



Aurinkokenno- energiamoduulit 3D-pintojen integrointiin

Mari Ylikunnari, VTT

Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisuja
2024:2

Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisu 2024:2

Aurinkokennoenergiamoduulit 3D-pintojen integrointiin

Mari Ylikunnari, VTT

Puolustusministeriö Helsinki 2024

Julkaisujen jakelu

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-
arkivet Valto

julkaisut.valtioneuvosto.fi

Puolustusministeriö

This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use.
Commercial use is prohibited.

ISBN pdf: 978-951-663-121-2

ISSN pdf: 2984-102X

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2024

Aurinkokennoenergiamoduulit 3D-pintojen integrointiin

Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisu 2024:2

Julkaisija Puolustusministeriö

Tekijä/t Mari Ylikunnari, Riikka Suhonen
Yhteisötekijä Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Kieli suomi

Sivumäärä 22

Tiivistelmä

Projektin tavoitteena oli tutkia ylivalun soveltuvuutta keveiden ja taipuisien aurinkokennojen kanssa, joka mahdollistaisi 3D muotoiltujen autonomisten energiamoduulien valmistamisen, joita ei tarvitse erikseen ladata. Ylivalun avulla kenno voidaan muokata haluttuun muotoon ja samalla siihen voidaan liittää kiinnityssysteemejä, kuten esimerkiksi solkia. Lisäksi kevyt ylivalumateriaali tukee ohutta kennoa lisäämättä kuitenkaan sen painoa merkittävästi. Tavoitteena oli löytää kaupallisesti saatavia aurinkokennoja, testata niiden ylivalumahdollisuutta, löytää ylivaluun ja kennoon sopivat ylivalumateriaalit, mitata aurinkokennojen sähköistä toimintaa erilaisissa olosuhteissa ja ikääntymistä. Materiaalien osalta projektissa käytettiin amorfisesta piistä valmistettuja kaupallisia aurinkokennoja niiden helpon saatavuuden takia ja ylivalumateriaalina testattiin kahta materiaalia; polykarbonaattia ja termoplastista polyuretaania. Ylivaluprosessissa etsittiin materiaaleille sopivat prosessiparametrit ja huomattiin, että termoplastinen polyuretaani oli soveliaampi materiaali aurinkokennojen kanssa. Lopuksi ylivalettuja kennoja testattiin eri valaisuolosuhteissa, taivutussäteillä, ylivalun puoleisuutta, niille tehtiin erilaisia kiihdytettyjä rasiustestejä sääkaapeissa sekä tutkittiin naarmuntumisen ja likaantumisen vaikutusta kennon toimintaan.

Klausuuli Tämä julkaisu on toteutettu osana Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan (MATINEn) tutkimusrahoituksen toimeenpanoa. (www.defmin.fi/matine) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta puolustusministeriön näkemystä.

Asiasanat valu, ylivalu, aurinkokennot, amorfiset aineet, rasiutus, maanpuolustus, tutkimus, kokonaismaanpuolustus

ISBN PDF 978-951-663-121-2

ISSN PDF 2984-102X

Julkaisun osoite <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-121-2>

Solcellsenergimoduler för integrering av 3D-ytor

Publikationer av försvarets vetenskapliga delegation 2024:2

Utgivare Försvarsministeriet

Författare Mari Ylikunnari, Riikka Suhonen

Redigerare Etunimi Sukunimi

Utarbetad av Teknologiska forskningscentralen VTT Ab

Språk finska

Sidantal

22

Referat

Målet med projektet var att undersöka användbarheten av övergjutning med lätta och flexibla solceller, vilket skulle möjliggöra produktion av 3D-gjutna autonoma energimoduler som inte behöver laddas separat. Med hjälp av övergjutning kan cellen modifieras till önskad form och samtidigt kan fästsystem, såsom spännen, fästas på den. Dessutom stödjer det lätta mulna materialet den tunna cellen utan att nämnvärt öka dess vikt. Målet var att hitta kommersiellt tillgängliga solceller, att testa deras övergjutningsmöjligheter, att hitta lämpliga övergjutningsmaterial för övergjutning och cellen, att mäta solcellers elektriska aktivitet under olika förhållanden och åldrande. Kommersiella solceller var användat gjorda av amorft kisel i projektet på grund av deras lättillgänglighet, och två material testades som övergjutningsmaterial; polykarbonat och termoplastisk polyuretan. I övergjutningsprocessen söktes lämpliga processparametrar efter materialen och det märktes att termoplastisk polyuretan var ett mer lämpligt material för solceller. Slutligen testades de mulna cellerna under olika ljusförhållanden, med böjradier, sidan av mulet, de utsattes för olika accelererade ansträngningstester i väderskåp, och effekten av repor och smuts på cellens funktion studerades.

Klausul

Den här publikation är en del i genomförandet av forskningsfinansiering av Försvarets vetenskapliga delegation. (www.defmin.fi/matine) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt.

