Folia przekierowująca światło (Light Redirecting Film) firmy 3M jako trwałe rozwiązane zarządzania światłem dla poprawy wydajności modułów fotowoltaicznych

Streszczenie

Folia przekierowująca światło (LRF) firmy 3M to zaawansowana technologicznie folia zwiększająca moc modułów fotowoltaicznych i ich wydajność energetyczną. Folia LRF może być nakładana na nieaktywne obszary modułu fotowoltaicznego podczas montażu w celu przekierowania światła na aktywny obszar ogniw słonecznych. Główne zastosowanie omówione w niniejszym artykule polega na nałożeniu folii 3M LRF na strukturę folii w celu osiągnięcia jak największej mocy i zysku energetycznego w skali roku, niezależnie od orientacji modułu po jego zainstalowaniu. Wydajność folii została poddana rygorystycznym testom i potwierdzona przez producentów modułów i zewnętrzne branżowe instytuty kontroli. Bogaty skład materiałów i optymalizacja procesu produkcji zapewniają, że folia jest trwała i niezawodna. Moduły zawierające folię LRF zostały przetestowane nawet trzykrotnie zgodnie z wymogami obowiązującej normy IEC. Ponadto, w ciągu pięciu lat wystawiania na działanie warunków zewnętrznych w zróżnicowanych geograficznie lokalizacjach testowych nie wykazano degradacji folii, a solidne i autorskie testy przyspieszonego starzenia w warunkach atmosferycznych przeprowadzone przez 3M wykazały, że folia LRF sprawdzi się w rzeczywistych warunkach. Od momentu wprowadzenia na rynek pod koniec 2016 roku ponad 20GW modułów pokryto folią LRF, przy minimalnej bądź zerowej utracie uzysku i wydajności w porównaniu ze standardowymi procesami produkcji modułów. Producenci modułów odnotowują wzrost mocy o 1,5-1,8% dzięki zastosowaniu rozwiązania LRF.

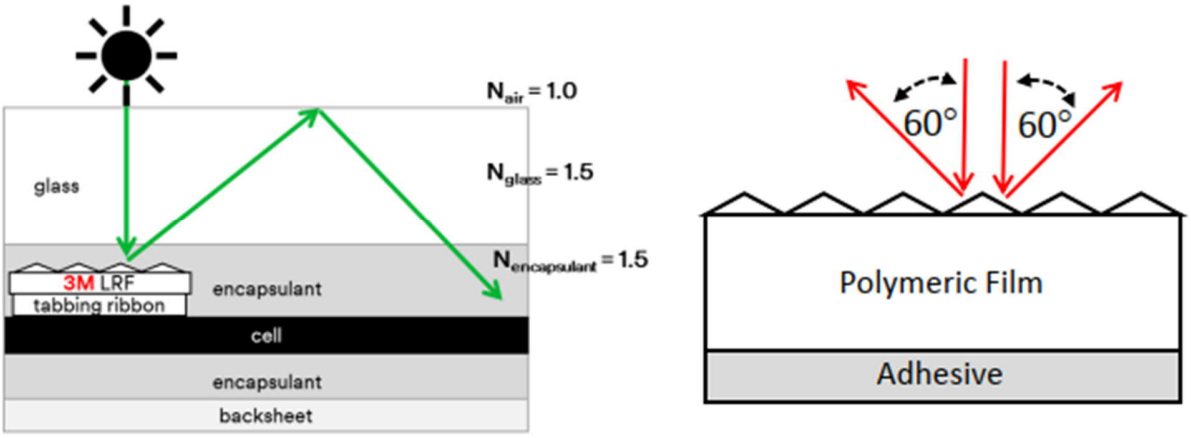
1. Informacje ogólne

W ciągu ostatnich kilku lat poprawa efektywności stała się krytycznym czynnikiem przyczyniającym się do obniżenia kosztów energii na rynku modułów fotowoltaicznych. Ta zaawansowana technologia ogniw słonecznych została szybko przyjęta w branży. Zarządzanie światłem to obok rozwoju ogniw słonecznych kolejny sposób na poprawę wydajności modułów. W typowym module fotowoltaicznym nawet do 15% powierzchni stanowią obszary nieaktywne (np. taśma łączeniowa, szczeliny między ogniwami i szeregami), więc światło padające na te części modułu nie jest zamieniane na energię elektryczną. Zastosowanie folii LRF pomaga aktywizować obszar nieaktywny za pomocą środków optycznych. Rozwiązanie w zakresie zarządzania energią świetlną musi być jednak trwałe i niezawodne, aby wytrzymać warunki, w jakich wykorzystywane są moduły słoneczne w terenie. Ponadto rozwiązania te musi dać się łatwo zintegrować z procesem produkcyjnym. Firma 3M jako pierwsza wprowadziła rozwiązanie wykorzystujące folię LRF nakładaną na taśmy łączeniowe do ogniw, które sprawdziło się zarówno pod względem wydajności, jak i produkcji, o czym świadczy 20GW modułów z folią LRF, które do tej pory wdrożono.

