

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Đặng Thị Hải Linh

**NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN VẬT LIỆU LAI CHO ĐIỆN CỰC ĐỐI
CỦA PIN NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI NHẠY QUANG
ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG TẠI VIỆT NAM**

Chuyên ngành: Khoa học Môi trường

Mã số: 9440301.01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC MÔI TRƯỜNG

Hà Nội - 2025

Công trình được hoàn thành tại: Khoa Môi trường, trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQGHN và Khoa Công nghệ Hóa học, Sinh học và Kỹ thuật môi trường, trường Đại học Phenikaa.

Người hướng dẫn khoa học:

HD1: PGS.TS. Đào Văn Dương

HD2: GS.TS. Hoàng Xuân Cơ

Phản biện: **PGS.TS. Lã Đức Dương**

Viện Hóa học - Vật liệu, Viện KH&CN Quân sự

Phản biện: **PGS.TS. Đặng Văn Thành**

Trường Đại học Y - Dược, Đại học Thái Nguyên

Phản biện: **PGS.TS. Dương Thanh Tùng**

Trường Vật liệu, Đại học Bách khoa Hà Nội

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ họp tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQGHN vào hồi giờ ngày tháng năm 20...

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam;
- Trung tâm Thư viện và Tri thức số, Đại học Quốc gia Hà Nội

MỞ ĐẦU

1. Lý do lựa chọn đề tài

Năng lượng tái tạo (NLTT) là yếu tố chính của sản xuất điện bền vững, thân thiện với môi trường và tiết kiệm chi phí. Theo báo cáo của Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA) năm 2023 cho biết, một số áp lực trước mắt từ cuộc khủng hoảng năng lượng toàn cầu đã giảm bớt nhưng thị trường năng lượng và nền kinh tế toàn cầu vẫn chưa ổn định. Việc nghiên cứu phát triển NLTT góp phần đảm bảo an ninh năng lượng quốc gia, đặc biệt đối với những quốc gia đang phụ thuộc nhiều vào việc nhập khẩu nhiên liệu hóa thạch. Các nghiên cứu về công nghệ NLTT liên tục phát triển để nâng cao hiệu suất của việc tạo ra NLTT, đặc biệt là về hiệu quả sử dụng chất chuyển đổi năng lượng.

Pin quang điện là một công nghệ khai thác năng lượng mặt trời (NLMT) tiên tiến, cung cấp nguồn năng lượng dồi dào cho tương lai. Pin năng lượng mặt trời nhạy quang (Dye-sensitized solar cell - DSSC) thuộc nhóm pin mặt trời màng mỏng đã được nghiên cứu sâu rộng trong hơn ba thập kỷ qua do những đặc tính ưu việt như chi phí thấp, phương pháp chế tạo đơn giản, thân thiện với môi trường và dễ sản xuất. Tuy nhiên, vẫn còn rất nhiều khía cạnh cần nghiên cứu nhằm thay thế các vật liệu hiện tại ứng dụng trong DSSC (ví dụ như Pt có chi phí cao, nguồn nguyên liệu hạn chế) cũng như cải thiện độ ổn định của pin.

Hiện nay, việc tổng hợp vật liệu lai vẫn phải đối mặt với nhiều thách thức cần được giải quyết, như điều kiện tổng hợp trong môi trường lỏng gây thất thoát trong quá trình tổng hợp, đặc biệt là trong quá trình làm sạch, áp suất thấp làm tăng chi phí và sử dụng các tác nhân hóa học độc hại ảnh hưởng đến sức khỏe và môi trường. Do đó, việc phát triển các phương pháp đơn giản và hiệu quả để sản xuất vật liệu lai nhằm thay thế một phần hay hoàn toàn vật liệu Pt trong các điện cực đối (Counter electrode - CE) và nâng cao hiệu quả của DSSC là một vấn đề đầy thách thức thu hút sự quan tâm nghiên cứu từ các nhà khoa học.

Vì những lý do trên, đề tài luận án “Nghiên cứu phát triển vật liệu lai cho điện cực đối của pin năng lượng mặt trời nhạy quang định hướng ứng dụng tại Việt Nam” đã được thực hiện.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chung: Nghiên cứu tổng hợp vật liệu lai ứng dụng làm điện cực đối trong pin năng lượng mặt trời nhạy quang và định hướng ứng

dụng tại Việt Nam.

Mục tiêu cụ thể:

+ Tổng hợp được vật liệu lai trên cơ sở oxit kim loại và Pt nhằm thay thế một phần Pt trong điện cực đối của DSSC

+ Tổng hợp được vật liệu lai thay thế hoàn toàn Pt trong điện cực đối của DSSC.

+ Đánh giá được tính chất điện hóa của các điện cực đối chế tạo được cũng như hiệu suất của DSSC sử dụng các điện cực đối trên với mục tiêu tạo ra DSSC có hiệu suất cao và giảm thiểu sử dụng nguyên liệu giá thành cao (Pt).

+ Đánh giá được tiềm năng và định hướng ứng dụng DSSC chế tạo được tại Việt Nam.

3. Ý nghĩa khoa học của luận án

DSSC sử dụng vật liệu NiO và WO₃ cho điện cực đối chỉ đạt hiệu suất thấp tương ứng là 1,53% và 4,36%. Trong nghiên cứu này, NiO, WO₃ được chế tạo thủy nhiệt và lai với Pt thông qua công nghệ khử plasma khô trong điều kiện áp suất khí quyển. Việc kết hợp các hạt nano Pt vào vật liệu NiO, WO₃ cung cấp nhiều vị trí hoạt động xúc tác hơn cho tốc độ phản ứng oxy hóa khử cao hơn, nhằm tăng hiệu suất chuyển đổi năng lượng của các tế bào quang điện.

Việc nghiên cứu các dạng vật liệu lai không sử dụng Pt (NiO/Cdot, CNT/Ru) ứng dụng trong CE của DSSC cũng được nghiên cứu trong luận án này. Các vật liệu lai NiO/Cdot và CNT/Ru được chế tạo với quy trình đơn giản nhằm hạn chế sử dụng các hóa chất hóa học, đồng thời tăng khả năng xúc tác, tính dẫn điện cũng như cải thiện hiệu suất chuyển đổi năng lượng của DSSC đã nghiên cứu trước đó (DSSC với CE NiO, CE RGO/Ru).

4. Ý nghĩa thực tiễn của luận án

Nikel (Ni) và Tungsten (W) là các dạng tài nguyên có trữ lượng lớn tại Việt Nam, có khả năng khai thác và sử dụng cao. Ruthenium (Ru) có trữ lượng lớn hơn Platinum (Pt), đồng thời CNT, Cdot cũng được chế tạo đơn giản từ các nguồn nguyên liệu đa dạng, sẵn có tại Việt Nam.

Công nghệ chế tạo điện cực được xây dựng đơn giản và ít phụ thuộc vào các hoá chất độc hại. Việc sử dụng NiO, WO₃, và CNT/Ru trong các điện cực không đòi hỏi các quy trình phức tạp hoặc cần thiết sử dụng các dung môi hay hóa chất độc hại.

5. Nội dung nghiên cứu

+ Chế tạo oxit kim loại (NiO, WO₃) có hình thái, cấu trúc đặc biệt làm tăng diện tích bề mặt riêng, tính chất xúc tác của vật liệu.

+ Chế tạo vật liệu lai (NiO/Pt, WO₃/Pt) ứng dụng trong các điện cực đối của DSSC nhằm thay thế một phần Pt ứng dụng trong điện cực đối, cải thiện đặc tính điện hóa của điện cực đối, nâng cao hiệu suất của DSSC.

+ Chế tạo vật liệu lai không Pt (NiO/Cdot, CNT/Ru) ứng dụng trong các điện cực đối của DSSC nhằm thay thế hoàn toàn Pt trong điện cực đối, nâng cao hiệu suất chuyển đổi năng lượng của DSSC.

+ Đánh giá tính chất điện hóa của các điện cực đối chế tạo được và hiệu suất của DSSC với các điện cực đối trên.

+ Đánh giá tiềm năng, tính phù hợp và định hướng phát triển, ứng dụng DSSC tại Việt Nam.

6. Những phương pháp nghiên cứu sử dụng trong luận án

- Phương pháp chế tạo vật liệu NiO, NiO/Pt, NiO/Cdot, WO₃, WO₃/Pt, CNT/Ru

- Phương pháp chế tạo điện cực đối dựa trên các vật liệu NiO, NiO/Pt, NiO/Cdot, WO₃, WO₃/Pt, CNT/Ru

- Chế tạo pin năng lượng mặt trời nhạy quang

- Phương pháp xác định tính chất vật liệu (SEM, TEM, HR-TEM, EDX, XRD, XPS)

- Phương pháp xác định tính chất điện hóa của điện cực đối (Quét thế vòng (CV), đo tổng trở điện hóa (EIS), Phổ đồ pha Bode, Đường cong phân cực Tafel)

- Phương pháp xác định hiệu suất và đặc tính của DSSC (Khảo sát đặc tính dòng quang điện – thế, Khảo sát đường cong IPCE, Khảo sát mối tương quan giữa dòng quang điện và thời gian)

- Phương pháp mô hình hóa sử dụng phần mềm Opengrads

7. Những đóng góp mới của luận án

+ Tổng hợp được vật liệu lai trên cơ sở Pt (NiO/Pt, WO₃/Pt) với cấu trúc hình thái đặc biệt lần đầu tiên được ứng dụng làm điện cực đối cho DSSC với các đặc trưng quang điện tốt hơn điện cực NiO và điện cực Pt phún xạ truyền thống.

