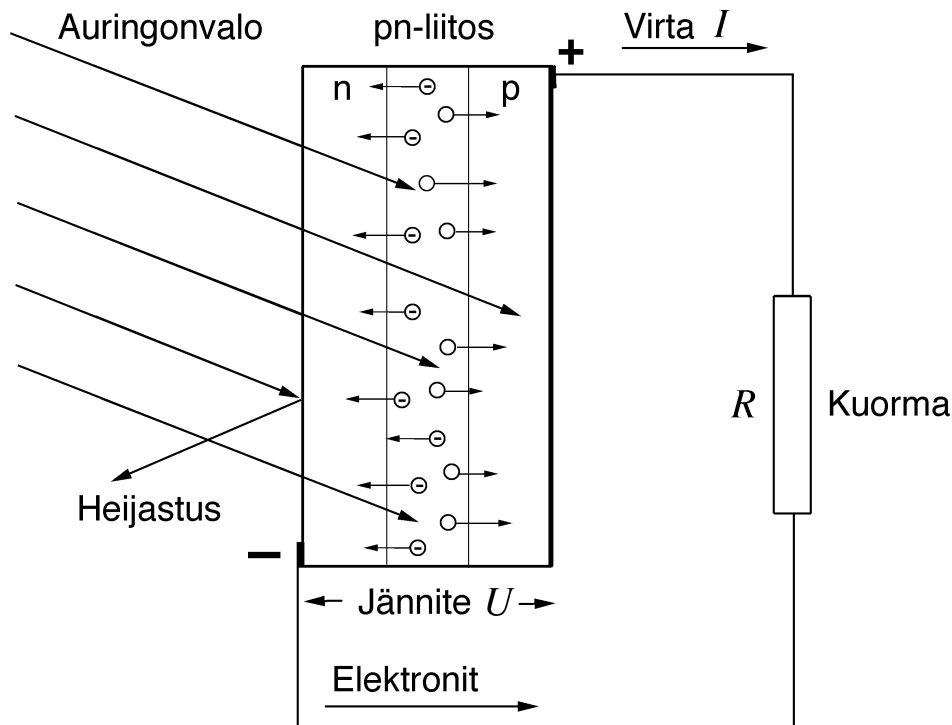


AURINKOPANEELIT

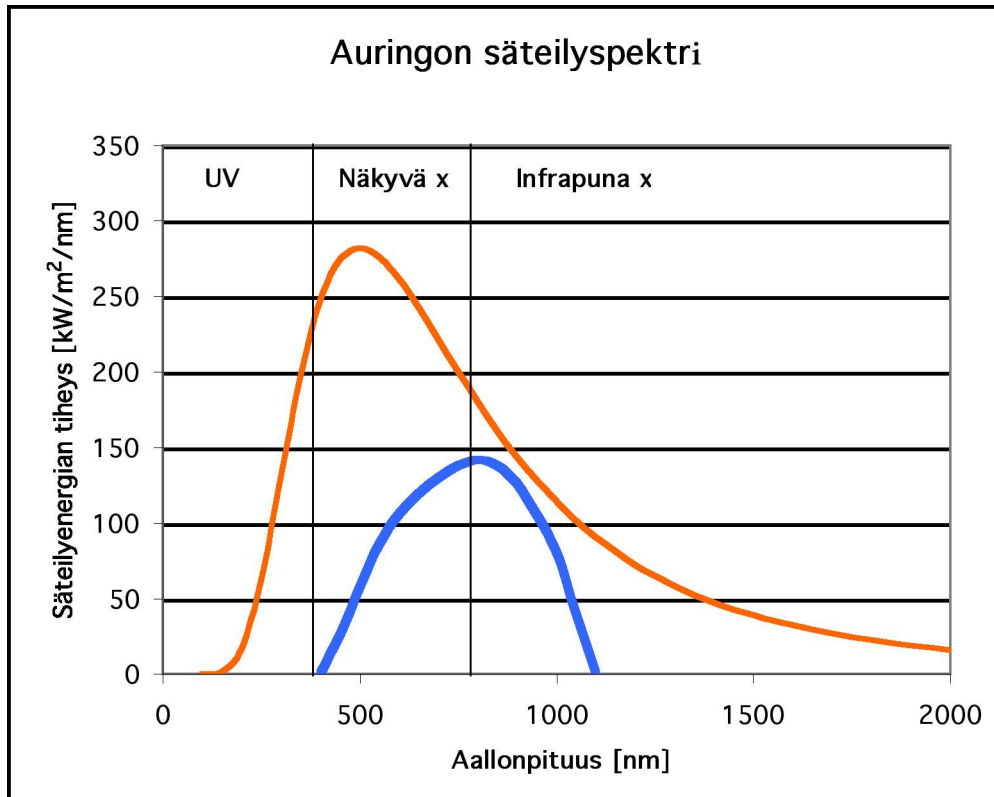
1. Aurinkopaneelin toimintaperiaate



Kuva 1. Aurinkopaneelin toimintaperiaate.

