

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Inkorporering av effektivitetshöjande nanomaterial från alger i solceller	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Incorporation of efficiency enhancing nanomaterial from algae in solar cells	
Universitet/högskola/företag Swedish Algae Factory	Avdelning/institution
Adress Stena Center 1b 41292 Göteborg	
Namn på projektledare Sofie Allert	
Namn på ev övriga projektdeltagare	
Nyckelord: 5-7 st Solpaneler, Effektivitet, Alger, Nanoporöst material, Cirkulärt	

Förord

Detta projekt har finansierats av Energimyndigheten och Swedish Algae Factory AB.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	4
Inledning/Bakgrund	5
Genomförande	8
Resultat	12
Diskussion.....	17
Publikationslista.....	18
Referenser, källor.....	18
Bilagor	19

Sammanfattning

Genom en ökning av effektiviteten hos solceller/solpaneler kommer solcellers/solpanelers attraktivitet öka på grund av lägre kostnad per kWh producerad energi. Detta är speciellt relevant i svenska klimatförhållanden som inte upplever en lika hög solinstrålning jämfört med många andra länder. En förbättring av verkningsgraden hos solceller/solpaneler bidrar till stor klimatnytta genom att mer energi kan produceras från en förnybar energikälla, vilket reducerar behovet av att nyttja andra koldioxidutsläppsintensiva energikällor.

En ökning av verkningsgraden hos solceller/solpaneler kan åstadkommas på flera sätt. Bland annat genom ökad ljusinfångning, manipulering av kortare våglängder till längre våglängder samt genom blockering av UV-ljus, som över tid bidrar till en degradering av effektiviteten hos solceller/solpaneler.

Under detta projekt har vi kunnat påvisa att kiselalgers skals hierarkiska nanoporösa struktur har en förmåga att:

- Effektivt fånga in synligt för att säkerställa att algen fotosyntetiserar även när det inte finns mycket ljus närvarande
- Effektivt blockera UV-ljus, men även manipulera (nedkonvertera) UV-ljus till synligt ljus, för att undvika att algernas DNA bryts ned.

För att algerna ska kunna nyttja dessa egenskaper under deras livstid måste dessa skal också vara extremt hållbara och stabila.

Målet med projektet var att identifiera nyckelparametrar för en kostnadseffektiv inkorporering av kiselalgskal i DSSC (Dye sensitized solar cells) och kiselbaserade solpaneler mot att kunna uppnå en repeterbar verkningsgradhöjning. Verkningsgradhöjningar på minst 30 % i DSSC och 5 % i kiselbaserade solpaneler skulle påvisas i projektet.

Inom projekt påvisades en repeterbar kostnadseffektiv ökning av verkningsgraden hos DSSC på 38 %.

I relation till kiselbaserade solpaneler har det varit mer komplext att utröna nyckelparametrar för reproducerbar kostnadseffektiv verkningsgradshöjning. Mot slutet av projektet identifierades en metod som verkar kunna bidra till en repeterbar effektivitetsökning i relation till inkorporering av kiselalgskalmaterial i en coating som beläggs på glaset av en solpanel under solpanelsproduktionen alternativt på glaset av redan installerade solpaneler. Verkningsgradshöjning hos en solpanel med denna inkorporeringsmetod hann inte testats under projektet gång, men transmissionstester samt tester rörande manipulering av korta våglängder till längre våglängder visar på att en ökning av verkningsgraden på minst 5 % bör kunna åstadkommas i dessa tester. I tester där kiselalgskal inkorporeras i en yta under solpanelsglaset har även en verkningsgradshöjning som bör kunna optimerats upp mot 5 % påvisats.

Summary

By increasing the efficiency of solar cells/solar panels, the attractiveness of solar cells/solar panels will increase due to lower cost per kWh produced energy. This is especially relevant in Swedish climatic conditions that do not experience as high solar irradiation as in many other countries. An improvement in the efficiency of solar cells/solar panels contributes to large climate benefits by enabling the production of more energy from a renewable energy source, which reduces the need to utilize other carbon dioxide emission intensive energy sources.

An increase in the efficiency of solar panels can be achieved in several ways. Among other things, through increased light trapping, manipulation of shorter light wavelengths to longer light wavelengths and through blocking of UV light, which over time contributes to a degradation of efficiency of solar cells / solar panels.

During this project we have been able to demonstrate that the hierarchical nanoporous structure of the diatom frustules has the ability to:

- Effectively trap visible light to ensure that algae photosynthesize even when there is not much light present
- Effectively block UV light, but also manipulate (down-convert) UV light to visible light, to avoid degeneration of the DNA of the algae.

To make sure that the algae will be able to utilize these properties during their lifetime, diatom frustules also must be extremely durable and stable.

The aim of the project was to identify key parameters for a cost-effective incorporation of diatom frustules into DSSC (Dye sensitized solar cells) and silicon-based solar panels towards being able to achieve a repeatable efficiency increase. Efficiency increases of at least 30% in DSSC and 5% in silicon-based solar panels should be demonstrated in the project.

Within the project, a repeatable cost-effective increase of the efficiency of DSSC was demonstrated at 38%. In relation to silicon-based solar panels it has been more complex to determine key parameters for a reproducible cost-efficient efficiency increase. Towards the end of the project, a method was identified that seems to be able contribute to a repeatable efficiency increase in relation to the incorporation of diatom frustules on the surface of the glass of solar panels in the production of solar panels or on the glass of already installed solar panels. Efficiency increase of a solar panel with this method of incorporation was not tested during the timeframe of the project, but transmission tests and tests on manipulation of short wavelengths to longer wavelengths demonstrate that an increase in efficiency of at least 5% should be achieved in these tests. In tests where diatom frustules have been incorporated into a coating under the glass of solar panels, an efficiency increase that should be able to be optimized up to 5% has also been demonstrated.

