

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2024

Mikko Tuikkala

# Aurinkopaneelien kierrätysjärjestelmän kehitys

– Prototyypin kehitys ja testaus



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2024 | 60 sivua

Mikko Tuikkala

## Aurinkopaneelien kierrätysjärjestelmän kehitys

- Prototyypin kehitys ja testaus

Tämän työn tavoitteena oli kehittää uusi materiaalien erottelumekanismi käytöstä poistettujen aurinkopaneelien kierrätystä varten. Käyttöikänsä jälkeen aurinkopaneelit tulisi kierrättää. Kierrätystä voidaan parantaa, kun materiaalit erotetaan jo purkuvaiheessa tehokkaasti.

Tutkielman perustana on laajeneva aurinkopaneeliteollisuus ja sen mukana kasvava kierrätyksen tarve. Työn teettäjillä on myös tarve pienemmälle järjestelmälle, kuin mitä markkinoilla on työn kehitysvaiheessa ollut. Aurinkopaneelit ovat elektroniikkalaitteita ja niiden valmistajia sitoo kierrätysvastuu. Useamman materiaalin erottelu saman mekanismin avulla mahdollistaa pienemmän järjestelmän kehityksen.

Kehitetty konsepti ja siitä rakennettu prototyyppi testaavat paneelien karmien irrotuksen jälkeen tehtävää takakalvon ja EVA-kerrosten mekaanista erottelua. Tuloksina saatiin todistettua kehitetyn konseptin toimivuus sekä tietoa erotettujen materiaalien lujuusominaisuuksista ja näihin ominaisuuksiin perustuvan tiedon hyödyntämismahdollisuus vastaavanlaisissa prosesseissa.

Asiasanat:

Aurinkopaneeli, EVA, PET-Takakalvo, tyhjiöpöytä, mekanismi, kierrätys.

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2024 | 60 pages

Mikko Tuikkala

## Development of a recycling system of solar panels

- Prototype development and testing

The objective of this work was to develop a novel material separation mechanism for the recycling of decommissioned solar panels. After their lifespan, solar panels should be recycled. To enhance recycling efficiency, an advantage is gained by achieving a higher degree of material separation during the dismantling phase.

The basis for this work lies in the expanding solar panel industry and the increasing need for recycling, along with the employer's requirement for a smaller system than what has been available on the market during the development phase of the work. Solar panels are electronic devices, and their manufacturers are bound by recycling responsibility. Separating multiple materials using the same mechanism enables the development of a smaller system.

The developed concept and the prototype built from it tests the mechanical separation of the backsheet and EVA layers after the removal of panel frames. The results demonstrate the functionality of the developed concept and provide information on the strength properties of the separated materials and the possibility of utilizing this information in similar processes.

Keywords:

Solar panel, EVA, PET-backsheet, vacuum table, mechanism, recycling.

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet tai sanasto</b>	<b>7</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>8</b>
<b>2 Kierrätyksen tarpeellisuus</b>	<b>10</b>
2.1 Paneelin rakenne ja toiminta	11
2.2 Paneelin valmistus ja elinkaari	15
2.3 Kierrätettävät materiaalit	19
<b>3 Olemassa olevat järjestelmät</b>	<b>21</b>
3.1 Silppurijärjestelmä	21
3.2 Kaavintajärjestelmä	23
<b>4 Konsepti</b>	<b>25</b>
4.1 Suunnittelu	25
4.1.1 Lujuustesti	25
4.1.2 Mekanismi	34
4.2 Kokoaminen	36
4.2.1 Osat	36
4.2.2 Kiinnitys	38
<b>5 Testaus ja tulokset</b>	<b>48</b>
5.1 Ongelmat ja kehitysmahdollisuudet	48
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>57</b>
<b>Lähteet</b>	<b>59</b>

## Kuvat

Kuva 1. Piin douppaus fosforilla ja boorilla (Devxplained, 2023).	11
Kuva 2. Havainnekuva piikennon poikkileikkauksesta (Lynn, P. 2010).	12
Kuva 3. (a) Tyhjennysalueen muodostuminen ja (b) ulkoisen jännitteen vaikutus elektroneihin diodissa (Lynn, P. 2010).	13
Kuva 4. Sähkövirran synty auringonvalon vaikutuksesta tyhjennysalueen reunoilta.	14
Kuva 5. Paneelin leikkauskuva (Lynn, 2010, 157).	15
Kuva 6. Paneelin kerrokset. (Alejandromiranda, 2023)	17
Kuva 7. Paneelin kohdistuvia rasiustekijöitä. (M, Aghaei ym. 2022).	19
Kuva 8. Kaavintajärjestelmän periaate kuva (NPC Incorporated, 2023).	23
Kuva 9. Havainnekuva paneelin kuljetuksesta terälle.	24
Kuva 10. Ilman lämmitystä, 10 mm leveydelle suoritettava vetokoe.	26
Kuva 11. Testiliuskat 10-30 mm valmiina kokeen tekemiseen	27
Kuva 12. Testi lämmityksellä ja vakiovoimalla	29
Kuva 13. Sylintereiden ja niiden letkujen kiertymisen ehkäisemiseksi toteutetaan kiinnitys rengaslaakerin (1) upotetulla sovitteella (2).	34
Kuva 14. Alipainepöytä ja rullainmekanismin konseptikuva (ilman kelkkaa).	35
Kuva 15. Konseptikuva tyhjiöpöydästä ja rullaimesta reikärivin kohdalta.	39
Kuva 16. Terä kiinnitettynä kelkkaan ja tyhjiöpöytä.	41
Kuva 17. Kaavintatesti terällä kennojen alta takakalvon ollessa vielä paikallaan.	43
Kuva 18. Järjestelmä kaikkine osineen valmiina testeihin.	44
Kuva 19. Tarraimen sylinterit kiinni alumiiniprofiilissa.	44
Kuva 20. Servo/kuularuuvi yhdistelmän kiinnitys kelkkaan ja pöydän runkoon.	45
Kuva 21. Silikoninen vastusmatto takakalvon lämmitykseen ja sen kuljetin.	46
Kuva 22. Terän asemointi takakalvon irrotusta varten.	51
Kuva 23. Takakalvon leikkaus kylmänä kennojen päältä.	51
Kuva 24. Takakalvon ohjaus tarraimen leukojen väliin.	53

Kuva 25. Takakalvon irrotus Infrapunalamppun ja rullaimen kanssa. 54

## **Kuviot**

Kuvio 1. Materiaali jakauma massan ja arvon mukaisesti (Peplow, M.2022). 20

## **Taulukot**

Taulukko 1. Vetotesti tulokset ilman lämmitystä. 30

Taulukko 2. Vetotesti tulokset lämmityksen kanssa. 31

## Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Busbar	Kuparijohde sähkökuljetukseen paneelin reunoilla
EVA	Etyylivinyyliasetaatti
FLIR	Forward-looking infrared
FRELP	Full Recovery End of Life Photovoltaic
Minority Carriers	Piikidekennoon syntyviä satunnaisia varauksenkuljettajia
N-tyyppi	Puolijohde negatiivisella osittaisvarauksella
PET	Polyeteeni
P-tyyppi	Puolijohde positiivisella osittaisvarauksella
Ribbon	Kennojen välillä toimiva sähköjohde

# 1 Johdanto

Tämän työ käsittelee aurinkopaneelien kierrätystä. Työssä pyritään kehittämään uutta menetelmää aurinkopaneelin materiaalien erotteluun ja rakentamaan prototyyppi, jolla pystytään testaamaan kehitettyä konseptia.

Aihe työlle tuli aurinkopaneeleita valmistavalta yritykseltä SolarFinland Oy:lta joka on ainoa suomalainen Suomessa aurinkopaneeleita valmistava yritys. SolarFinland on valmistanut markkinoiden laadukkaimpia ja Suomenkin kovia olosuhteita kestäviä aurinkopaneeleita Salon toimipisteellä jo vuodesta 2015 saakka. Paneelit valmistetaan alan viimeisintä teknologiaa olevalla täysin automatisoidulla linjastolla.

Aurinkopaneelien kierrätyksen kannalta ongelmana on olemassa olevien järjestelmien suuri koko. Tavoitteena on mahdollisimman kompakti versio, jolla kuitenkin saadaan paneeli eroteltua mielellään 4 eri osaan, jotka ovat, karmit, takakalvo, lasi sekä EVA-kerrokset ja niiden väliin jäävät piikennot.

Käytössä olevat kierrätysjärjestelmät ovat raskaita linjastoja, missä paneeli joko jauhetaan ensin hienoksi ja jauheesta erotellaan erilaisin sähköisin ja mekaanisin menetelmin eri materiaaleja jatkoerottelua varten, tai vaihtoehtoisesti paneelista erotetaan lasi ja siihen laminoidut kalvot terän avulla yhtenä "kakkuna". Järjestelmien raskauden ja suuren koon vuoksi, pienempien, paneeleja valmistavien yritysten voi olla vaikea löytää sopivaa ratkaisua vanhojen paneelien kierrätykseen. Tästä syystä on alalla vielä kehitettävää varsinkin kierrätyspuolella. Myös paneelien valmistusmateriaaleissa on eroja. Laminointi vaiheessa paneeliin kiinnitettävän ja sen taustaa suojaava takakalvo saattaa sisältää haitallisia fluorideja ja sen kierrätyksessä on oltava tarkkana myrkyllisten yhdisteiden takia. Takakalvon erottelevaa kierrätysjärjestelmää ei myöskään ole tämän projektin aloitusvaiheessa vielä kehitetty markkinoille asti.

Takakalvon ja lasin erottelulla EVA-kerroksista ja niiden välissä olevista piikennoista saavutetaan mahdollisuus kemialliseen käsittelyyn, missä esim.



liuottamalla voidaan koittaa erottaa EVA erilleen kennoista, ja näin kerätä kierrätykseen vauriottomat kennot.

Työnaihe on viime vuosikymmenellä tullut yhä tärkeämmäksi lisääntyneen aurinkopaneeliteollisuuden myötä. Tieteellistä tutkimusta aiheesta on kuitenkin suhteellisen vähän, ja kehitetyt sekä käytössä olevat järjestelmät ovat osin toiminnaltaan erilaisia kuin tässä työssä kehitettävä konsepti. Aurinkopaneelien suunniteltu käyttöikä on noin 25-30 vuotta. Kun paneelit vanhenevat tai vaurioituvat ja ne poistetaan käytöstä, päätyvät ne kierrätykseen.

Työn tuloksista hyötyy ensisijaisena työn teettäjää, mutta myös toissijaisena teollisuus ja yhteiskunta yleisesti. Viemällä aurinkopaneelien kierrätystyön kehitystä eteenpäin hyötyy siitä sekä ympäristö että talous. Kierrätyksen edistäminen vähentää jätteen määrää ja luonnonvarojen kulutusta. Lisäksi se luo uusia työpaikkoja ja edistää kiertotaloutta, mikä tukee kestävästä kehitystä ja luo pitkäaikaista arvoa yhteiskunnalle.

## 2 Kierrätyksen tarpeellisuus

Aurinkopaneeliteollisuus on kasvanut viime vuosikymmenillä valtavasti ja tämän seurauksena maailmanlaajuisesti aurinkopaneeleja oli asennettu yli 971 gigawatin laajuisesti vuoden 2021 loppuun mennessä. Tähän lukuun sisältyy 788 gigawattia asennettua kapasiteettia vuoden 2020 loppuun mennessä ja lisäksi 183 gigawattia vuonna 2021. Arvioidaan, että vuoden 2050 loppuun mennessä yhteenlasketun maailmanlaajuisen aurinkopaneeleista syntyvän jätteen eli potentiaalinen kierrätykseen päätyvän massan saavuttavan noin 60-78 miljoonan tonnin suuruuden. Kun paneeleista syntyvän jätteen määrä kasvaa luo se ympäristöllisiä pullonkauloja, mutta myös uusia taloudellisia mahdollisuuksia (Divya, A. Ym. 2023).

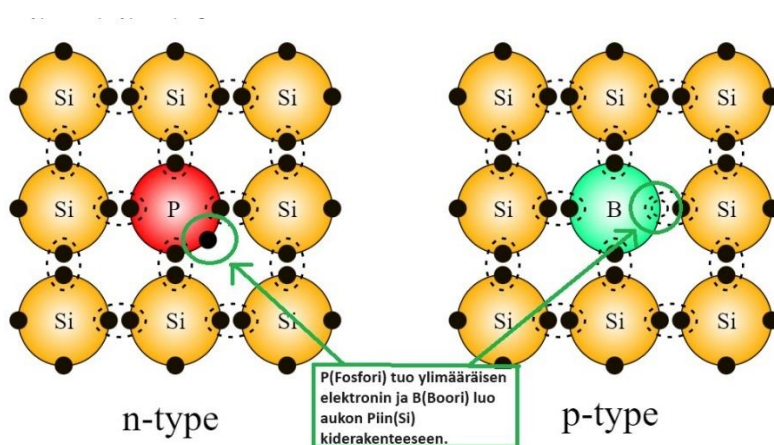
Paneeleiden kierrätystarpeen voidaan siis olettaa kasvavan samassa suhteessa, kun ensimmäiset paneelit saavuttavat käyttöikänsä päin. Kierrätyksessä saatavien materiaalien käyttö suunnataan ensisijaisesti takaisin aurinkopaneeliteollisuuteen, mutta raaka-aineita voidaan käyttää myös muuhun elektroniikkateollisuuteen. Ymmärtääkseen kierrätyksen tarpeellisuuden on hyvä ymmärtää paneelin toiminta ja sen sisältämien raaka-aineiden arvo.

Yritys jolle työ tehdään, pyrkii pääasiassa saamaan kierrätyspaneeleista lasit talteen uudelleenkäyttöä varten. Lasit vaativat uudelleenkarkaisun ennen niiden käyttöä sekä jos laseja halutaan leikata niiden karkaisu pitää päästää kuumennuksen avulla.

## 2.1 Paneelin rakenne ja toiminta

Aurinkopaneeli koostuu useasta eri materiaalista, mutta valoa sähköksi muuttava osa eli kenno on yleisimmin tehty piistä. Pii on puolijohde ja sen sähkönjohtokykyä parannetaan ns. douppauksella, eli lisäämällä siihen varausten kuljettamista helpottavia alkuaineita. Näin päästään jopa 3000 kertaa parempaan sähkönjohtokykyyn (Sullivan, 2013). Douppauksen eli seostamisen vaikutus piihin perustuu joko piin kiderakenteeseen lisättävän aineen tuomaan ylimääräiseen elektroniin tai lisättävän aineen luomaan aukkoon, kiderakenteessa olevien elektronien välisissä sidoksissa. Näin elektronit pääsevät liikkumaan piin ja seosaineen välillä, joko niiden paikallisen ylimäärän takia, tai ne voivat täyttää aukon ja liikkua koska niitä on vähemmän verrattuna puhtaan piin elektronien sidosrakenteeseen.