Nyckelord

gjutning, övergjutning, solceller, amorfa ämnen, ansträngning, försvaret, forskning, totalförsvaret

ISBN PDF 978-951-663-121-2

ISSN PDF

2984-102X

URN-adress <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-121-2>

Solar cell energy modules for integration of 3D surfaces

Publications of the Scientific Advisory Board for Defence 2024:2

Publisher Ministry of Defence

Author(s) Mari Ylikunnari, Riikka Suhonen

Group author VTT Technical Research Centre of Finland Ltd

Language Finnish

Pages

22

Abstract

The goal of the project was to investigate the applicability of overcasting with light and flexible solar cells, which would enable the production of 3D molded autonomous energy modules that do not need to be charged. By overcasting, the cell can be modified to the desired shape and at the same time fastening systems, such as buckles, can be attached to it. In addition, overcast material supports the thin cell without significantly increasing its weight. The goal was to find commercially available solar cells, to test their overcasting possibilities, to find suitable overcasting materials for overcasting and the cell, to measure the electrical activity of solar cells under different conditions and aging. Regarding materials, commercial solar cells made of amorphous silicon were used due to their easy availability, and two materials were tested as overcasting materials; polycarbonate and thermo-plastic polyurethane. In the overcasting process, suitable process parameters were searched for the materials and it was noticed that thermoplastic polyurethane was a more suitable material for solar cells. Finally, the overcast cells were tested under different lighting conditions, with bending radii, the side of the overcast, they were subjected to various accelerated strain tests in weather cabinets, and the effect of scratching and dirt on the cell's operation was studied.

Provision This publication is part of the implementation of research funding of the Scientific Advisory Board for Defence (MATINE). (www.defmin.fi/matine) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Defence Ministry.

Keywords casting, overcasting, solar cells, amorphous substances, strain, national defence, research, comprehensive defence approach

ISBN PDF 978-951-663-121-2

ISSN PDF

2984-102X

URN address <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-121-2>

Sisältö

1	Johdanto	7
2	Tavoite	8
3	Menetelmät	9
4	Tulokset ja niiden tarkastelu	12
4.1	Materiaalisuunnittelu	12
4.2	Testaus ja integrointi	13
4.2.1	Valaisutehon vaikutus	14
4.2.2	Taivutussäteen vaikutus	14
4.2.3	Ylivalun vaikutus	14
4.2.4	Ylivalettujen kennojen rasiustestit	15
4.2.4.1	Rasiustesti ISOS protokollalla	15
4.2.4.2	Rasiustesti IEC: vakioitu korkea lämpötila ja kosteus	17
4.2.4.3	Rasiustesti IEC: vaihtuva lämpötila	18
4.2.4.4	Mekaaninen rasitus	19
5	Yhteenveto	20
	Lähteet	21

1 Johdanto

Yksi tärkeimpiä vaatimuksia sotilaalle on liikkuvuus erilaisissa maastoissa. Maastot voivat olla kaukana verkkovirran saamislähteistä, jolloin yksiköiden tulee kuljettaa mukanaan varavirtalähteitä kuten akkuja. Nämä pitää kuitenkin ladata tarpeen mukaan ja ovat useimmiten painavia kannettavia. Lisäksi akkujen varauskyky heikenee kylmissä olosuhteissa ja vaativat jatkuvaa latausta. Jos latausmahdollisuutta verkkovirrasta ei ole tai se on liian kaukana, pitää latausenergia saada muulla tavalla.

Energiaa pieniin kulutuskohteisiin esimerkiksi aseiden tähtäimissä käytettyihin elektronisiin laitteisiin tai sensoreihin voidaan hankkia auringosta, jolloin isojen energiapankkien sähköenergia voidaan säästää toisenlaisiin kohteisiin kuten vaikkapa viestintään. Kaupallisesti on saatavilla monenlaisia kannettavia aurinkopaneeleja, mutta ne ovat irrallisia eivätkä ole suoraan suunniteltu kiinnitettäväksi tietynlaiseen 3D muodon omaavaan pintaan. Kevyet, valmiiksi 3D muotoillut, helposti kiinnitettävät ja irrotettavat pienet energiamoduulit, joissa energiaharvesteri, akku ja kiinnikkeet ovat samassa paketissa, mahdollistavat niiden nopean yhdistämisen sotilaiden varustuksiin. Keveä rakenne antaa vapauden liikkua tarvittaessa nopeasti eikä kasvata turhaa varusteiden kokonaispainoa. Lisäksi mukana voi kuljettaa useampaa energiamoduulia. Helposti kiinnitettävä ja irrotettava energiamoduuli ei vaadi koko varustuksen vaihtamista, jos energiaharvesterin toiminta lakkaa sekä mahdollistaa moduulin siirtämisen käyttäjältä tai käyttökohteelta toiselle. Lisäksi energialähde voidaan sijoittaa mahdollisimman lähellä käyttökohdetta ilman pitkiä johtimia energialähteen ja käyttökohteen välillä.

Monenlaisia puettavia ratkaisuja keveille ja taipuisille aurinkokennoille on esitetty mutta ne kaikki perustuvat joko kankaiden päälle kiinniommeltuihin energiaharvestereihin tai suoraan kankaisiin sisällytettyihin aurinkokennoihin. Kummassakaan tapauksessa aurinkokenno ei ole irrotettavissa ja siten vaihdettavissa. Samassa yhteydessä on tutkittu näiden aurinkokennojen käyttökestävyyttä kuten ikääntymis-, taivutus-, veto- ja vääntötesteillä sekä joissakin tapauksissa myös pesunkestävyyttä. Suoraan 3D muotoillut ja irrotettavat aurinkokennomoduulit eivät rasitu samalla tavalla käytön aikana kuin kankaisiin kiinnitetyt moduulit vaan suurin niihin kohdistuva rasitus tapahtuu valmistusprosessin aikana. Lisäksi ylivalettaessa kennon päälle, valumateriaali suojaa kennoa ulkoiselta kulutukselta.

