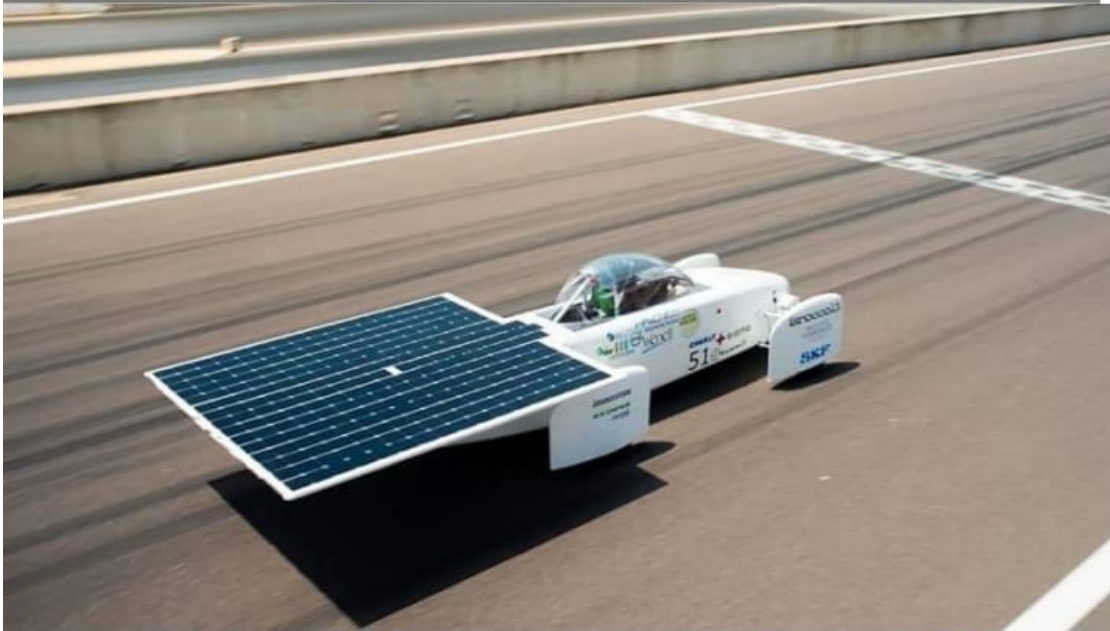




CHALMERS



Inkapsling av solceller för att maximera effektintaget i en solbil

Kandidatarbete vid Institutionen för industri- och materialvetenskap

Simon Andersson

Martin Hörnell

Axel Jensen

Axel Prebensen

Pouria Saber

Alexandra Simonsen

Institutionen för industri- och materialvetenskap

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2021

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE IMSX15-21-11

Inkapsling av solceller för att maximera effektintaget i en solbil

Studie av materialegenskaper för att förbättra effektintaget i en
solbil inför tävlingen *Bridgestone World Solar Challenge*.

Simon Andersson
Martin Hörnell
Axel Jensen
Axel Prebensen
Pouria Saber
Alexandra Simonsen



CHALMERS

Institutionen för Industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021

Inkapsling av solceller för att maximera effektintaget i en solbil
Studie av materialegenskaper för att förbättra effektintaget i en solbil inför tävlingen *Bridgestone World Solar Challenge*.

Simon Andersson

Martin Hörnell

Axel Jensen

Axel Prebensen

Pouria Saber

Alexandra Simonsen

© Simon Andersson, Martin Hörnell, Axel Jensen, Axel Prebensen, Pouria Saber, Alexandra Simonsen, 2021.

Examinator: Lars Almefelt, Institutionen för industri- och materialvetenskap

Handledare: Antal Boldizar, Institutionen för industri- och materialvetenskap

Handledare: Göran Gustafsson, Institutionen för industri- och materialvetenskap

Kandidatarbete IMSX15-21-11

Institution för industri- och materialvetenskap

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Göteborg

Omslagsbild: Chalmers solbil på the Hidden Valley Raceway i Darwin, Australien
2019 av Christian Lundberg.

Sammandrag

Syftet med denna studie är att undersöka lämpliga material för inkapsling av solceller som skall driva en elbil. Inkapslingen skall bidra med ett mekaniskt och väderbeständigt skydd samtidigt som den skall minska verkningsgraden så lite som möjligt. Viktiga egenskaper som identifierats för inkapslingsmaterialet är hög transmission, specifik styvhet och styrka samt hög användningstemperatur, smältpunkt och värmeledningsförmåga. I studiens första del användes en materialdatabas för att sälla fram material som hade potential. I nästa steg eliminerades de material som hade lägre transmissionsförmåga. Därefter samlades prover på de kvarvarande materialen in för att tester skulle kunna genomföras. Två typer av laborationer genomfördes; 1) FTIR-mätningar för att bestämma materialens transmissionsförmåga och 2) mätningar i en väderometer för att bestämma materialens väderbeständighet och påverkan på solcellernas verkningsgrad. Väderometern ställdes in för att simulera hög värme och UV-strålning. För de mekaniska egenskaperna användes data från datablad för att utvärdera materialens prestanda. Mätningarna i väderometern visade att verkningsgraden för solcellerna minskade enligt följande när de inkapslades med respektive material: 2,9 % för polyetennafталat (PEN), 6,7 % för polymetylmetakrylat (PMMA), 4,6 % för polyetentereftalat (PET) och 3,8 % för fluorerad etenpropen (FEP). Vissa material utvecklade deformationer under exponeringen i väderometern. Det material vars verkningsgrad minskade minst var PEN. Detta material hade även bra mekaniska och termiska egenskaper, samt satt fast bra på solcellen med vald appliceringsmetod. Därmed var PEN det material som hade totalt bäst prestanda och rekommenderas därmed som inkapsling med vald appliceringsmetod.

Nyckelord: Solceller, Inkapsling, Verkningsgrad, Polymerer

Abstract

The purpose of this study is to investigate suitable materials for encapsulating solar cells that will power an electric car. The encapsulation shall provide a protective layer against mechanical stresses and weatherability whilst reducing the efficiency as little as possible. Important characteristics that have been identified for the encapsulation material is high transmission, specific stiffness and strength including high operating temperatures, melting temperature and heat capacity. In the initial part of the study, a material database was used to sift materials that had potential. Followed by eliminating materials that had low transmission capabilities. Samples of the last remaining materials were then collected for tests to be carried out. Two types of experiments were carried out; 1) FTIR measurements to determine the transmission of the materials and 2) measurements on the solar cells inside a weatherometer to determine the materials weather resistance and the impact on the efficiency of solar cells. The weatherometer was set to simulate high temperature and UV-radiation. As for the mechanical properties, data from the materials datasheets was used to evaluate their performance. Measurements inside the weatherometer showed that the efficiency of the solar cells decreased when encapsulated with the respective material as follows: 2.9 % for polyethylene defthalate (PEN), 6.7 % for polymethyl methacrylate (PMMA), 4.6 % for polyethylene terephthalate (PET) and 3.8 % for fluorinated ethylenepropene (FEP). Some of the materials were deformed during the exposure inside the weatherometer. The material that had the least reduction in efficiency was PEN. The material had good mechanical and thermal properties and remained adhered to the solar cell with the chosen method of application. Thus, PEN was the material with the best overall performance and is therefore recommended as an encapsulant with the selected method of application.

Keywords: Solar cells, Encapsulation, Efficiency, Polymers

Förord

Denna kandidatuppsats genomfördes inom institutionen för industri- och materialvetenskap på Chalmers tekniska högskola under våren 2021. Lars Almefelt var examinerator och Antal Boldizar samt Göran Gustafsson var handledare. Uppsatsen skrevs under perioden januari till maj 2021 av tre studenter från Teknisk Fysik, två studenter från Maskinteknik samt en student från Automation och Mekatronik.

Vi vill tacka Göran och Antal för deras jobb som handledare och stöttepelare under arbetets gång. Stort tack även till Ludvig Brodén, huvudintressent och uppdragsgivare, som bidragit med solceller och insikter utifrån hans arbete för Chalmers Solar Team. Vi vill även rikta ett stort tack till Lena Bengtsson på RISE Research Institutes of Sweden i Borås och Katarina Logg på Chalmers materialanalyslaboratorium för deras hjälp samt möjligheten att använda deras utrustning för testerna i detta projekt. Slutligen vill vi tacka Glasfiber & Plastprodukter AB, Fluortek AB samt DuPont för de tillhandahållna materialen som användes under de praktiska testerna i projektet.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Mål	2
1.4	Frågeställningar	2
1.5	Avgränsningar	2
2	Närmare beskrivning av problemområdet	3
2.1	Solenergi - hur fungerar det?	3
2.2	Kristallina kiselsolceller	3
2.3	Solcellerna som användes 2019	4
2.4	Inkapsling av solceller	4
2.5	Inkapslingsmaterial som används idag	5
2.5.1	Etenvinylacetat (EVA)	5
2.5.2	Polyvinyl butyral (PVB)	5
2.5.3	Kisel	5
2.5.4	Bridgestone World Solar Challenge	6
2.5.5	Gochermann Solar Technology	6
3	Materialgenskaper	7
3.1	Optiska egenskaper	7
3.1.1	Transmission	7
3.1.2	Reflektion	7
3.1.3	Spektrofotometri	7
3.2	Mekaniska Egenskaper	8
3.2.1	Specifik styvhet	8
3.2.2	Specifik styrka	8
3.3	Termiska egenskaper	8
3.3.1	Smältpunkt	8
3.3.2	Användningstemperatur	8
3.3.3	Värmeledning	9
3.4	UV-beständighet	9
4	Metod	10
4.1	Sällning av material	10
4.2	Optiska egenskaper	11
4.3	Appliceringsmetoder	11
4.4	Mätningar i väderometer	12
4.4.1	Mätning 1 - Referensmätning	12
4.4.2	Mätning 2 - Inkapslade solceller	13
4.4.3	Mätning 3 - Inkapslade och exponerade solceller	13
5	Resultat	14
5.1	Kvarvarande material efter sällning	14

5.1.1	Tillhandahållna material	14
5.1.2	Givna materialdata	15
5.2	FTIR-resultat	15
5.2.1	FTIR-mätning på material före exponering i väderometer . . .	16
5.2.2	FTIR-mätning på material efter exponering i väderometer . .	16
5.2.3	Jämförelse av FTIR-resultat	17
5.3	Applicering	17
5.4	Väderometer	18
5.4.1	Mätning 1 - Referensmätning	18
5.4.2	Mätning 2 - Inkapslade solceller	18
5.4.3	Mätning 3 - Inkapslade och exponerade solceller	19
5.5	Visuellt resultat	19
6	Diskussion	22
6.1	Kvarvarande material efter sållning	22
6.2	Materialegenskaper	22
6.3	FTIR-resultat	23
6.4	Applicering	23
6.5	Visuellt resultat	24
6.5.1	Plexiglas (PMMA)	24
6.5.2	Fluorerad etenpropen (FEP)	24
6.5.3	Mylar 208 (PET)	24
6.5.4	Kaladex 2000 (PEN)	24
6.6	Analys av mätdata	25
6.7	Materialens totala prestanda	26
6.7.1	Plexiglas (PMMA)	26
6.7.2	Fluorerad etenpropen (FEP)	27
6.7.3	Mylar 208 (PET)	27
6.7.4	Kaladex 2000 (PEN)	27
7	Slutsatser och rekommendationer	28
7.1	Kvarvarande material	28
7.2	Förslag på vidare forskning	28
7.2.1	Appliceringsmetoder	28
7.2.2	Tjocklek på material	28
7.2.3	Inkapsling av panel	29
7.2.4	Materialets beteende i värme	29
	Litteraturförteckning	30

1 Inledning

Varje timme når mer energi jorden genom solinstrålning än vad som förbrukas i alla länder under ett helt år [1]. Detta är enorma mängder energi som går förlorad som hade kunnat omvandlas till elektricitet med hjälp av solceller. Solceller är idag vanligt på hustak och har även använts länge på satelliter. Nästa steg som det forskas mycket på är huruvida solceller skulle kunna användas mer inom transportsektorn [2]. Denna sektor är idag en av dem som släpper ut allra mest växthusgaser [3]. Solcellsbilar skulle kunna vara en lösning på detta problem.