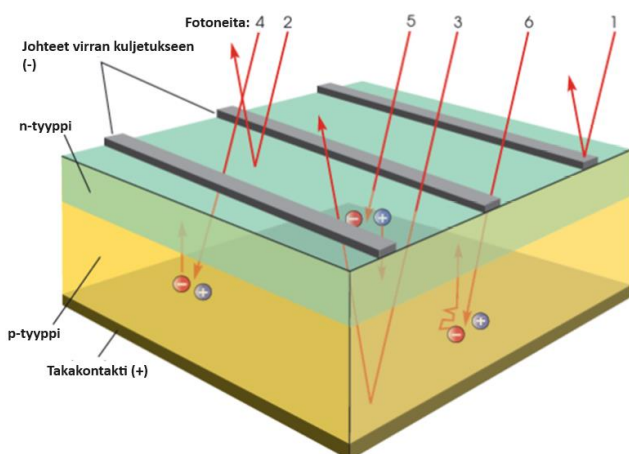
Yleisiä seostamiseen käytettäviä aineita on boori ja fosfori. Boorilla luodaan paikallisesti aukkoja rakenteeseen (p-tyyppi) ja fosforilla tuodaan ylimääräinen elektroni paikkoihin, mihin fosforiatomi asettuu kiderakenteeseen (n-tyyppi) (kuva 1).



Kuva 1. Piin douppaus fosforilla ja boorilla (Devxplained, 2023).

Auringon säteilemän valon, eli fotonien sisältämä energia, riittää irrottamaan elektroneja piistä ja tuottamaan sähkövirtaa, mutta vain ulkoiseen

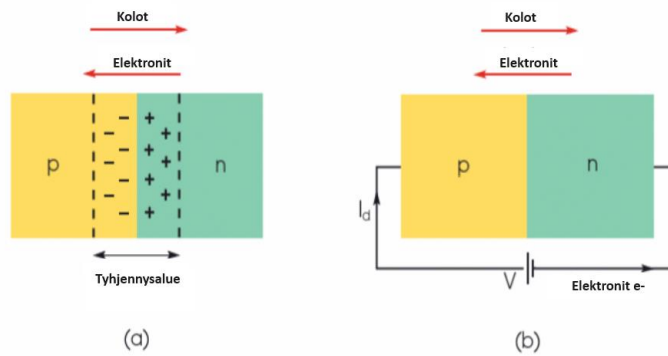
jännitelähteeseen kytkettynä. Tästä syystä aurinkopaneeleissa käytettävissä kennoissa käytetään molempia, n-tyyppin ja p-tyyppin puolijohteita ja näin pystytään hallitsemaan syntynyttä sähkövirtaa (Kuva 2).



Kuva 2. Havainnekuva piikennon poikkileikkauksesta (Lynn, P. 2010).

Käyttämällä molempia seostettuja muotoja piistä saadaan luotua anodin (+) ja katodin (-) välille alue mitä kutsutaan p-n liitokseksi. Liitoskohtaan syntyy sähkökenttä sekä potentiaalivalli, joka on seurausta n-tyyppin ylimääräisten elektronien siirtyessä liitoskohdan p-tyyppin aukkoihin. Alueelle syntyy positiivinen ja negatiivinen osittaisvaraus, jonka välille syntyvä sähkökenttä estää uusien varauksen kuljettajien liikkumisen. Tämä muuttaa piikennon diodiksi ja varmistaa sähkövirran kulkemisen vain yhteen suuntaan.

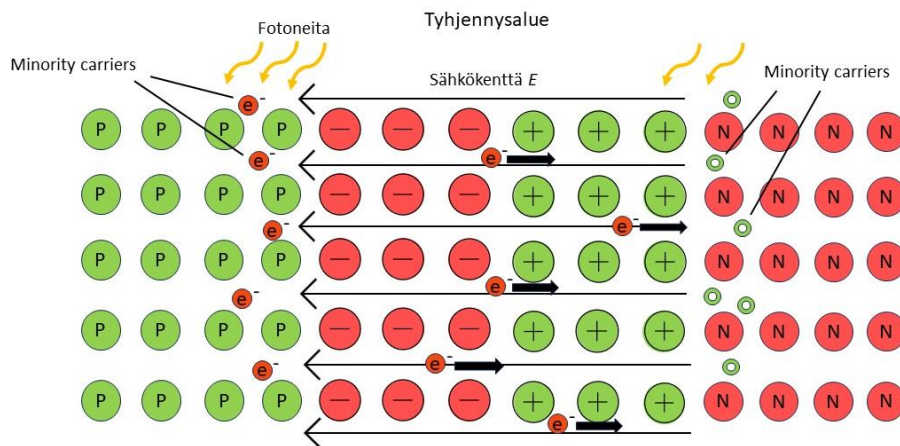
Aluetta, missä n-tyyppin elektronit yhdistyvät p-tyyppin aukkoihin kutsutaan tyhjennysalueeksi. Yhdistymisen vaikutuksesta n-tyyppin puoli tyhjennysalueesta saa positiivisen kokonaisvarauksen, kun taas p-tyyppin puoli negatiivisen kokonaisvarauksen (Kuva 3).



Kuva 3. (a) Tyhjennysalueen muodostuminen ja (b) ulkoisen jännitteen vaikutus elektroneihin diodissa (Lynn, P. 2010).

Tyhjennysalueen muodostuessa, syntyy lämpövaikutuksen seurauksena kuitenkin molemmiin puolin aluetta pienimäärä varauksen kuljettajia joita kutsutaan englanniksi *minority carriers*. Nämä koostuvat p-tyyppin puolella elektroneista ja n-tyyppin puolella aukoista. Nämä ns.vähemmistö varauksenkuljettajat mahdollistavat sähkövirran aurinkopaneelissa, mutta vasta auringonvalon lisätessä liikkuvien elektronien ja aukkojen määrää tyhjennysalueen molemmiin puolin (Kuva 4).

Tyhjennysalue syntyy, kun p-tyyppin aukot yhdistyvät n-tyyppin elektroneiden kanssa ja paljastavat ionirakenteen, minkä seurauksena syntyy voimakas sähkökenttä niiden välille. Voimakas sähkökenttä kiihdyttää satunnaiset varauksenkuljettajat (minority carriers) syöksymään alueen yli vastakkaisille puolille ja määrittävät sähkövirran suunnan (Kuva 4). Voidaan ajatella, että enemmistö varauksenkuljettajista eli kolot ja elektronit, jotka muodostavat tyhjennysalueen yhdistymällä, kokevat potentiaalivallin ylämäkenä, kun taas vähemmistö varauksenkuljettajat eli alueen molemmilla reunoilla olevat varauksenkuljettajat kokevat sähkökentän vaikutuksesta vallin alamäkenä (Lynn, P.s37. 2010).



Kuva 4. Sähkövirran synty auringonvalon vaikutuksesta tyhjennysalueen reunoilta.

Tyhjennysalueelle syntyvä sähkökenttä  $E$ , kohdistaa tekniikan kaavaston kaavan:

$$E = \frac{F}{q},$$

mukaan voiman elektroneihin, eli voiman suuruus on:

$$F = Eq$$

jossa

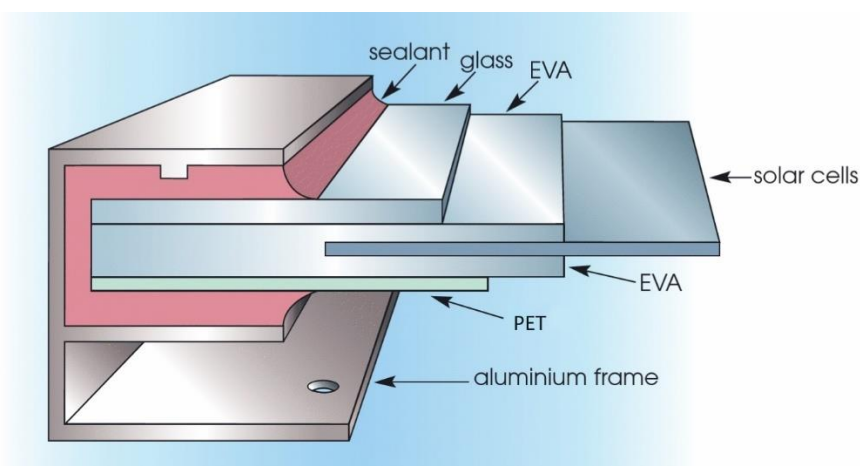
$q$  on elektronin varaus (C)

$E$  sähkökentän voimakkuus tyhjennysalueella (N/C).

Elektronit kulkevat siis sähkökentän suunnan vastaisesti kohti n-tyyppin puolijohdetta.

Muut osat paneelissa ovat, paneelin alumiiniset kehykset, kytkentärasia, karkaistu etulasi, PET(Polyeteeni) takakalvo, busbaarit, tiiviste/liimamassa, sekä piikentöjen kiinnitykseen käytettävät etyyliivinyyliasettaatti(EVA) kerrokset.

Kehykset toimivat tukirakenteena ja kiinnitystä helpottavana osana. Liimamassa kiinnittää ja tiivistää paneelin kehyksiin. Lasi toimii läpinäkyvänä suojana paneelin etupuolella. Takakalvo(PET) suojaa paneelia kosteudelta ja lialta. EVA-kerrokset muodostavat kennojen molemmin puolin, läpinäkyvän liiman tavoin toimivan kiinnityksen sekä lasiin (edessä), että takakalvoon (alapuolella) (Kuva 5). Busbaarit kuljettavat sähkövirtaa paneelissa ja kytkentärasia ohjaa sähkövirtaa paneelista.



Kuva 5. Paneelin leikkauskuva (Lynn, 2010, 157).

## 2.2 Paneelin valmistus ja elinkaari

Aurinkopaneelien tehokkain muoto on monokiteinen piikentö, joka valmistetaan puhtaasta piikiteestä. Tässä menetelmässä on lähtökohtana Czochralski-menetelmällä sulattamalla ja kiteyttämällä valmistettu piikristalli, joka on lähes 100 % puhdasta piitä. Vaikka menetelmä tuottaa laadukasta materiaalia, se on

hidas, runsaasti energiaa kuluttava ja altis epäpuhtauksille. Prosessissa syntyy puhdas piikideharkko, josta leikataan ohuita kennoissa käytettäviä siivuja. Koska leikkauksessa syntyy materiaalihäviöitä ja menetelmä on paljon energiaa kuluttava, menetelmän sijaan on tutkittu vaihtoehtoja, kuten ohuiden piilevyjen vetämistä.

Osa tutkituista menetelmistä on nykyisin käytössä aurinkopaneeliteollisuudessa. (Lynn, P, 29. 2010). Czochralski-menetelmässä syntyy puhdasta piitä, mutta seostamalla siihen booria tai fosforia ennen kiteyttämistä, saadaan syntyvään harkkoon parempi sähkönjohtavuus.

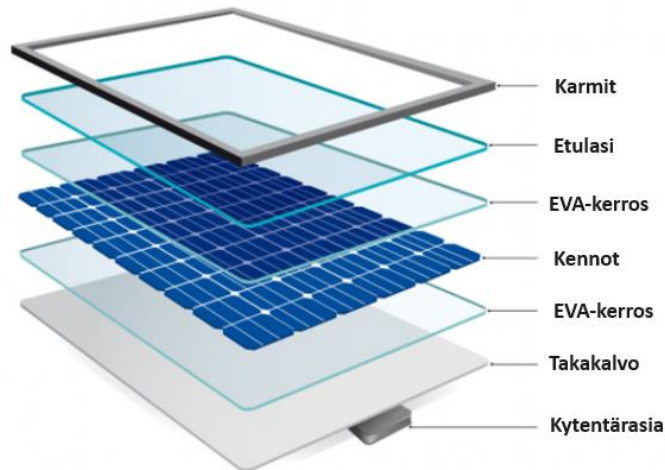
Kennojen valmistuksessa käytettävät piharkosta leikatut siivut toimivat piikennoina aurinkopaneelissa, mutta ennen niiden käyttöä pitää niihin lisätä sähkön johtamista ja kuljetusta varten johde verkosto. Johdeaineena käytetään ns. "Hopeapastaa". Hopealla peitetään mahdollisimman vähän kennon pinta-alaa, jotta sähköntuotto kennossa ei häiriintyisi. Hopean lisääminen tehdään tulostusmenetelmällä, jossa haluttu rakenne tuodaan kennolle sapluunan läpi painamalla (H.Fan, 2023).

Yleensä kennojen valmistaja ei itse käytä kennoja, vaan ne toimitetaan asiakkaille, jotka valmistavat niistä aurinkopaneeleja oman tehtaansa edellyttämällä menetelmillä. Ennen kennojen käyttöä paneelissa, valmiit kennot nidotaan yhteen johteilla niin, että sähkö kulkee kennojen välillä edellisen kennon pinnalta seuraavan kennon alle, eli kennot kytketään sarjaan.

Valmiit kennorivit asetetaan EVA-kerrosten väliin lasipinnalle ja niiden päälle asetetaan takakalvo laminointia varten. Ennen laminointia varmistetaan, että takakalvon ja EVA-kerrosten läpi tulee johde, sille leikatun aukon läpi. Tämän johteen kautta sähkö tuodaan paneelista käyttäjälle. Laminoinnissa EVA-kerrokset sulavat yhteen muodostaen yhtenäisen läpinäkyvän rakenteen takakalvon ja etulasin välille, rakenteessa kennot saavat sähköntuottamiseen tarvitsemansa auringon valon läpinäkyvän etulasin läpi ja takakalvo toimii suojana kosteutta ja ilman epäpuhtauksia vastaan (Kuva 6).



Lopuksi lasin reunoihin asennetaan karmit kiinnitystä varten ja kennon takapinnalle liimataan kytkentärasia takakalvon läpi tuleviin johteisiin, ja näin paneelin tuottama sähkövirta saadaan ohjattua paneelista ulos.



Kuva 6. Paneelin kerrokset. (Alejandromiranda, 2023)

Paneelien suunniteltu käyttöikä on noin 25-30 vuotta. Tämän jälkeen paneelin hyötysuhde on laskenut noin 80% alkuperäisestä ja paneeli yleensä luokitellaan käytöstä poistettavaksi.

Hyötysuhde kuvaa, kuinka paljon auringon säteilyenergiasta paneeli pystyy muuttamaan sähköksi.