Inledning/Bakgrund

Solenergiindustrin har under de senaste åren kraftigt reducerat kostnaderna för solpaneler för att kunna komma ner i en så attraktiv energikostnad som möjligt i jämförelse med vind- och fossil energi. Mycket fokus från industrin ligger nu istället på att öka effektiviteten hos solpanelerna för att kunna åstadkomma en än mer attraktiv kostnad för solenergi per kWh. Vid en diskussion med en före detta anställd på REC Solar, Karl Lundahl, framkom det enligt utsago att man inom REC solar letade efter 0,1 % förbättringar av effektiviteten för att kunna öka sin konkurrenskraft. Med andra ord uppskattas all förbättring av effektiviteten hos solpaneler.

En ökning av effektiviteten hos solpaneler bidrar till att fler företag och privatpersoner kommer investera i solenergi, speciellt i svenska klimatförhållanden som inte upplever en lika hög solinstrålning jämfört med de flesta andra länder.

En förbättring av effektiviteten hos solpaneler bidrar med stor klimatnytta. 2017 tilldelades Swedish Algae Factory WWF's climate solver award för vår grundläggande forskning som visar på möjligheten att öka effektiviteten hos solpaneler med 4 % med hjälp av kiselalgers skal. Enligt WWFs beräkningar skulle vi om vi penetrerar 30 % utav marknaden år 2027 kunna motverka att 21 miljoner ton koldioxid släpps ut till atmosfären. Denna beräkning utgår från att verkningsgraden hos en solpanel ökas från 16 % till 16,64 %. I dessa beräkningar ingår inte det positiva bidraget som Swedish Algae Factory bidrar med genom även faktisk absorption av koldioxid i produktionsprocessen, rening av vatten från kväve och fosfor samt kostnadseffektiv produktion av hållbar organisk biomassa som kan nyttjas i en rad olika samhällsnyttiga tillämpningar.

En ökning av effektiviteten kan bland annat ske genom att möjliggöra att solpanelen kan ta upp mer utav det ljus som träffar solpanelen genom att inkorporera ljusinfångande strukturer i/på solpanelen.

Man har försökt syntetisera hierarkiska nanoporösa material för effektiv ljusinfångning i solpaneler, men det har varit svårt att skapa material som är hållbara över tid. Vid PV-SEC-konferensen i Singapore 2016 presenterades ett försök att syntetisera ett silicamaterial med nanoporösa trattar (se bild) för effektiv ljusinfångning [1]. Materialet var dock energi- och kemikalieintensivt att producera och därigenom dyrt och degraderade redan efter 48 timmar. DSM, en stor producent av antireflekerande coatings för solpaneler, har försökt kommersialisera en ljusinfångande coating för solpaneler genom ett förvärv av företaget SolarExcel 2013 [2]. Detta har inte lyckats pga. att man inte lyckats tillverka strukturen i ett hållbart material. I de antireflektiva coatings som DSM säljer på marknaden idag använder DSM silicapartiklar som emellertid inte har en ljusinfångande struktur och därmed inte kan bidra med lika hög effektivitetsökning.

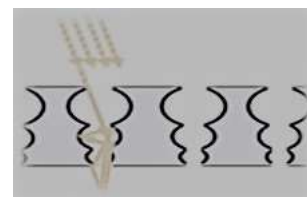


Bild på nanoporös ljusinfångande trattstruktur

Ett annat stort ämne i förhållande till effektivisering av solpanelers effektivitet är hur nedkonvertering och uppkonvertering av våglängder kan utnyttjas för detta ändamål. Olika typer av solceller absorberar olika våglängder av energi olika bra. Kisel solcellerna absorberar främst de närmaste infraröda (NIR) 950-1100 nm-fotonerna av energi nära kiselbandgapet ($E_g \approx 1,12 \text{ eV}$, $\lambda \approx 1100 \text{ nm}$), men det ultraviolett-synliga ljuset med mycket högre energi än kiselbandgapet dominerar det infallande solspektrumet. Överskottet av energi förloras som värme, och är i stor utsträckning ansvarig för minskning av solcellsverkningsgraden [3].

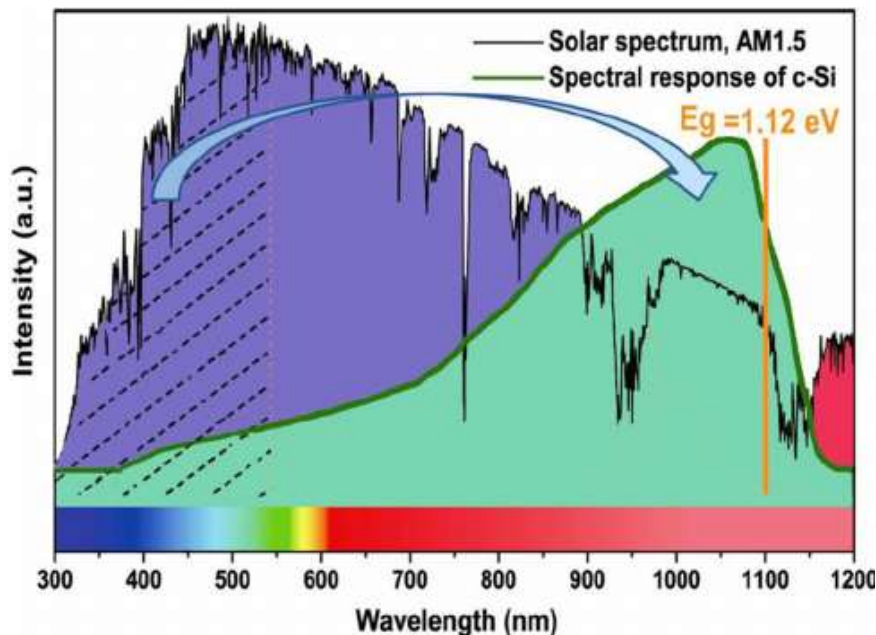


Bild som visar Airmass 1,5-solspektrumet samt spektralreaktionen hos en kristallin kisel (c-Si) solcell