Aurinkokennon rakenne ja toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. Kennossa auringon valo muuttuu suoraan sähkövirraksi. Aurinkokenno on periaatteessa hyvin suuri fotodiodi, jossa on yhdistetty kaksi eri tyyppistä puolijohdemateriaalia (p ja n). Kun auringon valo kohdistuu kennoon, niin ainakin osalla valohiukkasista (fotoneista) on niin suuri energia, että ne pääsevät ohuen pintakerroksen läpi pn-liitokseen ja voivat muodostaa elektroni-aukkopareja. Lähellä pn -liitosta muodostuvista pareista elektronit kulkeutuvat n-puolelle ja aukot p-puolelle. Rajapintaan muodostuneen sähkökentän vuoksi elektronit voivat kulkea vain tiettyyn suuntaan. Niiden on kuljettava ulkoisen johtimen kautta p-tyypin puolijohteeseen, jossa ne vasta voivat yhdistyä sinne kulkeutuneiden aukkojen kanssa. Valaistun liitoksen eri puolilla on siten jatkuvasti vastakkaismerkkiset varauksenkuljettajat, ja liitos voi toimia ulkoisen piirin jännitelähteenä.

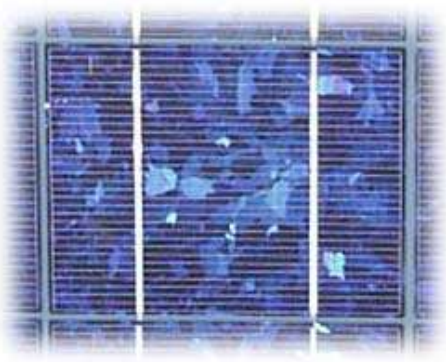
Aurinkokennojen yleisin materiaali on pii (Si), jota käytetään yksi- ja monikiteisenä sekä myös amorfisessa muodossa. Kiteiset piikennot ovat yleensä noin 0,2 -0,3 mm paksuja ja pinta-alaltaan (90-160) mm x (120-160) mm. Yksikiteiset piikennot on sahattu yhtenäisestä piiaihioista, jonka halkaisija on 10 – 16 cm. Koska raaka-aine on hyvin kallista, pyöreistä kiekkoista ei kannata tehdä neliskulmaisia. Tämän vuoksi yksikidepaneeleissa on aukot kennojen kulmissa. Monikiteisiä piikennoja voidaan tehdä neliskulmaisista aihioista, jolloin raaka aine saadaan käytettyä tarkemmin hyödyksi. Amorfisesta piistä valmistetut kennot ovat taipuisia ja valmistuskustannuksiltaan halvempia, mutta niiden hyötysuhde jää pienemmäksi.



Kuva 2. Auringon säteilyspektrin muoto sekä piikennon absorptioalue (sininen käyrä).

Suurin aallonpituus, jolla fotoni saa aikaan elektroni-aukkoparin piissä (Si) on 1150 nm eli 1,15 μm (energia pienenee aallonpituuden kasvaessa). Tällainen valo on lyhytaaltoista infrapunasäteilyä, jonka aallonpituus on lähellä näkyvän alueen rajaa. Säteily, jonka aallonpituus on suurempi kuin 1,15 mm ainoastaan kuumentaa paneelia, mutta ei synnytä sähkövirtaa. Jokainen fotoni voi synnyttää vain yhden elektroni-aukkoparin. Jos fotoneilla on enemmän energiaa kuin tarvitaan elektroni-aukkoparin synnyttämiseen, osa fotonien energiasta menee hukkaan. Piikennot eivät myöskään pysty hyödyntämään lyhytaaltoista ultraviolettivaloa, joka aiheuttaa paneelin tuhoutumista pitkän ajan kuluessa. Kuvassa 2 on esitetty auringon säteilyspektrin muoto ilman ilmakehän absorptiota sekä piikennon absorptioalue.

Piikidekennojen teoreettinen hyötysuhde on 31 %. Hyötysuhdetta huonontavat mm. metallijohteiden liitokset paneelien pinnalla, resistanssi sekä heijastukset paneelin päällä olevasta lasista. Jotkut valmistajat käyttävät lasin pinnalla heijastusta vähentävää pinnoitetta, mikä parantaa paneelin hyötysuhdetta. Mitä tummemmalta paneeli näyttää sitä vähemmän se heijastaa auringon valoa. Tällä hetkellä parhaiden piistä valmistettujen aurinkopaneelien hyötysuhde on noin 18 %.



Kuva 3. Monikiteinen piikkenno.



