



VTT

# Aurinkokenno- energiamoduulit 3D- pintojen integrointiin Valoi3

16.11.2023

Dr. Riikka Suhonen  
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

# Valoi3

- Hankkeen nimi:
  - Aurinkokennoenergiamoduulit 3D-pintojen integrointiin
- Toteuttajatahot:
  - Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
- Hankkeelle myönnetty MATINE-rahoitus euroina:
  - 63 919 €
- Hankkeen kesto:
  - 1.2.2023 – 31.12.2023

# Valoi3 – Tutkimussuunnitelma



## Aurinkokennoenergiamoduulit 3D-pintojen integrointiin

- Ylivalu-prosessin soveltavuuden arviointi kaupallisten, taipuisien aurinkokennojen kanssa → 3D-muotoiltu autonominen energiamoduuli
- Tavoitteet:
  - Kennojen testaus ylivalussa, ylivalumateriaalit
  - Sähköinen toiminta eri valaisu-olosuhteissa, ennen ja jälkeen ylivalun
  - Ylivalettujen näyttöiden ikääntyminen
  - Soveltavuuden arviointi



## Tehtävä 1

### Materiaalisuunnittelu

- Kaupalliset aurinkokennot
- Ylivalumateriaali

#### Tulos:

Yhteensopivat kombinaatiot valettavien aurinkokennojen, ylivalumuottien ja -materiaalien välillä valittu

## Tehtävä 2

### Aurinkokennojen ylivaluprosessi

- Ylivalun toteutus
- Prosessin säätö

#### Tulos:

Ylivaletut aurinkokennot

## Tehtävä 3

### Testaus ja integrointi

- Mittaus eri valotasoilla
- Rasiustestit
- Latauskyvykyys

#### Tulos:

Aurinkokennojen soveltuvuuden arviointi ylivaluprosessiin ja osaksi energiamoduulia

# Tehtävä 1

## Materiaalisuunnittelu

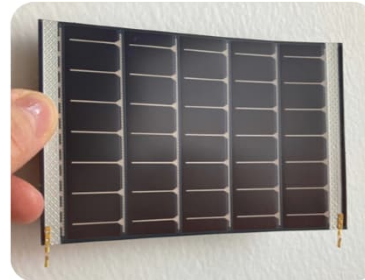
# Tehtävä 1 Materiaalisuunnittelu



## ■ Kaupalliset aurinkokennot

- Taipuisuus, paksuus
- Saatavuus

## ➤ Amorfinen pii (CIGS, perovskiitti)



## ■ Ylivalumateriaali

- Läpinäkyvyys
- Taipuisuus
- Prosessointilämpötila

## ➤ Polykarbonaatti (PC), Termoplastinen polyuretaani (TPU)



# Tehtävä 2

## Aurinkokennojen ylivaluprosessi

## Tehtävä 1

### Materiaalisuunnittelu

- Kaupalliset aurinkokennot
- Ylivalumateriaali

#### Tulos:

Yhteensopivat kombinaatiot valettavien aurinkokennojen, ylivalumuottien ja -materiaalien välillä valittu

## Tehtävä 2

### Aurinkokennojen ylivaluprosessi

- Ylivalun toteutus
- Prosessin säätö

#### Tulos:

Ylivaletut aurinkokennot

## Tehtävä 3

### Testaus ja integrointi

- Mittaus eri valotasoilla
- Rasiustestit
- Latauskyvykyys

#### Tulos:

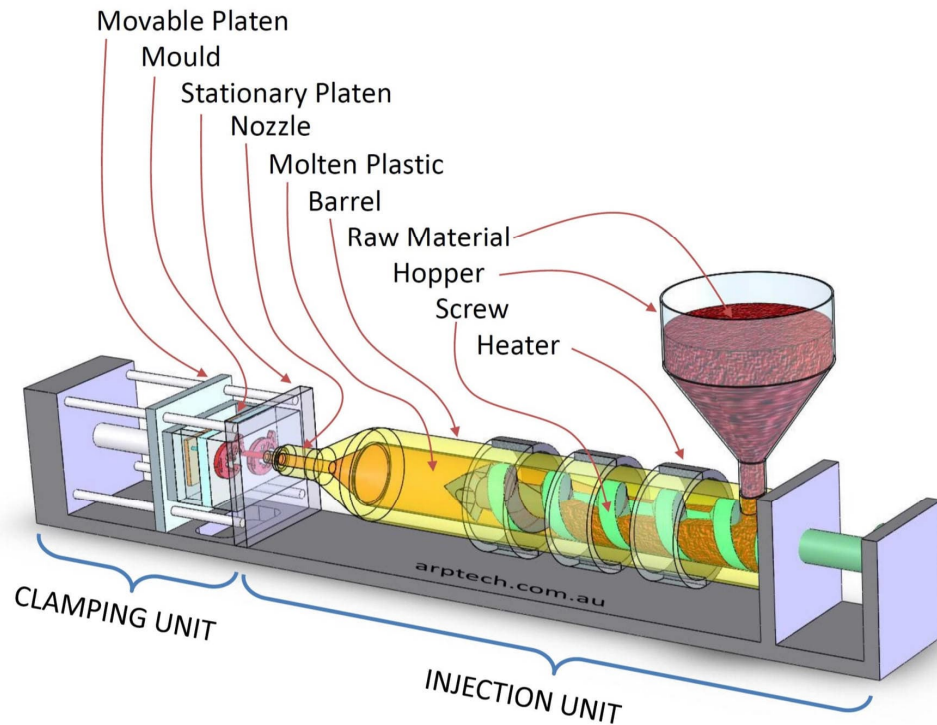
Aurinkokennojen soveltuvuuden arviointi ylivaluprosessiin ja osaksi energiamoduulia



# Tehtävä 2 Aurinkokennojen ylivaluprosessi



## ■ Ylivaluprosessin kaaviokuva



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

VTT – Engel victory 120

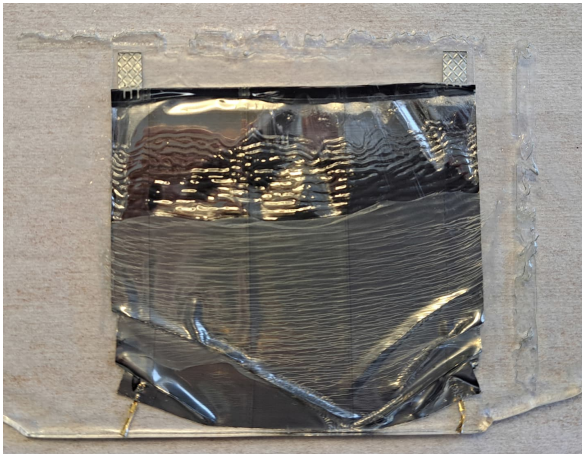


# Tehtävä 2 Aurinkokennojen ylivaluprosessi

- Aurinkokenno: **Amorfinen pii** + Ylivalumateriaali: **PC**

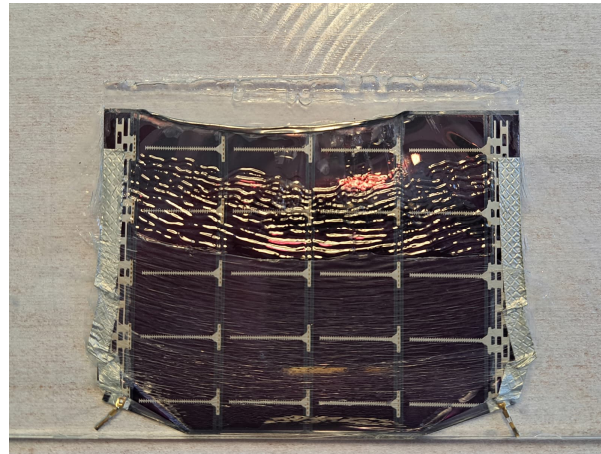
➤ Prosessiparametrien säädöstä huolimatta, kaikki kennot hajosivat kerrosten delaminoitumisen vuoksi PC-ylivaluprosessin aikana.