I en nedkonverteringsprocess manipuleras kortare våglängder vars energi inte kan användas av solpanelen till lika hög grad, UV- synligt ljus, till längre infraröda våglängder. Dessa längre våglängders energi kan utnyttjas av solpanelen till en högre grad [4]. Nanopartiklar av material som (Ba, Sr) $2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ eller giftiga kadmiumföreningar kan användas för att uppnå en nedkonverteringsprocess i solpaneler. Ett bra nedkonverterande material behöver inte endast vara bra på att på ett repeterbart sätt manipulera våglängder, det behöver också ha en termisk och kemisk stabilitet. Idag använder vi inte nedkonverterande material i solpaneler, främst på grund av problem med den termiska och kemiska stabiliteten hos dessa typer av syntetiserade material [5].

Ett problem relaterat till solpanelers effektivitet är även att effektiviteten hos solpaneler går ner över tid. En utav orsakerna till detta är UV-ljus exponering som bland annat får encapsulant i solpaneler att gulna och därmed bli mindre ljusgenomsläpplig. På detta sätt reduceras mängden ljus som kan komma solcellen tillgodo och därmed konverteras till elektricitet [6] [7]. Enligt en encapsulantaktör vi påbörjat tester med så ses problem med de UV filter som nyttjas i encapsulant för att undvika detta problem idag. De är antingen inte stabila nog eller inte nog

transparenta, vilket gör att UV filtret i sig bidrar till att mindre ljus kommer solcellen tillgodo.

Kiselalgens nanoporösa transparenta silicaskal har en intressant hierarkisk nanoporös struktur. Ett lager av mindre nanoporer ses i större nanoporer, vilket skapar en porös trattstruktur. Denna struktur har naturligt utformats av flera hundra miljoner års evolution för att:

- Effektivt fånga in synligt för att säkerställa att algen fotosyntetiserar även när det inte finns mycket ljus närvarande [8]
- Effektivt blockera UV-ljus, men även manipulera (nedkonvertera) UV-ljus till synligt ljus, för att undvika att algernas DNA bryts ned [9] [10].

För att algen ska kunna nyttja dessa egenskaper under deras livstid måste dessa skal också vara extremt hållbara och stabila.

Målet med detta projekt var att påvisa att kiselalgens skal kan nyttjas för att öka effektiviteten på ett repeterbart och kostnadseffektivt sätt i såväl kiselbaserade solpaneler som DSSC (Dye sensitized solar cells). För att detta mål ska kunna uppfyllas måste algskalmaterialet kunna produceras med en repeterbar hög kvalitet. Materialet måste även kunna inkorporeras på ett repeterbart och kostnadseffektivt sätt i solpaneler/solceller samt produceras till en tillräckligt låg kostnad för att priset på solenergi ska kunna minskas.

Utifrån verifiering av dessa parametrar är målet att påbörja en kommersialisering av algskalmaterial inom solenergisektorn.

Projektet påbörjades den 1 mars 2017 och avslutades den 28e februari 2019 med ett stöd från Energimyndigheten på 1 700 000 SEK vilket motsvarade hälften av budgeten för projektet.

Genomförande

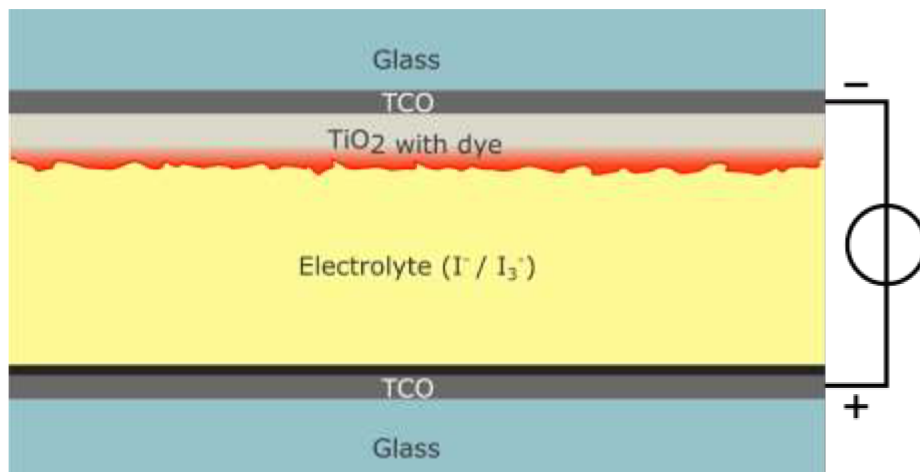
Ett av målen med projektet var att utvärdera metoder för inkorporering av kiselalgskal i potentiella kunders solpaneler/solceller. Tester som Swedish Algae Factory hade gjort sen tidigare med RISE hade visat att när kiselalgskal tillsätts på glasyta av en solpanel med hjälp av en bindningsmolekyl kunde en 4 %-ig effektivitetsökning påvisas. I tester med RISE hade vi även innan projektet påbörjades påvisat att när man inkorporerar våra kiselalgskal i titaniumdioxidlagret som ses inuti en DSSC ökar ljusinfångningsförmågan hos detta lager med upp emot 60 %. Innan detta projekt hade vårt material dock aldrig testats i en komplett DSSC där ström ut från solpanelen innan vårt material inkorporerades och efter vårt material inkorporerades testades.