+ Tổng hợp được vật liệu lai không chứa Pt (NiO/Cdot, CNT/Ru) cấu trúc hình thái đặc biệt lần đầu tiên được ứng dụng làm điện cực đối cho DSSC với các đặc trưng quang điện tốt gần tương đương với điện cực Pt phún xạ truyền thống.

+ Định hướng phát triển DSSC chế tạo được tại Việt Nam với điều kiện bức xạ, nguồn cung cấp nguyên liệu chế tạo.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN TÀI LIỆU

1.1. Tổng quan về phát triển điện mặt trời

NLMT nổi bật là nguồn tài nguyên thiên nhiên tái tạo, phong phú và tiết kiệm chi phí nhất. Triển vọng tương lai nhấn mạnh vai trò quan trọng của PV trong việc định hình năng lượng toàn cầu, cung cấp một giải pháp bền vững và khả thi về mặt kinh tế để mở rộng sản xuất điện.

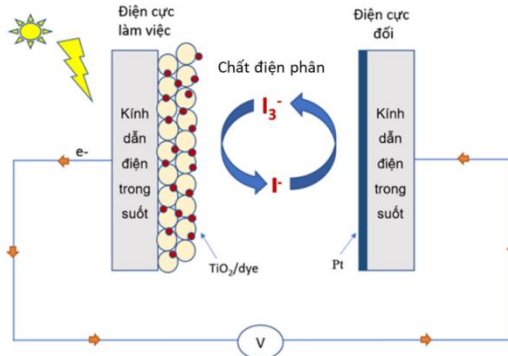
1.2. Phát triển điện mặt trời tại Việt Nam

Luận án đã trình bày tiềm năng NLMT tại Việt Nam, hiện trạng phát triển các dự án điện mặt trời tại Việt Nam. Việt Nam được đánh giá là một quốc gia có tiềm năng khá lớn về NLMT. Sự bùng nổ NLMT ở Việt Nam xảy ra từ năm 2017 đến năm 2020, chủ yếu do giá FITs mới tương đối cao.

1.3. Tác động môi trường của các dự án điện mặt trời

Nhìn chung, các ảnh hưởng của môi trường tập trung vào giai đoạn chế tạo pin mặt trời và sau khi hệ thống pin mặt trời hết hạn sử dụng. Do đó, các công nghệ chế tạo đơn giản, thân thiện với môi trường, sử dụng nguồn nguyên liệu sẵn có, ít độc hại, khả năng tái chế chất thải pin cao sẽ góp phần giảm thiểu đáng kể các tác động môi trường của dự án pin NLMT.

1.4. Tổng quan về DSSC



Hình 1. 1: Cấu tạo của DSSC cơ bản

Cấu tạo của DSSC cơ bản gồm năm phần chính: kính dẫn điện trong suốt (ITO hoặc FTO), một lớp oxit bán dẫn (TiO_2), chất nhạy quang (dye hấp thụ ánh sáng), chất điện ly (dung dịch iodide/triiodide), và CE (kính phủ

Platin hoặc carbon). Cấu trúc này cho phép các DSSC hấp thụ ánh sáng, chất nhạy quang chuyển lên trạng thái kích thích tạo ra các điện tử tự do và các điện tử sau khi đi qua mạch ngoài sẽ tới CE và chuyển giao năng lượng để khử ion I_3^- thành ion I^- trong chất điện ly, hoàn thành mạch điện để tạo ra dòng điện.

1.4.1. Nguyên lý hoạt động

Pin NLMT nhạy quang (DSSC) hoạt động dựa trên nguyên lý chuyển đổi năng lượng ánh sáng thành điện năng. Khi được chiếu sáng, các phân tử chất nhạy quang của DSSC (thường là các hợp chất hữu cơ hoặc kim loại phức) hấp thụ năng lượng từ các photon. Sự hấp thụ này làm chất nhạy quang chuyển từ trạng thái cơ bản lên trạng thái kích thích (tạo thành electron có mức năng lượng cao hơn). Sau khi được kích thích, các electron từ chất nhạy quang sẽ được chuyển vào lớp bán dẫn và di chuyển đến kính dẫn điện trong suốt, tạo ra dòng dịch chuyển electron qua mạch ngoài về phía điện cực đối. Sau đó, các electron đến CE và tham gia vào phản ứng khử ion I_3^- thành I^- trong chất điện ly. Ion I^- sau đó tái tạo lại chất nhạy quang, hoàn thành mạch điện khép kín. Quá trình này liên tục diễn ra, chuyển đổi năng lượng ánh sáng thành điện năng.

1.4.2. Đánh giá hiệu suất DSSC

Hiệu suất của DSSC có thể được đánh giá bằng cách sử dụng hiệu suất chuyển đổi dòng điện (IPCE, %), dòng ngắn mạch (J_{sc} , mAcm^{-2}), điện áp mạch hở (V_{oc} , V), công suất đầu ra tối đa [P_{max}], hiệu suất tổng thể [PCE, %] và hệ số lấp đầy [FF] ở mức độ chiếu sáng không đổi.

1.5. Điện cực đối trong DSSC

CE là một trong những thành phần quan trọng nhất trong DSSC. Nhiệm vụ chính của CE là khử triiodide thành iodide trong chất điện ly. Hầu hết các nghiên cứu về DSSC tập trung vào việc tăng J_{sc} , V_{oc} và hệ số lấp đầy (FF) để tăng hiệu quả. Thông thường, Pt được phủ trên FTO sử dụng làm CE cho DSSC truyền thống. Bằng cách cải thiện vật liệu CE, FF của DSSC tăng lên bằng cách giảm điện trở truyền điện tích ở CE và giao diện điện phân (R_{ct}).

Đã có rất nhiều nghiên cứu về các dạng vật liệu ứng dụng trong CE của DSSC, cụ thể là vật liệu Pt, carbon, composite, polymer, kim loại hoặc hợp kim, các kim loại chuyển tiếp,...

1.6. Tình hình nghiên cứu về DSSC tại Việt Nam

Luận án đã nêu tình hình nghiên cứu về DSSC nói chung và CE của DSSC nói riêng. Nhìn chung, các nghiên cứu tại Việt Nam phần lớn tập trung vào chế tạo vật liệu ứng dụng cho điện cực làm việc, nghiên cứu về CE hiện vẫn chưa được quan tâm nhiều.

Hiện nay, vật liệu lai đang trở thành nhóm vật liệu phổ biến trong việc thay thế hoặc giảm giá thành của Pt nhờ hiệu ứng cộng hưởng. Có rất nhiều loại vật liệu lai đã được phát triển với nhiều phương pháp khác nhau.

CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu:

+ Các dạng vật liệu lai (NiO/Pt, WO₃/Pt, NiO/Cdot, CNT/Ru) ứng dụng cho điện cực đối của DSSC.

+ Các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng ứng dụng DSSC chế tạo được tại Việt Nam như: Tiềm năng năng lượng mặt trời (bức xạ mặt trời) theo thời gian các tháng trong năm tại Việt Nam, Sự sẵn có của nguyên liệu chế tạo (Ni, W, vật liệu cacbon CNT, Cdot, ...).

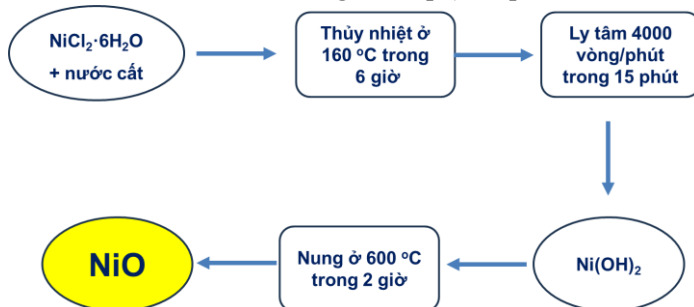
Phạm vi nội dung nghiên cứu:

Nghiên cứu tập trung vào vật liệu lai của NiO/Pt và WO₃/Pt và 2 dạng vật liệu lai không chứa Pt là NiO/Cdot và CNT/Ru.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