Det finns många utmaningar med att fästa solceller på en bil. Det krävs dels att solcellerna genererar lika mycket energi som förbrukas vid körning, eller åtminstone tillräckligt för att bilens, ofta förladdade, batteri inte skall laddas ur under körsträckan. Dessutom är solceller på en bil mer utsatta för mekaniska påfrestningar, som till exempel vibrationer, än vad solceller som sitter på hustak är. För att öka hållbarheten hos solceller är inkapsling en vanlig metod, där cellerna helt enkelt täcks av ett skyddande material. Materialets egenskaper att släppa igenom solljus, inte absorbera för mycket värme och framförallt skydda cellerna är här mycket viktiga.

1.1 Bakgrund

Under 2019 byggde Chalmers Solar Team en solbil och tävlade med denna i Australien. Tävlingen, Bridgestone World Solar Challenge [4], går ut på att åka så snabbt som möjligt mellan Darwin och Adelaide i Australien, alltså över hela kontinenten. Bilen får endast drivas med hjälp av solceller. Solceller i sitt "nakna" tillstånd är mycket känsliga för repor och smuts och är därför omöjliga att använda i en solbil. För att göra dem mer tåliga så kapslas de in, vilket innebär att ett lager av ett annat material läggs på deras yta som ett skydd. Det är viktigt att det valda materialet inte minskar solcellernas effektivitet för mycket. Till den bilen som Chalmers Solar Team använde 2019 så valdes en epoxy beställd från Polen. Ingen materialdata finns tillgänglig, men efter beräkningar av solcellernas effekt då de var inkapslade med materialet kunde det konstateras att det fanns förbättringspotential.

Verkningsgraden i en solcellsdriven elbil har stor påverkan på hur konkurrenskraftig bilen blir i tävlingssammanhang. I Bridgestone World Solar Challenge startar bilarna med ett batteri laddat med ca 5 kWh, utöver detta är det solcellerna som står för det enda energiflödet in i systemet och därmed har deras verkningsgrad en dramatisk påverkan på slutresultatet.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att undersöka några material för inkapsling av solceller och identifiera det material som resulterade i den högsta verkningsgraden hos solcellen. Samtidigt skall kraven på det skydd som krävs mot påfrestningar från om-

givningen beaktas.

1.3 Mål

Målet med arbetet är att identifiera det material som skyddar solcellerna bäst under bilens färd genom Australien samtidigt som försämringen av solcellernas verkningsgrad blir så liten som möjligt. Materialet behöver skydda mot väder och mekaniska påfrestningar samtidigt som det uppfylla regelkrav från Bridgestone World Solar Challenge. Materialet skall även kunna appliceras på solcellerna på ett bra sätt. Målet är också att allt skall kunna uppfyllas inom en rimlig budget och att metoden och materialet skall vara tillgängligt för Chalmers Solar Team.

1.4 Frågeställningar

Vilka material lämpar sig för inkapsling av solceller för en solbil? Vilket material kombinerar bäst de önskvärda egenskaper nedan och ger högsta möjliga verkningsgrad hos solcellen?

- Transmission/reflektion (skall släppa igenom önskade våglängder)
- Värmeabsorption (skall absorbera minimalt med värme eftersom detta minskar verkningsgraden på solcellerna)
- Densitet (skall vara låg för att minska vikt)
- Användningstemperatur och teknisk livslängd (skall klara av att utstå stora temperaturskillnader i flera dagar)
- Stöttålighet (skall klara stenskott och vibrationer)

Frågeställningarna skall besvaras genom att föreslå ett eller flera nya material samt ett sätt att applicera dessa på solcellen.

1.5 Avgränsningar

De avgränsningar som kommer att göras är följande:

- Varken bilen i sig eller solpanelen som helhet kommer beröras av detta projekt. Materialen kommer alltså fästas på enskilda solceller.
- Solceller som har tillhandahållits kommer inte att modifieras, inget fokus kommer att läggas på själva kiselcellerna.
- Material som inte är kommersiellt tillgängliga kommer inte att undersökas.

2 Närmare beskrivning av problemområdet

I detta kapitel kommer teorin bakom solcellerna förklaras för att ge ökad förståelse för hur problemet skulle kunna lösas. Olika redan existerande lösningar på problemet kommer att undersökas för att kunna identifiera styrkor och svagheter samt samla inspiration till projektet.

2.1 Solenergi - hur fungerar det?

Att generera elektricitet från ljus var ett fenomen som upptäcktes redan 1839 av Alexandre Edmond Becquerel. Sedan dess har solceller förbättrats genom att söka nya material som är billigare och som ger högre verkningsgrad för att göra solenergi kommersiellt tillgängligt [5].

De första solcellerna var vanliga kiselceller som med hjälp av PN-övergångar, positivt- och negativt laddade halvledare, genererade en ström när elektronerna exciterades av solenergi. Dessa solceller var däremot väldigt dyra och inte alls effektiva jämfört med dagens solceller. Solceller har gått från att kosta över USD-\$100 per watt till under USD-\$0,50 per watt och fortsätter att gå ner i pris. Detta beror framförallt på nya tillverkningsprocesser samt hårdare konkurrens bland det stigande antalet aktörer men också på grund av ständig forskning och tillverkning av bättre material som leder till en högre verkningsgrad [6].

Idag finns det en stor variation av solceller för alla möjliga typer av applikationer, från satelliter till bilar, och forskning på nya varianter sker runt om i världen för att hitta bättre, effektivare och miljövänligare material.

2.2 Kristallina kiselceller

Det finns idag två huvudgrupper av solceller, kristallina kiselceller och tunnfilmssolceller. Kristallina kiselceller är den vanligaste typen av solceller och den typ som Chalmers Solar Team använder till sin solbil. Fördelarna med dessa celler gentemot tunnfilmssolceller är framförallt att de har högre verkningsgrad och att kisel är ett mycket vanligt ämne på jorden. Nackdelarna är dock att de kräver mycket energi vid tillverkningen samt att de påverkas negativt av värme [7]. När de blir varmare minskar deras verkningsgrad, för varje grad högre än 25 °C som solcellen är, sjunker effekten med 0,4 % om övriga parametrar är lika. Detta innebär att temperaturkoefficienten, effektändring per grad Celsius, för kiselceller är -0,4 %/°C [8]. Vid en temperatur på 25 °C ligger verkningsgraden på ungefär 18-22 %. Det innebär att energi motsvarande 18-22 % av den solenergi som når solcellerna kan användas till nyttigt arbete [9]. Det finns två olika varianter av kiselceller, monokristallina och polykristallina. Som namnen indikerar så tillverkas de monokristallina cellerna av en kiselkristall medan de polykristallina tillverkas av flera. De monokristallina har lite högre verkningsgrad men är också lite dyrare [10]. Anledningen till dessa skillnader är att den monokristallina solcellen har en mer enhetlig, störningsfri struktur. Priset blir högre eftersom det finns färre kristaller med denna rena struktur. De två typerna går att ganska lätt att skilja på visuellt

då de monokrystallina cellerna i regel är svarta samtidigt som de polykristallina är blåskimrande [11].

Tillverkningsprocessen av kristallina kiselceller går ut på att kisel renas i en energikrävande process. Det renade kiset smälts sedan ned och blandas med bor. Borets funktion är att ge kiselkristallerna sin positiva laddning. Kisel- och borblandningen skärs sedan upp i papperstunna skivor, vilka sedan behandlas med en anti-reflektiv lack för att minska kisellets reflektionsförmåga. På kiselskivorna läggs sedan tunna metalltrådar vilka kommer att fungera som elektriska ledare. Skivorna hettas sedan upp i en ugn där ett tunt lager fosfor läggs ovanpå. Fosfor skapar en negativ elektrisk laddning på ytan av skivorna. Kombinationen av den positiva laddningen i skivornas material och den negativa laddningen på ytan skapar en så kallad positiv - negativ övergång, eller PN övergång. Denna övergång är det som skapar spänningsfallet i solcellen och är fundamental för funktionen [12].

2.3 Solcellerna som användes 2019

Chalmers Solar Team använder monokrystallina kiselceller från företaget Sunpower. Modellen heter Maxeon Gen3 och är uppbyggd av tre lager, en koppargrund, ett väldigt tunt monokrystallint kiselager och slutligen ett anti-reflektivt glaslager. Kopparlagret gör att Maxeon Gen3-solceller blir mer flexibla och inte bryts lika lätt som andra solceller som har en annan metall som grund. Enligt tillverkaren så har dessa solceller en verkningsgrad kring 22,6 %, för varje grad över 45 °C sjunker verkningsgraden sedan med 0,29 %/°C vilket är mindre än temperaturkoefficienten på -0,4 %/°C som är ett standardvärde att räkna med för kiselceller [13]. Vid optimala mätomständigheter ger en solcell spänningen 0,64 V. Genom att montera flera av dessa i serie kan tillräckligt hög spänning för att driva en solbil ges, på Chalmers Solar Teams bil 2019 användes över 250 stycken.

Maxeon Gen3-solcellerna kan framförallt utnyttja solens strålar i våglängdsspektrummet 350-1000 nm. En solcell har arean 153 cm², väger 6,5 g och är ungefär 150 µm i tjocklek. Varje cell har 6 st små ytor på vardera 5,4 mm × 3,0 mm där små ledningar kan lötas på och leda vidare den elektricitet som skapats i solcellen [14].

2.4 Inkapsling av solceller

Det finns flera anledningar till varför solceller bör inkapslas. För det första är solceller väldigt tunna och ömtåliga så att det behövs ett mekaniskt skyddande lager som skyddar dem från att gå sönder. Solceller behöver också inkapslas för att skyddas från smuts, fukt och åldring orsakad av UV-strålning. En annan typ av inkapsling sker när flera solceller sätts samman till solpaneler. Detta sker genom att flera solceller lamineras med ett inkapslingsmaterial för att få större paneler som tillsammans genererar en större effekt [15]. Valet av inkapslingsmaterial är viktigt då det har en stor betydelse för hur verkningsgraden och andra önskvärda egenskaper påverkas.

2.5 Inkapslingsmaterial som används idag

Idag sker mycket forskning på material som kan bidra med de skyddande egenskaperna samtidigt som solcellens verkningsgrad behålls eller till och med ökas. Det vanligaste materialet inom inkapsling är etenvinylacetat (EVA) som varit mest populärt sedan 80-talet. Sedan dess har nya solceller med nya kemiska bindningar utvecklats och för dessa är ofta andra inkapslingsmaterial bättre. Nedan följer material som idag används kommersiellt för inkapsling av solceller. För varje material listas för- och nackdelar.

2.5.1 Etenvinylacetat (EVA)

Inkapsling med EVA är det mest använda inkapslingsmaterialet i världen idag, nära 80 % av alla solceller är inkapslade med EVA [16]. Materialet används framförallt som mellanskikt och kompletteras i regel med ytterligare inkapslingsmaterial. Nedan listas några för- och nackdelar med EVA [16] [17]:

Fördelar:

- Elastiskt
- Bra transmittans av ljus
- Bra fästförmåga
- Billigt
- Miljövänlig
- Lång livslängd

Nackdelar:

- Dålig UV-resistans
- Gulnar efter långvarig exponering

2.5.2 Polyvinyl butyral (PVB)

PVB är ett annat inkapslingsmaterial som också är väl använt inom industrin [18]. Även detta material bör kompletteras med ytterligare material på grund av dess förmåga att ta upp vatten vilket kan orsaka problem hos cellerna.

Fördelar:

- Bra transmittans av ljus
- Bättre mekaniska egenskaper än EVA
- Bra fästförmåga på solceller
- Miljövänlig

Nackdelar:

- Högt vattenupptag
- Hög applicerings-temperatur

2.5.3 Kisel

Kisel-baserade inkapslingsmaterial är bland de bästa inkapslingsmaterialen. Dess egenskaper är bra över alla kategorier och används idag främst inom rymdsektorn [19].