2. Zasady dotyczące konstrukcji optycznej folii LRF firmy 3M

Konstrukcja folii LRF opiera się na zasadzie całkowitego wewnętrznego odbicia (TIR), która wykorzystuje współczynniki załamania światła materiału użytego w typowym laminacie modułu fotowoltaicznego do przekierowania światła słonecznego, które zostałoby w przeciwnym razie odbite i niewykorzystane, na aktywną część ogniwa słonecznego. Współczynnik załamania światła przedniej szyby i EVA stosowanych w typowych modułach wynosi około 1,5. Kąt krytyczny pomiędzy szkłem a interfejsem powietrznym, umożliwiający osiągnięcie całkowitego wewnętrznego odbicia (TIR) wynosi 42 stopnie lub więcej. Dlatego też konstrukcja folii LRF została zaprojektowana tak, aby odbijać światło padające pod kątem 60 stopni w stosunku do interfejsu szkło/powietrze (Rys. 1).

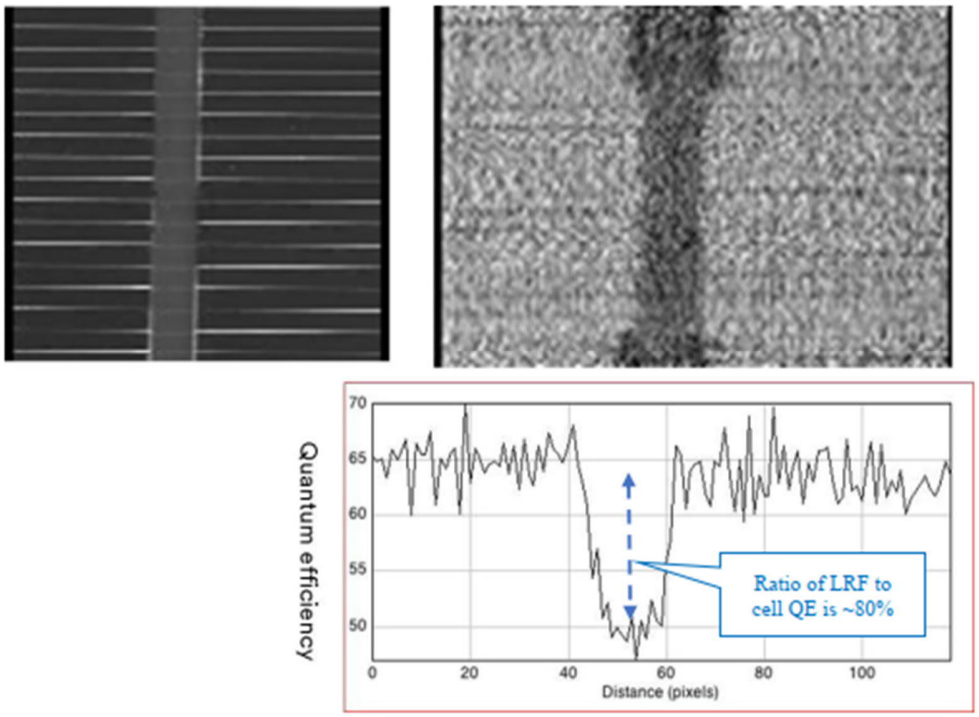
Rys. 1 przedstawia optyczną zasadę działania folii.



Rys. 1. Folia LRF odbija i przekierowuje światło pod dużym kątem w kierunku interfejsu szkło/powietrze, gdzie światło ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu (TIR) na aktywne ogniwa słoneczne.