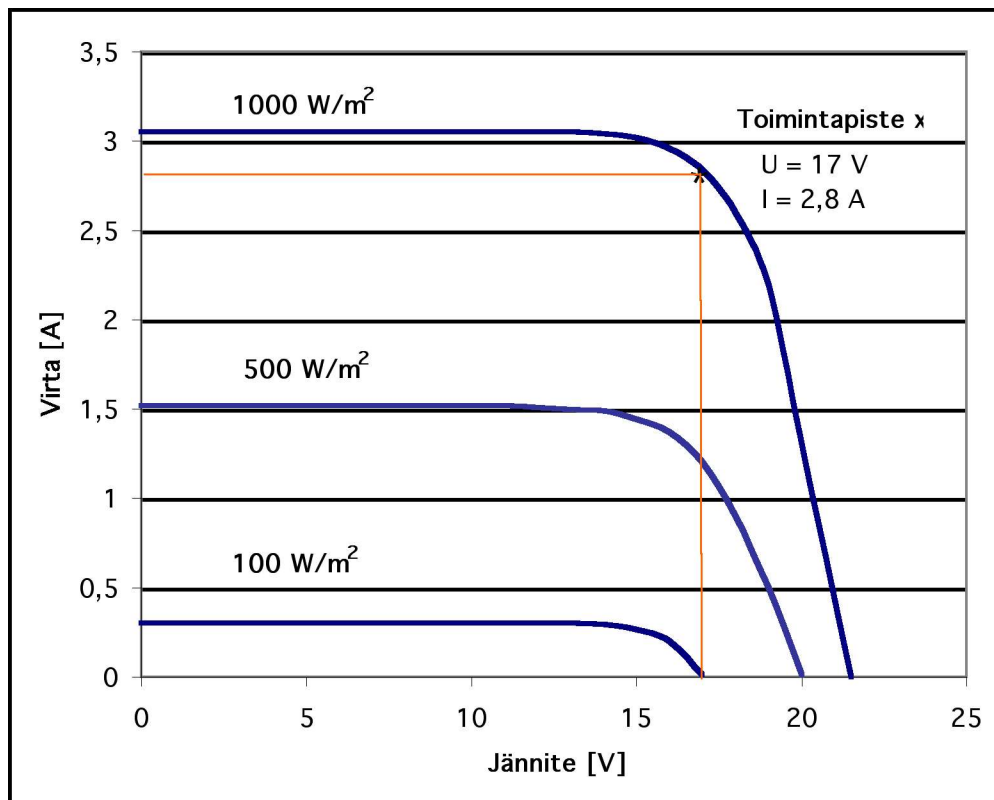
Kuva 4. Yksikiteinen piikkenno.

Monikiteisen piikennon rakenne on esitetty kuvassa 3. Siinä näkyvät yksittäiset piikiteet sekä kennon pinnalle juotetut johtimet, joiden avulla syntynyt sähkövirta saadaan johdettua ulkoiseen kuormaan. Johtimien kohdalla valo ei pääse tunkeutumaan puolijohdemateriaaliin ja tuottamaan sähköä.

Yhden aurinkokennon antama jännite on 0,5 - 0,6 V. Käyttötarpeen mukaan kennoja kytketään sarjaan paneeleiksi. Yleensä käytetään 36 kennon paneeleja, jolloin saadaan riittävä jännite esimerkiksi 12V akkujen lataamiseen. Aurinkokennosta saatu sähkövirta on verrannollinen muodostuvien elektronien lukumäärään. Sen vuoksi sähkövirta riippuu kennon pinta-alasta ja auringon säteilyn voimakkuudesta. Kennot tuottavat kirkkaalla auringonpaisteella sähkövirtaa noin 32 mA/cm². Näin esimerkiksi 90 mm x 120 mm suuruinen kenno tuottaa maksimissaan 3,5 A. Jos kennot on kytketty sarjaan, on aurinkopaneelista saatava virta yhtä suuri kuin yhden kennon tuottama virta.

2. Aurinkopaneelin ominaiskäyrä

Aurinkopaneelin ominaiskäyrä ilmoittaa, millä virran ja jännitteen arvoilla se voi toimia. Oikosulkuvirta on paneelin tuottama enimmäisvirta, kun paneelin navat on kytketty oikosulkuun. Tyhjäkäyntijännite on paneelin suurin jännite, joka saadaan silloin, kun paneeliin ei ole kytketty kuormaa. Hyvin tärkeä piste ominaiskäyrällä on maksimitehopiste tai toimintapiste. Sillä tarkoitetaan niitä virran ja jännitteen arvoja, joilla saavutetaan suurin ulostuloteho kulloisissakin käyttöolosuhteissa. Käytännössä tätä pistettä on vaikea saavuttaa, koska valaistusolosuhteet vaihtelevat ja kirkkaalla auringonpaisteella paneelin lämpötila nousee, mikä pienentää paneelin tehoa.



Kuva 5. 50 W_p aurinkopaneelin ominaiskäyrä eri säteilyvoimakkuuksilla lämpötilassa 25 °C.

Kuvassa 5 on esitetty 50 W_p paneelin ominaiskäyrä eri auringonsäteilyn voimakkuuksilla. Paneelin tuottama virta pienenee lähes suorassa suhteessa säteilyn määrään. Myös jännite pienenee säteilyn vähetessä. Maksimitehopiste saavutetaan hieman sen jälkeen, kun virta on käyrällä alkanut laskea.

3. Aurinkopaneelien tehontuotto

Aurinkopaneelin tuottama teho saadaan kaavasta (Joulen laki)

$$P = UI,$$

missä P on teho (W), U jännite (V) ja I virta (A). Paneelin tuottama energia saadaan, kun teho kerrotaan ajalla

$$E = Pt.$$

Yleensä sähköenergia annetaan yksiköissä wattitunti (Wh) tai kilowattitunti (kWh = 1000 Wh). Silloin aika annetaan tunteina (h). Esimerkiksi, jos paneelin napajännite on 18 V ja virta 3 A viiden tunnin ajan, on paneelin teho $P = UI = 54$ W ja tuotettu energia $E = Pt = 270$ Wh.

Paneelin hyötysuhde η saadaan paneelin tuottaman tehon ja paneelille tulevan säteilyn suhteena

$$h = \frac{P}{SA} \times 100 \%,$$

missä P on paneelin teho, S auringonsäteilyn voimakkuus ja A paneelin pinta-ala. Esimerkiksi, kun paneelin virta on 3 A ja jännite 14 V, on sen tuottama teho 42 W. Jos auringonsäteilyn voimakkuus on 700 W/m^2 ja paneelin pinta-ala $0,4 \text{ m}^2$, on hyötysuhde 15 %.

