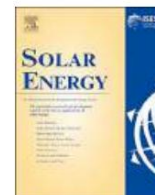




Danh sách nội dung có sẵn tại [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Năng lượng mặt trời

trang chủ tạp chí: www.elsevier.com/locate/solener



Sự phát triển ăn mòn của các tế bào quang điện trong các mô-đun sau 15 năm hoạt động

Điều tuyệt vời nhất của cuộc sống là chúng ta khó có thể hiểu được nó. Surawut Chuangchoted^a,
Krisanapong Kirtikarac^b

^a Viện sau đại học chung về năng lượng và môi trường (JGSEE), Đại học công nghệ Thonburi của vua Mongkut (KMUTT), Bangkok, Thái Lan

^b Trung tâm Xuất sắc về Công nghệ Năng lượng và Môi trường, Khoa học và Công nghệ Văn phòng Phát triển Nghiên cứu và Giáo dục Sau đại học, Bangkok, Thái Lan

^c Trung tâm thử nghiệm pin mặt trời CES (CSSC), Viện đào tạo và phát triển nhà máy thí điểm (PDTI), Đại học công nghệ Thonburi của Vua Mongkut (KMUTT), Bangkok, Thái Lan

^{*} Khoa Kỹ thuật Công cụ và Vật liệu, Khoa Kỹ thuật, Đại học Công nghệ King Mongkut Thonburi (KMUTT), Bangkok, Thái Lan

THÔNG TIN BÀI VIẾT

Từ khóa:
Sự suy giảm của các mô-đun PV
Sự suy thoái hàng năm
Tách lớp
Ăn mòn trên pin mặt trời
Đánh giá dài hạn

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu sự xuống cấp của các mô-đun PV sau 15 năm hoạt động tại Thái Lan. Tất cả 16 mô-đun của một chuỗi được đo hàng năm trong phòng thử nghiệm tiêu chuẩn, sau đó được đưa trở lại cùng một vị trí của chuỗi kể từ năm thứ 7 sau khi hoạt động. Kết quả và phân tích dữ liệu có thể được chia thành 3 phần bao gồm đánh giá hiệu suất điện, quan sát sự xuống cấp vật lý và sự phát triển ăn mòn trên các dải cell. Từ kết quả hiệu suất điện tại STC, người ta thấy rằng công suất của các mô-đun nhỏ hơn 80% giá trị nhãn hiệu trong năm thứ 15 đối với 75% tổng số mô-đun. Tỷ lệ suy thoái trung bình, dựa trên nhãn hiệu, là 1,47% / năm. Tỷ lệ suy thoái của các mô-đun kể từ năm thứ 10 sau khi vận hành nằm trong khoảng từ 2,5 đến 3,0%. Từ các lỗi trực quan ở mặt trước và mặt sau của các mô-đun đã xuất hiện trong tất cả các mô-đun. Trong năm thứ 12 - 15, sự phát triển diện tích ăn mòn trên các dải ô, được tính toán bằng chương trình ImageJ, là khoảng 10–17% / 3 năm diện tích dải, đặc biệt là đối với các ô bên cạnh hộp nối. Màu sắc của các sản phẩm ăn mòn cũng được quan sát thấy ở cả hình thức màu sắc và sự thay đổi màu sắc trên mỗi ô của các mô-đun được chọn. Đối với các mô-đun này, chúng tôi dự định tiếp tục vận hành cho đến khi hết vòng đời của hệ thống. Một mô-đun tương tự khác đã được phá hủy và lấy đi để điều tra. Các sản phẩm ăn mòn và màu sắc của các sản phẩm ăn mòn có thể được chứng minh bằng EDS và tham khảo tiêu chuẩn ASTM D130. Sản phẩm ăn mòn Sn và Pb được xác nhận bằng SEM và EDS.

1. Giới thiệu

Tổng công suất lắp đặt PV trên toàn thế giới tăng từ 14,5 MW năm 2008 lên 512,3 GW vào cuối năm 2018 (IEA-PVPS, 2009; Masson và Izumi, 2019; Masson và cộng sự, 2019). Ở nước ta, đất nước Thái Lan, mục tiêu lắp đặt PV là 10 GW vào năm 2037 theo Kế hoạch phát triển điện lực Thái Lan (PDP2018) và Kế hoạch phát triển năng lượng thay thế (AEDP2015). Tổng công suất lắp đặt tại nước ta đã đạt gần 3 GW vào cuối năm 2018 (DEDE, 2019). Để đạt được mục tiêu, công suất lắp đặt sẽ tăng trưởng gấp 1000 lần trong ba thập kỷ. Do đó, sự xuống cấp của mô-đun PV là một trong những vấn đề quan trọng nhất về độ tin cậy của hệ thống PV. Sự xuống cấp của mô-đun PV không chỉ ảnh hưởng đến lợi nhuận tài chính mà còn ảnh hưởng đến các khía cạnh môi trường. Do đó, đã có nhiều cuộc điều tra khác nhau bao gồm tốc độ suy thoái PV, cơ chế hỏng hóc của mô-đun, đánh giá hệ thống dài hạn, phương pháp thử nghiệm để đảm bảo tuổi thọ của mô-đun, cải tiến tiêu chuẩn, v.v.

(NREL) đã báo cáo rằng tỷ lệ suy thoái của các mô-đun PV được lắp đặt và tiếp xúc trên thực địa tại Hoa Kỳ, Châu Âu, Nhật Bản và Úc. Người ta thấy rằng các mô-đun PV silicon tinh thể (c-Si) có mức suy thoái trung bình là 0,8% / năm, nhưng chúng phụ thuộc vào thời điểm bắt đầu lắp đặt, chất lượng mô-đun PV và khu vực môi trường lắp đặt (Jordan và Kurtz, 2013). Viện Khoa học và Công nghệ Công nghiệp Tiên tiến Quốc gia (AIST) đã lắp đặt hệ thống PV kết nối lưới tại Nhật Bản vĩ độ 32,2 N và kinh độ 130,3 E từ năm 2010 đến năm 2016 cho thấy tỷ lệ suy thoái của các mô-đun PV silicon đơn tinh thể (mono-Si) là 2,6% / năm và các mô-đun PV silicon đa tinh thể (poly-Si) là 2,2% / năm (Ishii và Masuda, 2017). Phòng thí nghiệm Độ tin cậy quang điện (ASU-PRL) báo cáo rằng tỷ lệ suy thoái của các Mô-đun PV poly-Si được lắp đặt ở vùng khí hậu khô nóng chịu được hơn 13 năm là 2,29%/năm (Janakeeraman và cộng sự, 2014). Một số nhà nghiên cứu báo cáo rằng 90 mô-đun PV mono-Si được lắp đặt hơn 22 năm ở vùng khí hậu hỗn hợp của Ấn Độ cho thấy mức suy thoái điện năng trung bình là 1,9%/năm. Tuy nhiên, tỷ lệ suy thoái tối đa và tối thiểu là 4,4%/năm và 0,3%/năm

Về sự suy thoái của PV, Phòng thí nghiệm năng lượng tái tạo quốc gia

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: dhirayut.che@kmutt.ac.th (D. Chenvidhya).

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.016>

Nội dung bài báo này là tài sản của Elsevier. Mọi quyền được bảo lưu. Mọi quyền được bảo lưu. Mọi quyền được bảo lưu. Mọi quyền được bảo lưu. Mọi quyền được bảo lưu.

năm 2020 0038-092X/ © 2020 Hiệp hội Năng lượng Mặt trời Quốc tế. Xuất bản bởi Elsevier Ltd. Bảo lưu mọi quyền.

Bảng 1

Tóm tắt các cuộc điều tra về tốc độ suy thoái (DR).

Tham khảo	Thời gian học tập	Phối sáng thực địa	Đo lường	Tỷ lệ suy thoái
Jordan và Kurtz, 2013	1973–2013	Hoa Kỳ , Châu Á u, Nhật Bản và Úc	Thay đổi/Phòng thí nghiệm	c-Si cao 0,8%/năm trung bình0,5%/năm
http://dx.doi.org/10.1027/0021-843X.111.2.202 She và Masuda, 2017. Janakeezaman và cộng sự, 2014. Rajput và cộng sự	2010–2016 2001–2014 1994–2016	Nhật Bản Châu Á Ấn Độ	Cảnh đồng Cảnh đồng Cảnh đồng	mono-Si 2,6%/năm poly-Si 2,2%/năm poly-Si 2,29%/năm đơn-Si Trung bình 1,9%/năm Tối đa 4,4%/năm Tối thiểu 0,3%/năm
Virtuani và cộng sự, 2019	1982–2017	Châu Á u		(22%) là 0,2%/năm (73%) là 0,7%/năm
da Fonseca và cộng sự, 2020	2004–2019	Brazil		mono-Si 0,7%/năm
Limmanee và cộng sự, 2016	2013–2016	Thái Lan		c-Si 0,5%/năm
Sangpongsanont và cộng sự, 2013, 2016	2003–2016	Thái Lan		mono-Si 1,14%/năm poly-Si 1,41%/năm

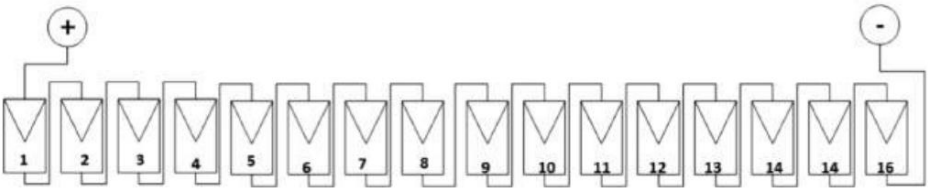
Bảng 2

Tóm tắt về tác động ăn mòn lên các mô-đun PV được thể hiện trong Bảng 2.

Tham khảo	Đo lường	Sự ăn mòn
Kraft và cộng sự, 2015	- lão hóa (nhiệt ẩm)/Phòng thí nghiệm - kính hiển vi điện tử quét (SEM) - sự ăn mòn của lớp kính	- cơ chế ăn mòn do axit axetic gây ra - sản phẩm ăn mòn của tiếp xúc (chì, bạc) bằng dấu vết hóa học
Kim và cộng sự, 2016	- lão hóa (nhiệt ẩm)/Phòng thí nghiệm (85 °C, 85% RH, 4000 giờ)	- sự suy thoái của các mô-đun PV xảy ra do tác động lão hóa - tăng điện trở nối tiếp và điện trở tiếp xúc của các thành phần kim loại bằng silic và bạc ăn mòn ngón tay
Ferrara và Philipp, 2012	- Hiện trường/Phòng thí nghiệm (điểm nóng, tải trọng cơ học, độ ẩm-đóng băng, nhiệt ẩm, chu kỳ nhiệt/STC)	- ăn mòn xảy ra trên vật liệu kết nối- ăn mòn được phát hiện bằng quan sát trực quan- tác động ăn mòn lên đặc tính điện của mô-đun PV (tăng điện trở nối tiếp)- các khí có thể gây ăn mòn như axit HNO3, HCL, H2SO4 , v.v.
Xiong và cộng sự, 2017	- Lão hóa /Phòng thí nghiệm (25 °C, 45%RH, 2 tháng) (25 °C, 85%RH, 240 giờ) (25 °C, 55%RH, 240 tháng, axit axetic)	- hành vi ăn mòn của điện cực phía sau trong các cell được thể hiện bằng màu vàng và màu chàm - sự ăn mòn xảy ra ở mối hàn - vùng ăn mòn sẽ mở rộng từ mép vào tâm giữa điện cực Ag và Sn37Pb hợp kim - kim loại có giá trị điện thế thấp hơn sẽ bị ăn mòn đầu tiên
Li và cộng sự, 2018	- Lão hóa/Phòng thí nghiệm (85 °C, 85%RH, nhiệt ẩm 1000 giờ) (85 °C, 85%RH, độ lệch 1000 V 300 giờ)	- sự ăn mòn vật liệu trong pin mặt trời xảy ra trên khả năng chống ăn mòn của chúng đối với kiểm soát pháp - sự ăn mòn và tách lớp có tác động qua lại và thúc đẩy sự hình thành và lan truyền của lẫn nhau



(a) Hệ thống kết nối lưới APV



(b) Cấu hình mô-đun PV

Hình 1. Cấu hình hệ thống PV và các mô-đun PV của chuỗi đã chọn.

Bảng 3
Danh sách nhạc cụ.

Mục kiểm tra	Dụng cụ
Đo lường hiệu suất tại STC	Máy mô phỏng năng lượng mặt trời Pasan IIIb với lớp AAA
Quan sát trực quan	Canon – E0577
Kiểm tra cách điện	Kiểm tra Hipot: Chroma 19052
Phát quang điện	Máy ảnh EL: Buchanan EL-MES CAM1
	Nguồn điện DC: Agilent N5769A 87J

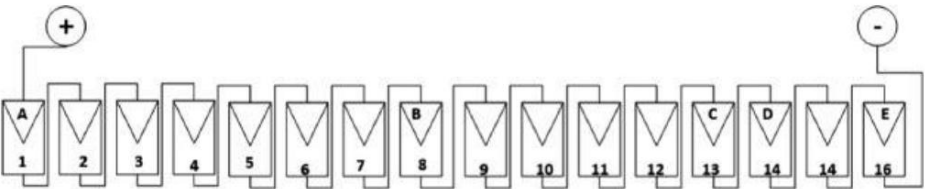
tương ứng (Rajput và cộng sự, 2016). Hệ thống PV lâu đời nhất được lắp đặt ở Châu Âu đã trình bày tỷ lệ suy thoái trung bình sau 35 năm hoạt động thành 2 nhóm: nhóm 1, 22% số mẫu, là 0,2%/năm; nhóm 2, 70% số mẫu, là 0,69%/năm (Virtuani và cộng sự, 2019). Ở Brazil, tỷ lệ suy thoái trung bình của các mô-đun PV Si đơn tinh thể là 0,70%/năm đối với hệ thống PV sau 15 năm hoạt động. Các khiếm khuyết về mặt thị giác, bao gồm chuyển sang màu nâu, oxy hóa lớp phủ, hoa văn màu trắng sữa, vết nứt tế bào, tách lớp tấm nền, khiếm khuyết diode bỏ qua và các điểm nóng đã được tìm thấy (da Fonseca và cộng sự, 2020). Tại Thái Lan, Cơ quan Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NSTDA) đã trình bày về các mô-đun poly-Si được lắp đặt trong điều kiện khí hậu nóng ẩm, tỷ lệ suy thoái là 0,5%/năm (Limmanee và cộng sự, 2016). Trong các công trình trước đây của chúng tôi đã báo cáo tốc độ thoái hóa của các mô-đun mono-Si và poly-Si được lắp đặt gần vịnh Thái Lan là 1,14%/năm và 1,41%/năm (Sangpongsanont và cộng sự, 2013, 2016). Tóm tắt các cuộc điều tra về tốc độ thoái hóa được thể hiện trong Bảng 1.

Đã có một số nghiên cứu tìm hiểu nguyên nhân khiến các mô-đun PV bị suy thoái trong các loại môi trường lắp đặt khác nhau, bao gồm sự đổi màu, nâu hóa, ổ vàng trên vật liệu đóng gói ((Mani)GovidaSamy TamizhMani, 2013; Ferrara và Philipp, 2012).

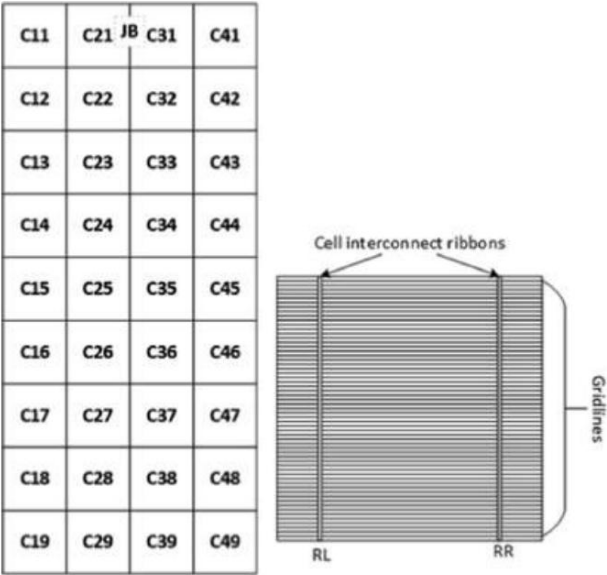
Sau khi Ethyl Vinyl Acetate (EVA) tiếp xúc với tia cực tím, nhiệt độ và độ ẩm cao, cấu trúc hóa học bị thay đổi và hình thành nước và axit axetic (Gagliardi và cộng sự, 2017). Những tác động này dẫn đến sự phân hủy EVA có thể quan sát thấy trên sự đổi màu của EVA. Sự nâu hóa EVA dẫn đến sự truyền photon từ bức xạ mặt trời đến tế bào PV gây ảnh hưởng trực tiếp đến dòng điện ngắn mạch (Isc) và công suất cực đại (Pm) của mô-đun PV (BBW, 2003). Sự nâu hóa không chỉ xuất hiện trên lớp nền mà còn trên chất nền. Tấm nền được sử dụng để bảo vệ các mô-đun khỏi tia cực tím, độ ẩm, nhiệt độ cao, gió và hoạt động như cách cách điện. Sự xuống cấp của nó xuất phát từ sự thay đổi cấu trúc hóa học do phản xạ bức xạ UV đến từng lớp trong mô-đun.