Efektywność kwantowa folii stanowi weryfikację jej konstrukcji

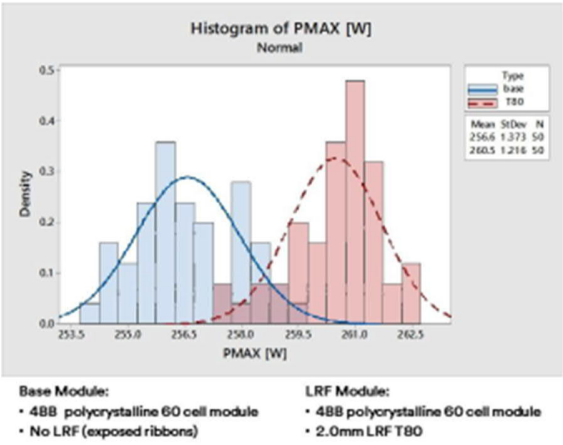
W celu weryfikacji konstrukcji optycznej folii LRF laboratorium National Renewable Energy Lab (NREL) z Kolorado, USA, przeprowadziło kontrolowany eksperyment w celu pomiaru efektywności kwantowej folii. Moduły jednokomórkowe z folią LRF nałożoną na taśmy łączeniowe zostały przetestowane przy użyciu prądu indukowanego wiązką laserową (LBIC, SEMILAB). Rysunek 2 przedstawia zdjęcia wykonane podczas testu. W teście przeprowadzonym w NREL stwierdzono, że efektywność kwantowa folii LRF wykazuje ponad 80% efektywności samego ogniwa słonecznego.



Rys. 2. Obraz efektywności kwantowej pokazuje, że folia LRF jest w około 80% tak aktywna jak powierzchnia ogniwa.

3. Udokumentowany przyrost mocy i przyrost uzysku energetycznego w ujęciu rocznym

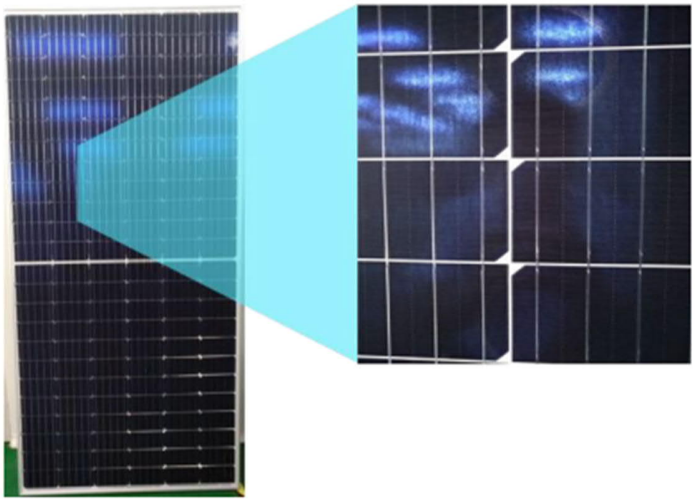
Moduły zawierające folię LRF zostały dokładnie przetestowane przez klientów pod kątem wzrostu mocy. W celu przeprowadzenia dokładnych testów wzrostu mocy potrzebna jest duża liczba modułów, aby wykazać statystycznie istotną różnicę między modułami podstawowymi a modułami z folią LRF. Na Rys. 3 przedstawiono przykład testu porównawczego ("side by side"), w którym uzyskano średni wzrost Pmax o 1,5% dzięki folii LRF.



Rys. 3. W niniejszym przykładzie zbudowano i przetestowano 50 modułów bazowych i 50 modułów z folią LRF z wykorzystaniem symulatora słonecznego PSAN. Średni przyrost mocy na poziomie 1,5% był zgodny z przewidywaną wartością uzyskaną na podstawie modelowania empirycznego 3M.

Przykład komercyjny: Moduły 385W

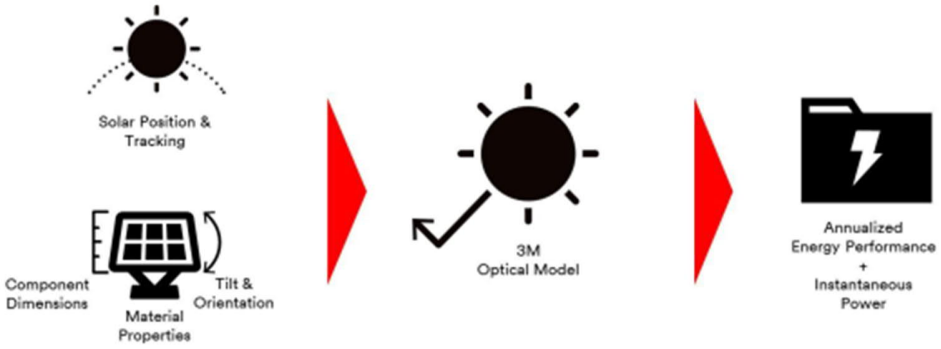
Konstrukcja modułu monokrystalicznego 385W jest wykorzystywana przez kilku wiodących producentów modułów i jest jednym z najbardziej wydajnych modułów na rynku, oferujących sprawdzone możliwości produkcyjne i wydajność. Aby uzyskać tę moc znamionową połączono nałożenie folii LRF na taśmę łączeniową ze 144 połowicznymi ogniwami PERC, jak pokazano na poniższym rysunku.