MPT3.6 – 180 mW kenno



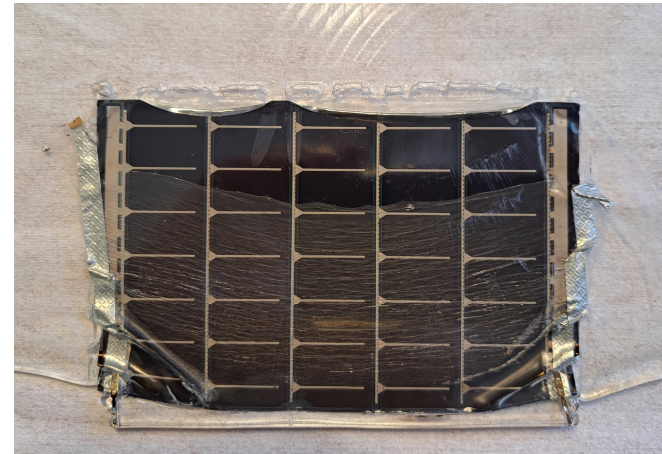
Kennon takaosa kohti PC

MPT4.8 – 240 mW kenno



Kennon etuosa kohti PC

MPT6 – 300 mW kenno



Kennon etuosa kohti PC

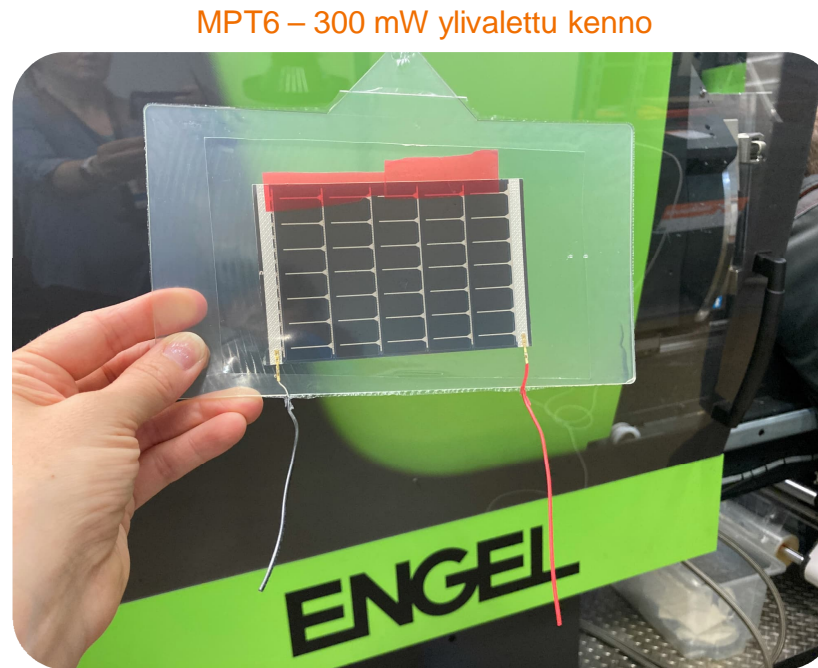
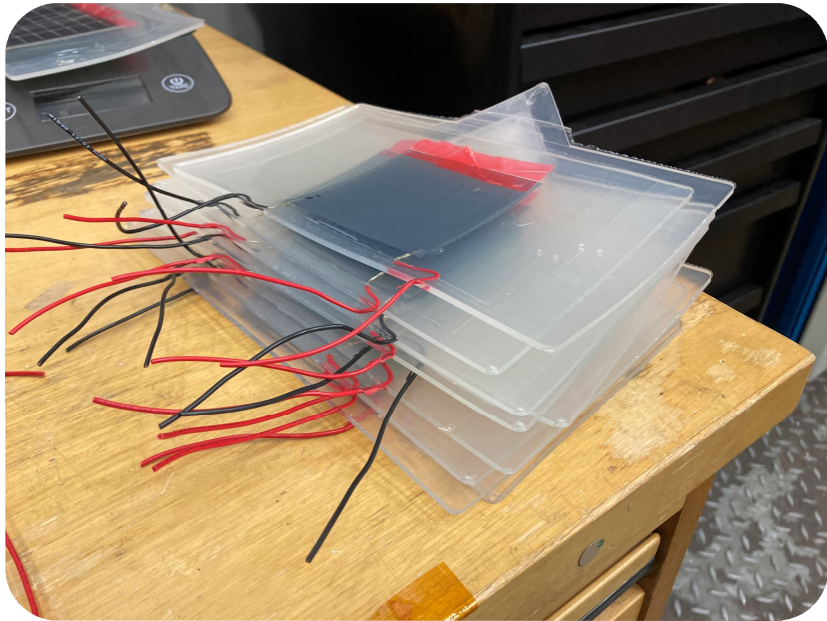
Valun  
suunta



# Tehtävä 2 Aurinkokennojen ylivaluprosessi

- Aurinkokenno: **Amorfinen pii** + Ylivalumateriaali: **TPU**

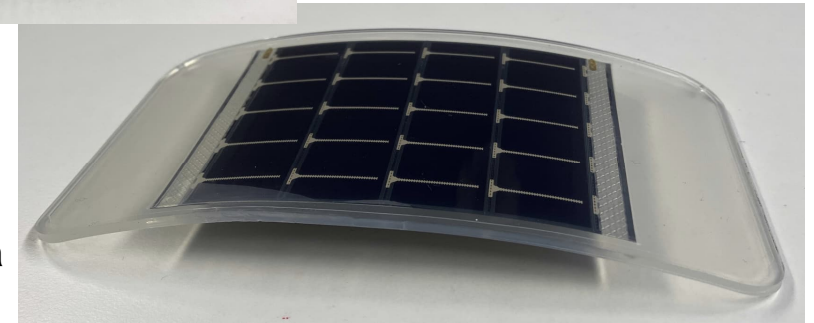
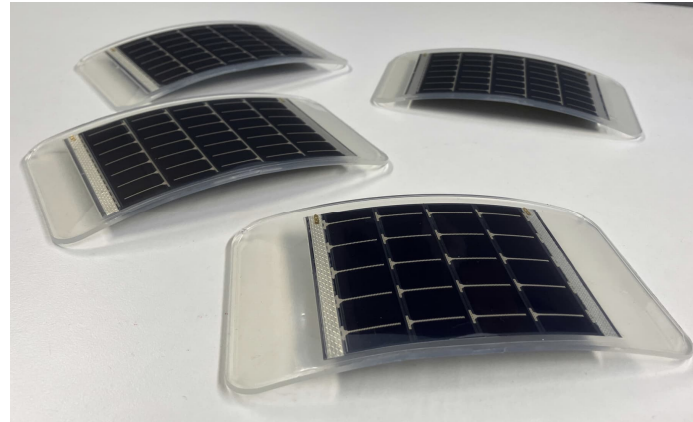
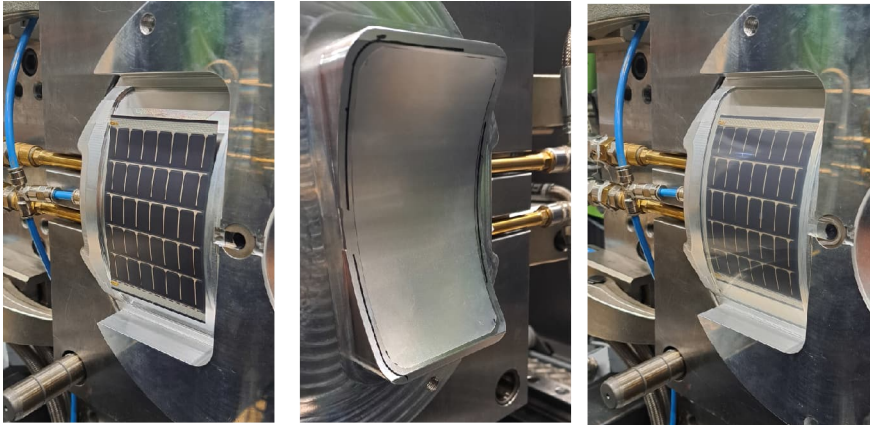
➤ Aurinkokennoja (3 eri kokoa) ylivalettiin onnistuneesti TPU:lla.





## Tehtävä 2 Aurinkokennojen ylivaluprosessi

### ■ Ylivalu kaarevaan muotoon

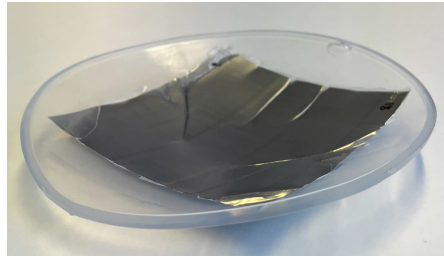
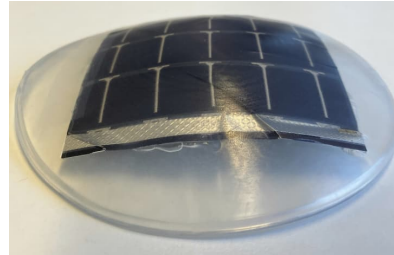
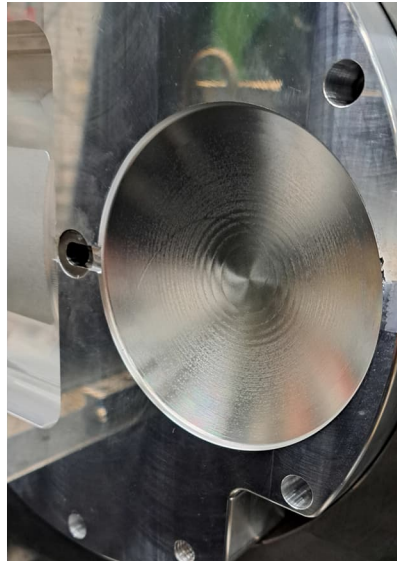
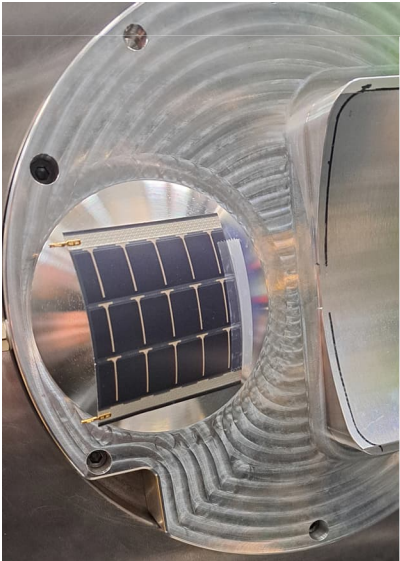


- Kenno irtoaa hieman TPU:sta valetun kappaleen muotista irrottamisen yhteydessä.
  - Adheesio valun ja paneelin välillä voisi olla parempi tai muotin vakuumpala hieman suurempi, jolloin valetun kappaleen voisi puhalttaa tehokkaammin irti pesästä vakuumpalan kautta.
- Ylivalun jälkeen MPT6 (1 sun)  $P = 390 \text{ mW}$ ,  $U = 6.6 \text{ V}$ ,  $I = 60 \text{ mA}$

➤ **Ylivalu kaarevaan muotoon ei vaikuta kennon toimintaan.**

## Tehtävä 2 Aurinkokennojen ylivaluprosessi

- Ylivalu kaarevaan muotoon: kupu / puolipallo



### ■ Huomioita:

- Kenno ei veny muotoon valun aikana, vaan siihen tulee taitoksia.
- Kenno pitäisi lämpömuovata kaksoiskaarevaan muotoon ennen ylivalua.
- **Kenno ei ollut toimiva puolipallon muotoon ylivalun jälkeen.**