Fördelar:

- Bra kemiska egenskaper
- Bra mekaniska egenskaper
- Bra termiska egenskaper
- Bra optiska egenskaper

Nackdelar:

- Dyra
- Svåra att applicera, kräver komplicerade metoder.

2.5.4 Bridgestone World Solar Challenge

Eftersom tävlingen Bridgestone World Solar Challenge i Australien är en framstående tävling som representerar en bild av framtidens solcellsdrivna bilar för de många åskådarna, så lägger tävlingen stor vikt på miljövänlighet. Denna strävan konkretiseras i regelboken till tävlingen under sektion 2.4.1 där det specificeras att materialet på solcellerna ska ha låg miljögiftighet [20]. Dessa krav omöjliggör bland annat enligt reglerna användandet av galliumarsenid och kadmiumtellturid i eller runt solcellerna. En annan mycket viktig faktor när det kommer till solbilar i tävlingen är att de försöker att ha så lite solcellsarea som möjligt på ett högeffektivt fordon så att det går att konstruera en så liten bil som möjligt. En liten tvärsnittsarea i färdriktningen ger minskad blottad area, ger mer fördelaktig aerodynamik och minskad vikt vilket gör dramatisk skillnad.

För att få en bättre bild av vad som har använts under tidigare tävlingar och således vad som kan användas under framtida tävlingar så utfördes en mindre studie av de lag som placerat sig bra till under Bridgestone World Solar Challenge 2019. Det vinnande laget under detta år var Agoria Solar Team med bilen Bluepoint från Belgien. Deras bil använde sig av 2,64 m² of Azurspace Multijunction celler. Detta är en mycket hög-kvalitativ typ av solcell som bland annat används på satelliter i rymden.

2.5.5 Gochermann Solar Technology

När det kom till vilken typ av behandling som de bäst presterande lagen gjorde av sina solcellers inkapsling, så framhövdes Gochermann Solar Technology [21]. Gochermann tillhandahåller både solceller samt en unik icke-reflekterande ytbehandling. Denna icke-reflekterande yta består av mikrostrukturella pyramider med en höjd på cirka 5 μm . Pyramiderna fungerar på det sättet att den lilla mängd solstrålning som inte absorberas av ytan på pyramiden kommer att reflekteras till en kringliggande pyramid som fullständigt absorberar den reflekterade strålningen. Resultatet av strukturen blir att mer ljus absorberas ner i solcellerna och således genereras mer energi jämfört med en plan yta. Mot en plan yta med vertikalt inkommande solstrålar så reflekteras vanligen ca 4 % av solstrålarna iväg, denna unika ytbehandling reducerar denna reflektion till 0,3 %. Ytor så små som 5 μm har enligt Gochermann ingen påverkan på cellens aerodynamik [22].

3 Materialegenskaper

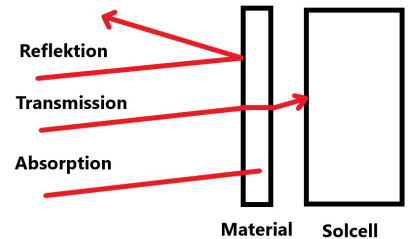
Nedan listas de materialegenskaper som är relevanta för projektet. För att ett material som uppfyller kraven och önskemålen skall kunna identifieras kommer nedan materialegenskaper undersökas.

3.1 Optiska egenskaper

Att materialet släpper igenom så mycket solljus som möjligt är väldigt viktigt för dess påverkan på verkningsgraden. De materialegenskaper som påverkar ljusets möjligheter att nå solcellens yta redovisas i denna del.

3.1.1 Transmission

Eftersom inkapslingsmaterialet kommer att vara emellan solen och solcellen så är det viktigt att så mycket som möjligt att solens strålar kan ta sig igenom materialet. Transmission är den materialegenskap som avgör hur stor andel av ljusets energi som kan penetrera inkapslingsmaterialet och användas som nyttig energi [23]. Transmission är när ljus färdas genom material utan att absorberas, reflekteras eller spridas ut. Inkapslingsmaterialets transmissionsförmåga är fundamental för solcellernas verkningsgrad. Med en hög transmission, i ett brett ljusspektrum, så når mer nyttig solenergi solcellen som sedan kan omvandlas till elektricitet.



Figur 1: Strålgångar av ljus vid reflektion, transmission och absorption genom material.

3.1.2 Reflektion

Reflektion är mängden ljus som träffar materialet och sedan inte transmitteras eller absorberas. Det reflekterade ljuset varierar i intensitet för olika våglängder och kan, som transmission, beskrivas med ett intensitetsspektrum. Material som deformeras under mekanisk eller termisk stress kan förlora sin transmissionsförmåga och bli mer reflektiva.

3.1.3 Spektrofotometri

Spektrofotometri kallas tekniken som används när transmission eller reflektion hos ett material mäts som en funktion av det inkommande ljusets våglängd. En spektrofotometer kan antingen bestå av en monokromator eller en interferometer. En monokromator är en spektrofotometer som filtrerar ut specifika våglängder och mäter sedan intensiteten för dessa. Genom att stegvis justera våglängden som monokromatorn mäter, så mäts ett intensitetsspektrum som beror av våglängden. Med hjälp av en ATR (Attenuated total reflectance) tillägg fås absorptionsspektrum för provet, vilket kommer visa ifall ett inkapslingsmaterial har hög transmission i de våglängdsspektrum som solcellen ger en hög spänning vid.

3.2 Mekaniska Egenskaper

För att klara av stenskott, vibrationer och andra mekaniska påfrestningar krävs att materialet har tillräckligt bra mekaniska egenskaper. De två viktigaste egenskaperna för att klara av dessa krav är specifik styvhet och styrka.

3.2.1 Specifik styvhet

Specifik styvhet är en materialegenskap som säger hur styvt materialet är i förhållande till dess densitet. Ett styvt material har hög elasticitetsmodul vilket innebär att den ändrar form väldigt lite då den belastas. Keramer är en av de materialgrupper som har högst styvhet medans polymerer till exempel är mer töjbara.

$$S_{styv} = \frac{E}{\rho} \quad (1)$$

Där E är elasticitetsmodulen, ρ är densiteten och S_{styv} är den specifika styvheten

3.2.2 Specifik styrka

Specifik styrka är en materialegenskap som säger hur starkt ett material är i förhållande till dess densitet. Styrkan hos ett material avgör hur mycket belastning det klarar av utan att deformeras plastiskt eller gå sönder. Ett starkt material deformeras vid hög belastning.

$$S_{styrka} = \frac{T_s}{\rho} \quad (2)$$

Där T_s är materialets brottgräns och S_{styrka} är den specifika styrkan.

3.3 Termiska egenskaper

För att materialet skall fungera under höga temperaturer krävs det att det har vissa termiska egenskaper. Nedan följer beskrivningar av de termiska egenskaper som är av intresse för materialet.

3.3.1 Smältpunkt

Smältpunkt är en viktig egenskap att undersöka eftersom solcellerna kan uppnå betydligt högre temperaturer än omgivningstemperaturen. För att säkerställa att materialen inte smälts eller får permanenta deformation så är det viktigt att materialen har en hög smältpunkt.

3.3.2 Användningstemperatur

Användningstemperatur säkerställer att materialen som undersöks är lämpliga att användas inom det önskade temperaturområdet under längre tid utan att det påverkas negativt av krympning eller annan deformation. Eftersom temperaturen kan uppgå till 45 °C i Australien vid årstiden som tävlingen pågår behövs en användningstemperatur som klarar detta med god marginal [24].

3.3.3 Värmeledning

Ett av de stora problemen med att täcka solceller med ett inkapslingsmaterial är att det finns en stor risk att solcellernas temperatur ökar. Även fotooxidationen, vilket är den process där solljusets ultraviolette strålning bryter ner polymerer, påskyndas av en hög temperatur. Därmed kommer en dålig värmeledning att påverka effektiviteten dubbelt negativt, på så sätt att solcellernas effektivitet kommer minskas av både en ökad temperatur och ett mer nedbrutet inkapslingsmaterial med försämrade egenskaper. Det är därför viktigt att inkapslingsmaterialet har så hög värmeledningsförmåga som möjligt [25]. Värmeledningsförmågan, κ , hittas i Fouriers lag som lyder:

$$q = -\kappa \Delta T \quad (3)$$

Där q är värmeflödet, ΔT är temperaturgradienten och κ är värmeledningsförmågan. Denna egenskap kommer inte att direkt mätas utan kommer att tas från datablad, dock kommer värmeledningens effekt påverka resultatet i mätningarna som utförs på inkapslade solceller.

3.4 UV-beständighet

Materialens UV-beständighet är intressant eftersom det är den avgörande faktorn för polymerers väderbeständighet. Solen i Australien är dessutom mycket stark och det är viktigt att inkapslingsmaterialen inte gulnar på grund av fotooxidation och blir mindre transparenta. Olika polymerer är olika känsliga för UV, dessutom används ibland UV-stabilisatorer som tillsats i kommersiella material, vilket gör många kommersiella material intressanta att undersöka för applikationen inkapsling av solceller [26].

Materials UV-beständighet kan undersökas med en väderometer. En väderometer är en kammare som möjliggör simulering av olika väderförhållanden. Solljus med specifik intensitet, temperatur, luftfuktighet och regn är några av de egenskaper som kan ställas in. Väderometern består av en kammare där prover kan läggas in och sedan utsättas för valda väderförhållanden. Det största kommersiella användningsområdet är att simulera långvarigt åldrande utomhus, där åldrandet kan accelereras ungefär 10-50 gånger [27]. Detta görs bland annat på uppdrag av företag för att testa hur produkter påverkas av t.ex stark sol eller fuktigt väder.

4 Metod

Till en början utformades en specifikationslista med hårda krav och önskemål som uppfyller kriterierna för Bridgestone World Solar Challenge och även huvudintressentens behov. Utifrån dessa kriterier sållades ett flertal material bort med hjälp av bland annat databasen GRANTA EduPack [28]. De material som kvarstod granskades mer omfattande teoretiskt och praktiskt.

Materialens egenskaper kontrollerades genom olika laborationer för att säkerställa att de uppnått kraven samt för att få fram det optimala inkapslingsmaterialet. Tillsammans med data från materialdatablad och resultat från laborationer kommer de bästa inkapslingsmaterialen för solceller att presenteras som alternativ till huvudintressenten.

Beslutet togs att helt utgå ifrån den egna metoden och inte undersöka material som används på marknaden om de inte dök upp under sållningen av material. Detta på grund att det antogs att de isåfall inte uppfyllde alla kraven på de sållningsparametrar som användes.

4.1 Sållning av material

Programvaran GRANTA EduPack är en unik resurs som finns att tillgå för materialstudier inom många olika typer av ingenjörskonst, design och hållbar utveckling. GRANTA tillhandahåller bland annat en omfattande databas med material och processinformation samt kraftfulla programvaruverktyg för material.

GRANTA EduPack användes i ett inledande stadium för att sålla bort den stora mängd material som inte lämpar sig för att användas till projektets ändamål genom att sätta olika krav på materialen. I den initiala sållningen sattes följande krav som är nödvändiga för att inkapslingsmaterialet skall klara av omständigheterna under tävlingens gång.

Tabell 1: Inledande materialkrav.

Smältpunkt	Minimum 120 °C
Optisk kvalitet	Optisk & transparent
UV-beständighet	Excellent & Bra
Vattentålighet	Excellent & Acceptabel

Eftersom EduPack hade vissa begränsningar kring materialdata så granskades de kvarstående materialen från den initiala sållningen. Här eliminerades icke-kommersiella material och material med transmittans under 80 %, se tabell 2 & 3.

4.2 Optiska egenskaper

Då materialet som används placeras ovanpå solcellen är en av de viktigaste egenskaperna hos materialen deras optiska egenskaper. För att mäta materialens transmissionsförmåga så användes en FTIR-spektrofotometer från Chalmers materialanalyslaboratorium för analyser av material. Mer om hur en spektrofotomet fungerar beskrivs i kapitel 3.1.3. FTIR-spektrofotometern kan med hjälp av ett ATR-tillägg mäta hur mycket av en utskickad IR-stråle som materialen absorberar [29].