Độ ẩm trong tương lai và nhiệt độ cao gây ra hiện tượng ổ vàng và rách ở tấm nền, ảnh hưởng đến Pm của các mô-đun PV (Jorgensen và cộng sự, 2006; Kim và cộng sự, 2016). Sự tách lớp xuất hiện trên cùng một lớp ổ vàng trên vật liệu đóng gói. Trong quá trình tách lớp kéo dài, hiện tượng phồng rộp sẽ cho phép nước và khí xâm nhập vào lớp EVA/cell (Ferrara và Philipp, 2012). Sau khi các kết nối kim loại bị đứt, chẳng hạn như khung, đầu nối, cáp, kết nối cell, ruy băng, thanh cái và đường lưới, thì độ ẩm trong khí quyển hoặc sự kết hợp với khí xâm nhập vào lớp đóng gói. Nguyên nhân đó dẫn đến ăn mòn.

Hơn nữa, nhiệt độ cao hơn sẽ đẩy nhanh phản ứng. Ăn mòn có tác động trực tiếp đến điện trở nối tiếp (Rs) và Pm. Cơ chế ăn mòn xảy ra trên dải và đường lưới do nước và axit axetic từ sự phân hủy EVA. Các kết nối hàn trong các ô bị hòa tan trong nước và phản ứng giống như ăn mòn điện hóa hoặc ăn mòn axit. Năng lượng điện cực tiềm năng thấp nhất của kim loại sẽ bị ăn mòn đầu tiên (Kraft và cộng sự, 2015; Xiong và cộng sự, 2017). Tương quan giữa ăn mòn và



Hình 2. 5 mô-đun được chọn (Mô-đun A, B, C, D và E).



Hình 3. Bố trí cell trên mô-đun và mã của ribbon kết nối cell.

sự tách lớp tương tác và thúc đẩy sự hình thành và lan truyền của nhau (Li et al., 2018). Tóm tắt về tác động ăn mòn trên các mô-đun PV được thể hiện trong Bảng 2.

Bài báo này nhằm mục đích điều tra sự phát triển của quá trình ăn mòn kim loại trong các mô-đun PV được đưa vào vận hành trong hơn 15 năm liên tiếp. Khi bắt đầu lắp đặt hệ thống PV, có một dự án đầy tham vọng, Hệ thống nhà năng lượng mặt trời (SHS), tại Thái Lan. Tất cả 16 mô-đun PV, một chuỗi hoàn chỉnh, đã được lấy để đo trong phòng thí nghiệm thử nghiệm tiêu chuẩn và được đưa trở lại để lắp đặt ở cùng một vị trí trong mỗi năm. Hệ thống giám sát PV đã được trang bị tốt kể từ năm thứ 7 sau khi bắt đầu. Thông qua nghiên cứu có hệ thống, chúng tôi mong đợi sẽ quan sát được sự phát triển của sự xuống cấp, đặc biệt là sự phát triển của quá trình ăn mòn kim loại trên các dải pin trong cuộc điều tra này. Đóng góp chính của bài báo này bao gồm sự phát triển của quá trình ăn mòn dải kim loại trên các tế bào năng lượng mặt trời và tốc độ xuống cấp. Tất cả các mô-đun PV trong một chuỗi nối tiếp đã được đưa trở lại để đo tại phòng thí nghiệm thử nghiệm tiêu chuẩn trong mỗi năm. Chúng tôi không tìm thấy cuộc điều tra nào đề cập đến việc đánh giá dài hạn bằng cách lấy lại toàn bộ các mô-đun trong một chuỗi nối tiếp để đo trong phòng thí nghiệm thử nghiệm hàng năm. Hầu hết các cuộc điều tra đã thực hiện phép đo khi bắt đầu hệ thống và sau đó đo vào cuối vòng đời hoặc vào năm thứ n.

Do đó, chúng ta có kết quả đo lường của mô-đun PV trong suốt thời gian tồn tại của hệ thống PV. Chúng ta có thể đánh giá tiến trình hoặc sự phát triển của sự xuống cấp như sự phát triển của ăn mòn kim loại trong bài báo này.

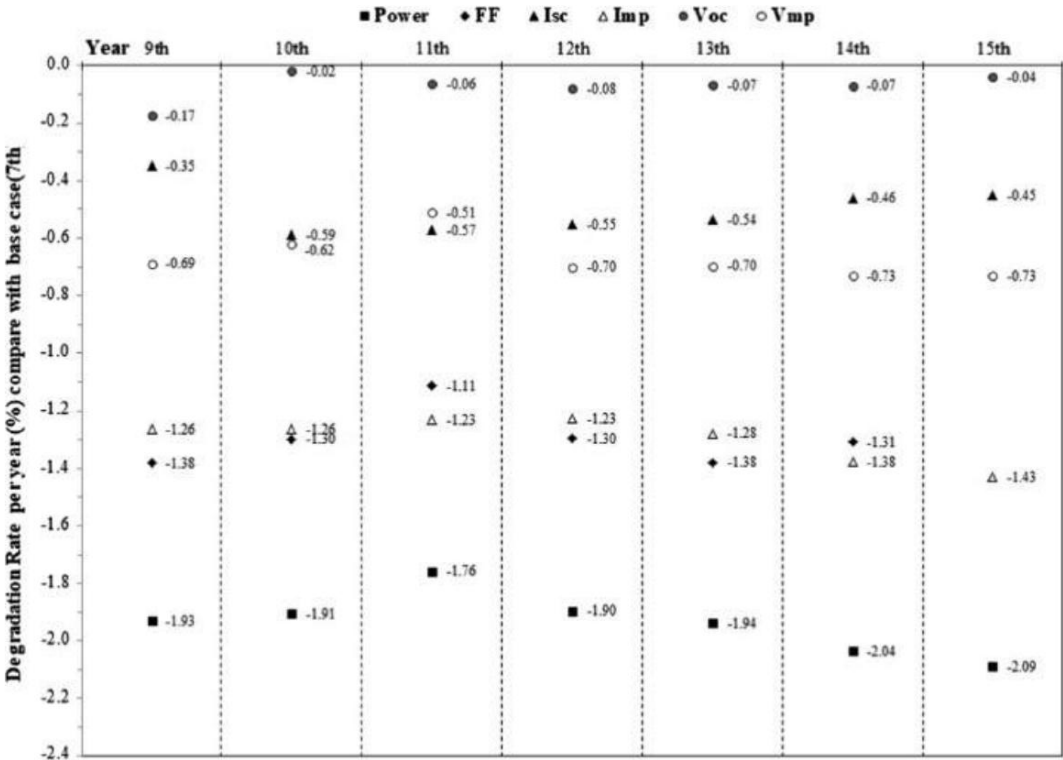
2. Phương pháp luận

Công trình này tập trung vào sự xuống cấp của các mô-đun PV trong lĩnh vực này điều kiện tiếp xúc trong hơn 15 năm liên tiếp tại Thái Lan. Tất cả các mô-đun đang được điều tra đều được đưa trở lại phòng thí nghiệm thử nghiệm tiêu chuẩn hàng năm. Việc quan sát sự phát triển của ăn mòn đã được nêu bật.

Bảng 4

Các thông số điện thu được bằng cách đo hiệu suất ở điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn (STC).

		Năm Mô-đun Số															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Công suất tại STC (Wp)	Thứ 7	111,4	112,3	113,4	112,7	113,1	113,9	112,0	114,2	112,5	113,8	111,7	111,8	111,7	113,4	111,0	108,7
	Thứ 9	106,8	108,3	110,2	110,1	110,2	109,6	108,2	108,5	109,0	108,8	109,6	106,2	103,8	109,2	105,5	104,2
	Thứ 10	103,4	105,6	108,6	107,9	108,4	107,7	104,9	107,4	108,0	105,8	105,9	104,0	104,2	108,0	101,6	103,5
	Thứ 11	100,8	102,6	106,4	106,3	106,7	105,6	104,7	106,8	108,0	105,0	103,0	101,5	103,5	106,0	102,7	101,7
	12	98,9	102,9	100,0	100,0	104,6	103,6	103,8	103,3	103,0	104,9	104,2	102,4	98,2			
	13	97,2	14	97,5	101,3	101,2	101,1	100,8	101,6	103,3	101,7	99,6					
	93,5		93,7	97,0	98,7	99,2	97,3	99,3	100,7	100,0	93,4		97,9	95,1	93,1	100,4	98,8
	15	90,4	90,0	93,7	96,1	97,3	94,7	97,3	98,4	95,2	92,8		93,4	90,9	86,5	92,7	93,3
																	94,3
Dòng điện ngắn mạch (A) 7th 9th	7.33	7,45	7,43	7,29	7,34	7,47	7,46	7,41	7,52	7,46	7,43	7,48	7,40	7,44	7,36	7,34	
	7,25	7,39	7,39	7,32	7,32	7,44	7,45	7,35	7,43	7,36	7,42	7,40	7,33	7,37	7,29	7,33	
	10 7.19	7,32	7,32	7,18	7,25	7,38	7,29	7,28	7,38	7,30	7,35	7,34	7,27	7,30	7,16	7,21	
	11 7.14	7,28	7,29	7,14	7,21	7,35	7,27	7,24	7,35	7,25	7,31	7,29	7,22	7,26	7,11	7,18	
	12 tháng 7.11	7,27	7,25	7,10	7,19	7,31	7,25	7,22	7,29	7,24	7,21	7,26	7,12	7,21	7,10	7,20	
	13 7.09 14	7,21	7,18	7,06	7,17	7,30	7,23	7,20	7,26	7,17	7,19	7,24	7,07	7,17	7,08	7,17	
	7.08 15 7.01	7,23	7,18	7,03	7,18	7,29	7,23	7,23	7,26	7,19	7,16	7,23	7,05	7,17	7,09	7,19	
		7,18	7,14	7,00	7,18	7,25	7,21	7,20	7,22	7,17	7,16	7,17	7,02	7,16	7,06	7,20	
Điện áp mạch hở (V) 7 9 21,6 10	21,7	21,8	21,8	21,7	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,7	21,8	21,8	21,7	
	21,7 11 21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	
	12 21,6 13	21,8	21,8	21,7	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,7	21,8	21,7	21,8	21,8	21,8	
	21,6	21,7	21,7	21,7	21,7	21,8	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,8	21,7	
		21,7	21,7	21,6	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,6	21,7	21,7	21,7	
		21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,6	21,7	21,6	21,7	21,7	21,7	
	14 21,6	21,7	21,6	21,6	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,5	21,7	21,6	21,7	21,7	21,7	
	15 21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,8	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	

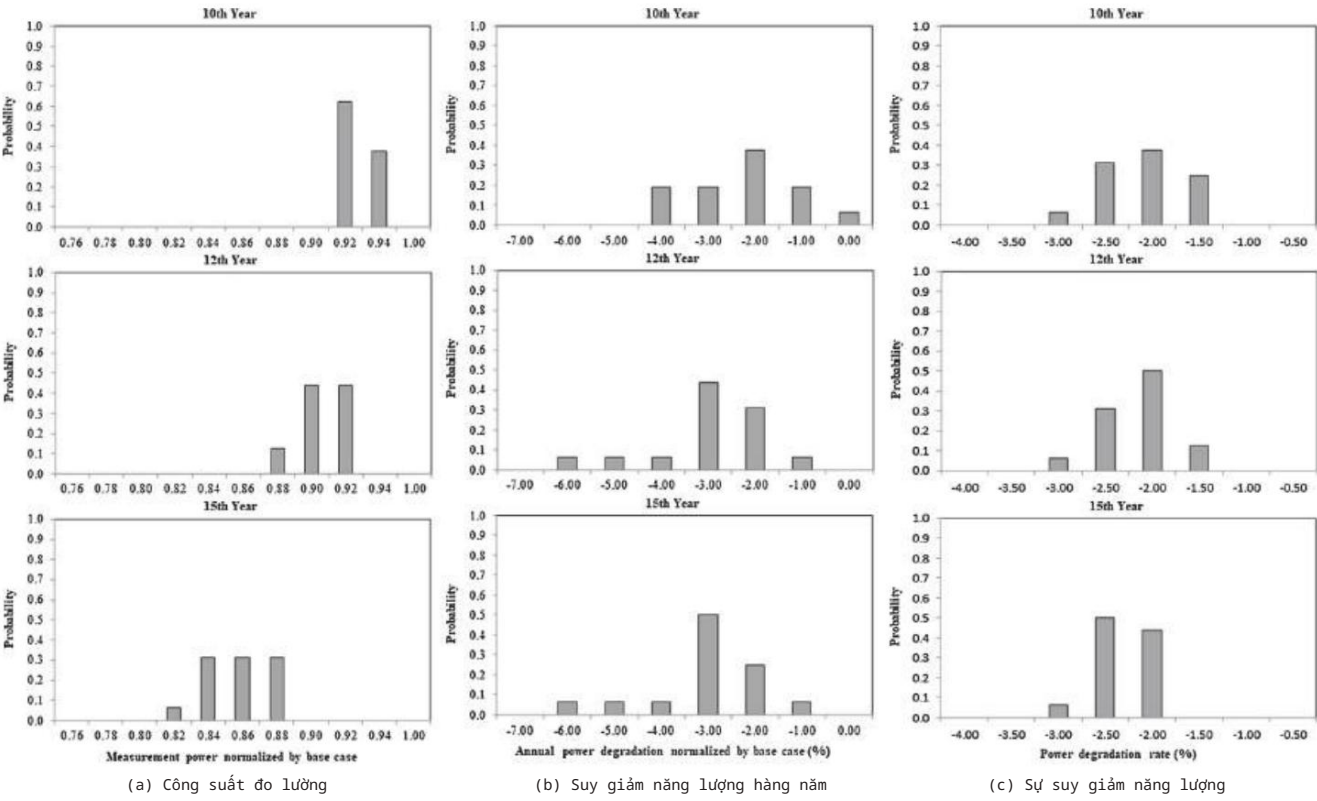


Hình 4. Tốc độ suy thoái hàng năm của từng thông số so với trường hợp cơ sở (năm thứ 7).

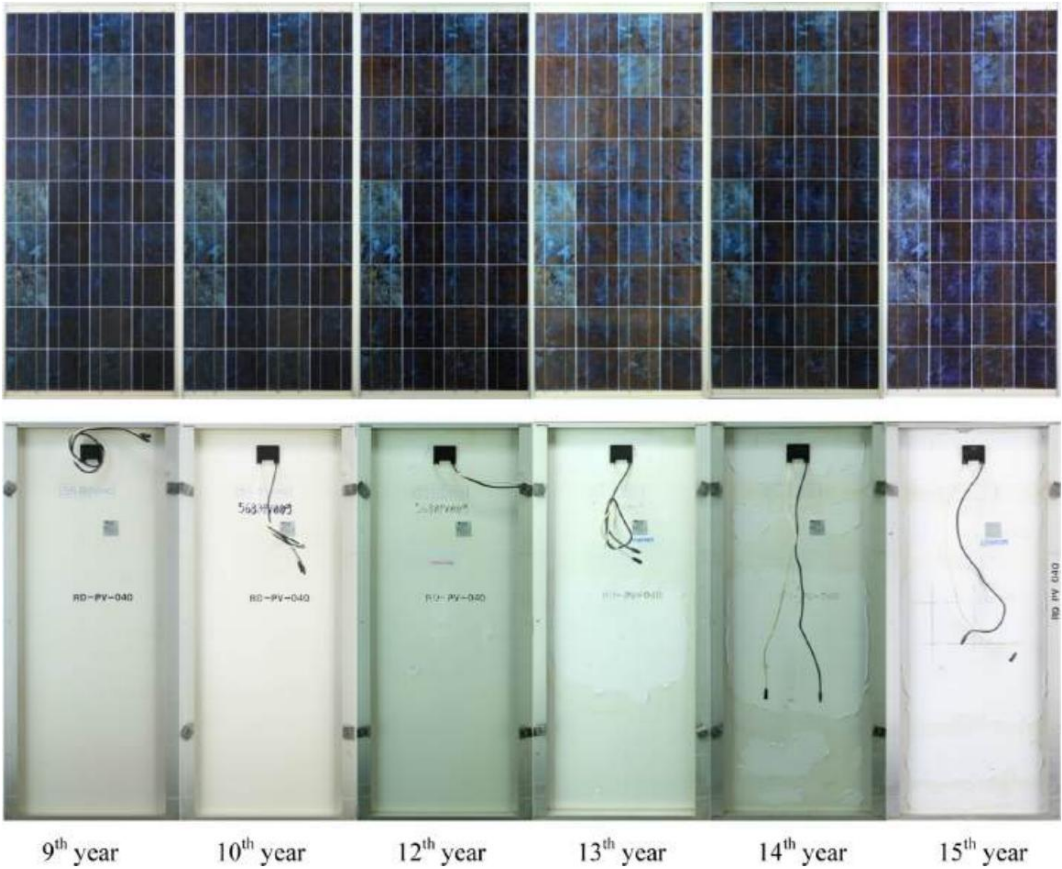
2.1. Thông tin về địa điểm và hệ thống PV

Một chuỗi hệ thống điện mặt trời kết nối lưới điện đã được lựa chọn trong nghiên cứu này. Các mô-đun PV của hệ thống được lắp đặt trên mỗi giá đỡ độc lập lắp đặt cấu trúc trên mái phẳng của một tòa nhà từ năm 2003. Vị trí của công trình là ở vĩ độ 13°34' Bắc và kinh độ 100°26' Đông, trên khu vực phía nam của Bangkok, Thái Lan. Từ môi trường chung tình trạng của Quận Bang Khun Thian của Bangkok, địa điểm nằm trên

1-1,5 m so với mực nước biển. Điều kiện khí hậu của Bangkok là Aw theo phân loại khí hậu Köppen-Geiger (<https://en.climate-data.org/asia/thailand/bangkok/bangkok-6313/> , 2020). Trung bình nhiệt độ ở Bangkok là 28,1 °C. Lượng mưa khoảng 1430 mm giảm hàng năm. Bức xạ mặt trời trung bình toàn cầu là khoảng 5,24 kWh/m2/ngày (<http://www.dede.go.th/>, 2017). Có 16 mô-đun PV dạng tinh thể đa tinh thể được kết nối theo chuỗi. Các mô-đun PV được đặt vào hoạt động từ năm 2003, trong khi các thiết bị đo lường vẫn hoạt động tốt



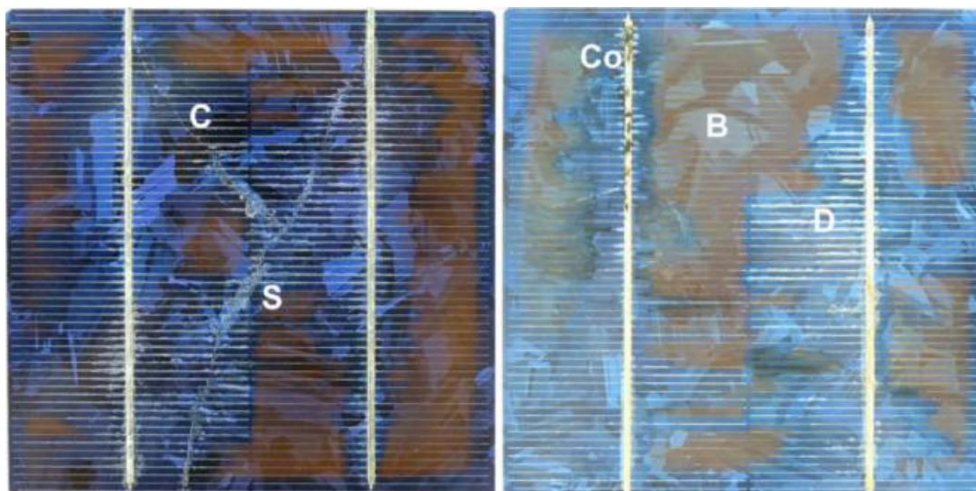
Hình 5. Phân bố của Pm vào năm thứ 10, 12 và 15 được chuẩn hóa theo Pm trong trường hợp cơ sở (năm thứ 7).



