

Projektledare Emma Woxlin
Projekttitel Ta världens potentiellt billigaste, mest resurseffektiva och skalbara solcellsmodul från labbmiljö till pilotproduktion

## Administrativ bilaga till Slutrapport

### Uppföljning av måluppfyllelse och nyttiggörande

I samband med att ni lämnar in slutrapport för ert projekt ska också denna blankett fyllas i och läggas som bilaga till slutrapporten.

Denna blankett riktar sig till Energimyndigheten, och visas *inte* i vår externa projektdatabas.

Syftet med blanketten är att följa upp projektets måluppfyllelse enligt Energimyndighetens beslutsdokument, eventuella avvikelser i projektets måluppfyllelse och genomförande samt vad projektet har gjort/kommer att göra för att projektets resultat ska komma till gagn för övriga samhället. Samtidigt följer vi också upp ett antal generella indikatorer som Energimyndigheten följer för de projekt vi stödjer.

**Detta dokument ska skickas in som en bilaga till slutrapporten via E-kanalen.**

### 1. Projektets måluppfyllelse

a) Vilka var projektets mål (enligt Energimyndighetens beslutsdokument)?

#### **Delmål 1: Fastställa materialkomposition**

Målet är att ta fram en materialkomposition för tryckta moduler i en process med följande prestanda:

- > 5-6% verkningsgrad på den aktiva ytan på små moduler (10 - 300 cm<sup>2</sup> med en aktiv yta på minst 80%) uppmätt under solsimulator med motsvarande AM1.5 belysning
- Över 1 års livslängd. Kravet är 80% av initial verkningsgrad i små moduler kapslade med den valda barriärfolien efter 1000h heat (85 C) och även damp heat (65% RH, 80 C).
- En materialkostnad på 1 300 - 4 000 kr/m<sup>2</sup> med kommersiella bläck vid volymer på 1 000 m<sup>2</sup>.

#### **Delmål 2: Fulländad produktionskedja**

I detta mål ska alla steg i produktionskedjan fastställas och dokumenteras med avseende på prestanda för solcellen, process, kapacitet, kostnad (offerter på volymer på 100, 1 000 och 10 000 m<sup>2</sup> ska tas in), leverantör, och logistisk. Stegen är följande:

1. Tryckning av busbars
2. Tryckning av elektroder och interlager
3. Tryckning av det aktiva lagret
4. Kantskärning
5. Ihopsättning
6. Inkapsling i barriärfilm
7. Moduls kärning
8. Kontaktering
9. Karakterisering / Kvalitetssäkring

**Delmål 3: Verifiering/Problemlösning/Optimering av pilotproduktionen**

Samtliga produktionssteg ska verifieras. Steg 2-3, samt 5-6 ska köras sekventiellt, men i den befintliga linan som finns vid projektslut kommer två-tre körningar krävas för steg 2-3 och tre körningar för steg 5-6. Pilotlinan ska uppnå följande mål:

- 75% yield som verifieras genom stickprov på färdiga moduler samt optisk verifiering av yield för varje steg.
- Produktionskapaciteten 1 500 m<sup>2</sup>/ månad vid skiftarbete med 75% beläggning och 90% yield.

Steg 1 kommer att verifieras i samarbete med externa partners. Steg 2-4 ska köras vid 2 m/min och steg 5-6 vid 1 m/min under två timmar för att verifiera kapaciteten. Steg 7-9 ska verifieras i den mån det är genomförbart utan att köpa in de designade maskinerna.

### Delmål 1

Vi anser att delmål 1 uppfyllts delvis med avseende på prestanda, livstid och kostnad för tryckta solcellsmoduler och till fullo med avseende på energy harvesting moduler, vilka vi initialt kommer att ta till marknaden. Delmål 1 har varit starkt beroende av delmål 2 för att slå fast vilka material som är processbara i en R2R process i vanlig atmosfär. Vid industriell tillverkning förändras processvillkoren med till exempel avseende på kontakt med andra material, tid vid förhöjd temperatur, intorkningsvillkor etc. Vi har under projektet fokuserat på att småskaligt försöka efterlikna dessa processvillkor men i praktiken blir det många iterationer i labbet med små celler i takt med att den industriella linan utvecklats.

Trots ett starkt fokus på processutveckling har vi har uppnått 4% verkningsgrad i tryckta moduler på den aktiva ytan, där den aktiva ytan exklusive ram utgör 80% av ytan, uppmätt med en klass ABA solsimulator<sup>1</sup>. Vi har utvärderat två alternativa geometrier med dels smala PEDOT elektroder samt bredare PEDOT-elektroder med förstärkning av en silvergrid för att öka ledningsförmågan.