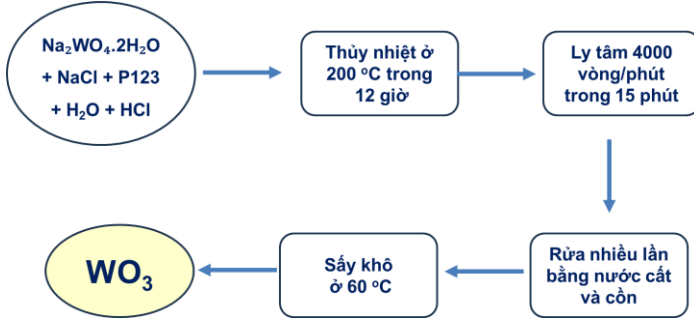
2.2.1. Phương pháp chế tạo vật liệu

2.2.1.1. NiO kích thước nano dạng tấm xốp (nanoporous NiO nanosheet)



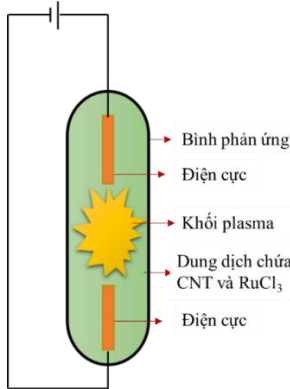
Hình 2. 1: Quy trình tổng hợp NiO

2.2.1.2. Phương pháp tổng hợp WO_3



Hình 2. 2: Quy trình tổng hợp WO_3

2.2.1.3. Phương pháp tổng hợp vật liệu nano CNT/Ru

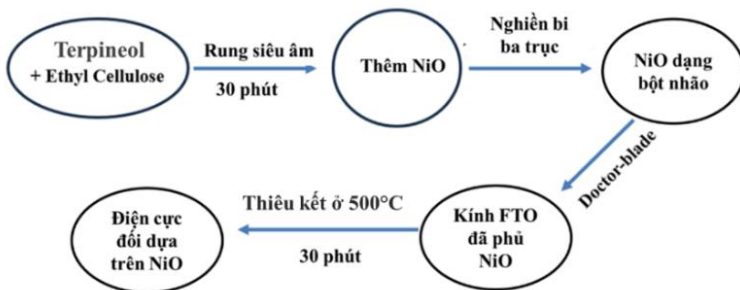


Hình 2. 3: Cấu trúc hệ plasma lỏng

CNT/Ru được tổng hợp bằng phương pháp khử plasma lỏng.

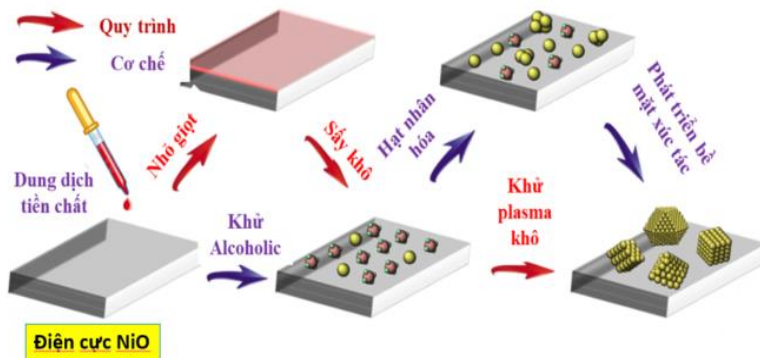
2.2.2. Phương pháp chế tạo điện cực đối

2.2.2.1. Phương pháp chế tạo điện cực đối NiO, NiO/Cdot, NiO/Pt



Hình 2. 4: Quy trình chế tạo điện cực đối NiO

Để chế tạo điện cực đối NiO/Pt, 3 μl H_2PtCl_6 10 mM trong isopropyl alcohol được nhỏ giọt lên bề mặt của điện cực NiO và được nung ở 400 °C trong vòng 15 phút sử dụng phương pháp plasma khô.

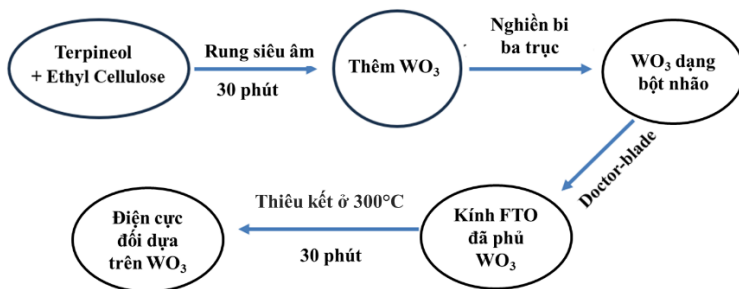


Hình 2. 5: Quy trình chế tạo điện cực đối NiO/Pt

Đối với việc chế tạo NiO/Cdot, điện cực NiO được ngâm vào dung dịch Cdot (1 g/L) trong 15 phút và sau đó được rửa nhiều lần bằng nước cất để loại bỏ Cdot dư thừa. Sau đó, điện cực được sấy ở 70 °C trong 30 phút trong lò.

2.2.2.2. Phương pháp chế tạo điện cực đối WO_3

CE dựa trên WO_3 được chế tạo theo quy trình tại Hình 2.6.



Hình 2. 6: Quy trình chế tạo điện cực đối WO_3

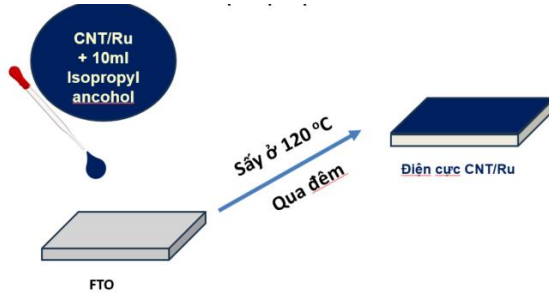
2.2.2.3. Chế tạo điện cực đối WO_3/Pt

Quy trình chế tạo điện cực WO_3/Pt tương tự như chế tạo điện cực NiO/Pt.

2.2.2.4. Phương pháp chế tạo điện cực đối CNT/Ru và RGO/Ru

Điện cực CNT/Ru và RGO/Ru được chế tạo đơn giản theo cùng quy

trình hình 2.7.



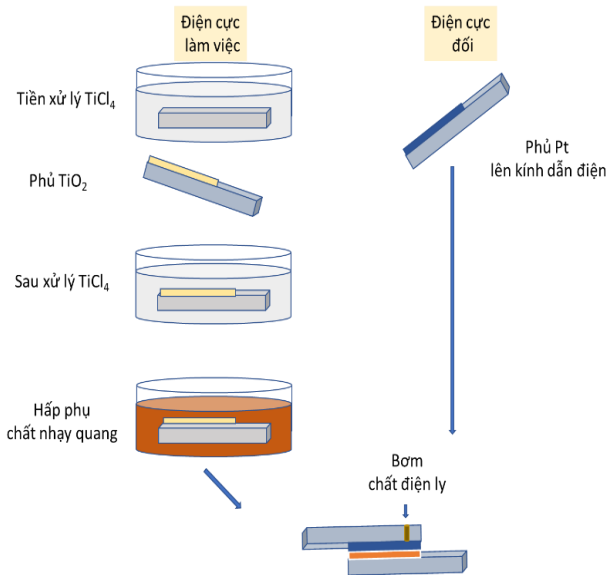
Hình 2. 7: Quy trình chế tạo điện cực đối CNT/Ru

2.2.2.5. Chế tạo điện cực đối Pt

Điện cực đối Pt được chế tạo bằng phương pháp phun xạ truyền thống nhằm tạo ra điện cực đối chứng.

2.2.3. Chế tạo pin năng lượng mặt trời nhạy quang

Các tế bào DSSC được chế tạo bằng quy trình truyền thống được thể hiện trên hình 2.8. Các vật liệu điện cực đối được tổng hợp và thay thế lần lượt cho điện cực Pt phun xạ truyền thống trước khi lắp ghép thành DSSC hoàn chỉnh.



Hình 2. 8: Quy trình chế tạo tế bào quang điện nhạy quang (DSSC) cơ bản với điện cực đối là Pt

2.2.4. Phương pháp xác định tính chất vật liệu

2.2.4.1. Phương pháp hiển vi điện tử quét (SEM)

Trong nghiên cứu này, hình thái của vật liệu lai, điện cực đếm được phân tích bằng SEM, kính hiển vi điện tử quét độ phân giải cao (HRSEM, JEOL JSM-7000F) và kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM; Hitachi S-4800, Hitachi) không có lớp phủ dây dẫn.

2.2.4.2. Phương pháp hiển vi điện tử truyền qua (TEM)

Trong nghiên cứu này, hình thái của vật liệu lai, điện cực đếm được phân tích bằng kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM) (JEM-2100F, Joel, Nhật Bản)

2.2.4.3. Quang phổ tia X phân tán năng lượng (EDS)

Quang phổ tia X phân tán năng lượng (EDS) được sử dụng trong nghiên cứu này để phân tích nguyên tố hoặc đặc tính hóa học của mẫu. Trong nghiên cứu này, phép đo EDS được thực hiện bởi thiết bị JEM-2100F, Joel, Nhật Bản.

2.2.4.4. Quang phổ quang điện tử tia X (XPS)

Trong nghiên cứu này, phép đo XPS được thực hiện bởi thiết bị Sigma Pribe Thermo Fisher VG Scientific Spectrometer được trang bị với nguồn đơn sắc Al K α X-ray.

2.2.4.5. Phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD)

Thí nghiệm nhiễu xạ tia X được thực hiện với máy đo nhiễu xạ bột tia X tự động (D / Max 2400, RIGAKU).