# Tehtävä 3

## Testaus ja integrointi

## Tehtävä 1

### Materiaalisuunnittelu

- Kaupalliset aurinkokennot
- Ylivalumateriaali

#### Tulos:

Yhteensopivat kombinaatiot valettavien aurinkokennojen, ylivalumuottien ja -materiaalien välillä valittu

## Tehtävä 2

### Aurinkokennojen ylivaluprosessi

- Ylivalun toteutus
- Prosessin säätö

#### Tulos:

Ylivaletut aurinkokennot

## Tehtävä 3

### Testaus ja integrointi

- Mittaus eri valotasoilla
- Rasiustestit
- Latauskyvykyys

#### Tulos:

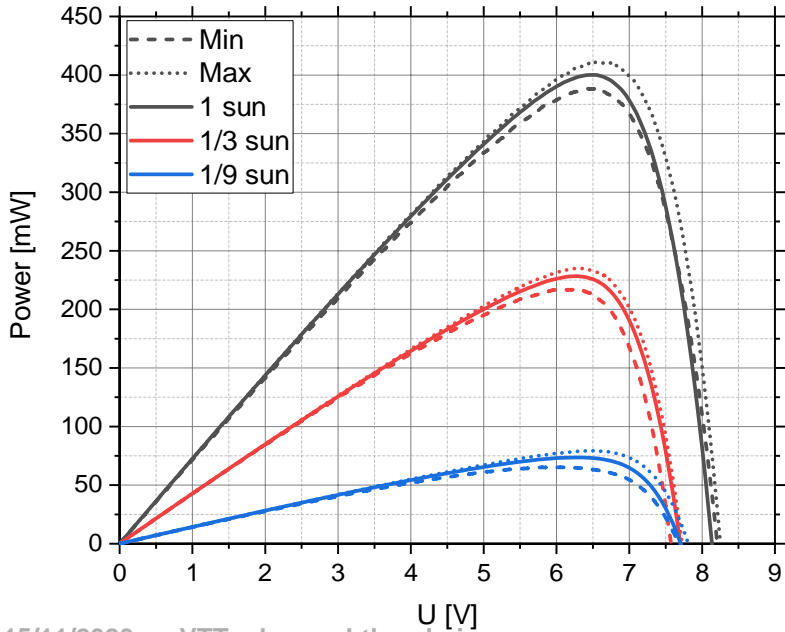
Aurinkokennojen soveltuvuuden arviointi ylivaluprosessiin ja osaksi energiamoduulia

# Tehtävä 3 Valaisutehon vaikutus

Eri valotehot simuloivat esim. pilvistä säätä tai muuten varjoista olosuhdetta.

- 1 sun (100 mW/cm<sup>2</sup>, 100%)
- 1/3 sun (33 mW/cm<sup>2</sup>, 33 %) – Mitattu teho 57%
- 1/9 sun (11 mW/cm<sup>2</sup>, 11 %) – Mitattu teho 20%

Teho = Jännite × Virta  
 $P = U \times I$



Teho [mW]						
	1 sun	%	1/3 sun	%	1/9 sun	%
<b>MPT3.6</b>	205	100	117	57	41	20
<b>MPT4.8</b>	290	100	169	58	58	20
<b>MPT6</b>	401	100	229	57	74	18

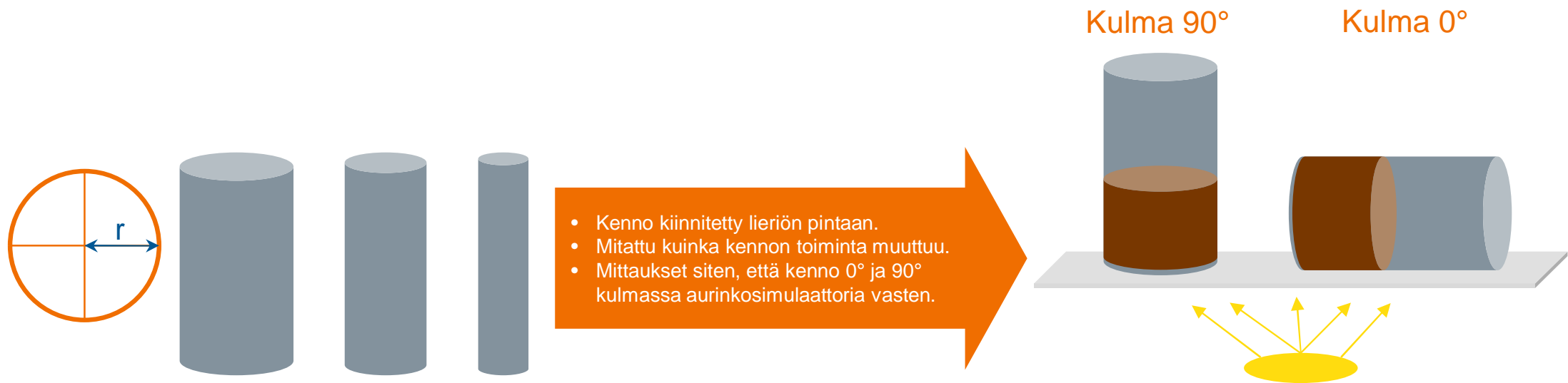
Jännite [V]						
	1 sun	%	1/3 sun	%	1/9 sun	%
<b>MPT3.6</b>	4	100	4	98	4	102
<b>MPT4.8</b>	5	100	5	98	5	101
<b>MPT6</b>	6	100	6	96	6	96

Virta [mA]						
	1 sun	%	1/3 sun	%	1/9 sun	%
<b>MPT3.6</b>	54	100	32	58	11	20
<b>MPT4.8</b>	60	100	36	60	12	20
<b>MPT6</b>	62	100	37	59	12	19



# Tehtävä 3 Taivutussäteen vaikutus

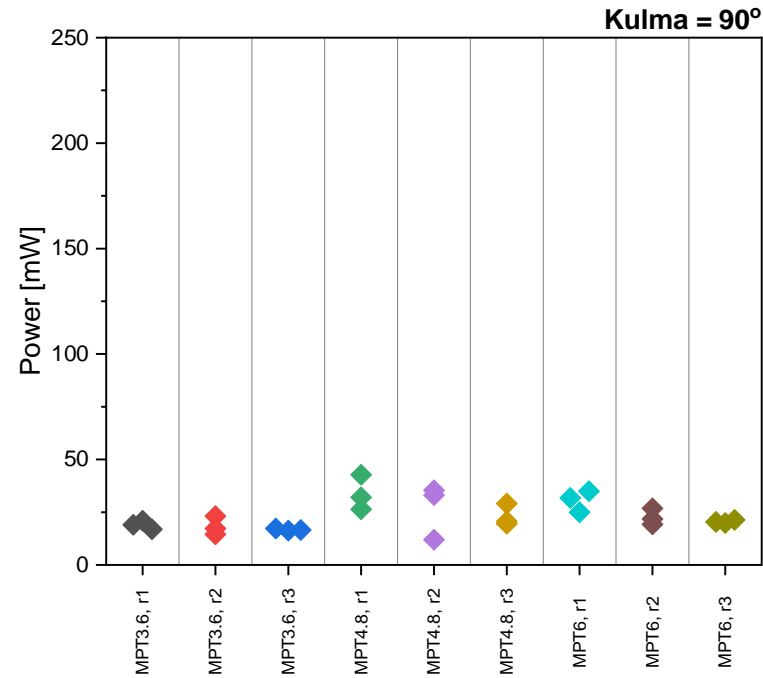
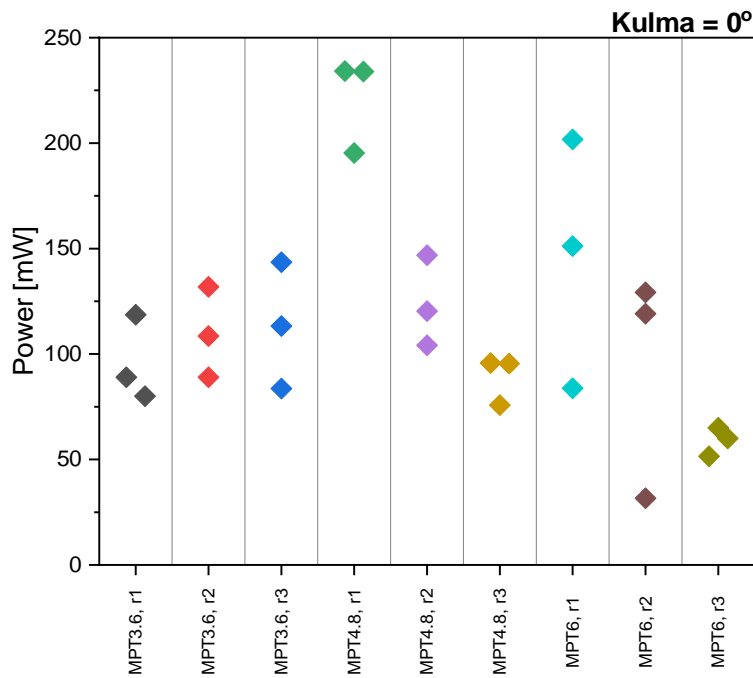
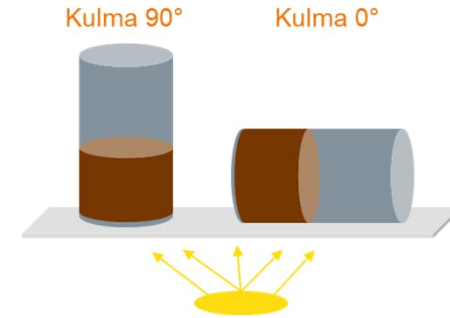
- Kennon toimivuuden määrittäminen eri taivutussäteillä.
  - Taipuisan kennon voi integroida myös kaarevalle pinnalle (esim. käsivarteen).
  - Mitä pienempi säde  $r$ , sitä ”tiukemmalle” rullalle kenno taivutetaan.