Hyötysuhde lasketaan tekniikan kaavaston mukaisesti seuraavasti:

$$\eta = \frac{E_{anto}}{E_{otto}},$$

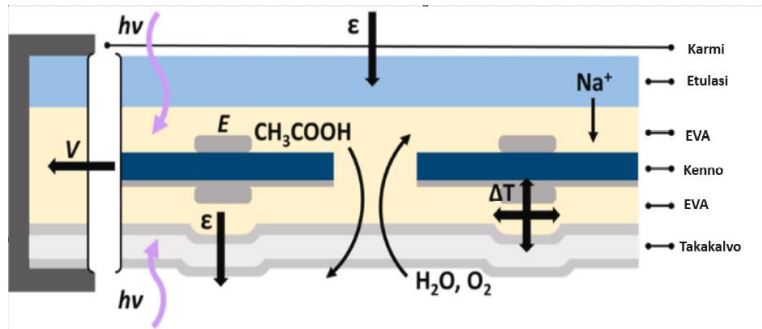
jossa

$E_{anto}$  on sähkön tuottamiseen kuluva energia (J)

$E_{otto}$  on auringon säteilystä otettu energia (J).

Hyötysuhteen pienenemisen syynä on useat seikat (Kuva 7), joista neljä yleisintä ovat (M, Aghaei ym. 2022):

1. *Säteily*: Pitkäaikainen altistuminen auringon säteilyn UV-alueelle aiheuttaa polymeerimateriaalien kuten EVA-kerrosten molekyylien hajoamista, mikä johtaa materiaalin haurastumiseen ja värinmuutoksiin. Tekijät kuten leveyspiiri, vuodenaika ja vuorokaudenaika vaikuttavat säteilyn spektrijakaumaan ja intensiteettiin.
2. *Lämpötila*: Lämpötilan vaihtelut vaikuttavat aurinkopaneelien sähköiseen suorituskykyyn, kiihdyttävät kemiallisia reaktioita ja aiheuttavat termomekaanisia rasituksia. Lämpölaajenemiskertoimen epäsuhdat voivat johtaa muodonmuutoksiin, delaminaatioon ja kennojen halkeiluun.
3. *Kosteus*: Kosteuden tunkeutuminen voi heikentää liimausliitoksia, aiheuttaen delaminaatiota ja metallielementtien korroosiota. Erilaiset kosteuden muodot, kuten vesihöyry, nestemäinen vesi ja jää, voivat aiheuttaa mekaanisia rasituksia, syövyttää materiaaleja ja vaikuttaa sähköiseen eristykseen.
4. *Mekaaninen kuormitus*: Valmistuksen, kuljetuksen, asennuksen, tuulen, rakeen ja lumen aiheuttamat mekaaniset rasitukset voivat johtaa kennojen halkeiluun, delaminaatioon ja kehikon vaurioitumiseen. Lumikuorma ja tuulen aiheuttamat värähtelyt aiheuttavat staattisia ja dynaamisia rasitustekijöitä



Kuva 7. Paneelin kohdistuvia rasiustekijöitä. (M, Aghaei ym. 2022).

Paneelin saavuttaessa suunnitellun käyttöikänsä se voidaan joko hävittää, kierrättää tai käyttää uudelleen. Uudelleen käytössä paneeli tulee testata sen kunnon ja suorituskyvyn varmistamiseksi, sekä antaa sille niitä vastaava luokitus ennen asiakkaalle uudelleen myymistä. Sekä uuden paneelin, että kierrätetyn ja uudelleen myyntiin laitettavan paneelin tulisi käydä läpi Standardin SFS-EN IEC 60904-1:2020, mukainen virta ja jänniteominaisuuksien mittaus ennen paneelin luokittelua ja myymistä eteenpäin.

Mittauksissa tarkistetaan paneelin oikeanlainen toiminta, vertaamalla sitä kalibroituun referenssipaneeliin ja mittausdata liitetään paneelin mukaan ennen sen myymistä (SFS Ry. 2020). Kierrätyksessä paneeli puretaan osiin ja osa materiaaleista murskataan ennen niiden erottelua.

### 2.3 Kierrätettävät materiaalit

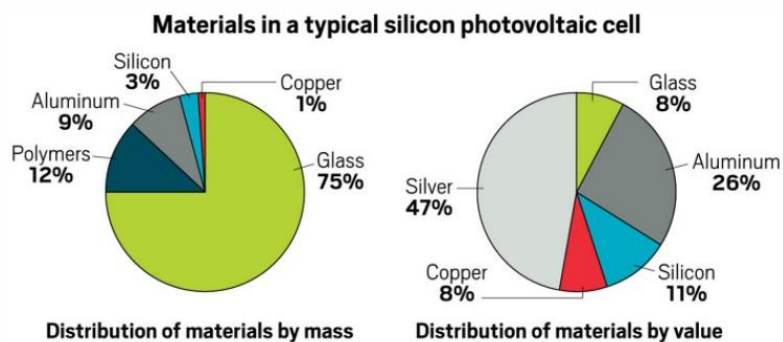
Materiaalien talteen ottaminen kierrätettävässä paneelissa on hankalaa, koska paneeleita ei ole suunniteltu purettaviksi osiin. Laminoituvaiheessa pyritään luomaan mahdollisimman tiivis ja kestävä rakenne minkä hajottaminen vaatii usein lämmitystä, kemiallista käsittelyä ja mekaanista rasiusta. Paneelien raaka-aineista puhdas Pii ja Hopea muodostavat 60% paneelin hinnasta (Crownhart, C. 2021). Muita arvokkaita raaka-aineita on kuparijohteet (busbaarit), joilla sähköä kuljetetaan paneelista.

Piikentöiden valmistus taas kuluttaa noin puolet koko paneelin valmistukseen kuluva energiasta ja sen talteen saamisesta olisi huomattava etu uuden valmistamisen sijaan (Peplow, M. 2022).

Vaikka piikentöt saataisiin talteen, ei niitä kuitenkaan voida sulattaa uudelleen käytettäväksi puhtaaksi piiksi niissä olevien seostusaineiden takia. Harva aurinkopaneeleita valmistava taho myöskään haluaa käyttää 25-30 vuotta vanhoja kennoja uusien paneelien valmistuksessa.

Epäpuhtaudet on saatava eroteltua piistä ennen sen uudelleen käyttöä. Metallurginen pii, jonka puhtaus on noin 99 %, maksaa suunnilleen 4 dollaria kilogrammalta. Mutta aurinkopaneelien käyttöluokituksella oleva pii vaatii vähintään 99.9999 % puhtauden ja maksaa vähintään kahdeksan kertaa enemmän eli yli 30 dollaria kilolta (Peplow, M. 2022).

Paneelista saatavia kierrätettäviä materiaaleja ovat mm. hopea, pii, kupari, alumiini ja lasi (Kuvio 1) Karkaistulasi ja alumiinikehykset ovat helpommin kierrätettävissä, mutta vaikka lasista saataisiin eroteltua EVA ja PET takakalvon välissä oleva materiaali, vaatii sen uudelleen käyttö, uudelleen karkaisun ja mahdollisten epäpuhtauksien poistamisen, esim. polttamalla korkeassa lämpötilassa.



Kuvio 1. Materiaali jakauma massan ja arvon mukaisesti (Peplow, M.2022).

### 3 Olemassa olevat järjestelmät

Aurinkopaneelien kierrätyksessä on käytössä useita erilaisia järjestelmiä, jotka toimivat lasin ja polymeerikerrosten sekä niiden välissä olevien piikkenojen erottelun osalta eri tavoin.

Järjestelmästä riippumatta ensimmäinen askel kierrätyksessä on aina karmien ja kytkentärasian irrotus paneelista. Irrotus tehdään mekaanisesti, tyypillisesti kehykset poistetaan sylintereistä tehdyllä vetimillä ja kytkentärasia terän avulla. Seuraavat vaiheet riippuvat kierrätysjärjestelmän tyypistä ja sen suunnitellusta toiminnasta. Järjestelmiä voidaan jakaa jatkotoiminnan perusteella, esimerkiksi murskausjärjestelmiin, silppurijärjestelmiin sekä kaavintajärjestelmiin. Kukin järjestelmä toimii nimensä mukaisesti. Murskausjärjestelmä on yksinkertaisin malli, missä paneeli kulkee karmien ja kytkentärasian irrotuksen jälkeen erilaisten murskainten läpi ja jauhaa paneelin murskeeksi, jota voidaan jatko-käsitellä sähköisesti tai kemiallisesti.

Pitemmälle kehitettyjen mallien, kuten kaavintajärjestelmien avulla saavutetaan suurempi materiaalien erotteluaste ennen jatkokäsittelyä. Mikään olemassa oleva järjestelmä ei kuitenkaan tee sekä murskausta, että kemiallista käsittelyä esim. polymeerien erotteluun piikkenoista. Kemiallisen käsittelyn vaativuuden ja turvallisuussyiden takia se tehdään siihen erikoistuneissa yrityksissä tai kierrätyskeskuksissa.

#### 3.1 Silppurijärjestelmä

EU:n rahoittamana Italialainen yritys (*SASIL S.p.A*), kehittää FREL<sub>P</sub>-projektia - *Full Recovery End of Life Photovoltaic* - osana Euroopan "LIFE"-ohjelmaa. FREL<sub>P</sub>-projekti keskittyy prosessin kehittämiseen, joka perustuu mekaanisiin ja kemiallisiin käsittelyihin kierrättääkseen ja talteen ottaakseen jätte-aurinkopaneeleita.

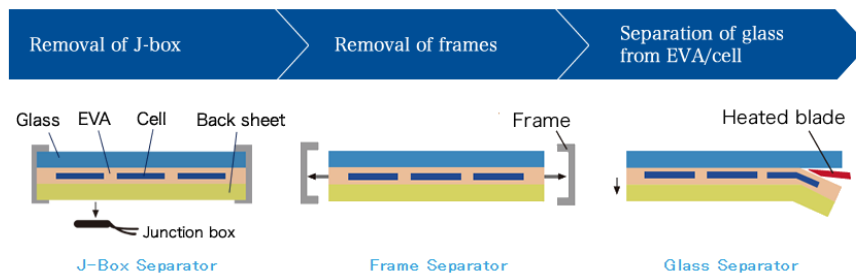
FRELP-käsittelyn ansiosta, yhdestä tonnista aurinkopaneelijätettä voidaan erottaa useita materiaaleja, mukaan lukien: lasi (98 %), alumiini (99 %), pii (95 %), kupari (99 %) ja hopea (94 %), yhteensä 908 kg. Joitain näistä materiaaleista (esim. pii, antimoni, kromi ja fluoriitti) pidetään kriittisinä raaka-aineina Euroopan talousalueella, koska ne ovat taloudellisesti merkittäviä ja niille on luokiteltu korkea toimitusriski (Latunussa, C. Ym. 2016).

Aurinkopaneelijätteet kuljetetaan käsittelylaitokseen ja siellä niistä poistetaan aluksi mekaanisesti alumiinikehykset ja kytkentärasiat. Paneeli ilman kehystä ja kytkentärasiaa viedään korkeassa lämpötilassa tapahtuvaan prosessiin, joka erottaa lasin aurinkopaneelin EVA-PET kerroksista. Puhdas lasi saadaan talteen optisella erotteluprosessilla. Jäljelle jäänyt EVA-PET kerroksista ja niiden välissä olevista Pii kennoista muodostuva ”kakku” leikataan 2 x 3 cm:n paloiksi ennen sen lähettämistä poltettavaksi. Silppuamisen jälkeen kakusta leikattujen palojen on määrä päätyä valtuutettuun polttolaitokseen, jossa polymeeriosa poltetaan ja palamisesta syntyvä energia otetaan talteen. Jäljelle jäävä tuhka menee seulontaprosessiin alumiiniseoksen erottamiseksi tuhkasta. Tuhka, joka sisältää Piitä ja muita metalleja, käsitellään edelleen happoliuotusprosessissa.

Happoliuotusprosessissa vesi- ja happoliuos liuottavat metallit tuottaen metallioksidea, kun taas pii jää jäännöstuotteeksi. Liuotetut metallioksidit ja piin sisältävä nestemäinen liuos siirretään tyhjiösuodatusprosessiin, jossa pii palautetaan metallurgiseen asteeseen ja osa happoliuoksesta kierrätetään. Tämän jälkeen happoliuotuksen jäännökset käsitellään elektrolyysillä hopean ja kuparin talteenottoa varten. Prosessin viimeinen osa koostuu happoliuosta sisältävien metallijäämien neutraloinnista lisäämällä kalsiumhydroksidia. Tämän prosessin tuotos suodatetaan suodatinpuristimella, joka erottaa nestemäisen jätteen kierrättämättömistä metalleista ja jäännöskalsiumhydroksidia sisältävästä lietteestä. Nämä lopulliset jätteet kuljetetaan kaatopaikalle. Talteen otettujen materiaalien on tarkoitus korvata uusien materiaalien käyttö paneelien tuotannossa (Latunussa, C. Ym. 2016).

### 3.2 Kaavintajärjestelmä

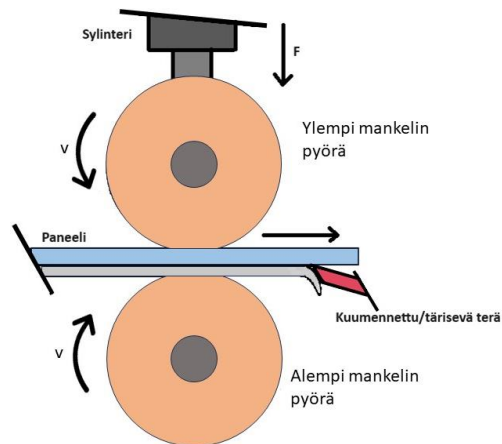
Korealainen yritys NPC Incorporated käyttää kaavintajärjestelmää lasin erotteluun EVA-PET kerroksista. Kaavinta tehdään kuumennetun terän avulla ja paneeli syötetään terälle lasi puoli ylöspäin ja irtoava ”kakku” putoaa terältä alaspäin (Kuva 8). Tässä menetelmässä 300 °C lämmitetty terä sulattaa EVA-kerroksen erottaakseen lasin muista materiaaleista. Menetelmää pidetään tehokkaana ja taloudellisena sen kaikki vaiheet on automatisoitu (NPC Incorporated. 2023)



Kuva 8. Kaavintajärjestelmän periaate kuva (NPC Incorporated, 2023).

Lasin ja EVA-PET kerrosten erottelun jälkeen pitää eroteltu kakku silputa tai murskata, ja murske toimitetaan kemialliseen erotteluun, minkä tyypillisesti tekee siihen erikoistunut yritys tai kierrätyslaitos.

Italialainen kierrätysyritys, Tialpi, käyttää kaavintajärjestelmissä myös infrapuna lämmitystä ja värähtelevää terää jonka värähtely toteutetaan yleensä ultraäänen avulla (Peplow, M. 2022). Lasi kuljetetaan terälle oikeassa kulmassa mankelien välissä. Kun paneeli kulkee terää pitkin, tukevat sylinterit sitä mankelin rullien välityksellä. (Kuva 9)



Kuva 9. Havainnekuva paneelin kuljetuksesta terälle.

Irronnut kakku kerätään talteen manuaalisesti, ja yritys joko murskaa sen itse tai toimittaa kierrätyskeskuksille, jotka hoitavat jatkokäsittelyn raaka-aineiden talteenottoa varten.