2.2.5. Phương pháp xác định tính chất điện hóa của pin

Các phép đo được thực hiện tại Phòng thí nghiệm nghiên cứu lưu trữ và chuyển hóa năng lượng tái tạo (RECS LAB) trường Đại học Phenikaa, Hà Nội, bao gồm: Phương pháp quét thế vòng (CV); Phương pháp đo tổng trở điện hóa (EIS); Phổ đồ pha Bode; Đường cong phân cực Tafel; Đặc tính dòng quang điện – thế; Khảo sát đường cong IPCE; Khảo sát mối tương quan giữa dòng quang điện và thời gian.

2.2.6. Phương pháp mô hình hóa sử dụng phần mềm Opengrads

Trong nghiên cứu này, dữ liệu về bức xạ mặt trời được thu thập từ nguồn dữ liệu trung bình tháng trên toàn cầu trong đất liền (ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present-<https://cds.climate.copernicus.eu/>). Định dạng dữ liệu ở dạng file NetCDF4 (Experimental). Số liệu được thu thập là giá trị trung bình tháng của 12 tháng trong các năm 2020, 2021, 2022 và 2023.

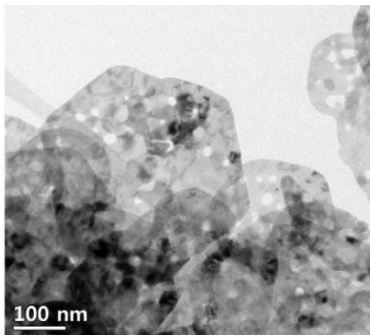
Dữ liệu được xử lý và mô hình hóa thông qua phần mềm Opengrads.

CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Nghiên cứu phát triển vật liệu lai dựa trên NiO ứng dụng trong điện cực đối của DSSC

3.1.1. Kết quả đặc tính của vật liệu lai dựa trên NiO

3.1.1.1. Đặc tính của vật liệu NiO

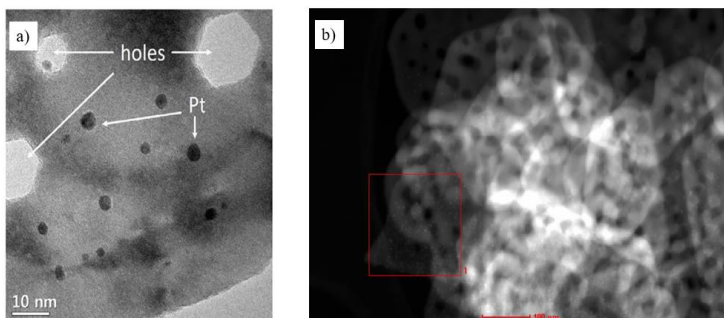


Hình 3. 1: Hình ảnh TEM của NiO

Kết quả phân tích đặc tính của vật liệu NiO (đại diện kết quả TEM trên hình 3.1) cho thấy cấu trúc dạng tấm phẳng hình bát giác của NiO với kích thước trong khoảng 200-500nm. Đặc biệt trên bề mặt của NiO có xuất hiện các lỗ rỗng nhỏ có kích thước trong khoảng từ vài nm đến mười nm.

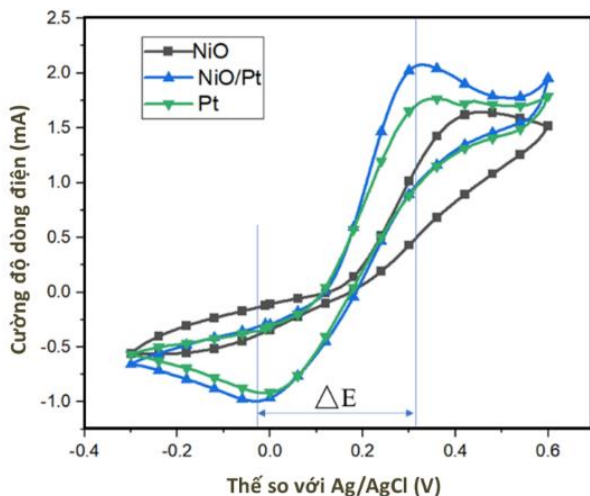
3.1.1.2. Đặc tính của vật liệu NiO/Pt

Pt được gắn trực tiếp lên CE NiO thông qua quá trình khử plasma khô. Ảnh TEM (Hình 3.2) cho thấy hạt Pt kích thước nano đã được gắn trên các tấm vật liệu NiO. Có thể thấy Pt NPs không chỉ gắn trên bề mặt của vật liệu nano NiO dạng tấm mà còn nằm ở thành của các lỗ rỗng.



Hình 3. 2: Hình ảnh TEM của vật liệu lai NiO/Pt với độ phóng đại (a) 10nm, (b) 100nm

3.1.2. Tính chất điện hóa của điện cực đối dựa trên NiO



Hình 3. 3: Kết quả khảo sát CV cho điện cực đối NiO, NiO/Pt, Pt

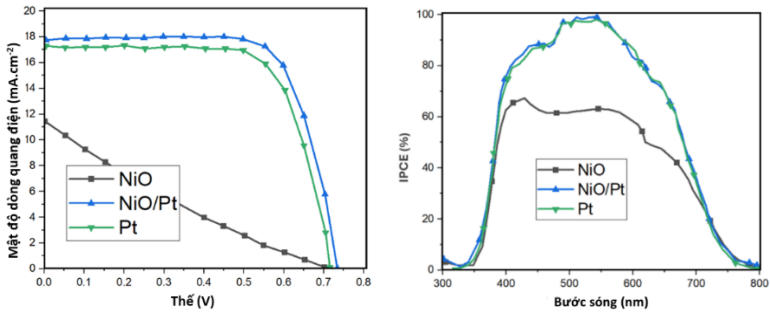
Kết quả các phép đo CV (Hình 3.3) cho thấy dòng khử tuyệt đối ($|J_{red}|$) của các CE được tuân theo một quy luật như sau NiO/Pt > Pt > NiO. Giá trị R_{ct} (Bảng 3.1) của các điện cực đối chế tạo được thay đổi theo thứ tự giảm dần của NiO/Pt ($1,79 \Omega$) < Pt ($2,92 \Omega$) < NiO ($295,4 \Omega$). Giá trị V_{oc} (Bảng 3.1) đối với DSSC (dummy cell) dựa trên điện cực đối NiO, Pt, và NiO/Pt lần lượt là 715, 715, và 735 mV. Các kết quả thu được cho thấy sự thay đổi trong hoạt động xúc tác của CE tuân theo trình tự giảm dần từ CE NiO/Pt > Pt > NiO và hoàn toàn phù hợp với kết quả CV và EIS.

Bảng 3. 1: Các thông số đặc trưng của điện cực đối dựa trên NiO và Pt

CE	$R_{ct}(\Omega)$	$J_{sc}(\text{mAcm}^{-2})$	$V_{oc}(\text{mV})$	FF (%)	PCE (%)
NiO	295,4	11,50	715	20,83	1,71
NiO/Pt	1,79	17,76	735	73,97	9,66
Pt	2,92	17,30	715	71,29	8,82

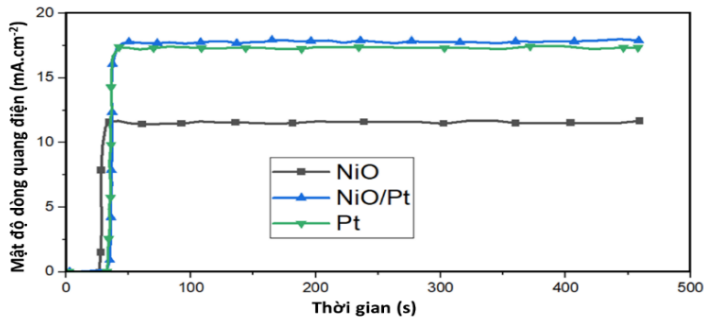
3.1.3. Hiệu suất của DSSC sử dụng điện cực đối dựa trên NiO

Để đánh giá hiệu suất của các tế bào quang điện sử dụng các điện cực đối dựa trên NiO chế tạo được, các phép đo khảo sát mối tương quan giữa mật độ dòng và điện áp được thực hiện.



Hình 3. 4: Khảo sát Dòng quang điện – thế và khảo sát IPCE của các tế bào quang điện dựa trên NiO và Pt

Từ kết quả khảo sát dòng quang điện và thế (Hình 3.4), PCE của DSSC với CE NiO được xác định là 1,73%, PCE của thiết bị có điện cực Pt phun xạ là 8,82%, thấp hơn so với hiệu suất 9,66% của DSSC dựa trên CE NiO/Pt. Các giá trị J_{SC} không thay đổi trong cả quá trình khảo sát dưới ánh sáng chiếu xạ mặt trời (Hình 3.5). Từ đó cho thấy các CE cho thấy độ ổn định cao dưới sự khử của các ion triiodide. Do đó, DSSC với điện cực đối NiO/Pt có khả năng phát triển thương mại hóa và ứng dụng cao hơn.