# Tehtävä 3 Taivutussäteen vaikutus



- Mittauskulma eli kennoon suoraan osuvan valon määrä vaikuttaa merkittävästi kennon tehoon → esim. MPT6 kennon teho tippuu yli 80% kun mittauskulma vaihtuu 0°:sta 90°:een.
- Taivutussäteen vaikutus selvempi isommilla kennoilla → suuremmasta pinta-alasta suurempi osa jää peittoon pienellä taivutussäteellä.

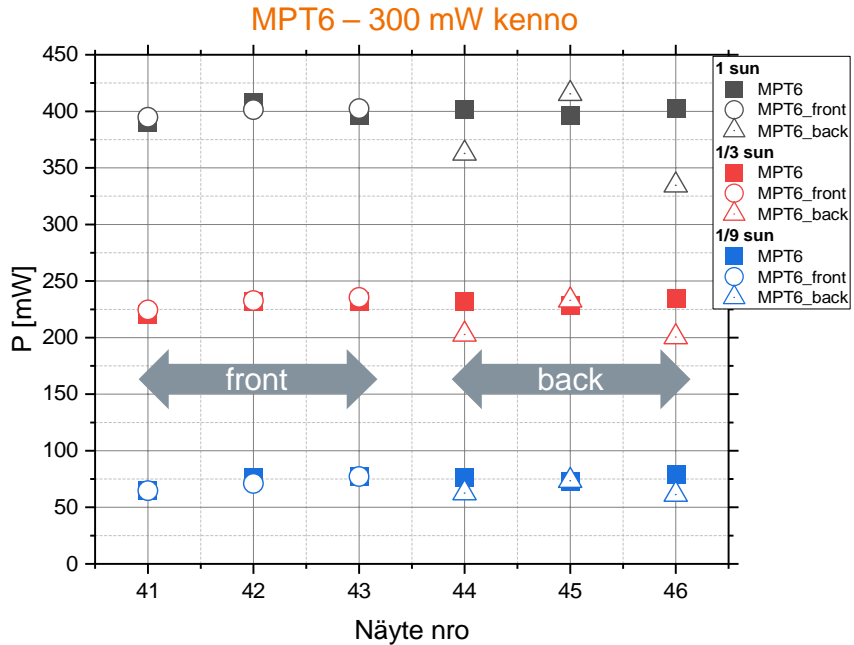
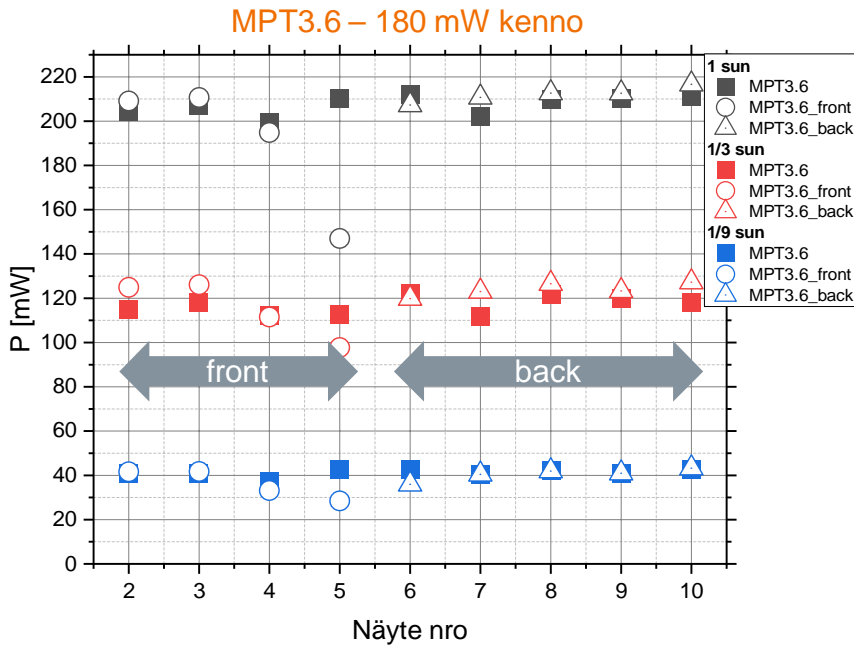


r1 = 4.55 cm  
r2 = 3.30 cm  
r3 = 2.80 cm

# Tehtävä 3 Ylivalun vaikutus

- Kahdenkokoisia kennoja ylivalettiin TPU:lla. TPU joko kennon edessä tai takana ("front" ja "back").

➤ Kennojen suorituskyky säilyy samana ylivaluprosessin jälkeen valun puolesta riippumatta.

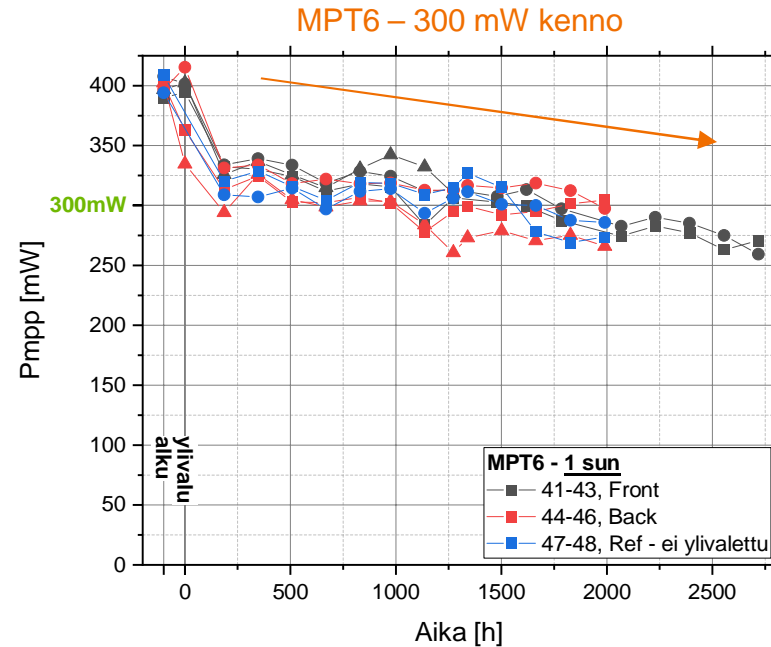
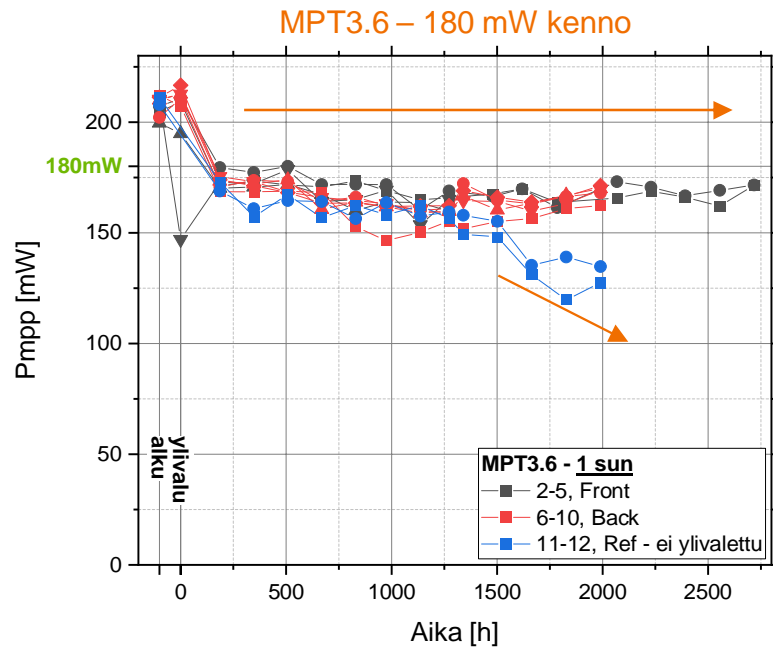


# Tehtävä 3 Ylivalettujen kennojen rasitustestit

- Ylivalettuja kennoja rasitettiin erilaisissa kiihdytetyissä olosuhteissa, jotta nähtäisiin kuinka ne toimivat rasituksen aikana ja kuinka valettu muoto kestää rasituksen.
  
- **Rasitustestit:**
  1. ISOS-protokolla aurinkokennoille:
    - 1 sun valo (100 mW/cm<sup>2</sup>), kosteus 50%, lämpötila 65°C
  2. IEC: Vakioitu korkea lämpötila ja kosteus
    - Kosteus 85%, lämpötila 85°C
  3. IEC: Vaihtuva lämpötila
    - -40°C – +85°C
  4. Mekaaninen rasitus:
    - Kennon naarmutus
    - Ylivalumateriaalin naarmutus
    - Likaantuminen