2 Tavoite

Projektin tavoitteena on tutkia ylivalun soveltuvuutta keveiden ja taipuisien aurinkokennojen kanssa, joka mahdollistaisi 3D muotoiltujen energiamoduulien valmistamisen. Työssä oli tarkoituksena testata useita kaupallisia aurinkokennoja (mm. CIGS, amorfinen pii), jolloin energiamoduuli olisi helposti ylöskaalattavissa komponentin saatavuuden perusteella. Työssä käytetään valmiita valumuotteja, jotka mahdollistavat sekä tasaisen pinnan että taipuisien rakenteiden tekemisen sekä hankitaan uusi 3D muodon mahdollistava valumuotti.

Työssä käydään läpi erilaisia läpinäkyviä ylivalumateriaaleja ja etsitään niistä aurinkokennolle sopivin. Valettaessa kennon ei-valotettavalle puolelle aurinkokennon valotettava pinta jää alttiiksi ulkoiselle kulumiselle ja voi myöhemmin johtaa kennon toiminnan heikkenemiseen. Toisaalta sillä estetään kulumisen pinta-kosketuksen aikana. Ylivalussa tarkastellaan:

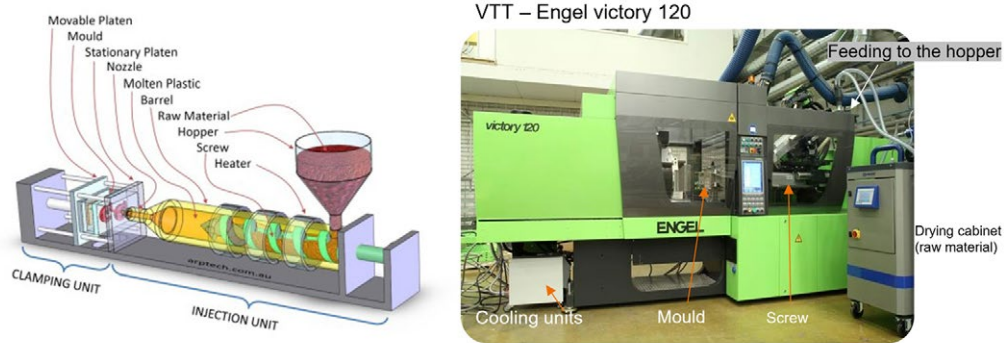
- Materiaalien yhteensopivuutta, erityisesti aurinkokennopinnan adheesiota ylivalumateriaaliin.
- Prosessointilämpötilaa, jolla ylivalumateriaali saadaan valettavaksi. Liian korkea lämpötila voi sulattaa aurinkokennon pinnan ja tuhota kennon, kun taas liian matalassa lämpötilassa ylivalumateriaali ei virtaa kunnolla kennon pinnalla/pinnalle.
- Mistä suunnasta ja millä paineella on suotuisinta valaa ylivalettava materiaali, jotta ylivalussa saadaan tasainen pinta aurinkokennon päälle. Tämän yhteydessä käytetään simulointia tukemaan ylivaluprosessia.

Kennojen soveltuvuutta ja kestävyyttä ylivalussa arvioidaan mittaamalla niiden toiminta ennen ja jälkeen ylivalun. Mittauksissa käytetään auringonvalosimulaattoria (AM1.5), jolla voidaan mitata kennon sähköinen toiminta ja hyötysuhde auringonvalossa. AM1.5 on määrittystapa aurinkovalon teholle, joka saapuu maapallon pinnalle 1.5-kertaisen ilmamassan läpi ja on teholtaan 100 mW/cm^2 . 100 mW/cm^2 (1SUN) mittauksen lisäksi testataan myös alhaisemmalla auringonvaloteholla, kuten 33 mW/cm^2 (1/3SUN) ja 11 mW/cm^2 (1/9SUN), jotka vastaavat pilvisen sään valaisuolosuhteita. Sääkaappitestauksella voidaan seurata ylivaletun aurinkokennon kosteus- ja lämpökestävyyttä.

3 Menetelmät

Työssä käytettiin Engel victory 120 ylivalulaitetta, jonka toimintaperiaate ja kuva on esitetty kuvassa 1. Ylivalu tehtiin joko aurinkokennon valotettavalle tai ei-valotettavalle puolelle.

Kuva 1. Ylivaluprosessin kaaviokuva ja ylivalulaite [1]



Aurinkokennojen sähköinen toiminta mitattiin AM1.5 keinoaurinkovalo mittauslaitteistolla, josta saatiin virta-jännitekäyrä. Käytetty laitteisto esitetty kuvassa 2. Saadun käyrän perusteella mittausohjelma laski aurinkokennon maksimitehon. Keinoaurionvaloa rajoitettiin teräsverkoilla, jolloin tulevan auringonvalon teho (100 mW/cm^2) laski $1/3$:een (33 mW/cm^2) ja $1/9$:een (11 mW/cm^2) osaan.

Kuva 2. AM1.5 keinoaurinkovalo mittauslaitteisto



Ylivalettuja kennoja rasiettiin sääkaapissa erilaisissa kiihdytetyissä olosuhteissa. Rasiustestejä oli neljä erilaista:

1. ISOS-protokolla aurinkokennoille: 100 mW/cm² valo, kosteus 50 %
lämpötila 65 °C
2. IEC protokolla, jossa vakioitu korkea lämpötila ja kosteus: kosteus 85 %,
lämpötila 85 °C
3. IEC protokolla, jossa vaihtuva lämpötila: -40 °C – +85 °C
4. Mekaaninen rasitus: kennon naarmutus, ylivalumateriaalin naarmutus,
likaantuminen

Kennojen sähköistä toimintaa mitattiin kiinnittämällä kenno lieriöiden pintaan, joissa kolme eri taivutussädetä; 4.55, 3.30 ja 2.80 cm. Kennot mitattiin eri asennoissa suhteessa tulevaan valoon, josta esitetty mallikuva kuvassa 3.