Projektet är uppdelat i två huvudaktiviteter:

- Utvärdering av metod för inkorporering av nanoporöst kiselmaterial från alger i potentiella kunders solceller/solpaneler
- Verifiering av verkningsgradshöjning i solceller/solpaneler genom inkorporering av nanoporöst kiselmaterial från alger i potentiella kunders solceller

I projektet ansågs det viktigt att påbörja projektets arbete med att undersöka den bästa inkorporeringsmetoden av vårt material i en solpanel/solcell för att verifiera att verkningsgradshöjningen är kommersiellt relevant.

Inom DSSC var inkorporeringsmetoden för vårt material i princip självklar. I enlighet med tidigare tester som gjordes ansågs det bästa sättet att inkorporera vårt material vara att inkorporera materialet i titaniumdioxidlagret av solcellen.



Illustrativ bild som visar hur en DSSC är uppbyggd

Utifrån detta antagande påbörjades tester tillsammans med Chalmers Tekniska Högskola som partner för att verifiera verkningsgradshöjning genom inkorporering av algskalmaterial i DSSC. Verkningsgradshöjningen mättes med standardtester för att mäta effektiviteten i solceller. Dessa utgörs av flash tester där resultatet visas i form av en IV kurva, där IV kurvan för DSSC utan kiselalgskal jämfördes med IV kurvan för DSSC med kiselalgskal. Flash tester

mäter uteffekten hos en sol-PV-modul och är ett standardprovingsförfarande hos tillverkare för att säkerställa att alla PV-moduler överensstämmer.

Under ett flash-test exponeras PV-modulen för ett kort (1 ms till 30 ms, 100 mW per kvadratcentimeter) flash av ljus från en xenonfylld ljusbågslampa.

Instrålningsspektrumet för denna lampa är så nära solens spektrum som möjligt. Uteffektresultaten från testerna samlas in av en dator och data jämförs med en exakt kalibrerad referens solpanelsmodul.

Inom kiselbaserade solpaneler var inkorporeringsmetod för kiselalgskal inte självklar vid start av projektet. Metod som användes vid inkorporering av kiselalgskalmaterial i kiselbaserade solpaneler tillsammans med RISE är inte kommersiellt gångbar, delvis för att dyra labbprocesser användes för att applicera materialet på ytan, men också för att våra partiklar satt fritt på ytan vilket mest troligt innebär svårigheter med att rengöra ytan vid kommersiell användning. Kiselalgskalmaterialiet behöver på något sätt inkapslas i/på solpanelen.

För att utröna vart vi bäst borde inkorporera kiselalgskalmaterial i kiselbaserade solpaneler påbörjades en diskussion med solpanelsproducenter vi hade etablerat kontakt med vid InterSolar sommaren 2016.

Deras rekommendationer var att vi till att börja med skulle försöka inkorporera vårt material i befintliga coatings som ses i/på en solpanel; encapsulants och anti-reflekterande coatings. En encapsulant ses mellan solcellen och glaset på en solpanel som en skyddande hinna. En anti-reflekterande coating ses på glaset av en solpanel.

Vårt mål inom projektet var att om möjligt utföra tester direkt med kunder för att förkorta tiden för kommersialisering av vårt kiselalgskalmaterial. I början av 2017 påbörjades arbetet med att identifiera möjliga encapsulant och anti-reflekterande coating producenter som kunde tänkas vara intresserade av att testa vårt material i sina produkter.

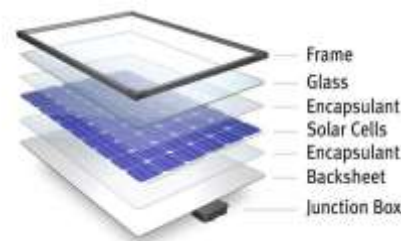


Illustration av hur en kiselbaserad solpanel är uppbyggd

Under våren 2017 identifierades en encapsulantaktör som såg intresse av att utföra tester med oss. I dessa tester inkorporerades vårt material i deras encapsulant och enligt industristandardförfarande gjordes flashtester där IV-kurvor uppmättes, med och utan vårt material inkorporerat i encapsulant.

I januari 2019 påbörjades även tester med ytterligare en encapsulantaktör.

Vi hade under projektets gång svårt att attrahera intresse för tester från en antireflektande coating producent. En dialog rörande tester startades dock med två anti-reflekterande coating producenter mot slutet av 2018, men tester hann inte påbörjas under projektets gång.

I och med att tester inom anti-reflekterande coatings inte kunde utföras med kund bestämdes det att tester rörande verkningsgradhöjning skulle göras med ECN först genom transmissionstester endast på det coatade glaset och sedan genom flash tester på en solpanel där glaset har inkorporerats i solpanelen. För att kunna inkorporera kiselalgs-kalmaterial i en coating som beläggs på glaset på en solpanel behövde vi dock hitta en partner som kunde hjälpa oss med att få in våra alpartiklar i en coating. De två aktörer som kontrakterades för detta valdes baserat på rekommendationer från personer inom miljöteknik och kemiindustrin.