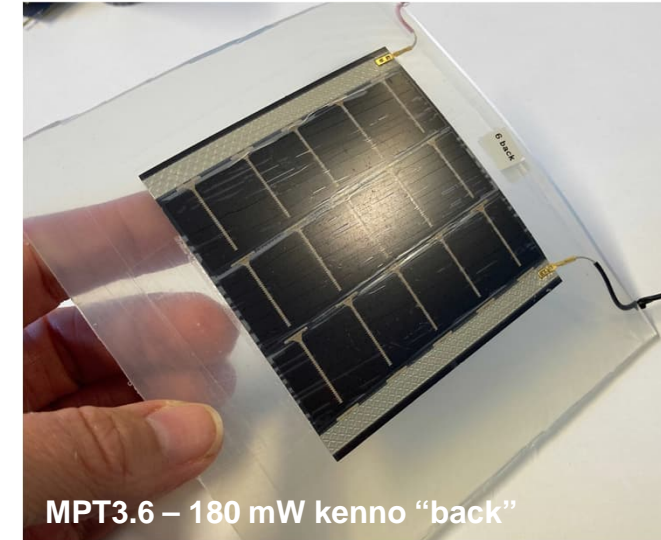
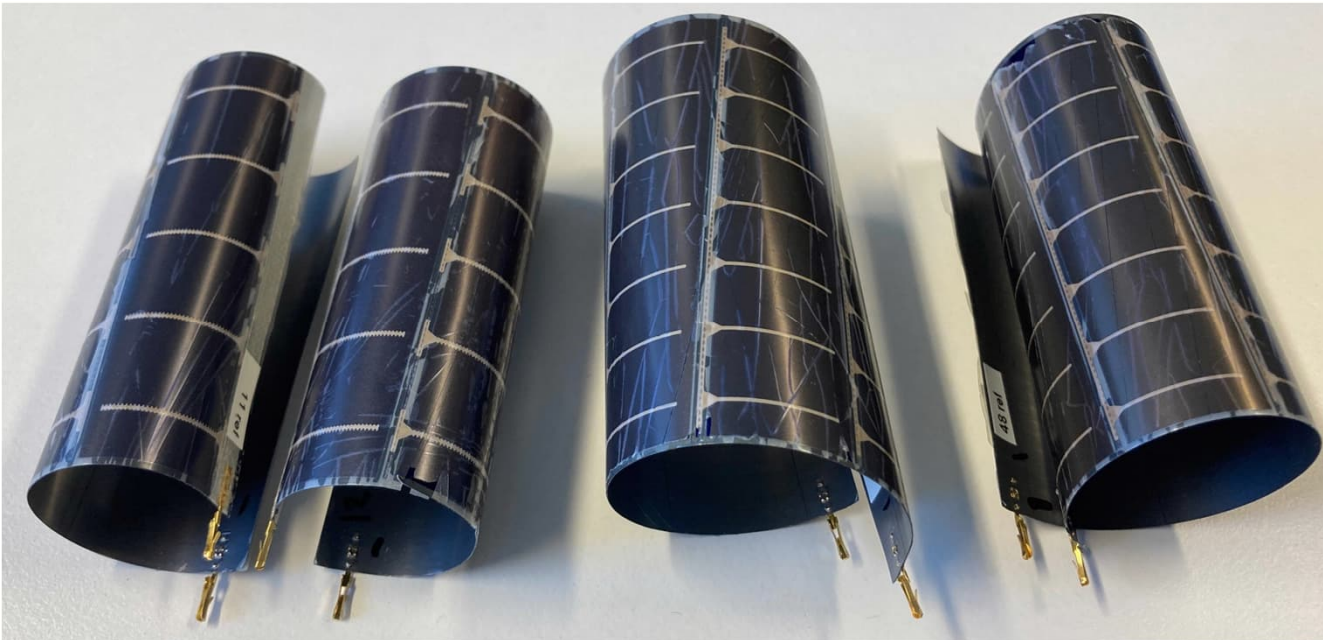
# Tehtävä 3 Rasitustestit: ISOS protokolla

- Kaikkien näytteiden teho laskee ensimmäisen 200h rasituksen aikana ja tasoittuu sen jälkeen 150-170 mW (MPT3.6) ja 300 mW (MPT6) teholumemiin.
- MPT3.6 ylivalettujen kennojen teho pysyy stabiilina koko testin ajan kun taas MPT6 kennojen tehossa havaittavissa laskusuunta.
- MPT3.6 ylivalamattomien referenssi-kennojen teho laskee 1500h rasituksen jälkeen. Tehon lasku johtuu laskeneesta jännitteestä, joka viittaa yksittäisten kennojen toiminnan heikkenemiseen.

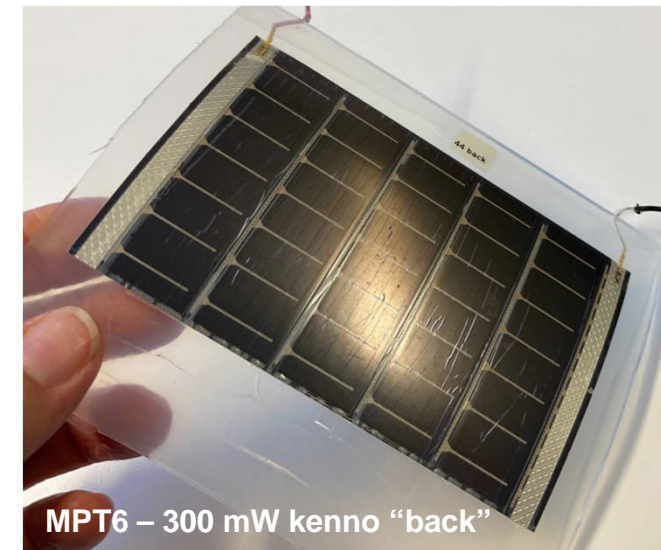


# Tehtävä 3 Ylivalettujen kennojen rasiustestit

- Molempien kokoisilla kennoilla "ref" ja "back" näytteisiin ilmestyy rasiuksen aikana säröjä.
- Ylivalamattomat "ref" näytteet taipuvat voimakkaasti rasiuksen aikana (kts. kuva alla).
- Myös "back" moduulit taipuvat, mutta eivät niin voimakkaasti (TPU ylivalu estää liiallisen taipumisen).



MPT3.6 – 180 mW kenno "back"

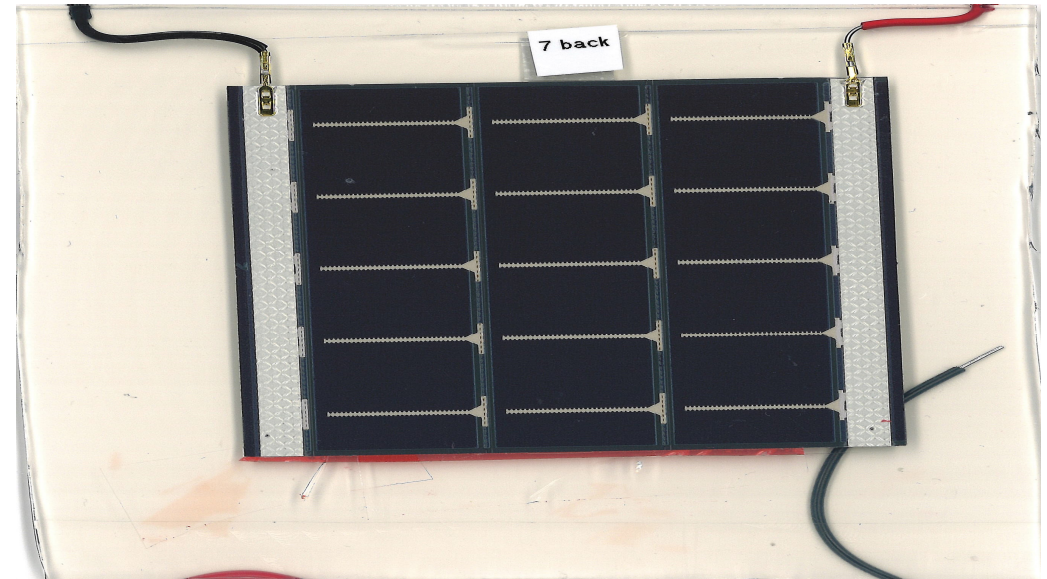
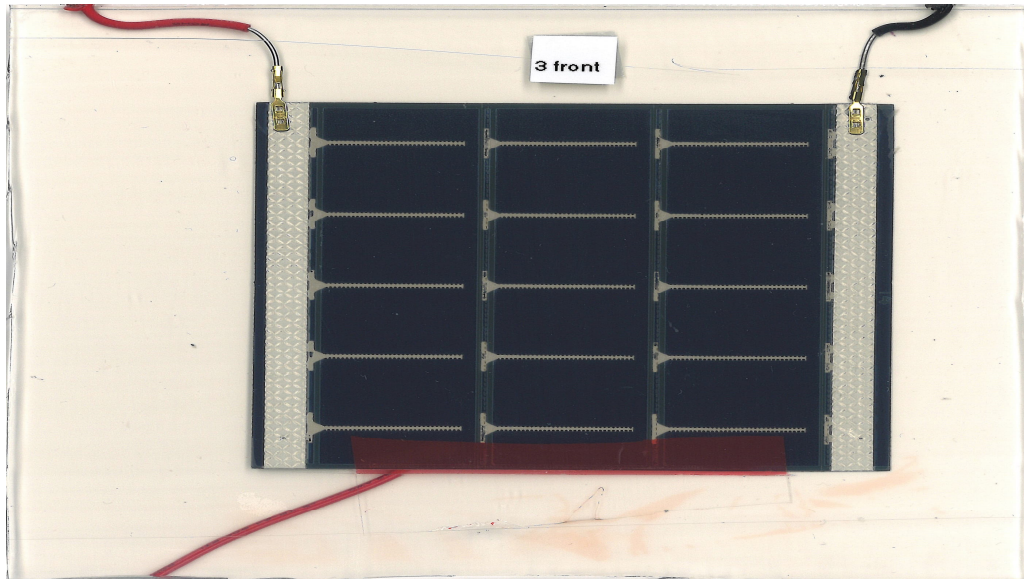


MPT6 – 300 mW kenno "back"