Kuva 3. Kennon toimivuuden määrittäminen eri taivutussäteillä ja suhteessa tulevan valon kulmaan.



4 Tulokset ja niiden tarkastelu

4.1 Materiaalisuunnittelu

Kriteerinä aurinkokennoa valittaessa oli sen kaupallinen saatavuus sekä kennojen tuli olla taipuisia ja ohutrakenteisia. Ainoastaan kahdelta toimittajalta saatiin amorfisesta piistä tehtyjä kennoja, jotka täyttivät edellä olevat vaatimukset ja vain toiseen oli mahdollista ottaa suora sähköinen kontakti kennomittausta varten. Työssä käytettiin kolmea eritehoista aurinkokennoa: MPT3.6, MPT4.8 ja MPT6, jotka ostettiin PowerFilm Inc. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty kennojen valmistajan antamat teho, jännite ja virran arvot sekä ulkoiset mitat.

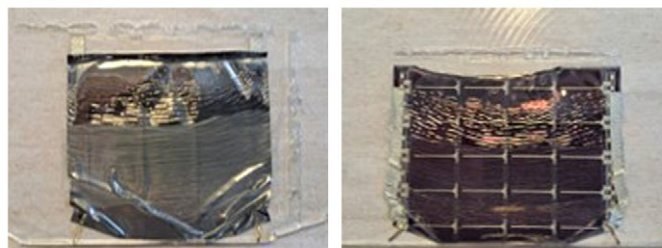
Taulukko 1. Työssä käytettyjen aurinkokennojen sähköiset arvot ja ulkoiset mitat.

Kenno	Teho [mW]	Käyttöjännite [V]	Käyttövirta [mA]	Leveys [mm]	Korkeus [mm]	Paksuus [mm]
MPT3.6	180	3.6	50	74	73	0.22
MPT4.8	240	4.8	50	94	73	0.22
MPT6	300	6.0	50	114	73	0.22

Ylivalumateriaalin vaatimuksina oli läpinäkyvyys, taipuisuus ja matala prosessointilämpötila. Näiden perusteella valittiin kaksi materiaalia: polykarbonaatti (PC) ja termoplastinen polyuretaani (TPU). Aurinkokennojen ylivaluprosessi

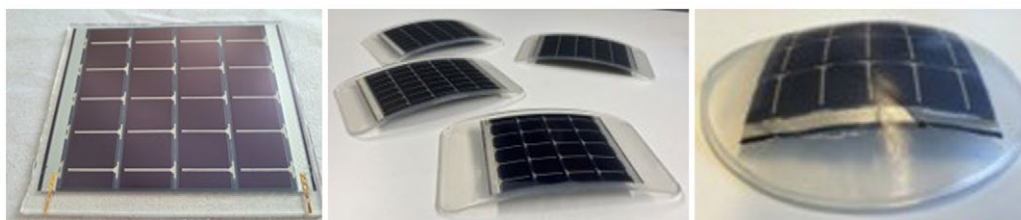
Ylivaluprosessin aikana etsittiin ylivalumateriaalille ja aurinkokennolle sopivat prosessiparametrit. Parametrien säädöistä huolimatta, PC-ylivaluprosessin aikana kaikki kennot hajosivat kerrosten yhteensopimattomuuden vuoksi. Kuvassa 4 PC:lla ylivalettuja aurinkokennoja.

Kuva 4. vasen: PC ylivalu kennon taustapuolella, oikea: PC ylivalu kennon etupuolella.



Valettaessa TPU:lla aurinkokennot kestivät hyvin ylivalua ja valuja tehtiin kolmella eri muotilla; tasainen pinta, kaareva pinta ja kupumainen pinta. Kaarevaan muotoon valettaessa kenno irtosi herkästi valumateriaalista muotista irrottamisen yhteydessä. Kupumaiseen muotoon valettaessa kenno ei venynyt muotoon valun aikana ja kennoon muodostui taitoksia. Kuvassa 5 on TPU:lla ylivalettuja aurinkokennoja.

Kuva 5. TPU:lla ylivalettuja kennoja, vasen: tasainen pinta, keskellä: kaareva pinta, oikea: kupumainen pinta



4.2 Testaus ja integrointi

Säättämällä keinoaurinkovalon valaisutehoa voitiin simuloida pilvistä säätä tai muuten varjoisaa olosuhdetta. Jokainen ylivalettu aurinkokenno mitattiin ennen ja jälkeen ylivalun. Jokaisessa testauksessa rinnakkaisia näytteitä oli 3–5 kpl. Ulko-olosuhteita, joissa kennot altistuvat kosteudelle ja erilaisille lämpötiloille simuloitiin sääkapeilla.