Under hösten 2017 erhöles en kontakt med en aktör som producerar add-on coatings till redan installerade solpaneler för att öka deras effektivitet. Detta är en relativt ny marknad som även lite större anti-reflekterande coating producenter börjar intressera sig för, då en utav de stora problemen med solpaneler är att dess effektivitet går ner över tid. I tidigare lägesrapport nämndes eventuella problem med garantier på solpanelen relaterat till en beläggning av redan installerade solpanelers yta. Dessa problem verkar ha lösts från aktörer som har börjat arbetet med att kommersialisera lösningar likt dessa.

Tester med denna aktör påbörjades under slutet av 2018 där fokus under det här projektets gång blev att utföra initiala transmissionsmätningar, men även mätningar som berörde möjligheten att kiselalgs-kal kan nyttjas för att manipulera kortare ljusvåglängder till längre ljusvåglängder.

Parallellt med ovan aktioner pågick även grundforskning kring kiselalgs-kals interaktion med ljus tillsammans med Olle Inganäs forskargrupp vid Linköpings Universitet.

Den referensgrupp som meddelades i början av projektet var baserad på de kontakter vi då hade inom industrin. Efter att vi i början av projektet definierade våra kunder/stakeholders till projektet främst som aktörer som producerar olika typer av coatings till solpanelsindustrin blev vårt mål att sätta ihop en referensgrupp bestående av aktörer som producerar coatings till solpanelindustrin. 2 aktörer av encapsulants, 1 producent av anti-reflekterande coatings som beläggs på glaset i solpanelsproduktionsprocessen samt en producent av add-on coatings till redan installerade solpaneler knöts an till projektet. Målet var att dessa skulle kallas till ett referensgruppsmöte utifrån resultat som uppkom i samband med tester med ECN. Tyvärr föll inte dessa tester väl ut, vilket gjorde det onödigt att diskutera dessa tester över ett möte. Under tiden som testerna med ECN initierades beslutade sig även 3 utav dessa kunder/stakeholders för att göra egna tester på vårt material. Två utav dessa tester fall väl ut under projektets gång, men dessa potentiella kunder till oss var givetvis inte villiga att diskutera sina forskningsresultat med konkurrenter. Detta gjorde att vi hade svårigheter att få till ett referensgruppsmöte under projektet, men hade bra och för projektet viktiga dialoger med respektive referensgruppsdeltagande. Av respekt för NDA skrivna med dessa kunder skrivs inte namn på referensgruppen här, men kan lämnas ut under sekretess.

Mot slutet av projektet träffade vi Karl Lundahl, tidigare anställd på REC Solar, De projektresultat han fick ta del av under NDA ansågs enligt honom ha potential att skapa stort värde för solenergiindustrin.

Under de sista dagarna av projektet (efter testresultat i relation till DSSC hade skickats in för publicering) skickades testresultat från våra tester inom DSSC till vår kontakt på Exeger som vi nu inväntar feedback från.

Resultat

Testresultat DSSC

Tester med Chalmers Tekniska Högskolas DSSC grupp slutfördes under april 2018. I samband med dessa tester upptäcktes det att detaljer runt hur titaniumdioxidlagret i DSSC utformas samt mängden kiselalgskal som tillsätts har stor betydelse för effektivitetshöjning. En högre procentuell effektivitetsökning bör kunna uppnås genom vidare optimering av utformning av titaniumdioxidlagret samt koncentrationen av kiselalgskal. I testerna uppnåddes en verkningsgradshöjning med 38 %. Verkningsraden ökade från 3,4 till 4,7 %. Vid vidare optimering av tjocklek av titaniumdioxidlagret samt vid ökning av koncentration av kiselalgskalpartiklar i titaniumdioxidlagret skulle en högre procentuell effektivitetsökning kunna uppnås. Vidare utveckling inom DSSC tillsammans med bland annat Chalmers Tekniska Högskola är planerade i relation till projekt finansierade av EU.

Testresultat från detta projekt har genererat initialt intresse från en potentiell kund som producerar DSSC.

Mer detaljerad information rörande tester kan vid behov delges under sekretess.

Målet med detta projekt var att påvisa en minst 30 %-ig höjning av verkningsgraden hos DSSC, vilket uppfylldes. Inom projektet har vi även kunnat påvisa en repeterbar kostnadseffektiv verkningsgradshöjning i DSSC.

Testresultat inom kiselbaserade solpaneler

Inom kiselbaserade solpaneler har vi under projektets gång testat att inkorporera kiselalgskal i 3 olika delar av kiselbaserade solpaneler:

- I encapsulant
- I dagens anti-reflektiva coating som inkorporeras på glaset av en solpanel i produktionsprocessen.
- Som en add-on coating på redan installerade solpaneler

Vidare grundforskning tillsammans med Olle Inganäs grupp vid Linköpings Universitet har även lett till nya insikter kring kiselalgskals interaktion med ljus och därmed kunskap som vidare kan nyttjas inom forskning kring kiselalgskalens möjlighet att höja verkningsgraden hos kiselbaserade solpaneler.

Testresultat genom inkorporering i encapsulant

Under början på 2018 avslutades initiala tester med en encapsulantproducent. Testresultaten påvisade en 3 %-ig ökning av verkningsgraden hos en solpanel genom inkorporering av kiselalgskal, från ca 17 % till ca 17,45 %. Dessa tester ansågs inte optimala, vilket talar för att högre verkningsgradshöjningar kan uppnås. Mer detaljerad information rörande tester kan vid behov delges under sekretess. På grund av interna problem relaterat till bland annat sjukdom hos

encapsulantproducenten kunde inte vidare tester utföras under detta projekts gång. Fortsatta tester kan förhoppningsvis påbörjas under sensvåren/hösten 2019.