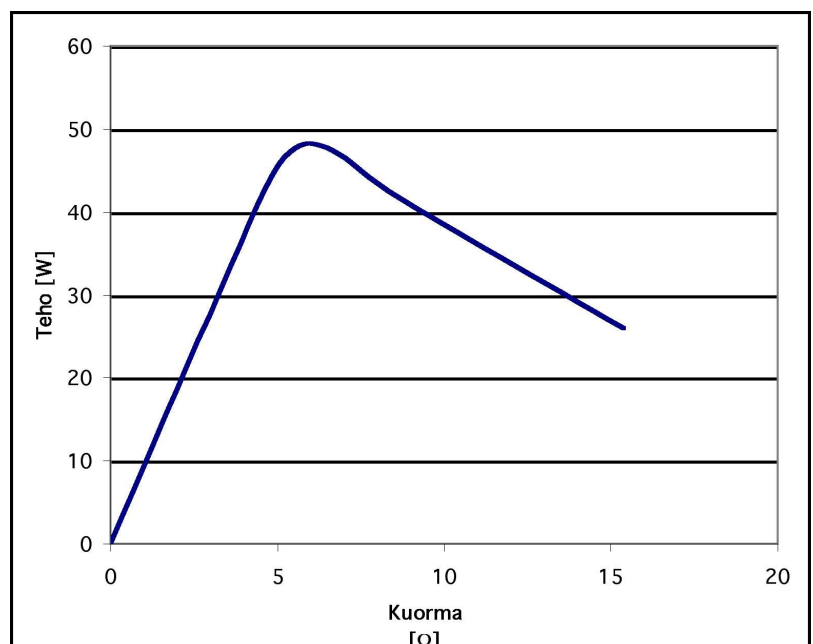
Paneeliin kytketty kuorma tai akusto määrää paneelin jännitteen, jota vastaavaan pisteeseen virta hakeutuu kulloistakin säteilyä ja lämpötilaa vastaavalla ominaiskäyrällä. Kuorman suuruus voidaan laskea ohmin laista

$$R = \frac{U}{I},$$

missä R on kuorman resistanssi (Ω), U paneelin napajännite ja I virta.

Kuvassa 6 on kuvattu kuorman vaikutusta 50 W_p aurinkopaneelin tehoon. Jos kuorman resistanssi on pieni, jää paneelin jännite myös pieneksi ja silloin myös paneelin tuottama teho on pieni. Toisaalta liian suuri resistanssi pienentää virtaa ja myös silloin teho tulee pieneksi. Suurin teho saadaan 50 W_p paneelilla täydessä auringonpaisteessa, kun kuorman resistanssi on noin 6Ω , mikä on sama kuin jännitteen ja virran suhde toimintapisteessä ($17 \text{ V}/2,8 \text{ A} = 6 \Omega$). Kun auringonsäteilyn voimakkuus muuttuu, muuttuu myös toimintapisteen paikka. Tämän vuoksi optimikuorma muuttuu säteilyn voimakkuuden muuttuessa ja myös paneelin lämpötilan muuttuessa. Käyrän huippu on terävä ja sen vuoksi pienetkin heitot optimista pudottavat merkittävästi paneelista saatavaa tehoa.

Kuva 6. Kuorman vaikutus 50 W_p aurinkopaneelin tehoon, kun auringonsäteilyn voimakkuus on 1000 W/m^2 .



Paneelien tehot annetaan tietyissä olosuhteissa, jotta niitä voidaan vertailla keskenään. Nämä standardiolosuhteet (STC = Standard Test Conditions) ovat:

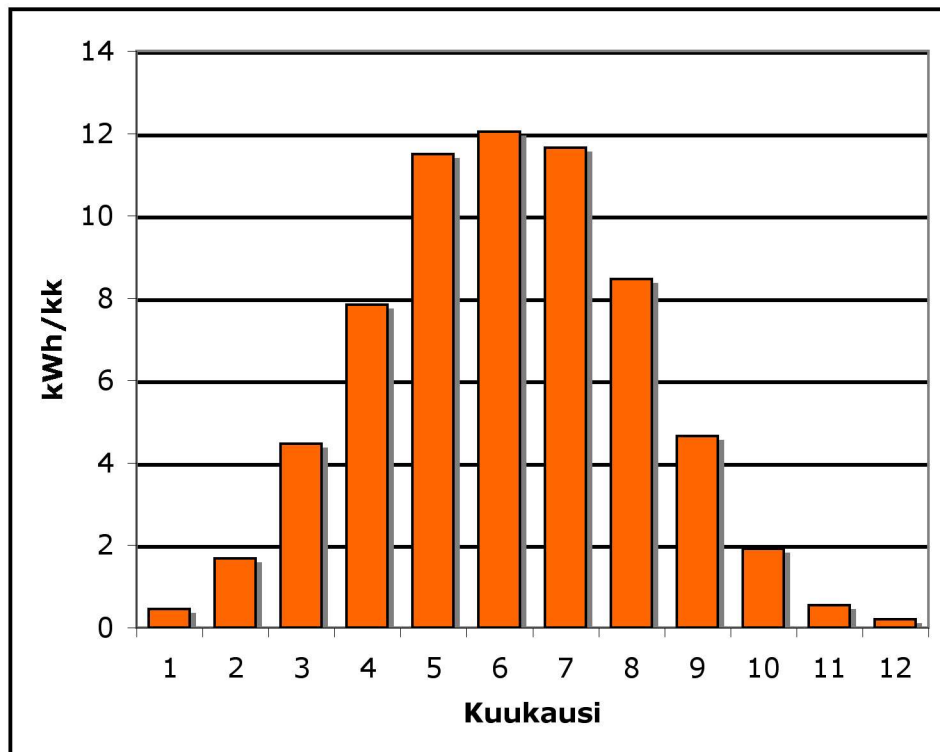
- 1) Auringon säteilyn voimakkuus 1000 W/m^2
- 2) Paneelin lämpötila $+25 \text{ }^\circ\text{C}$
- 3) Auringon spektri normitettu ilmamassalle 1,5. (Tällöin aurinko on $41,81^\circ$ horisontin yläpuolella.)