Vi har genomfört accelererad åldring för att approximera livstiden för våra moduler. Vi har använt absolut fuktighet vid förhöjd temperatur och luftfuktighet som accelerationsfaktor, vilket ger en grov approximation. Vi arbetar nu efter projektet med en empirisk studie där moduler degraderade vid olika villkor studeras för att kunna ta fram mer noggranna accelerationsfaktorer, baserat på den bas för produktion och prestanda vi har att stå på tack vare detta projekt.

Vi har genomfört accelererade åldringsstudier och vid förhöjd temperatur (55°C) och med simulerat perfekt inkapsling i kvävgasmiljö utan barriärfolier klarar vi målet på ett års livstid. Vi följde sex moduler under 90 dagar och ansatte en linjär extrapolering som resulterade i att T80 vid 55°C på 365-410 dagar för fyra av modulerna och ca 200 dagar för de övriga två.

Vi har även utfört accelererad åldring under damp heat (55°C, 85% relativ fuktighet). Här har vi extrapolerat livstiden (T80) beräknad från absolut luftfuktighet (ansatt 20°C, 40%RH) till 3 månader. T80 uppmättes för sju testade moduler (55°C, 85%) till 8-9 dagar, vilket med en accelerationsfaktor på 12.7 ger tre månaders livstid.

Våra referensexperiment indikerar att den svagaste punkten för degradering kan vara kontakterna där fukt kan ta sig in, inkapslingen i sig ser däremot ut att vara tillräcklig för att uppnå målet.

<sup>1</sup> ABA betyder att den spatiala intensitetsvariationen understiger 5%, jämfört med 2% för AAA. För att karakterisera moduler behövs en solsimulator med stor belyst yta. En 30x30 cm<sup>2</sup> solsimulator köptes in utanför detta projekt. I den storleken kostar klass AAA ca en miljon och ABA ca en tiondel. Därför beslutades att använda ABA. Modellen som användes var: ISOSun Solar Simulator, infinity PV AS, [https://infinitypv.com/images/infinityPV\\_ISOSun.pdf](https://infinitypv.com/images/infinityPV_ISOSun.pdf)

Utifrån målformulering och ansatt metod att beräkna livstid i projektformuleringen med avseende på absolut luftfuktighet har vi uppnått tre månaders livstid.

Vi uppnår målet för materialkostnad där materialkostnaden för 1 m<sup>2</sup> modul vid produktion av 1 000 m<sup>2</sup> ligger på EUR 340 där aktivt lager utgör 60% och barriärfilmen 30% av materialkostnaden. Notera att vid ansökan beräknades materialkostnaden utifrån att allt bläck täcker exakt 1 m<sup>2</sup>, vilket inte är fallet i produktionen. Vi bifogar även en volymtabell för att visa på hur materialkostnaden kommer att sjunka vid större beställningar:

Solceller [m2]	Aktivt lager [EUR/m2 solcell]	Barriär [EUR/m2 solcell]	Totalt [EUR/m2 solcell]*
<5000	210	98	340
5 000 – 25 000	98	54	165
25 000 – 50 000	80	54	150
50 000- 75 000	80	36	130
>75 000	70	36	115

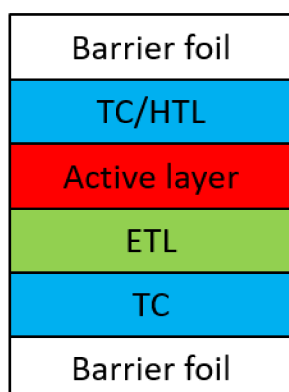
\*Övriga material ~10% av materialkostnad

Tabellen ovan visar de state-of-the-art-material som vi använt i projektet och även används av konkurrenter. Vi har dock tät kontakt med andra leverantörer som utlovar lägre priser vilket vi ämnar undersöka i kommande projekt. Oavsett leverantör är dock priserna starkt volymberoende och hos vissa leverantörer kan den minsta möjliga volymen ligga på över 1 miljon m<sup>2</sup>! Då ligger dock priset på en tredjedel av priserna ovan.

### **Delmål 2**

Delmål 2 anses vara uppnått eftersom vi har verifierat att alla steg i processen är robusta. Även om vissa processteg utförs av Consensus Production (CP) har utvecklingen av dessa körts under Epishines (E) överinseende.

