärjestelmiä maksimaalisen energiantuoton saamiseksi eli taulukot on kiinnitetty moottoroituihin kiinnityksiin, jotka pitävät kennot optimaalisessa kulmassa aurinkoon nähden. Jännitteen säätö on tärkeä osa energian tuotantoa, sillä yli- ja alijännitteet voivat olla tuhoisia. Aurinkoenergiajärjestelmien yleistyminen on kiinni järjestelmien hinnasta ja käytettävyydestä sekä niiden eliniästä. Akkuteknologian kehittäminen on äärimmäisen tärkeää, sillä aurinkoenergiajärjestelmiin tarvitaan tehokkaita akkuja, jotka eivät saisi laskea järjestelmän hyötysuhdetta paljoa. Nykytekniikalla akkujen käyttö pienentää hyötysuhdetta noin 20 %. (3)

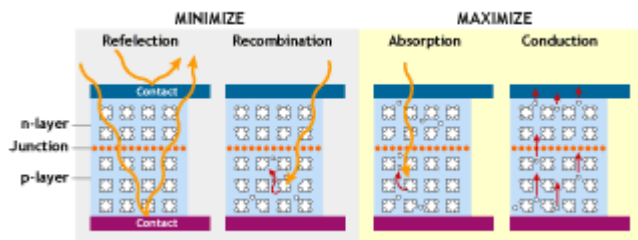
Aurinkokennojen suunnittelussa täytyy huomioida se, miten valo osuu kennoon, sillä valo voi joko osua kennoon suoraan tai se heijastua esimerkiksi pilvistä tai maasta. Keskitinjärjestelmät voivat hyödyntää vain niihin suoraan osuvaa valoa, kun taas litteät paneelit pystyvät hyödyntämään heijastuneenkin komponentin. Suoraan kennoon tulevan valon määrä vaihtelee välillä 0-90 %. Aurinkoenergian käyttökelpoisuus vaihtelee alueittain, sillä alueelle osuvan auringon säteilyenergian määrä riippuu siitä missä päin maapalloa ollaan sekä paikallisesta ilmastosta ja ilmansaasteiden määrästä. Parhaimmillaan aurinkoenergiajärjestelmät ovat aurinkoisissa maissa päiväntasaajan molemmin puolin. (3)

Aurinkoenergian käyttö kasvaa koko ajan, sillä monet syrjäiset kohteet kuten majakat tai tukiasemat ja muut vastaavat kohteet on järkevintä sähköistää joko pelkällä aurinkoenergialla tai käyttämällä hybridijärjestelmiä. Tulevaisuudessa aurinkoenergian tärkeimmäksi sovellutukseksi nousee veden hajoittaminen elektrolyytisesti vedyksi ja hapeksi polttokennoja varten. Tulevaisuudessa moniin rakennuksiin integroidaan aurinkoenergiajärjestelmä, joka saatetaan kytkeä verkkoon. Ideana tässä on se, että ylimääräistä sähköä voi myydä verkkoon ja ostaa sieltä lisää tarvittaessa (3). Saksassa valtio on tukenut aurinkoenergiajärjestelmien rakentamista ja monet ihmiset ovat asentaneet talojensa katoille aurinkopaneeleja. ESA on kehittänyt aurinkoenergialla kulkevan auton, Husqvarna ruohonleikkurin, joka toimii aurinkopaneelilla.

Tällä hetkellä aurinkoenergian suurin käyttökohde on avaruustekniikka, jossa miltei kaikki laitteet jotka operoivat Marsin radan sisäpuolella käyttävät aurinkopaneeleita. Aurinkokennojen kehittyessä niiden käyttökelpoisuus mobiilisovellutuksissa kasvaa, joten jo alle kymmenen vuoden päästä kännykkä- ja kannettavien tietokoneiden laturit saattavat olla pieniä aurinkoenergiajärjestelmiä. Tällä hetkellä suurin este aurinkoenergian yleistymisen tiellä on korkeat investointikustannukset. Tulevaisuudessa on odotettavissa monia läpimurtoja aurinkoenergian alalla, joiden myötä järjestelmien hinta saadaan painettua kilpailukykyiselle tasolle. Aurinkokennojen valmistuksessa pyritään eroon lyijystä ja muista raskasmetalleista sekä kehittämään entistä varmempia valmistustekniikoita hintojen laskemiseksi. Ei ole epäilystäkään siitä, etteikö aurinkoenergia olisi tulevaisuuden energiamuoto.

(kuva poistettu tekijänoikeuksien vuoksi)

Kuva 1. Yllä yksinkertaistettu kaavio taloon integroidusta aurinkoenergiajärjestelmästä (3).



Kuva 2. Yllä oleva kuva kertoo mitä huonoimmas- (vas.) ja parhaassa (oik.) mahdollisessa aurinkokennossa tapahtuu fotonin osuessa (3). Lähde: U.S. Department of Energy

## Lähteet:

1. Los Alamos National Laboratory: The Daily Newsbulletin  
<http://www.lanl.gov/orgs/pa/newsbulletin/2004/05/03/text02.shtml> (19.10.2004).
2. NewScientist.com news service  
<http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns99992688> (24.10.2004).
3. U.S. Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy: Solar Energy Technologies Program  
<https://web.archive.org/web/20041010000118/http://www.eere.energy.gov/solar/> (19.10.2004).
4. VTT Energia, Energia Suomessa, Edita, Helsinki 1999.
5. Young & Freedman, Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics 11th Edition.