

Juho Järvinen

# AURINKOPANEELIN ENERGIATAKAISINMAKSUAIKA SUOMESSA

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus

2024



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri
Tekijä	Juho Järvinen
Työn nimi	Aurinkopaneelin energiantakaisinmaksuaika Suomessa
Vuosi	2024
Sivut	37 sivua, liitteitä 1
Työn ohjaaja	Tarmo Makkonen

## TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli laskea aurinkopaneelin energiantakaisinmaksuaika Suomessa käytetylle aurinkopaneelille. Energiakulujen laskennassa huomioitiin aurinkopaneelin valmistus, kasaus, kuljetus ja kierrätys. Energiakuluja verrattiin aurinkopaneelin tuottamaan energiaan, kun se on asennettu Suomeen.

Pii on tärkein aine, jota käytetään aurinkopaneeleissa, ja siksi tässä työssä pureudutaan piin kiertokulkuun kaivokselta katolle ja katolta kierrätykseen. Tutkimuksessa esitetään työvaiheet piille, ennen kuin siitä saadaan toimiva osa paneelia aurinkokennona.

Tutkinnan tulosten perusteella aurinkopaneelin energiantakaisinmaksuaika Suomessa on noin puolitoista vuotta. Laskennasta on jätetty pois manuaalisia työvaiheita, kuten rahtilastaaminen ja työntekijän panos. Tulokseen ei vaikuta myöskään tehtaiden ylläpitokustannukset, joten todellinen tulos olisi korkeampi.

Laskennasta saatujen tulosten avulla työssä pohditaan aurinkoenergiaprosessin parannuskeinoja ja sitä, millä tavoin kuluttaja voi vaikuttaa ympäristöystävälliseen valintaan aurinkopaneelihankinnassa. Laskutulokset esittävät myös arvion aurinkopaneelin hiilidioksidiekvivalentista, joka on 53,6 g/kWh.

**Asiasanat:** Energiantakaisinmaksuaika, aurinkopaneeli, pii

Thesis title Energy payback time of solar panels in Finland  
Time 2024  
Pages 36 pages, 1 appendix  
Supervisor Tarmo Makkonen

## ABSTRACT

The purpose of this thesis was to calculate the energy payback time of solar panels mounted in Finland. Manufacturing, assembling, transporting and recycling were taken into account in the calculation process of the energy costs. The energy costs were then compared to the energy produced by the panels.

Silicon is the most important material used in solar panels and that is why this study focused on the life cycle of silicon. The study presents the phases in silicon manufacturing, from the quarry to the roof and from the roof to recycling.

The result of this study shows that the energy payback time of solar panels used in Finland is about 1.5 years. The calculation process excludes manual work phases, such as loading and the contribution of an employee. The calculation also does not consider the factories' maintenance energy costs. Keeping those things in mind, the realistic result would be higher.

Based on the calculation, improvements in the solar energy process are discussed as well as ways in which a consumer can affect environmental friendliness when acquiring solar panels. The result of the calculation also includes an evaluation of carbon dioxide equivalent of solar energy, which is 53.6 g/kWh.

**Keywords:** Energy payback time, solar panel, silicon

# SISÄLLYS

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO .....	6
1 JOHDANTO .....	7
1.1 Tutkimuksen taustaa ja tavoite .....	7
2 AURINGOENERGIAN MERKITYS JA TOIMINTA.....	7
2.1 Aurinkopaneelin ja aurinkokennon rakenne .....	9
2.2 Aurinkoenergian haasteet.....	11
3 AURINKOPANEELIN VALMISTUS .....	11
3.1 Kaivostyöt .....	12
3.2 Karboterminen pelkistys .....	12
3.3 Hydroklooraatio.....	13
3.4 Siemensin prosessi.....	14
3.5 Piiharkon valaminen .....	15
3.6 Aurinkokennojen valmistus .....	16
3.7 Aurinkopaneelin kasaus.....	18
3.8 Aurinkopaneelin asennus .....	19
3.9 Aurinkopaneelin kierrätys .....	19
4 ENERGIAN TAKAISINMAKSUAIKA.....	21
4.1 Aurinkopaneelin valmistus .....	21
4.2 Kuljetus.....	22
4.3 Aurinkovoimalan muut osat .....	24
4.4 Aurinkovoimalan tuotto .....	24
4.5 Tulokset .....	25
4.6 Tulosten arviointi.....	26
4.7 Aurinkoenergian ja kivihiilen vertailu.....	27
4.8 Aurinkovoimalan sijainnin merkitys.....	28
5 POHDINTA.....	29
LÄHTEET.....	32

KUVALUETTELO .....	35
TAULUKOT .....	36

## LIITTEET

Liite 1. Excel taulukko [Aurinkopaneelin energiantakaisinmaksuaika.xlsx](#)

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

Puolijohde	Materiaali, joka on johtimen ja eristeen välistä. Se johtaa sähköä vain tietyssä olosuhteessa. Esimerkiksi pii.
Aurinkopaneelin hyötysuhde	Suhde, jolla aurinkopaneeli kykenee muuttamaan auringonsäteilytehon energiaksi.
Aurinkokenno	Aurinkopaneeleissa käytetty levy, joka luo valosähköisen ilmiön.
Mg-Si	Metallurginen pii. Piin metallinen muoto karbotermisen pelkistyksen jälkeen.
EVA	Ethyleeni vinyyli asetaatti. Muovityyppi.

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Tutkimuksen taustaa ja tavoite

Aurinkoenergia. Meidän mahdollisuutemme päästä eroon fossiilisista polttoaineista. Tätä ”uusiutuvaa” energiamuotoa on kutsuttu jopa ilmaiseksi energiaksi, mutta sitä se ei kuitenkaan ole. Aurinkopaneelin valmistukseen liittyy energiaa vievä valmistusprosessi, johon tässä opinnäytetyössä pureudutaan. Työn tavoitteena on selvittää energian takaisinmaksuaika Suomessa käytetyille tyypilliselle aurinkopaneelille. Tuohon takaisinmaksuaikaan sisällytän myös paneelin kierrätykseen kuluvan energian, jotta materiaalin elinkaari noudattaa kiertotaloudellista mallia. Aurinkopaneeli koostuu monesta eri aineesta, ja tärkein niistä on puolijohdemateriaalina käytetty pii. Paneelin valmistuksessa piin käsittely vie kaikista eniten energiaa, ja siksi olen rajannut tämän työn keskittymään piin matkaan louhokselta katolle ja katolta takaisin tuotantoon. Esitän tutkimuksessa esimerkkilaskun, jossa lasketaan aurinkopaneelien pääkomponenttien yhteistä energiavaatimusta ja sitä verrataan paneelien tuottamaan energiaan.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää aurinkopaneelissa käytettyjen komponenttien valmistukseen kulunut energia ja määrittää kauan kestää, että Suomeen asennettu paneeli tuottaa saman määrän energiaa. Aurinkopaneelissa käytetään tietysti muitakin aineita kuin piitä, jotka tarvitsevat käsittelyä ennen kuin niistä voidaan kasata paneeliin valmis komponentti, kuten pinalasi, muoviosat ja johdotukset. Tutkimuksen laajuuden vuoksi olen rajannut työni käsittelemään vain valmistus- ja kuljetusprosesseja. Aurinkokennojen valmistuksesta ei ole paljon suomalaista tietoa, joten olen käyttänyt tutkimuksessani pääosin ulkomaisia lähteitä. Lähteissäni olen suosinut mahdollisimman uutta tietoa.

## 2 AURINGOENERGIAN MERKITYS JA TOIMINTA

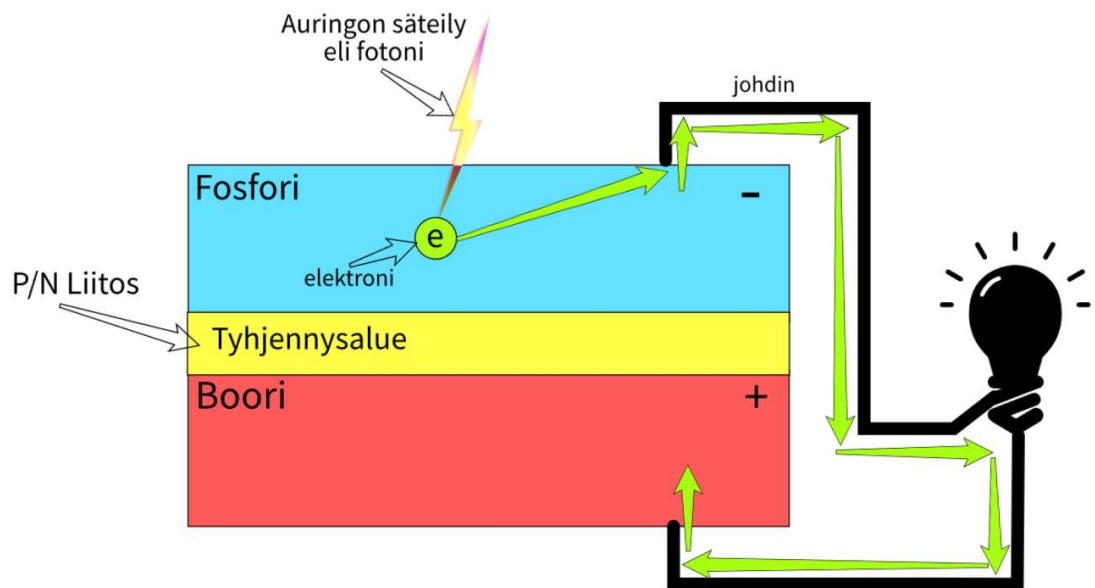
Aurinkoenergian merkitys yhteiskunnassamme on kasvavassa tahdissa. Heleen aurinko- ja tuulituotekehityksen vetäjä Minna Junnikkala kertoo, että Suomen aurinkosähkökapasiteetin vuosikasvu oli yli 60 % vuonna 2022 ja se on kasvamaan päin /1/. Tiedustelin Suomen suurimmalta aurinkovoimaloiden

asennuttajalta Solarigo:lta, minkä valmistajan aurinkopaneeleita he käyttävät, ja vastaukseksi sain Trina, Jinko ja Longi /2/. Nämä ovat kiinalaisia valmistajia. Tämä tarkoittaa sitä, että jos Suomen aurinkosähkökapasiteetti on kasvussa, niin myös Kiinasta maahantuotujen aurinkopaneelien määrä kasvaa. Aurinkopaneelien valmistus on energiaa kuluttavaa toimintaa, ja näin ollen kiinalaiset valmistajat tarvitsevat paljon energiaa. Ympäristöystävällisestä näkökulmasta tässä piilee ongelma. Kiinan kuluttama energia tuotetaan pääosin kivihiihellä /3/. Kivihiihi on massaenergian tuotannossa ilmastoa saastuttavin tuotantomuoto. Eli vaikka aurinkopaneeli tuottaa päästötöntä energiaa, sen hiilijalanjälki ei ole olematon. Kiinan tuotantopolitiikkaan suomalaisten on lähes mahdotonta vaikuttaa, mutta jos Suomessa kehitettäisiin omaa piituantantoa, voisimme valvoa aurinkopaneelien tuotantolinjan pysyvän mahdollisimman ympäristöystävällisenä.

Suomessa on jo kotimaisia aurinkopaneelivalmistajia kuten Salotech, mutta he tilaavat paneelin osat ulkomailta ja kasaavat ne. Esimerkiksi Salotechin aurinkokennoja valmistetaan Kiinassa /4/. Suomessa ei ole aurinkopaneelin tärkeimmän osan eli aurinkokennon massavalmistusta. Jos olisi, niin näiden aurinkokennojen avulla Suomessa käytettyjen paneelien elinkaari muuttuisi huomattavasti ympäristöystävällisemmäksi. Aurinkoenergian ”vihertymisessä” on myös toinen ongelma. Kierrätys. Aurinkopaneeli luokitellaan ongelmajätteeksi, sillä sen valmistukseen käytetään aineita, jotka ovat vaikeasti kierrätettävissä ja ne ovat myös vaikeasti toisiinsa sitoutuneita. Tähän kierrätysprosessiin tarvitaan myös energiaa, joka on otettava huomioon paneelin elinkaareissa. Aurinkopaneelin kierrätysteknologia on vielä uutta maailmalla, mutta siitä tulee relevantti asia lähivuosina, koska ennen 2000-lukua tehdyt paneelit alkavat nyt olla kierrätyksen partaalla. Tulevaisuudessa kierrätyksen tarve ja merkitys kasvaa, mutta tässä ongelmassa on hautautuneena suuri mahdollisuus. Aurinkopaneeli sisältää arvokkaita materiaaleja, kuten hopeaa ja kuparia. Näiden materiaalien talteenotto olisi niin taloudellisesti, kuin ekologisesti kannattavaa.