Standardiolosuhteissa valmistajat määrittävät tuottamiensa paneelien nimellisteho on (W_p = Watts peak).

Nyrkkisääntö:

Koko vuoden keskiarvoteho Suomessa on noin 15 % huipputehosta W_p .

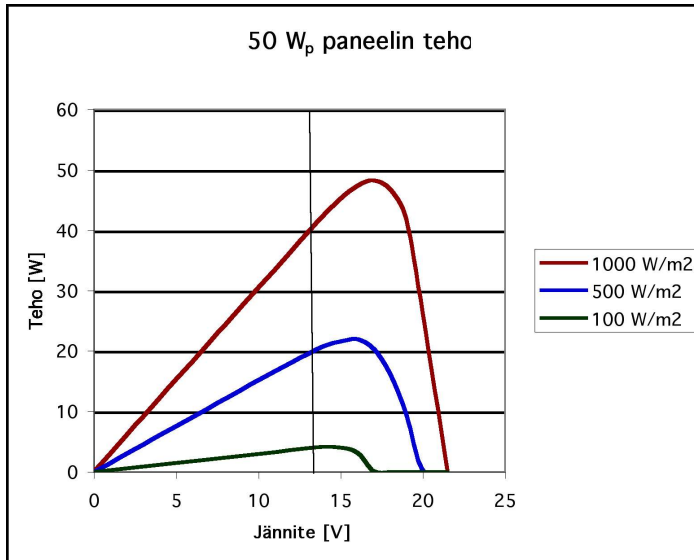
Esimerkiksi, jos paneelin huipputeho on $W_p = 125 \text{ W}$, saadaan siitä vuodessa keskimäärin 18 W teho. Vuoden aikana saatu energia on silloin noin 160 kWh . Tämä voidaan laskea myös siten, että Suomessa jokaiselle neliömetrille tulee vuodessa noin 1000 kWh energiaa. Koska 125 W_p paneelin pinta-ala on noin 1 m^2 , ja jos sen hyötysuhde on 16 %, voidaan vuoden aikana saada energiaa 160 kWh . Tätäkään ei saada kokonaan käytettyä hyödyksi, koska osa energiasta kuluu mm. johtimissa ja inverttereissä.



Kuva 7. 50 W_p paneelin laskennallinen tehontuotto Keski-Suomessa eri kuukausina.

Kuvassa 7 on esitetty 50 W_p paneelin laskennallinen energiantuotto Keski-Suomessa eri kuukausina. Marras-joulukuussa ja tammikuussa paneelin energiantuotto on lähes olematon, alle $0,5 \text{ kWh/kk}$. Myös lokakuussa ja helmikuussa energiamäärä jää pieneksi. Sen sijaan maaliskuun ja syyskuun välisenä ajanjaksona energiantuotto on hyvä, keskimäärin $8,6 \text{ kWh/kk}$. Yhteensä vuoden aikana saadaan energiaa 65 kWh , josta maaliskuun ja syyskuun välisenä aikana saadaan yli 90 %.

4. Säteilyn voimakkuuden vaikutus paneelien tehontuottoon

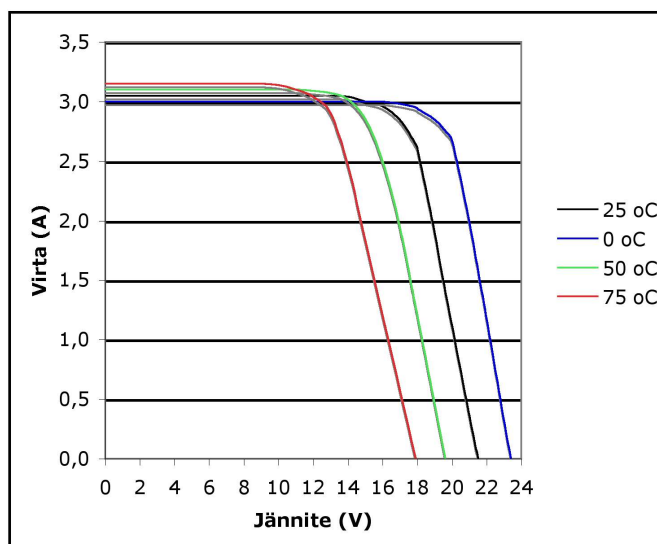


Kuva 8. Auringonsäteilyn voimakkuuden vaikutus 50 W_p paneelin tehoon.