4.2.1 Valaisutehon vaikutus

1 SUN keinoaurinkovalon valaisuteho on 100 mW/cm^2 , jolloin mitattaessa 1/3 SUN:lla valaisuteho on 33 mW/cm^2 (33 %) ja 1/9 SUN:lla valaisuteho on 11 mW/cm^2 (11 %). Mitattaessa kennojen tehoja ennen ylivalua, kennojen tehot olivat 1/3 SUN valaisulla 57 % ja 1/9 SUN valaisulla 20 % 1 SUN valaisulla saadusta kennotehosta. Lisäksi mitatut tehot olivat hiukan suurempia kuin valmistajan antamat tehoarvot. Kennojen tuottama jännite säilyy samana riippumatta valaisutehosta mutta kennon tuottama virta laskee valaisutehon laskiessa.

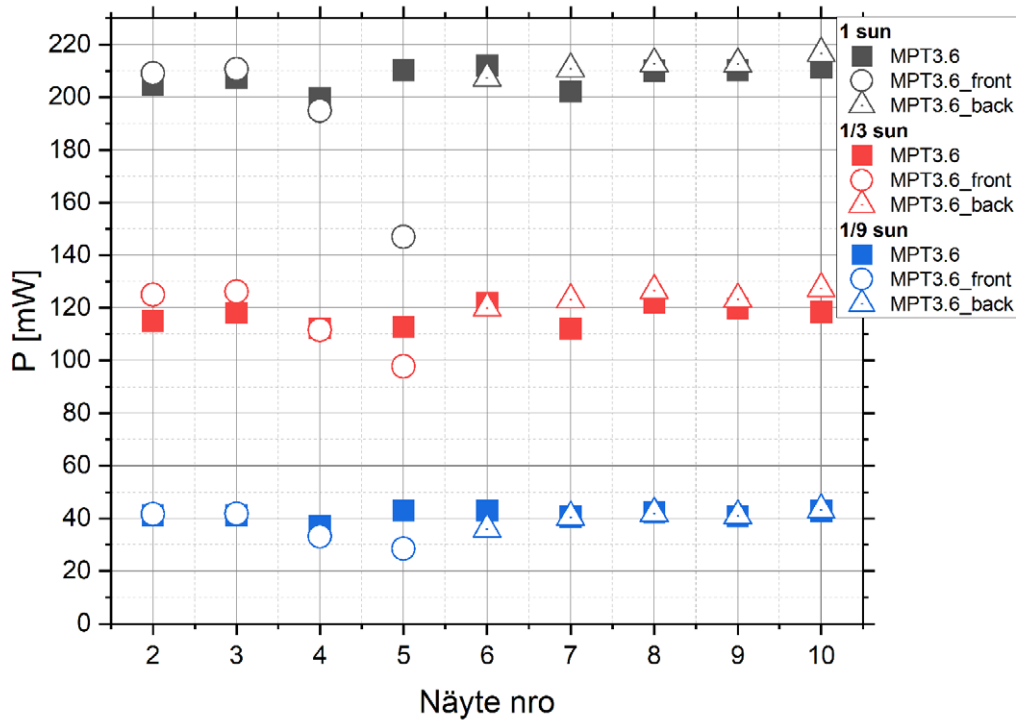
4.2.2 Taivutussäteen vaikutus

Mittauskulma eli kennoon suoraan osuvan valon määrä vaikuttaa merkittävästi kennon tehoon. Isoimmalla kennolla (MPT6) teho tippuu yli 80 % mittauskulman vaihtuessa 0° :sta 90° :een. Lisäksi, mitä pienempi taivutussäde ja isompi kenno, sitä selvempi vaikutus taivutussäteellä on kennon tuottamaan tehoon, osan kennoa ollessa varjon puolella. Esimerkiksi 0° :lla kulmalla MPT6 kennon teho laski 400 mW :sta (tasainen valaisu 1SUN:lla) 50 mW :iin $2,80 \text{ cm}$ taivutussäteellä.

4.2.3 Ylivalun vaikutus

Tasaiseen tai kaarevaan muotoon valettujen kennojen toiminta pysyi samana ja mitatut tehoarvot vastasivat toimittajan antamia arvoja 1SUN valaisuteholla. Lisäksi ylivalun puoleisuudella ei ollut vaikutusta kennojen toimintaan. Kuvassa 6 on tasaisella muotilla ylivalettujen MPT3.6 kennojen mitatut tehoarvot ennen ja jälkeen ylivalun. Kupumaiseen muottiin valettu kenno ei toiminut enää ylivalun jälkeen.

Kuva 6. ylivalettujen MPT3.6 kennojen tehoarvoja. Front – Ylivalu valaisupuolelle, back – ylivalu ei-valaistavalle puolelle.



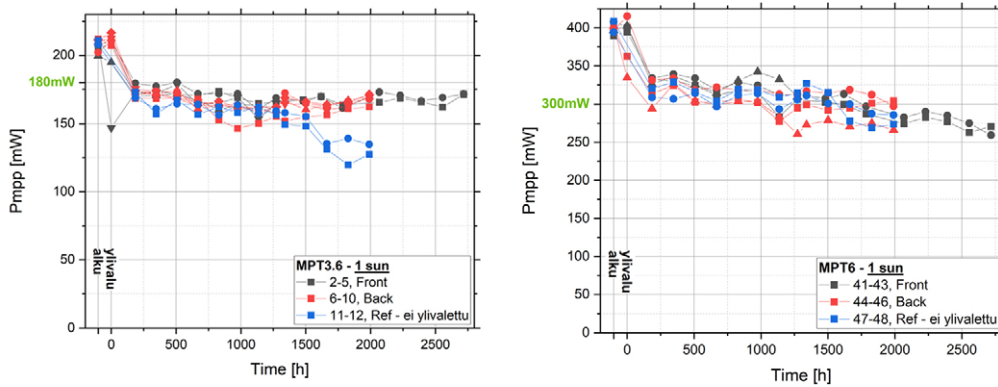
4.2.4 Ylivalettujen kennojen rasitustestit

Kennojen rasitustestit olivat suurin tehtäväkokonaisuus projektissa. Ylivalettuja ja ei-ylivalettuja kennoja rasitettiin erilaisissa kiihdytetyissä olosuhteissa, jotta nähtäisiin niiden toiminnan kestävyys rasituksen aikana. Sääkaapissa olleet kennot mitattiin säännöllisesti sääkaapin ulkopuolella.