Rys. 4. Połowiczne ogniwo 385W PERC (144) + folia LRF nałożona na taśmę. Powiększenie wskazujące dokładne ułożenie folii LRF na taśmie.

Modelowanie, pomiary i wyniki produkcji energii w ujęciu rocznym

Oprócz chwilowego wzmocnienia mocy, powszechnie nazywanego wzmocnieniem przy teście błysku, folię zoptymalizowano pod kątem rocznego przyrostu energii poprzez zastosowanie zaawansowanego modelowania w formie danych wejściowych do konstrukcji optycznej, co przedstawiono na Rys. 5.

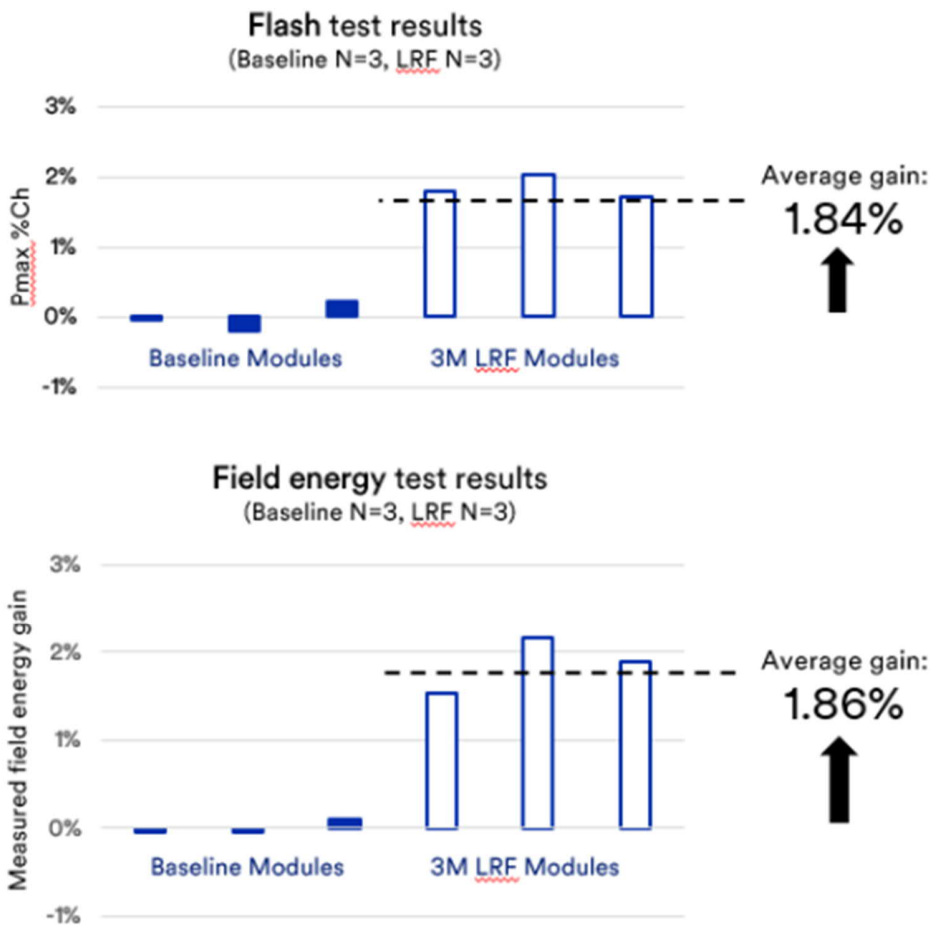


Rys. 5. Dane wejściowe do modelu optymalizacji zysków energii obejmują: kąt promieni słonecznych, płytki modułowe i kąty orientacji oraz właściwości folii.