Tämän tyyppinen järjestelmä koostuu useasta eri automatisoidusta solusta, joista kukin on erikoistunut tiettyyn työvaiheeseen. Ensimmäinen solu irrottaa karmit ja joissakin tapauksissa myös kytkentärasian mekaanisesti. Vähemmän kehittyissä malleissa kytkentärasia irrotetaan erillisessä solussa. Seuraavalle solulle paneeli kulkee kuljettimen välityksellä ja siinä suoritetaan kaavinta terän avulla. Kaavinnan jälkeen karkaistulasi viedään jatkokäsittelyyn mikä tapahtuu erillisillä laitteilla ja yleensä myös eri yrityksen toimesta.



## 4 Konsepti

Tavoitteena on saada kehitettyä uudenlainen materiaalien erottelumekanismi, mutta myös mahdollisimman kompakti kierrätysjärjestelmä, joka olisi sovitettavissa tehtaisiin, joissa tilaa on rajallisesti ja joihin jo olemassa olevat järjestelmät eivät mahdu. Nämä seikat huomioiden sekä lujuuksitestien tulokset, päädyttiin kehittämään irrotusmenetelmää, missä takakalvon irrotus toteutetaan terän ja sylintereistä rakennetun tarrain-rullain yhdistelmän avulla. Rullaimen käytön etuna on takakalvon irrotuksen lisäksi myös irrotustyön tekemiseen vaadittavan tilan pysyminen paneelin omien mittojen mukaisena.

Rullaimen lisäksi, on samalla konseptilla mahdollista kokeilla takakalvon leikkausta terällä. Tässä metodissa ennen EVA-kerrosten kaavintaa pyritään takakalvosta leikkaamaan samalla menetelmällä mahdollisimman paljon materiaalia.

Suunnitteluvaiheessa pyritään laskemalla arvioimaan tarvittavia ominaisuuksia mahdollisuuksien mukaan. Rakenteiden mallinnusta tehdään SolidWorks-ohjelmalla rakentamisen ohessa. Työn luonteen vuoksi voidaan olettaa, että suunnittelussa joudutaan muuttamaan kokeilun tulosten perusteella rakenteita työn edetessä, joten tarkan ja kokonaisvaltaisen 3D-mallin piirtäminen ei ole kannattavaa ennen kuin konsepti on testattu ja todettu toimivaksi.

### 4.1 Suunnittelu

#### 4.1.1 Lujuuks testi

Paneelien takakalvon irrottamista varten on hyödyllistä tietää sen ja EVA-kerrosten välille laminoinnissa syntyvän liitoksen lujuus. Vaikka paneeleita on valmistettu jo pitkään, on niistä vaikea löytää luotettavaa tietoa takakalvon ja EVA:n välisen liitoksen lujuuksista. Tiedon puuttumisen lisäksi, sen pitäisi olla testattu samojen valmistajien materiaaleista sekä liitoksen tehty samoilla laminointimenetelmillä antaakseen käyttökelpoista tietoa.

Lujuuden testaamista varten suoritettiin vetokoe. Vetokoe valmisteltiin kolmessa vaiheessa. Ensimmäisenä satunnaisesti valitussa paneelissa, mutta kuitenkin edellytyksenä, että laminointi on suoritettu onnistuneesti, irrotettiin tarkasti mitoitetulta matkalta takakalvoa, voima-anturin kiinnitystä varten. Seuraavaksi anturi kiinnitettiin ruuveilla kiristettävällä laipalla takakalvon irrotettuun osaan ja anturiin kiinnitettiin lähes kitkattomien väkipyörien (rengaslaakereiden) kautta kulkeva hihna (Kuva 10). Kolmannessa vaiheessa narun toiseen päähän lisättiin portaittain painoa, jonka seurauksena takakalvoon kohdistui kasvava vetovoima.

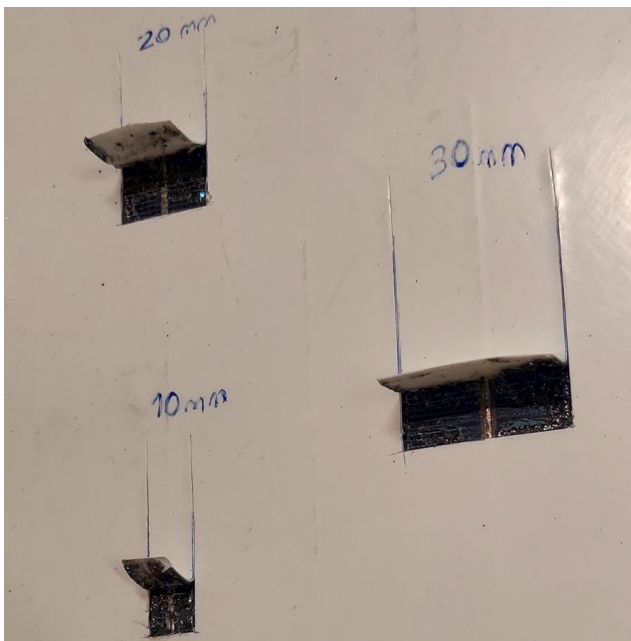


Kuva 10. Ilman lämmitystä, 10 mm leveydelle suoritettava vetokoe.

Voiman suuruutta seurattiin koko kokeen ajan. Takakalvon repeytyessä saatiin selville noin 5 % tarkkuudella sen ja EVA:n välisen liitoksen lujuus. Mittaus- tulosten varmistamiseksi voima-anturin tarkkuutta selvitettiin terästangon avulla. Tangon tarkkojen mittojen ottamisen jälkeen laskettiin sen tilavuus ja teräksen tiheyden avulla sen paino, kaavaa:

$$m = \rho V,$$

käyttäen. Voima-anturin tarkkuutta testattiin jakamalla terästangon riiputtamisessa syntyvä vetovoima maan gravitaatio kiihtyvyyden arvolla (n.  $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ja vertaamalla saatua tulosta tangon massaan. Tulokset osoittivat anturin olevan kalibroitu ja riittävän tarkka testeihin. Testin tarkkuutta arvioitaessa on hyvä ottaa huomioon, että rakennettaessa irrotusmekanismia takakalvolle ei muutaman ( $\pm 5$ ) Newtonin epävarmuus tuloksissa ole kovin merkityksellinen, koska rakenteiden lujuudet tulisi mitoittaa paljon sen ylitse. Testin tekovaiheessa SolarFinlandin tuotannossa valmistettavien paneelien leveys ilman karmeja on 986 mm ja koko leveydeltä kerralla suoritettava vetotesti on mahdoton toteuttaa testin tekemisessä käytettävissä olevilla laitteilla. Tämän vuoksi koe suoritettiin 3 eri leveydelle (Kuva 11). Leveyden vaihtelua kasvatettiin edellisen kertaluokkana. Leveydet olivat 10 mm, 20 mm ja 30 mm.



Kuva 11. Testiliuskat 10-30 mm valmiina kokeen tekemiseen

Näin pystyttiin selvittämään, kasvaako irrotukseen tarvittava voima lineaarisesti, ja jos se kasvaa, niin voidaan arvioida melko tarkasti koko takakalvon leveydelle

sen irrottamiseen tarvittava kokonaisvoima. Selvitettyä voimaa yhtä senttimetriä kohden (N/cm) voidaan käyttää myös muissa paneelien leveyksissä, jos raaka-aineet ja kenno-layout pysyvät samoina.

Testejä tehdessä huomattiin, että vaikka takakalvo on kiinni EVA kerroksissa ei liitos kuitenkaan pettänyt PET- ja EVA- kerrosten välillä vaan EVA:n ja kennojen väliltä. Heikoin kohta liitoksessa, ilman lämmitystä, on siis kennojen hauras rakenne, jonka murtuminen johtaa takakalvon, siinä kiinni olevan EVA:n ja osittain myös kennojen irtoamiseen paneelista. Testeissä huomattiin myös, että ribbonien kohdalla irtoaminen tapahtui pienimmällä voimalla, kennojen päällä tarvittava voima oli huomattavasti suurempi ja kohdissa, missä oli kennojen väli, oli tarvittava voima suurimmillaan. Koko takakalvon irrottamiseen tarvittavaa kokonaisvoimaa arvioitaessa on otettava huomioon, kuinka paljon prosentteina vaikuttaa ribbonien ja kennovälien kohdalla tarvittavat voimat suhteutettuna koko paneelin leveyteen.

Testit suoritettiin jokaiselle leveydelle kolme kertaa satunnaisesti valitusta paneelista. Toisessa testissä, jossa koejärjestelyt olivat muuten samantyyppiset, mutta takakalvoa lämmitettiin kuumailmapuhaltimella ja lämmityksen vaikutusta tarvittavaan voimaan suuruuteen pystyttiin arvioimaan seuraamalla lämpötilaa FLIR-kameran avulla (Kuva 12). Ennen lämmitystestiä haettiin kokeilemalla suurpiirteiset arvot, millä lämpötilalla takakalvo irtoaa niin, että tarvittava voima olisi mahdollisimman pieni ja takakalvoon ei tulisi muodonmuutoksia vedon vaikutuksesta. Lämmitysvetotestissä käytettiin vakiovoimaa ja muutettiin lämpötilaa, koska kahden muuttujan seuraaminen näillä koejärjestelyillä olisi tuonut tuloksiin liikaa epävarmuutta. Tulokset taulukoitiin ja niiden perusteella arvioitiin tyhjiöpöydän käytettävyyttä osana konseptia.



Kuva 12. Testi lämmityksellä ja vakiovoimalla

Tuloksina saatiin siis yhteensä 18 arvoa voimille, joista puolet (9) oli ilman lämmitystä mitattuja voimia, jotka testattiin valitsemalla yllä mainitut kolme erilaista kohtaa paneelista. Loput 9 arvoa saatiin testaamalla lämmityksen vaikutusta irtoamiseen. Näiden keskiarvoja käytetään pohjana järjestelmän suunnittelussa (Taulukko 1).

Ilman lämmitystä saaduissa tuloksissa jouduttiin arvioimaan painotetun keskiarvon avulla koko paneelin leveydeltä liitoksen lujuutta. Paneeli jaettiin laskua varten samanlaisiin osiin, missä yksi osa toimii mittayksikkönä, joka sisältää yhden kennovalin leveyden edellisen kennon puolestavälistä seuraavan kennon puoleen väliin. Näin huomioidaan kennojen, niiden välien, sekä ribbonien vaikutukset liitos lujuuteen. Painokertoimet määritettiin niiden prosentteina viemän pituuden mukaan yhdessä yksikössä. Kennojen välileveys vaihtelee noin 3-5 mm välillä ja laskussa käytettiin leveytenä 4 mm. On hyvä huomioida, että kennojen kulmien viisteiden takia syntyy neljän kennon risteyskohtiin alue, missä liitoslujuus on suurimmillaan, mutta sen vaikutusta koko takakalvon irrottamiseen ilman lämmön lisäystä, ei ole laskuissa otettu huomioon.

Mittauksissa käytetyn kennoleveyden ollessa n.164 mm ja yhteen mitattavaan osaan mahtuu 6 kappaletta n.0,9 mm ribbonia, yksi 4 mm kennoväli, ja kennoa:  $164 \text{ mm} - 4 \text{ mm} - (6 \times 0,9 \text{ mm}) = 154,6 \text{ mm}$ . Näiden mittojen suhteista saadaan painokertoimet.

Yhden yksikön (164 mm) leveydestä ovat siis:

- Kennot 94,3 %

- Ribbonit 3,3 %

- Kennoväli 2,4 %

Näillä kertoimilla lasketusta painotetustakeskiarvosta 10-30 mm vetotestien tuloksille huomattiin, että leveämmällä alueella kennovälien ja ribbonien merkitys on pieni ja tarvittava voima kasvaa lineaarisesti.

Taulukko 1. Vetotesti tulokset ilman lämmitystä.

Vetotesti ilman lämpöä					
Leveys	Kenno	Ribboni	Kenn.Väli	Keskiarvo	Painot.KA
10 mm	71,8	53,4	204,6	109,9	74,38
20 mm	146	112,9	263,6	174,2	147,7301
30 mm	223,8	172,4	310	235,4	224,1726

Kenno= Kennon päällä tarvittu voima annetulla leveydellä					
Ribboni= Ribbonin kohdalla tarvittu voima annetulla leveydellä					
Kenn.Väli= Kennojen välissä tarvittu voima annetulla leveydellä					
Keskiarvo= Tietyn leveyden kaikkien alueiden keskiarvo					
Painot.KA= Painotettu keskiarvo huomioiden eri alueiden suhteellisen osuuden paneelin leveydestä					

Painotetun keskiarvon ollessa 10 mm testeille: 74,38 N, voidaan approksimoida valmistuksessa olevan paneelin leveydelle, kalvon irrottamiseen tarvittavan voiman suuruudeksi noin:

$$986 \text{ mm} / 10 \text{ mm} = 98,6$$

$$98,6 \times 74,38 \text{ N} \approx 7334 \text{ Newtonia}$$

Kalvoa irrottaessa on siis lämmityksen tuoma apu ehdoton. Lämmitys vetotesteissä huomattiin, että liitos irtoaa takakalvon ja EVA:n väliltä, kun taas

ilman lämmitystä tehdyissä kokeissa kennojen hauraus aiheutti liitoksen hajoamisen EVA:n ollessa huoneenlämpöinen. Tämän seurauksena on tarvittava voima tarkastelualueella ja lämmittäessä, koko paneelin alueella likimain sama. Testit suoritettiin 10 mm koe liuskalle 20 N voimalla, 20 mm liuskalle 40 Newtonin voimalla ja 30 mm liuskalle 60 Newtonin voimalla. Eli voiman suhde testialueeseen pidettiin samana ja kokeessa tarkasteltiin, onko eri alueilla eroa (Ribbon, Kennoväli yms.) lämpöä lisättäessä (Taulukko 2). Tuloksista nähdään, että takakalvon irrotessa lämmön vaikutuksesta suoraan EVA kerroksesta ei testialueella ole vaikutusta tarvittavan voiman suuruuteen. Testeissä tarkasteltiin myös, millä lämpötilalla kalvo irtoaa nopeasti mahdollistaen tehokkaan kierrätysprosessin. Lämmön seuranta FLIR-kameran avulla ja kalvon nopea jäähtyminen aiheuttaa epätarkkuutta (n.  $\pm 5$  °C) saatuihin tuloksiin.

Taulukko 2. Vetotesti tulokset lämmityksen kanssa.