Aurinkopaneelin sähköntuotanto perustuu valosähköiseen ilmiöön, joka on mahdollista tehdä puolijohdemateriaalin ja P/N-liitoksen avulla. Boorilla rikastetun ja positiivisesti varautuneen piilevyn toinen puoli käsitellään fosforilla. Fosfori tekee levyn toisen puolen negatiivisesti varautuneeksi, ja tämän seurauksena saadaan P/N liitos (kuva 1).





Kuva 1. P/N-Liitos

Auringosta peräisin olevat fotonit kykenevät liikuttamaan elektroneja piikidekennossa, joka mahdollistaa potentiaalieron syntymisen ja näin ollen voidaan rakentaa virtapiiri eri varausten välille ja tuloksena saadaan virtaa.

## 2.1 Aurinkopaneelin ja aurinkokennon rakenne

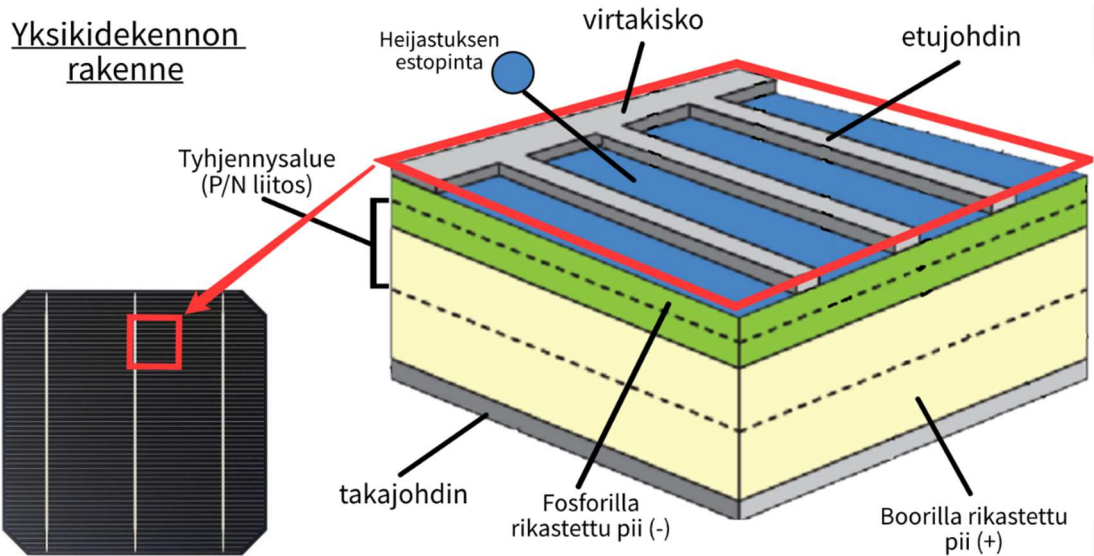
Ennen kuin voi lähteä laskemaan aurinkopaneelin valmistuksessa kulunutta energiaa, on ymmärrettävä, mistä paneeli koostuu. Erilaisia aurinkopaneelityyppejä on olemassa ainakin seitsemän, ja ne luokitellaan ensimmäisen, toisen ja kolmannen sukupolven kennoihin. Kaupallisia markkinoita hallitsee ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelit, ja niitä näkee myös suomalaisten kotien katoilla enimmäkseen. Myös tässä opinnäytetyössä keskitytään ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelisiin. Toisen sukupolven aurinkopaneelit ovat ohutkalvopaneeleita, joita yleensä käytetään rakenteisiin integroituna niiden taipuisuuden ansiosta. Ohutkalvopaneelien hyötysuhde on heikompi kuin ensimmäisen sukupolven paneelien. Kolmannen sukupolven aurinkopaneelit pohjautuvat pääosin myös ohutkalvotekniikkaan, mutta ne ovat vielä kehitysvaiheessa. /5./ Grätzel-kennot ovat kolmannen sukupolven aurinkokennoja, jotka käyttävät väriainetta valosähköisen ilmiön saavuttamiseen. Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelin rakenne.



Kuva 2. Ensimmäisen sukupolven aurinkopaneeli

Tyypillisesti vain 3–4 % aurinkopaneelin painosta on piitä, mutta se kattaa noin 40 % paneelin arvosta. Painavin osa on etulasi, noin 70 % kokonaispainosta, joka kattaa vain 11–15 % paneelin arvosta. Aurinkopaneeli sisältää kymmeniä piikidekennoja, jotka ovat juotettu yhteen sarjaan muodostaakseen halutun jännitteen. Juotos- ja kaapelimateriaalina käytetään muun muassa hopeaa ja kuparia. Hopean osuus paneelin arvosta voi vaihdella 9–23 % välillä ja kuparin 5–12 % välillä. Kuvan 2 esittämät osat tiivistetään yhteen alumiinikehiksen avulla. Aurinkopaneeli sisältää noin 14 % alumiinia. /6, s. 21./

Piikidekennon materiaali luokitellaan kahteen eri tyyppiin, monikidepiihin tai yksikidepiihin. Nopeasti nämä kennot voidaan tunnistaa värin perusteella. Monikidekennon väri on sinertävä, kun taas yksikidekenno on musta. Monikidekenno on hyötysuhteeltaan huonompi kuin yksikidekenno, mutta se on myös halvempi. Yleisesti monikiteen hyötysuhde on noin 15 % ja yksikiteen noin 20 %. Yksikidekenno on rakenteeltaan hauraampi kuin monikidekenno, ja sen valmistus on vaativampaa. Yksikidepaneelien elinikä on kuitenkin pidempi. /5./ Kuvassa 3 on esitetty yksikiteisen aurinkokennon rakenne.



Kuva 3. Yksikidekennon rakenne

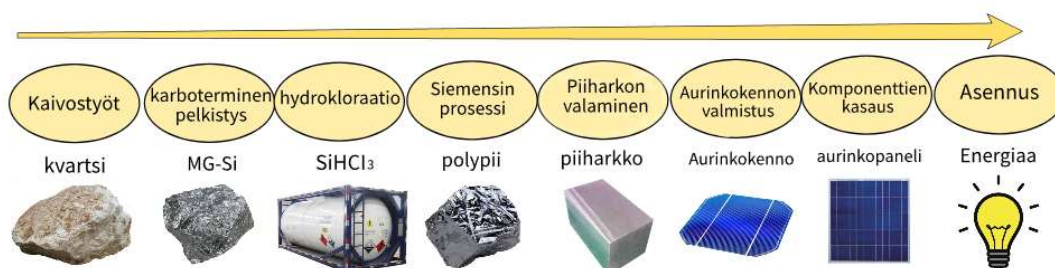
Aurinkopaneelissa näiden kennojen virtakiskot liitetään sarjaan, jotta paneelin antama yhteisjännite nousee ja auringonvalon aiheuttamat vapaat elektronit pääsevät liikkumaan virtapiirissä eteenpäin.

## 2.2 Aurinkoenergian haasteet

Varsinkin Suomessa aurinkoenergian hyödyntäminen on haasteellista, koska talviaikaan, silloin kuin energian tarve on suurimmillaan, aurinko ei juurikaan paista. Tämän seurauksena on kehiteltävä energian varastointitapoja eli akustoja. Ideaalitapauksessa Suomessa kyettäisiin hyödyntämään talviaikaan kesällä tuotettua aurinkoenergiaa, mutta vielä nykyteknologialla se vaatii isoja energianvarastointijärjestelmiä ja suuria investointeja. Suomessa tämä kausivarastointi on hyödyllisintä toteuttaa lämpövarastoilla. Iso osa talven energiakustannuksista koostuu lämmityksen tarpeesta, ja lämpövarastojen avulla energia voitaisiin siirtää helpommin ja hyödyllisemmin rakennusten lämmittämiseen.

## 3 AURINKOPANEELIN VALMISTUS

Ennen kuin luonnossa esiintyvä raaka piikvartsi on muunnettu osaksi aurinkopaneelia ja sitten osaksi aurinkovoimalaa, sen on käytävä kahdeksan pääprosessia. Tässä luvussa kerron kyseisistä prosesseista ja niiden vaatimasta energiamäärästä. Kuvassa 4 on esitetty kyseiset prosessit.



Kuva 4. Piin matka osaksi aurinkovoimalaa

### 3.1 Kaivostyöt

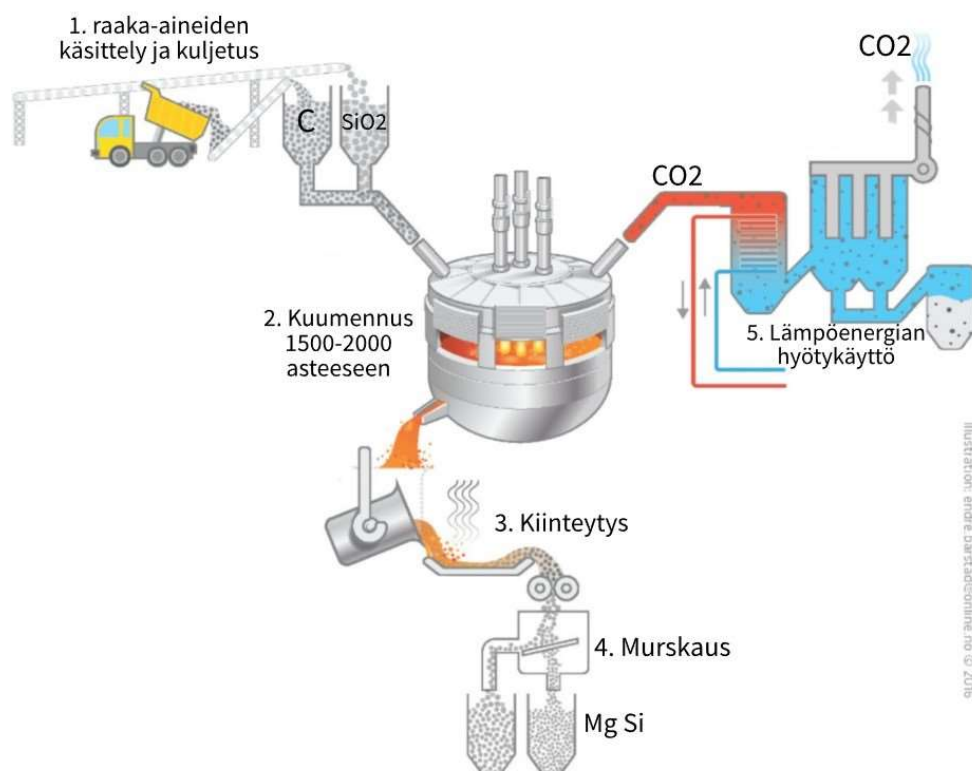
Piidioksidia eli kvartssia löytyy maapallon kuorikerroksesta. Maapallon kuori sisältää 27,7 % piitä sen ollen toiseksi yleisin alkuaine maan kuorella. Puhdasta piitä ei esiinny luonnossa, mutta sitä voi löytää kivissä kvartsimuodostuksina. Näiden kivien piipitoisuus voi olla jopa yli 98 %. Kiina, Venäjä ja Norja ovat yksiä suurimpia piimineraalien tuottajia. /7./ Koska pii on yleinen aine, sen kaivosprosessi on suoraviivainen ja se vie vähän energiaa verrattuna muiden alkuaineiden louhintaan. Ensiksi piipitoinen maaperä räjäytetään ja kerätään kaivureilla ja kuorma-autoilla. Sitten kivimurska kuljetetaan liukuhihnoja apuna käyttäen seulonta, pesu ja kuivausvaiheiden läpi. /8, s. 5./ Tämän jälkeen kivimurska voidaan kuljettaa kaivokselta piin jalostuslaitokselle. Kuljetus on kaivosprosessissa eniten energiaa vaativa asia, ja se toteutetaan pääosin dieselpolttoisilla työkoneilla. Kiinan kotimaisessa piin tuotannossa tähän prosessiin kuluu 1317 MJ per tonni piikvartssia /8, s. 12/.