Transmission beräknades sedan med hjälp av absorptionen enligt följande ekvation [30].

$$T = 10^{2-A} \quad (4)$$

Där T är hur mycket ljus som passerar materialet i procent och A är i absorptionsenheter Au.

4.3 Appliceringsmetoder

Inkapslingsmaterialen applicerades på solcellerna med hjälp av lim. Ett transparent sprejlim från märket UHU användes. Två olika metoder undersöktes - att limma på hela solcellen eller bara längs kanterna. I båda fall sprejades limmet på solcellerna varefter materialet lades på, detta eftersom solcellen utgjorde den mest stabila delen. För PMMA, som var en hård polymerskiva, gjordes tvärtom då det i detta fall var materialet som var mest stabil. För att minimera luftbubblor lades materialen på samtidigt som ett kort användes för att trycka materialet mot solcellen. Se figur 2.

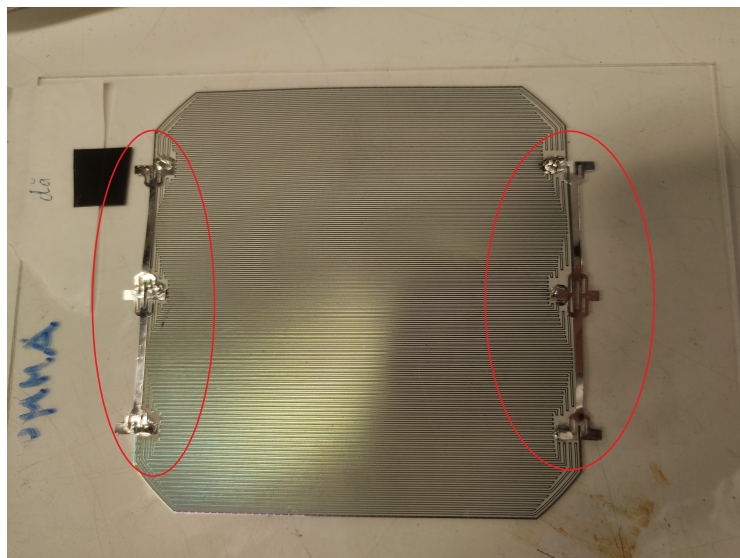


Figur 2: Applicering av filmer efter limning. Luftbubblor trycks ut med ett kort.

4.4 Mätningar i väderometer

För att undersöka de olika materialens väderbeständighet och solcellernas verkningsgrader i en kontrollerad miljö användes en Atlas Suntest XXL väderometer. Utrustningen lånades av RISE i Borås. För att mäta den spänning som solcellerna producerar användes en spänningsmätare. Mätaren var kopplad på ett par metallbryggor som var fastlödda på baksidan av solcellen vilket kan ses i figur 3. Till en början testades solcellerna i väderometern utan någon inkapsling för att få en referensmätning och därefter med material på. Nedan följer beskrivningar av hur dessa laborationer genomfördes. Tre olika mätningar genomfördes, en referensmätning med nakna solceller och två mätningar med inkapslade solceller.

Tävlingsförhållandena simulerades genom att väderometern ställdes in på samma temperatur, solintensitet och luftfuktighet som råder i Australien under en väldigt varm period och plats, 45 °C, 30% luftfuktighet och en irradians på 60 W/m².



Figur 3: Brygga på solcell. En på varje sida av cellen. Sladdar fästs här för spänningsmätning.

4.4.1 Mätning 1 - Referensmätning

Som en referensmätning utfördes en mätning på 4 solceller utan inkapslingsmaterial för att ha ett referensvärde att senare jämföra de inkapslade solcellerna med. Medelvärdena från mätresultaten från de tre solcellerna beräknades sedan för att kunna jämföras med de inkapslade solcellerna. Detta medelvärde kan ses i figur 9.

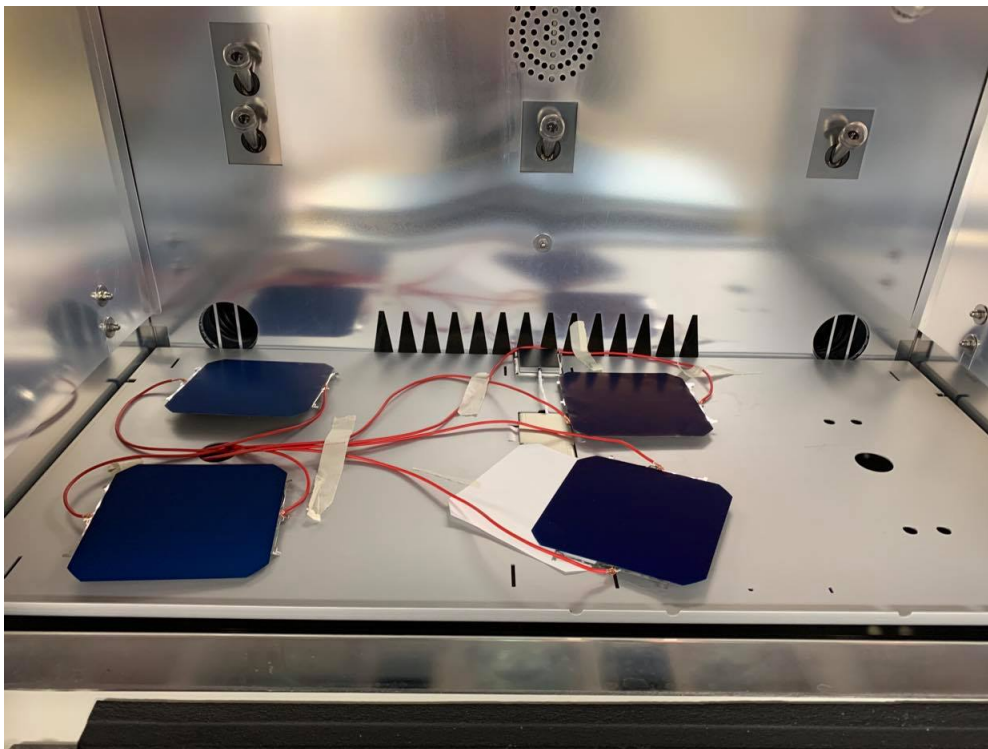


Figure 4: Solcellerna inuti väderometern helt utan inkapslingsmaterial.

4.4.2 Mätning 2 - Inkapslade solceller

På samma sätt som referensmätningen utfördes mättes de inkapslade solcellerna på RISE i Borås, med de fyra olika inkapslingsmaterialen. Detta med samma temperatur och fuktighetsinställningar samt under samma tidsperiod som under referensmätningen. Datan från de fyra olika solcellerna jämfördes med referensmätningens mätningen i tabell 5. Efter att denna mätning genomfördes sattes även en extra exponerings-timme in hos väderometern. Detta för att försöka utsätta solcellerna för extra exponering inför mätning 3.

4.4.3 Mätning 3 - Inkapslade och exponerade solceller

Mätning 3 utfördes på samma sätt som mätning 2 och utfördes även den på RISE i Borås, med de fyra olika inkapslingsmaterialen. Datan från de fyra olika solcellerna jämfördes med referensmätningen i tabell 5. Enda skillnaden var att fyra nya extra solceller med samma material lades in bredvid de riktiga proverna för att kontrollera så att dessa betedde sig visuellt likt de riktiga proverna i mätning 2.

5 Resultat

I detta kapitel redovisas de material som kvarstod efter de båda sållningarna samt resultaten från de laborationer som genomfördes i syfte att analysera dessa.

5.1 Kvarvarande material efter sållning

Tabell 2: Kvarvarande material efter första sållningen med GRANTA EduPack.

Material
FEP (ofyllt)
PCTFE (ofyllt)
PEI+PCE (slagkvalitet)
PEN (ofyllt, Amorf)
PLA (allmänna ändamål)
PMMA (slagmodifierad)
POE/POP (Propen-baserad, Shore A80)
Spectra 1000 polyetenfiber
TPU (Eter, aromatisk, Shore A70)
TPU (Eter, aromatisk, Shore D75)

Tabell 3: Kvarvarande material efter ytterligare granskning.

Material
FEP (ofyllt)
PEN (ofyllt, Amorf)
PMMA (slagmodifierad)

5.1.1 Tillhandahållna material

För att kunna utföra de praktiska mätningar på prioriterade material för inkapsling av solceller så införskaffades ett antal materialprover. Dessa prover, deras leverantörer samt deras egenskaper kommer att presenteras nedan för att få en överblick över vad dessa material har att erbjuda.

- Plexiglas XT 2 mm från Glasfiber & Plastprodukter AB.
Plexiglas XT tillverkas genom extrudering, är absolut färglöst och genomskinligt. Materialet har ett gott motstånd mot mildare syror.
- Fluorerad etenpropen (FEP) 0,05 mm från Fluortek AB.
FEP är en transparent termoplast med liknande egenskaper som Teflon®, hög transmittans och UV-resistans samt goda mekaniska egenskaper. Det tillhandahållna materialet är av DuPont som garanterar att materialet är rent och inte innehåller tillsatser.

- Polyetentereftalat (PET) 0,05 mm från DuPont.
PET är också en termoplast med mycket lika egenskaper som FEP, dock med sämre UV-resistans. Detta material fanns inte med i EduPack men rekommenderades av DuPont, just denna PET film är Mylar® 208 CLRPV som är en modifierad PET med bättre UV-resistans, utvecklad specifikt som en komponent till solceller.
- Polyetennaftalat (PEN) 0,05 mm från DuPont.
PEN är en polyester som likt FEP och PET har goda mekaniska och termiska egenskaper samt hög transmittans. Det tillhandahållna materialet är Kaladex® 2000.

5.1.2 Givna materialdata

Materialens mekaniska och termiska egenskaper är ingenting som uppmättes manuellt då de fanns angivna precist på företagens hemsidor för varje material. Den materialdata som ansågs vara mest väsentlig för projektet finns sammanställd i Tabell 4.

Tabell 4: Givna materialdata från datablad.

Material	Fluorerad etenpropen (FEP)	Mylar (PET)	Kaladex (PEN)	Plexiglas (PMMA)
Densitet [g/cm^3]	2,15	1,39	1,36	1,19
Styrka [MPa]	21	190	235	40
Specifik styrka [$\text{MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$]	9,8	136,7	172,8	33,6
Styvhet [MPa]	480	3790	3800	3300
Specifik styvhet [$\text{MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$]	223,3	2726,6	2794,1	2773,1
Smältpunkt [$^{\circ}\text{C}$]	260	254	269	180
Arbetstemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	-240 till 205	204	N/A	70
Värmeledning [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]	1172	N/A	N/A	1470

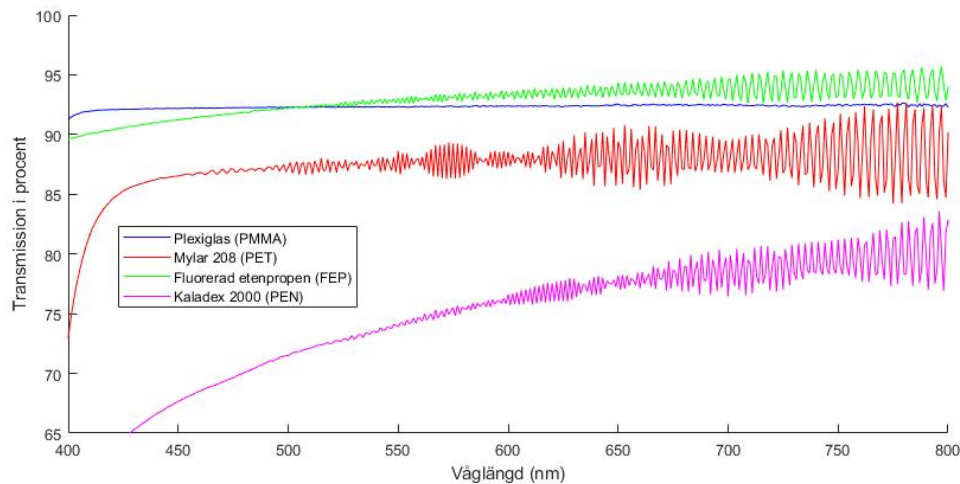
Notera: Information som inte fanns angivet i databladerna är skrivet N/A (Not Available).