Under slutet av detta projekt, januari 2018, påbörjades tester med ytterligare en encapsulantaktör. Testerna är i inledningsfasen och det är tyvärr för tidigt att redovisa några resultat. I dessa tester kommer fokus framförallt inte ligga på momentan effektivitetsökning i relation till kiselalgs kals ljusinfångande förmåga utan istället på kiselalgs kals påvisade förmåga att blockera UV-ljus (se mer under forskning med Olle Inganäs forskningsgrupp). Kiselalgs kals förmåga att blockera UV-ljus bör kunna nyttjas för att minimera effektivitetsdegradering hos solpaneler över tid, genom minimerad missfärgning av encapsulant.

För att verifiera en repeterbar momentan effektivitetsökning inom encapsulants genom ljusinfångning samt hur kiselalgs kal kan nyttjas repeterbart för att minimera effektivitetsdegradering hos solpaneler behöver vidare tester utföras.

De initiala tester som nämns ovan i kombination med bidrag från kiselalgs kals UV-ljusblockerande förmåga talar för att en effektivitetshöjning på över 5 % ska kunna åstadkommas genom en inkorporering av kiselalgs kals material i encapsulants. Endast genom ljusinfångning är det möjligt att komma över 5 % i effektivitetshöjning. Syntetiska ljusinfångande alternativ som dock inte kunde produceras i ett material som var hållbart över tid visar på möjligheten att endast öka effekten hos en solpanel genom ökad ljusingångning med över 6 % [2]. I en äldre studie från 1990-talet påvisade man att en gulnande encapsulant minskar effektiviteten hos en solpanel mellan 9-50 % beroende på hur långt gulning har gått. En av faktorerna som påverkar gulningen är UV-ljus degradering [11]. Figuren nedan visar minskningen av transmissionen då en encapsulant exponerades för UV-ljus, i Fraunhofers Atlas 4000 Weather-Ometer, före och efter accelererad åldring i 120 dagar [12].

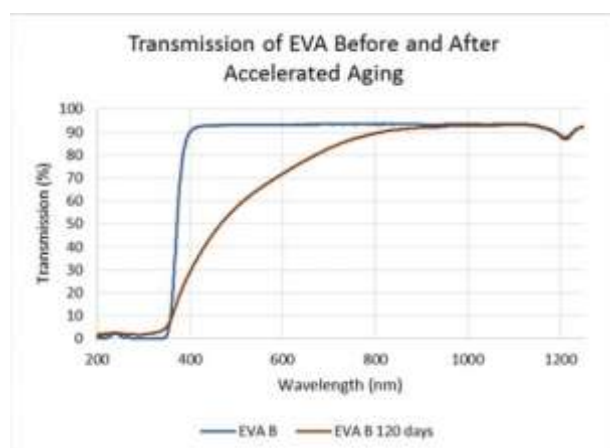


Bild som visar transmission genom EVA före och efter exponering för 120 dagars UV-nedbrytning

Dessa tester påvisar att UV-ljus degradering är en stor bidragande faktor till UV-ljusdegradering, men det är svårt att säga exakt hur stor effekt kiselalgs kals UV-

Ljus blockerande effekt har på verkningsgraden hos solpaneler över tid utan vidare tester, men effekten förväntas vara signifikant.

Testresultat genom inkorporering i dagens anti-reflektiva coatings

I relation till tester för inkorporering av vårt material i dagens anti-reflektiva coatings behövde vi i och med att vi inte under projektets gång lyckades involvera potentiella kunder i projektet hitta en partner som kunde hjälpa oss att producera en coating likt detta.

Vi hade svårigheter att hitta aktörer som hade erfarenhet av produktion av transparenta coatings för genomförelse av ljus som vi kunde kontraktera i samband med projektet.

Utifrån rekommendationer från personer inom kemi- och miljöteknikbranschen kontrakterades först ett forskningsinstitut som hävdade att de hade erfarenhet av produktion av coatings som maximerar ljusgenomförelse. Utifrån testresultat med ECN visade sig detta inte vara sant, då kontrollcoatingen som inte innehöll våra kiselalgskalpartiklar reducerade effektiviteten hos solpanelen. Mer detaljerad information rörande tester kan vid behov delges under sekretess.

Jakten på att hitta en ny coatingaktör att samarbeta med påbörjades därefter. Denna aktör lyckades få till en bra coating som möjliggjorde genomförelse av ljus och därmed inte minskade effektiviteten hos solpanelen. Däremot hade aktören problem med att säkerställa en tunn coating med ett monolager av vårt material vilket gjorde det svårt att verifiera en signifikant effektivitetsökning med hjälp av vårt material i samband med tester med ECN. Mer detaljerad information rörande tester kan vid behov delges under sekretess.

Från projektet har vi lärt oss att en inkorporering av ett monolager av vårt kiselalgskal material i en coating som ska fästas på glaset på en solpanel inte är enkelt. Kunskapen om att producera coatings likt dessa hos forskningsinstitut och universitet är låg. Denna kunskap verkar främst ses ackumulerad hos producenter av coatings för solpaneler idag. Under projektets gång har diskussioner med coatingproducenter påbörjats och initiala möten mot start av tester hållits.