### 3.2 Karboterminen pelkistys

Kun kvartsi saapuu louhokselta, alkaa sen puhdistusprosessi. Ensimmäisenä prosessina on karboterminen pelkistys. Pelkistuksen tavoitteena on saada kvartsi metallurgiseksi piiksi (Mg-Si), jonka piipitoisuus on noin 98–99 %. Piidioksidi ( $\text{SiO}_2$ ) on hapen ja piin yhdiste ja karbotermisellä pelkistyksellä päästään hapesta eroon. Kvartssia lämmitetään valokaariuunissa noin 1500–2000 °C ja uuniin lisätään hiiltä (C). Hiili reagoi piidioksidin kanssa yhtälön 1 mukaisesti ja lopputuloksena saadaan piitä (Si) ja hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ). /9./



Reaktion jälkeen metallurginen pii valutetaan nestemäisessä muodossa astiaan kiinteytystä varten. Sivutuotteena syntyneestä kuumasta hiilidioksidikaasusta otetaan lämpöenergia hyötykäyttöön, ennen kuin kaasu vapautetaan ilmakehään. Kiinteytyksen jälkeen pii murskataan seuraavia prosesseja ja kuljetusta varten. Kuvassa 5 on esitetty karbotermisen pelkistysvaiheet.



Kuva 5 Karbotermisen pelkistys

Koska pelkistys vaatii suuria lämpötiloja, se myös vaatii paljon energiaa. Tämän prosessin energian tarve on 15 kWh/kg metallurgista piitä /9/.

### 3.3 Hydrokloraatio

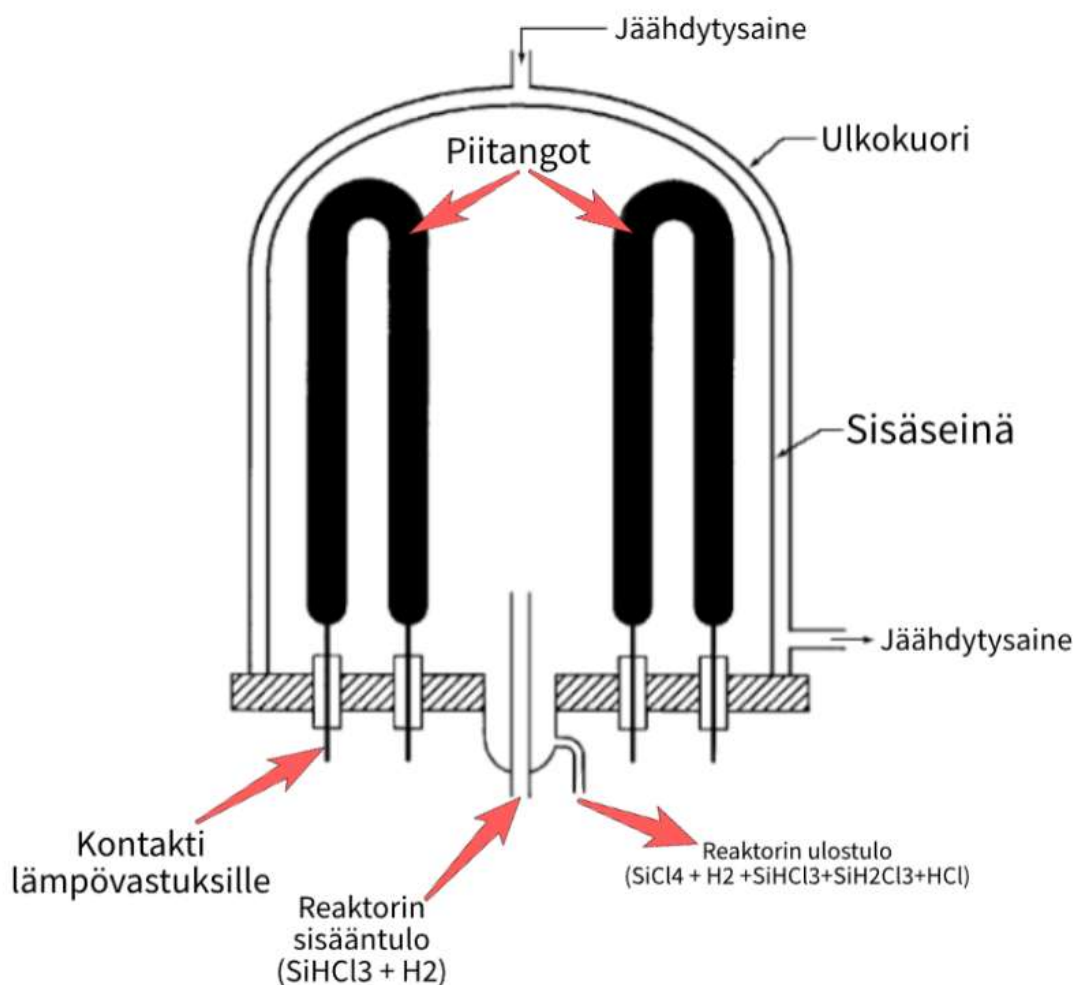
Jotta metallurgisesta piistä saadaan lähes täysin puhdasta piitä, on sille tehtävä ensiksi kemiallinen käsittely hydrokloraatio. Metallurgisessa piissä on vielä noin 1–2 % epäpuhtauksia, kuten rautaa ja alumiinia, ja tässä kemiallisessa käsittelyssä ne pyritään poistamaan. Hienoksi jauhettu metallurginen pii yhdistetään suolahapon (HCl) kanssa muodostaakseen yhtälön 2 mukaisen reaktion. /9./



Lopputulemana reaktiosta syntyy nestemäistä piikloroformia ja vetyä. Reaktion aikana metallurgisen piin epäpuhtaudet reagoivat myös suolahapon kanssa muodostaen halideita, jotka suodatetaan nesteestä pois jättäen jäljelle todella puhdasta piikloroformia /9/. Tämä kemiallinen käsittely ei vaadi ulkoista energiaa reagoidakseen.

### 3.4 Siemensin prosessi

Siemensin prosessin tarkoituksena on kiinteyttää piikloroformi ja saada lopputulemaksi tarpeeksi puhdasta piitä, että se toimii puolijohdemateriaalina. Aurinkopaneeleissa pii on yleisesti puhtaampaa kuin 99,9999 %. Siemensin prosessissa puhdas piikloroformi liuotetaan vetyyn ja kaasutetaan kuvan 6 mukaiseen kammioon. Kammiossa voi olla yli 30 ohutta U:n muotoista piitankoa, jotka toimivat lämmitysvastuksina. Näitä vastuksia lämmitetään noin 1100 °C asteeseen, ja reaktiona niiden päälle alkaa kasvaa paksumpi piikerros. /10, s. 14–15./



Kuva 6 Siemens reaktori

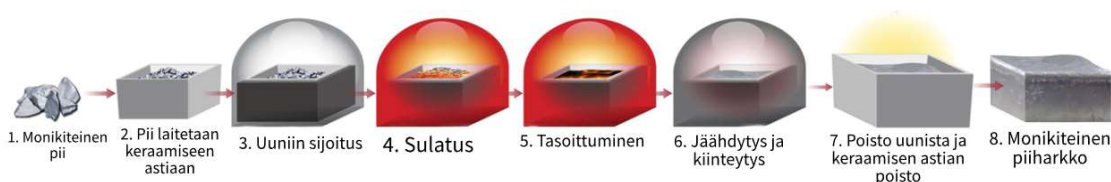
U-tankojen päälle kasvanut pii on todella puhdasta, ja sitä voidaan käyttää puolijohdemateriaalina. Haluttu reaktio, joka tapahtuu kammiossa, näkyy yhtälössä 3 /9/.



Kammiossa tapahtuu myös muita kemiallisia reaktioita, ja näiden reaktioiden sivutuotteet sitovat myös piitä laskien näin ollen prosessin hyötysuhdetta /10, s.15/. Prosessin aikana piitangoista kasvaa 150–200 mm paksuudeltaan. Siemensin prosessi voi kestää jopa 300 tuntia. /9./ Prosessin jälkeen U-tangot poistetaan kammioista, ja ne paloitellaan seuraavia vaiheita varten. Koska reaktiossa tarvitaan suuria lämpötiloja ja pitkää prosessiaikaa, siihen kuluu paljon energiaa. Siemensin prosessi vaatii alimmillaan 50 kWh/kg monikiteistä piitä /11, s.10/.

### 3.5 Piiharkon valaminen

Siemensin prosessin jäljiltä saatu pii on nyt saatava yhtenäiseksi piiharkoksi. Piiharkon valuprosessissa piihin lisätään booria, jotta siitä saadaan positiivisesti varautunutta. Yleisin menetelmä yksikiteisen piiharkon tekemiseen on Czochralski-menetelmä. Monikiteinen harkko valetaan perinteisemmin keinoon. Monikideharkko valetaan lisäämällä piitä suorakulmaiseen astiaan, joka sijoitetaan uuniin sulatusta varten. Pii sulaa astian muotoiseksi harkoksi. Kun pii on jäähtynyt ja kiinteytynyt, se poistetaan astiasta. /11, s.16./ Monikideharkon valaminen on energiatehokkaampaa, kuin yksikideharkon. Kuvassa 7 on esitetty monikideharkon valamisprosessi.

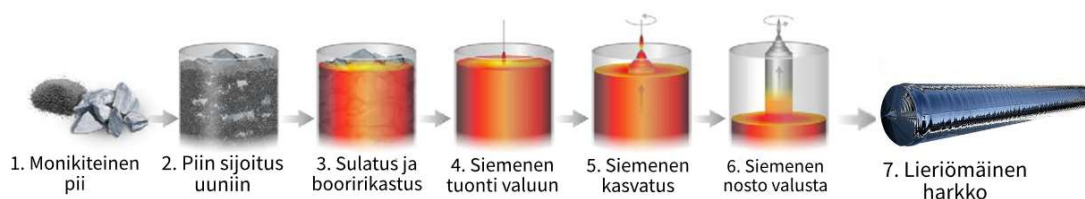


Kuva 7 Monikideharkon valaminen

Czochralski-menetelmän avulla piiharkosta saadaan yksikiteinen. Menetelmässä pii sulatetaan lieriömäisessä astiassa ja astiaan viedään yksikiteisestä piistä tehty ”siemen”. Siementä kierretään ja vedetään ylöspäin hitaasti, jonka



seurauksena astiassa oleva sula pii alkaa muodostaa siemenen ympärille lisää yksikiteistä piitä. Piin lämpötilaa ja siemenen veto- ja kierrosnopeutta on tarkkailtava jatkuvasti. Prosessin edetessä siemen alkaa näyttää pitkulaiselta lieriöltä. Lieriön halkaisijaksi halutaan tyypillisesti noin 200 mm /12/. Prosessin päätyttyä siemenestä on kasvanut pitkä lieriö, joka voi painaa noin 150–200 kiloa. Menetelmä vaatii paljon energiaa, sillä se kestää noin 35 tuntia. /11, s.15/. Kuvassa 8 on esitetty Czochralski-menetelmä.