Vetotesti lämmön kanssa (PET irtoaminen)				
Leveys/N	Kenno °C	Ribboni °C	Kenn.Väli °C	Keskiarvo
10mm/20N	74,6	73,1	78	75,2
20mm/40N	70,3	74,1	78,3	74,2
30mm/60N	67,8	74,3	76,7	72,9
Vetotesti lämmön kanssa (PET nopea irtoaminen)				
Leveys/N	Kenno °C	Ribboni °C	Kenn.Väli °C	Keskiarvo
10mm/20N	107,2	102	105	104,7
20mm/40N	108	107	110,2	108,4
30mm/60N	115,3	112,3	117,1	114,9

Tuloksien perusteella saadaan nopea irrottaminen toteutumaan yli sadan celciusasteen lämpötilassa 20 Newtonin voiman kohdistuessa 1 cm alueelle. Paneelin leveyden ollessa 98,6 cm tarvitaan n. 100 celciusasteessa,

$$20 \text{ N} \times 98,6 = 1972 \text{ N}$$

voima takakalvon nopeaan irrotukseen.

Takakalvon irrottamisen näyttäessä mahdolliselta testitulosten perusteella, voidaan irrotuksen toteuttamiseksi arvioida paneelin kiinni pitämiseen tarvittavia voimia. Kalvon irrottamista varten on helpointa, jos paneeli on kalvo ylöspäin ja sen paikallaan pitämiseen voidaan tuoda yläpuolelta fyysistä tukea, mutta se hankaloittaa irrotusmekanismin työskentelyä. Tyhjiöpöydällä paneelin saadaan kohdistettua paine-eron suuruinen voima, joka kasvaa pöydän reikien pinta-alan mukaan.

Kaavalla:

$$F = PA,$$

arvioitiin halkaisijaltaan  $d=8$  mm olevan reiän (alumiinilevyssä valmiina olevien reikien halkaisija) kohdistavan paneeliin noin 5 Newtonin voiman, olettaen, että pöytään saadaan muodostettua täydellinen tyhjiö, pumpun avulla. Näin paine-eroksi tulisi ilmanpaine 101325 Pascalia. Eli voima syntyisi reiän pinta-alan mukaisesti seuraavasti:

$$A = \pi r^2 \text{ ja } F = P \times \pi \times r^2 = 101325 \text{ Pa} \times \pi \times (0,004\text{m})^2 \approx 5 \text{ N}.$$

Kun paneeli on tyhjiöpöydällä, kohdistuu koko paneeliin, sen alle jäävien aukkojen alla olevan paine-eron vaikutuksesta voima ja voiman vaikutus kohdistuu pääasiassa suoraan reiän alueelle. Materiaalin, tässä tapauksessa lasin, jäykkyysominaisuudet vaikuttavat myös siihen, miten voima vaikuttaa aukoista etäännyttäessä.



Paneelin paikallaan pitämiseen vedon aikana, on sen etu- ja takareuna kriittisimmät alueet, koska tyhjiöpöydästä saatava pitovoima on vain paneelin sisäosista levittäytyvä eli reunalla vain toiselta puolelta.

Pöytä rakennetaan käytöstä poistetuista alumiinilevyistä ja noudattaen 2 tuuman sääntöä (reikien min. etäisyys paneelin reunasta) voidaan alueelle porata 34 reikää, joiden halkaisija on  $d=12$  mm eli pinta-alaltaan n.  $1,1 \text{ cm}^2$ . Yksi reikä kohdistaa n. 10 N voiman paneeliin, joten reunalle syntyisi  $34 \times 10 \text{ N} = 340$  Newtonin kokonaisvoima. Todellisuudessa paneelin alle jäävistä sisemmistä reikäriveistä leviävä voima vaikuttaa myös reunalle. Testeissä kokeiltiin, onko takakalvon irtoaminen mahdollista saavuttaa lämmittämällä tällä voimalla. Saatu voima jaettuna paneelin leveydellä  $340\text{N}/98,6 \text{ cm}$  saadaan pitäväksi voimaksi n.  $3,4 \text{ N/cm}$ .

Koejärjestelyissä takakalvoon kohdistettiin  $3,4 \text{ N}$  voima  $1 \text{ cm}$  leveydelle (yhden reikärivin pito) ja kokeiltiin, lähteekö kalvo irti ennen  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilaa (Muodonmuutos). Kalvo irtosi tällä voimalla noin  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  asteen lämpötilassa, mutta irtoaminen tapahtui hitaasti. Lämpötilaa nostettiin  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  ja kalvon annettiin jäähtyä  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  kokeillen  $10$  asteen välein kalvon irtoamista. Kalvo irtosi n.  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  asti käsin vetämällä tarvittavan voiman kasvaessa suhteessa jäähtymiseen.

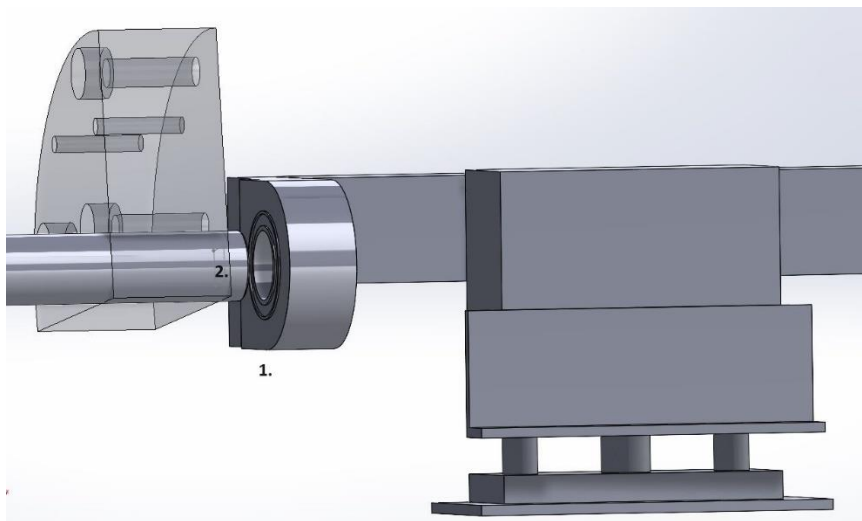
Lopuksi kokeiltiin lämmittää kalvo  $100$  celciusasteeseen ja nostaa portaittain voimaa, kunnes kalvo irtaa nopeasti sekä, missä lämpötilassa kalvoon tulee pysyviä muodonmuutoksia kohtalaisen voiman vaikutuksesta (n.  $10 \text{ N/cm}$ ).

Tulokset:

- Kalvo irtaa  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  noin  $40$  Newtonin voimalla ja  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  noin  $30$  Newtonin voimalla ( $\pm 5\text{N}$ ).
- Pysyvä muodonmuutos n.  $10 \text{ N/cm}$  newtonin voimalla noin  $190 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

#### 4.1.2 Mekanismi

Mekanismi koostuu erillisistä kokonaisuuksista. Kaikki osat liikkuvat samassa rakenteessa lineaarisesti sekä sylintereiden avulla terä ja tarraimen leuat myös vertikaalisesti. Mekanismin toiminta vaatii suurta tarkkuutta terältä ja käytettävissä olevilta komponenteilta. Sylintereiden ja niiden kiinnityksenä olevan alumiiniprofiilin liike on mahdollista vain lineaarisesti pneumaattisten letkujen kiertymisen estämiseksi (Kuva 13). Lämmitys on edellytys, jotta irrotus onnistuisi kuorimisella.

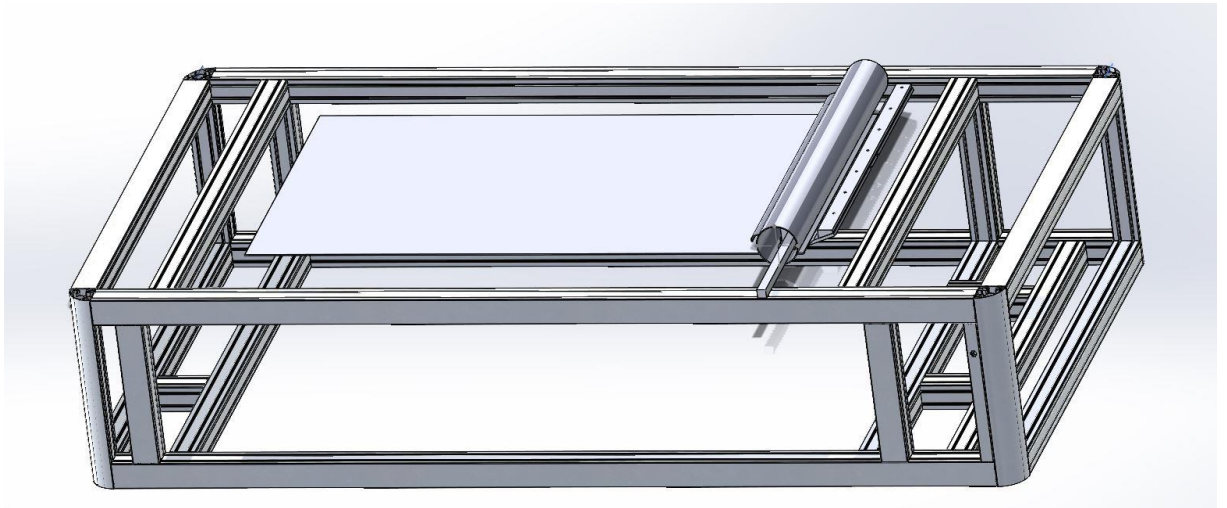


Kuva 13. Sylintereiden ja niiden letkujen kiertymisen ehkäisemiseksi toteutetaan kiinnitys rengaslaakerin (1) upotetulla sovitteella (2).

Rakennetta, johon kaikki mekanismin osat tulevat kiinni kutsutaan kelkaksi. Sitä liikutetaan kahden servomootorilla ajettavan kuularuuvien avulla. Kelkka kulkee tyhjiöpöydän reunoilla kiinni olevissa lineaarijohteissa niiden mukaisesti. Liikkeeseen tarvittava voima siirretään servoista kuularuuveilla kelkan rakenteisiin.

EVA-kerrosten kaavinnassa voidaan terän taakse sijoittaa kouru tai vastaava osa, johon leikkaantuvat kerrokset ohjautuvat kaavinnan aikana. Kourun tyhjennys voidaan suorittaa sylinterikipillä tai sylinterin avulla kourun päästä

työnnettävällä männällä. Rullaimessa olevan reiän kohdistus sylintereiden leukojen kanssa voidaan tehdä esim. optisella anturilla. Anturin asennuksella leukojen reunan kanssa samaan tasoon, voidaan etäisyyden perusteella (rullaimen sisäpinta) tunnistaa reikä ja pysäyttää rullain oikeaan kohtaan. Anturi tulisi kiinnittää samaan alumiiniprofiiliin kuin sylinterit. Terän oikean aloituspaikan varmistamiseksi on paneelin oltava aina samassa paikassa ja sen asemointi voidaan tehdä ns. pakotetusti, eli paneeli ohjataan pysäyttimiä vasten. Kapasitiivisilla antureilla voidaan vielä varmistaa asemoinnin onnistuminen ennen irrotusmekanismin käynnistystä (Kuva 14). Irrotusmekanismi tässä prototyypissä ei pyri aloittamaan kaavintaa ja takakalvon irrottamista täysin paneelin reunasta, vaan muutaman millimetrin päästä reunasta.



Kuva 14. Alipainepöytä ja rullainmekanismin konseptikuva (ilman kelkkaa).

Paneeleiden siirtäminen kuljettimella järjestelmän eri pisteiden välillä on hankalaa toteuttaa, koska alipainepöytään ei pysty sijoittamaan kuljetushihnoja, joten paneeli tulisi siirtää pöydälle alipainetarraimella. Tarraimen tulisi kytetä tarttumaan, karmien irrotuksen jälkeen, paneelin takakalvon puoleiseen osaan ja siirtää paneeli karmien irrotuspisteeltä alipainepöydälle asemointia varten. Tarraimen liikkuminen, karmien irrotuspisteen ja kaavintapisteen välillä toteutetaan lineaarien avulla. Lineaarien korkeus mekanismin työskentely tasosta

arvioidaan konseptin testauksen jälkeen. Sylinterit asemoivat ja painavat paneelin pysäyttimiä vasten. Lämmityksessä syntyvät kaasut voidaan poistaa riittävällä koneellisella ilmanvaihdolla. Lämmitystä seurataan ja hallitaan lämpötila-antureilla ja PID-säätimellä. Koko järjestelmän toimintojen yhteensovittaminen tapahtuu ohjelmoitavan logiikan ja releohjausten avulla.

## 4.2 Kokoaminen

Konseptia pyritään testaamaan kokonaisvaltaisesti rakentamalla prototyyppi ja arvioimalla sen toiminnallisuutta ja soveltuvuutta. Prototyypin rakenteiden kokoamisessa käytettiin alumiiniprofiileja niiden helpon saatavuuden ja koneistettavuuden takia. Testien tulokset voivat vaihdella osia muutettaessa ja tulokset perustuvatkin alla listattuihin komponentteihin ja niiden kokoonpanoon.

### 4.2.1 Osat

Kun järjestelmä jaetaan mekanismin toiminnallisuuksien mukaan osiin, voidaan eri toimintojen komponentit myös karkeasti järjestää samoihin ryhmiin. Osa-alueet ovat 1. Tyhjiöpöytä, 2. Kelkka, 3. Terä, 4. Rullain ja tarrain yhdistelmä, 5. Servomootorit ja kuularuuvit, 6. Lämmitys. Tässä työssä ei käsitellä kaikkia elektronisia komponentteja, koska testaus tehdään osittain manuaalisesti, mutta tuloksista arvioidaan niiden tarvetta ja käytettävyyttä. Myös pneumaattisten letkujen ja sähköjohtojen kuljetukseen tarvittavat osat arvioidaan vasta tuloksissa. Alla listataan käytettyjä ja mahdollisia komponentteja toiminnallisuuksien mukaan.