Testresultat-inkorporering i add-on coating på installerade solpaneler

Under hösten 2018 påbörjades tester med en producent av add-on coatings för effektivitetsökning av redan installerade solpaneler. De testresultaten som har erhållits i samband med tester med denna aktör under projektets gång är även relevanta för inkorporering av vårt material i dagens anti-reflektiva coatings.

De första testerna som gjordes med denna aktör avsåg att testa 3 olika coatingmetoder för att få fram ett repeterbart homogent monolager med kiselalgskal i en coating. Testerna avslöjade att en coatingsmetod var betydligt bättre än de övriga två coatingsmetoderna för att få fram en coating med repeterbar effekt. Dessa tester visade även, i likhet med testresultat vi fick fram i samarbete med RISE innan detta projekt startades, att en för hög koncentration av kiselalgskal i en yta kan leda till negativa effekter genom att det blir svårare att säkerställa att ett monolager av kiselalgskal erhålls på grund av överlapp av

partiklar. Vid samtliga coatingmetoder sågs en minimering av den positiva effekten från kiselalgskal vid högre koncentrationer av kiselalgskal, vilket tyder på att det finns en optimal koncentration för kiselalgskal i en yta för att en så hög effektivitetsökning som möjligt ska kunna åstadkommas.

Vid alla coatingmetoder kunde vi i tester se att en stor del av UV-ljuset inte transmittades genom ytan utan absorberades/reflekterades samt att transmittansen av synligt ljus var högre vid alla coatingmetoder än transmittansen genom endast glas, speciellt efter 500 nm, men där coatings som hade producerats med en coatingmetod visade på högre transmittansökning än övriga coatings. En ökning av transmittansen innebär en ökning av infångning av ljus.

Alla ytor med olika koncentration som hade coatats med den metod som främst säkerställde en homogen yta, testades med avseende på förmågan att manipulera kortare ljusvåglängder till längre ljusvåglängder med hjälp av fotoluminiscens. Ett tydligt spektralskifte från kortare våglängder till längre våglängder kunde observeras i dessa tester. Mer detaljerad information rörande tester kan vid behov delges under sekretess.

Nästa steg i tester med denna aktör är att en befintlig solpanel ska coatats med metod som bäst säkerställer en homogen monolager yta med kiselalgskalmaterial.

Utifrån diskussion med den här aktören med avseende på ovan resultat förväntas en ökning på minst 5 % i likhet med målet för detta projekt inte vara orimlig att uppnå.

Testresultat från forskning med Olle Inganäs forskningsgrupp

Genom forskning med Olle Inganäs forskningsgrupp vid Linköpings Universitet har vi bekräftat kiselalgens skals UV-ljus blockerande förmåga. Forskningen publicerades den 23 mars 2018 i Scientific Reports [9].

Den här forskningen skapade stort intresse för att testa vårt material från en encapsulantproducent. Dessa tester påbörjades under slutet av januari 2019 och nämns ovan.

Sammanfattning av resultat

I enlighet med målen för projektet har vi i relation till DSSC påvisat en verkningsgradhöjning på minst 30 % samt identifierat nyckelparametrar rörande reproducerbarhet för verkningsgradshöjning samt har säkerställt att kiselalgskalmaterial kan inkorporeras på ett kostnadseffektivt sätt i denna typ av solcell.

I relation till kiselbaserade solpaneler har det varit mer komplext att utröna nyckelparametrar för reproducerbar kostnadseffektiv verkningsgradshöjning.

Utifrån tidiga signaler från marknaden i början av projektet har projektet framförallt fokuserat på inkorporering av kiselalgskal i coatingprodukter som ses i/på kiselbaserade solpaneler. Under projektets gång har vi framförallt kunnat utesluta vad som inte fungerar mot att säkerställa en repeterbar

verkningsgradshöjning. Mot slutet av projektet identifierades en coatingmetod som verkar kunna bidra till en repeterbar verkningsgradshöjning i relation till inkorporering av algskalmaterial på en yta på glaset i produktion av solpaneler alternativt på glaset av redan installerade solpaneler. Verkningsgradshöjning hos en solpanel med denna inkorporeringsmetod hann inte testats under projektets gång, men transmissionstester samt tester rörande manipulering av korta ljusvåglängder till längre ljusvåglängder visar på att en ökning av verkningsgraden på minst 5 % bör kunna åstadkommas i dessa tester.

I första initiala tester där kiselalgskalmaterial inkorporerades i en encapsulant påvisades en 3 %-ig ökning av verkningsgraden hos en solpanel. Dessa tester behöver dock optimeras vidare för att säkerställa att en så hög verkningsgradshöjning som möjligt kan åstadkommas.

Diskussion

Enligt resultat från projektet har vi påvisat att kiselalgskal kan nyttjas för att öka verkningsgraden hos solceller/solpaneler betydligt.

När projektet började hade vi en hypotes om att materialets förmåga att öka verkningsgraden hos solpaneler endast skulle vara länkat till materialets ljusinfångande förmåga, men under projektets gång har vi även påvisat att materialet har en förmåga att blockera UV-ljus samt manipulera kortare ljusvåglängder till längre ljusvåglängder. Att materialet verka kunna öka effektiviteten hos solceller/solpaneler på flera olika sätt påvisar att kiselalgskal mest troligt har möjlighet att bidra till större verkningsgradshöjningar än vad vi antog i början av projektet.

Vidare bekräftande tester i relation till kiselbaserade solpaneler behöver dock utföras för att säkerställa en verkningsgradshöjning på 5 %. Dessa tester kommer utföras under 2019/2020.