Kuvassa 8 on esitetty 50 W_p aurinkopaneelin tehon riippuvuus säteilyn voimakkuudesta ja jännitteestä. Jos paneelia käytetään akkujen lataamiseen, on latausjännite tyypillisesti noin 13 V. Silloin paneelin tehontuotto on 40 W kirkkaalla auringonpaisteella 1000 W/m², 20 W paisteella 500 W/m² ja 4 W paisteella 100 W/m². Maksimitehopistettä ei voida saavuttaa, koska akun napajännite määrää myös paneelin jännitteen. Siksi paneeli kykenisi tuottamaan 15 % enemmän energiaa kuin akkujen latauksessa voidaan hyödyntää. Toisaalta paneelien lämpiäminen pudottaa tehopistettä alemmaksi.

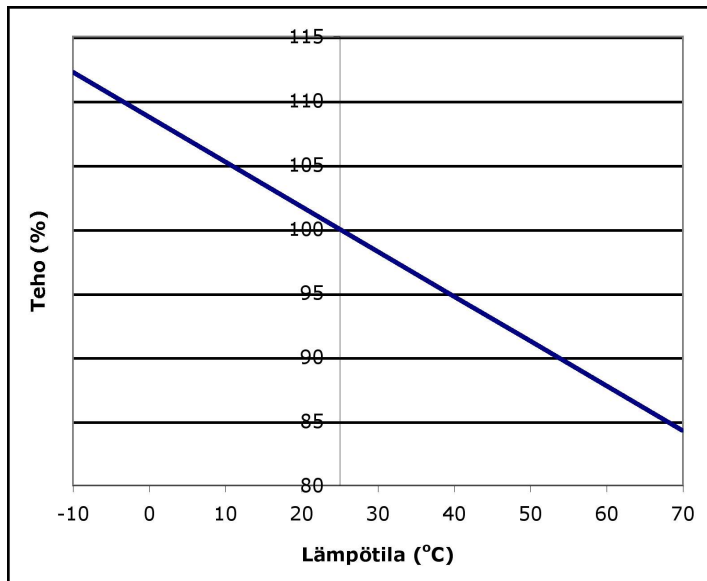
5. Lämpötilan vaikutus paneelien tehontuottoon

Aurinkopaneelin teho riippuu hyvin monista tekijöistä, kuten auringonsäteilyn voimakkuudesta ja tulokulmasta, auringon korkeudesta ja ilmakehän absorptiosta sekä paneelin lämpötilasta.



Kuva 9. Lämpötilan vaikutus paneelin ominaiskäyrään.

Kuvassa 9 on esitetty aurinkopaneelin ominaiskäyrän muuttuminen eri lämpötilassa. Paneelin virta kasvaa, kun sen lämpötila nousee, koska lämpötila lisää termisten varaustenkuljettajien määrää paneelissa. Tämä vaikutus on kuitenkin hyvin pieni, noin +0,065 %/°C. Sen sijaan paneelin tyhjäkäyntijännite putoaa huomattavasti voimakkaammin lämpötilan noustessa. Piikidekennojen jännitteen lasku on yleensä noin -0,5 %/°C ja parhaimmillakin kennoilla jännitteen alenema on noin -0,35 %/°C. Koska jännitteen muutos on paljon voimakkaampi kuin virran muutos, on tehon alenema lämpötilan noustessa samaa luokkaa kuin jännitteen lasku.



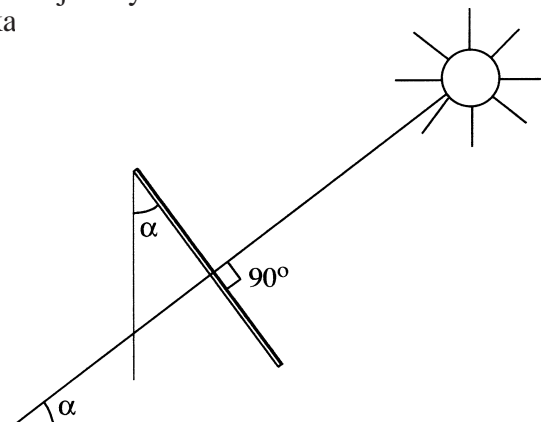
Kuva 10. Aurinkopaneelin tehon riippuvuus lämpötilasta, kun tehon lämpötilakerroin on $-0,35 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Normiteho 100 % on kiinnitetty lämpötilaan $+25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kuvassa 10 on esitetty paneelin lämpötilan vaikutus sen tuottamaan tehoon, kun tehon lämpötilakerroin on $-0,35 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Kun lämpötila on $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ saadaan paneelista lähes 10 % enemmän tehoa kuin lämpötilassa $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vastaavasti teho putoaa 10 % kun lämpötila on $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vaikka ulkoilman lämpötila on $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, on paneelin lämpötila helposti auringonpaisteessa yli $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja tehon vähennys siten hyvälläkin paneelilla noin 10 % normitehosta. Huonolla paneelilla vähennys voi olla jopa kaksinkertainen. Tämän vuoksi paneelit pitäisi sijoittaa siten, että tuuli ja ilmavirtaukset pääsisivät jäähdyttämään niitä tehokkaasti. Myöskään niitä ei saisi sijoittaa sellaisten pintojen lähelle, jotka mustat huopakatot.