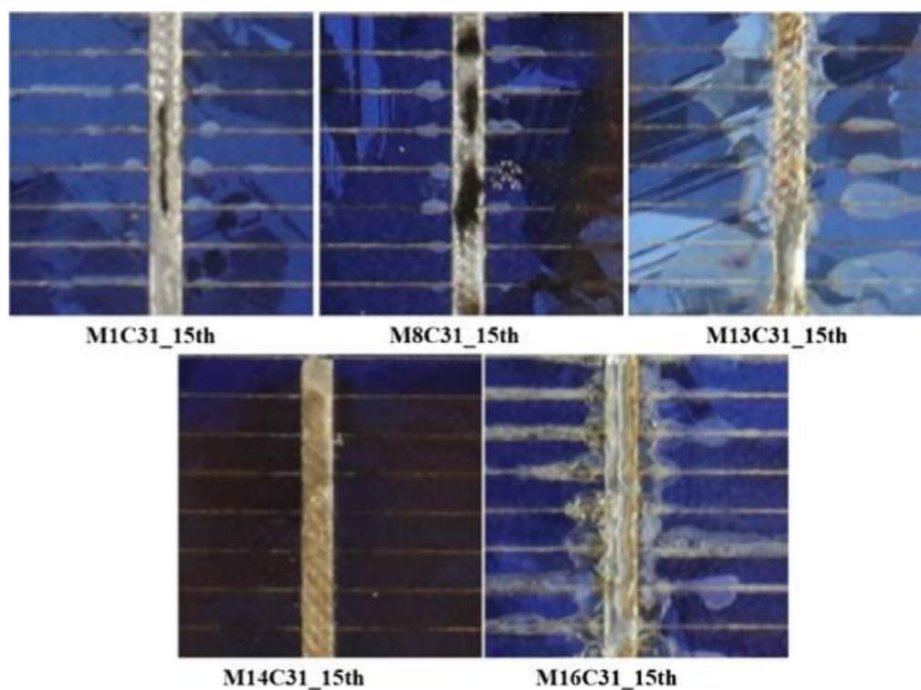
Hình 6. Hình ảnh mặt trước và mặt sau của Module số 13 (Module C) từ năm thứ 9 đến năm thứ 15.



Hình 7. Sự tách lớp và phân hóa của tờ giấy phía sau.



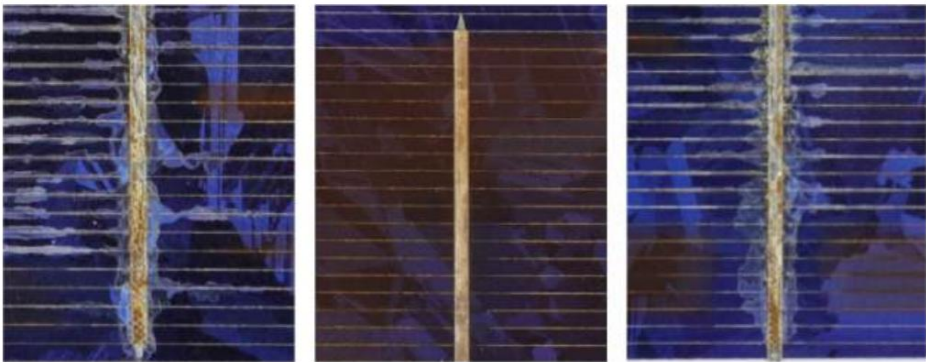
Hình 8. Các khuyết tật về thị giác xuất hiện trên một tế bào như Nâu hóa (B), Nứt (C), Ăn mòn (Co), Tách lớp (D) và Vết ốc sên (S).



Hình 9. Màu sắc của sự ăn mòn trên ruy băng và đường lưới bao gồm vàng, xám nhạt, nâu sẫm và đen. (Để giải thích các tham chiếu đến màu sắc trong chú thích hình này, người đọc được giới thiệu phiên bản web của bài viết này.)

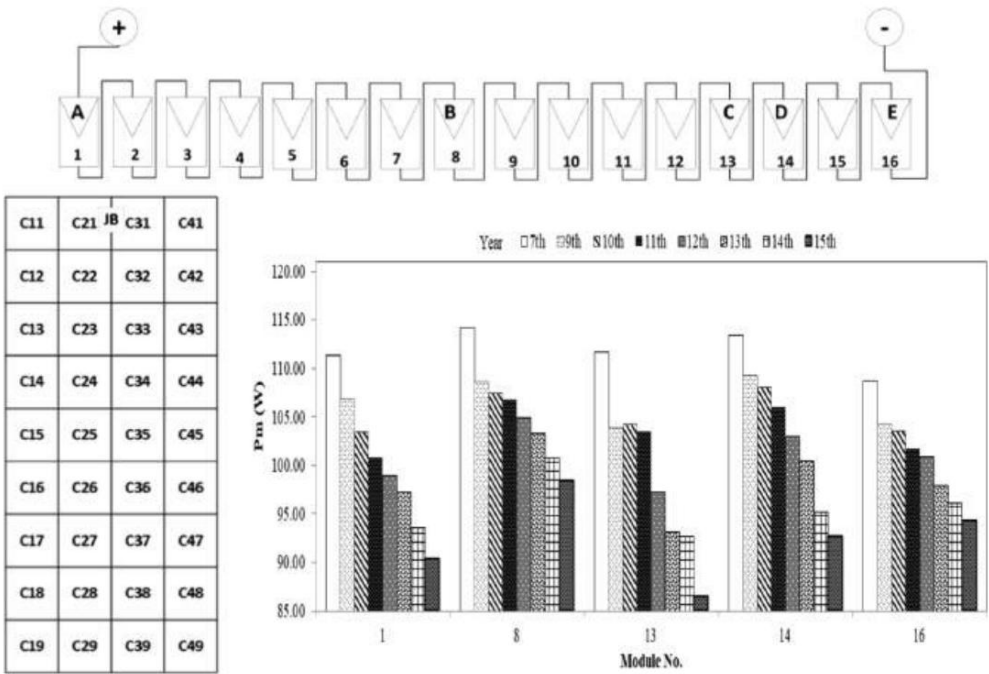
được thiết lập vào năm 2010. Dữ liệu bao gồm bức xạ mặt trời trong mặt phẳng, nhiệt độ và độ ẩm môi trường, dữ liệu gió và nhiệt độ mô-đun, được thu thập trong một phút. Mỗi mô-đun PV được cố định tại vị trí của nó kể từ năm 2010, tức là Mô-đun số 1 được lắp đặt ở đầu dương của chuỗi hoặc Mô-đun số 16 được lắp đặt ở đầu âm của chuỗi. Ảnh chụp hệ thống và cấu hình chuỗi được hiển thị trong Hình 1.

Thông số kỹ thuật của mỗi mô-đun PV là silicon đa tinh thể 120 Wp, dòng điện ngắn mạch (I_{sc}) 7,81 A, dòng điện ở công suất cực đại (I_{mp}) 7,02 A, điện áp mạch hở (V_{oc}) 21,30 V, điện áp ở công suất cực đại (V_{mp}) 17,10 V và hệ số lấp đầy (FF) 0,72. Các mô-đun PV trong nghiên cứu này được lắp ráp trong nước với thương hiệu nước ngoài. Năm đầu tiên vận hành mô-đun là năm 2003, vì vậy năm 2010 được gọi là năm thứ 7 và năm 2018 được gọi là

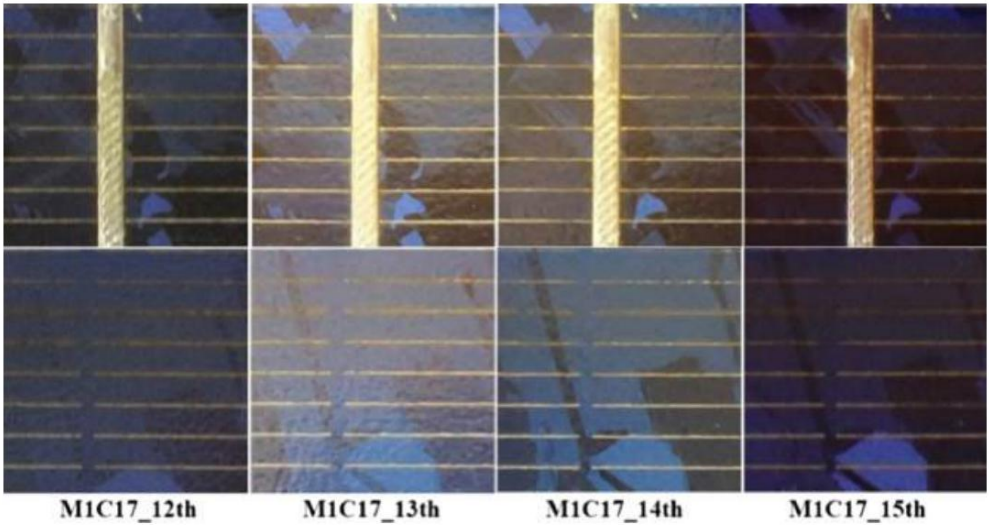


(a) M8C21_năm thứ 15 (b) M13C11_năm thứ 15 (c) M16C31_năm thứ 15

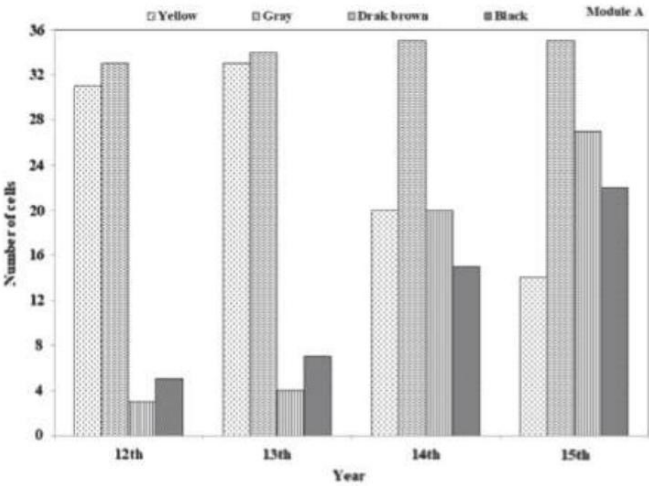
Hình 10. Ăn mòn trên bảng (a) ăn mòn có tách lớp (b) ăn mòn có chuyển màu nâu (c) ăn mòn có tách lớp và chuyển màu nâu.



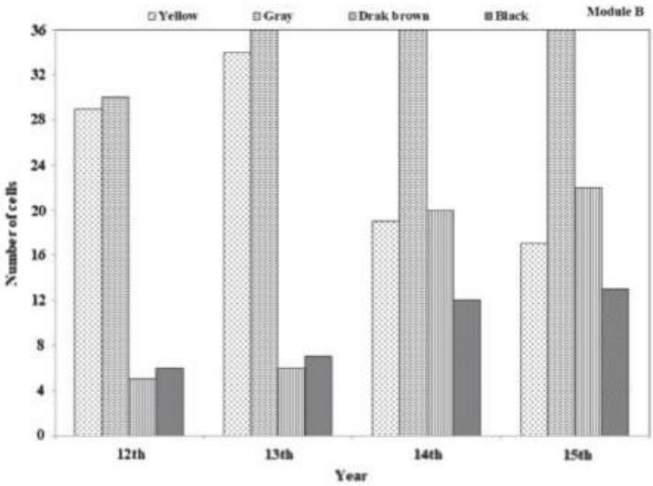
Hình 11. Sơ đồ và cách bố trí các mô-đun được chọn và cách bố trí ô và Pm của mỗi mô-đun được chọn.



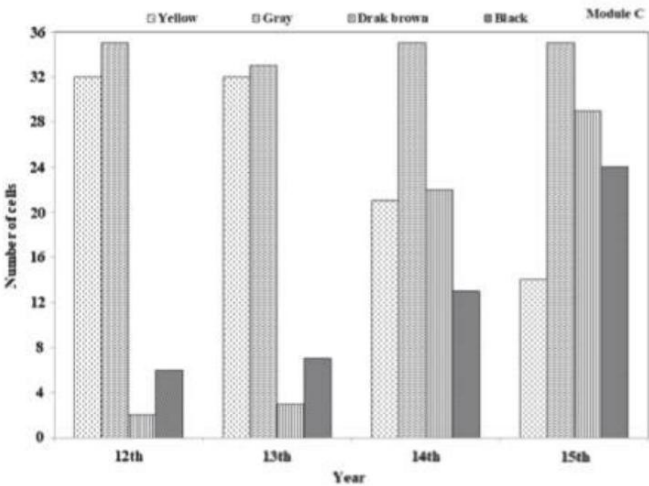
Hình 12. Sự thay đổi màu sắc ăn mòn trong năm thứ 12-15.



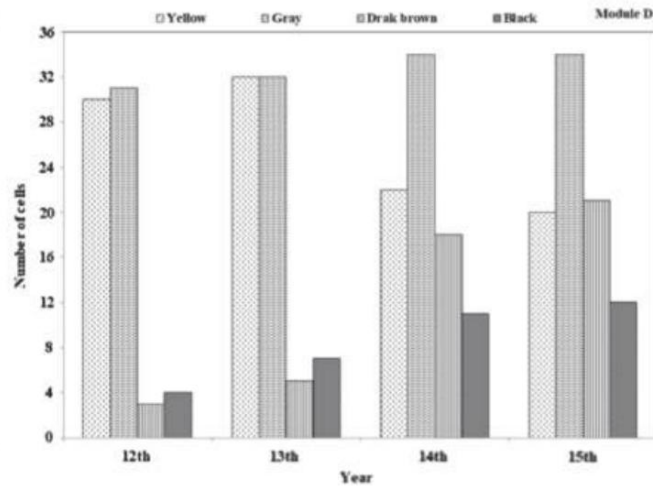
(a) cho Mô-đun A



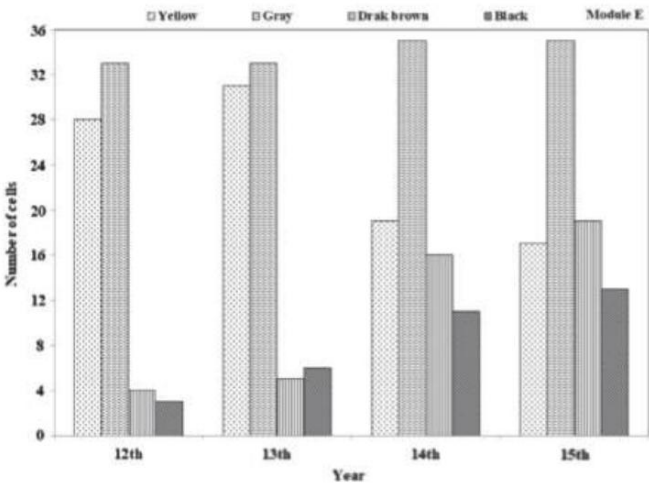
(b) cho Mô-đun B



(c) cho Mô-đun C



(d) cho Mô-đun D



(e) cho Mô-đun E

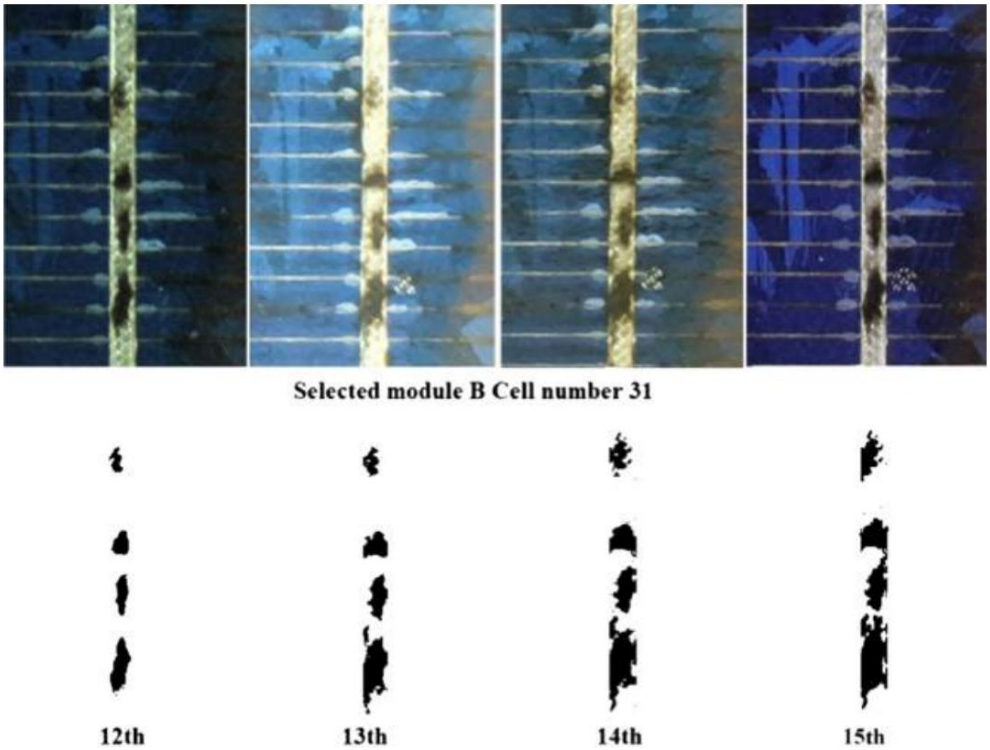
Hình 13. Số lượng ô xuất hiện mỗi màu ăn mòn trên ruy-băng của mỗi mô-đun được chọn.