Vidare grundforskning i ett projekt finansierat av Vetenskapsrådet tillsammans med Olle Inganäs och Mario de Stefanos forskargrupper kommer även bidra till ytterligare kunskap om kiselalgskals ljusmanipulerande förmågor erhålls under 2019-2021. Denna kunskap bör kunna nyttjas för att maximera verkningsgradshöjningen hos solceller/solpaneler genom inkorporering av kiselalgskal.

Nyligen påbörjades även diskussioner med en aktör som vill testa att inkorporera vårt material direkt på solcellens yta under encapsulant. Ett projekt likt detta skulle bidra till ännu mer kunskap om vart kiselalgskal bör inkorporeras i solpaneler för att uppnå en så hög verkningsgradshöjning som möjligt till en så låg kostnad som möjligt.

Inom detta projekt har intresse för vårt algmaterial genererats från aktörer inom solenergiindustrin för nyttjandet av vårt material för att öka verkningsgraden hos solpaneler/solceller och därmed solenergens konkurrenskraft samt mängd förnyelsebar energi som kan nyttjas från solen. Ju mer energi som kommer från förnyelsebara energikällor likt solen desto mindre energi behöver nyttjas från andra energikällor som bidrar till stora utsläpp av koldioxid.

Utifrån intresse från potentiella kunder inom solenergiindustrin planerar Swedish Algae Factory att skala upp produktionen av kiselalgskal under 2020. En uppskalning av Swedish Algae Factory's produktion kommer inte bara generera värden för solenergiindustrin. I och med Swedish Algae Factory's cirkulär ekonomiska affärsmodell bidrar vår verksamhet även till att mer livsuppehållande näringsämnen återvinns samt mer samhällsnyttig närings- och oljerik organisk biomassa produceras ju större vi blir. Dessutom kommer vi även bidra till att lösa övergödningens problematiken samt den globala uppvärmningsproblematiken. Sist men inte minst kommer vi även kunna bidra till mer jobb inom en hållbar industri.

Publikationslista

Artikel: **Nature, Scientific Reports; Diatom Frustules protect DNA from ultraviolet light** (Luis Ever Aguirre, Liangqi Ouyang, Anders Elfving, Mikael Hedblom, Angela Wulff & Olle Inganäs) 2018

Artikeln berör kiselalgskalets UV-ljus blockerande förmåga.

Poster: **Dye sensitized solar cells improvements using diatom frustules: a light wave guiding effect** (Maurizio Furlani, T.M. Wijendra J. Bendara, Ingvar Albinsson, Bengt-Erk Mellander)

En artikel om samma ämne kommer publiceras under 2019. Postern/Artikeln visar på verkningsgradshöjningar genom inkorporering av kiselalgskalet i DSSC

Referenser, källor

- [1] M. Schmid, Interviewee, *PV-SEC presentation: Nano- and microconcentration for the next generation of chalcopyrite solar cells*. [Interview]. 27 October 2016.
- [2] DSM, "<https://www.dsm.com/corporate/media/informationcenter-news/2013/03/2013-03-19-dsm-acquires-innovative-light-trapping-technology-for-solar-modules.html>," 19 Mars 2013. [Online]. Available: <https://www.dsm.com/corporate/media/informationcenter-news/2013/03/2013-03-19-dsm-acquires-innovative-light-trapping-technology-for-solar-modules.html>. [Accessed 27 Februari 2019].
- [3] J. e. a. Zhao, "JSS FOCUS ISSUE ON NOVEL APPLICATIONS OF LUMINESCENT OPTICAL MATERIALS Near-Infrared Down-Conversion and Energy Transfer Mechanism of Ce³⁺-Yb³⁺ Co-Doped Ba₂Y(BO₃)₂Cl Phosphors," *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. R3055-R3058, 2016.
- [4] R. Abrahams et.al and R. Abrahams et al., "Solar energy enhancement using down-converting particles: A rigorous approach," *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, vol. 109, no. 114905, 2011.
- [5] J. McKittrick et. al and J. McKittrick et al., "Review: Down Conversion Materials for Solid-State Lighting," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 97, no. 5, pp. 1327-1352, 2014.
- [6] H. Kim et al., "Performance degradation of c-Si solar cells under UV exposure," *J Nanosci Nanotechnol*, vol. 14, no. 5, pp. 3561-3, 2014.
- [7] F. Pern, "Factors that affect the EVA encapsulant discoloration rate upon accelerated exposure," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vols. 41-42, pp. 587-615, 1996.

- [8] X. Chen et al., "Numerical and experimental investigation of light trapping effect of nanostructured diatom frustules," *Scientific Reports*, vol. 5, no. Article number: 11977, 2015.
- [9] L. E. Aguirre et al., "Diatom frustules protect DNA from ultraviolet light," *Article | OPEN | Published: 23 March 2018*, vol. 8, no. Article number: 5138, 2018.
- [10] E. D. Tommasi, "Light Manipulation by Single Cells: The Case of Diatoms," *Journal of Spectroscopy*, vol. 2016, no. Article ID 2490128, 2016.
- [11] A. C. K. E. a. R. D. F.J. Pern, "Weathering Degradation of EVA Encapsulant and the Effect of its Yellowing on Solar Cell Efficiency," *IEEE*, 1991.
- [12] L. Fuller, "Yellow solar panels: do they perform poorly, or just look bad?," PVTECH, 23 Dec 2015. [Online]. Available: <https://www.pv-tech.org/guest-blog/yellow-solar-panels-do-they-perform-poorly-or-just-look-bad>. [Accessed 15 Mar 2019].

Bilagor

- Administrativ bilaga
- Sekretessbelagd bilaga