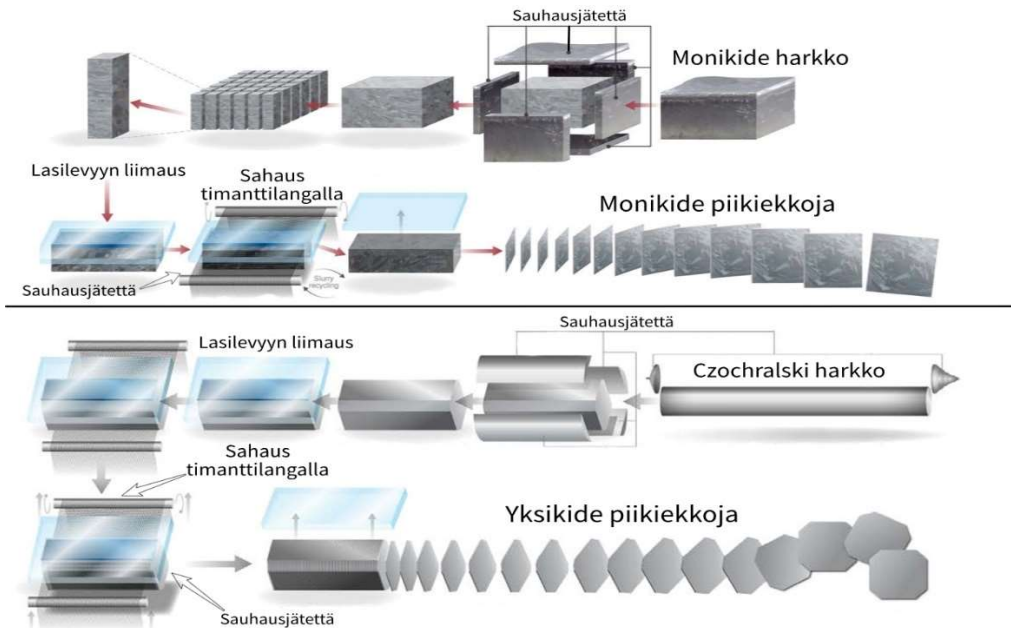
Kuva 8 Czochralski menetelmä

Uusimpia teknologioita hyödyksi käyttäen energian kulutus Czochralski-menetelmällä on 32 kWh/kg. Monikidepiiharkon valamiseen tarvitaan vain 7 kWh/kg. /13, s. 28./

### 3.6 Aurinkokennojen valmistus

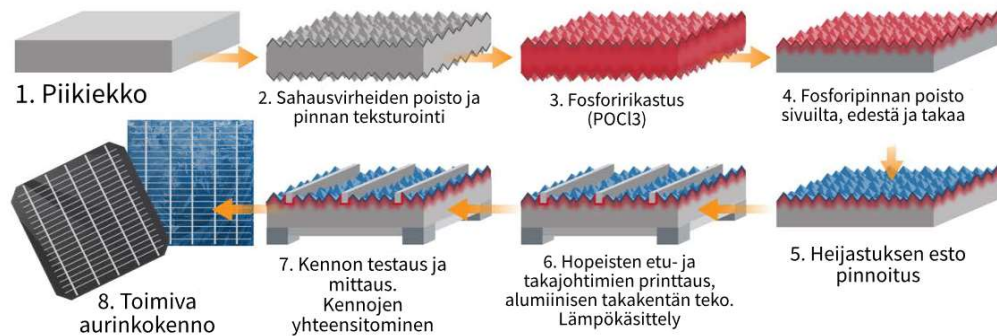
Piiharkkojen valamisen jälkeen voidaan aloittaa piikiekkojen valmistus. Olkoon yksi- tai monikide harkko kyseessä, se vaatii sahausta. Harkkojen sahaus tyyli on samankaltainen. Ensiksi harkosta poistetaan epätasaisuudet reunoilta ja siitä tehdään oikean mittainen suhteessa piikiekkoon. Harkko sen jälkeen paloitellaan ohuiksi noin 160–180  $\mu\text{m}$  paksuisiksi kiekkoiksi. /11, s.15–16./ Kiekot sahataan timanttivaijerilla, ja sahausjätettä noin 40 prosenttia harkon kokonaispainosta /14, s.1/. Kuvassa 9 on esitetty piiharkkojen sahausmenetelmät.





Kuva 9 Piikiekkojen sahaus

Sahausprosessin jälkeen piikiekoista aletaan valmistaa aurinkokennoja. Tähän prosessiin kuuluu monta välivaihetta, ja ne vaihtelevat aurinkokennon tyyppin mukaan. Välivaiheisiin kuuluu kemiallisia käsittelyjä, plasmakäsittelyä, lämpökäsittelyä ja juotoksia /11, s.24/. Aurinkokennon valmistusvaiheet on esitetty kuvassa 10.



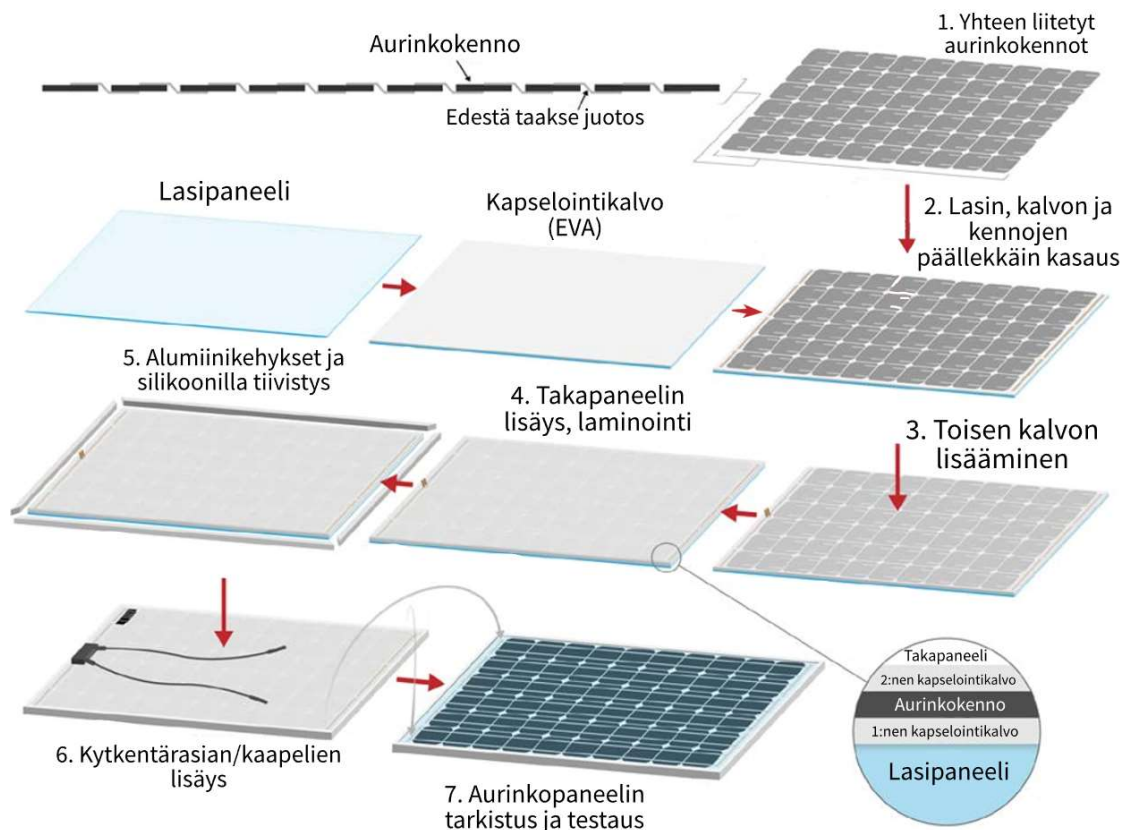
Kuva 10 Aurinkokennon valmistus

Ensiksi piikiekoista poistetaan sahausajan aiheuttamat virheet kuumalla natriumhydroksidiliuoksella. Sitten pinta teksturoidaan laimeammalla natriumhydroksidiliuoksella, jossa on isopropanolia tensidinä eli kosteutusaineena. Teksturoinnin jälkeen piikiekon toinen puoli kastetaan fosforyylikloridissa ja lämmitetään uunissa, jotta kiekon pinta saadaan negatiivisesti varautuneeksi. Seuraavaksi poistetaan fosforipinnoitus kiekon sivusta. Se saadaan aikaan asettamalla pino piikiekoja plasmauuniin, joka kuivaattaa kiekkojen sivut tetrafluorimetaanin ja hapen avulla. Heijastuksenestopinnoitus saadaan fosforipinnan

päälle käyttämällä kemiallista höyrypinnoitusprosessia. Kiekot asetetaan kammiioon, johon kaasutetaan ammoniakkia ja silaania. Aineet hajoavat kammiossa lämpötilan vaikutuksesta ja muodostavat piikiekon päälle heijastuksenesto pinnan. Pinnoitusten jälkeen piikiekkoon printataan hopeiset etujohtimet. Märkää hopeamassaa levitetään muotin läpi kiekon pinnalle, ja se vietään kuivausuuniin. Kuivumisen jälkeen kiekon taakse printataan alumiininen takalevy samankaltaisella prosessilla, ja se vietään taas kuivausuuniin. Viimeisenä levyn taakse printataan vielä hopeajohtimet, ja ne kuivataan myös. Piikiekkoo käytetään tämän jälkeen lämpökäsittelyssä, jotta johtimet kiinteytyvät hyvin kiinni. /9./ Kaiken tämän jälkeen piikiekosta on muuntautunut aurinkokenno, joka mitataan ja testataan kunnolliseksi ennen aurinkopaneelin kasausvaihetta. Yhden aurinkokennon tekemiseen kuluu noin 0,45 kWh /13, s.34/.

### 3.7 Aurinkopaneelin kasaus

Aurinkokenno kykenee jo valosähköisen ilmiön toteuttamiseen, mutta ei ole käytännöllistä asentaa yksittäisiä kennoja sähkön tuottamista varten. Näin ollen kennot juotetaan yhteen ja niistä kasataan aurinkopaneeli, joka sisältää tyypillisesti 60 kennoa. Kuvassa 11 on esitetty aurinkopaneelin kasausvaiheet.



Kuva 11 Aurinkopaneelin kasaus

Aurinkopaneelin kasauksen ensimmäinen vaihe on liittää aurinkokennot sähköisesti yhteen kuparilangalla. Sitten kennot lasketaan ethyleeni-vinyyliaasetatista (EVA) tehdyn kapselointikalvon ja lasipaneelin päälle. Kennojen päälle lasketaan toinen kapselointikalvo ja takapaneeli. Nämä kerrokset laminoidaan yhteen, jotta niistä saadaan tiivis ja vedenpitävä levy. Tämä levy kehystetään alumiinikehyksillä ja reunat tiivistetään silikonilla. Aurinkokennoihin yhdistetään vielä kuparikaapelit kytkentärasiasissa, ja sitten aurinkopaneeli on valmis. Ennen aurinkopaneelin kuljetusta tai pakkaamista se testataan virheiden varalta. Yhden aurinkopaneelin kasaukseen kuluu 20–25 kWh sähköenergiaa. /11, s.31–33./

### **3.8 Aurinkopaneelin asennus**

Normaalisti aurinkopaneeleita asennetaan rakennusten katoille tai maan pinnalle kenttinä, ja ne muodostavat aurinkovoimalan. Yleisesti katolle asennetut paneelit lepäävät alumiinirimojen päällä, ja maahan asennetut paneelit ovat maatelineillä, jotka koostuvat betoniharkoista ja metallikehikosta. Aurinkopaneelit tuottavat tasasähköä, joten se on muutettava invertterin avulla verkkoon sopivaksi vaihtosähköksi. Invertterit ovat kalliita, ja niiden valmistus on myös monimutkaista ja energiaa vaativaa toimintaa. Arvioiden mukaan 10 kW invertterin kasaamiseen kuluu 36,4 kWh energiaa /13, s.57/. Aurinkopaneelien, asennuskehikkojen ja invertterin lisäksi aurinkovoimala ei vaadi kuin kupari- tai alumiinikaapelia tuottaakseen energiaa verkkoon.