Năm thứ 15 trong bài báo này.

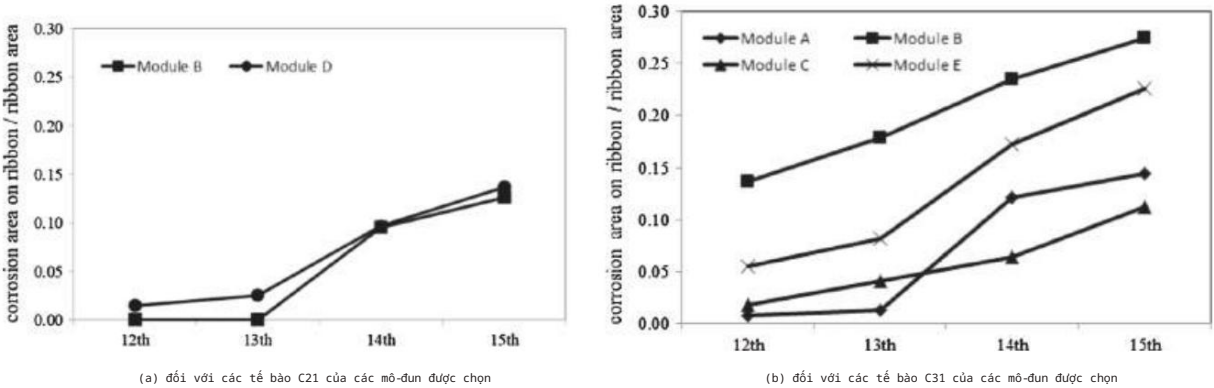
2.2. Đo lường và đánh giá các mô-đun PV

Các mô-đun PV trong chuỗi này đã được đo hàng năm một số mục thử nghiệm theo IEC61215:2005 kể từ năm 2010. Tất cả các mô-đun được hàng năm

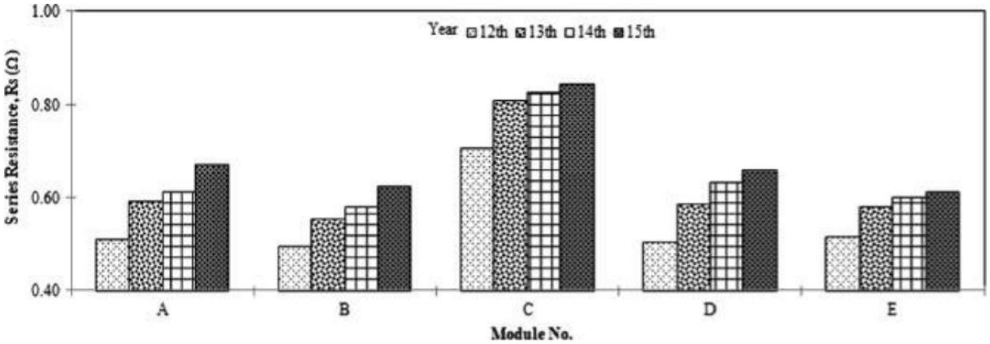
được đưa đi đưa lại từ địa điểm này đến phòng thí nghiệm thử nghiệm tiêu chuẩn, theo chứng nhận ISO/IEC17025. Các phép đo, theo IEC61215:2005 điều khoản 10.1, 10.6, 10.3 và IEC TS60904-13, đã được thực hiện bởi phòng thử nghiệm công nhận theo Tiêu chuẩn ISO/IEC17025. Các mục kiểm tra bao gồm phép đo hiệu suất tại STC, Quan sát trực quan, Kiểm tra cách điện và



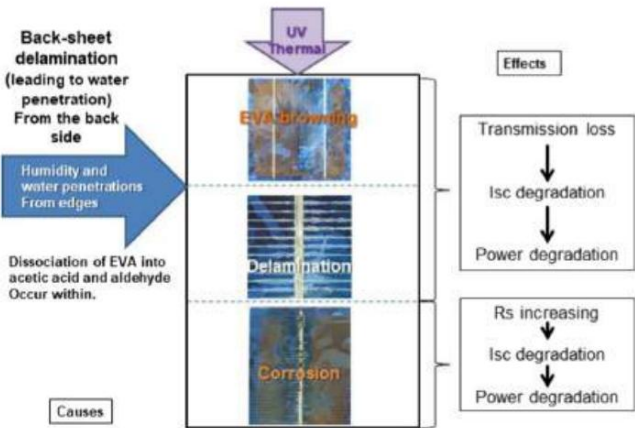
Hình 14. Hình ảnh tế bào 31 của Mô-đun: B.



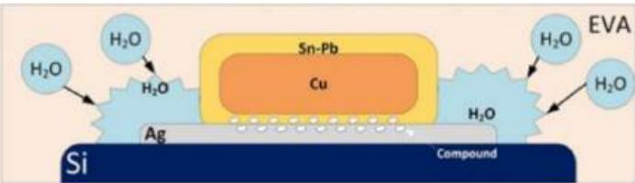
Hình 15. Sự gia tăng diện tích ăn mòn trên cả hai dải tế bào C21 và C31 xuất hiện ở các mô-đun được chọn trong năm thứ 12-15.



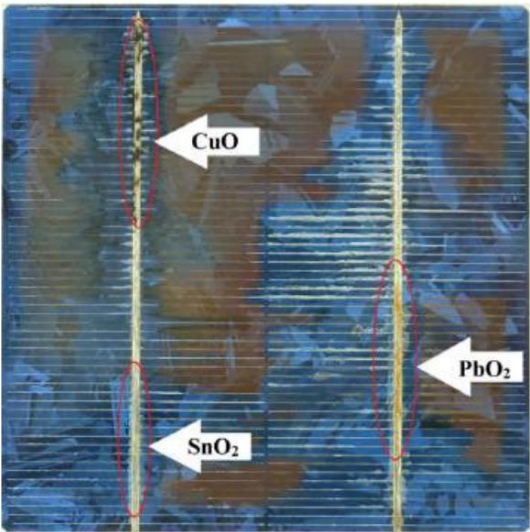
Hình 16. Điện trở nối tiếp tăng dần của các Mô-đun được chọn trong năm thứ 12-15.



Hình 17. Mô hình nguyên nhân và tác động của sự suy thoái.



Hình 18. Cơ chế ăn mòn có thể có trong một pin.



Hình 19. Màu sắc sản phẩm ăn mòn của ô C31 thuộc Module B năm thứ 14.

phát quang điện. Đo lường hiệu suất ở điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn (STC) được thực hiện theo IEC61215:2005 điều khoản 10.6 và IEC60904-1. Quan sát trực quan được thực hiện theo IEC61215:2005 điều khoản 10.1 để kiểm tra lỗi và quan sát bổ sung được chụp ảnh riêng lẻ từng ô trong mỗi mô-đun.

Thử nghiệm cách điện được thực hiện theo IEC61215:2005 mục 10.3 để kiểm tra khả năng chịu cách điện. Các thông số điện, bao gồm đặc tính dòng điện-điện áp (đường cong IV), dòng điện ngắn mạch (Isc), điện áp mạch hở (Voc), dòng điện tại điểm công suất cực đại (Im), điện áp tại điểm công suất cực đại (Vm), công suất tại điểm công suất cực đại (Pm), hệ số lấp đầy (FF), được lấy từ bộ mô phỏng năng lượng mặt trời trong phép đo hiệu suất tại STC. Độ không chắc chắn của

phép đo hiệu suất tại STC là 2,24%. Mỗi mô-đun luôn cố định vị trí của nó như thể hiện trong Hình 1. Các mục kiểm tra bao gồm phép đo hiệu suất ở điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn (STC), thử nghiệm cách điện, kiểm tra trực quan và thử nghiệm phát quang điện (EL). Phép đo EL bắt đầu vào năm thứ 13. Các thiết bị được liệt kê như thể hiện trong Bảng 3.

Tỷ lệ suy thoái điện hàng năm (DR) được tính toán theo phương trình (1)

%Tỷ lệ suy thoái = $\frac{X(t) - X(0)}{X(0) \cdot \Delta t} \cdot 100$ (1)

ở đây

X(t) n biểu thị giá trị của tham số điện được xem xét ở các điều kiện STC tương ứng tại thời điểm X(t) 0 biểu thị giá trị của tham số trên nhãn hoặc biểu thị giá trị của tham số tại năm thứ 7 của hệ thống PV (2010) t0biểu thị thời gian ban đầu tương ứng với lần lắp đặt đầu tiên hoặc biểu thị thời gian tương ứng với lần đo đầu tiên vào năm thứ 7 của hệ thống PV (2010) tn biểu thị thời điểm thực hiện các thử nghiệm t biểu thị thời gian tiếp xúc trong trường của các mô-đun PV.

Δ

Các thông số thu được bằng đặc tính IV ở điều kiện STC được đánh giá sự suy thoái hàng năm. Kết quả thử nghiệm cách điện đã được quan sát. Hình ảnh của các mô-đun PV, được chụp bằng thử nghiệm kiểm tra trực quan và thử nghiệm phát quang điện, đã được so sánh theo thời gian. Đánh giá sự xuống cấp của các mô-đun có thể được thực hiện bằng các thông số điện đồng thời với quan sát hình ảnh.

2.3. Khảo sát sự phát triển của ăn mòn

Trong năm thứ 12-15 vận hành hệ thống PV, hiện tượng ăn mòn kim loại trên mỗi cell được quan sát thấy hàng năm khi diện tích, chiều dài và màu sắc tăng lên. Số lượng mô-đun chạy, từ đầu cực dương của chuỗi đến đầu cực âm của chuỗi, được gọi tương ứng là Mô-đun số 1 đến Mô-đun số 16. Trên thực tế, tất cả các mô-đun đều được nghiên cứu, nhưng chúng tôi chỉ chọn 5 mô-đun trong số 16 mô-đun để trình bày chi tiết trong bài báo này. Năm mô-đun, như thể hiện trong Hình 2, bao gồm một mô-đun nằm ở đầu dương (M1), một mô-đun nằm ở đầu âm (M16), một mô-đun nằm ở giữa chuỗi (M8) và hai mô-đun khác có tỷ lệ suy giảm công suất tối đa (M13 và M14).

Có 36 ô trong chuỗi của mỗi mô-đun. Chúng tôi định nghĩa mã của từng ô và cũng định nghĩa mã của các dải kết nối ô như được thể hiện trong Hình 2. Một hộp nối của mỗi mô-đun được đặt ở mặt sau bên cạnh hai ô, C21 và C31 ở mặt trước. Ruy băng ở bên phải được gọi là RR, và ruy băng ở bên trái được gọi là RL, tương ứng (xem Hình 3).

Sự phát triển của ăn mòn được quan sát hàng năm bằng cách tăng diện tích ăn mòn, tăng chiều dài ăn mòn và thay đổi màu sắc của ăn mòn kim loại. Trong nghiên cứu này, mỗi ô trong mỗi mô-đun được chụp riêng một hình ảnh kỹ thuật số có độ phân giải cao trong mỗi năm trong năm hoạt động thử 12-15, sau đó chúng tôi sử dụng chương trình ImageJ để thao tác tính toán diện tích ăn mòn. Ngưỡng màu hoặc mức lượng tử hóa của hình ảnh được sử dụng để định lượng diện tích ăn mòn. Tham khảo tiêu chuẩn ASTM D130 về màu sắc của sản phẩm ăn mòn.

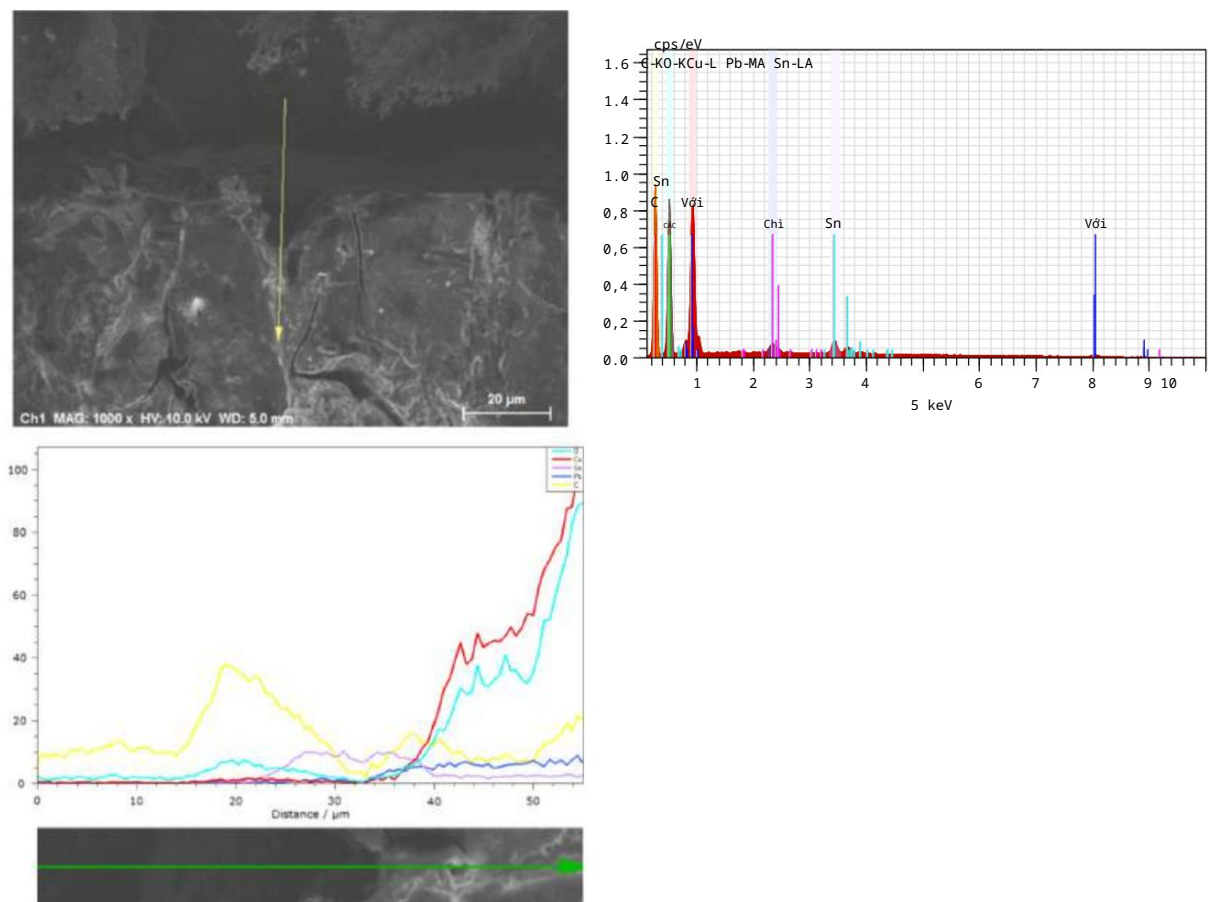
Các mô-đun PV được lắp đặt trong hệ thống là các mô-đun thương mại với lắp ráp tại địa phương. Khi xem xét từ quy trình sản xuất tại thời điểm đó, các dải thường được sử dụng đồng (Cu) phủ hợp kim thiếc-chì (SnPb). Bề mặt của thanh cái tế bào là bạc (Ag). Kim loại hàn