Efektywny i dokładny pomiar rocznego zysku energetycznego, który można przypisać działaniu folii LRF, jest bardziej skomplikowany niż zysk chwilowy lub uzyskany podczas testu błysku. Należy rozważyć następujące kwestie:

1) Różnica w wydajności pomiędzy modułami podstawowymi i LRF musi być mierzalna.
2) Sprzęt badawczy musi być starannie skalibrowany, aby uzyskać dużą liniową odpowiedź na natężenie światła. Zazwyczaj wczesny poranek i późne popołudnie okazują się bardziej wymagające ze względu na małe natężenie światła i duży kąt padania światła.
3) Lokalizacja badania jest niezacieniona i wolna od zakłóceń świetlnych w otoczeniu podczas wydłużonego okresu testowego. Pobliskie budynki i tereny stanowią możliwe źródła światła, które wpływają na światło padające na moduły podstawowe i LRF.
4) Okres badania musi być wystarczająco długi, aby przezwyciężyć nierównomierne napromieniowanie spowodowane przez chmury i różnice temperatur wywołane przez wiatr.
5) Dane muszą zostać dokładnie przeanalizowane przez niezależnych ekspertów w celu odfiltrowania szumów.

Aby zweryfikować wpływ LRF na wydajność energetyczną modułów w terenie, przeprowadzono kontrolowane badania w laboratorium TUV Rheinland w Szanghaju w dniach 08/15/15 - 11/27/15. Dane z tego kontrolowanego badania pokazują, że moduły LRF generowały średnio o 1,86% więcej energii w terenie, w porównaniu z modułami bazowymi niezawierającymi LRF. Rys. 6 przedstawia wyniki i zawiera również wyniki testu błysku przeprowadzonego przez TUV Rheinland w Szanghaju.



Rys. 6. Trzy moduły bazowe i trzy moduły LRF zostały zbudowane i przetestowane w terminie 08/15/15 - 11/27/15 w Szanghaju w Chinach.

4. **Folia jest zaprojektowana tak, by spełniała wymagania dotyczące długotrwałej trwałości i niezawodności.**

Żywotność typowych modułów fotowoltaicznych wynosi ponad 25 lub 30 lat. Materiały wchodzące w skład modułu, takie jak LRF, muszą spełniać wszystkie normy branżowe w zakresie testowania trwałości i niezawodności. Co najważniejsze, muszą one zapewnić wydajność w terenie przez cały okres eksploatacji modułu. W projekcie LRF uwzględniono następujące elementy, mając na uwadze długoterminową trwałość i niezawodność:

1) Materiały są tak sformułowane, że są chemicznie kompatybilne z materiałami zastosowanymi wewnątrz modułów fotowoltaicznych. Na przykład PET jest używany jako podłoże bazowe, które jest obecne w większości dostępnych na rynku arkuszy tylnych modułów słonecznych, a jako klej wybrano EVA, który jest powszechnie stosowany w branży jako enkapsulant.
   Wszystkie krytyczne materiały LRF są opracowane i wykonane przez 3M

2) Wytrzymałość na promieniowanie UV: Na mikrokonstrukcji osadzono cienką i trwałą warstwę aluminium (Al), która jest skierowana w stronę słońca. Ta warstwa Al zatrzymuje szkodliwe światło i uniemożliwia jego penetrację do materiału polimerowego, zapewniając jednocześnie wymagane właściwości odblaskowe folii.
3) Struktura mikrooptyczna musi być stabilna termicznie. Ma to kluczowe znaczenie dla utrzymania optycznych parametrów folii LRF przez cały okres eksploatacji modułu fotowoltaicznego.
4) Proces produkcji folii LRF jest starannie kontrolowany w celu zapewnienia precyzji i spójności produktu, co z natury rzeczy przyczynia się do długoterminowej trwałości i niezawodności w zastosowaniu.

Końcowy zestaw materiałów zastosowany w konstrukcji produktu 3M LRF jest wynikiem zastosowania procedury rygorystycznej selekcji dostawców, w którym oceniono szeroki zakres materiałów i warunków obróbki.