4.2.4.1 Rasitustesti ISOS protokollalla

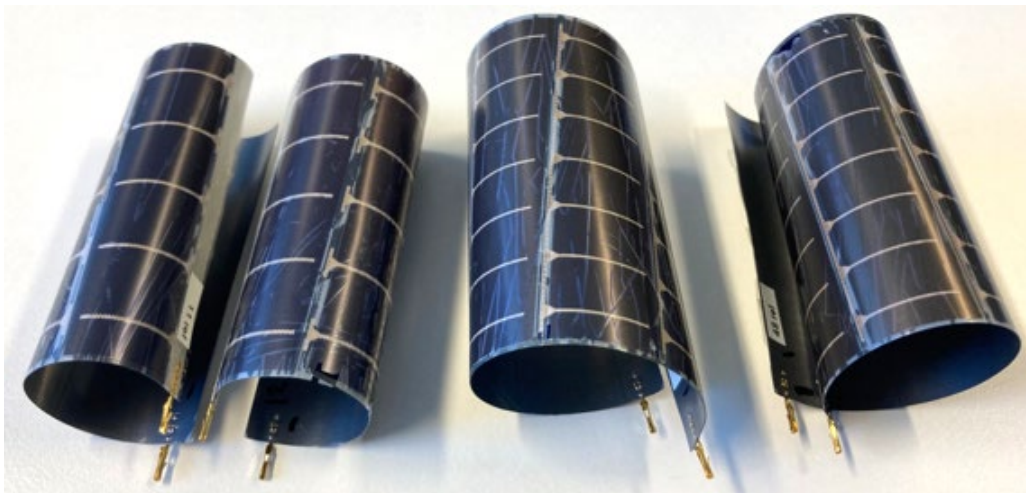
ISOS protokollan mukaisessa testissä kahdenkokoisia kennoja (MPT3.6 ja MPT6) pidettiin 2000 h 1 SUN valossa, 50 % kosteudessa ja 65 °C lämpötilassa. Näissä olosuhteissa kaikkien kennojen teho laski ensimmäisen 200 h rasituksen aikana ja tasoittui sen jälkeen. Pienempien MPT3.6 ylivalettujen kennojen teho pysyi stabiilina koko testin ajan kun taas isojen MPT6 kennojen teho laski tasaisesti, kts. kuva 7.

Kuva 7. ISOS protokollan mukainen rasitustesti MPT3.6 (vasen) ja MPT6 (oikea) kennoille.



Rasituksen aikana ei-ylivalettuihin ja taustapuolelle valettuihin kennoihin muodostui säröjä kennon pinnalle, jotka eivät kuitenkaan vaikuttaneet kennojen toimintaan. Ei-ylivalettuihin MPT3.6 kennoihin säröt muodostuivat 669 h jälkeen ja taustapuolelle valettuihin kennoihin 830 h jälkeen. Isoimmissa MPT6 kennoissa säröt muodostuivat 669 h jälkeen kummassakin tapauksessa. Lisäksi ei-ylivaletut kennot taipuivat voimakkaasti rasituksen aikana, kts kuva 8. Taustapuolelle valetut kennot pyrkivät myös taipumaan mutta valu esti niiden liiallisen taipumisen. Etupuolelle valettuihin kennoihin ei ilmestynyt rasituksen aikana säröjä mutta TPU samentui jonkin verran.

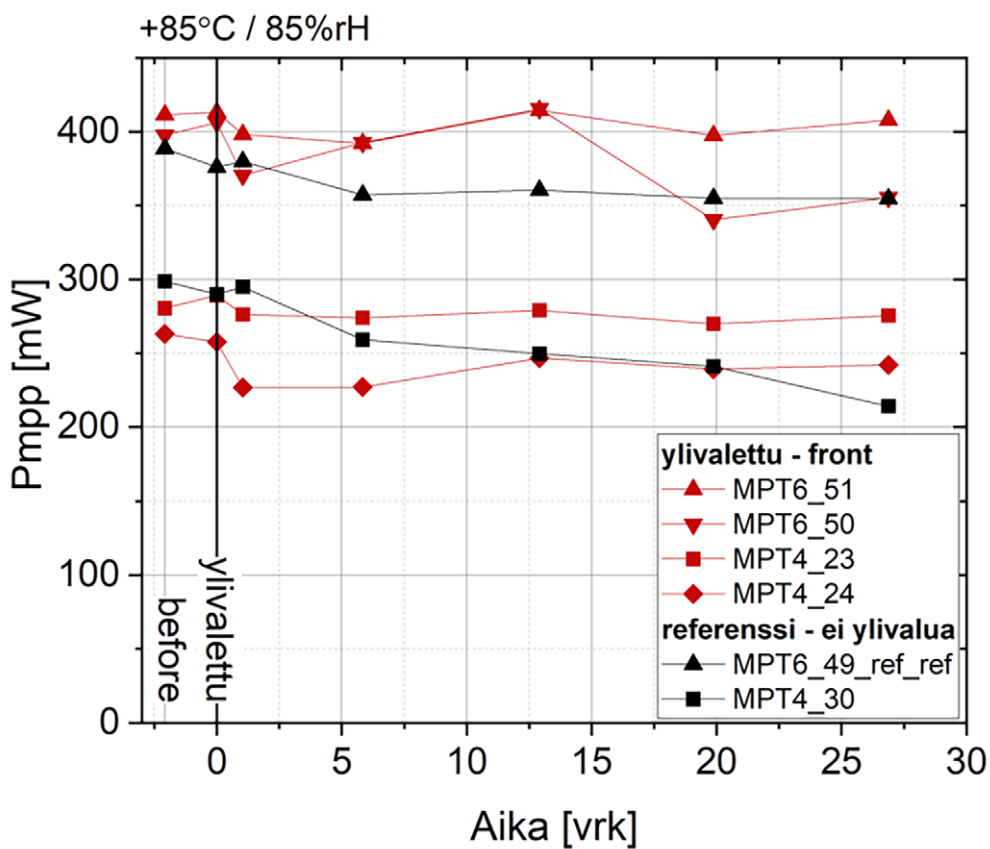
Kuva 8. Rasitustestissä taipuneet ei-valetut kennot.