#### 1. Tyhjiöpöytä

- 1 x Alumiinilevy (rei'itetty ylälevy)
- 1 x Alumiinilevy (uritettu alalevy)
- Silikonitiiviste
- Kierteelliset paineilma nipat (Tyhjiöpumpun kiinnitykseen)

- Paineilma letku
- 6 x tukielementti (Pöydän levyjen välille)

## 2. Kelkka

Runko (Ei kpl määriä):

- Alumiini profiili 45 x 90
- Alumiini profiili 90 x 90
- Alumiini profiili 45 x 45
- Alumiini kulmapala 16
- Alumiini kulmapala 25
- Alumiini kulmapala 45
- Alumiini kulmapala 90

Lineaarijohteet:

- 2 x Lineaarijohde
- 6 x Alumiinilaippa (Kelkan kiinnitys johteeseen)

## 3. Terä

- Paperiterä 1095 mm
- Sovitekulmapala 12,5 °
- Sylinteri SMC MGPM80TF-50Z
- 2 x Ohjaus kulmapala (Terän alle, korkeus säätö)
- 4 x Tukikulma (Terän ja kelkan välille)
- 2 x Tukilevy (Terän ja kelkan välille)

## 4. Rullain ja tarrain yhdistelmä

- Teräsputki Ø 140 mm, 2 mm
- 4 x Sylinterit SMC MGPM20TF-20Z
- 4 x Sylinterin alaleuka (Teräs)
- 4 x Sylinterin yläleuka (Teräs)
- Alumiiniprofiili 45 x 45
- Rengaslaakeri

- Laakerin kiinnityspala
- Sovitepala (laakerin ja rullaimen välille)
- Sovitepala (moottorin ja rullaimen välille)
- Suojapala (pneumaattiset letkut)
- Tukipala (rullain ja alumiiniprofiili)

#### 5. Servomoottorit ja kuularuuvit

- 2 x Schneider BSH0701T01A1A
- 2 x Vaihdelaatikko Neugart GBX060020K (Servot)
- 2 x Kuularuuvien laakerit BK215-C5
- 2 x Kuularuuvien laakerit BF25
- 2 x Kuularuuvi
- 2 x Kiinnityskulma (Kelkan ja kuularuuvin välille)
- 2 x Sakarakytkin
- 2 x Kiinnityslevy (Servon ja ruuvin välille)

#### 6. Lämmitys

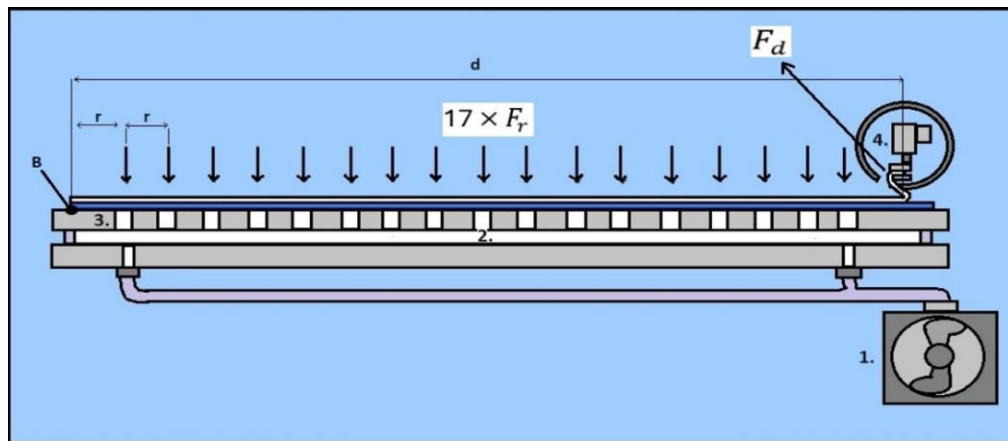
- Infrapunalamppu 1000 W
- Silikonivastusmatto 5,4 kW
- Rele
- 16A sulake
- KytKentä johtimet
- 2 x riviliitin
- Virtalähde
- KytKin (Releen ohjauspiirille)

#### 4.2.2 Kiinnitys

Konseptin erillisten toiminnallisuuksien kokoaminen käsitellään pääpiirteittäin, mutta jossain tapauksissa, kuten kelkan rungon kasauksessa, voidaan käyttää omaa harkintaa halutun lopputuloksen saavuttamiseksi.

## 1. Tyhjiöpöytä

Tyhjiöpöytä koostuu kahdesta alumiinilevystä. Ylemmän levyn tulee olla kierrätettävän paneelin mittoja suurempi, mielellään ainakin 100 mm, molemmissa x- ja y suunnassa eli yhteensä 200 mm. Levyn on reiätetty ja reikien pinta-alasta sekä välityksestä saatava momentti levyn takareunan suhteen (piste B) tulee olla takakalvon kuorimisessa syntyvän voiman aiheuttamaa momenttia suurempi. Alla esitetään momenttiyhtälöön perustuva laskutapa pöydän voimille, mutta on hyvä huomioida, että se on vain suunta-antava eikä huomioi kaikkia muuttujia, jotka vaikuttavat kappaleen paikallaan pitämiseen.



Kuva 15. Konseptikuva tyhjiöpöydästä ja rullaimesta reikärivin kohdalta.

Tyhjiöpumpulla (1) saadaan levyjen väliin luotua lähes absoluuttinen tyhjiö (2) ja näin paine-eron avulla syntyy jokaisen reiän (3) kohdalle paneeliin reiän pinta-alan ja paine-eron määrittämä voima ( $F_r$ ). Reikien välien ollessa  $r$ , voidaan laskea jokaisen yksittäisen reiän aiheuttama momentti pisteeseen B. Kuorimisesta syntyvän voiman  $F_d$  ja etäisyyden  $d$  avulla saadaan selville pöydän pitoa vastustava momentti pisteen B suhteen. Näistä lasketaan reikien koon mukaan, kuinka monta niitä tarvitaan pitämään paneeli paikallaan kuorimisen aikana. Paneeli voidaan jakaa laskun yksinkertaistamiseksi osiin, missä irrotustyön voima jaetaan reikien välien mukaan ja selvitetään rivikohtainen momenttiyhtälö (Kuva 15).

Koska reikien etäisyydet toisistaan ovat samansuuruiset, voidaan laskun helpottamiseksi käyttää aritmeettista summaa. On hyvä huomioida, että saatu tulos ei ota huomioon lasin jäykkyysominaisuuksia, jotka vaikuttavat pitoon, vaan lasi oletetaan pysyvän muodossaan.

Pöydän rei'istä syntyvien momenttien ja takakalvon irrotuksen aiheuttaman momentin summa pisteen B suhteen saadaan kaavalla:

$$\sum M_B = n \times \frac{F_r(r+(r \times n))}{2} - F_d \times \sin \alpha \times d \quad (1)$$

missä,

$n$  = Reikien määrä

$F_r$  = Yhdestä reiästä saatava voima

$r$  = Kahden peräkkäisen reiän välinen etäisyys

$d$  = Irrotusvoiman etäisyys pisteestä B

$F_d$  = Irrotustyöstä syntyvä voima

$\alpha$  = Voiman  $F_d$  kulma pisteen B ja paneelin pinnan kohtisuoran suhteen

Jos  $\varnothing=15$  mm reikiä on paneelin alalta  $17 \times 17$  matriisi voidaan myös takakalvon nopeaan irrotukseen tarvittava voima,  $F_d= 1972$  N, jakaa vastaaman reikärivejä. Yhdelle riville jää tällöin  $1972$  N /  $17 = 116$  Newtonin voima, joka kohdistaa momentin noin  $\alpha = 45^\circ$  kulmassa paneelin pinnan suhteen pisteeseen B. Kun taas yhdestä  $\varnothing15$  mm reiästä saatava voima on n.18 Newtonia. Reikien välien ollessa  $r = 100$  mm ja irrottavan voiman etäisyyden  $d = 1700$  mm saadaan laskettua momenttien summa pisteen B suhteen.

Sijoittamalla arvot kaavaan saadaan momentiksi,

$$\sum M_B = 17 \times \frac{18 \text{ N}(0,1\text{m}+(0,1\text{m} \times 17))}{2} - 116\text{N} \times \sin 45 \times 1,7 \text{ m} \approx 136 \text{ Nm},$$



ja suunta pöytää vasten, joten kyseisellä reikämatriisilla pitäisi olla riittävä pito irrotustyön aikana, sillä rullaimen edetessä sen kohdistama momentti pienenee B:n suhteen, kun taas reikien momentit pysyvät vakiona.

## 2. Kelkka

Kelkka rakennetaan konseptia varten erikokoisista alumiiniprofiileista. Kelkan leveys on suurempi kuin tyhjiöpöydän leveys, jotta kuularuuvit mahtuvat kelkan ja lineaarijohteiden väliin. Kelkka toimii voiman siirrossa kuularuuvien ja terän välillä ja sen tulee olla mahdollisimman jäykkärakenteinen, jotta energiaa ei häviäsi voimansiirrossa rakenteiden vääntymiseen vaan se saataisiin mahdollisimman tehokkaasti siirrettyä terälle (Kuva 16).



Kuva 16. Terä kiinnitettynä kelkkaan ja tyhjiöpöytä.

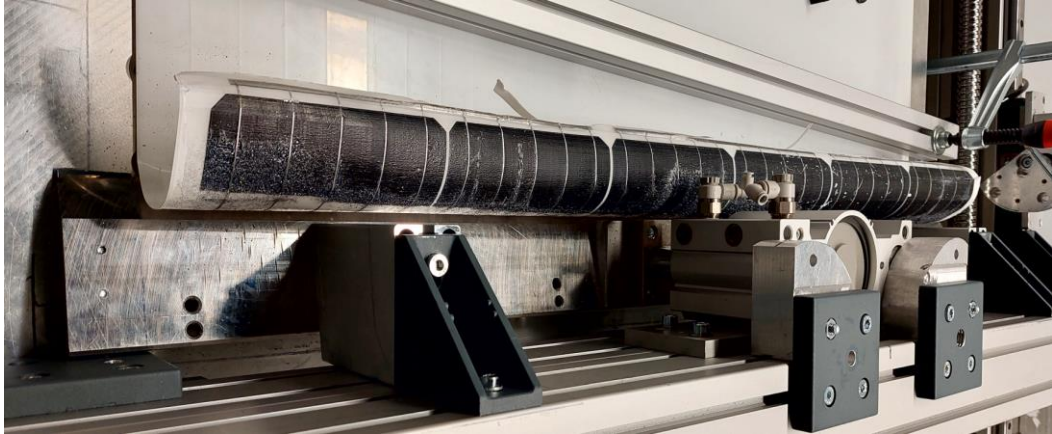
Kelkan ja kuularuuvien välinen kiinnitys tehdään mahdollisimman lähelle leikkaustason korkeutta, jotta vähennetään rakenteeseen syntyviä vääntömomenteja. Kelkassa on myös, pitemmälle kehitettäessä, rullaimen ja sen moottorin kiinnityssovitteen paikka.

### 3.Terä

Takakalvon irrotukseen kokeillaan kahta erilaista tekniikkaa, joissa molemmissa terän leikkauskorkeudelle tarvitaan säätömahdollisuus. Ensin kokeillaan irrottaa takakalvo rullainta varten ja rullaimen avulla saavuttaa korkeampi erotteluaste. Toisena vaihtoehtona kokeillaan terän avulla leikata ensin takakalvosta mahdollisimman paljon materiaalia pois ja sen jälkeen kaapia loput EVA-kerrokset ja niiden välissä olevat kennot.

Terän tulee liikkua vertikaalisesti noin 10-15 mm, tai vaihtoehtoisesti tyhjiöpöytää tulisi pystyä liikuttamaan saman verran. Terän tulee olla säädettävissä tarkasti n. 0,10 mm tarkkuudella. Säätö voidaan tehdä sopivilla kuularuuveilla ja sylinteriyhdistelmällä, jossa terän alle kiinnitetyn ohjurit pitävät terän alla tuen ja oikean kulman sekä ohjurit kulkevat kaavinnan aikana urissa. Urien korkeutta paneelin pintaan pystytään säätämään pystyasentoon asennetuilla kuularuuveilla, joita ohjataan servojen avulla. Tai vaihtoehtoisesti pöydän korkeutta säädetään samalla menetelmällä. Sopivalla kierteiden nousulla ja absoluuttianturin avulla voidaan saavuttaa riittävä tarkkuus. Terä painetaan uriin pneumaattisen sylinterin avulla kaavinnan ajaksi ja nostetaan samalla sylinterillä pois rullauksen aikana.

Prototyypissä ja konseptin testaus vaiheessa säädöt tehdään manuaalisesti ja terän tuenta leikkauksen aikana tulee siihen koneistetuista alumiiniprofiilista tehdyistä säädettävistä tukielementeistä (Kuva 17).

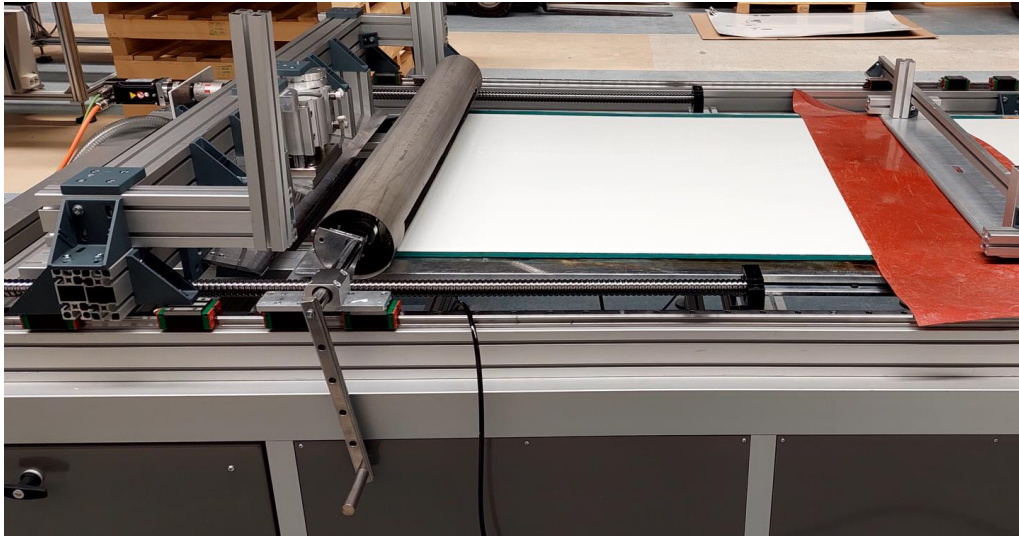


Kuva 17. Kaavintatesti terällä kennojen alta takakalvon ollessa vielä paikallaan.

Terän säätösynteriin voi kohdistaa vain vähän rasiusta, joten terä pitää olla tuettuna myös taaksepäin kohdistuvalta väännöltä. Terään kiinnitetyt jäykisteenä toimivat tukielementit ohjaavat rasiuksen kelkan rakenteisiin. Näin saadaan synteri suojattua liialta väännöltä, sekä varmistettua terän pysyminen muodossa kaavinnan ajan.

#### 4. Rullain ja tarrain yhdistelmä

Rullaimen rumpuosa kiinnitetään kelkan ja moottorin välillä olevaan sovitteeseen. Prototyypissä ei ole moottoria vaan rullaus tehdään manuaalisesti kammen avulla (Kuva 18).



Kuva 18. Järjestelmä kaikkine osineen valmiina testeihin.

Tarraimen sylinterit kiinnitetään prototyypissä alumiiniprofiilin. Alumiini ei ole jäykkyyssominaisuuksiltaan hyvä kyseiseksi osaksi siihen kohdistuvan väännön takia (Kuva 19).