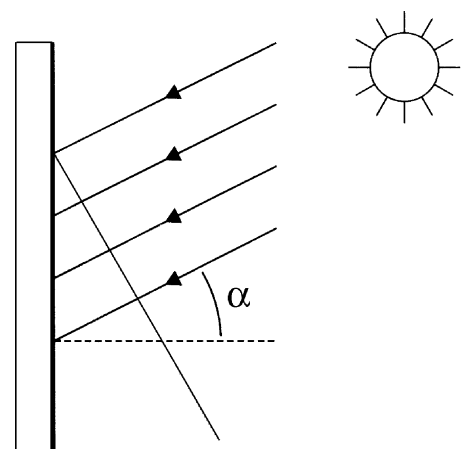
6. Suuntauksen vaikutus paneelin tehontuottoon

Auringon säteily tulee kohtisuorasti paneelin pintaan silloin, kun sen kallistuskulma on yhtä suuri kuin auringon korkeus horisontista. Auringon korkeus kuitenkin vaihtelee jatkuvasti päivittäin ja myös vuodenaikojen mukaan. Varkauden korkeudella ($\phi = 62^{\circ}$) aurinko on korkeimmillaan keskipäivällä kesäkuussa hieman yli 50° ja matalimmillaan se on joulukuussa alle 5° horisontin yläpuolella. Näiden keskiarvo on noin 30° . Päivittäin auringon korkeus vaihtelee nolasta maksimikorkeuteen. Kuitenkin ilmakehän imee yli 50 % auringon säteilystä silloin kun se on alle 15° korkeudella horisontista (katso aurinkoenergia, kuva 7). Tämän vuoksi paneeleita ei kannata suunnata vastaanottamaan pelkästään horisontista tulevaa auringon säteilyä. Tosin noin 50 % auringon säteilystä on hajasäteilyä, johon paneelin suuntauksella ei ole kovin paljon merkitystä. Optimikulma Suomessa kiinteästi sijoitetulle paneelille on suoran säteilyn kannalta $30 - 40^{\circ}$.

Mikäli paneeli seuraa aurinkoa, saadaan noin 30 % enemmän energiaa kuin kiinteän paneelin avulla. Pilvisenä päivänä kääntämisestä ei ole juuri hyötyä, koska 100 % auringon säteilystä on hajasäteilyä (katso aurinkopaneelien energiamittauksia, kuva 3).



Kuva 11. Paneelin suuntaus aurinkoa kohti.

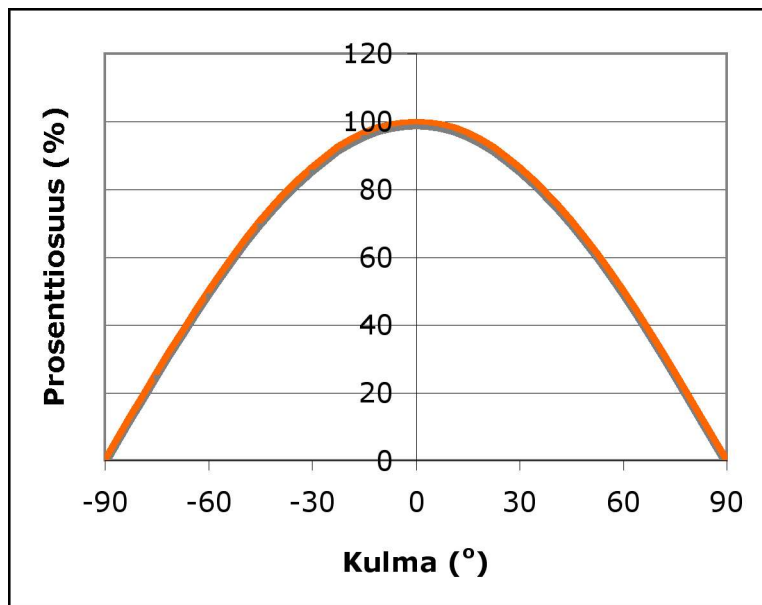


Kuva 12. Auringonsäteilyn saapuminen vinosti paneelin pinnalle.

Vinosti paneelin pinnalle tuleva auringonsäteilyn teho voidaan laskea yhtälöstä

$$P_s = SA \cos a,$$

missä S on auringonsäteilyn voimakkuus (W/m^2), A paneelin pinta-ala (m^2) ja a paneelin normaalin ja auringonsäteiden välinen kulma. Paneelille tuleva säteilyteho on suurimmillaan, kun paneeli osoittaa kohti aurinkoa eli paneelin normaalin ja auringonsäteiden välinen kulma on nolla. Kuvassa 13 on esitetty tehon muuttuminen säteilyn tulokulman muuttuessa. Aluksi muutos on hyvin hidas, ja vaikka tulokulma on 30° , putoaa paneelille tuleva säteilyteho vain noin 13 %. Kun tulokulma on 60° , säteilyteho putoaa puoleen ($\cos 60^\circ = 1/2$). Vaikka suuntauksen vaikutus ei ole kovin suuri, on huomattava, että auringonsäteiden kohtaamiskulmaa on tarkasteltava kahdessa suunnassa: pystysuunnassa ja vaakasuunnassa. Jos kummassakin suunnassa tulokulma on 30° , tulokset kerrotaan keskenään $\cos 30^\circ \times \cos 30^\circ = 0,75$ eli säteilyteho pienenee 25 % verrattuna suoraan aurinkoon suunnattuun paneeliin.



Kuva 13. Kohtaamiskulman vaikutus paneelille tulevaan auringonsäteilyn tehoon.