För att hålla materialkostnad på en rimlig nivå har steg verifierats med smala tryck på 3 + 3 cm bredd. Processen har parallellt verifierats för 9 cm brett tryck. Maskinparken har i dagsläget kapacitet för upp till 25 cm breda tryck på 30 cm breda folier.



*Tvärsnitt av modul – Process v1.0*

Eftersom det är komplext att utvärdera varje enskilt processteg har vi tagit ut prover från R2R-processen och därefter tillverkat celler för hand med spin-coating. Genom denna provtagningsteknik har vi visat att varje enskilt steg är robust.

1. Tryckning av busbars – Screentryck av kol (R2R) samt gravyr-tryck\* av silver körs i upp till 5m/min. I koltrycket trycks också det grafiska lager som ger information som underlättar mönsterpassning i senare lager. (CP)
2. Tryckning av elektroder och interlager körs upp till 2 m/min. (E)
3. Tryckning av det aktiva lagret – Bestrykningen ger reproducerbar prestanda verifierat genom ovan nämnda provtagningsteknik. Körs upp till 2m/min. (E).
4. Kantskärning – Vi har lagt till kantskärningsknivar till bestrykningsmaskinen vilket minskar antalet processteg. (E)
5. Ihopsättning – Lamineringen sker R2R i semi-manuell utrustning där mönsterpassningen sker manuellt och körs upp till 3m/min. Prestandan är direkt korrelerad till hur väl mönsterpassningen sker och i en kommande utrustning kommer mönsterpassningen ske automatisk med högre precision. (E)
6. Inkapsling i barriärfilm – I Process v 1.0 sker trycket direkt på barriären.
7. Moduls kärning – En metod för modulseparering har utvecklats som körs upp till 5 m/min, själva uppskärningen kan ske i ett senare outsourcat steg. (CP)
8. Kontakttering – I produktdesignen ingår frilagda kolkontakter som med lätthet kan kontakteras genom s k fjäderkontakter. (E)
9. Karakterisering / Kvalitetssäkring – som tidigare rapporterat har vi höjt ambitionsnivån och använt en automatiskt R2R-testare där processen utvecklats i ett parallellt projekt. Mätningen av en modul tar c:a 13 sekunder och med vår lilla modul motsvarar det 0,3 m/min (CP)

\*Gravyr-trycket har körts på standard-PET-material för att minska kostnader.

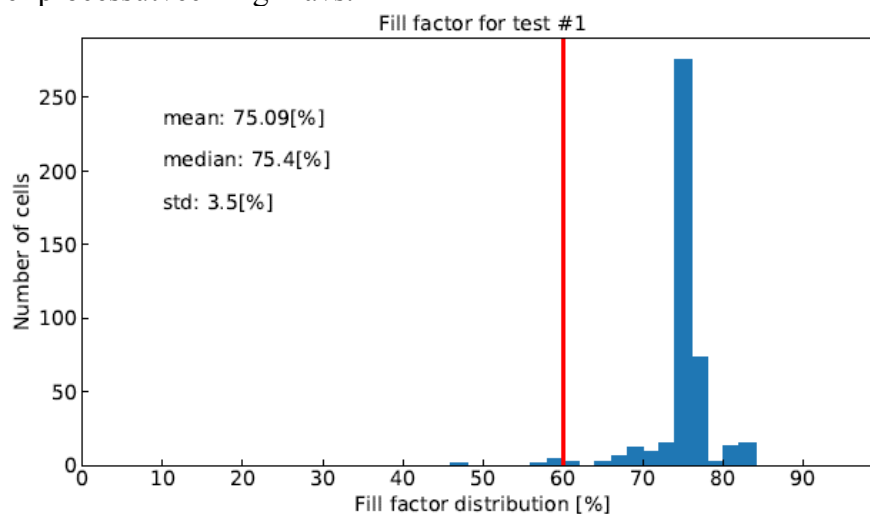
I denna process är bestrykningen (steg 2 och 3) långsammast. Tiden för testningen beror mycket på om modulstorleken och kan med lätthet snabbas på.

Kostnaden bestäms framförallt av materialkostnader och det är först vid höga volymer som kostnader för maskintid blir intressant. Då en del processteg är

outsourcade till en relativ hög timkostnad krävs inköp av egna maskiner för tryck, konvertering och kapsling för en ekonomisk viabel produktion.