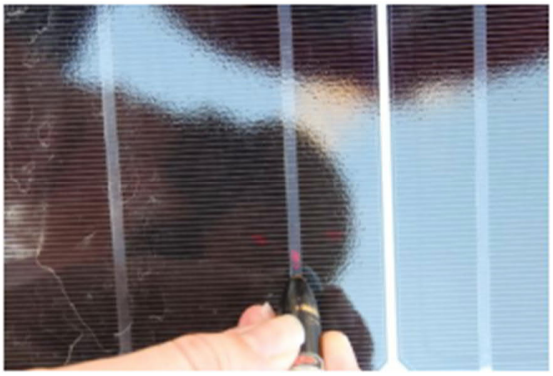
5. Dane pochodzące z minimum 5-letnich testów starzeniowych w warunkach zewnętrznych i zastosowanie rozwiązań naukowych firmy 3M w zakresie testów starzeniowych odnoszących się do LRF

Około 25% rocznej globalnej sprzedaży 3M pochodzi z produktów, które wymagają trwałości w warunkach zewnętrznych. Firma 3M zbudowała światowej klasy centrum badań nad zjawiskami atmosferycznymi, w którym pracują naukowcy zajmujący się procesami starzeniowymi, oraz największe na świecie laboratorium przyspieszonego starzenia zlokalizowane w St. Paul w stanie Minnesota w USA. Zespół ds. rozwoju LRF wykorzystał specjalistyczną wiedzę firmy 3M w zakresie ochrony przed wpływem warunków atmosferycznych w celu podjęcia decyzji o wyborze materiałów i konstrukcji produktu końcowego.

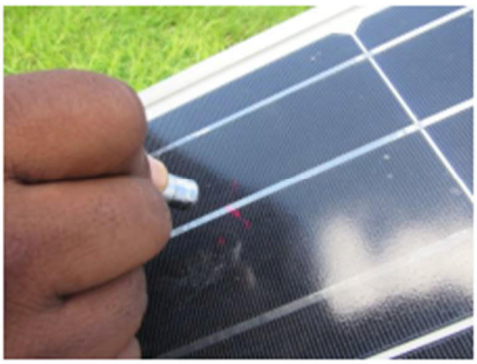
Próby zewnętrzne rozpoczęły się na wczesnym etapie procesu rozwoju produktu. Moduły fotowoltaiczne zawierające folię LRF zostały umieszczone w wybranych miejscach ekspozycji zewnętrznej w całych Stanach Zjednoczonych, reprezentujących trzy różne warunki klimatyczne. Miami na Florydzie zostało wybrane ze względu na panujące tam ekstremalne upały i wilgotne środowisko. Arizona została wybrana ze względu na ekstremalne warunki w zakresie promieniowania UV i ciepła. Wreszcie, Minnesota została wybrana ze względu na jej ekstremalnie zimne i wilgotne środowisko.

Rysunek 7. Obrazy wskaźnika laserowego na LRF, wykazujące wydajność optyczną po 5 latach pracy w terenie (zdjęcia wykonane odpowiednio w lipcu i sierpniu 2018 r.)