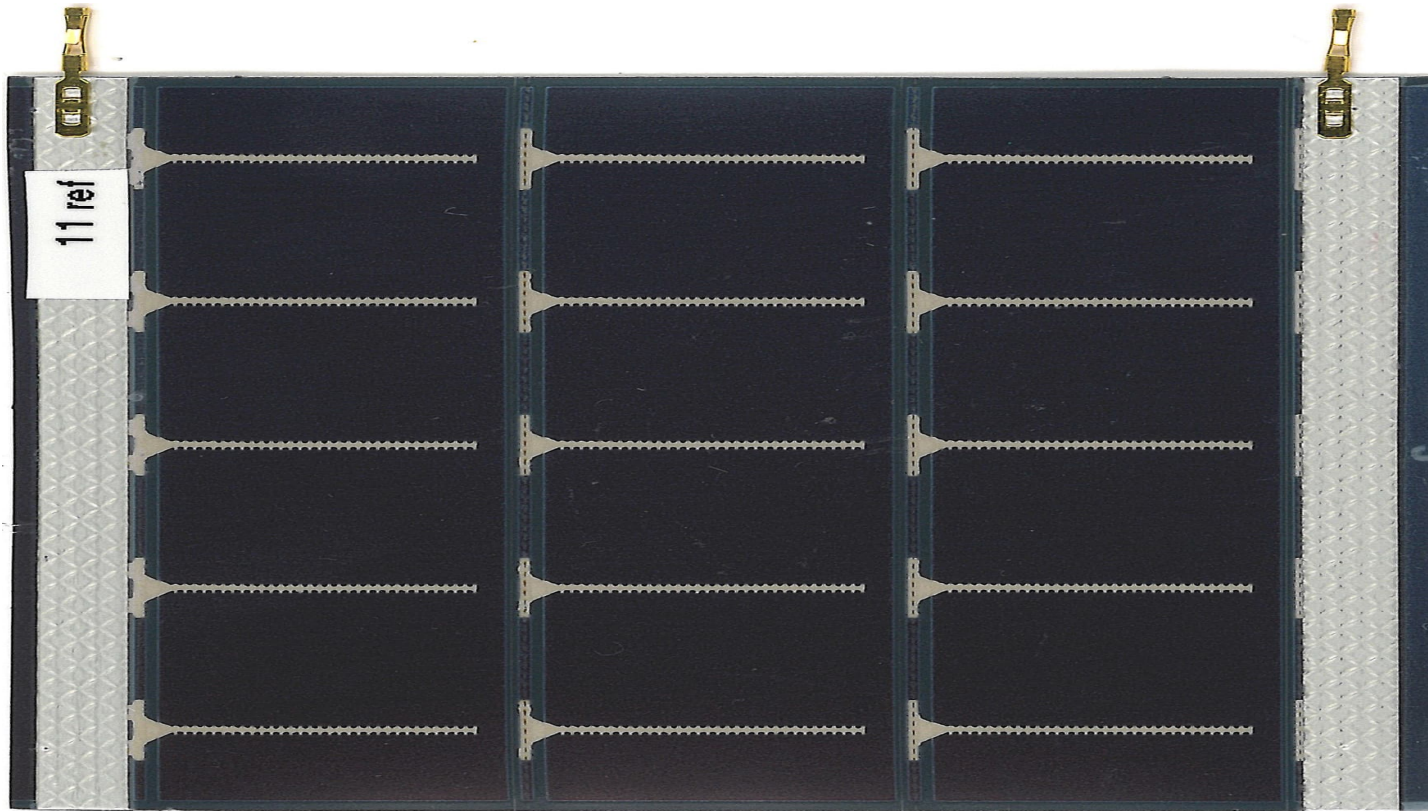
# Tehtävä 3 Rasitustestit: ISOS protokolla

- "front" kennoihin ei ilmesty rasituksen aikana säröjä lainkaan. TPU samentuu jonkin verran.
- MPT3.6 ilman ylivalua "ref" kennoilla säröt ilmestyvät 669h rasituksen jälkeen ja "back" kennoilla 830h rasituksen jälkeen.
- MPT6 sekä "ref" että "back" kennoilla säröt ilmestyvät 669h rasituksen jälkeen.
- Säröistä huolimatta, "back" ylivalettujen kennojen toiminta säilyy ennallaan rasituksen aikana.



# Tehtävä 3 Rasitustestit: ISOS protokolla

- MPT3.6 ilman ylivalua "ref" kennoilla säröt ilmestyvät 669h rasituksen jälkeen.
- Säröistä huolimatta, MPT3.6 ylivalamattomien "ref" kennojen teho laskee vasta 1500h rasituksen jälkeen.





# Tehtävä 3 Rasitustestit 85°C / 85%rH

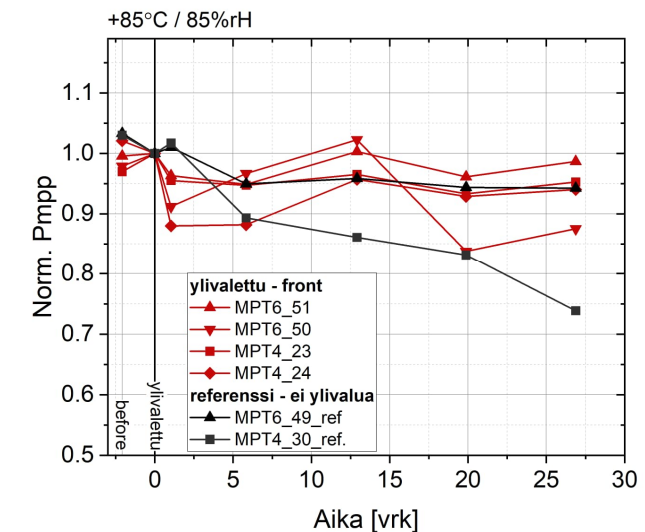
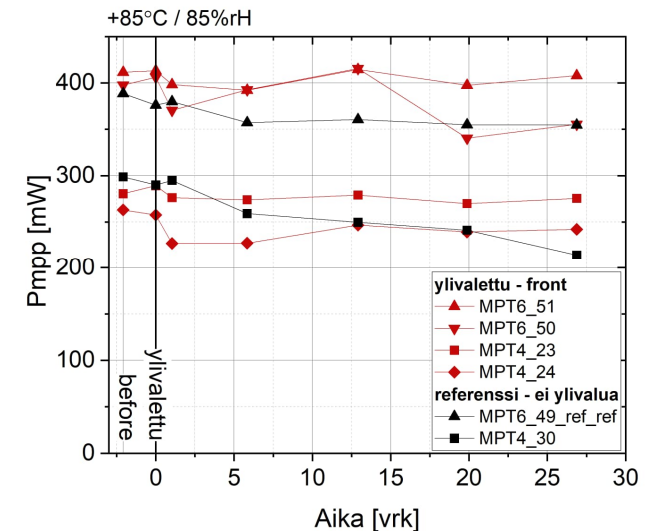
## IEC: Vakioitu korkea lämpötila ja kosteus

- MPT4 - nr. 23, 24 – ylivaletut näytteet
  - nr. 30 – referenssi ilman ylivalua
- MPT6 - nr. 50, 51 – ylivaletut näytteet
  - nr. 30 – referenssi ilman ylivalua

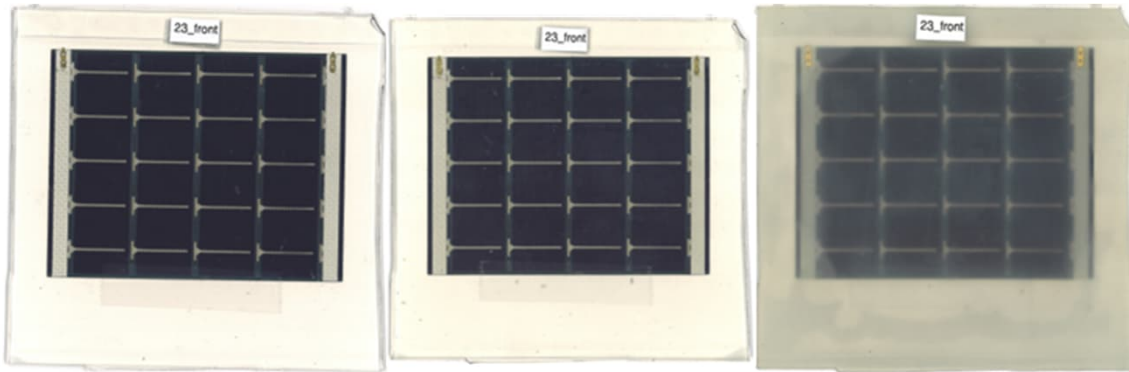
### ■ IV-mittaukset 1 sun valoteholla:

- Teho 645 h / 27 vrk rasituksen jälkeen:
  - MTP4 ylivalettu - front : 94 – 95% alkuperäisestä
  - MTP4 referenssi - ei ylivalua 74 % alkuperäisestä
  - MTP6 ylivalettu - front : 88 – 99% alkuperäisestä
  - MTP6 referenssi - ei ylivalua 94 % alkuperäisestä

➤ Pienet alenemat sekä virrassa että jännitteessä aiheuttavat tehon alenemisen, mutta **suurimmalla osalla näytteistä teho edelleen yli 90% alkuperäisestä.**



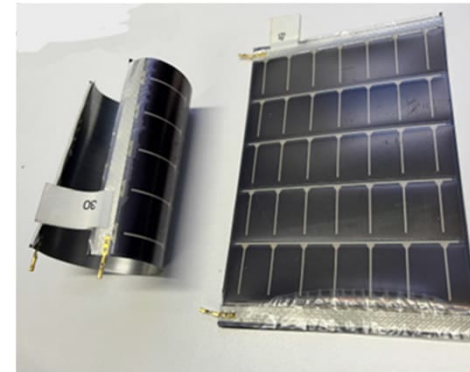
# Tehtävä 3 Rasitustestit 85°C / 85%rH



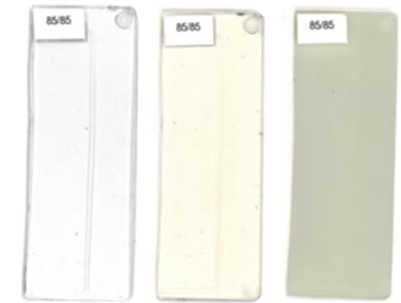
Alussa

13 vrk

27 vrk

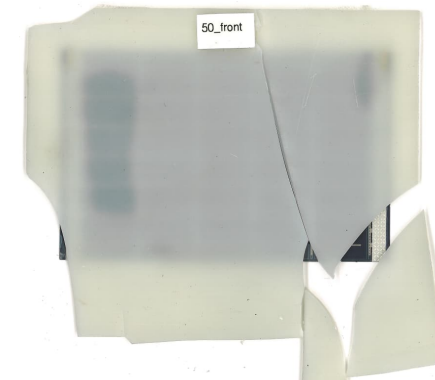
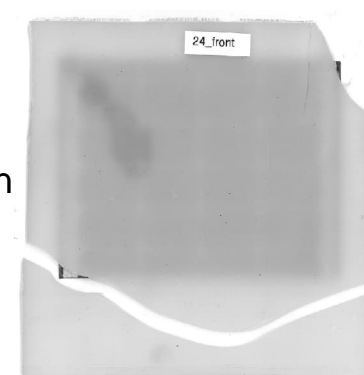