### **3.9 Aurinkopaneelin kierrätys**

Kun arvioidaan tuotteiden kokonaisvaltaista energiakustannusta, on otettava myös huomioon tuotteen kierrättämiseen kulunut energia. Aurinkopaneelit ja invertterit luokitellaan ongelmajätteeksi, joten niiden kierrätys on kallis ja energiatiivis prosessi. Aurinkopaneelien kierrätys on vielä uusi ja kehitystä vailla oleva ala, mutta se muuttuu relevantiksi alaksi seuraavina vuosina, sillä 1990-luvulla tehtyjen paneelien elinikä alkaa olla lopussa. Myös aurinkopaneelien kasvava markkina takaa kierrätykselle merkityksen. Vaikka kierrätyskin vaatii energiaa, se vaatii sitä vähemmän kuin aurinkopaneelin tuottaminen alusta saakka, ja kierrätyksen avulla energiaa voisi säästää paneelin valmistusprosessissa. Energian säästön lisäksi aurinkopaneelien oikean tapainen kierrätys

estäisi ongelmajätteen kasaantumisen kaatopaikoille säästään näin ollen myös ympäristöämme.

Kiertotaloudellinen aurinkopaneelien kierrätysprosessi voidaan jakaa neljään osaan (kuva 12). Kun puhdas pii on erotettu paneelin osista, niin silloin paneelin kaikki osat ovat eroteltuja toisistaan. Aurinkopaneelin valmistuksessa käytetyt kemialliset aineet tekevät kierrätysprosessista ja materiaalien puhtaasta takaisin saannista haastavaa.



Kuva 12 Aurinkopaneelin kierrätys

Kierrätysprosessin ensimmäiseen vaiheeseen kuuluu aurinkovoimalan purkutyöt. Tässä vaiheessa katsotaan myös, mitkä paneelit laitetaan uudelleen käyttöön ja mitkä paneelit lähetetään kierrätysprosessissa eteenpäin. Paneelit, jotka etenevät kierrätysprosessissa, kohtaavat seuraavaksi mekaanisen käsittelyn, jossa irrotetaan alumiinikehys, kaapelit ja kytkentäkotelo. Kaapelit leikataan manuaalisesti pihdeillä pois, ja sitten paneeli asetetaan laitteeseen, joka työntää kehysten ja kotelon metalliterillä irti paneelista. Nämä komponentit ovat helppoja kierrättää, sillä ne koostuvat puhtaista metalleista ja muoveista. /15./

Kehyksettömän paneelin kierrätykseen on monia tapoja, ja usein sovelletaan-kin mekaanisia, kemiallisia ja lämpökäsittelyjä yhdessä. Yksi tapa poistaa muovit aurinkokennojen ympäriltä on polttaa ne kaasuiksi uunissa. Jälkeen jää paneelin lasi ja kennomateriaali. Tämän jälkeen voidaan mekaanisesti erottaa

lasi ja kennot toisistaan seulontamenetelmällä. Aurinkokennot sisältävät metalleja, jotka voidaan liuottaa kemiallisesti pois jättäen jälkeen pelkän piin. Kyseinen pii ei ole kuitenkaan tarpeeksi puhdasta, jotta se voitaisiin suoranaisesti hyötykäyttää aurinkopaneeliteollisuudessa käytettyjen piiharkkojen valmistamiseen. Piille täytyy tehdä erillinen puhdistusprosessi, jotta se voisi välttää aurinkopaneelien valmistuksessa ilmenneen energiatähtiin Siemensin prosessin. Piin puhdistusprosessiin kuuluu leikkaaminen, seulonta, happouutto, suodatus ja elektrolyysi. Kiertotalousmallisen kierrätysprosessin energian kulutukseksi on arvioitu 105 kWh/tonni aurinkopaneelijätettä. /15, s.9–12./

## 4 ENERGIAN TAKAISINMAKSUAIKA

Tässä luvussa esitän esimerkkilaskun, jossa lasketaan tyypillisen katolle asennettavan aurinkovoimalan perustamiseen kulunutta energiaa ja verrataan sitä sen tuottamaan energiaan. Havainnoidaan hypoteettinen tilanne, jossa kouvolaalainen sähköasennusyriitys saa tehtäväkseen rakentaa Kajaaniin aurinkovoimalan. Voimala rakennetaan omakotitalon katolle, jonka kallistuskulma on 45 astetta ja se osoittaa etelään. Asiakas haluaa katolleen 16 aurinkopaneelia ja aurinkopaneeliksi valitaan Longi:n aurinkopaneelimalli LR4-60HPB 355M /16/. Lasketaan, kuinka paljon energiaa näiden 16 paneelin valmistukseen ja kuljetukseen kuluu. Laskussa ei oteta huomioon prosessien manuaalisia työvaiheita, kuten lastaamista, suunnittelua ja asentamista. Laskussa ei myöskään oteta huomioon tehtaiden ylläpitokustannuksia, kuten ilmanvaihtoa, lämmitystä tai muuta energian kulutusta. Laskutoimenpiteitä voi tarkkailla liitteestä 1([Aurinkopaneelin energiantakaisinmaksuaika.xlsx](#)).

### 4.1 Aurinkopaneelin valmistus

Ensimmäiseksi lasketaan aurinkopaneelin valmistamiseen kulunut energia. Kyseisessä aurinkopaneelimallissa on 60 aurinkokennoa, jotka sisältävät yhteensä 587,28 g piitä /16/. Kun otetaan huomioon piikiikkojen valmistuksessa syntynyt sahausjäte, niin tiedetään paneelin tarvitsevan 0,822 kg monikiteistä piitä. Tuo määrä monikidepiitä saadaan aikaan laittamalla 0,906 kg metallurgista piitä Siemens-reaktoriin, ja 0,906 kg metallurgista piitä saadaan tekemällä karboterminen pelkistys 3,05 kilolle piikiveä. Vaiheet esitetty taulukossa 1.



Taulukko 1 Aurinkopaneelin sisältämä pii

Aurinkopaneelimalli - Jinko LR4-60HPB 345-365M		Käytetty pii			
Pinta-ala	1,87 m <sup>2</sup>	Kerroin			
Kennot	60 kpl	Sahausjäte 40% /14/	140 %	=	0,822 kg Monikidepii
Paino	20 kg	Siemens /17, s.4/	1,101	=	0,906 kg Metallurginen pii
Pmax	355 W	Karboterminen pelkistys /17, s.4/	3,368	=	3,050 kg Piikivi
Kennon paino	9,788 g				
Piitä yhteensä	587,28 g				
Hyötysuhde	19 %	Kertoimet suhteutettu lähteestä			

Piin käsittelyyn kaivokselta katolle ja katolta takaisin aurinkopaneelituotantoon sisältyy kahdeksan vaihetta. Nämä vaiheet kukin kuluttavat tietyn verran energiaa, ja ne on esitelty taulukossa 2. Yhteensä yhden aurinkopaneelin piin käsittelyyn kuluu noin 170,6 kWh.

Taulukko 2 Energiankulutus aurinkopaneelin valmistuksessa

Energiankulutus yhden aurinkopaneelin valmistukseen (pii)				Paneelin muut osat	
Piin osuus paneelin painosta		2,94 %		Lasi(70%)	14 kg
Kaivostyöt /8, s. 12/	0,3658 kWh/kg	=	1,115855 kWh	Valmistus /18, s.14/	4,34 kWh/kg
Karboterminen pelkistys /9/	15 kWh/kg	=	13,58404 kWh	Energia =	60,76 kWh
Hydroklooraatio /9/	0 kWh/kg	=	0 kWh	Alumiinikehys(14%)	2,8 kg
Siemensin prosessi /11, s.10/	57,5 kWh/kg	=	47,27604 kWh	Alumiinin valmistus /19/	40,17 kWh/kg
Yksikidepiikiekon teko /11, s.18/	0,9 kWh/kiekkko	=	54 kWh	Kehyksen valmistus /20/	4,54 kWh/kg
Kennon valmistus /11, s.26/	0,5 kWh/kenno	=	30 kWh	Energia =	125,188 kWh
Paneelin kasaus /11, s.33/	22,5 kWh/paneeli	=	22,5 kWh	Muovi(9%)	1,8 kg
Kierrätys /15/	105 kWh/tonni	=	2,1 kWh	Muovin valmistus/21/	15,89 kWh/kg
				Energia	28,602 kWh
			<b>Yhteensä 170,5759 kWh</b>	<b>Yhteensä</b>	<b>214,55 kWh</b>

Aurinkopaneelin lasi kattaa noin 70 % paneelin kokonaispainosta ja sen tuotantoon kuluu 60,8 kWh /6, s.21; 18, s.14/. Paneelin alumiinikehys kattaa noin 14 % painosta, ja sen valmistukseen kuluu yhteensä 125,2 kWh /6, s.21; 19, s.5; 20, s.10/. Laskussa EVA-muovin valmistukseen kulunut energia on rinnastettu PVC-muovin valmistukseen. Muovien valmistukseen kuluu energiaa 28,6 kWh /21, s.55/. Muiden komponenttien, kuten hopeajuotoksien, valmistukseen kulunutta energiaa ei ole sisällytetty laskuun. Pii, alumiini, lasi ja muovit kattavat noin 96 % aurinkopaneelin painosta, ja näiden komponenttien valmistukseen kuluu yhteensä noin 385 kWh per aurinkopaneeli (taulukko 2).

#### 4.2 Kuljetus

Longi-aurinkopaneelien valmistusmaa on Kiina, joka tarkoittaa sitä, että paneelien osia on kuljetettava yli 10 000 kilometriä, ennen kuin ne päätyvät koh-

teeseensa Kajaaniin. Laskussa havainnoidaan ihannetilanne, jossa piikivi kuljetetaan Xinjiangissa sijaitsevalta louhokselta Longin aurinkopaneelitehtaalle Xianiin. Xianin tehtaalla tapahtuu jokainen piin käsittelyyn ja aurinkopaneelin kasaukseen liittyvä työvaihe, kunnes aurinkopaneeli on valmis. Tämän jälkeen paneeli kuljetetaan dieselveturissa Kouvolaan ja sieltä pakettiautossa työmaalle. Reittien pituudet on selvitetty Google maps -sovellusta apuna käyttäen. Reitti on havainnoitu kuvassa 13.



Kuva 13 Kuljetusreitti

Reitin ensimmäinen osuus eli Xinjiangista Xi'aniin toteutetaan rautateitse. Rautatiekuljetuksessa esimerkkinä olen valinnut VR:n käyttämän yleisvaunun, jonka hyötykuorma on 28 tonnia /22/. Raskaan dieselveturin vaunu kohtainen keskikulutus on 0,5 l/km /23, s. 78/. Näitä arvoja apuna käyttäen voidaan laskea kuljetuksen energiankulutus 3,05 kilolle piikiveä, eli yhden aurinkopaneelin verran. Tulokseksi saadaan niukat 13,8 millilitraa. Xianista Kouvolaan kuljetus tapahtuu myös rautateitse. Kyseinen aurinkopaneelimalli pakataan 30 paneelin nipuissa, joten yleisvaunuun mahtuu 420 paneelia /16; 22/. Vaunun kuljetus Kouvolaan vaatii 400 litraa dieseliä ja näin ollen yhden paneelin osuus on noin 0,95 litraa. Viimeinen kuljetus tapahtuu dieselpoltteisella pakettiautolla, jonka keskikulutus on arvioitu 10 litraa per 100 kilometriä. Kajaanin työmaalla vaaditaan 16 aurinkopaneelia, ja niiden kuljetus vaatii 43,5 litraa dieseliä. Edellä mainitut kuljetukset vaativat 16 paneelin osalta yhteensä

59 litraa dieseliä. Dieselin energiasisältö on 11,8 kWh/l, joten kuljetuksiin kului noin 696 kWh energiaa. Kuljetuksen energiamäärät on esitetty taulukossa 3.