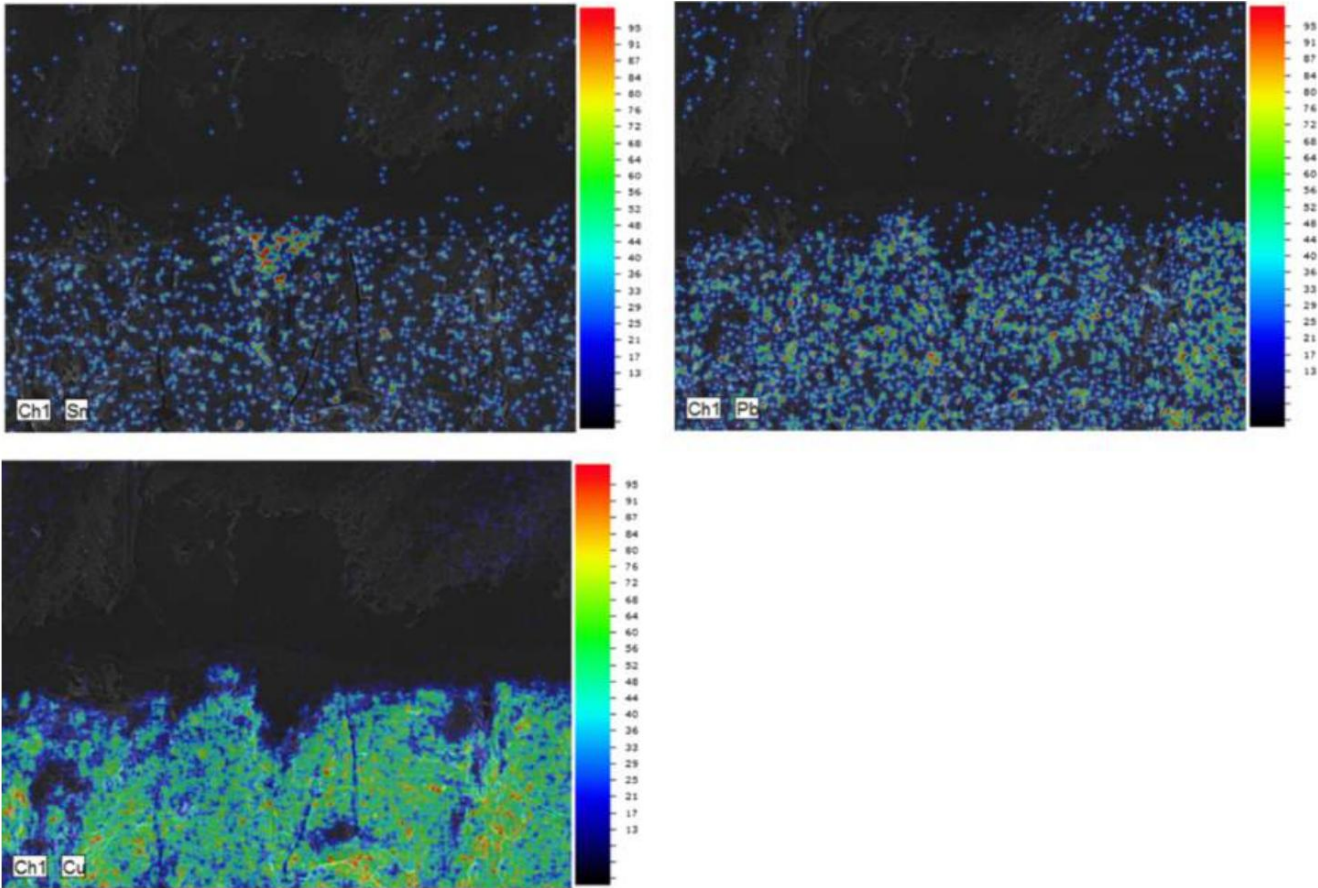
(a) Nhìn từ trên xuống bề mặt ruy băng qua kính hiển vi quang học



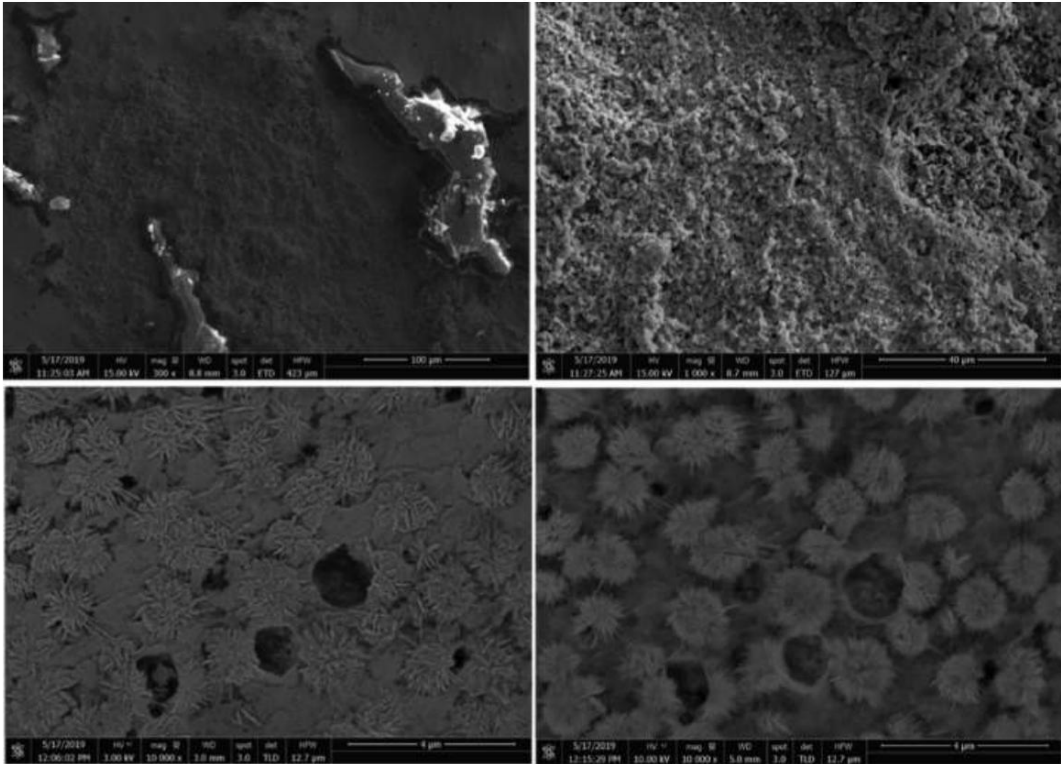
(b) Nhìn từ dưới lên bề mặt ruy băng qua kính hiển vi quang học

Hình 20. Hình ảnh bề mặt ruy băng thu được bằng kính hiển vi quang học (với $\times 50$).

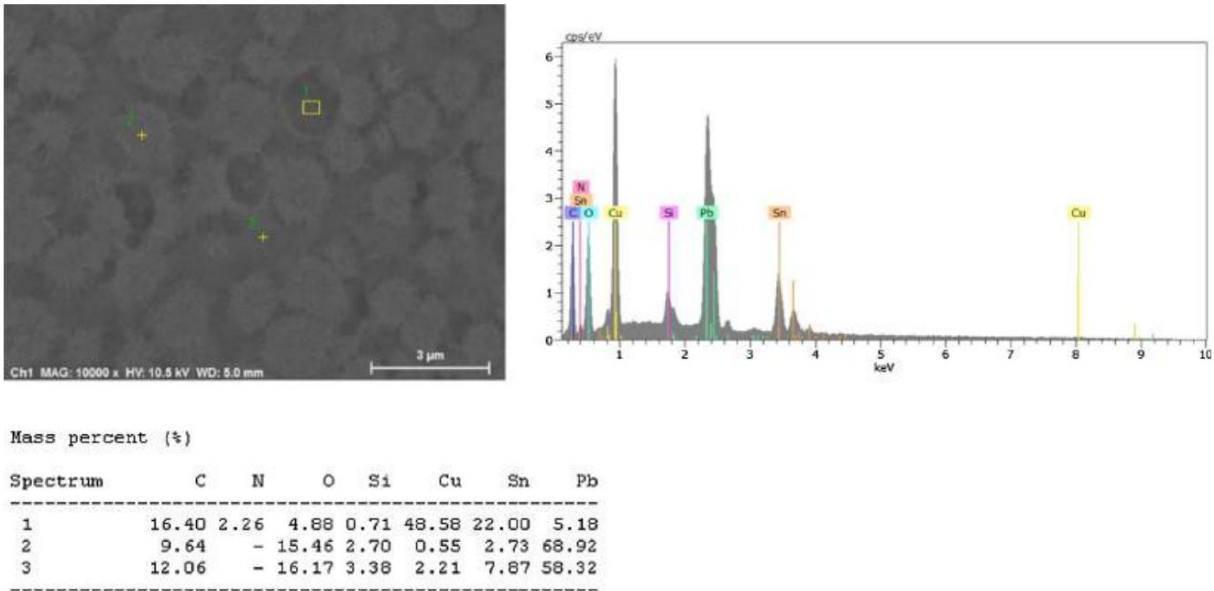
Hình 21. Hình ảnh SEM và quét EDS của mặt cắt ngang của dải băng.



Hình 22. Kết quả lập bản đồ EDS của mặt cắt ngang dải băng.



Hình 23. Ảnh SEM của sản phẩm ăn mòn Pb.



Hình 24. Ảnh SEM và kết quả EDS của sản phẩm ăn mòn Sn và Pb.

được làm bằng chì (Pb). Sự ăn mòn kim loại có thể xảy ra đồng thời từ nhiều cơ chế ăn mòn khác nhau. Các sản phẩm ăn mòn có thể bao gồm PbO, Pb(OH)2, SnO hoặc Sn(OH)2.

Đối với các mô-đun được lắp đặt trong hệ thống trong bài báo này, chúng tôi dự định sẽ tiếp tục hoạt động cho đến khi hết vòng đời của hệ thống. Do đó, các mô-đun này không nên bị phá hủy trong quá trình thử nghiệm. Để hiểu sâu hơn về sự ăn mòn kim loại trên một tế bào quang điện, chúng tôi cũng đã phá hủy một mô-đun PV c-Si khác bằng cách lắp ráp tại chỗ và với cách thức phá hủy tương tự. Một số tế bào, từ một mô-đun bị hỏng khác, đã được lấy để nghiên cứu bằng kính hiển vi quang học, kính hiển vi điện tử quét (SEM) và Máy quang phổ tia X phân tán năng lượng (EDS).

3. Kết quả và thảo luận

Trong nghiên cứu này, tất cả 16 mô-đun PV, trong một chuỗi hệ thống kết nối lưới điện, đã được lắp đặt trên mái bằng của một tòa nhà kể từ năm 2003. Góc nghiêng của các mô-đun là 14° và hướng về phía Nam. Bức xạ mặt trời trong mặt phẳng của hệ thống nằm trong khoảng từ 1843 đến 2005 kWh/m2 /năm. Từ dữ liệu giám sát hệ thống trong giai đoạn 2018-2019, phần trăm thứ 50 của bức xạ mặt trời hàng ngày trong mặt phẳng là 5,21 kWh/m2 /ngày. Bức xạ mặt trời trung bình trong mặt phẳng là khoảng 1928 kWh/m2 /năm. Điều này có nghĩa là tất cả các mô-đun poly-Si trong cuộc điều tra này đều được tiếp xúc với ánh sáng mặt trời khoảng 28,9 MWh/m2 trong 15 năm liên tiếp tính đến năm 2018. Đối với điều kiện thời tiết, nhiệt độ môi trường trung bình là khoảng 29 °C và độ ẩm tương đối trung bình là khoảng 78%RH. Các giá trị nhiệt độ mô-đun được ghi lại nằm trong khoảng 19,6-67,4 °C.

3.1. Kết quả thử nghiệm và đánh giá các mô-đun PV

Cả 16 mô-đun đều được đo hàng năm trong 3 hạng mục thử nghiệm bao gồm hiệu suất ở điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn (STC), kiểm tra trực quan và thử nghiệm cách điện theo IEC61215:2005 được nêu chi tiết trong phần 2.2. Kết quả thử nghiệm được thực hiện bởi phòng thử nghiệm tiêu chuẩn theo chứng nhận ISO/IEC17025. Hàng năm (trừ năm thứ 8), tất cả các mô-đun đều được thử nghiệm qua lại giữa hệ thống và phòng thử nghiệm kể từ năm 2010 hoặc năm thứ 7 sau khi vận hành. Đầu tiên, các thông số điện của đặc tính dòng điện-điện áp (đặc điểm IV) của từng mô-đun được so sánh với giá trị trên nhãn của nó.

Kết quả so sánh được thể hiện trong Hình A1 và A3 và trong Bảng 4. Thật không may, không có dữ liệu đo lường chuẩn của từng mô-đun làm giá trị ban đầu trước khi lắp đặt. Không thể đảm bảo độ lệch của các giá trị đo lường thực tế và các giá trị trên nhãn trước khi vận hành. Do đó, kết quả cũng nên được phân tích bằng cách sử dụng kết quả đo lường của năm thứ 7 sau khi vận hành làm trường hợp cơ sở.

Tỷ lệ suy thoái hàng năm của mỗi thông số, được phân tích theo kết quả hiệu suất tại STC, có thể được tính toán bằng Công thức (1) khi so sánh với các giá trị tại năm thứ 7 làm trường hợp cơ sở. Các giá trị trung bình của tỷ lệ suy thoái được thể hiện trong Hình 4.

Từ kết quả hiệu suất đo lường STC, người ta thấy rằng

- Năm thứ 9: Tỷ lệ 31% tổng số mô đun đạt dưới 90% giá trị biển tên.
- Đến năm thứ 11: Pm của tất cả các mô đun đều nhỏ hơn 90% so với bảng tên giá trị.
- Đến năm thứ 13: Có 13% tổng số module có giá trị nhỏ hơn 80% giá trị ghi trên nhãn.
- Đến năm thứ 15: Pm của 75% tổng số module nhỏ hơn 80% giá trị ghi trên nhãn.

Từ Hình 5(a), Pm của tất cả các mô-đun đều nhỏ hơn 90% Pm ở trường hợp cơ sở trong giai đoạn 8 năm liên tiếp (năm thứ 7 đến năm thứ 15). Điều này có nghĩa là sự suy giảm hàng năm của Pm của hầu hết tất cả các mô-đun đều lớn hơn 2% sau 10 năm vận hành như thể hiện trong Hình 5(b) và (c).

Hầu hết các nhà sản xuất thường cung cấp bảo hành điện trong thời hạn 25 năm, hoặc một số nhà sản xuất cung cấp bảo hành 30 năm. Họ đảm bảo sản lượng điện sẽ không thấp hơn 80% giá trị ghi trên nhãn hoặc sự suy giảm điện sẽ không quá 20%. Đối với các nhà máy điện PV hoặc hệ thống điện mặt trời trên mái nhà quy mô lớn, có các điều kiện hợp đồng chặt chẽ để kiểm tra và yêu cầu sản phẩm của họ. Đối với các hệ thống nhỏ, đặc biệt là điện khí hóa nông thôn ở vùng sâu vùng xa, rất khó để đảm bảo chất lượng sản phẩm khi vận hành lần đầu và trong nhiều năm vận hành.

Ở nước ta, cho đến năm 2010 chưa có phòng thử nghiệm chuẩn để thử nghiệm các mô-đun PV. Do đó, một phòng thử nghiệm chuẩn đã được thành lập.

được tài trợ bởi Bộ Phát triển và Hiệu quả Năng lượng Thay thế (DEDE) và Quỹ Bảo tồn Năng lượng thuộc Bộ Năng lượng, để thành lập cơ sở thử nghiệm tại trường đại học của chúng tôi từ năm 2006. Điều này là cần thiết để đảm bảo chất lượng sản phẩm và bảo vệ người tiêu dùng.

Tỷ lệ suy thoái hàng năm của các thông số điện có thể được tính toán bằng Công thức (1). Đánh giá thường dựa trên giá trị bảng tên của chúng. Trong bài báo này, chúng tôi đã tính toán bằng cách so sánh với cả giá trị bảng tên của chúng và kết quả đo được của chúng trong mỗi năm. Trong giai đoạn đo lường, 8 năm, từ năm thứ 7 đến năm thứ 15), Pm của tất cả các mô-đun giảm hơn 10% so với trường hợp cơ sở. Hàng năm

Kết quả suy giảm công suất, dựa trên năm thứ 7, là hơn 2% mỗi năm đối với hơn 50% tổng số mô-đun kể từ năm thứ 10. Trong năm thứ 15, kết quả suy giảm công suất hàng năm là hơn 3% mỗi năm đối với 70% tổng số mô-đun. Tỷ lệ suy giảm của các mô-đun kể từ năm thứ 10 sau khi vận hành nằm trong khoảng 2,5–3,0%. Phân bố dân số của các mô-đun có thể được tìm thấy trong Hình 5(b) và (c).

Đối với thử nghiệm cách điện theo điều khoản 10.3 của IEC61215:2005, kết quả thử nghiệm cách điện, trong cả thử nghiệm chịu đựng và thử nghiệm điện trở cách điện, đều đạt tiêu chuẩn cho tất cả các mô-đun trong mỗi năm.