### Delmål 3

Delmål tre anses vara uppnått eftersom hela pilotproduktionsprocessen (1.0) har körts igenom ett stort antal gånger (kompletterande produktionssteg som vi blivit medvetna om tack vare detta projekt har utvecklats i parallella projekt). Under våren 2019 kördes ”Roll of the Week” mer än 10 gånger och kröntes med en verifieringskörning under maj 2019 då tre produktionsbatcher kördes igenom från start till slut inom en vecka. Yielden under verifieringskörningarna uppgick den till 62% vilket är något lägre än det uppsatta målet och visar att mer processutveckling krävs.



Genom att öka tryck/bestrykningshastigheten och arbeta med en mer strömlinjerformad produktion (vilket finns dokumenterat i ett examensarbete av Hanna Hartikainen och Anna Willman) har vi estimerat en produktionskapacitet till 15 000 moduler/månad. Detta må vara väsentligt lägre än målet på 1500 m<sup>2</sup>/månad men produktionsprocessen har varit inriktad på väldigt små testmoduler på en smal och relativt kort (~50 m) plastfolie för att hålla nere materialkostnaderna under utvecklingen. Vi har dock även verifierat att det är möjligt att uppnå en jämn prestanda även med bredare folier och vi är övertygade om att med längre körningar (~500 m) kommer produktionskapaciteten mångdubblas eftersom ställtiden, som idag dominerar kommer bli försvinnande liten.

Produktionsprocessen har i huvudsak körts av Epishine medan koltryck körts av bolaget Consensus Production (numera Ynvisible Production) under vårt överinseende. För moduluppskrifning har vi kontakt med Topflight i Helsingborg som har visat att de kan utföra detta steg. Vi kommer dock i andra projekt driva på en intern lösning på detta.

Som nämnt ovan är bestrykningen flaskhalsen i processen och vi kan estimerar produktionskapaciteten utifrån detta processteg. Med en bestrykningsbredd på 20 cm, en bestrykningshastighet av 2 m/min, två körningar och behov att topp

och bottenlaminat och utifrån en 75% beläggning och 68% yield motsvarar detta  $(20 \text{ cm} \times 120 \text{ m/h} \times \frac{1}{2} \text{ (två körningar)} \times \frac{1}{2} \text{ (tryck/laminat)} \times 0.75 \text{ (beläggning)} \times 0.68 \text{ (yield)} \times 720 \text{ h/ månad} = 2\,200 \text{ m}^2 / \text{ månad}$ , vilket betyder att vi når det formulerade kapacitetsmålet på  $1\,500 \text{ m}^2/\text{månad}$ .

Process och produktionsmognaden har ökat radikalt inom organisationen. Vid projektstart ansatte vi kapacitet utifrån hastighet och maxbredd på tryckmaskinerna. Beräkningen på en kapacitet på  $2\,200 \text{ m}^2$  är baserad på denna. Vi har dock nu tack vare projektet en mycket nyanserad bild där hänsyn till kvalitet och processflöden dessutom är inräknade.

## 2. Kommentera eventuella betydande avvikelser i projektets måluppfyllelse och/eller genomförande i förhållande till Energimyndighetens beslut om stöd till projektet

Om projektet inte nått målen eller om betydande förändringar gjorts i projektets genomförande jämfört med projektbeslutet, motivera detta. Beskriv också vad som har gjorts för att motverka dessa avvikelser.

Vi har inte nått hela vägen gällande Delmål 1 gällande verkningsgrad och livstid, 4% och 3 månader, jämfört med målet 5-6% och 1 år, dock har vi gjort stora framsteg och kunnat nå tillräckligt långt för att tillverka demonstratorer från vår pilotlina. Projektet specificerades för snart tre år sedan av ett oerfaret team och vi har lärt oss väldigt mycket vad gäller hur mycket resurser som krävs för att nå uppsatt mål. Sett i retrospekt var vår ansökan naiv, men trots det har vi lyckats få en rullande pilotproduktionslina på plats.

Processen som utvecklades under projektet (Process v1.0) byggde på att trycka direkt på barriär (se Figur nedan). Detta möjliggjorde en snabb väg till "självinkapslade" moduler med existerande utrustning. Livstiden hos dessa moduler var dock kort och vi kommer i Process 2.0 som nu utvecklas trycka på PET och kapsla in efteråt (se Figur nedan). Full R2R utveckling av denna process ryms inte i detta projekt, särskilt som det kommer kräva maskininköp, utan körs i parallella projekt.