Transportaatio				Reitti Kajaaniin	
Pakettiauto				Piikiven kuljetus louhokselta tehtaalle (Xinjiang-Xian)	2531 km
Kulutus	10 l/100km			Kulutus	= 126,55 l
Raskas diesel veturi, yleisvaunu-Gbln /22/				Yhden paneelin osuus	= 0,013787 l
Vaunun mitat	1278	285	313 cm	Paneelien kuljetus tehtaalta Suomeen (Xian-Kouvola)	8000 km
Vaunukohtainen energiankulutus /23/	0,05 l/km			Kulutus	= 400 l
Paneeleita mahtuu	420 kpl			Yhden paneelin osuus	= 0,952381 l
Hyötykuorma	28000 kg			Paneelien kuljetus Kouvolaan työmaalle (Kouvola-Kajaani)	435 km
<b>Muut aurinkovoimalan osat</b>				Kulutus	= 43,5 l
Invertterin kasaamiseen kulunut energia(10kW) /13/			36,4 kWh	Yhden paneelin osuus	= 2,71875 l
Alumiinikiskoa 2,4 m			15 kpl	Diesel-polttoöljyn energiasisältö	11,8 kWh/l
paino per kisko			2 kg	Yhden paneelin kuljetukseen	= 43,48203 kWh
valmistukseen kulunut energia /19; 20/			1341,3 kWh	kulunut energia	
			<b>Yhteensä =</b>		<b>1377,7 kWh</b>

Taulukko 2 Kuljetus ja muut kulut

### 4.3 Aurinkovoimalan muut osat

Kun kyseessä on kattoasennus, aurinkopaneelit tarvitsevat kiskon, johon ne tulee kiinnittää. Tällä työmaalla käytetään yleisimmin alumiinikiskoa /24/. Näitä kahden kilon painoisia kiskoja tarvitaan 15 kappaletta, ja niiden valmistukseen kuluu 1341,3 kWh /19, s.5; 20, s.10/. Voimalaan tarvitaan myös invertteri, jonka kasaamiseen kuluu 36,4 kWh /13, s.57/. Invertterissä käytetyn materiaalin valmistusta ei ole huomioitu laskussa. Energiamäärät esitetty taulukossa 3.

### 4.4 Aurinkovoimalan tuotto

Aurinkovoimalan tuottoennuste voidaan laskea käyttämällä apuna Ilmatieteen laitoksen ilmoittamaa aurinkosäteilyenergiälukua. Kajaanin kohdalla säteilyenergiaa on noin 890 kWh/m<sup>2</sup> vuodessa /25/.

Aurinkovoimalan tuottavuus voidaan määrittää yhtälöstä 4.

$$E = \eta \times A \times R \quad (4)$$

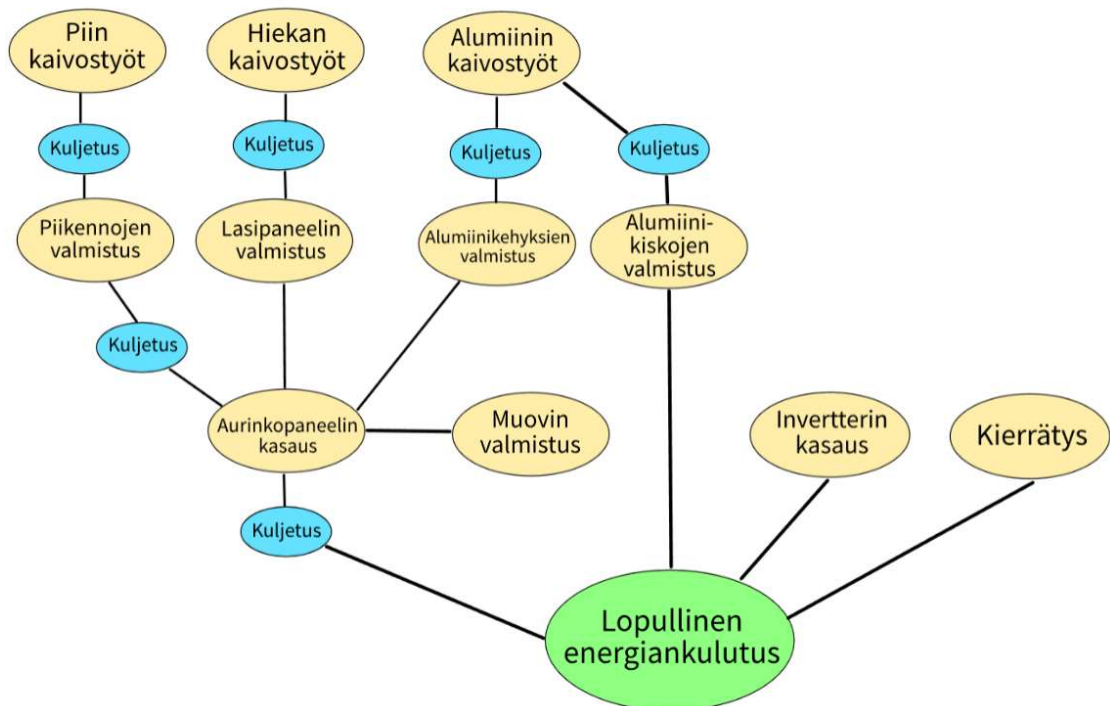
jossa	$E$	Voimalan vuosituotto	[kWh]
	$\eta$	Paneelin hyötysuhde	[%]
	$A$	Paneelien pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]



Paneelien hyötysuhteen ollessa 19 % ja paneelien yhteispinta-alan noin 30 neliometriä. Aurinkovoimalan vuotuiseksi tuottavuudeksi tulee 5055 kWh. Tuon luvun takana on olettaimus, että paneelit toimivat moitteettomasti ja talven lumipeite ei vaikuta tuloksiin.

#### 4.5 Tulokset

Kun lasketaan yhteen energiantarve aurinkopaneelin pääkomponenttien valmistuksessa (aurinkokennot, lasipaneeli, alumiinikehys, kapselointimuovi), kuljetuksessa, invertterin kasaamisessa ja alumiinikiskon valmistuksessa, niin tulokseksi saadaan 8235 kWh. Kuvassa 14 on havainnoitu laskussa huomioidut seikat. Jokainen ellipsi kuvaa energiaa vaativaa vaihetta.



Kuva 14 Energiankulutuskaavio

Nyt voidaan vertailla tulosta aurinkopaneelien tuottamaan energiaan. Jakaamalla energiantarve aurinkovoimalan vuosituotolla tulokseksi saadaan lopullinen energiantakaisinmaksuaika, joka on 1,63 vuotta. Tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4 Energiantakaisinmaksuaika

Katolle asennettu aurinkovoimala	
Sijointus	Kajaani
Paneelit	16 kpl
Invertterit (10kW)	1 kpl
Pmax	5680 W
Asennuskulma	45 aste
Suuntaus	etelä
Aurinkosäteilyn määrä /25/	890 kWh/m <sup>2</sup>
Vuosituotto	5055,2 kWh
Takaisinmaksuaika	1,63 vuotta
Takaisinmaksuenergia	8235,43 kWh

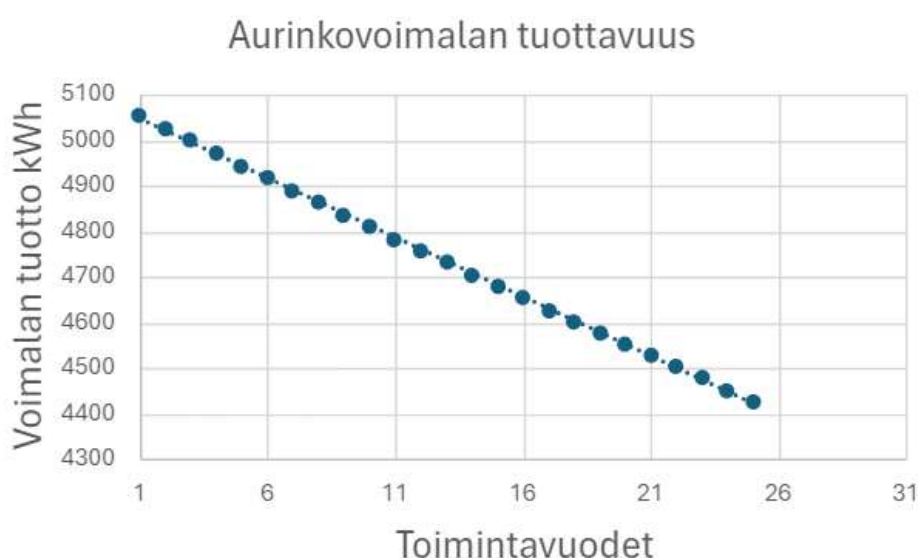
#### 4.6 Tulosten arviointi

Noin puolentoista vuoden energiatakasoinmaksuaika aurinkopaneeleille on epärealistinen tulos, mutta hyvin suuntaa antava. Esimerkiksi piin käsittely laskussa on toteutettu ihannelanteessa, jossa eri tehtaiden väliset ainekuljetukset on jätetty pois. Myös ihmisten tekemät manuaaliset prosessit on jätetty huomiotta. Kaikkia pieniä työvaiheita on vaikea arvioida näin pitkässä teollisuusprosessissa. Esimerkiksi pii varastoidaan ja lastataan moneen kertaan, ennen kuin se päättyy aurinkokennoksi. Tehtaiden ylläpitokustannukset ovat kuitenkin isoin seikka, joka on jätetty laskusta pois. Piin valmistuksessa käytetään korkeita lämpötiloja, jonka takia tehtaot vaativat hyvää ilmanvaihtoa ja suurta vedenkulutusta. Jos kaikki suoranaiset energiakulut aurinkopaneelin valmistuksessa otettaisiin huomioon, paneelin energiatakasoinmaksuaika ylittäisi arvioni mukaan yli kolmeen vuoteen.

Epäsuoria energiakuluja liittyy myös aurinkopaneelin valmistukseen. Esimerkiksi kaivostöiden aiheuttamat luonnonsuojelutyöt kuuluvat näihin. Piin kaivuu muokkaa ympäristön ekosysteemiä, ja tästä koituu erinäisiä ongelmia. Kiinassa sijaitsevan Mekong-joen varrella sijaitsee maailman suurimpia piin kaivutyömaita, ja niiden seurauksesta Mekong-joen ekosysteemi kärsii. Mekong jokialueella asuu yli 60 miljoonaa ihmistä, joiden ruoanhankinta vaikeutuu

ekosysteemin muuttumisesta. /8, s.7./ Tämän tyyppisten ongelmien ratkomi-  
seen kuluu myös energiaa, mutta niiden energiakuluja on vaikea ennustaa  
etukäteen.

Longi lupaa kyseiselle aurinkopaneelimalille 25 vuoden takuun, jossa aurinko-  
paneelin vuotuinen tehontuotto laskee vain 0,55 % /16/. Kuvitellaan tilanne,  
että aurinkopaneelit kestää vain 25 vuotta toiminnassa ja niiden tehontuotto  
laskee vuosittain 0,55 %. Kuvassa 15 on esitetty aurinkovoimalan vuosituotto-  
kuvaaja.



Kuva 15 Aurinkovoimalan tuottavuus

25 vuodessa aurinkovoimala tuottaa yhteensä 118,4 MW, joka tarkoittaa, että  
voimala tuottaa vaatimansa energian 14,4-kertaisesti elinikänsä aikana. Jos  
kuitenkin oletetaan, että energiantakaisinmaksuaika ylittää yli kolmen vuoden  
eli kaksinkertaisesti edellä lasketun ajan, niin voimala tuottaa vaatimansa  
energiaa noin 7,2-kertaisesti takuun aikana.