3.2. Kết quả phát triển ăn mòn

Sơ đồ và bố cục của các mô-đun trong chuỗi bao gồm mã đang chạy, các mô-đun và ô, được sử dụng trong bài báo này đã được trình bày và định nghĩa trong Phần 2.3. Chúng tôi đã chọn 5 mô-đun từ tổng số 16 mô-đun.

ules để chứng minh trong bài báo này. Các mô-đun được chọn bao gồm một mô-đun nằm ở đầu dương (M1), một mô-đun nằm ở đầu âm (M16), một mô-đun nằm ở giữa chuỗi (M8) và hai mô-đun khác có tỷ lệ suy giảm công suất tối đa (M13 và M14). Trong phần này, các mô-đun được chọn lần lượt được gọi là Mô-đun A, B, C, D và E.

Hình ảnh của các mô-đun, ô và phát quang điện (EL) được thu được bằng thử nghiệm kiểm tra trực quan và phép đo EL đến từ phòng thử nghiệm tiêu chuẩn cũng như kết quả trong phần 3.1.

Có hình ảnh trực quan của các mô-đun từ năm thứ 9. Hình ảnh của các tế bào được chụp từ năm thứ 12. Hình ảnh EL được chụp từ năm thứ 13 năm.

Hình ảnh trực quan, trong khoảng từ năm thứ 9 đến năm thứ 15, của mô-đun M13 được gọi là Mô-đun C, được hiển thị trong Hình 6 chẳng hạn. Sự suy giảm hoặc quan sát các khiếm khuyết trên các mô-đun được tập trung như trong Hình 7. Hình 8 cho thấy ví dụ về quan sát các khiếm khuyết trực quan trên mỗi ô trong mỗi mô-đun.

Sự xuống cấp ở mặt sau của các mô-đun có thể được quan sát hàng năm. Cần lưu ý rằng màu tẩm nền của mỗi mô-đun có màu nâu nhạt kể từ năm thứ 9 sau khi vận hành. Từ hình ảnh của các mô-đun vào năm thứ 12, sự tách lớp tẩm nền đã được quan sát thấy bên cạnh các hộp nối của chúng ở khoảng 20% tổng diện tích mô-đun và sự bắt đầu của sự phân hóa tẩm nền đã được tìm thấy. Sự tách lớp tẩm nền đã được tìm thấy. Từ hình ảnh vào năm thứ 13, khu vực tách lớp tẩm nền là khoảng 50% tổng diện tích mô-đun và sự xuất hiện của EVA đặc biệt được tìm thấy ở khu vực mô-đun không có ô. Trong năm thứ 14 và 15, diện tích tách lớp tẩm nền lần lượt là hơn 80% và hoàn toàn.

Từ hình ảnh trực quan ở mặt trước của các mô-đun, hiện tượng ô vàng, nứt, ăn mòn, tách lớp và vết ốc sên trên vật liệu nền xuất hiện ở tất cả các mô-đun. Ở mặt sau của các mô-đun, hiện tượng hư hỏng, bao gồm ô vàng ở mặt sau, tách lớp và phân hóa, xuất hiện ở vật liệu nền như thể hiện trong Hình 6. Vào năm thứ 15, hiện tượng tách lớp ở mặt sau xuất hiện trên 80% tổng diện tích của tất cả các mô-đun.

Có sự xuất hiện của EVA nâu trên mọi ô của tất cả các mô-đun kể từ năm thứ 12. Trong năm thứ 12 đến năm thứ 15, EVA nâu

diện tích trên mỗi tế bào không thay đổi đáng kể, nhưng mức độ chuyển sang màu nâu hoặc màu nâu nhạt đã thay đổi nhẹ thành màu nâu sẫm hàng năm. Từ quần thể hình ảnh của các tế bào, diện tích chuyển sang màu nâu có thể được phân loại thành 3 nhóm bao gồm (a) chuyển sang màu nâu xuất hiện trên 90% diện tích tế bào, (b) chuyển sang màu nâu xuất hiện trên 50% diện tích tế bào và (c) chuyển sang màu nâu rải rác xuất hiện thành từng mảnh nhỏ trên diện tích tế bào. Hình.

B1 cho thấy ba nhóm có vẻ ngoài chuyển sang màu nâu. Người ta thấy rằng hầu hết các tế bào, hơn 70% tổng số tế bào của tất cả các mô-đun, được phân loại vào nhóm (c). Có 20% tổng số tế bào được phân loại vào nhóm (b) và 10% còn lại của tổng số tế bào nằm trong nhóm (a). Trong trường hợp nhóm (a), không có các khuyết tật khác như ăn mòn dạng dải hoặc lưới. Mặt khác, có các khuyết tật khác, chẳng hạn như tách lớp, ăn mòn, thử nghiệm ốc sên, trên các tế bào trong nhóm (b) và (c).

Sự gia tăng diện tích tách lớp xuất hiện trên mỗi tế bào được nghiên cứu đồng thời. Chi tiết về vấn đề tách lớp sẽ được báo cáo riêng. Hình ảnh trực quan của các tế bào được chụp và sau đó được xử lý bằng chương trình ImageJ để lượng tử hóa từng hình ảnh thành cấp độ nhị phân như thể hiện trong Hình B2.

Trong Hình B3 và B.4, hình ảnh Điện phát quang (EL) cũng được chụp cho tất cả các mô-đun kể từ năm thứ 13. Có nhiều loại ô nứt được tìm thấy trong mô-đun M13. Chi tiết về các ô nứt đã được đề cập

trong các báo cáo khác như báo cáo IEA-PVPS Task13 (Köntges et al., 2014).

Bài báo này tập trung vào sự phát triển của ăn mòn kim loại xảy ra trên mỗi ô. Năm mô-đun được chọn để mô tả sự phát triển ăn mòn trong công trình này. Một hộp nối của mỗi mô-đun nằm ở mặt sau bên cạnh hai ô, C21 và C31, ở góc nhìn mặt trước.

Do đó, cả hai ô đều phải được làm nổi bật để phát hiện sự ăn mòn. Sự ăn mòn kim loại trên các dải và đường lưới bao gồm màu vàng, xám nhạt, nâu sẫm và đen như thể hiện trong Hình 9 và 10. Hình ảnh về sự ăn mòn kim loại của ô C31 của mỗi mô-đun được so sánh vào năm thứ 15.

Sơ đồ và cách bố trí các mô-đun được chọn, cách bố trí ô trên mỗi mô-đun và kết quả đo Pm được thể hiện trong Hình 11. Từ kết quả Pm của các mô-đun được chọn, M13 hoặc Mô-đun C không phải là Pm thấp nhất vào năm thứ 7 (năm quan sát đầu tiên), nhưng nó là Pm thấp nhất vào năm thứ 15 với tốc độ phân hủy tối đa và sự phân hủy Pm hàng năm.

Màu sắc ăn mòn của dải băng là vàng, nâu và xám nhạt vào năm thứ 12 và 13, sau đó chuyển sang nâu sẫm, xám và đen vào năm thứ 14 và 15 như thể hiện ở Hình 12. Do đó, ăn mòn đường lưới có màu vàng vào năm thứ 12 - 13, sau đó chuyển sang nâu sẫm và đen vào năm thứ 14 và 15.

Hình 13 cho thấy số lượng cell đếm từng màu ăn mòn trong mỗi mô-đun được chọn trong năm thứ 12–15 sau khi hệ thống PV hoạt động. Tổng số cell trong mỗi mô-đun là 36 cell nối tiếp.

Màu sắc của sự ăn mòn được tìm thấy trong nghiên cứu này bao gồm vàng, xám, nâu sẫm và đen. Số lượng tế bào có sự ăn mòn màu đen tăng lên trong những năm sau đó.

Diện tích ăn mòn trên các dải băng của mỗi ô của các mô-đun được chọn được tính toán dựa trên tổng diện tích của mỗi dải băng. Tổng diện tích của hai dải băng là 6,72 cm2 . Hình 14 mô tả phương pháp xác định diện tích ăn mòn trên dải băng của ô. Ngưỡng màu hoặc mức định lượng của hình ảnh được sử dụng để định lượng diện tích ăn mòn.

Tham khảo tiêu chuẩn ASTM D130 về màu sắc của sản phẩm ăn mòn. Tính toán diện tích được thực hiện bằng chương trình ImageJ trên mỗi hình ảnh trực quan của tế bào. Sự phát triển ăn mòn dọc theo chiều rộng của dải bị giới hạn bởi chiều rộng, nhưng sự phát triển dọc theo chiều dài của dải lại chiếm ưu thế hàng năm khi diện tích ăn mòn tăng lên. Tính toán tỷ lệ diện tích ăn mòn và tổng diện tích dải

có thể được hiển thị trong Hình B5. Sự ăn mòn dải trên các ô C21 chỉ xuất hiện trên Mô-đun B và D. Trong khi chúng tôi tập trung vào sự phát triển của khu vực ăn mòn của các dải trên ô C31, ô bên cạnh hộp nối, của mỗi mô-đun được chọn, thì thấy rằng khu vực ăn mòn, trên cả hai dải

Y. Kết luận, et al.

Tế bào C31 của Mô-đun B lớn hơn các mô-đun được chọn khác. Đối với C31 của Mô-đun B, diện tích ăn mòn tăng lên là 13% tổng số ruy băng khu vực trong 4 năm quan sát. Đối với bốn mô-đun được chọn, ngoại trừ Mô-đun D, các khu vực ăn mòn tăng khoảng 10 đến 17% mỗi tổng diện tích dài ruy băng trong năm thứ 12-15 sau khi hoạt động. Một đồ đạc theo các sự phát triển ăn mòn được quan sát thấy giữa ngày 12 và năm thứ 13 sau phẫu thuật (xem Hình 15).

Trong **Hình 16**, kết quả điện trở nổi tiếp, R_s , của mỗi mô-đun được chọn đã được lập biểu đồ trong năm thứ 12-15. Không thể tóm tắt rằng diện tích ăn mòn càng lớn thì R_s càng cao. Điều đó có nghĩa là sự xuất hiện ăn mòn trên dải tế bào có thể không đáng kể đối với điện trở của các tiếp điểm kết nối.

Khi chúng ta quay lại hình ảnh mặt sau của năm hình ảnh đã chọn các mô-đun như thể hiện trong **Hình B5**, sự tách lớp của tám nền, đặc biệt là gần mép khung bên cạnh hộp nổi, có thể ảnh hưởng đến việc phát triển sự phát triển của hiện tượng ăn mòn kim loại trên tế bào.

Phân tích sự suy giảm của mô-đun PV dựa trên mô hình nguyên nhân và tác động như thể hiện trong [Hình 17](#). Cuộc điều tra này nhấn mạnh vào sự phát triển của sự ăn mòn kim loại trên bề bảo. [Hình 17](#) mô tả sự phát triển của kim loại sự ăn mòn trên các dải ruy băng bắt đầu bằng sự tách lớp của Ethylene Vinyl Acetate (EVA) và độ ẩm xâm nhập vào mô-đun.

Vật liệu đóng gói, EVA, sự tách lớp có thể xảy ra do tia UV và Tác động nhiệt dưới sự tiếp xúc thực địa. Hai sản phẩm chính của liên kết hóa học EVA bị phá vỡ bao gồm axit axetic và andehit ([Xiong et al., 2017](#)). Sau đó, axit axetic, giàu oxy, trở thành chất điện phân của phản ứng galvanic của mỗi cặp kim loại kẹp khác nhau trên pin mặt trời trong các mô-đun. Có bốn phần, trong một pin ăn mòn điện hóa nói chung, bao gồm cực dương, cực âm, chất điện phân và điện kết nối giữa anode và catot. Vào thời điểm lắp đặt hệ thống này, vật liệu ruy băng thường được phủ đồng (Cu)

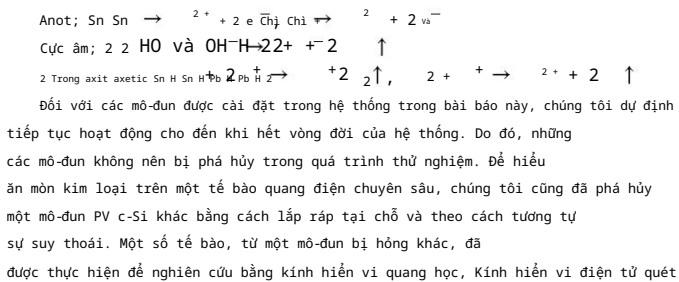
với hợp kim thiếc-chì (SnPb), và bề mặt thanh cái của cell là bạc (Ag) và kim loại hàn được làm bằng chì (Pb). Vì vậy, sự ăn mòn sản phẩm có thể bao gồm PbO, Pb(OH)₂, SnO hoặc Sn(OH)₂.

thế điện cực chuẩn ở 25 °C của Ag, Cu, Pb và Sn là + 0,800, +0,520, 0,125 và 0,137 tương ứng (xem [Hình 18](#)).

Tham khảo tiêu chuẩn ASTM D130, màu sắc của màu tương ứng sản phẩm rosion được liệt kê

- PbO và $Pb(OH)_2$ xuất hiện ở dạng vôi định hình màu xanh và nâu sẫm hoặc đen.
- SnO_2 và $Sn(OH)_2$ xuất hiện màu vàng hoặc xám nhạt và trắng
- CuO và $Cu(OH)_2$ xuất hiện màu đen và xanh lục (lớp gỉ đồng)

Hình 19 minh họa các sản phẩm ăn mòn và màu sắc của chúng ví dụ về Mô-đun B trong năm thứ 14 sau khi vận hành. Từ sự ăn mòn galvanic (Xiong và cộng sự, 2017), phản ứng hóa học của pin galvanic có thể được liệt kê



(SEM) và Máy quang phổ tia X phân tán năng lượng (EDS).

Các sản phẩm ăn mòn và màu sắc của các sản phẩm ăn mòn có thể được chứng minh bằng EDS và tham khảo tiêu chuẩn ASTM D130. Từ [Hình 20-24](#), màu sắc của sản phẩm ăn mòn trên bề mặt ruy băng bao gồm màu vàng, nâu sẫm, xám nhạt và xanh lục (patina). [Hình 21](#) và [22](#) là xác nhận mật độ Pb và Sn giảm và Cu còn lại. [Hình 23](#) và [24](#) xác nhận sản phẩm ăn mòn Sn và Pb bằng phương pháp lập bản đồ SEM và EDS.

4. Kết luận

Sự xuống cấp của các mô-đun PV được đưa vào vận hành sau hơn 15 năm liên tiếp ở Thái Lan, đã tập trung vào cuộc điều tra này. Một chuỗi các mô-đun PV poly-Si, được lắp đặt trong hệ thống kết nối lưới điện kể từ 2003, đã được chọn trong nghiên cứu này. Tất cả 16 mô-đun được thực hiện hàng năm để đo qua lại từ hệ thống và trong phòng thử nghiệm tiêu chuẩn kể từ năm thứ 7 sau khi vận hành. Từ kết quả hiệu suất tại STC, người ta thấy rằng Pm của 75% tổng số mô-đun là ít hơn 80% giá trị biểu số xe trong năm thứ 15. Hàng năm kết quả suy giảm công suất là hơn 3% mỗi năm trong 70% tổng số các mô-đun trong năm thứ 15. Tỷ lệ suy thoái của các mô-đun kể từ Năm thứ 10 sau phẫu thuật nằm trong khoảng từ 2,5 đến 3,0%. Trong bài báo này, sự phát triển của sự ăn mòn kim loại trên các dải ruy băng đã được làm nổi bật. Trong Năm thứ 12-15, diện tích ăn mòn tăng trưởng trên các dải tế bào là khoảng 10-17% diện tích ruy băng, đặc biệt là đối với các ô bên cạnh hộp nối của nó mô-đun. Từ kết quả Rs, không thể tóm tắt tất nhiên càng nhiều khu vực ăn mòn, Rs càng cao. Màu sắc của sản phẩm ăn mòn là cũng được quan sát thấy ở cả màu sắc xuất hiện và sự thay đổi màu sắc trên mỗi tế bào của các mô-đun được chọn. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã tìm thấy màu sắc của các sản phẩm ăn mòn gồm có màu vàng, xám, nâu sẫm và đen. Vì vậy, sự ăn mòn sản phẩm có thể bao gồm PbO, Pb(OH)₂, SnO hoặc Sn(OH)₂. Đối với các mô-đun được cài đặt trong hệ thống trong bài báo này, chúng tôi dự định sẽ tiếp tục hoạt động cho đến khi kết thúc vòng đời của hệ thống. Do đó, các mô-đun này không nên bị phá hủy trong thí nghiệm. Để hiểu kim loại ăn mòn trên một tế bào bằng lượng mặt trời sâu, chúng tôi cũng đã phá vỡ một PV c-Si khác mô-đun với lắp ráp tại chỗ và có cách hư hỏng tương tự.

Tuyên bố về lợi ích cạnh tranh

Các tác giả tuyên bố rằng họ không có đối thủ cạnh tranh tài chính nào được biết đến sở thích hoặc mối quan hệ cá nhân có thể ảnh hưởng đến công việc được báo cáo trong bài báo này.