5.2 FTIR-resultat

Nedan redovisas resultaten från FTIR-mätningarna.

5.2.1 FTIR-mätning på material före exponering i väderometer

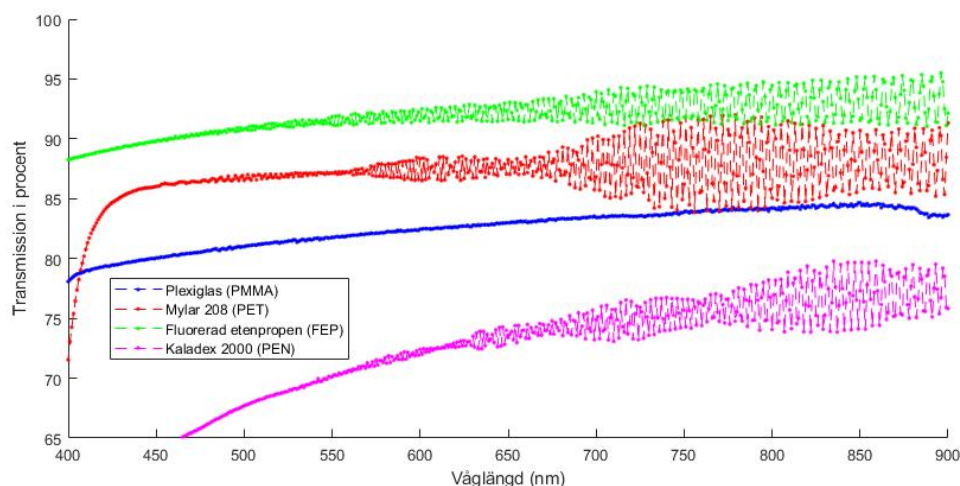
Innan materialen exponerades för värme och UV-strålning i väderometern utfördes en FTIR-mätning för att observera transmissionsförmågan hos alla material. Resultatet visas i figur 5.



Figur 5: Materialens transmissionsförmågan i procent över 400 till 800 nanometer före exponering av värme och UV-strålning.

5.2.2 FTIR-mätning på material efter exponering i väderometer

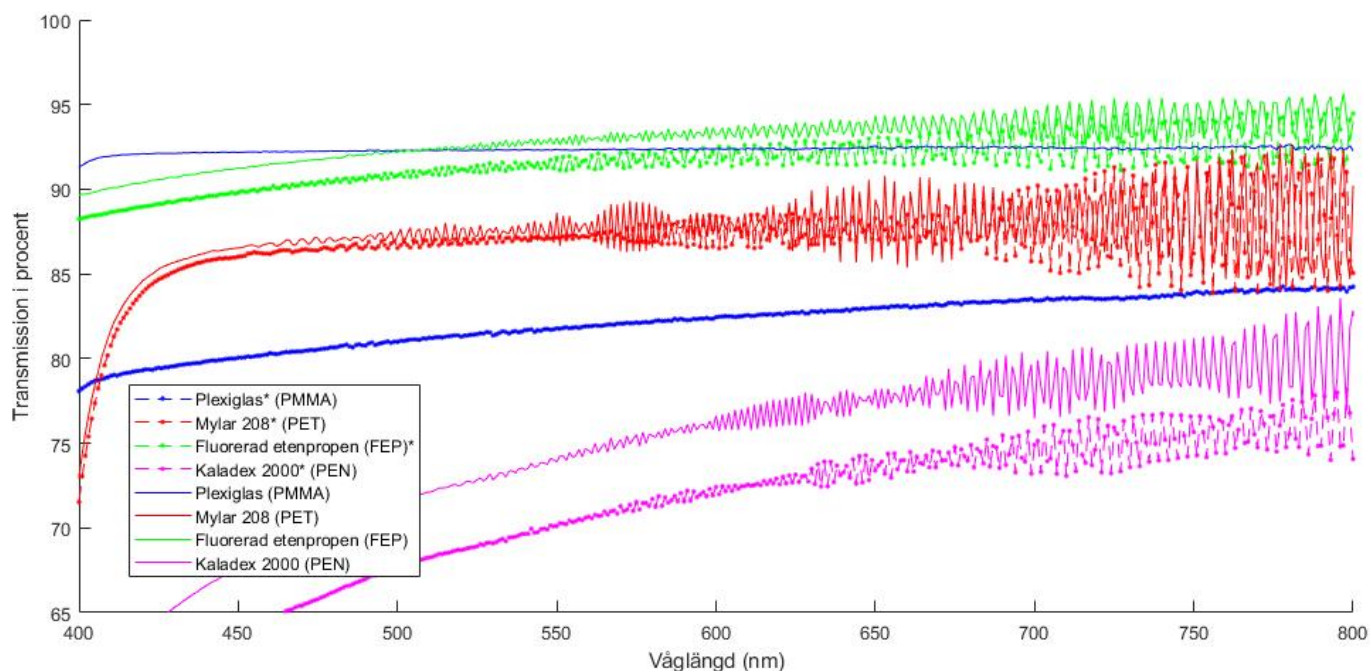
Efter att ha exponerat materialen för värme och UV-strålning i en väderometer utfördes en andra FTIR-mätning som visas i figur 6.



Figur 6: Materialens transmissionsförmågan i procent över 400 till 800 nanometer efter exponering av värme och UV-strålning.

5.2.3 Jämförelse av FTIR-resultat

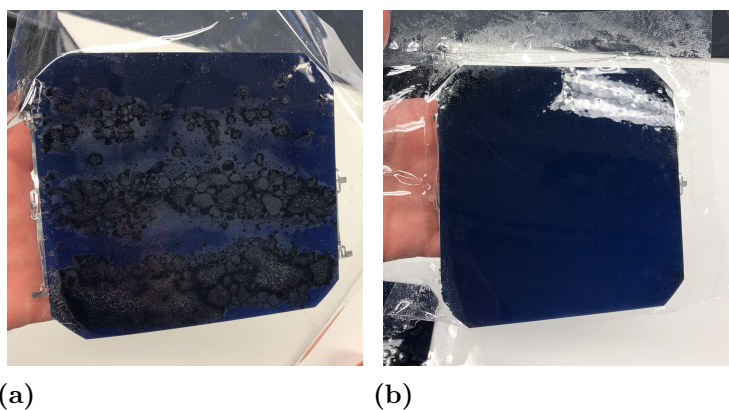
I figur 7 presenteras båda FTIR-mätningarna tillsammans för att se hur de påverkas.



Figur 7: Materialens transmissionsförmågan i procent över 400 till 800 nanometer. Mätningar före exponering visas med heldragna linjer och efter exponering i streckade linjer.

5.3 Applicering

Appliceringen av materialen skedde genom två olika metoder, limning på hela solcellen samt limning på kanterna av solcellen. Därefter lades materialet på och luftbubblor trycktes undan med hjälp av ett kort.



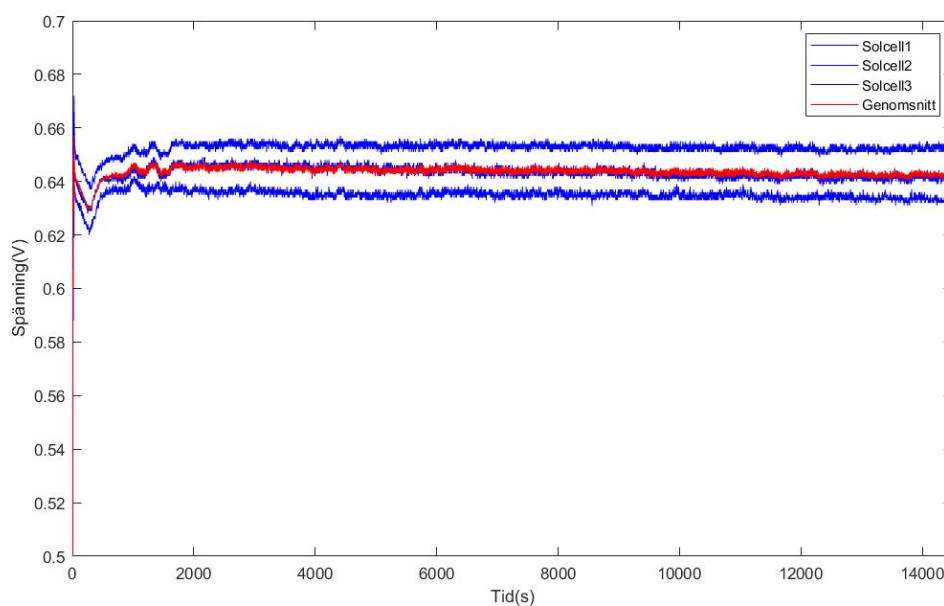
Figur 8: a: Limning på hela solcellen, b: Limning på kanten av solcellen.

5.4 Väderometer

Samtliga mätningar utfördes i en väderometer hos RISE i Borås. Mätning 2 och 3 var med samma inkapslade solceller.

5.4.1 Mätning 1 - Referensmätning

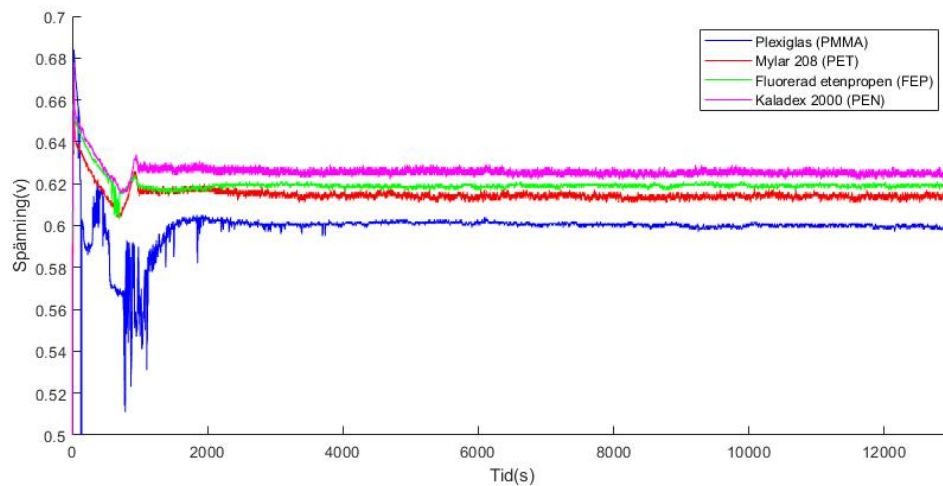
Resultat från referensmätningen och genomsnittet av spänningsfallet över solcellerna kan ses i figur 9.



Figur 9: De tre blå kurvorna är spänningsfallet över tre olika solceller utan inkapsling. Den röda linjen är genomsnittet av de blå linjerna.

5.4.2 Mätning 2 - Inkapslade solceller

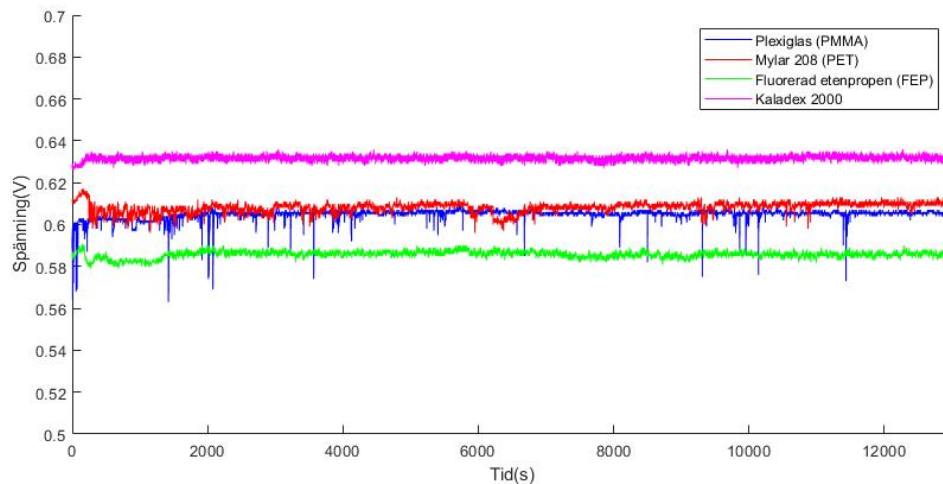
I figur 10 visas resultatet för den första exponeringen av de inkapslade solcellerna. Tiden 0-2000 sekunder är tiden det tog för kammaren att ställa in temperaturen inuti kammaren.