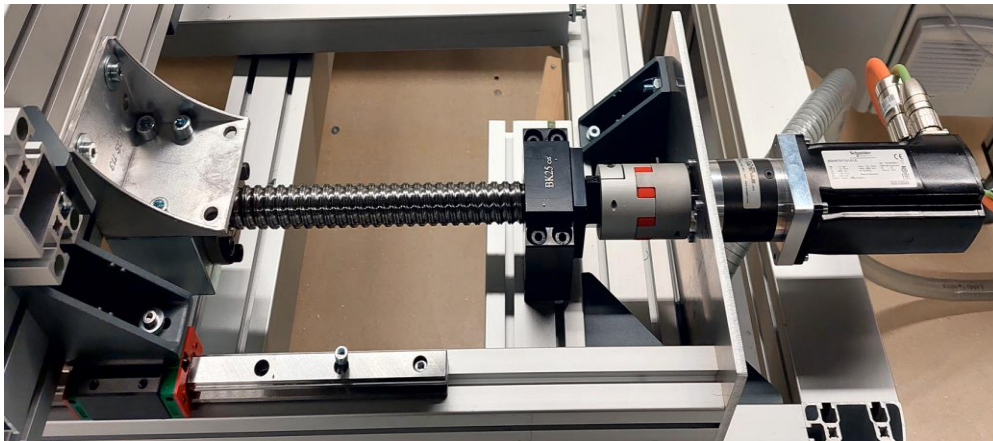
Kuva 19. Tarraimen sylinterit kiinni alumiiniprofilissa.



Tarrainten sylinterit ja tarrainten leuat kiinnitetään niin, että rumpu pääsee pyörimään akselinsa ympäri esteettä niiden ollessa kiinni. Rumpu on tuettu toisesta päästä ja tukielementit mitoitettu rummun sisäkehälle 2 tai 3 pisteeseen. Tukielementit kiinnitetään samaan profiiliin tarrainten kanssa. Tukielementtien päässä käytetään prototyypissä rengaslaakereita, jotta ei syntyisi pyörimistä haittaavaa kitkaa. Tarrainten letkut kiinnitetään myös profiiliin ja ne suojataan. Tarrainten kiinnityksessä olevan profiilin toinen pää tulee kiinni rullaimen moottorin puolelle ja se tulee kiinnittää sovitteella rengaslaakerin sisälle (Kuva 13), jotta tarrain ja pneumaattiset letkut eivät kierry rullauksessa.

## 5. Servomootorit ja kuularuuvit

Planeettavaihteistolla ( $i = 20$ ) varustetut servomootorit ja niissä kiinni olevat kuularuuvit kiinnitetään tarkasti, ja varmistetaan ruuvien olevan vaakatasossa maan suhteen sekä paneelin sivujen suhteen samassa linjassa. Kiinnityksessä käytetään riittävän vahvoja kuularuuveja ja ruuvien kiinnitysalustat/laakerit kiinnitetään lujasti pöydän runkoon niihin kohdistuvan korkean vastavoiman takia (Kuva 20).



Kuva 20. Servo/kuularuuvi yhdistelmän kiinnitys kelkkaan ja pöydän runkoon.

Voimansiirto kuularuuveista kelkkaan tulee prototyypissä alumiinisista vahvistetuista kulmapaloista, jotka kiinnitetään kuularuuveissa olevaan kiinnityselementtiin ja kelkassa rungon profiiliin mahdollisimman lähelle leikkauspinnan korkeutta.

## 6. Lämmitys

Konseptia testattaessa lämmitys toteutetaan kokeilemalla kahta erityyppistä vaihtoehtoa. Aluksi rullainta ja takakalvon käärimistä kokeiltaessa käytettiin infrapunakohdelämmittintä ja kuumailmapuhallinta takakalvolle, mutta myöhemmin testattiin myös silikonista vastusmattoa (Kuva 21).



Kuva 21. Silikoninen vastusmatto takakalvon lämmitykseen ja sen kuljetin.

Vastusmatolle tehtiin manuaalinen releohjaus, jossa matto kytkettiin suoraan verkkoon 1-vaiheeseen sekä releen välille. Releen ohjauspiiri kytkettiin mekaanisen rajakytkimeen, minkä päällä olo aikaa manuaalisesti pulssittamalla saatiin maton lämmitystä kontrolloitua. Ylikuormitukselta suojausta varten lisättiin maton piiriin 16 Ampeerin sulake. Lämmitystä seurattiin FLIR-kameran avulla ja lämpötila pyrittiin pitämään 150 °C asteen alapuolella testien ajan. Mattoa

kuljetettiin lineaarijohteissa sille rakennetun kuljetinalustan avulla. Tämä muoto ei ole soveltuvin suoritettulle testille, ja maton uudelleen muotoilu on mahdotonta sen sisällä olevan vastusmatriisin takia. Koe tehtiin soveltamalla saatavilla olevia tarvikkeita.

## 5 Testaus ja tulokset

Kokoonpanon jälkeen tehtiin mekanismin toiminnalle useita testejä. Testeissä keskityttiin ensin terän avulla pelkästään takakalvon leikkauksen sekä myöhemmin koko ”EVA/Takakalvo kakun” kaavintaan. Testeissä huomattiin alumiinirakenteiden ongelmallisuus voimansiirtäjänä ja terän tuennan tärkeys. Terä testien jälkeen kokeiltiin takakalvon käärintää rullaimella ja siihen soveltuvia lämmitysvaihtoehtoja.

Työ ei käsittele varsinaisesti muita kuin kehitettyä rullaus menetelmää ja terällä leikkausta, mutta sen ohessa kokeiltiin myös Kanthal-vastuslankaa ja sen soveltuvuutta EVA:n leikkaukseen. Testissä vastuslankaan johdettiin jännite säädettävän virtalähteen avulla ja kokeiltiin eri jännitteen arvoilla, saadaanko kuumeneva lanka leikkaamaan EVA-kerroksia. Tulokset osoittautuivat leikkauksen osalta huonoiksi EVA:n ruvetessa savuamaan ja langan taittuessa, mutta ilman näkyviä leikkautumisen merkkejä.

### 5.1 Ongelmat ja kehitysmahdollisuudet

Testien aikana huomattiin ongelmakohtia, jotka jaotellaan toiminnallisuuksien mukaan. Jos ongelmia ei ilmennyt käsitellään kyseinen toiminnallisuus tässä osiossa sen toimivuuden mukaisesti.

#### **Tyhjiöpöydän ongelmat**

Tyhjiöpöydän käytössä oli testien aikana vaikeuksia saada paneeli tiiviisti pöydän pintaan ja mahdollistaa tyhjiön imeminen pumpulla pöydän sisälle. Pöydän alumiinilevyt olivat testissä tarkoituksen kannalta huonolaatuisia ja saadut tulokset osittain tästä syystä huonoja. Pintaa pyrittiin puhdistamaan liuottimilla sekä tasoittamaan hiomalla epäkeskohiomakoneella. Laitteen kehittämisessä onkin huomioitava pinnan tasaisuuden ja suoruuden tärkeys.

Kierrätykseen saapuvista paneeleista poistetaan myös karmit. Tämän seurauksesta tai käyttöikänsä aikana tapahtuvista rasituksista johtuen paneelin



lasit eivät ole täysin suoria niiden saapuessa kaavintaprosessiin. Jos tyhjiöpöytä on tasainen, voidaan paneelin kuljetuksessa käytettävillä alipainetarraimilla ja sylintereillä painaa lasi pöydän pintaan tasaisesti tyhjiön muodostumiseen saakka. Tyhjiöpöydästä saatava voima kykenee pitämään tämän jälkeen lasin riittävän tasaisena kaavintaprosessin ajan.

Tyhjiöpöydän käytössä on yhtenä osana prosessia kaavinta ja toisena osana takakalvon kuoriminen. Kuorimisessa oleellista on pöydän aiheuttama voima irrotustyötä vastaan, mutta kaavinnassa tulee myös tärkeänä ominaisuutena paneelin ja pöydän välinen kitka, terän kohdistuessa x-akselin suuntaisen voiman paneeliin. Testeissä huomattiin, että paneeli pitää olla tuettu toisesta päästä ja tarpeen mukaan kitkan lisäämiseksi käyttää soveltuvaa pinnoitetta paneelin ja pöydän välillä.

### **Tyhjiöpöydän kehitysmahdollisuudet**

Kitkan lisäämiseksi käytettäessä pinnoitetta tulisi sen olla hyvin lämpöä johtava, jos lämmityksessä päädytään pöydän sisältä johtamalla tuotavaan lämmön lähteeseen, kuten liimattavaan vastusmattoon. Pöydän sisäpinnalla olevan vastusmaton käytössä tulee myös huomioida tyhjiön muodostamiseen vaadittava ilmanpoisto. Ilman poistamiseksi voidaan jyrsiä uria pöydän reikien ja maton välille tai tilata rei'itetty matto valmistajalta.

Paneelin oikea asemointi ennen prosessin aloittamista on tärkeää ja sen varmistamiseksi sekä riittävän tuen saamiseksi voidaan pöydän pinnassa käyttää max. lasin korkeudella olevaa koroketta johon paneeli tuetaan kaavinnan ajaksi kaavinnan päättymisen puolelta paneelia.

Pöytään kohdistuu suurivoima, ja sen taipumisen estämiseksi voidaan käyttää tukevampaa valmistusmateriaalia kuin alumiini, esimerkiksi terästä. Pöydän sisällä täytyy olla tukirankoja ja rankoja suunniteltaessa myös huomioida ilman poistamisen mahdollisuus koko pöydän alalta.

### **Kelkan ongelmat**

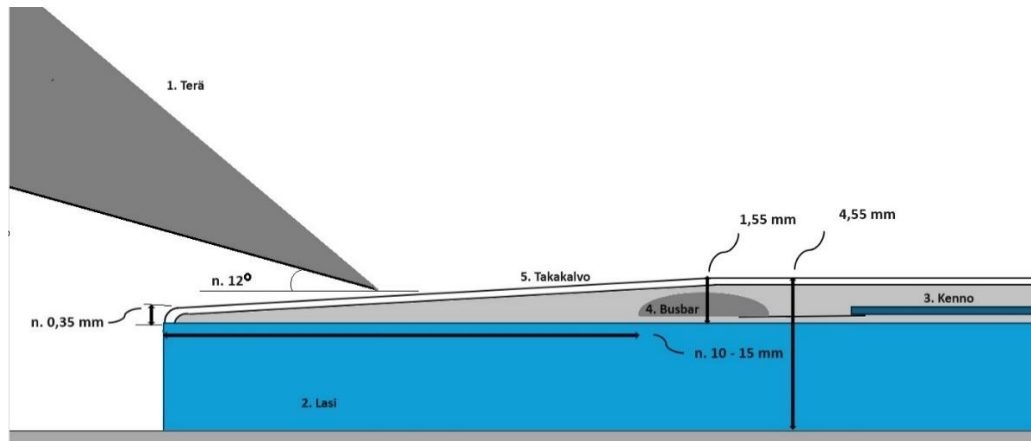
Kelkka toimii konseptissa terän ja rullain/tarrain yhdistelmän kuljettajana, mutta myös voimansiirtäjänä kuularuuvien ja terän välillä. Konseptin testausta varten kelkka rakennettiin useasta alumiiniprofiilin palasta, jotka liitettiin yhteen ruuviliitoksilla. Testeissä huomattiin alumiinin olevan huono voimansiirtäjä sen jäykkyysominaisuuksien takia ja rakenteisiin jouduttiin lisäämään tukia ja jäykisteitä portaittain, kunnes saavutettiin haluttu jäykkyys ja kaavinta onnistuttuiin suorittamaan.

### **Kelkan kehitysmahdollisuudet**

Kelkkaa kehittäessä voisi teräs olla parempi mahdollisuus. Terästä käytettäessä on sen massan takia varottava liian painavan rakenteen syntymistä. Alumiini on helpompi kokoamisen ja uudelleenrakentamisen kannalta. Sillä saavutettiin haluttu lopputulos kaavintaa tehtäessä, mutta terän tuen kannalta olisi teräs ominaisuuksiltaan parempi.

### **Terän ongelmat**

Kaavinnassa ja takakalvon irrottamisessa alulle kuorintaa varten käytettiin noin 1095 mm teräksistä osittain karkaistua paperiterää. Terän säätäminen oikeaan korkeuteen ja siinä pitäminen, sekä tukeminen kaavinnan aikana syntyvien voimien vaikutuksesta huolimatta, on hankalaa alumiiniprofiilien ja kulmien avulla. Terän manuaalinen säätäminen millimetrin kymmenesosien tarkkuudella on hyvin haasteellista manuaalisesti. Lukuisien yritysten ja koneistettujen säätöpalojen ja tukien avulla, saatiin terällä kaavittua lasin pinnan mukaisesti ”kennokakku” irti ilman lämmitystäkin. Erityisesti terän tukeminen ja taipumisen ehkäiseminen on hankalaa alumiinin avulla. Kaapimista vaikeuttaa myös paneelin reunaan laminoinnin jälkeen muodostuva ”ramppi”, missä noin 10-15 mm paneelin reunasta tulee busbar sekä kennon reuna. Niiden ja lasin reunan välillä on vain EVA ja takakalvo (Kuva 22). Näiden välillä on noin 1 mm korkeusero.



Kuva 22. Terän asemointi takakalvon irrotusta varten.

Toisena tekniikkana kokeiltiin ensin leikata irti takakalvo, ja tämän jälkeen kaavittiin irti loput materiaalista. Tulokset olivat hyviä, vaikka tällä tekniikalla ei saadakaan koko takakalvoa erotettua vaan ns. ramppien kohdalle jää kalvo paikalleen (Kuva 23).



Kuva 23. Takakalvon leikkaus kylmänä kennojen päältä.

Testituloksiin vaikuttaa koneistettujen osien epätarkkuus sillä niiden jyrsintä on manuaalisesti suoritettua ja toleranssien vaikeasti saavutettavia.

### Terän kehittämismahdollisuudet

Terän kehittämisessä kannattaa käyttää teräksisiä tukia ja mahdollisesti nailonista tai vastaavasta kovasta muovista valmistettuja tuki ja

säätöelementtejä. Terää on tarkoitus liikuttaa joko sylinterien tai kuularuuvien avulla, missä haluttu tarkkuus saadaan oikeanlaisten komponenttien huolellisella valinnalla. Vaihtoehtona terän korkeussäädölle voidaan tyhjiöpöytää liikuttaa korkeussuunnassa. Terän leikkauskulmana käytettiin noin 12,5 ° asteen kulmaa pöydän pinnan ja kaavittavan paneelin suhteen (Kuva 22). Kulmalla saatiin hyviä tuloksia, mutta sen säätäminen testeissä ei ollut mahdollista ja kaikki testit tehtiin tällä kulmalla. Terän kulman koneellista säätöä voidaan arvioida ja sen toteutusta esim. kelkan kallistamisella portaittain, mutta sen suunnittelua ei käsitellä tässä työssä.