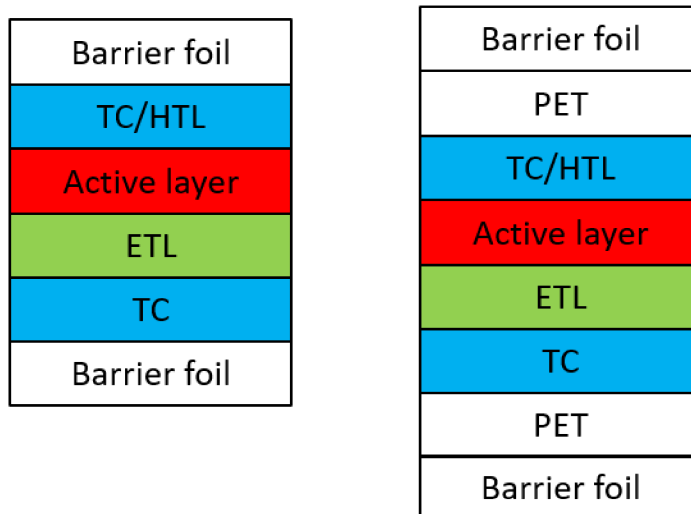


Figure: Process 1.0 (t.v.), Process 2.0 (t.h.)

I ett annat projekt har vi nu nått knappa 14% verkningsgrad i labceller tillverkade inom Epishine. Där kvarstår arbete med industrialisering och livstid, men tillsammans med det senaste rekordet från NRELs ”Best cell efficiency chart” på 17.4% verkningsgrad gör det att vi ser mycket positivt på fortsatt utveckling av organiska solceller. Speciellt sett i relation till cellrekordet för multikristallint kisel på 22.8%.

### 3. Spridning och nyttiggörande av resultatet i samhället

- a) Hur har projektet arbetat för att sprida projektets resultat och/eller på andra sätt se till att det kommer till nytta? Vilka eventuella ytterligare aktiviteter kommer att göras framöver?  
Beskriv projektets genomförda och planerade kommande aktiviteter för att sprida projektets resultat och/eller på andra sätt se till att det kommer till nytta i samhället. Berätta också om ni har förslag på resultat som ni eventuellt skulle vilja kommuniceras genom Energimyndighetens kanaler (genom nyhet, information riktad till Energi – och klimatrådgivare etc), och föreslå i så fall gärna hur detta skulle kunna göras.

Projektet har presenterats på Solforum 2019 i Göteborg.

Projektet ligger tillsammans med ett ytterligare anslag till grund för bolaget Epishines existens. Epishine har utanför detta projekt utvecklat en kommunikation för att sprida information om bolagets tillverkning av organiska solceller samt potentialen med dessa. Där har detta projekt dessutom vid flertalet tillfällen omnämnts.

- b) Har eller planeras projektet resultera i några patent eller andra bevis på rättigheter till resultat, eller några ansökningar om detta? Om bevis på rättigheter till resultat tagits ut eller ansökningar planeras, vem äger/har nyttjanderätt till dessa?  
Beskriv detta i så fall här.

Projektet har haft starkt fokus på processutveckling vilket är utmanande att patentsöka då det i vårt fall ofta är svårt att se i slutprodukten vilken process som använts vid tillverkning. Trots detta kommer 1-4 patentansökningar skrivas inom nya projekt, till del baserade på erfarenheterna från detta projekt.

### 4. Eventuella bilagor till rapporten som inte ska visas i Energimyndighetens externa projektdatabas

- a) Innehåller slutrapporteringen bilagor som inte ska visas i Energimyndighetens externa projektdatabas?  
Slutrapporten ska alltid kunna visas i Energimyndighetens externa projektdatabas. Däremot visas inte denna Administrativa bilaga i projektdatabasen. Innehåller slutrapporteringen andra bilagor som inte ska visas i Energimyndighetens externa projektdatabas?

Ja  Nej



- b) Om "Ja" i frågan ovan, vilka bilagor gäller det?  
Skriv filnamnen på eventuella bilagor till slutrapporten som inte ska visas externt här.  
Bilagor som inte ska exponeras externt ska märkas upp genom att "EJ SPRIDNING" skrivs in i dokumentets rubrik.  
Alternativt kan dokumentet vattenstämplas med "EJ SPRIDNING". Dessutom ska i filnamnet läggas in ordet "SEKRETESS" alternativt "EJ SPRIDNING".