Figur 10: Spänning som funktion av tiden för PMMA, PET, FEP och PEN i en väderometer.

5.4.3 Mätning 3 - Inkapslade och exponerade solceller

I figur 11 visas resultatet för den andra exponeringen av de inkapslade solcellerna.

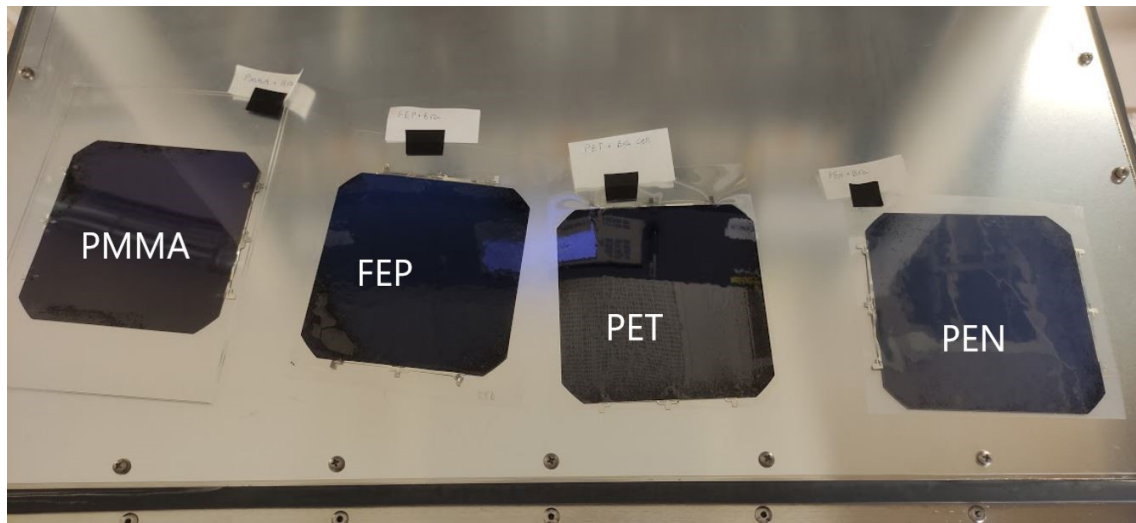


Figur 11: Spänning som funktion av tiden för för PMMA, PET, FEP och PEN i en väderometer.

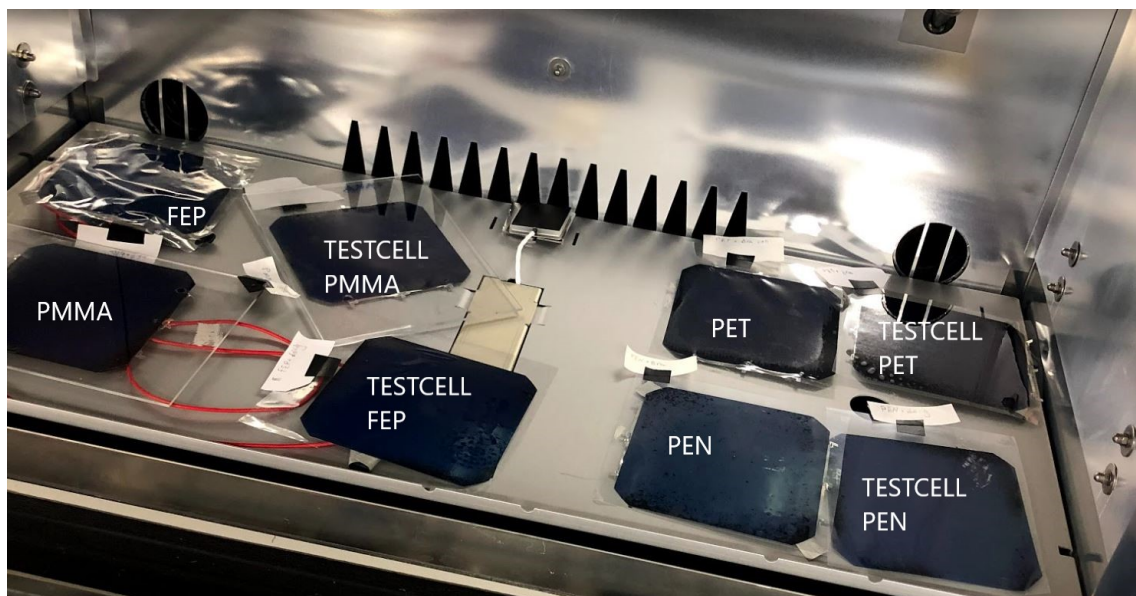
Notera: En spricka i PMMA är troligen anledningen till de tillfälligt, plötsligt låga värdena i figuren.

5.5 Visuellt resultat

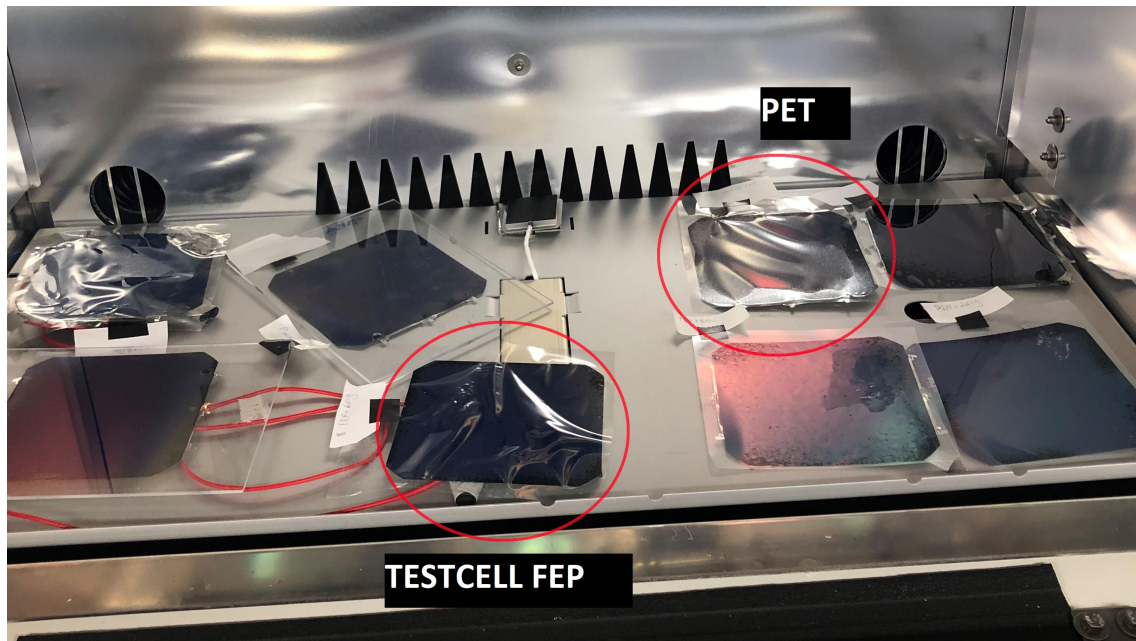
Utöver mätdata utgör det visuella resultatet en viktig del av laborationen då faktorer som inte kan ses i data kan ses rent visuellt. Inför mätning 3 lades 4 extra testceller in, med samma material som de fyra solceller som mätserierna är utförda på vilket kan ses i figur 13. Detta gjordes för att möjliggöra en senare visuell jämförelse.



Figur 12: Alla 4 inkapslade solceller innan mätningar.



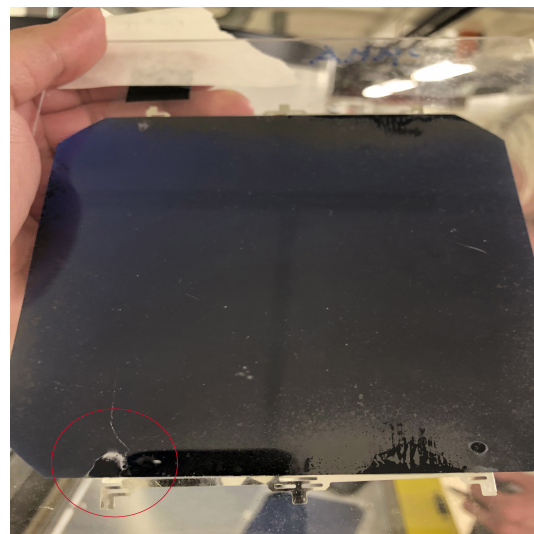
Figur 13: De fyra inkapslade solcellerna från mätning 2 samt 4 extra testcellerna innan mätning 3.



Figur 14: Samma åtta solceller som i figur 13 efter mätning 3.



(a)



(b)

Figur 15: a: Spricka i PMMA efter mätning 2. b: Spricka i PMMA-testcellen efter mätning 3.

6 Diskussion

I detta kapitel kommer resultaten diskuteras för att frågeställningarna skall kunna besvaras.

6.1 Kvarvarande material efter sällning

Den första sällning av materialen gav oss en generell bild av vilka typer av material som har hade potential att användas som inkapslingsmaterial. Då EDUPACK inte har kompletta datablad för alla material var det nödvändigt att även genomföra en särskild granskning. I denna granskning eliminerades ett flertal material som hade liknande egenskaper men betydligt sämre transmittans, den egenskap som ansågs mest viktig för detta projekt. Denna granskning gjorde det också möjligt att fokusera på de tre mer intressanta materialen.

Det kan observeras att inga av de tidigare kommersiellt använda materialen för beläggning av solceller var kvar efter all sällning och granskning. Troligen kan detta bero på att projektet har begränsade ekonomiska möjligheter eller att inkapslingsmaterialen oftast används på billigare solceller som lämpar sig för andra applikationer. En annan förklaring kan vara att det i många fall används flera olika lager av inkapslingsmaterial och att inte ett av dessa material själv kunde uppfylla kraven.

6.2 Materialegenskaper

I tabell 4 listas data taget från de olika materialens datablad.

Specifik styrka och styvhet är två viktiga egenskaper för att materialet ska klara de mekaniska påfrestningar som det utsätts för under körning. Anledningen till att det valdes att undersöka de specifika värdena och inte bara styrka och styvhet är att densiteten är mycket viktig i detta fall. Att inkapslingsmaterialet är så lätt som möjligt är väsentligt för att bilen ska kunna köra så energisnålt som möjligt. De material som har bäst mekaniska egenskaper är PET och PEN. FEP har sämst värden vilket beror på dess höga densitet men framförallt låga styrka och styvhet. PMMA har bra specifik styvhet men bristfällig specifik styrka. Detta innebär att PMMA riskerar att deformeras och gå sönder. Det är viktigt med en kombination av bra specifik styvhet och styrka för att materialet både skall klara att skydda solcellerna från stenskott eller en tappad skruvmejsel, men samtidigt får det inte vara så styvt att det riskerar att spricka på grund av exempelvis alla vibrationer materialet utsätts för när bilen kör.

Användningstemperatur och smältpunkt är två termiska egenskaper som är viktiga att undersöka för att försäkra sig om att inkapslingsmaterialen kommer att behålla sina egenskaper och klara av värmen som de skall utsättas för. Dessa egenskaper hör ihop eftersom den maximala arbetstemperaturen i regel ligger ett antal grader under smälttemperaturen. De material som presterar bäst i denna kate-

gorin är PET, PEN och FEP. Alla tre har en smältpunkt på runt 260 °C och bör därmed inte riskera att smälta trots höga temperaturer och solstrålning. För FEP och PET ligger den maximala arbetstemperaturen ungefär på 205 °C och det kan antas att PEN har en liknande arbetstemperatur trots att detta inte stod i databladet. PMMA hade en maximal arbetstemperatur på 70 °C vilket kan bli problematiskt då det är möjligt att materialet kommer upp i denna temperatur. Solcellernas mörka yta, stark sol och 45 °C utomhustemperatur som antagits, kan leda till en yttemperatur på 70 °C, speciellt om bilen står still i solen.