Hình 3. 5: Kết quả khảo sát Dòng quang điện theo thời gian của các tế bào quang điện dựa trên NiO và Pt

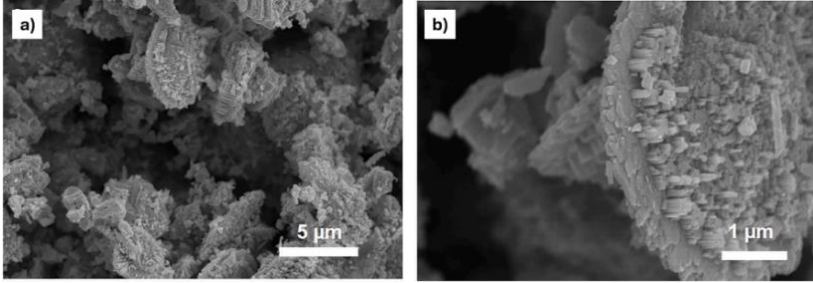
3.2. Nghiên cứu phát triển vật liệu lai dựa trên WO_3 ứng dụng trong điện cực đối của DSSC

3.2.1. Kết quả đặc tính vật liệu lai dựa trên WO_3

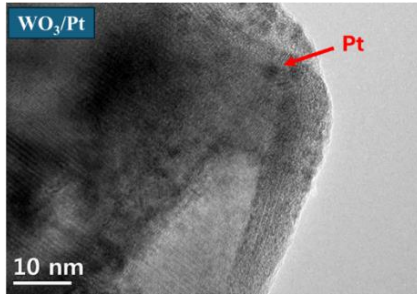
3.2.1.1. Đặc tính vật liệu WO_3 /Pt

Hình thái của vật liệu lai WO_3 và hạt nano Pt được khảo sát qua SEM (Hình 3.6). Cấu trúc bánh xe có đường kính khoảng 5 μ m trong khi

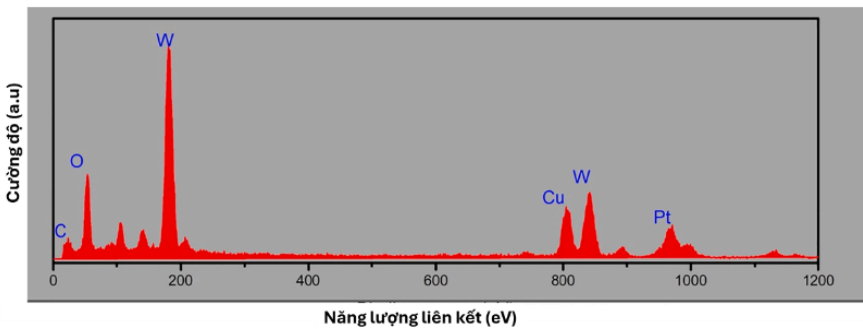
chiều dài của các thanh WO_3 nằm trong khoảng 200-500 nm.



Hình 3. 6: Hình ảnh SEM của WO_3/Pt ở các độ phóng đại (a) 5 μm ; (b) 1 μm



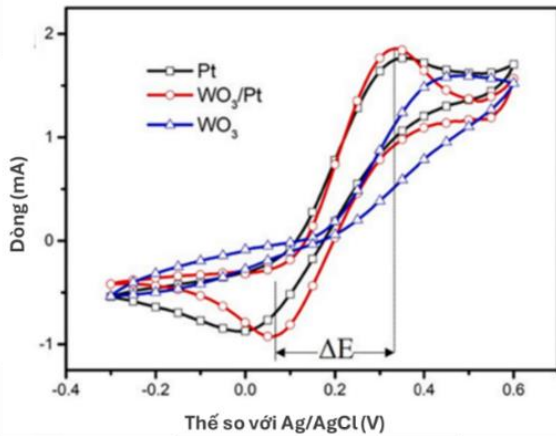
Hình 3. 7: Hình ảnh TEM của vật liệu WO_3/Pt



Hình 3.8: Kết quả EDS của vật liệu WO_3/Pt

Để khẳng định sự tồn tại của Pt trong vật liệu WO_3/Pt chế tạo, TEM đã được thực hiện (Hình 3.7). Các hạt nano Pt có kích thước 2 nm được cố định tốt trên bề mặt của WO_3 . Kết quả EDS (Hình 3.8) xác nhận thêm về sự tồn tại của Pt trên bề mặt của WO_3 . Kết quả đo TEM-EDS cho thấy sự xuất hiện các đỉnh của C, O, Cu có nguồn gốc từ đế lưới đồng, các đỉnh W, O, Pt một lần nữa khẳng định sự tồn tại của vật liệu lai WO_3/Pt chế tạo được.

3.2.2. Tính chất điện hóa của điện cực đối dựa trên WO₃



Hình 3.9: Kết quả khảo sát CV cho các điện cực đối WO₃, WO₃/Pt, Pt

Kết quả khảo sát CV được mô tả trên Hình 3.9. Dòng khử tuyệt đối ($|J_{red}|$) của các CE giảm dần theo thứ tự là WO₃/Pt > Pt > WO₃. So sánh các giá trị của $|J_{red}|$ chỉ ra rằng tốc độ của các phản ứng ô xy hóa khử diễn ra trên các CE giảm dần theo thứ tự WO₃/Pt > Pt > WO₃.

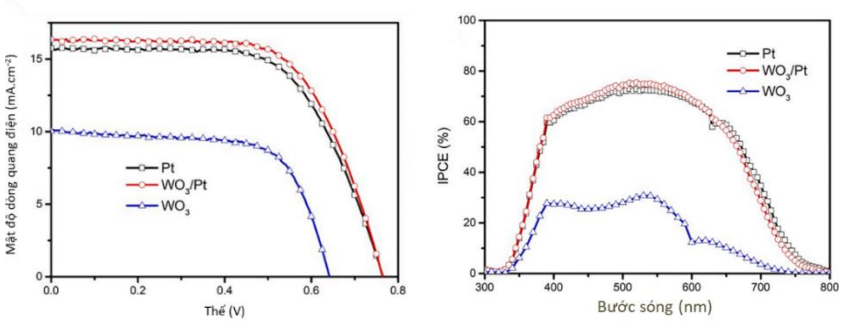
Khảo sát EIS được thực hiện và xây dựng nên đồ thị Nyquist plots, cung cấp các số liệu tính toán các thông số điện hóa của điện cực (Bảng 3.2). Có thể thấy WO₃ chế tạo được có các tính chất điện hóa phù hợp cho ứng dụng là CE của DSSC.

Bảng 3. 2: Một số thông số điện hóa đặc trưng của pin với điện cực đối dựa trên WO₃ và Pt

Thông số	$ J_{red} $ (mA)	R_{ct} (Ω)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA.cm ⁻²)	FF (%)	PCE (%)
WO ₃	0,45	29,42	500,00	10,10	67,84	4,36
Pt	0,88	2,91	765,00	15,75	63,26	7,61
WO ₃ /Pt	0,94	1,84	763,66	16,35	64,61	8,10

Giá trị R_{ct} ước tính từ đồ thị Nyquist plot khoảng 29,42 Ω , nhỏ hơn rất nhiều so với giá trị R_{ct} của vật liệu CE NiO (295,4 Ω). Các giá trị của R_{ct} biến đổi theo quy luật sau đây: WO₃/Pt (1,84 Ω) < Pt (2,91 Ω) < WO₃ (29,42 Ω).

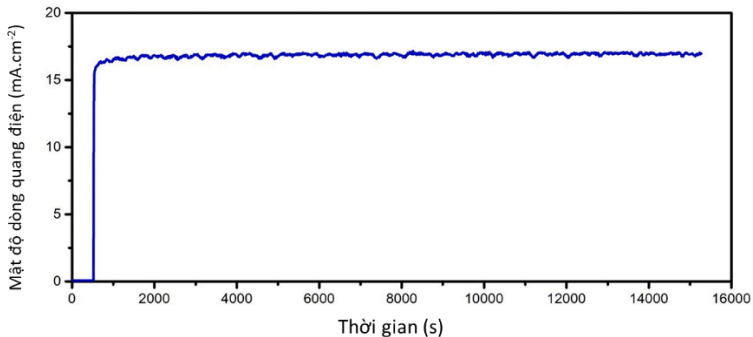
3.2.3. Hiệu suất của DSSC dựa trên WO_3



Hình 3. 6: Đường cong đặc trưng của mật độ dòng – thế và đường cong IPCE của DSSCs với các CE Pt, WO_3 , WO_3/Pt .

Đường cong đặc trưng của mật độ dòng – thế và đường cong IPCE của các DSSC được thể hiện trên Hình 3.10. Kết quả chỉ ra rằng hiệu suất chuyển đổi năng lượng của DSSC chế tạo bởi CE WO_3/Pt cao hơn so với các DSSC sử dụng CE WO_3 và CE Pt phun xạ truyền thống, với các giá trị PCE lần lượt là 8,10%, 4,36%, và 7,61%.

Kết quả IPCE cho thấy hiệu suất chuyển đổi photon - electron đạt được cao nhất là khoảng 76% tại bước sóng 520 nm đối với DSSC sử dụng WO_3/Pt . DSSC chế tạo được có khả năng ứng dụng cao trong điều kiện ánh sáng ở vùng khả kiến.