4.2.4.2 Rasiustesti IEC: vakioitu korkea lämpötila ja kosteus

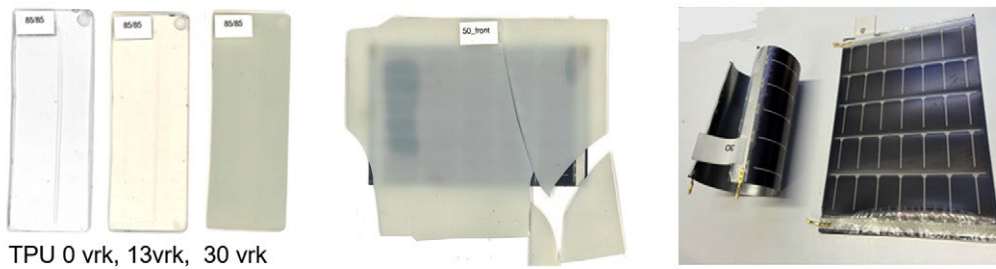
Rasiustestissä pidettiin kahdenkokoisia kennoja (MPT4 ja MPT6) 645 h 85 % kosteudessa ja 85 °C lämpötilassa. Testissä käytettiin ei-ylivalettuja ja valotettavalle puolelle ylivalettuja kennoja. Testiaikana suurimmalla osalla kennoista teho pysyi yli 90 % alkuperäisestä arvosta, kts kuva 9.

Kuva 9. 85°C/85 %rH rasiustestissä olleiden kennojen tehot.



TPU:n väri samenee testin aikana mutta pysyy joustavana. Testin loputtua, huoneenilmassa säilytetyissä ylivaletuissa kennoissa TPU samenee edelleen sekä kovettuu ja haurastuu lopulta irrotten kennoista. Referenssinä toimineista ei-ylivaletuista kennoista irtoaa päällimmäinen kalvo reunojen kontaktialueista. Kuvia rasiustestissä olleista materiaaleista kuvassa 10.

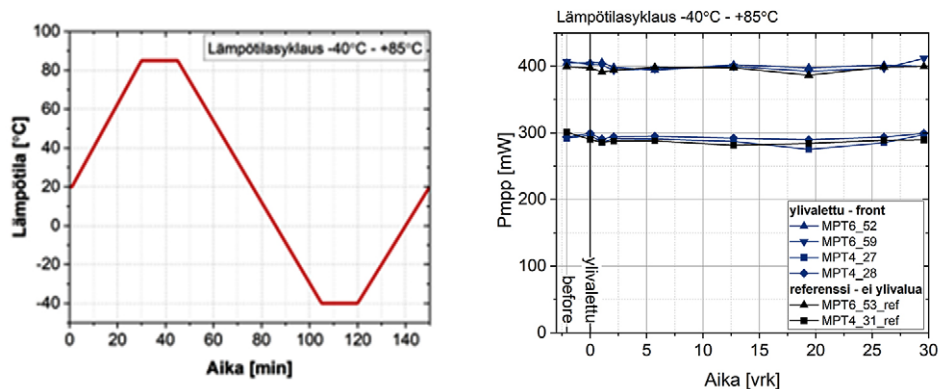
Kuva 10. Vasen: TPU:n samentuminen testin aikana, keskellä: TPU huonesäilytyksen jälkeen, oikea: referenssinäytteet testin lopussa.