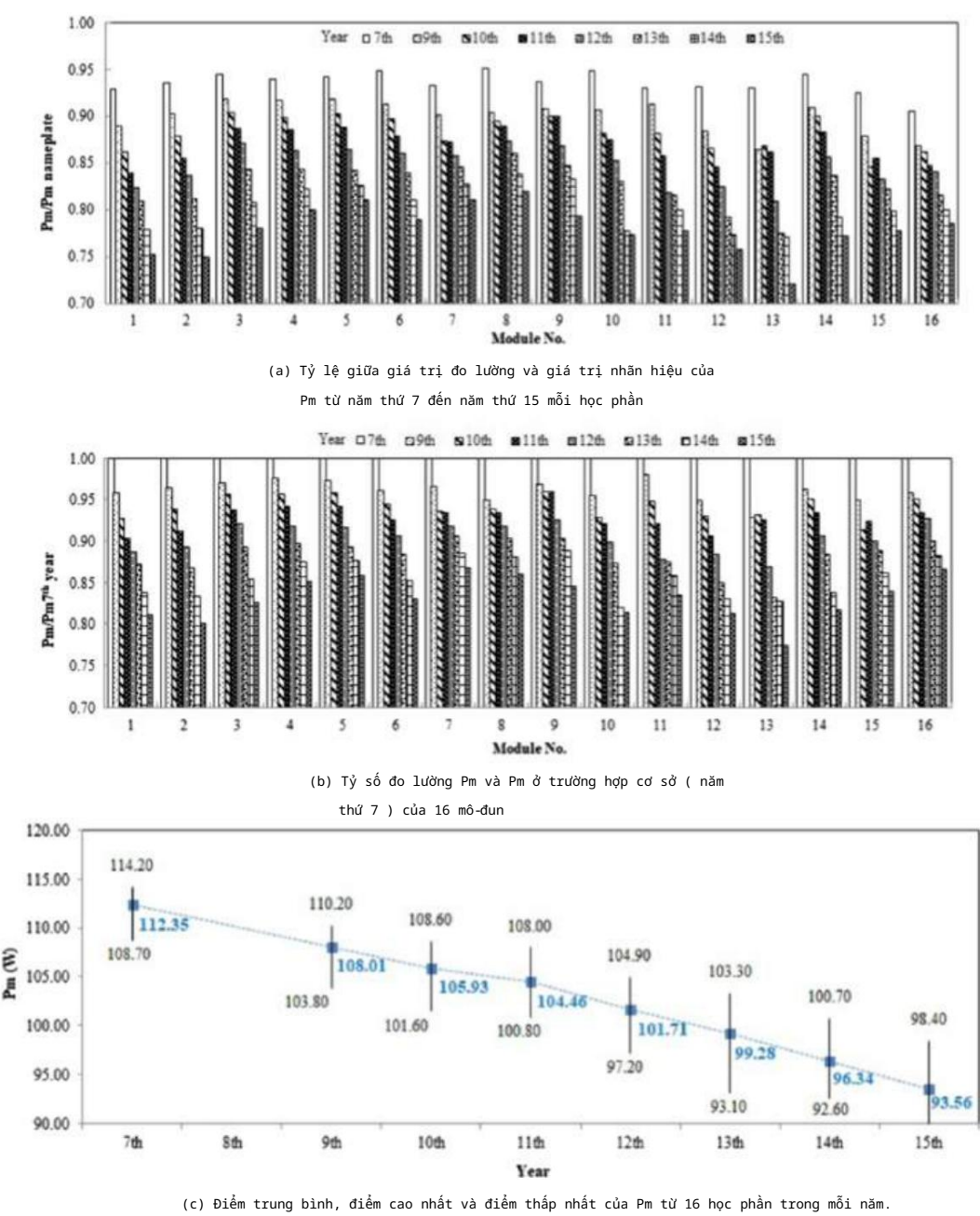
Lời cảm ơn

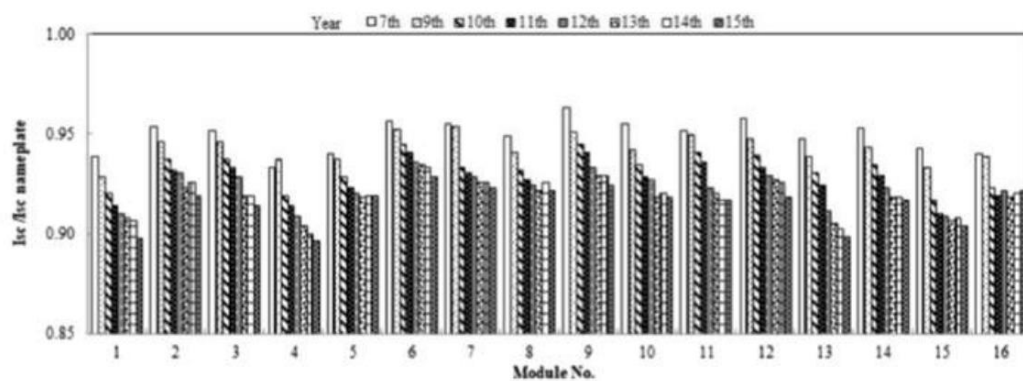
Tác giả xin cảm ơn Trung tâm thử nghiệm pin mặt trời CES (CSSC), Viện đào tạo và phát triển nhà máy thí điểm của trường đại học, ISO/ Phòng thí nghiệm được công nhận theo IEC17025 để hỗ trợ kết quả thử nghiệm. Cái.

Trường sau đại học chung về năng lượng và môi trường (JGSEE) dành cho cung cấp các khoản tài trợ nghiên cứu một phần để hỗ trợ công việc này. Chúng tôi cũng chân thành cảm ơn Tiến sĩ Kobsak Sriprapha từ Viện Khoa học và Công nghệ Quốc gia Cơ quan Phát triển Công nghệ, Tiến sĩ Napachart Tareelap từ Trường Khoa Năng lượng, Môi trường và Vật liệu của trường đại học, Tiến sĩ Amporn Wiengmoon và Tiến sĩ Buntoon Wiengmoo từ Đại học Naresuan những bình luận có giá trị.

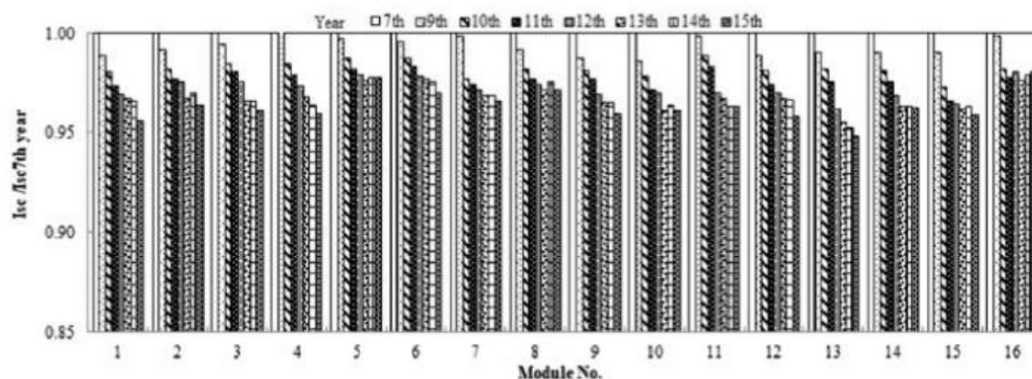
Phụ lục A

Xem [Hình A1-A3](#).

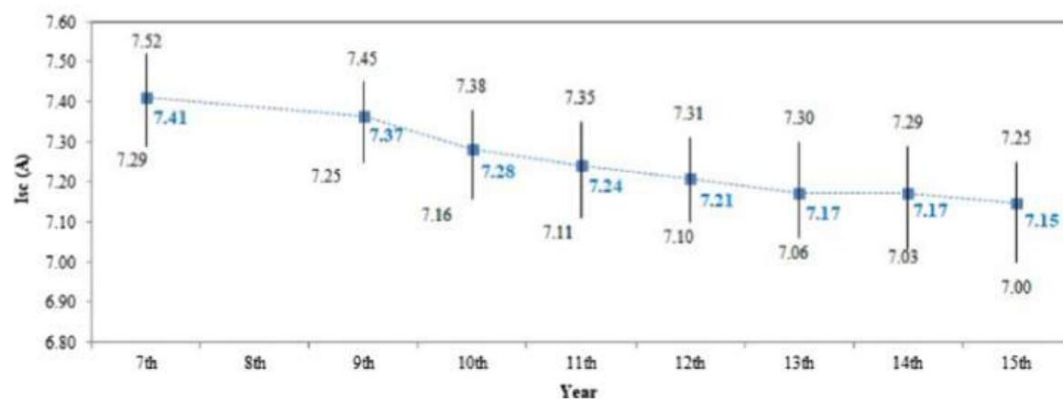




(a) Tỷ lệ giá trị đo lường và giá trị bảng tên của Isc từ năm thứ 7 đến năm thứ 15 của 16 mô-đun

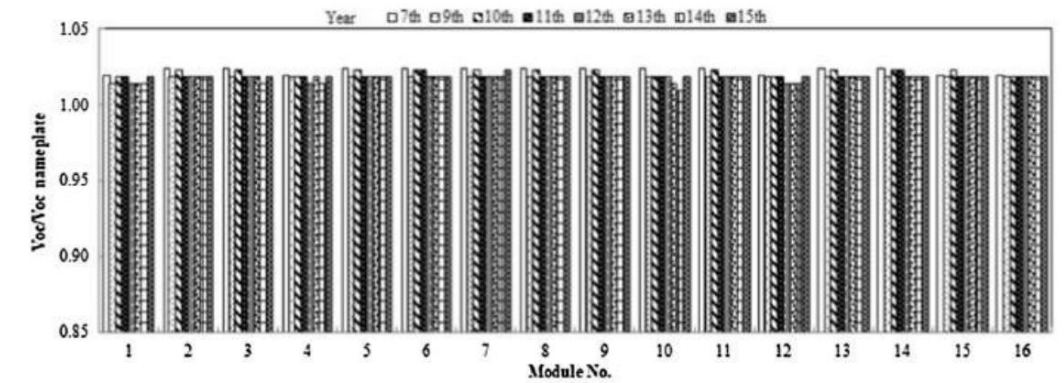


(b) Tỷ lệ đo lường Isc và Isc ở trường hợp cơ sở (năm thứ 7) của 16 mô-đun

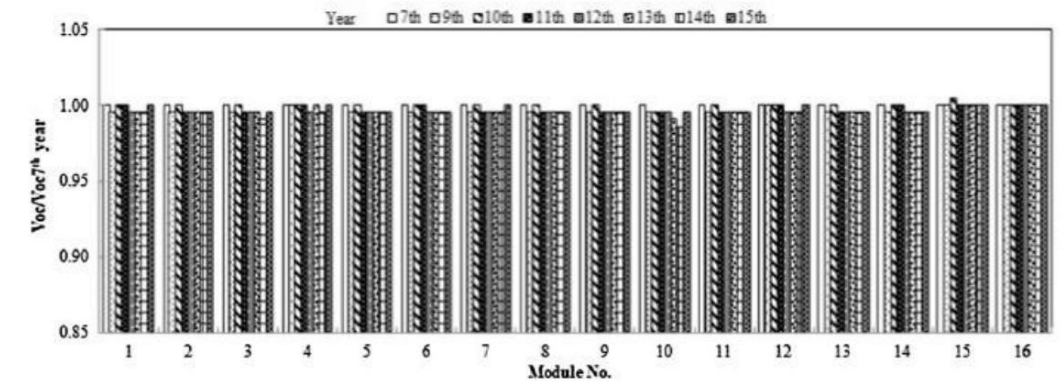


(c) Điểm trung bình, tối đa và tối thiểu của Isc từ 16 học phần trong mỗi năm.

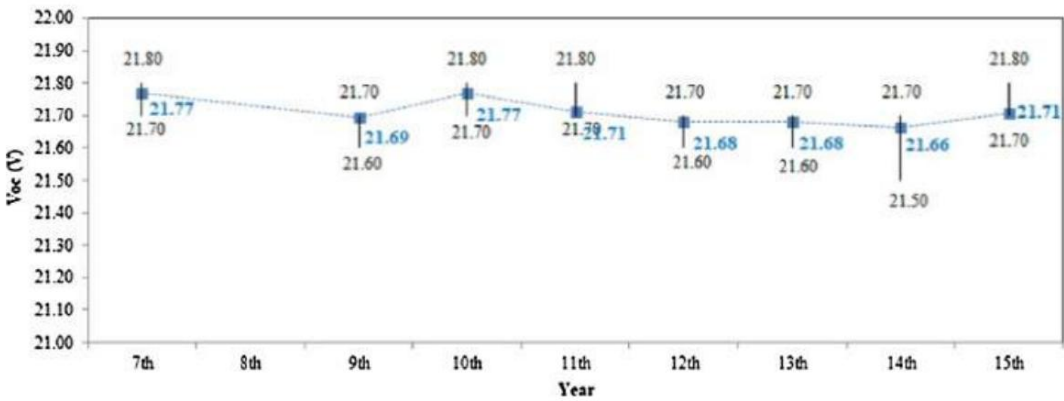
Hình A2. Giá trị đo lường Isc từ năm thứ 7 đến năm thứ 15.



(a) Tỷ lệ giá trị đo được và giá trị bảng tên của Voc từ năm thứ 7 đến năm thứ 15 của 16 mô-đun



(b) Tỷ lệ Voc và Voc được đo ở trường hợp cơ sở (năm thứ 7) của 16 mô-đun

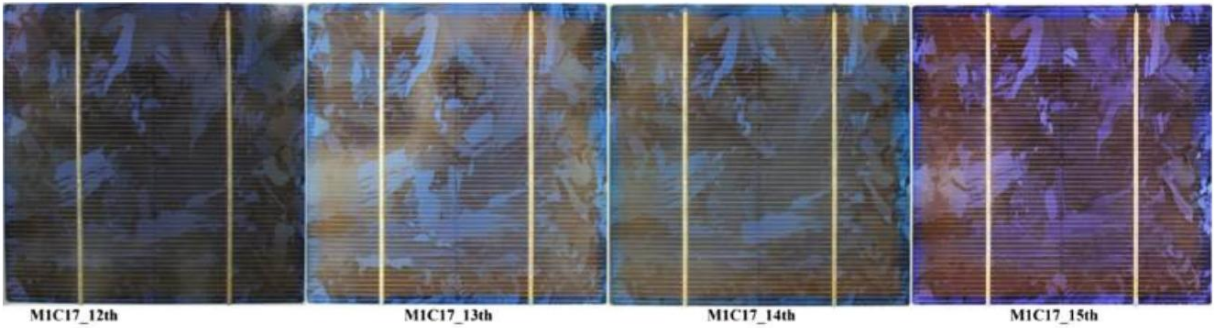


(c) Điểm trung bình, tối đa và tối thiểu của Voc từ 16 học phần trong mỗi năm.

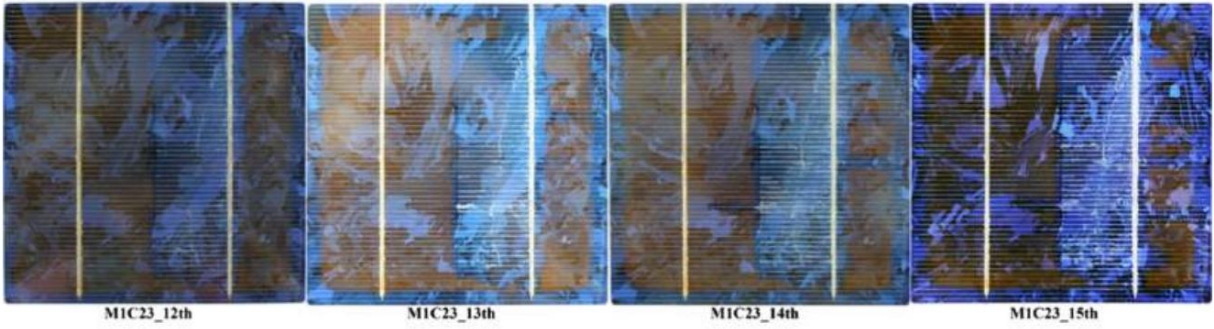
Hình A3. Giá trị đo Voc từ năm thứ 7 đến năm thứ 15.

Phụ lục B

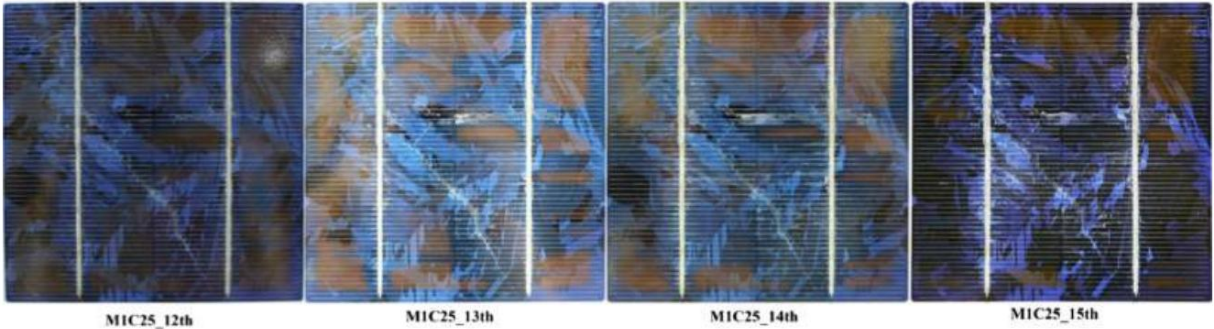
Xem Hình B1-B5.