Hình 3. 11: Khảo sát độ ổn định của dòng điện tạo ra theo thời gian của DSSC với WO_3/Pt CE

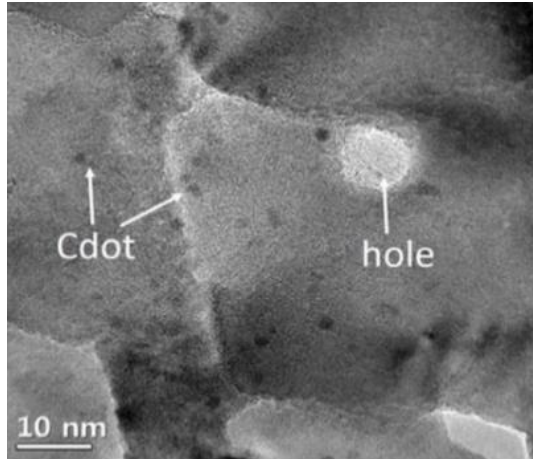
Giá trị J_{SC} duy trì không đổi trong thời gian thí nghiệm, tế bào quang điện được chiếu sáng bởi ánh sáng mặt trời (thể hiện trên hình 3.11). Điều này chứng minh CE với WO_3/Pt có độ ổn định cao dưới điều kiện của

phản ứng oxi hóa khử.

3.3. Nghiên cứu phát triển vật liệu lai không chứa Pt ứng dụng trong điện cực đối của DSSC

3.3.1. Nghiên cứu phát triển vật liệu lai NiO/Cdot ứng dụng trong CE của DSSC

3.3.1.1. Kết quả đặc tính vật liệu NiO/Cdot

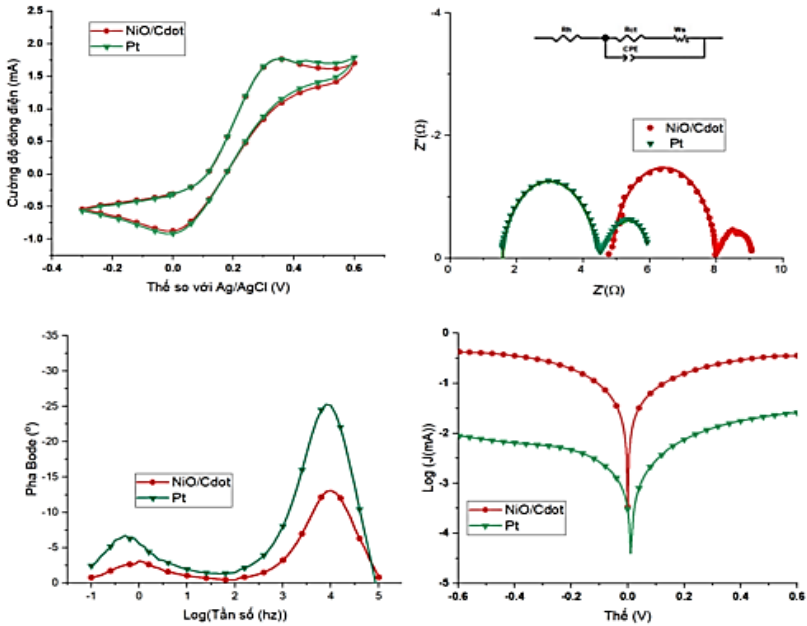


Hình 3. 7: Hình ảnh TEM của vật liệu NiO/Cdot

Kết quả TEM của vật liệu NiO/Cdot (Hình 3.12) cho thấy sự cố định của Cdot trên bề mặt của các tấm nano NiO cấu trúc bát giác. Cdot không chỉ gắn trên bề mặt của các tấm nano NiO mà còn gắn trên thành các lỗ rỗng. Việc cố định Cdot trên các tấm nano NiO xốp không chỉ tăng cường hoạt động xúc tác điện hóa mà còn cải thiện tính ổn định của NiO/Cdot trong môi trường điện phân do sự hình thành cấu trúc đặc biệt, Cdot bị khử trong quy trình tổng hợp vật liệu lai NiO/Cdot.

3.3.1.2. Tính chất điện hóa của điện cực đối NiO/Cdot

Kết quả khảo sát CV (Hình 3.13) cho thấy các giá trị dòng khử tuyệt đối của các CE tăng dần theo thứ tự NiO < NiO/Cdot < Pt < NiO/Pt. Các giá trị R_{ct} được thay đổi theo thứ tự NiO/Pt (1,79 Ω) < Pt (2,92 Ω) < NiO / Cdot (3,07 Ω) < NiO (295,4 Ω). Các kết quả thu được từ khảo sát CV, EIS, Pha Bode và Tafel (Hình 3.13) cho thấy sự thay đổi trong hoạt động xúc tác của CE được tuân theo thứ tự của NiO/Pt > Pt > NiO-Cdot > NiO. Điện cực đối NiO/Cdot thể hiện hoạt tính xúc tác tương đối tốt trong khi hoàn toàn không sử dụng Pt.



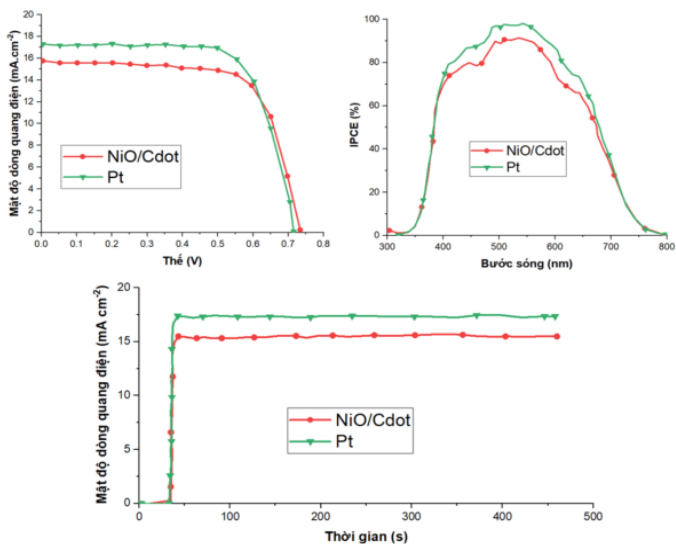
Hình 3. 8: Khảo sát CV, EIS, pha Bode và Tafel cho các điện cực đối NiO/Cdot và Pt

Bảng 3. 3: Các thông số đặc trưng của điện cực đối NiO/Cdot và Pt

CE	R_{ct} (Ω)	J_{SC} (mAcm^{-2})	V_{OC} (mV)	FF (%)	PCE (%)
NiO/Cdot	3,07	15,72	735	73,97	8,25
Pt	2,92	17,30	715	71,29	8,82

3.3.1.3. Hiệu suất của DSSC với điện cực đối NiO/Cdot

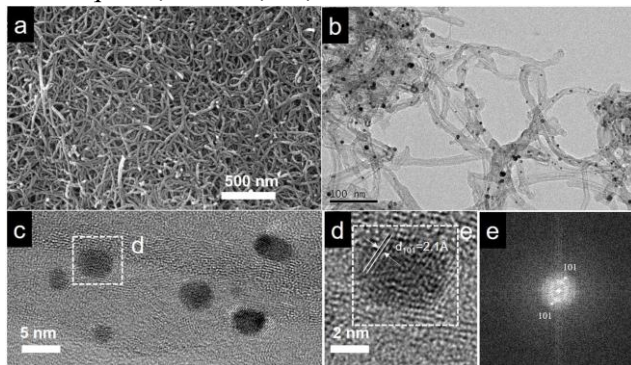
Bảng 3.3 cho thấy hiệu suất chuyển đổi năng lượng của thiết bị pin NLMT dựa trên vật liệu NiO chỉ đạt là 1,73% (như phân tích ở phần 3.1), được cải thiện lên 8,25% đối với các tế bào quang điện dựa trên CE NiO/Cdot (nhỏ hơn một chút so với DSSC dựa trên NiO/Pt là 9,66% và gần tương đương với DSSC dựa trên Pt phun xạ là 8,82%). Thiết bị CE không chứa Pt (NiO/Cdot) cho độ ổn định cao đối với chất điện phân I_3^-/I^- (thể hiện trên hình 3.14). Điều này cho thấy việc thay thế hoàn toàn Pt trong CE của pin NLMT nhạy quang là khả thi và có thể ứng dụng trong quy mô rộng.



Hình 3.14: Kết quả khảo sát tương quan dòng quang điện và thế, IPCE, độ ổn định dòng theo thời gian của DSSC với điện cực đối NiO/Cdote và Pt

3.3.2. Nghiên cứu phát triển vật liệu lai CNT/Ru ứng dụng trong điện cực đối của DSSC

3.3.2.1. Kết quả đặc tính vật liệu CNT/Ru



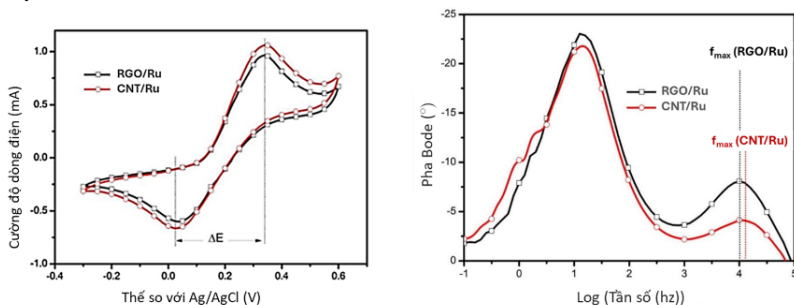
Hình 3.15: (a) Hình ảnh SEM của CNT/Ru; (b,c,d) Hình ảnh TEM của CNT/Ru với độ phân giải khác nhau; (e) Hình thái FFT của vùng được đánh dấu (e) Sự hình thành [101] trong hình (c)

CNT/Ru được tổng hợp thành công bằng phương pháp khử plasma lỏng. CNT/Ru có cấu trúc xốp, các hạt Ru đã được gắn thành công lên thành các ống CNT (Hình 3.15). Sự tồn tại của Ru trong vật liệu lai đã

được kiểm chứng qua các kết quả XRD, EDS.