4.2.4.3 Rasiustesti IEC: vaihtuva lämpötila

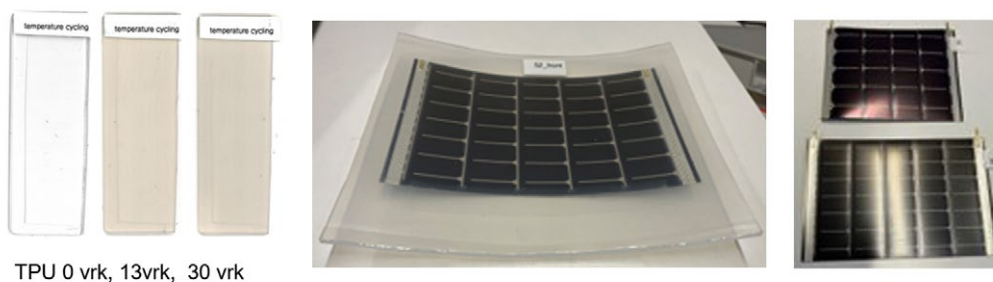
Rasiustestissä pidettiin kahdenkokoisia kennoja (MPT4 ja MPT6) 645 h -40°C ja $+85^{\circ}\text{C}$ lämpötilojen välillä. Lämpösyklauksen lämpötila on esitetty ajan funktiona kuvassa 11 vasemmalla. Testissä käytettiin ei-ylivalettuja ja valotettavalle puolelle ylivalettuja kennoja. Kennojen toiminta ei muuttunut lämpösyklauksen aikana, kuva 11 oikea.

Kuva 11. vasen: lämpösyklauksen profiili, oikea: lämpösyklauksessa olleiden kennojen tehot.



TPU:n väri sameni lämpörasituksen aikana mutta samentuminen ei vaikuttanut kennojen sähköiseen toimintaan. Samanlaista TPU:n kovettumista ja pintojen irtoamista kuin edellisessä rasiustestissä ei huomattu, ainoastaan ylivaletut näytteet kaareutuivat hieman, kts kuva 12.

Kuva 12. Vasen: TPU:n samentuminen testin aikana, keskellä: Ylivalettu kenno testin jälkeen, oikea: referenssinäytteet testin lopussa.



4.2.4.4 Mekaaninen rasitus

Mekaanisessa rasituksessa naarmutettiin kennon pintaa P60 hiekkapaperilla. Naarmutettaessa valotettavalle puolelle valettua TPU:ta, kennon sähköinen toiminta pysyi samana kuin ylivalettu, ei-naarmutettu kenno. Ilman TPU:n tuomaa suojaa kenno lakkasi toimimasta, kun sen valotettavaa puolta naarmutettiin.

Kennon pinnan likaantumista simuloitiin peittämällä kolme kennoa kirkkaalla muovikalvolla, jolle oli tulostettu osaksi peittävä Camo-kuvio. Camo A:n peittoalue oli 37 % ja Camo B:n peittoalue oli 56 % ja täysin mustan kalvon peittoalue 100 %. Likaantumisella on merkittävä vaikutus kennon tuottamaan virtaan, jolloin myös kennon teho laskee. Taulukossa 2 on esitetty yhden MPT6 kennon teho, jännite ja virta 1 SUN valaisussa peittävien kalvojen läpi valaistaessa.

Taulukko 2 MPT6 kennon teho, jännite ja virta peittävien kalvojen läpi valaistaessa.

Kalvo	Peitto	Teho [mW]		Jännite [V]		Virta [mA]	
kirkas	0 %	351	100 %	7	100 %	53	100 %
Camo A	37 %	157	45 %	7	100 %	24	44 %
Camo B	56 %	58	17 %	6	98 %	9	17 %
musta	100 %	0	0 %	0	0 %	0	0 %

5 Yhteenveto

Tässä työssä arvioitiin ylivaluprosessin soveltuvuutta kaupallisten, taipuisien ja ohuiden aurinkokennojen kanssa. Sopivin ylivalumateriaali testatuille amorfisesta piistä valmistetuille aurinkokennoille oli termoplastinen polyuretaani, jonka kanssa ylivaluprosessi soveltuu hyvin taipuisien aurinkokennojen muotoiluun yhteen suuntaan kaarevaksi kappaleeksi. Puolipallo-muoto vaatisi kennon lämpömuovausta.

Huomioitavaa käyttökohteessa (puettava, kaarevapintainen sovellus), että kennon toimintaan vaikuttavat ainakin seuraavat tekijät:

1. valon määrä (esim. pilvinen sää), jolloin 11 % valoteho antaa 20 % kennon alkuperäisestä tehosta.
2. kennon kaarevuussäde: mitä pienempi säde ja isompi kennon pinta-ala, sitä alhaisempi kennon teho.
3. valon kulma: kennon teho tippuu yli 80 % kun valaisukulma vaihtuu 0°:sta 90°:een. Suora valo johtaa suurimpaan tehoon.
4. lämpötila ja kosteus: ylivaletut kennot kestivät hyvin kiihdytettyjä rasitusolosuhteita, mutta ylivalumateriaali muutti olomuotoaan korkeassa lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa. Koko systeemi testattava.
5. mekaaninen rasitus (esim. naarmuuntuminen): kennon pinnan naarmuuntuessa sen toiminta lakkaa. Kuitenkin naarmutettaessa ylivalettua pintaa kennon toiminta säilyy ennallaan. Kennon pinta suojattava mekaaniselta rasitukselta.
6. likaantuminen: Kun pinta-alasta peitetään 56 %, kenno tuottaa vain 15–17 % alkuperäisestä tehostaan. Kenno pidettävä mahdollisimman puhtaana.

Lähteet

[1] <https://www.arptech.com.au/blog/injection-moulding-process-explained.htm#>



Puolustusministeriö
Försvarsministeriet
Ministry of Defence



Puolustusministeriö

MATINE

Maanpuolustuksen tieteellinen
neuvottelukunta

Eteläinen Makasiinikatu 8, Helsinki

PL 31, 00131 Helsinki

defmin.fi

ISSN PDF: 2984-102X

ISBN PDF: 978-951-663-121-2