Referenssit 30 vrk



TPU 0 vrk, 13vrk, 30 vrk

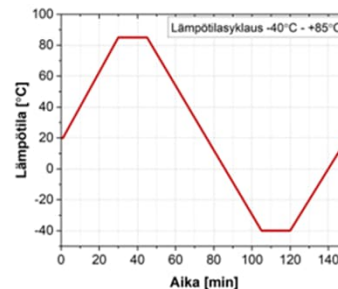
- TPU:n väri samenee 85°C / 85%rH säärasitus-testin aikana.
- TPU pysyy joustavana 27 vrk jatkuvan testin aikana.
- Kun ylivaletut näytteet ovat testin jälkeen huoneilmassa useamman vuorokauden ajan, **TPU muuttuu sameaksi sekä kovaksi ja hauraaksi**. Tällöin kennot irtoavat TPU:sta.
- Kennot ovat edelleen toimivia, mutta samentuneen TPU:n läpi mitatessa niiden teho, putoaa 62 – 69 %:iin ilman TPU:ta mitatusta.
- Referensseistä toinen rullautuu, heti ensimmäisen vuorokauden aikana.
- Molemmissa referenssi-kennoissa havaitaan päällimmäisen kalvon irtoamista reunojen kontaktialueilla.



# Tehtävä 3 Rasitustestit -40°C – +85°C

## IEC: Vaihtuva lämpötila -40°C – +85°C

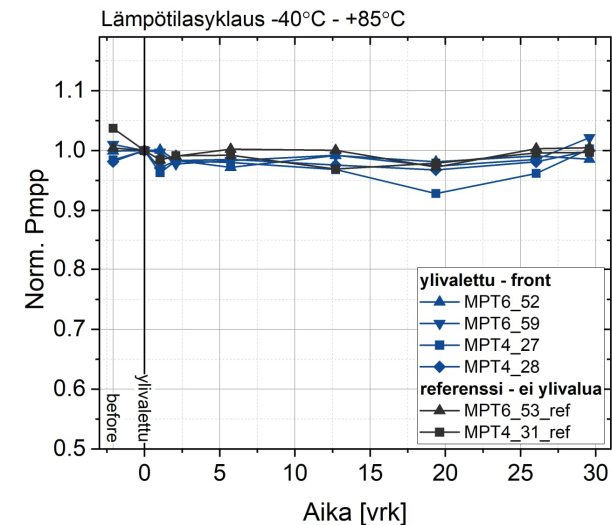
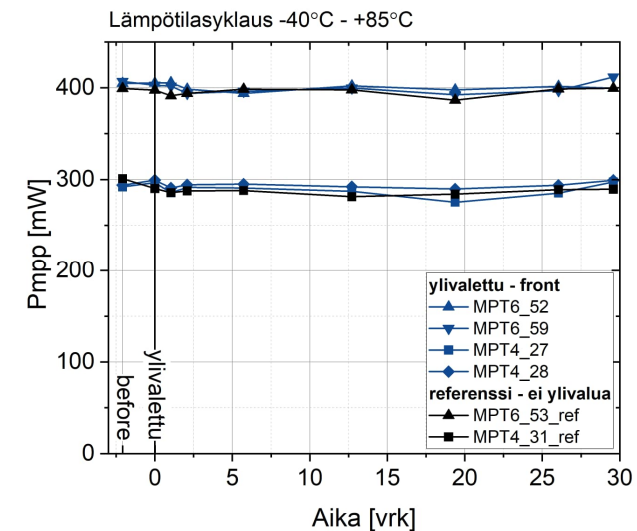
- MPT4 - nr. 27, 28 – ylivaletut näyttteet
  - nr. 31 – referenssi ilman ylivalua
- MPT6 - nr. 52, 59 – ylivaletut näyttteet
  - nr. 53 – referenssi ilman ylivalua



### ■ IV-mittaukset 1 sun valoteholla:

- Teho 284 syklin / 27 vrk rasituksen jälkeen:
  - MTP4 ylivalettu - front : 100 % alkuperäisestä
  - MTP4 referenssi - ei ylivalua 100 % alkuperäisestä
  - MTP6 ylivalettu - front : 99 – 102 % alkuperäisestä
  - MTP6 referenssi - ei ylivalua 100 % alkuperäisestä

➤ **Kennojen tehossa ei tapahdu muutoksia rasituksen aikana.**



# Tehtävä 3 Rasitustestit -40°C – +85°C



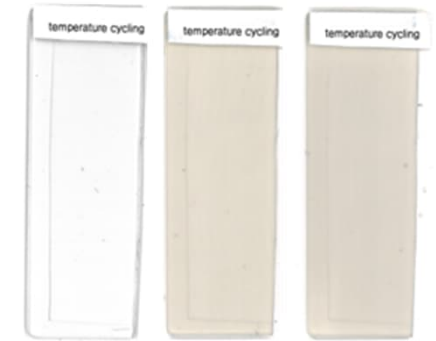
Alussa

13 vrk

27 vrk

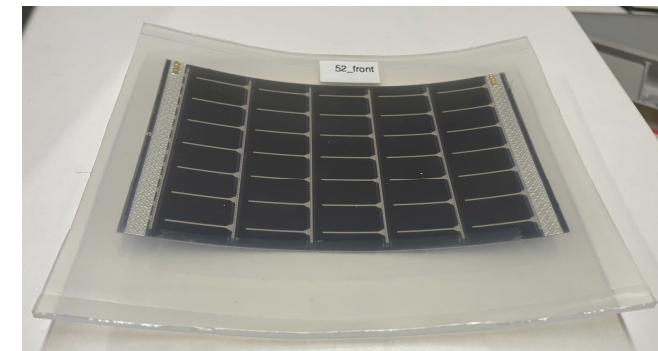


Referenssit 30 vrk



TPU 0 vrk, 13vrk, 30 vrk

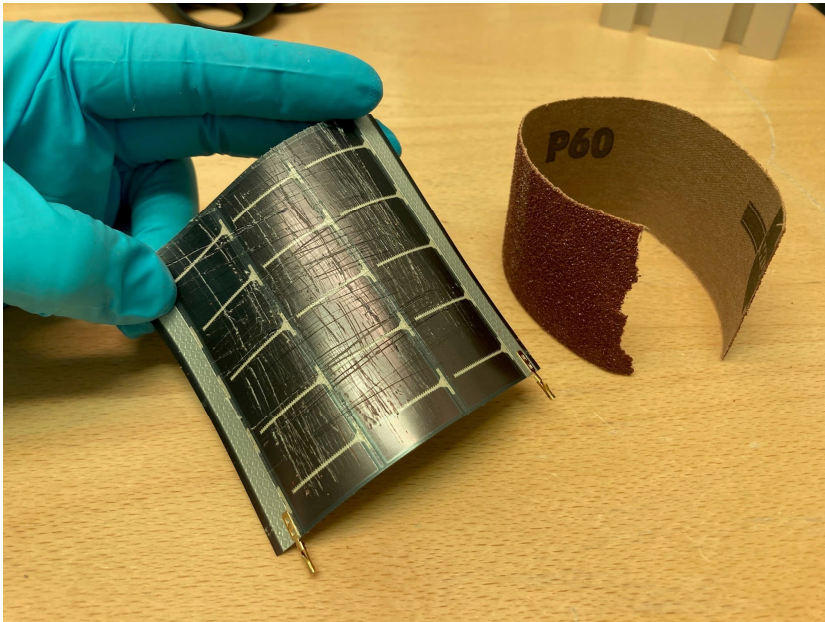
- TPU:n väri samenee -40°C – +85°C lämpörasitus-testin aikana. Tällä ei kuitenkaan näytä olevan vaikutusta kennojen sähköiseen toimintaan.
- TPU kovettuu kylmänä, mutta muuttuu taas joustavaksi lämmitettyään huoneenlämpöön.
- Ylivaletut näytteet kaareutuvat hieman.
- Referensseissä ei havaita muutoksia.