#### 4.7 Aurinkoenergian ja kivihiilen vertailu

Ympäristöystävällisyyden nimissä on myös tärkeää vertailla energiamuotojen  
päästöjä. Sähköyhtiö Helenin blogissa kivihiilen hiilidioksidiekvivalentiksi on il-  
moitettu 820 g/kWh. Eli yhden kilowatin tuottaminen aiheuttaa tuon verran hiili-  
dioksidipäästöjä. Aurinkoenergian ekvivalentti on puolestaan ilmoitettu 44

g/kWh. /26./Jos oletetaan, että esimerkkilaskussa aurinkovoimalan valmistukseen kulunut energia on kaikki tuotettu kivihieillä ja kuljetukseen on käytetty dieselpolttoöljyä, niin aurinkovoimalan hiilidioksidipäästöt olisivat 6,34 tonnia CO<sup>2</sup>. Kun jakaa hiilidioksidipäästöt aurinkovoimalan koko eliniän tuottavuudella (25 vuotta), niin hiilidioksidiekvivalentiksi määräytyy 53,6 g/kWh. Kivihieillä tuotettu sähköenergia tuottaa siis yli 15 kertaa enemmän hiilidioksidipäästöjä kuin katolle asennettu sähkövoimala. Taulukossa 5 on esitetty katolle asennettavan aurinkovoimalan hiilidioksidipäästöjä.

Taulukko 5 Kivihieiden ja aurinkoenergian vertailu

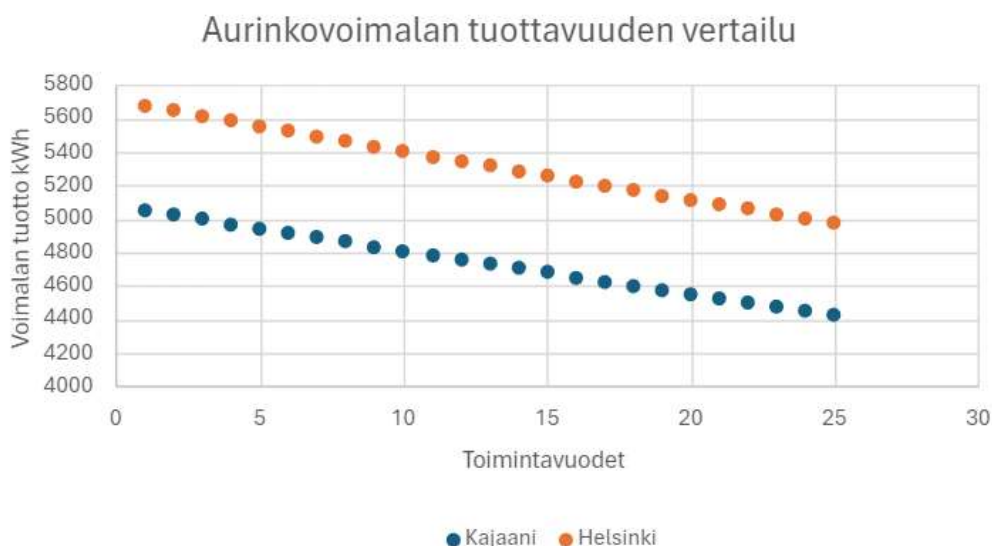
Kivihieiden ja aurinkoenergian vertailu			
Aurinkovoimalan perustamisen päästöt:			
Kivihieiden sähkötuotannon CO <sub>2</sub> päästöt /26/		820 g/kWh	
Dieselin palamisen CO <sub>2</sub> päästöt /27/		2,66 kg/l	
Diesel	58,95869 Litraa	=	0,16 tonnia
Sähköenergia (Kivihieillä tuotettu)	7539,71 kWh	=	6,2 tonnia
	Yhteensä	=	6,34 tonnia CO <sub>2</sub>
Voimalan CO <sub>2</sub> päästöt verrattuna sähköntuotantoon (Hiilidioksidiekvivalentti)		=	53,6 g/kWh
	Sähkön tuottaminen kivihieillä tekee	15,3	
	kertaisesti enemmän päästöjä kuin aurinkovoimalalla		

Saamani tulos tukee Helenin blogissa esitettyä lukua. Vaikka hiilidioksidiekvivalentin määrittämiseksi oli käytetty "vajavaista" (1,63 vuoden energiantakaisinmaksuaika) energiankulutusmäärää, tulosta kuitenkin kompensoi aurinkovoimalan tuottovuosien määrä. Aurinkopaneelien takuu loppuu 25 vuoden päästä, mutta se ei tarkoita, etteivätkö ne enää tuottaisi energiaa.

#### 4.8 Aurinkovoimalan sijainnin merkitys

Jos laskussa havainnoitu aurinkovoimala olisi asennettu Suomen rannikkoseudulle, niin energiantakaisinmaksuaika laskisi. Motivan mukaan aurinkoenergian säteily määrä rannikkoseudulla on noin 1000 kWh/m<sup>2</sup> /25/. Myös

kuljetuskustannukset alenevat sijainnin myötä. Helsinkiin asennetun samankaltaisen aurinkovoimalan energiantakaisinmaksuaika olisi 1,39 vuotta. Se olisi noin kolme kuukautta vähemmän kuin Kajaanin voimalalla. Takuun aikana Helsingin voimala tuottaisi noin 15 MWh enemmän energiaa. Kuvassa 16 on esitetty voimaloiden tuottavuuskäyrät (25 vuotta).



Kuva 16 Tuottavuuksien vertailu

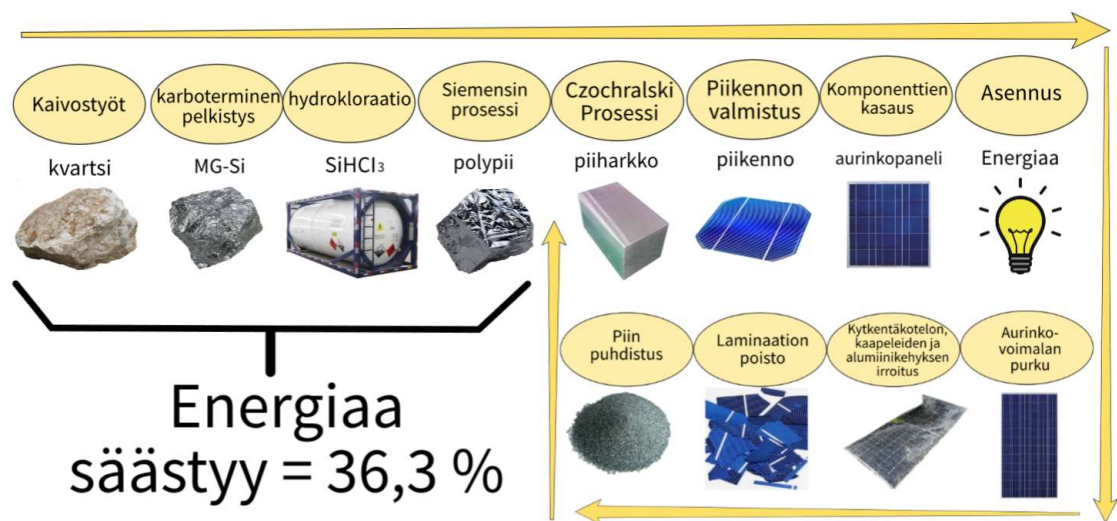
Käyristä huomaa, että vasta 22 vuoden jälkeen Helsingin aurinkovoimala tuottaa saman verran energiaa kuin Kajaanin voimala vasta-asennettuna.

## 5 POHDINTA

Tutkimukseni ei ole täysin vedenpitävä, kun mietitään energiantakaisinmaksuajan kannalta. Lisätutkimuksella lopputulemasta saisi tarkemman ja luotettavamman. Jotta lopputulemasta saisi mahdollisimman tarkan, olisi tärkeää saada teollisuustehtaiden yksityiset energiankulutustiedot. Se voi kuitenkin olla haastavaa yrityssalaisuuksien takia. Myös yksityiskohtaisemmalla rahtireitin selvittämisellä olisi tutkimuksen tarkkuuden kannalta hyötyä. Tutkimukseni tulos ei ole kuitenkaan tärkein seikka, vaan se, mitä huomioita ja kysymyksiä tutkimus herättää. Kun tarkkailee laskelmiani, huomaa, että aurinkopaneelien kasaamiseen ja pystytykseen tarvitaan paljon alumiinia. Alumiinikiskojen ja kehyksien tuottamiseen kuluu myös rutkasti energiaa. Hyödyllinen kehityskohde olisikin uuden ja ekologisemman materiaalin käyttö kiskoissa ja kehyksissä.

On myös tärkeää huomioida ja parantaa tapaa, miten aurinkoenergia saavutetaan. Aurinkopaneelien alkuperämaalla voidaan vaikuttaa, kuinka vihreätä aurinkoenergia oikeasti on. Kun Kiinan energiatuotanto toteutetaan pääosin kivihieillä ja kuljetukseen käytetään polttoöljyä, niin aurinkoenergian toteuttamisen pohjalla on aina fossiilisen energian vaatimus. Tämä vaatimus nykyteknikalla on vielä mahdotonta vähentää nollaan, mutta sen suuruuteen voidaan vaikuttaa. Jos kotimaista tai eurooppalaista pii- ja aurinkopaneelituotantoa lisätään, niin sitä helpompi on vaikuttaa paneelien valmistusprosessiin ja lyhentää kuljetuksia. Myös riippuvuus Kiinan vahvasta markkinaotteesta hellittäisi.

Tulevaisuuden kannalta on otettava huomioon myös potentiaali aurinkopaneelien kierrätyksessä. Kierrätyksen avulla aurinkopaneelien valmistusprosessin energiavaatimuksesta voidaan leikata iso siivu pois. Jos paneeli kierrätettäisiin oikein, olisi mahdollista säästyä neljältä piin jalostusvaiheelta. Tämän seurauksena piin valmistusprosessissa säästyisi yli 36 % energiaa (kuva 14).



Kuva 17 Kierrätyksellä säästetty energia

Kierrätyksen avulla ympäristöhaitat myös pienenevät. Kun piin kaivuu aiheuttaa jo ekosysteemien heikkenemistä, niin olisi epäkäytännöllistä lastata vanhentuneet aurinkopaneelit takaisin "maan vaivaksi" ongelmajätteenä.

On selvää, kun verrataan kivihieiden ja aurinkoenergian ilmastopäästöjä, että aurinkoenergia on puhtaampi vaihtoehto. On kuitenkin pidettävä mielessä, että aurinkoenergia ei toimi polttoaineen tavoin ja sitä varten on rakennettava

akustojärjestelmiä. Näiden järjestelmien rakentaminen tarkoittaa lisää sekä energiantarvetta että päästöjä. Nämä asiat tulisi ottaa huomioon takaisinmaksua ja ympäristöystävällisyyttä ajatellessa. Luonnon varoja miettien aurinkoenergia on kaikista luotettavin energiamuoto, kunhan energialle saadaan hyvä varastointitapa. Aurinko ei tule sammumaan ihan lähiaikoina. Tulevaisuutta ajatellen energianvarastointi tulee olemaan tärkeämmässä roolissa kuin sen tuottaminen.

Tutkimus onnistui valaisemaan kiertotalousmallisen aurinkopaneelituotannon tärkeyttä ja osoittamaan kehityskohteita teollisuusprosessissa. Tutkimus myös osoittaa, miten normaalit kansalaiset voivat vaikuttaa ympäristön hyväksi. Eli suosimalla aurinkopaneeleita, joiden komponentit ovat valmistettu ja ovat kasattu lähimpänä tulevaa aurinkovoimalaa, sekä välttämällä niin sanottuja Kiinan "kivihiilipaneeleita" voi vaikuttaa ekologisesti. Yleisesti ottaen tutkimus kehottaa noudattamaan kahden P:n taktiikkaa. Paikallisesti ja puhtaasti.