Materialens värmeledning hittades bara i två av databladerna och det är därför svårt att dra någon slutsats om vilka material som presterar bäst inom detta område. Det enda som kan sägas är att PMMA hade högre värmeledningsförmåga än FEP och är därmed bättre inom detta område.

Sammanfattningsvis har PEN och PET klart bättre värden på de materialegenskaper som togs fram med hjälp av datablad än FEP och PMMA.

6.3 FTIR-resultat

Figur 5 visar att FEP och PMMA har bästa transmissionförmågan bland alla materialen i nyskick. Figur 6 visar att alla material förutom PET har förlorat en del av sin transmissionsförmåga efter att ha exponerats för värme, fukt och UV-strålning i väderometern. Transmissionen hos PMMA försämrades mest av exponeringen.

6.4 Applicering

Den första metod som testades var att limma på hela solcellens yta. Det visade sig att limmet blev svart när de hamnade på ytan och dessutom utvecklades det luftfickor under stelningssfasen. Resultatet av första appliceringen blev som syns i figur 15, en svart yta med luftfickor. För att undersöka hur stor påverkan på verkningsgraden detta hade kopplades spänningsmätaren till solcellen. En referensmätning gjordes även innan limningen och visade att solcellerna, med hjälp av rummets belysning, producerade en spänning på 0,55 V. Efter att FEP hade limmats på den första solcellen sjönk spänningen till 0,50 V. Detta visar att både limmet och materialet tillsammans minskade verkningsgraden med 10 %. Denna siffra ses dock bara som en fingervisning då mätningen skedde i en okontrollerad miljö med befintlig belysning. Mätningen var dock givande då den visade att, trots att limmet som täckte solcellens yta blev svart, så fungerade solcellen fortfarande relativt bra.

Därefter undersöktes metoden att bara limma på kanterna. I och med att limmet var i sprejform så riktades sprejstrålen precis utanför solcellen så att limmet som hamnade på solcellens kanter var mindre droppar. Denna metod användes för att minimera mängden lim som täckte solcellens yta, samt för att få en mer kontrollerad limprocess. Resultatet blev som syns i figur 15, en mycket slätare och klarare yta. Även för denna metod mättes producerad spänning före och efter

limning. Resultatet i denna mätning visade att spänningen skiljde sig mycket lite från mätningen på nakna solcellen, vilket indikerar att denna metod var bättre då verkningsgraden sjönk mindre.

Direkt efter limningen kunde det konstateras att materialet satt fast bra för båda metoder. Detta kunde konstateras eftersom materialet inte lossnade från solcellen då inkapslingsmaterialet försiktigt lyftes i kanterna. På grund av att verkningsgraden påverkades mindre då bara kanterna limmades beslutades det därmed att metoden med limning på hela solceller ska undvikas. Alla solceller som användes i mätningarna nedan har därmed materialet applicerats med lim endast i kanterna.

6.5 Visuellt resultat

Detta kapitel behandlar de observationer som kunde genomföras direkt efter mätningarna hos RISE. Observationerna samt möjliga orsaker till dessa fenomen kommer att diskuteras.

6.5.1 Plexiglas (PMMA)

Några observationer som kunde göras på PMMA var att solcellen spruckit i hörnet vilket syns i figur 15a och figur 15b. Detta beror troligvis på att PMMA expanderat på grund av värmen och därmed fått solcellen att spricka.

6.5.2 Fluorerad etenpropen (FEP)

En jämförelse av figur 12 och figur 13 visar hur FEP har glidit av solcellen så att luft har kommit mellan materialet och solcellen. FEP har goda termiska egenskaper men däremot en väldigt låg friktion vilket troligtvis är anledningen till varför limmet släppt materialets yta vid uppvärmingen.

6.5.3 Mylar 208 (PET)

Vid jämförelse av figur 12 och figur 13 syns även här att luft kommit in under filmen. PET-filmen verkar ha krympt en aning vilket har lett till att den inte längre var limmad utmed kanterna. Att PET-filmen skulle krympa var i någon mån väntat med tanke på att det finns angivet i databladet hur materialet förkrymper sig efter 30 minuter i 150 °C, men att krympningen blev så stor var oväntat eftersom temperaturen var långt under 150 °C.

6.5.4 Kaladex 2000 (PEN)

PEN var det material som satt på bäst och mellan mätningarna så syntes ingen direkt skillnad vilket kan ses vid jämförelse av solcellen före, figur 12, och efter, figur 13.

6.6 Analys av mätdata

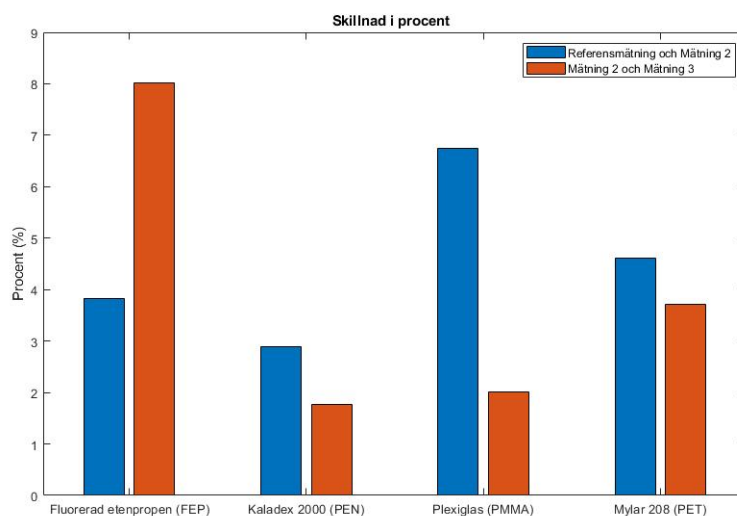
I tabell 5 presenteras alla mätningar som har utförts i väderometern som ett genomsnitt över ett tidsintervall av 3000 sekunder till 14000 sekunder. De första 3000 sekunderna räknades inte med på grund av att väderometern började samla in data under tiden som den ställde in sig på inställningarna som skulle testas. Från Figur 10 och 11 är det tydligt att mätdatan som samlats in är ungefärligt konstant och därför används medelvärdet av mätserierna för materialen för att analysera den insamlade datan. Det är tydligt av tabell 5 att alla material förlorar lite spänning mellan varje RISE-mätning, och att den förlusten är olika för olika material. Vad denna sänkning av verkningsgraden beror på är svårt att avgöra och måste ses som en felkälla. Det intressanta är iallafall att solcellernas verkningsgrader är konstanta under varje mätning vilket indikerar att verkningsgraden inte snabbt sjunker när solcellerna utsätts för stark UV-strålning och värme.

Det kan också konstateras att PEN var det material vars inkapslade solcells verkningsgrad sjönk minst, både vid mätning 2 och 3. PMMA var det material som påverkade verkningsgraden mest i mätning 2 och solcellen inkapslad med FEP fick kraftigt försämrade verkningsgrad i mätning 3.

Genom att utföra fler mätningar på RISE skulle en tydligare bild om materialens nedbrytning kunna göras. Detta hade gett en bättre bild av materialens prestanda under hela bilens hela livslängd och skulle minimerat felkällorna. Det skulle varit intressant att se om en försämring av verkningsgraden, likt den mellan mätning 2 och 3 skulle fås även vid en ytterligare mätning eller om förlusterna berodde på hur materialen hanterats mellan de två mätningarna till exempel.

Tabell 5: Tabell över genomsnittliga uppmätta värden på solceller. Först utan inkapslingsmaterial och sedan med PEN, PMMA, PET och FEP. Den genomsnittliga skillnaden mellan referensmätningen och mätning 2 samt skillnaden mellan mätning 2 och 3 på RISE. Alla mätningar har enheten V. Alla förändringar i volt och procent representerar en minskning.

Material	Referens-mätning	Mätning 2	δV_1	$\delta\%$	Mätning 3	δV_2	$\delta\%$	Total $\delta\%$
PEN	0.644 ± 0.02	0.625	0.0186	2.9	0.614	0.0111	1.8	4.6
PMMA	0.644 ± 0.02	0.600	0.0434	6.7	0.588	0.0121	2.0	8.6
PET	0.644 ± 0.02	0.614	0.0297	4.6	0.591	0.0228	3.7	8.2
FEP	0.644 ± 0.02	0.619	0.0247	3.8	0.569	0.0497	8.0	12



Figur 16: Procentuell minskning av spänning mellan referensmätningen och mätning 2 i blått samt differensen mellan mätning 2 och 3 i rött

6.7 Materialens totala prestanda

Allmänt gäller att de material som presterar bra i FTIR-mätningen presterar sämre i väderometer-mätningen. Hypotesen var den omvända, att materialen med hög transmittans även skulle påverka verkningsgraden minst. Att transmittansen var den avgörande materialegenskapen stämde därmed inte helt utan andra faktorer visade sig ha större inverkan. Värmen som solcellerna utsattes för i väderometern har antagligen haft en stor inverkan trots att de 45°C som användes är långt ifrån materialens smältpunkter och inom deras arbetstemperaturer.

6.7.1 Plexiglas (PMMA)

Att PMMA ändrade karakteristik under väderometer-mätningens gång är med stor sannolikhet på grund av värmen som materialet utsattes för under mätningarna. PMMA var det material som hade lägst arbets- och smälttemperatur vilket blev synligt i både väderometer- och den andra FTIR-mätningen. Troligen är den ändrade karakteristiken orsaken till att verkningsgraden på solcellen blev så låg trots påvisad hög transmission i första FTIR-mätningen. Då materialet värmdes upp skedde en mindre expansion av materialets area, vilket ofta brukar hända då material värms upp. Eftersom PMMA var fastlimmat på solcellen så resulterade denna expansion i mindre sprickbildningar solcellens yta. Sprickbildningen var troligtvis en bidragande faktor till den lägre verkningsgraden samt de mindre stabila mätvärdena som redovisades i figur 11. Att detta var det enda av materialen där denna sprickbildning skedde berodde troligtvis på att materialprovet i fråga var många gånger tjockare än de andra materialen och således kunde materialet utöva större dragkraft i solcellen som var fastlimmad på PMMA-skivan. Att materialet skulle lossnat från cellerna var inget som observerades under testerna och således verkar limmet som användes vara väl utformat för att appliceras tillsammans med

PMMA. En fördel med detta material är möjligheten att enklare täcka en större area av solceller med större skivor av PMMA. Materialet hade bra specifik styvhet men dålig specifik styrka och riskerar därför att spricka på grund av plastisk deformation om det utsätts för alla vibrationer som en solbil måste klara av.

6.7.2 Fluorerad etenpropen (FEP)

Trots att FEP presterade bäst i FTIR-mätningen presterade den näst bäst i första RISE-mätningen och sämst i den andra. Detta beror troligtvis på att materialet inte kunde fästas bra med limmet, vilket resulterade i att varmluft kom in under filmen och skapade en bubbla. FEP har som materialegenskap en väldigt låg friktion vilket innebär att mer specifika appliceringsmetoder behövs för att kunna fästa materialet, något som inte fanns tid nog att få tillgång till. Med optimala appliceringsmetoder hade FEP troligtvis gett ett bättre resultat och dess låga friktion hade varit fördelaktigt på solcellerna, då tävlingen sker i ökenklimat där det förekommer mycket damm. Detta innebär att FEP har bra potential att presteras bäst om en passande appliceringsmetod används. En stor nackdel med FEP är dock dess dåliga mekaniska egenskaper som troligen kommer göra materialet olämpligt att använda på en solbil då det finns risk att materialet inte kommer skydda solcellerna tillräckligt bra och själv gå sönder.