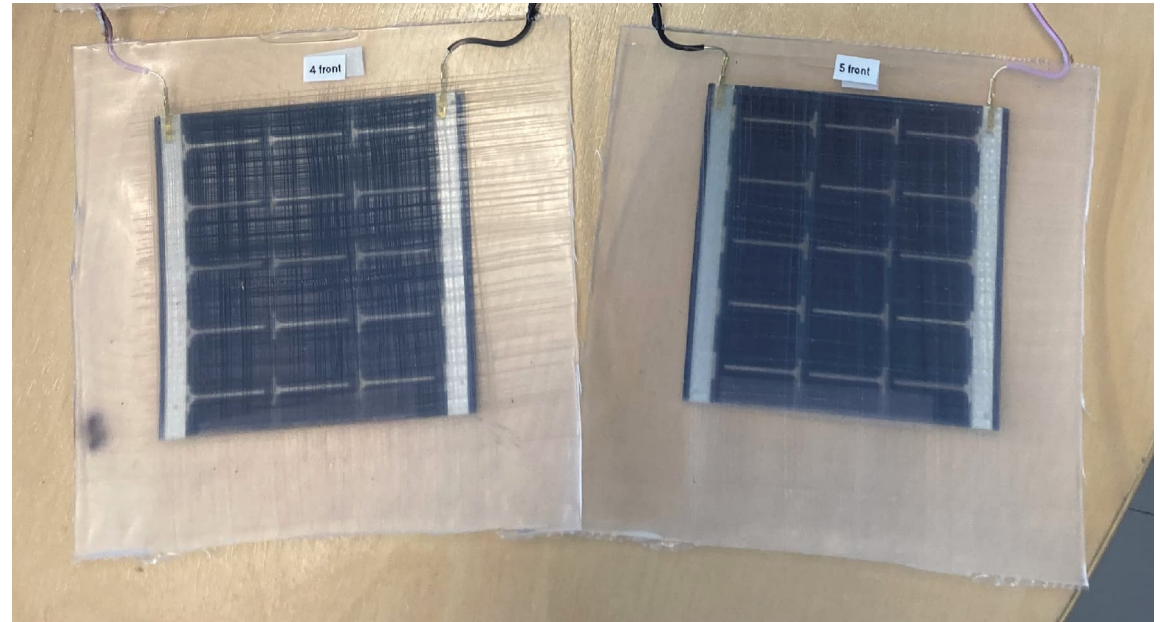


# Tehtävä 3 Rasitustestit – Naarmuuntuminen

- Kuinka kenno selviää mekaanisesta rasituksesta esim. naarmuuntuminen?



Jos kennoa naarmutetaan ilman ylimääräistä suojaa → **kenno ei toimi enää.**



Jos kennon ylivalua naarmutetaan → **kenno toimii kuten ylivalettu, ei-naarmutettu kenno.**

- Suojaus mekaaniselta rasitukselta on tarpeen.

# Tehtävä 3 Rasitustestit – Likaantumisen

■ MPT6 (nr. 56-58) kennoista osa peitettiin muovikalvolle tulostetuilla Camokuvioilla, kuin päällä olisi valoa estävää likaa.

- Musta kalvo peittoalue 100%
- Camo A peittoalue 37%
- Camo B peittoalue 56%
- Kirkas kalvo peittoalue 0%

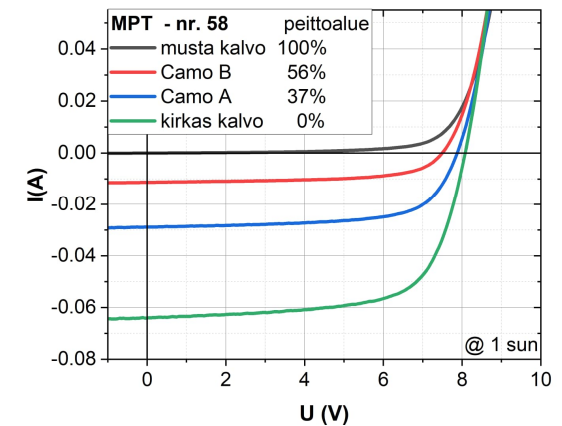
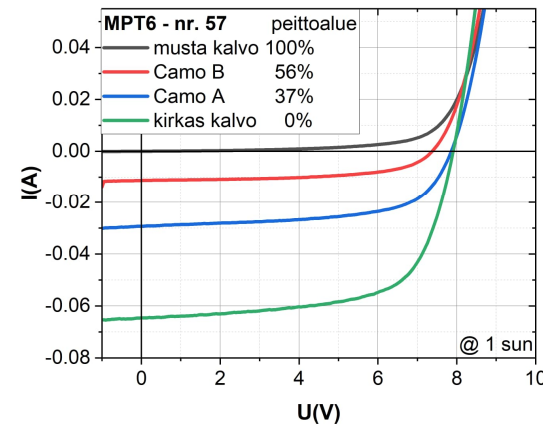
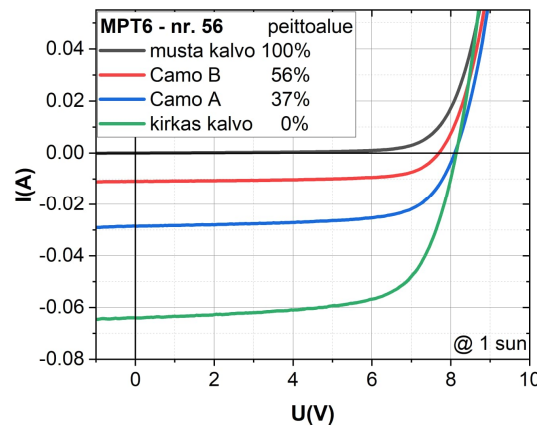
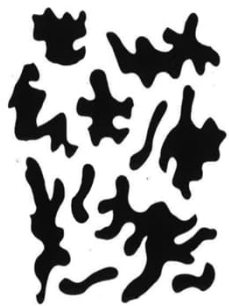
■ Käytetty valoteho 1 sun (100 mW/cm<sup>2</sup>).

- Likaantumisella on merkittävä vaikutus kennon tuottamaan virtaan, jolloin myös teho laskee.
- Peittoalue 37% → Teho 43-45% alkuperäisestä.
- Peittoalue 56% → Teho 15-17% alkuperäisestä.

	Peittoalue	Power [mW]	Operating Voltage [V]	Operating Current [mA]
nr.56 kirkas kalvo	0 %	351 (100%)	7 (100%)	53 (100%)
nr.56 Camo A	37 %	157 (45%)	7 (100%)	24 (44%)
nr.56 Camo B	56 %	58 (17%)	6 (98%)	9 (17%)
nr.56 musta kalvo	100 %	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
nr.57 kirkas kalvo	0 %	334 (100%)	6 (100%)	53 (100%)
nr.57 Camo A	37 %	142 (43%)	6 (99%)	23 (43%)
nr.57 Camo B	56 %	49 (15%)	6 (91%)	8 (16%)
nr.57 musta kalvo	100 %	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
nr.58 kirkas kalvo	0 %	349 (100%)	7 (100%)	54 (100%)
nr.58 Camo A	37 %	152 (43%)	6 (99%)	24 (44%)
nr.58 Camo B	56 %	53 (15%)	6 (91%)	9 (17%)
nr.58 musta kalvo	100 %	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

Camo A

Camo B

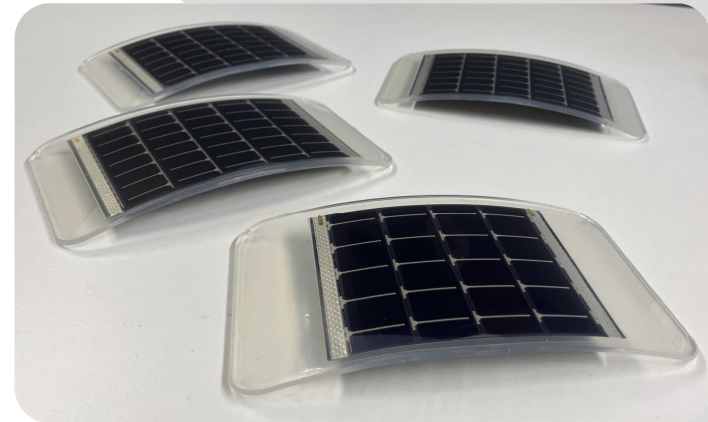


- Ylivalu-prosessin soveltuvuuden arviointi kaupallisten, taipuisien aurinkokennojen kanssa:
  - Sopivan ylivalumateriaalin kanssa **ylivaluprosessi soveltuu hyvin taipuisien aurinkokennojen muotoiluun** yhteen suuntaan kaarevaksi kappaleeksi. Puolipallo-muoto vaatisi kennon lämpömuovausta.
- Huomioitavaa käyttökohteessa (puettava, kaarevapintainen sovellus), että kennon toimintaan vaikuttavat ainakin seuraavat tekijät:
  - **Valon määrä** (esim. pilvinen sää): 11% valoteho antaa 20% kennon alkuperäisestä tehosta.
  - **Kennon kaarevuussäde**: Pienempi säde johtaa alhaisempaan kennon tehoon.
  - **Valon kulma**: Kennon teho tippuu yli 80% kun valon kulma vaihtuu 0°:sta 90°:een. Suora valo johtaa suurimpaan tehoon.
  - **Lämpötila ja kosteus**: Ylivaletut kennot kestivät hyvin kiihdytettyjä rasitusolosuhteita, mutta ylivalumateriaali muutti olomuotoaan korkeassa T ja RH. Koko systeemi testattava.
  - **Mekaaninen rasitus** (esim. naarmuuntuminen): Kennon pinnan naarmuuntuessa, sen toiminta lakkaa. Mutta jos ylivalettu pinta naarmuuntuu, kennon toiminta säilyy ennallaan. Kenno suojattava mekaaniselta rasitukselta.
  - **Likaantuminen**: Kun pinta-alasta peitetään 56%, kenno tuottaa vain 15-17% alkuperäisestä tehostaan. Kenno pidettävä mahdollisimman puhtaana.

# KIITOS!

## VTT:n projekti-tiimi

- Minna Kehusmaa
- Jenni Tomperi
- Anne Peltoniemi
- Kaisa-Leena Väisänen
- Kyösti Heikkinen
- Thomas Kraft
- Mari Ylikunnari



## Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta (MATINE)



Puolustusministeriö  
Försvarsministeriet  
Ministry of Defence





# bey<sup>0</sup>nd

## the obvious

Riikka Suhonen  
[Riikka.Suhonen@vtt](mailto:Riikka.Suhonen@vtt)

@VTTFinland

[www.vtt.fi](http://www.vtt.fi)