## LÄHTEET

1. Auringosta energiaa. Aurinkovoiman määrä ottamassa valtavan loikan. WWW-dokumentti. Julkaistu 2023. Saatavissa: <https://aurinko-puistot.fi/aurinkovoiman-maara-ottamassa-valtavan-loikan/> [viitattu 7.3.2024].
2. Yksityinen sähköposti viesti. Puoskari, M. Viestintäasiantuntija. Sähköposti. Lähetetty 8.2.2024. Solarigo. [viitattu 7.3.2024].
3. Bofit. Bofit viikkokatsaus 2022/14. WWW-dokumentti. Julkaistu 7.4.2022. Saatavissa: [https://www.bofit.fi/fi/seuranta/viikkokatsaus/2022/vw202214\\_2/](https://www.bofit.fi/fi/seuranta/viikkokatsaus/2022/vw202214_2/) [viitattu 7.3.2024].
4. Onninen. Kotimaiset Salo-aurinkopaneelit valmistetaan Salossa. WWW-dokumentti. Julkaistu 6.2021. Saatavissa: <https://www.onninen.fi/artikkelit/solar-finland-kotimaista-tuotantoa> [viitattu 7.3.2024].
5. Greenmatch. Types of solar panels. WWW-dokumentti. Päivitetty 26.1.2024. Saatavissa: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels> [viitattu 11.3.2024].
6. Iea. Solar PV global supply chains. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains> [viitattu 8.3.2024].
7. Britannica. Silicon. WWW-dokumentti. Päivitetty 25.2.2024. Saatavissa: <https://www.britannica.com/science/silicon/Uses> [viitattu 18.3.2024].
8. Heidari, S, M & Anctil, A. Country specific carbon footprint and cumulative energy demand of metallurgical grade silicon production for silicon photovoltaics. Resources, conservation and recycling, 5–12. Julkaistu 5.2022. Saatavissa: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922000192?casa\\_token=BeN8XpVSJIE-AAAAA:YGWGuW00NHk9eJqr959wTPtEJneGc5nHYWCvoh-JoE9gXc1i5y9B6UP1V8rA6PqIJU58GtjbHzTY#bib0087](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922000192?casa_token=BeN8XpVSJIE-AAAAA:YGWGuW00NHk9eJqr959wTPtEJneGc5nHYWCvoh-JoE9gXc1i5y9B6UP1V8rA6PqIJU58GtjbHzTY#bib0087) [viitattu 18.3.2024].
9. Honsberg, C. & Bowden, S. Photovoltaics Education Website. WWW-dokumentti. Julkaistu 2019. Saatavissa: <https://www.pveducation.org/> [viitattu 18.3.2024].
10. Ciftja, A., Engh, T. & Tangstad, M. Refining and recycling of silicon. Katselmus, 14–15. Julkaistu 1.2008. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/267552614\\_Refining\\_and\\_Recycling\\_of\\_Silicon\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/267552614_Refining_and_Recycling_of_Silicon_A_Review) [viitattu 19.3.2024].
11. Woodhouse, M. & Smith, B. & Ramdas, A. & Margolis, R. Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map. Tekninen raportti. PDF-dokumentti. Tarkistettu 2.2020. Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72134.pdf> [viitattu 19.3.2024].



12. DSNSolar. Yksikiteinen pii harkko ja kiekkojen tuotanto. WWW-dokumentti. Julkaistu 16.9.2020. Saatavissa: <https://fi.dsnso-lar.com/info/cz-czochralski-monocrystalline-silicon-solar-49830612.html> [viitattu 20.3.2024].
13. Iea. Life cycle inventories and life cycle assessments of photovoltaic systems. PDF-dokumentti. Julkaistu 2020. Saatavissa: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf> [viitattu 20.3.2024].
14. Icarus. Inventory of waste materials from silicon ingot and wafer manufacturing for a circular PV value chain. PDF-dokumentti. Julkaistu 10.2022. Saatavissa: [https://www.icarus.eu.com/wp-content/uploads/2022/10/WCPEC-8-Paper\\_5DV.2.52.pdf](https://www.icarus.eu.com/wp-content/uploads/2022/10/WCPEC-8-Paper_5DV.2.52.pdf) [viitattu 20.3.2024].
15. Mulazzani, A., Eleftheriadis, P. & Leva, S. Recycling c-Si PV Modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison. WWW-dokumentti. Julkaistu 10.11.2022. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8419> [viitattu 25.3.2024].
16. Longi. LR4-60HPB 345-365M. PDF-dokumentti. Julkaistu 10.2020. Saatavissa: <https://mysolarsolutions.ca/wp-content/uploads/2023/04/Datasheet-Longi-LR4-60HPB-345M-350M-355M-360M-365M-Solar-Panel.pdf> [viitattu 25.3.2024].
17. Fu, Y., Liu, X. & Yuan, Z. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. Verkkoartikkeli. Journal of cleaner production. 86. Pinos, 180–190. Julkaistu 1.8.2014. Saatavissa: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614007859?casa\\_token=9WBqoldKy94AAAAA:klqnD-Bvji4nQuaMQt4eE8lgFNFRv1U-xAYkV1lxq\\_1gWe\\_X9003na0taG2\\_T49LN4ASCKYzdA4g](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614007859?casa_token=9WBqoldKy94AAAAA:klqnD-Bvji4nQuaMQt4eE8lgFNFRv1U-xAYkV1lxq_1gWe_X9003na0taG2_T49LN4ASCKYzdA4g) [viitattu 25.3.2024].
18. PE International. Life cycle assessment of float glass. PDF-dokumentti. Tarkistettu 2.2011. Saatavissa: <https://glassforeurope.com/wp-content/uploads/2018/04/Life-Cycle-Assessment.pdf> [viitattu 28.3.2024].
19. Peng, T., Ou, X., Yan, X. & Wang, G. Energy procedia. Life-cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of aluminium production in China. Verkkoartikkeli. Energy procedia. 158. Pinos, 3937-3943. Julkaistu 2.2019. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219308902> [viitattu 28.3.2024].
20. Zeng, B., Jolly, M. & Salonitis, K. Investigating the energy consumption of casting process by multiple life cycle method. PDF-dokumentti. Julkaistu 4.2014. Saatavissa : [https://dspace.lib Cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/12876/Investigating\\_the\\_energy\\_consumption\\_of\\_casting\\_process-2014.pdf](https://dspace.lib Cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/12876/Investigating_the_energy_consumption_of_casting_process-2014.pdf) [viitattu 28.3.2024].

21. European commission. Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials. PDF-dokumentti. Julkaistu 12.10.2015. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/13049/attachments/1/translations/en/renditions/pdf> [viitattu 5.4.2024].
22. VRTranspoint. Yleisvaunu-Gbln. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vrtranspoint.fi/fi/vr-transpoint/asiakkaan-opas/kalusto/rauta-tiekalusto/kotimaan-liikenteen-vaunut/katetut-vaunut/yleisvaunu/yleisvaunu---gbln/> [viitattu 2.4.2024].
23. Väylävirasto. Ratahankkeiden arviointiohje. PDF-dokumentti. Päivitetty 1.4.2022. Saatavissa: [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2020-39\\_ratahankkeiden\\_arviointiohje\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2020-39_ratahankkeiden_arviointiohje_web.pdf) [viitattu 2.4.2024].
24. Taloon.com. Aurinkopaneelin asennuskisko SL Rack Rail 40, 2.4m. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.taloon.com/aurinkopaneelin-asennuskisko-sl-rack-rail-40-2-4m?shop-ping=1&utm\\_source=google&utm\\_term=&utm\\_campaign=&utm\\_medium=cpc&utm\\_content=s%7Cpcrid%7C400058753516%7Cpkw%7C%7Cpmt%7C%7Cpdv%7Cc%7C&gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjwqpSwBhCIARIsADIZ\\_TkP5R59-v-1SJUHN26vdKco1h0zhl-VEIGTQhfV859CELgCTHWyhuZoaAglHEALw\\_wcB](https://www.taloon.com/aurinkopaneelin-asennuskisko-sl-rack-rail-40-2-4m?shop-ping=1&utm_source=google&utm_term=&utm_campaign=&utm_medium=cpc&utm_content=s%7Cpcrid%7C400058753516%7Cpkw%7C%7Cpmt%7C%7Cpdv%7Cc%7C&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwqpSwBhCIARIsADIZ_TkP5R59-v-1SJUHN26vdKco1h0zhl-VEIGTQhfV859CELgCTHWyhuZoaAglHEALw_wcB) [viitattu 2.4.2024].
25. Motiva. Aurinkosäteilyn määrä Suomessa. WWW-dokumentti. Päivitetty 31.1.2024. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon\\_perusteet/auringonsateilyn\\_maara\\_suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa) [viitattu 2.4.2024].
26. Luukko, K. Helen. Päästöissä on eroa. WWW-dokumentti. Julkaistu 24.1.2019. Saatavissa: <https://www.helen.fi/blogi/2019/p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6iss%C3%A4-on-eroja> [viitattu 8.4.2024].
27. Motiva. Diesel. WWW-dokumentti. Päivitetty 20.2.2024. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/valitse\\_auto\\_viisaasti/energialahteet/diesel](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energialahteet/diesel) [viitattu 8.4.2024].

## KUVALUETTELO

Kuva 1. P/N Liitos. Järvinen, J. 2024.

Kuva 2. Ensimmäisen sukupolven aurinkopaneeli. Jodat ympäristöenergia Oy. 4.7.2018. Saatavissa: <https://www.slideshare.net/Metsakeskus/aurinkoenergian-mahdollisuudet-Imm-n-ja-shkn-tuotannossa>

Kuva 3. Yksikidekennon rakenne. Järvinen, J. 2024.

Kuva 4. Piin matka osaksi aurinkovoimalaa. Järvinen, J. 2024.

Kuva 5. Karboterminen pelkistys. Jørgensen, R. & Kero, I. & Blom, A. & Grove, E., Svendsen, K. 17.12.2020. Exposure to Ultrafine Particles in the Ferroalloy Industry Using a Logbook Method. Muunneltuna. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/12/2546>

Kuva 6. Siemens reaktori. Ciftja, A. & Engh, T. & Tangstad, M. 2.2008. Refining and Recycling of Silicon: A Review. Muunneltuna. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/267552614\\_Refining\\_and\\_Recycling\\_of\\_Silicon\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/267552614_Refining_and_Recycling_of_Silicon_A_Review)

Kuva 7. Monikideharkon valaminen. Woodhouse, M. & Smith, B. & Ramdas, A. & Margolis, R. 2.2020. Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map. Muunneltuna. Saatavissa: [Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map \(nrel.gov\)](#)

Kuva 8. Czochralski menetelmä. Woodhouse, M. & Smith, B. & Ramdas, A. & Margolis, R. 2.2020. Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map. Muunneltuna. Saatavissa: [Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map \(nrel.gov\)](#)

Kuva 9. Piikiekköjen sahaus. Woodhouse, M. & Smith, B. & Ramdas, A. & Margolis, R. 2.2020. Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map. Muunneltuna. Saatavissa: [Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map \(nrel.gov\)](#)

Kuva 10. Aurinkokennon valmistus. Woodhouse, M. & Smith, B. & Ramdas, A. & Margolis, R. 2.2020. Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map. Muunneltuna. Saatavissa: [Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map \(nrel.gov\)](#)

Kuva 11. Aurinkopaneelin kasaus. Woodhouse, M. & Smith, B. & Ramdas, A. & Margolis, R. 2.2020. Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing

Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map. Muunneltuna. Saatavissa: [Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map \(nrel.gov\)](#)

Kuva 12. Aurinkopaneelin kierrätys. Järvinen, J. 2024.

Kuva 13. Kuljetusreitti. Himanen, J. Helsingin sanomat 9.11.2017. Muunneltuna. Saatavissa: <https://www.hs.fi/kotimaa/art-2000005441772.html>

Kuva 14. Energiankulutus kaavio. Järvinen, J. 2024.

Kuva 15. Aurinkovoimalan tuottavuus. Järvinen, J. 2024.

Kuva 16. Tuottavuuksien vertailu. Järvinen, J. 2024.

Kuva 17. Kierrätyksellä säästetty energia. Järvinen, J. 2024.

## TAULUKOT

Taulukko 1. Aurinkopaneelin sisältämä pii.....	22
Taulukko 2. Energiankulutus aurinkopaneelin valmistuksessa.....	23
Taulukko 3. Kuljetus ja muut kulut.....	25
Taulukko 4. Takaisinmaksuaika .....	27
Taulukko 5. Kivihiilen ja aurinkoenergian vertailu .....	29