3.3.2.2. Tính chất điện hóa của điện cực đối CNT/Ru

Kết quả khảo sát CV, phổ đồ pha Bode với các điện cực đối CNT/Ru và RGO/Ru được thể hiện trên hình 3.16. Có thể thấy dòng khử tuyệt đối của điện cực CNT/Ru cao hơn so với RGO/Ru do độ xốp của điện cực CNT/Ru cao hơn so với điện cực RGO/Ru. Kết quả thu được chỉ ra rằng điện trở truyền điện tích (R_{ct}) và V_{OC} của điện cực CNT/Ru thấp hơn so với điện cực RGO/Ru.



Hình 3. 9: Kết quả khảo sát CV, phổ đồ pha Bode với các điện cực đối CNT/Ru và RGO/Ru

Các thông số chính về điện hóa của tế bào NLMT với các điện cực đối CNT/Ru và RGO/Ru được trình bày trong bảng 3.4. Việc giảm R_{ct} thể hiện sự gia tăng hoạt động xúc tác của CE. Hơn nữa, điện cực CNT/Ru có diện tích bề mặt lớn hơn điện cực RGO/Ru dẫn đến thực tế là hoạt động xúc tác của điện cực CNT/Ru tốt hơn so với điện cực RGO/Ru.

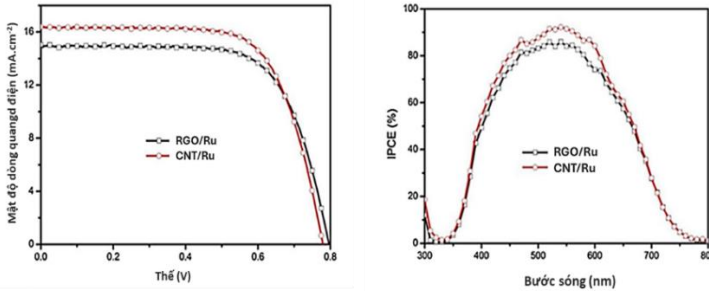
Bảng 3. 4: Các thông số chính về điện hóa của tế bào NLMT với các điện cực đối CNT/Ru và RGO/Ru

Điện cực đối	J_{sc} (mAcm ⁻²)	V_{oc} (V)	FF	R_{ct} (Ω)	PCE (%)
RGO/Ru	15,04	0,795	68,61	1,93	8,20
CNT/Ru	16,39	0,78	68,74	1,07	8,79

3.3.2.3. Hiệu suất của DSSC với điện cực đối CNT/Ru

Khảo sát tương quan dòng điện và thế của các DSSC với điện cực đối CNT/Ru và RGO/Ru được thực hiện và tính toán các thông số của DSSC (Hình 3.17 và Bảng 3.4). Thiết bị DSSC có điện cực RGO/Ru cho thấy hiệu suất chuyển đổi năng lượng (PCE) là 8,20% trong khi tế bào có CNT/Ru có PCE là 8,79%. Sự cải tiến PCE của thiết bị có điện cực

CNT/Ru so với điện cực RGO có thể do việc tăng cường hoạt động xúc tác điện hóa của CNT/Ru so với RGO/Ru. Phép đo IPCE (Hình 3.17) cũng chỉ ra rằng dòng điện tạo ra của thiết bị DSSC với CE CNT/Ru luôn có giá trị cao hơn so với thiết bị sử dụng vật liệu RGO/Ru.



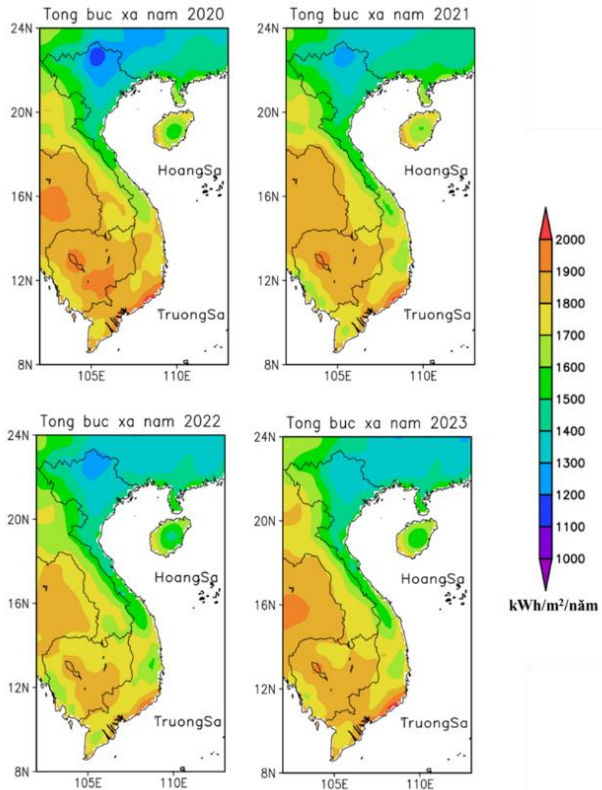
Hình 3. 17: Khảo sát tương quan dòng quang điện và thế và khảo sát IPCE của các tế bào quang điện với điện cực đối CNT/Ru và RGO/Ru

3.4. Định hướng phát triển và ứng dụng DSSC chế tạo được tại Việt Nam

3.4.1. Ảnh hưởng của tiềm năng NLMT đến khả năng ứng dụng DSSC chế tạo được tại Việt Nam

Năng lượng bức xạ mặt trời đến mặt đất chủ yếu là bức xạ sóng ngắn với bước sóng từ 300nm-3000nm. DSSC chế tạo được có chất nhạy quang là N719 có khả năng hấp thụ tốt ánh sáng có bước sóng từ 300 đến 800nm, cho thấy DSSC chế tạo được hoàn toàn phù hợp với điều kiện bức xạ tại Việt Nam.

Bản đồ bức xạ năng lượng mặt trời tới mặt đất tại Việt Nam được xây dựng cho các năm 2020, 2021, 2022 và 2023 (Hình 3.18). Tiềm năng năng lượng bức xạ tại các khu vực trên lãnh thổ Việt Nam có sự khác biệt rõ rệt, phụ thuộc vào điều kiện địa lý và khí hậu từng vùng. Tại khu vực Tây Bắc, năng lượng bức xạ khá đồng đều giữa các địa phương, với giá trị dao động từ 1.500 đến 1.600 KWh/m²/năm. Vùng Đông Bắc có tiềm năng năng lượng bức xạ thấp nhất cả nước, chỉ đạt từ 1.400 đến 1.500 KWh/m²/năm. Đồng Bằng Bắc Bộ cũng có mức năng lượng bức xạ dao động trong khoảng 1.400 đến 1.500 KWh/m²/năm. Ở khu vực Bắc Trung Bộ, tiềm năng năng lượng bức xạ phân bố từ 1.400 đến 1.600 KWh/m²/năm. Nam Trung Bộ là khu vực có tiềm năng năng lượng bức xạ cao nhất cả nước, đạt trung bình trên 1.900 KWh/m²/năm. Tây Nguyên và Nam Bộ cũng là những vùng dồi dào năng lượng bức xạ, với giá trị trung bình khoảng 1.800 KWh/m²/năm.



Hình 3. 18: Tổng bức xạ mặt trời đến mặt đất tại Việt Nam các năm 2020, 2021, 2022, 2023

3.4.2. Sự sẵn có nguồn nguyên liệu chế tạo vật liệu điện cực đối ứng dụng DSSC tại Việt Nam

Trong nghiên cứu này, điện cực đối của DSSC được chế tạo dựa trên các nguyên liệu Niken, Vonfram, Cdot, Platin, CNT, Ru nhằm thay thế một phần hay hoàn toàn platin (dạng tài nguyên có trữ lượng thấp, giá thành cao) trong DSSC cũng như nâng cao hiệu suất chuyển đổi năng lượng của DSSC. Nguồn nguyên liệu Niken, Vonfram có trữ lượng khai thác tương đối lớn tại Việt Nam, ước tính mục tiêu tới năm 2030 khai thác 5.115.000 tấn quặng nguyên khai Vonfram/năm và 7.200.000 quặng Niken/năm. CNT đã được chế tạo thành công tại một số Viện nghiên cứu tại Việt Nam. Các nhóm tác giả ở Việt Nam đã nghiên cứu và chế tạo thành công chấm lượng tử carbon (CDs) với quy trình và nguyên liệu đơn

giản. Với nguồn nguyên liệu phong phú, quy trình chế tạo đơn giản, thiết bị sẵn có tại Việt Nam, DSSC với điện cực đối NiO/Pt, WO₃/Pt, NiO/Cdot, CNT/Ru có tiềm năng để phát triển ứng dụng tại Việt Nam.

KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu trên, luận án đã thu được những kết luận sau:

1. Tổng hợp thành công vật liệu nano NiO dạng tấm có cấu trúc lục giác với sự xuất hiện các lỗ rỗng trên bề mặt. Pt đã được gắn trên bề mặt của các tấm nano NiO rỗng xốp bằng phương pháp thủy nhiệt và cho thấy các đặc tính điện hóa vượt trội so với vật liệu NiO dùng trong điện cực đối của DSSC. Hoạt tính xúc tác của các CE dựa trên NiO tuân theo trình tự giảm dần của vật liệu NiO/Pt > Pt > NiO. Do đó, hiệu suất chuyển đổi quang điện tăng dần lần lượt là 1,73; 8,82 và 9,66% cho các tế bào quang điện có CE NiO, Pt và NiO/Pt.

2. Tổng hợp thành công WO₃ cấu trúc hình bánh xe (micro-wheels) từ các thanh oxit WO₃. WO₃ được kết hợp thành công với Platin thông qua công nghệ khử plasma khô trong khí quyển. Vật liệu WO₃/Pt cho thấy tính chất xúc tác hiệu quả để khử các ion I₃⁻ thành ion I⁻, được minh chứng thông qua giá trị Rct nhỏ nhất. Kết quả cho thấy hạt nano Pt có kích thước 2 nm được phân tán tốt trên bề mặt của WO₃ để tạo thành một cấu trúc 3D, giúp tăng cường đặc tính xúc tác và giảm trở kháng khuếch tán của quá trình tái tạo các ion I⁻ từ ion I₃⁻. Các tính chất điện hóa chỉ ra rằng đặc tính xúc tác của các điện cực đối giảm theo thứ tự WO₃/Pt > Pt phun xạ > WO₃. Do đó, hiệu suất chuyển đổi điện năng (PCE) của các tế bào quang điện tăng dần với CE WO₃, Pt phun sputtering và WO₃/Pt tương ứng là 4,36%, 7,61% và 8,10% dưới cùng điều kiện khảo sát. Hơn nữa, sự ổn định của CE WO₃ với chất điện phân đã chỉ ra tính khả thi trong việc mở rộng quy mô cho DSSC chế tạo được.

3. Điện cực đối không chứa Platin đã được chế tạo thành công. NiO/Cdot, vật liệu điện cực không chứa Pt cung cấp hoạt tính xúc tác vượt trội, cho PCE của thiết bị có NiO/Cdot đạt 8,25%, hiệu quả tương đương với tế bào quang điện truyền thống phun xạ Pt (8,86%). Một cấu trúc lục giác đặc biệt của các tấm nano NiO xốp nano kết hợp với Cdot khử, dẫn đến cải thiện hoạt động xúc tác của điện cực NiO/Cdot. Hiệu suất chuyển đổi có thể được cải thiện bằng cách tối ưu hóa thời gian lai hoặc nồng độ Cdot trong dung dịch sẽ được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo

trong tương lai gần.

4. Vật liệu CE CNT/Ru được chế tạo thành công bằng công nghệ plasma khô trong khí quyển. RuNP có kích thước từ 2 đến 8nm dễ dàng cố định trên bề mặt CNT. Hoạt tính điện xúc tác của CNT/Ru tốt hơn so với điện cực RGO/Ru. Giá trị JSC của tế bào có điện cực CNT/Ru cao hơn giá trị của điện cực RGO/Ru vì các electron truyền qua giao diện CE / chất điện phân của CNT/Ru nhanh hơn so với RGO/Ru. Các phép đo EIS chỉ ra rằng giá trị Rct của tế bào có CNT/Ru thấp hơn giá trị của điện cực RGO/Ru.

5. Năng lượng bức xạ mặt trời đến mặt đất chủ yếu là bức xạ sóng ngắn với bước sóng từ 300nm-3000nm. DSSC chế tạo được có chất nhạy quang là N719 có khả năng hấp thụ tốt ánh sáng có bước sóng từ 300 đến 800nm, cho thấy DSSC chế tạo được hoàn toàn phù hợp với điều kiện bức xạ tại Việt Nam. Bản đồ phân bố bức xạ mặt trời trên đất liền tại Việt Nam cho thấy các khu vực có tiềm năng phát triển điện mặt trời cao nhất là khu vực phía Nam, khu vực Tây Bắc; tiếp theo là ở Đông Bắc, Đồng Bằng Bắc Bộ và Bắc Trung Bộ. Khu vực phía Nam có lượng bức xạ mặt trời đến mặt đất đồng đều hơn qua các tháng trong năm, trong khi đó khu vực phía Bắc có ảnh hưởng rõ rệt của mùa đông lạnh, năng lượng bức xạ mặt trời giảm rõ rệt vào tháng 12 đến tháng 2. Biến đổi khí hậu có ảnh hưởng tới năng lượng bức xạ mặt trời tới mặt đất, do đó khi ứng dụng DSSC tại Việt Nam cần nghiên cứu đến sự ảnh hưởng này.

6. Nguồn nguyên liệu Ni, W có trữ lượng khai thác tương đối lớn tại Việt Nam, ước tính mục tiêu tới năm 2030 khai thác 5.115.000 tấn quặng nguyên khai Tungsten/năm và 7.200.000 tấn quặng Nikel/năm. CNT đã được chế tạo thành công tại một số Viện nghiên cứu tại Việt Nam. Các nhóm tác giả ở Việt Nam đã nghiên cứu và chế tạo thành công chấm lượng tử carbon (CDs) với quy trình và nguyên liệu đơn giản. Với nguồn nguyên liệu phong phú, quy trình chế tạo đơn giản, thiết bị sẵn có tại Việt Nam, DSSC với điện cực đối NiO/Pt, WO₃/Pt, NiO/Cdot, CNT/Ru có tiềm năng để phát triển ứng dụng tại Việt Nam.

KHUYẾN NGHỊ

Hiệu suất chuyển đổi của thiết bị chế tạo được có thể được cải thiện bằng cách tối ưu hóa thời gian lai hoặc nồng độ (Pt, Cdot, Ru) trong dung dịch hoặc nghiên cứu chất nhạy quang phù hợp với điều kiện bức xạ của từng khu vực tại Việt Nam sẽ được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

DANH MỤC CÔNG BỐ KHOA HỌC LIÊN QUAN

1. Dao, Van-Duong; **Dang, Hai-Linh Thi**; Vu, Ngoc Hung; Vu, Hong Ha Thi; Hoa, Nguyen Duc; Van Hieu, Nguyen; Tuan, Pham Anh; *Nanoporous NiO nanosheets-based nanohybrid catalyst for efficient reduction of triiodide ions*, Solar Energy, 197, 546-552, 2020, Elsevier. **IF:4.608**
 2. **Dang, Hai Linh Thi**; Dao, Van-Duong; Vu, Ngoc Hung; Vu, Hong Ha Thi; Anh, Tran Nam; Huyen, Nguyen Thi Khanh; Hoang, Xuan-Co; Hanh, Nguyen Thi; Tuan, Pham Anh; *Micro-wheels composed of self-assembled tungsten oxide nanorods supported platinum counter electrode for highly efficient liquid-junction photovoltaic devices*, Solar Energy, 214, 214-219, 2021, Elsevier. **IF: 4.608**
 3. **Dang, Hai-Linh Thi**; Tran, Nam Anh; Dao, Van-Duong; Vu, Ngoc Hung; Quang, Dang Viet; Vu, Hong Ha Thi; Nguyen, Thi Hanh; Pham, Thanh-Dong; Hoang, Xuan-Co; Nguyen, Hien Thi; *Carbon nanotubes-ruthenium as an outstanding catalyst for triiodide ions reduction*, Synthetic Metals, 260, 116299, 2020, Elsevier. **IF: 2.870**
 4. **Dang, Hai-Linh Thi**; Dao, Van-Duong; Vu, Ngoc Hung; Quang, Dang Viet; Vu, Hong Ha Thi; Nguyen, Thi Hanh; Mohamed, Ibrahim MA; Hoang, Xuan-Co; Vu, Doan Anh; Tuan, Pham Anh; *Balance between the explored Pt counter electrode in an electrolyte medium and the photoanode for highly efficient liquid-junction photovoltaic devices*, Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 5, 2, 180-184, 2020, Elsevier. **IF:3.783**
- * **Danh mục bài báo công bố trên tạp chí chuyên ngành**
5. **Đặng Thị Hải Linh**, Hoàng Xuân Cơ, Trần Văn Quy, Đào Văn Dương, Tổng quan về điện mặt trời và khả năng ứng dụng DSSC tại Việt Nam, Tạp chí Môi trường: Kết quả nghiên cứu trong lĩnh vực công nghệ môi trường xanh, 123-128, 2021.