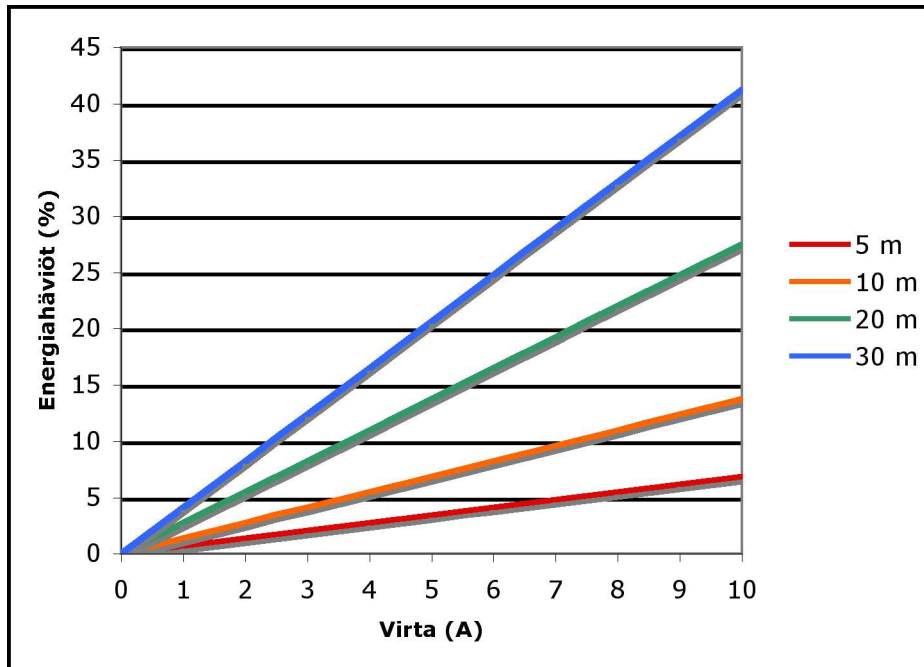
Kun auringonvalo tulee hyvin vinosti (tulokulma $>60^\circ$) paneelin pintaan, heijastukset paneelin pinnalla olevasta suojalasista tulevat merkittäviksi (katso aurinkoenergia, kuva 10). Suurin osa aurinkoenergiasta tulee kesällä kello 10 ja klo 18 välisenä aikana. Koska aurinko kiertyy tunnissa 15° , kiertyy se silloin 8 tunnissa 120° . Mikäli paneeli on suunnattu suoraan etelään, silloin 60° tulokulma ei ylity parhaana paisteaikana.

7. Siirtojohtimien aiheuttamat tehohäviöt

Johtimessa kulkeva virta lämmittää johdinta ja aiheuttaa siten tehohäviöitä. Tehohäviöt P (W) voidaan laskea yhtälöstä

$$P = I^2 R,$$

missä I on johtimessa kulkeva virta (A) ja R johtimen resistanssi (Ω). Siirtohäviöiden pienentämiseksi johtimessa kulkevan virran tulisi olla mahdollisimman pieni. Myös johtimen resistanssin täytyisi olla pieni eli johtimen pitäisi olla paksu ja hyvin sähköä johtava. Kuparilla ja hopealla on paras sähköjohtokyky. Kuparia käytetäänkin hyvin yleisesti sähköjohtimissa ja hopeaa erityistapauksissa kuten aurinkopaneelien pintaliitoksissa. Valtakunnan verkossa käytetään alumiinijohtimia niiden keveyden takia, mutta tehonsiirto tehdään hyvin suurella jännitteellä, esimerkiksi päälinjoissa se on 400 kV. Aurinkoenergiajärjestelmissä jännitteet ovat pieniä ja sen vuoksi johtimien tehohäviöt muodostuvat helposti suuriksi.



Kuva 14. Kuparikaapelien ($A = 2 \text{ mm}^2$) aiheuttamat tehohäviöt 12 V järjestelmässä eri siirtomatkoilla.

Kuvassa 14 on esitetty virran vaikutus kuparikaapelien tehohäviöihin eri siirtomatkoilla 12 V järjestelmässä, kun johtimen poikkipinta-ala on 2 mm^2 eli johtimen halkaisija on 1,6 mm. Laskelmassa on huomioitu sekä meno- että paluujohtimen pituus. Jos siirtojohtimen pituus on 5 m, jäävät tehohäviöt alle 5 % mikäli virta on alle 7 A. Häviöt kasvavat suorassa suhteessa kaapelin pituuteen siten, että 10 m kaapelissa häviöt ovat 7 A virralla 10 %, 20 m kaapelilla 20 % ja 30 m kaapelilla jo 30 %. Toisaalta johtimen poikkipinta-alan tai jännitteen kasvattaminen pienentää tehohäviöitä. Kaksinkertainen pinta-ala pienentää häviöt puoleen ja samoin 24 V järjestelmässä tehohäviöt puolittuvat. Kun virta on pieni (alle 1 A), häviöt ovat pieniä pitkälläkin matkalla.

Kuparikaapelin (meno+paluujohtin) aiheuttamat tehohäviöt voidaan laskea kaavasta

$$\text{Häviöt (\%)} = 3,4 \times \text{virta} \times \text{johtimen pituus (m)} / \text{poikkipinta-ala (mm}^2\text{)} / \text{jännite (V)}.$$

Yleensä johtimet mitoitetaan siten, että häviöt eivät ylitä 5 %. Mitä pitempi johdin, sen paksumpi sen pitää olla, jotta häviöt eivät kasva liian suuriksi.