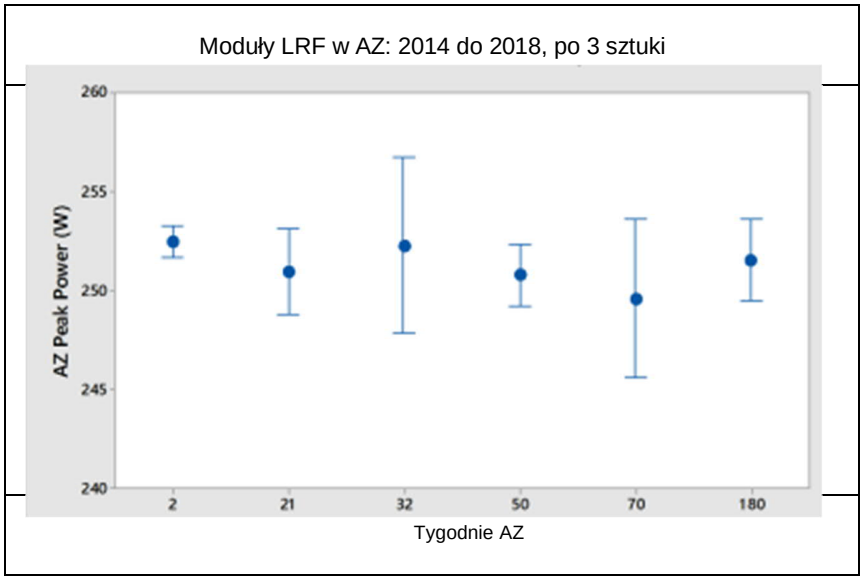
Arizona, USA

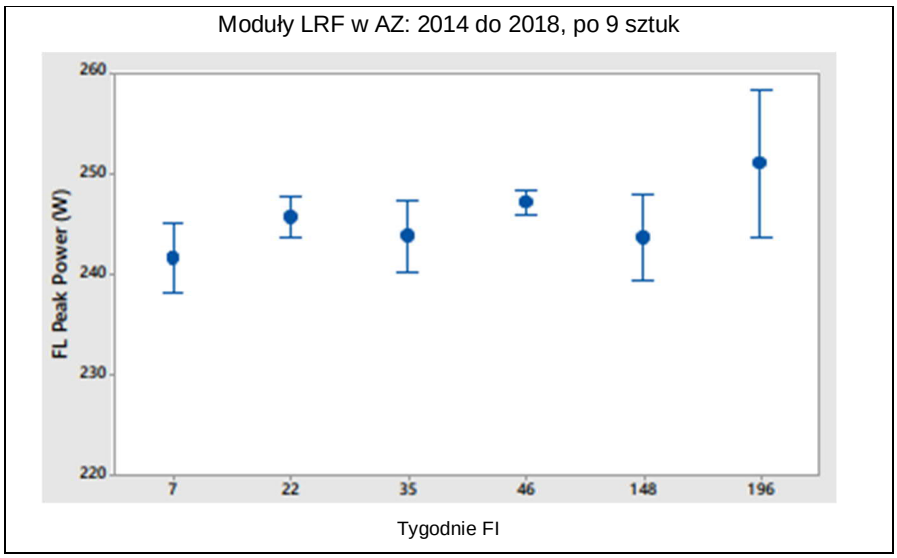


Floryda, USA



Rysunek 8. Pomiary mocy modułu LRF w poszczególnych tygodniach wskazują na stałą moc szczytową (Daystar 100C IV curve Tracer) w czasie, tym samym wykazując brak pogorszenia wydajności LRF po odpowiednio 180 i 196 tygodniach.





3M planuje kontynuować obserwację i testowanie tych modułów w najbliższej przyszłości, aby stworzyć długoterminowy zestaw danych dla folii LRF i jej przyszłych pochodnych.

6. Prosta integracja z istniejącym procesem produkcyjnym

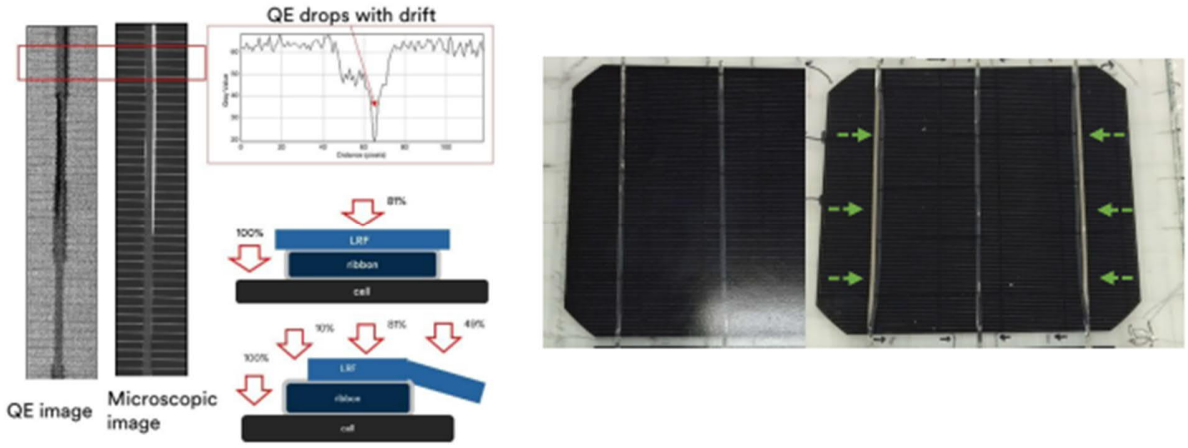
Produkcja modułów słonecznych osiągnęła bardzo wysoką wydajność i sprawność, zapewniając roczną produkcję na poziomie ponad 100 GW. Ważne i korzystne jest, aby każda nowa technologia była łatwo integrowana z istniejącymi procesami bez wpływu na wydajność i sprawność w tej wysoce konkurencyjnej i skalowalnej branży. Aplikator LRF jest urządzeniem, które może być dodane do przestrzeni dostępnej podłużnicach powszechnie stosowanych w