(a) sự chuyển sang màu nâu xuất hiện trên 90% diện tích tế bào

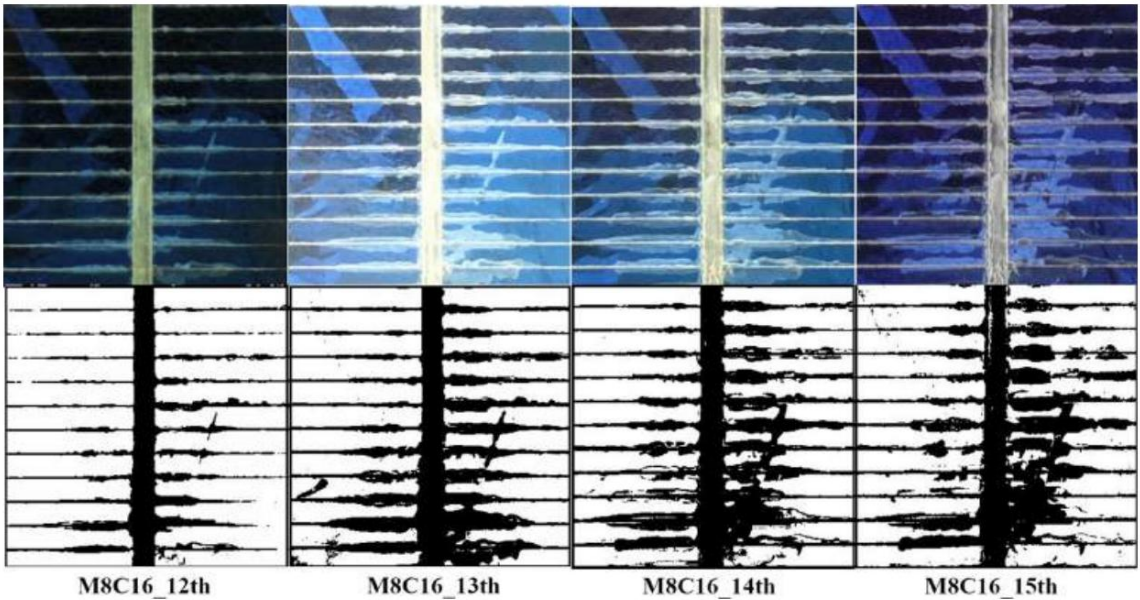


(b) sự chuyển sang màu nâu xuất hiện trên 50% diện tích tế bào

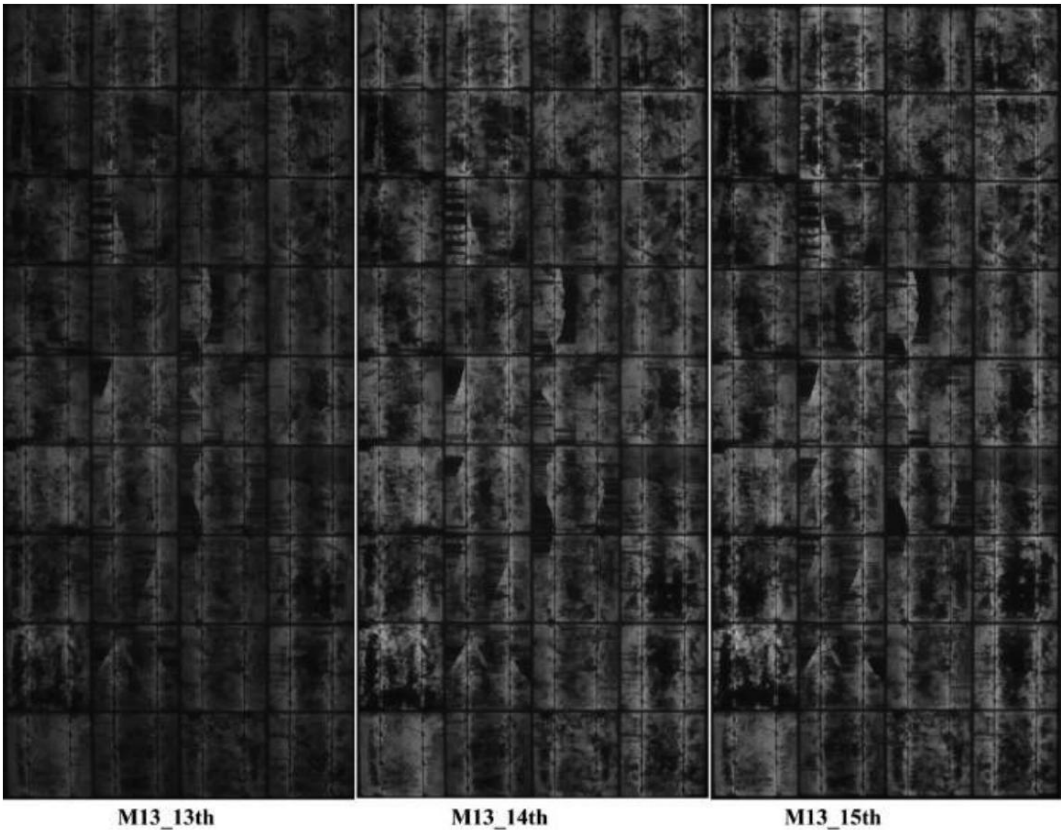


(c) sự phân tán màu nâu xuất hiện thành từng mảnh nhỏ trên diện tích tế bào

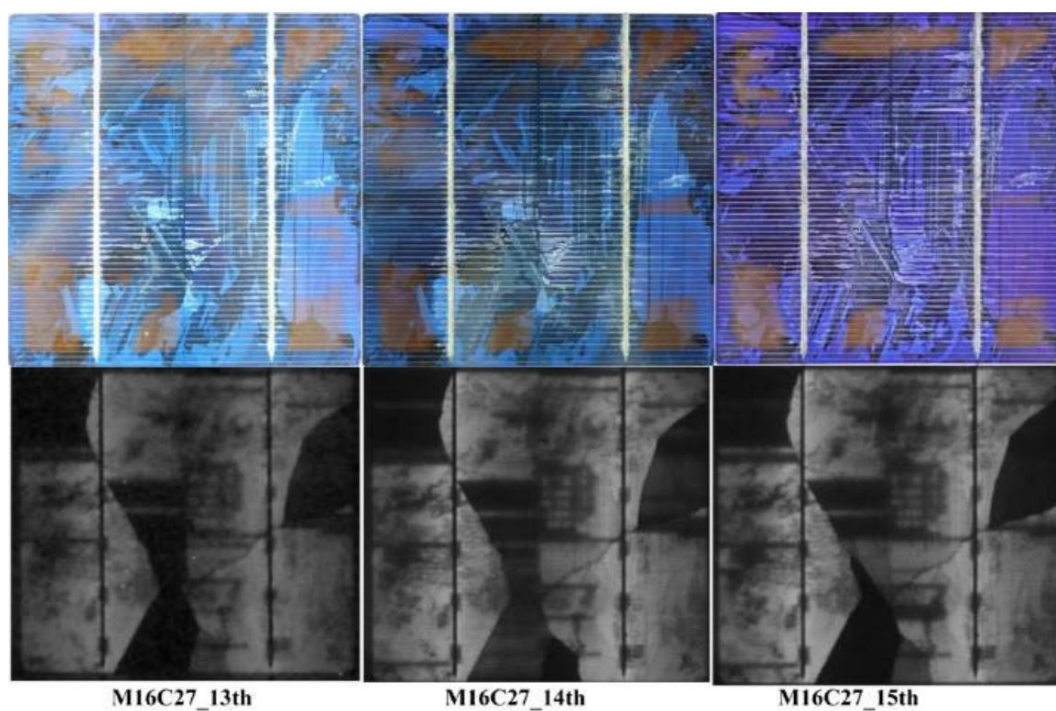
Hình B1. Sự xuất hiện của hiện tượng nâu hóa trên tế bào có thể được phân loại thành 3 nhóm (a) hiện tượng nâu hóa xuất hiện trên 90% diện tích tế bào, (b) hiện tượng nâu hóa xuất hiện trên 50% diện tích tế bào và (c) hiện tượng nâu hóa xuất hiện rải rác thành từng mảng nhỏ trên diện tích tế bào.



Hình B2. Sự gia tăng diện tích tách lớp trên một phần cell ở cell số 16 trên mô-đun M8.



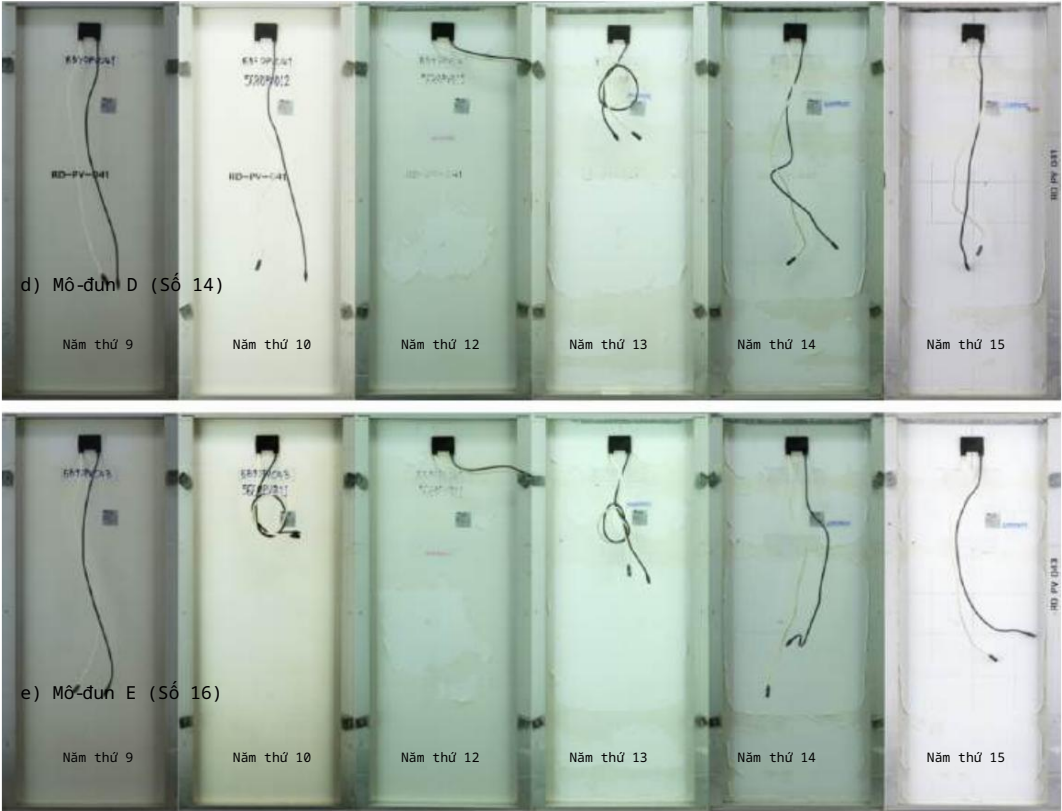
Hình B3. Hình ảnh EL của mô-đun M13 trong năm thứ 13 đến năm thứ 15.



Hình B4. Hình ảnh EL của các tế bào trong mô-đun M16 từ năm thứ 13 đến năm thứ 15.



Hình B5. Hình ảnh mặt sau của 5 mô-đun đã chọn.



Hình B5. (tiếp theo)

Tài liệu tham khảo

BBW, 2003. Thời gian trung bình trước khi hỏng của các mô-đun quang điện. SUPSI, DACD, LEE-NGÂN.

DEDE, 2019. Báo cáo tình hình PV Thái Lan năm 2018. Bộ Năng lượng Thay thế Phát triển và Hiệu quả, Bộ Năng lượng, Thái Lan.

của Fonseca, JEF, của Oliveira, FS, Massen Prieb, CW, Krenzinger, A., 2020. Phân tích sự suy thoái của máy phát điện quang điện sau khi hoạt động trong 15 năm miền nam Brazil. Sol. Năng lượng 196, 196–206.

Ferrara, C., Philipp, D., 2012. Tại sao các mô-đun PV bị hỏng? Energy Procedia 15, 379–387.

Gagliardi, M., Lenarda, P., Paggi, M., 2017. Một công thức phản ứng-khuếch tán để mô phỏng Sự thoái hóa của polyme EVA trong điều kiện môi trường và lão hóa nhanh. Sol. Vật liệu năng lượng. Sol. Cells 164, 93–106.

IEA-PVPS, 2009. Báo cáo khảo sát xu hướng ứng dụng quang điện của một số IEA các nước từ năm 1992 đến năm 2008. Báo cáo số IEA-PVPS T1-18.

Ishii, T., Masuda, A., 2017. Tỷ lệ suy thoái hàng năm của các mô-đun quang điện silic tinh thể gần đây. Progr. Photovolt. Res. Appl. 25, 953–967.

Janakeeraman, S.V., Singh, J., Kuitche, J., Mallineni, J.K., TamizhMani, G., 2014. phân tích thống kê về các thông số để bảo chịu trách nhiệm cho sự suy giảm năng lượng của mô-đun quang điện được lắp đặt trong điều kiện khí hậu khô nóng. Trong: Chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 40 năm 2014 Hội nghị (PVSC). trang 3234–3238.

Jordan, DC, Kurtz, SR, 2013. Tốc độ suy thoái quang điện - một đánh giá phân tích. Progr. Photovolt. Res. Appl. 21 (1), 1–32.

Jorgensen, GJ, Terwilliger, KM, DelCueto, JA, Glick, SH, Kempe, MD, Pankow, JW, Pezn, FJ, McMahon, TJ, 2006. Vận chuyển độ ẩm, độ bám dính và ăn mòn bảo vệ vật liệu đóng gói mô-đun PV. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 90 (16), 2739–2775.

Kraft, A., Labusch, L., Ensslen, T., Dürr, I., Bartsch, J., Glatthaar, M., Glunz, S., Reinecke, H., 2015. Nghiên cứu tác động của sự ăn mòn axit axetic lên các tiếp điểm của tế bào quang điện được in. IEEE J. Điện áp quang điện.. 5 (3), 736–743.

Kim, N., Lee, S., Zhao, XG, Kim, D., Oh, C., Kang, H., 2016. Phân xạ và độ bền nghiên cứu các loại tấm nền khác nhau và tác động của chúng đến hiệu suất của mô-đun PV c-Si. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 146 (Phụ lục C), 91–98.

Li, J., Shen, Y.-C., Hacke, P., Kempe, M., 2018. Cơ chế điện hóa của sự tách lớp và ăn mòn do rò rỉ dòng điện trong các mô-đun quang điện Si. Sol. Năng lượng Mater. Sol. Cells 188, 273–279.

Limmanee, A., Udomdachanut, N., Songtrai, S., Kaewniyompanit, S., Sato, Y., Nakaishi, M., Kittisontirak, S., Sriprapha, K., Sakamoto, Y., 2016. Hiệu suất thực tế và tốc độ suy giảm của các loại mô-đun quang điện khác nhau: Nghiên cứu trường hợp ở Thái Lan. Tái tạo. Năng lượng 89 (Phụ lục C), 12–17.

(Mani) GovindaSamy TamizhMani, JK, 2013. Kiểm tra tuổi thọ tăng tốc của Mô-đun quang điện. Báo cáo của Hội đồng Tiêu chuẩn và Quy định Solar America, trang. 1–106.

Masson, GK, Izumi, 2019. Xu hướng năm 2019 trong các ứng dụng quang điện: IEA-PVPS Nhiệm vụ 1: Phân tích và tiếp cận PV chiến lược. Cơ quan năng lượng quốc tế, Quang điện Chương trình Hệ thống Điện (IEA-PVPS).

Masson, GK, Izumi, Detollenaere, A., Lindahl, J., 2019. Bức tranh toàn cảnh về PV toàn cầu năm 2019 Thị trường: IEA-PVPS Nhiệm vụ 1: Phân tích và tiếp cận PV chiến lược. Năng lượng quốc tế Cơ quan, Chương trình Hệ thống Điện quang điện (IEA-PVPS).

Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K., và cộng sự, 2014. IEA PVPS T13-01; Đánh giá về các lỗi của mô-đun quang điện. Trong: Hệ thống, PaRoP (Biên tập) Đánh giá Sự cố của các mô-đun quang điện. Cơ quan năng lượng quốc tế Điện quang điện Chương trình Hệ thống, trang 1–140.

Rajput, P., Tiwari, GN, Sastry, OS, Bora, B., Sharma, V., 2016. Sự suy thoái của các mô-đun quang điện đơn tinh thể sau 22 năm tiếp xúc ngoài trời trong vật liệu composite khí hậu của Ấn Độ. Sol. Năng lượng 135, 786–795.

Sangpongsanont, Y., Chenvidhya, D., Chuangchote, S., Limsakul, C., Seapan, M., Muenpinij, B., Chenvidhya, T., Jivacate, C., Kirtikara, K., 2013. Giám sát dài hạn hệ thống PV trên mái nhà dân dụng nhỏ được kết nối với lưới điện ở Thái Lan. Trong: 23 Hội nghị khoa học và kỹ thuật quang điện quốc tế (PVSEC-23). Đài Bắc, Đài Loan.

Sangpongsanont, Y., Chenvidhya, D., Chuangchote, S., Limsakul, C., Seapan, M., Muenpinij, B., Chenvidhya, T., Parinya, P., Kirtikara, K., 2016. Giám sát dài hạn mười ba năm và độ tin cậy của sự suy giảm mô-đun PV ở Thái Lan. Trong: 26 Hội nghị khoa học và kỹ thuật quang điện quốc tế (PVSEC-26). Singapore.

Virtuani, A., Caccivio, M., Annigoni, E., Friesen, G., Chianese, D., Ballif, C., Miao, T., 2019. 35 năm quang điện: Phân tích nhà máy điện mặt trời TISO-10 kW, bài học kinh nghiệm đã học về an toàn và hiệu suất-Phần 1. Progr. Photovolt.: Res. Appl.

Xiong, H., Gan, C., Yang, X., Hu, Z., Niu, H., Li, J., Si, J., Xing, P., Luo, X., 2017. Ăn mòn hành vi của pin mặt trời silic tinh thể. Microelectron. Reliab. 70, 49–58.