6.7.3 Mylar 208 (PET)

PET visade sig prestera ungefär genomsnittligt i FTIR-mätningen men i väderometern presterade den näst bäst när det kom till den totala procentuella förändringen, som visas i tabell 5. Detta kan bero på att PET inte deformerades lika mycket som FEP och PMMA, där deformationerna av dessa material lär ha påverkat resultatet mer. De visuella skillnader som observerades på PET innan och efter var uppkomsten av en luftbubbla i mitten av cellen som beror på att materialet krympte. Trots att PET har hög smältpunkt så har den en glasomvandlingstemperatur på 60 °C vilket är den temperatur där krympning börjar.

6.7.4 Kaladex 2000 (PEN)

PEN var det material som presterade bäst i båda väderometermätningarna. Detta trots att materialet hade lägst transmission utifrån FTIR-mätningarna. Detta kan bero på att materialet hade väldigt bra termiska egenskaper och påverkades inte synligt av värmen. Solcellen inkapslad med PEN såg likadan ut före och efter väderometer-mätningarna vilket betyder att materialet kommer att fungera bra i värmen med vald appliceringsmetod. PEN hade även bäst mekaniska egenskaper. Ett problem med PEN kan dock vara att transmissionen skulle bli för låg om ett tjockare lager behövs för att skydda solcellerna tillräckligt under körning. Samtidigt så gör de höga värdena på specifik styrka och styvhet att ett tunnare lager kommer att behövas jämfört med FEP och PMMA.

7 Slutsatser och rekommendationer

I detta kapitel kommer de slutsatser som kunde dras utifrån utförda laborationer och analyser diskuteras. Rekommendationer för vidare forskning inom området kommer också att presenteras.

7.1 Kvarvarande material

Slutsatsen som kan dras av detta kandidatarbete är att PEN var det överlag bästa inkapslingsmaterialet av de fyra som testats. Materialet prestanda under valda väderförhållandena var högt, det vill säga att materialet deformerades minst samt gav den högsta genererade spänning hos dess solcell. PEN hade därför antagligen presterat bäst som inkapslingsmaterial för Chalmers Solar Team och deras solbil.

7.2 Förslag på vidare forskning

Detta kandidatarbete har på många sätt bidragit till en diskussion och ett bra underlag för vidare forskning på ämnet inkapsling av solceller. Eftersom arbetet endast behandlar en del av detta ämne finns många andra möjliga frågeställningar och infallsvinklar kvar att undersöka. Nedan följer några punkter med förslag till vidare forskning.

7.2.1 Appliceringsmetoder

Som diskuterats så bidrog appliceringsmetoden sannolikt till att sänka verkningsgraden för de solceller vars inkapslingsmaterial ändrade karaktär i värmen. Att undersöka andra metoder där materialet inte appliceras direkt på solcellerna hade därför varit intressant. Genom att ha ett mellanlager av luft till exempel så hade inte solcellerna påverkats av inkapslingsmaterialens karaktärsförändringar. Ett annat förslag är att undersöka alternativ där inkapslingsmaterialet först behandlas för att öka friktionen och på så sätt minska risken att det lossnar. I och med att de inkapslade solcellerna ska sitta på en bil så hade det också varit intressant att undersöka hur bra materialet sitter kvar på solcellen vid stark vind.

7.2.2 Tjocklek på material

Ett annat förslag för vidare forskning skulle kunna vara att försöka få tag på samma typ av material fast i varierande tjocklekar. Detta var något som diskuterades i detta projekt men det beslutades om att arbetet med att ha flera material och flera tjocklekar blev för stort. Dels på grund av för många mätningar men även att alla material inte finns lättillgängliga i flera olika tjocklekar. Därför skulle ett intressant arbete kunna göras på till exempel PEN, som befanns vara bäst och optimera tjockleken. Sedan skulle även skyddsaspekten kunna vägas in, därmed en övervägning av hur tjockt ska det vara för att skydda mot väder och vind kontra hur mycket energi som förloras vid försämrad aerodynamik per millimeter tjocklek.

7.2.3 Inkapsling av panel

Då detta projekt endast fokuserar på inkapslingsmaterial till en enskild solcell så har frågan om att föra samman dessa enskilda solceller till en solpanel ännu inte diskuterats. Som tidigare nämnt i rapporten behöver solceller sammansättas till större paneler för att generera någon märkvärd effekt och baserat på våra tester så finns det potential att använda tre av materialen till denna sammansättning. PMMA har goda mekaniska och optiska egenskaper om det inte deformeras av höga temperaturer vilket innebär att det inte kan ha direktkontakt med solcellerna. Att fästa en PMMA skiva på en ram över flera solceller hade löst problemet med sprickbildning samtidigt som dess tjocklek erbjuder ett gott skydd mot omgivningen. PEN och FEP kan också användas för att sammansätta flera solceller då de visar goda optiska egenskaper men den tunna filmen ger ett betydligt mindre skydd mot omgivningen än PMMA. Filmerna skulle även behöva andra appliceringsmetoder för större sammansättningar av solceller för att bland annat undvika bildandet av luftfickor.

7.2.4 Materialets beteende i värme

Oberoende av materialens smält- och arbetstemperaturer förekom det en del deformationer efter några timmar i väderometern som var inställd på 45°C. Antagligen blir cellerna varmare än inställningen men på grund av de höga smältpunkterna och arbetstemperaturerna på filmerna var dessa deformationer ändå inte väntade. Att undersöka materialens glasomvandlingstemperatur är också viktigt då det är den temperatur som krympning sker vid, vilket oftast är betydligt lägre än dess smältpunkt. Ett exempel är PET som har en glasomvandlingstemperatur vid 60°C men smältpunkt på över 200°C. Genom att även undersöka materialens glasomvandlingstemperatur och mäta temperaturen på solcellernas yta hade en djupare förståelse för materialens beteende i väderometern kunnat fås.

Litteraturförteckning

- [1] R. Harrington, "This incredible fact should get you psyched about solar power", *Business Insider*, 2015
<https://www.businessinsider.com/this-is-the-potential-of-solar-power-2015-9?r=US&IR=T>
Hämtad 06-03-2021
- [2] MyMoney, "Solcellsbil, framtidens miljöbil?", *MyMoney*, 2019
<https://www.mymoney.se/vi-tipsar/bil/miljo/solcellsbil>
Hämtad 2021-03-08
- [3] Pelle Boberg, "Utsläpp av växthusgaser från inrikes transporter", *Naturvårdsverket*, 2021
<https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/utslapp-av-vaxthusgaser-fran-inrikes-transporter/>
Hämtad 2021-03-08
- [4] WorldSolarChallenge, "Regulations"
WorldSolarChallenge, 2021
<https://worldsolarchallenge.org/the-challenge/regulations>
Hämtad 2021-05-13
- [5] Denis Lenardic, "Photovoltaics - Historical Development"
pvresources, 2015
<https://www.pvresources.com/en/introduction/history.php>
Hämtad 2021-03-08
- [6] Max Roser, "Why did renewables become so cheap so fast? And what can we do to use this global opportunity for green growth?"
OurWorldInData, 2020
<https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>
Hämtad 2021-03-08
- [7] Linda Nohrstedt. "Guide: Solcellernas tre generationer"
NyTeknik, 2017
<https://www.nyteknik.se/energi/guide-solcellernas-tre-generationer-6880611>
Hämtad 2021-03-08
- [8] Jonatan Leman, "Så funkar solceller - verkningsgrad, effekt och energi"
Vattenfall 2021
<https://www.vattenfall.se/fokus/hus-hem/solpaneler-verkningsgrad/>
Hämtad 2021-05-13
- [9] Office of Energy Efficiency Renewable Energy, "Crystalline Silicon Photovoltaics Research"
Department of Energy, 2021

- <https://www.energy.gov/eere/solar/crystalline-silicon-photovoltaics-research>
Hämtad 2021-03-08
- [10] Anders, “BASFakta - solceller”
jamforsolceller, 2016
<http://jamforsolceller.se/snabba-fakta/basfakta-solceller/>
Hämtad 2021-03-08
- [11] Effecta, “Moduler”
Polykristalina solceller, 2021
<https://solceller.effecta.se/solkraft/moduler>
Hämtad 2021-03-08
- [12] GreenMatch, “How Are Solar Panels Produced?”
GreenMatch, 2014
<https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/12/how-are-solar-panels-made>
Hämtad 2021-04-22
- [13] SunPower, “SunPower Maxeon Solar Panels”
sunpower.maxeon.com/int/, 2021
<https://sunpower.maxeon.com/int/solar-panel-products/sunpower-maxeon-solar-panels>
Hämtad 2021-03-08
- [14] SunPower, “GEN III SOLAR CELLS”
MAXEON™, 2017
https://us.sunpower.com/sites/default/files/sp-gen3-solar-cell-ds-en-a4-160-507816f_0.pdf
Hämtad 2021-03-08
- [15] Bluesolaria, “Solar Panel Encapsulation.”, BlueSolaria.com
<https://www.bluesolaria.com/custom-348.html>
Hämtad 2021-01-29
- [16] S. Jiang, K. Wang, H. Zhang, Y. Ding, och Q. Yu, “Encapsulation of PV Modules Using Ethylene Vinyl Acetate Copolymer as the Encapsulant.”, *Macromol*, 2015 [Online] Tillgänglig: <https://doi.org/10.1002/mren.201400065>
- [17] A. Uddin, M. Upama, H. Yi, och L. Duan, “Encapsulation of Organic and Perovskite Solar Cells: A Review,” *Coatings* vol. 9, 2019 [Online]. Tillgänglig: <http://dx.doi.org/10.3390/coatings9020065>
- [18] Niclas D. Weimar, “EVA and PVB”, *sinovoltaics.com*
<https://sinovoltaics.com/learning-center/materials/eva-and-pvb/>
Hämtad 2021-03-15
- [19] CHT Group, “Silicone Encapsulation Potting for Electronics”, *cht-silicones.com*
<https://www.cht-silicones.com/products/encapsulants>

Hämtad 2021-03-04

- [20] Bridgestone World Solar Challenge, “2021 REGULATIONS”
<https://www.worldsolarchallenge.org/the-challenge/regulations>
Hämtad 2021-03-10
- [21] Gochermann Solar Technology, “GaAs or Si solar cells of the highest efficiency, from leading cell manufacturers”
<https://www.gochermann.com/gaas-or-si-solar-cells/>
Hämtad 2021-03-08
- [22] Gochermann Solar Technology, “Unique: a non-reflective module surface for increased power output”
<https://www.gochermann.com/non-reflective-module-surface/>
Hämtad 2021-03-08
- [23] Revic, “Light Transmission”, revicoptics.com
<http://www.revicoptics.com/research/light-transmission/>
Hämtad 2021-04-18
- [24] Bureau of Meteorology, “Seasonal Climate Summary for Australia”, 2021
<http://www.bom.gov.au/climate/current/season/aus/summary.shtml#temperatures> Hämtad 2021-03-30
- [25] B. Lee, J. Liu, B. Sun, C. Shen och G. Dai, “Thermally conductive and electrically insulating EVA composite encapsulant for solar photovoltaic (PV) cell”, *Express Polymer Letters*, Vol.2, No.5 (2008) 357–363, 2008.
DOI: 10.3144/expresspolymlett.2008.42
- [26] Nationalencyklopedin, “Nedbrytning av solceller p.g.a. uv-strålning”
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/uv-nedbrytning>
Hämtad 2021-03-08
- [27] ATLAS, “ATLAS SUNTEST XXL+ ”, atlas-mts.com
<https://www.atlas-mts.com/products/standard-instruments/xenon-arc-weathering-test/suntest/xxl>
Hämtad 2021-03-15
- [28] Ansys, “Ansys Granta EduPack”, ansys.com
<https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>
Hämtad 2021-03-08
- [29] M. Bradley, “The FT-IR Transmission Technique for Measuring Polymers”, “Thermo Fisher scientific”, ThermoFisher.com
<https://www.thermofisher.com/blog/materials/the-ft-ir-transmission-technique-for-measuring-polymers/>
Hämtad 2021-04-21
- [30] Merckgroup, “Transmittance to Absorbance Table”,
<https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/biology/transmittance-to-absorbance.html>
Hämtad 2021-03-08