branży. W procesie montażu modułów, folia LRF jest nakładana na taśmy bezpośrednio po ich wlutowaniu w ogniwa i może obecnie obejmować komórki w konfiguracji z 3, 4 lub 5 szynami. Folia przylega do taśm natychmiast po zetknięciu się z nimi, dzięki czemu proces ten nie ogranicza przepustowości całego procesu produkcji. Dodatkowo, zastrzeżony klej stosowany w LRF umożliwia pozostanie folii na taśmach po precyzyjnym ułożeniu i pozwala zachować jej położenie na taśmie w kolejnych etapach procesu układania i laminowania modułów. Inwestycja kapitałowa jest stosunkowo niewielka i stanowi zaledwie ułamek kosztów całej podłużnicy. W wielu przypadkach aplikatory LRF mogą być montowane na istniejących liniach produkcyjnych.

7. **Krytyczne właściwości kleju: Wystarczająco silny, aby zminimalizować znoszenie, ale wystarczająco miękki, aby zminimalizować obciążenie ogniw słonecznych**

Folia LRF jest nakładana na taśmy, w określonych punktach naprężenia ogniw. Dlatego ważne jest, aby klej nie powodował dodatkowych naprężeń na ogniwach, ponieważ folie polimerowe mają mniejszą stabilność termiczną niż ogniwa słoneczne. Z drugiej strony, klej musi być wystarczająco mocny, aby folia pozostała na taśmach i nie przesuwała się podczas kolejnych etapów obróbki, w tym podczas laminowania termicznego. Taki przesunięcie powoduje zmianę mocy oraz wpływa na wygląd. Przesunięta folia pokryje aktywną powierzchnię fotowoltaiczną, co zmniejszy moc zamiast ją zwiększyć.

Rys. 9 przedstawia spadek wydajności kwantowej przy przesuniętej folii LRF oraz wygląd ogniwa.



Rys. 9. Obraz QE pokazuje znaczny spadek wydajności przy przesunięciu folii. Zdjęcia po prawej stronie pokazują różnicę w wyglądzie pomiędzy folią LRF przesuniętą a nieprzesuniętą.

Klej stosowany w powłoce LRF został starannie opracowany tak, aby spełniał powyższe kryteria i pozostawał łatwy do nakładania na taśmy w środowisku produkcji masowej.

Opracowano prostą metodę, zmodyfikowaną w oparciu o ASTM D3654 / D3654M w celu badania kleju pod kątem odporności na przesunięcie przed laminacją. Paski folii LRF

(szerokość 1/4") nakładano na folię Al. Do taśm przymocowano ciężar 1 kg. Próbki umieszczono w piecu o temp. 150 stopni C, jak pokazano na Rys. 10. Folia LRF z typowym klejem EVA wypada w ciągu 2 minut. Specjalnie opracowany klej LRF nie opada po 10 minutach wystawienia na działanie warunków badania.

Rys. 10. Testowanie kleju w piecu pod kątem minimalnego przesunięcia przed laminowaniem.

8. Wnioski

Folia LRF (Light Redirecting Film) to nowy sposób na zwiększenie wydajności modułów fotowoltaicznych. Poprzez wykorzystanie nieaktywnej części modułu fotowoltaicznego, w tym przypadku są to taśmy z trwałymi foliami optycznymi, producenci OEM modułów mogą osiągnąć wzrost mocy o 1,5-1,8% niezależnie od efektywności ogniwa bazowego. Folia LRF 3M została starannie zaprojektowana i opracowana, aby zapewnić stałe wzmocnienie optyczne i trwałość folii w module fotowoltaicznym. Ponad pięć lat badań w warunkach wystawienia na działanie czynników zewnętrznych (w połączeniu z rygorystycznymi, opatentowanymi próbami starzeniowymi) nie wykazało żadnego pogorszenia wyglądu ani działania. Korzyści z LRF obejmują zwiększoną produkcję energii w terenie, co zostało potwierdzone w kontrolowanym badaniu przeprowadzonym przez laboratorium TUV Rheinland w Szanghaju. I na koniec, osiągnięcie zysku mocy z folii LRF na taśmie wymaga zastosowania specjalnie opracowanego kleju, który umożliwia nakładanie folii LRF z prędkością produkcji masowej modułu i utrzymanie jego pozycji nad taśmą w procesie montażu i laminowania modułu.