Terän asemointi kaavinnan aloittamista varten voidaan tehdä osittain ohjelmallisesti, hakemalla paneelin pinnasta ensin sen korkeus ja vähentää siitä ”kakun” paksuus tai vain takakalvo riippuen halutusta lopputuloksesta. Tämän jälkeen joko terän tai tyhjiöpöydän korkeutta säätämällä saadaan leikkaustaso määritettyä. Turvallisuuden varmistamiseksi pitää terän virheellinen asemointi tunnistaa, eikä se voi vahingossa yrittää leikata lasia. Optisten antureiden käyttö lasin reunan tasalla varmistaa, että terä ei voi laskeutua liian alas ennen kaavinnan aloitusta. Myös erilaiset voimaa tunnistavat anturit terään kiinnitettynä saattavat olla käyttökelpoisia tunnistamaan lasin kanssa tapahtuvan kontaktin seurauksena syntyvät, kakun kaavinnasta eroavat voimasuhteet.

Kaavittavan materiaalin ohjaukseen voidaan käyttää terän päällä kulkevaa auraa tai kaukaloa, johon materiaali kerätään kaavinnan aikana. Kerätyn materiaalin tyhjennys voidaan tehdä sylinterillä joko kipillä tai päästä työntämällä.

### **Rullaimen ja tarraimien ongelmat**

Rullain ja tarrain yhdistelmän koneistamisessa ja kokoonpanossa käytettiin saatavilla olevia alumiinisia osia sekä muutamia teräksestä koneistettuja sovitteita. Tarrainten sylintereitä valittaessa, huomattiin, että riittävän pitovoiman saamiseksi jouduttiin käyttämään neljää SMC MGPM20TF-20Z sylinteriä ennen riittävän voiman saavuttamista. Riittävän pidon muodostamiseksi testien aikana käytettiin tarrainten leukojen sisäpinnalla liukuestoteippiä. Tarrainten leuat

koneistettiin saatavilla olevista teräksisistä kulmarauodoista ja niiden ainevahvuus määrätti osittain takakalvosta irrotettavan liuskan mitan (Kuva 24).



Kuva 24. Takakalvon ohjaus tarraimen leukojen väliin.

Sylinterit mahtuvat rullaimen sisälle, vaikka ylimääräistä tilaa jää vähän. Niiden kiinnittämiseen käytettiin kapeaa alumiiniprofiilia. Kun kannatteleva profiili on alumiinia, kuorimisessa syntyvä vääntö saa sen kiertymään. Vaikka näillä komponenteilla saavutettiin haluttu lopputulos ja takakalvo saatiin irtoamaan rullaimen avulla, vääntyi rakenteet kuorimisprosessin aikana (Kuva 25).



Kuva 25. Takakalvon irrotus Infrapunalampun ja rullaimen kanssa.

Rullaimelle vaihtoehtona kokeiltiin terällä takakalvon irrottamista ja se vaikutti kannattavammalta tekniikalta, vaikka sillä ei saavuteta yhtä korkeaa materiaalien erotteluastetta.

### **Rullaimen ja tarraimien kehitysmahdollisuudet**

Rullaimen suunnittelussa on useita kehitys- ja toteutusvaihtoehtoja mitä kaikkia ei pystytty testaamaan. Tarrainten leukojen sisäpintaan voidaan koneistaa pidonlisäämistä varten karkeutta lisäävä pinta tai hampaita. Sylintereiden lisäämisellä voidaan sama pito saavuttaa pienemmillä sylintereillä, mutta on huomioitava niiden rasituksen sieto. Tarrainten kiinnitysprofiilina tulisi käyttää jäykempää ja lujempaa materiaalia sen kiertymisen estämiseksi. Kiertymisen esto on tärkeää myös prosessin automatisoinnissa tarvittavien sensoreiden kiinnityksen takia. Tarraimet voidaan teoriassa asentaa niin, että takakalvo jää tarraimessa olevan vain yhden leuan ja rullaimen reunan väliin. Tämän edellytyksenä on, että tarrainten ja niiden kiinnitys profiilin on pystyttävä pyörimään rullaimen mukana. Tällöin letkujen kiertymisen ehkäisemiseksi tarvitaan paineilma nippa, joka pyörisi syöttöpaineen kiinnityskohdassa akselinsa ympäri. Tarrainten leukojen mitoittamisessa on huomioitava niiden vaikutus siihen, kuinka paljon terällä on takakalvoa irrotettava ennen kuin siihen pystytään tarttumaan. Leukojen ainevahvuus vaikuttaa sylintereiden asennuskorkeuteen,

jotta varmistetaan rullaimen pyöriminen ilman kontaktia leukoihin. Asennuskorkeus määrittää myös mihin korkeuteen takakalvon on nouseva ennen rullauksen aloitusta.

Kokonaan erilaista tekniikkaa hyödyntäen voidaan rullaimen tilalla käyttää myös koneistettua mekanismia, jossa x-suuntainen tai rotaatioliike muutetaan pystysuuntaiseksi esim. koneistettujen urien ja niissä kulkevien tarraimen leuoissa olevien ohjaustappien avulla. Työ ei käsittele tätä vaihtoehtoa, mutta sen etuna olisi rullaimen muuttuminen pelkiksi tarraimen leuoiksi, joita puristetaan päädyistä sylinterin avulla. Käytettäessä tämän tapaista mekanismia tulee ongelmaksi kuitenkin tarkkuuden saavuttaminen sensoreiden haasteellisen kiinnityksen takia.

### **Servomoottoreiden ja kuularuuvien ongelmat**

Servomoottoreiden ollessa ( $i=20$ ) vähennyksellä toimivien planeettavaihteistojen kautta kiinni kuularuuveissa ei voiman tuotossa ilmennyt ongelmia. Testeissä käytettyjen kuularuuvien pituus ei riitä koko paneelin matkalta tehtävään kaavintaan. Niillä päästiin kuitenkin kokeilemaan konseptin toimivuus. Servojen ohjaukseen tarvitaan ohjausjärjestelmä, mutta sen ohjelmointia ei käsitellä tässä työssä.

### **Servojen ja kuularuuvien kehitysmahdollisuudet**

Kokonaista prosessia suunniteltaessa tulee kuularuuvien pituus mitoitaa riittäväksi. Servojen ja planeettavaihteistojen toimivuus on todettu riittäväksi, mutta ne saattavat olla myös ylimitoitettuja. Tarkka mitoitus on vaikeaa ilman tarkkoja voimasuhteiden arvoja kaavinnan aikana.

### **Lämmityksen ongelmat**

Kun takakalvo irrotetaan kuorimalla, tärkeintä on sen lämmitys aina EVA-kerrokseen asti. Lämmityksen toteutukseen ei konseptin kokeiluvaiheessa ollut käytettävissä kuin kaksi eri tekniikkaa. Ensin kokeiltiin infrapunakohdelämmittimellä lämmittää kuorinnan aloitus kohtaa pieneltä alueelta. Kohdelämmitin osoittautui riittäväksi takakalvon hitaaseen irtoamiseen,

mutta sen ongelmana on lämmityksen hitaus sekä lämmitettävän alueen pieni ala. Kohdelämmitys ei testien perusteella ole parhaiten soveltuva lämmitysmuoto.

Toisena lämmitysmuotona kokeiltiin silikonista vastusmattoa. Vastusmatto on erittäin tehokas ja lämpenee muutamassa sekunnissa haluttuun lämpötilaan, tosin lämmönjohtuminen matosta takakalvoon tai tyhjiöpöydän läpi koko paneeliin ei tapahdu yhtä nopeasti. Matto vaatii tarkan lämmön säätelyn sillä sitä ei saa päästää lämpenemään yli 150 C° asteeseen. Testeihin kytkettiin säätelyä varten rele maton ja vaiheen välille sekä releen ohjauspiiriin mekaaninen rajakytkin, minkä päällä olo aikaa pulssittamalla saatiin lämpötilaa ohjattua. Apuna käytettiin FLIR-lämpökameraa jolla seurattiin lämpötilan vaihtelua ohjauksen aikana. Maton käytössä ongelmana on paneelin päältä toteutetussa lämmityksessä maton kuljettaminen kaavinnan ja kuorinnan edellä sekä maton siirtäminen kuorinnan lopussa pois rullaimen tieltä.

### **Lämmityksen kehitysmahdollisuudet**

Kun käytetään kohdelämmitintä, on mahdollista suurentaa lämmitysalaa, jos valitaan tehokkaampi IR-lamppu. Tällä menetelmällä tuskin kuitenkaan päästään optimaalisimpaan tai lämmityksen osalta kustannustehokkaimpaan tulokseen.

Vastusmatolla on useita erilaisia toteutus tapoja, joista vain yhtä kokeiltiin osittain testeissä. Maton käyttö johtamalla lämpö tyhjiöpöydän ylälevyn läpi jäi testeissä kokeilematta, mutta se voi olla kannattavin lämmitysmuoto, jos kaavinta halutaan toteuttaa lämmityksen kanssa. Tällöin saadaan koko paneeli kauttaaltaan lämpenemään ja kuorinta ei vaadi erillistä liikkuvaa lämmitintä rullaimen edellä. Kaavinta on mahdollista toteuttaa myös ilman lämmitystä ja näin säästää energiaa. Jos kaavinta tehdään kylmänä, on takakalvon lämmitys sen yläpuolelta erillisessä lämmitys elementillä kustannustehokkain vaihtoehto. Vastusmatto voidaan kiinnittää sille suunniteltuun kuljettimeen ja liikuttaa sitä halutulla nopeudella rullaimen edellä, mutta maton ohjaukseen ja virran tuottoon vaadittavat johdot sekä niiden kuljetus prosessin aikana lisäävät toteutuksen monimutkaisuutta.



## 6 Yhteenveto

Työn tulosten perusteella on selvää, että kehitetyssä konseptissa suurimmat haasteet tulevat terän tarkassa asemoinnissa kaavintaa varten ja takakalvon irrottaminen vain lyhyeltä matkalta tarrainten kiinnittymistä varten. Vaadittavan tarkkuuden saavuttaminen käytössä olleilla komponenteilla ei vaikuttanut mahdolliselta. Halutun lopputuloksen saavuttaminen vaatisi koneellisen korkeussäädön joko terälle tai tyhjiöpöydälle sekä teräsrakenteisiin koneistetut kiinnitys- ja tuki elementit varmistamaan terän pysyminen asemassa. Myös erilaisten sensoritekniikoiden hyödyntäminen on välttämätöntä asematietojen saamiseksi. Vaikka alumiiniset rakenteet eivät ole soveliaimpia, saatiin niillä silti hyviä tuloksia EVA- ja PET- kerrosten kaapimisesta.

Tuloksien perusteella vaikuttaa kahdella erillisellä kaavinnalla/leikkauksella tehtävä materiaalien erottelu paremmalta vaihtoehdolta, kuin rullauksen avulla tehty erottelu. Takakalvon ja EVA kerrosten leikkaus kylmänä lisäisi prosessin kustannustehokkuutta huomattavasti. Vaikka tällä menetelmällä ei saada takakalvoa yhtä paljon irrotettua, tapahtuu kuitenkin erottelu nopeammin, kustannustehokkaammin sekä sen toteutus on yksinkertaisempi.

Tyhjiöpöydän käyttö osoittautui haasteelliseksi testien aikana, mutta haasteiden syynä oli useimmiten käytettyjen materiaalien ja komponenttien huono laatu tai soveltuvuus. Alumiinisten levyjen taipuminen omanpainon ja voiman vaikutuksesta sekä niissä olevat epäpuhtaudet vaikuttivat testeihin. Ongelmista huolimatta saatiin myös tyhjiöpöydän avulla hyviä tuloksia kuorimisprosessin aikana. Kuorinnan aloituksen ollessa riittävän hidas saadaan kalvo irtamaan ja kun rullain etenee paneelin päällä, voidaan nopeutta lisätä.

Lämmityksen toteutukseen on olemassa useita vaihtoehtoja, mutta tässä työssä kokeiltiin vain kahta menetelmää, joista vastusmatto vaikuttaa lupaavammalta, kun kustannustehokkuus ja suunnittelu otetaan huomioon. Tarkkoja tuloksia ei kuitenkaan testeistä saatu ja lisätutkimus maton soveltuvuudelle ja parhaalle käyttötavalle olisi tarpeen.

Kokonaisuudessaan konseptin toimivuus vaikuttaa mahdolliselta, vaikka vaatiikin tarkempaa mekaniikan ja sensoritekniikan suunnittelua. Saavutettavia etuja on paremman materiaalin erottelun lisäksi myös suhteellisen edullinen ja pienikokoinen järjestelmä. Prototyypin kokoonpano on myös sen yksinkertaisuuden vuoksi helppo toteuttaa. Kun huomioidaan kierrätyksen kasvava tarve ja testien tulokset, vastaavanlaisille järjestelmille vaikuttaisi olevan kysyntää tulevaisuudessa.

## Lähteet

- Alejandromiranda. 2023. iStock. <https://www.istockphoto.com/fi/vektori/kaavio-aurinkopaneelin-osista-uusiutuva-energia-gm913319388-251411238?phrase=solar+panel+layers&searchscope=image%2Cfilm>
- C, Crownhart. 2021. MIT Technology review. Viitattu. 2.1.2024. <https://www.technologyreview.com/2021/08/19/1032215/solar-panels-recycling/>
- C, Latunussa.Ym. 2016. European Comission JRC puplicatons Repository. Analysis of material recovery from silicon photovoltaic panels. Viitattu. 2.1.2024. [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC100783#:~:text=The%20FREL%20project%20focuses%20on,\)%20photovoltaic%20\(PV\)%20panels.](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC100783#:~:text=The%20FREL%20project%20focuses%20on,)%20photovoltaic%20(PV)%20panels.)
- Devxplained. Viitattu 7.12.2023. <https://devxplained.eu/en/blog/p-n-junction.>
- Divya, A. ym. 2023. Review on recycling of solar modules/panels. ScienceDirect. Viitattu 31.12.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024822005682>
- Fan, H. 2023. Viitattu 1.4.2024. <https://www.wevolver.com/article/inkjet-printing-for-solar-cell-manufacturing-how-electroforming-is-empowering-the-photovoltaics-industry-moving-forward>
- Lynn,P. 2010. Electricity from Sunlight, An Introduction to Photovoltaics, Chichester, West Sussex : Wiley, 2010.
- M, Aghaei ym. 2022. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. ScienceDirect. Viitattu 31.12.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122000880>
- M, Peplow. 2022. Chemical & Engineering News. Solar panels face recycling challenge. Viitattu 2.1.2024. <https://cen.acs.org/environment/recycling/Solar-panels-face-recycling-challenge-photovoltaic-waste/100/i18>
- NPC Incorporated. Viitattu 2.1.2024. <https://www.npcgroup.net/eng/solarpower/reuse-recycle/recycle-service>
- SFS-EN IEC 60904-1:2020 Aurinkosähkölaitteet. Osa 1: Virtajännite-ominaisuuksien mittaus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry

Sullivan, J. Syksy 2013. Fundamentals of Photovoltaics. MIT OpenCourseWare.  
Viitattu 7.12.2023.

[https://www.youtube.com/watch?v=k12GMjtN8aA&ab\\_channel=MITOpenCourseWare](https://www.youtube.com/watch?v=k12GMjtN8aA&ab_channel=MITOpenCourseWare).

