

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Lê Thị Quỳnh Xuân

**NGHIÊN CỨU CÔNG NGHỆ PLASMA LẠNH ỨNG DỤNG
TRONG TỔNG HỢP VẬT LIỆU KIM LOẠI NANO, XỬ LÝ HẠT
GIÓNG VÀ CHẤT NHUỘM MÀU**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật liệu quang học, quang điện tử và quang tử

Mã số: 9.44.01.27

Hà Nội – 2025

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học:

1. TS. Đào Nguyên Thuận – Viện Khoa học vật liệu – Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam
2. TS. Nguyễn Văn Chúc – Viện Khoa học vật liệu – Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi giờ, ngày tháng năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

1

Mở đầu

Công nghệ plasma lạnh đang thu hút sự quan tâm nhờ khả năng ứng dụng rộng trong nông nghiệp, y học và xử lý môi trường, đặc biệt với vật liệu nhạy nhiệt và chất ô nhiễm phức tạp. Mặc dù còn hạn chế tại Việt Nam, plasma lạnh cho thấy tiềm năng lớn trong kích thích nảy mầm và xử lý nước thải.

Luận án tập trung nghiên cứu plasma lạnh để tổng hợp hạt nano vàng (chương 3), xử lý bề mặt vật liệu (chương 4), và ứng dụng trong nông nghiệp và xử lý chất nhuộm (chương 5), nhằm nâng cao hiệu quả sản xuất và bảo vệ môi trường. Phương pháp được lựa chọn nhờ tính hiệu quả, tiết kiệm năng lượng và thân thiện sinh thái.

Mục tiêu nghiên cứu của luận án:

- Xây dựng được hệ phát tia plasma lạnh (plasma jet) với các thông số vận hành như điện áp, tần số, khoảng cách chiếu và tốc độ dòng khí để làm phương tiện nghiên cứu cho các ứng dụng tiếp theo.
- Nghiên cứu ứng dụng công nghệ plasma lạnh để chế tạo được các hạt nano vàng có độ đồng nhất cao với đường kính trung bình 45 nm, độ tinh khiết cao và khả năng ổn định trong dung dịch tốt trong thời gian dài mà không cần dùng tới chất hóa chất khử hay chất bảo vệ bề mặt. Phương pháp chế tạo cần phải được đánh giá, tối ưu và có độ lặp lại cao.
- Nghiên cứu chế tạo được đế SERS có độ nhạy cao, độ ổn định và lặp lại cao dựa trên tiền xử lý đế bằng công nghệ plasma lạnh. Phương pháp chế tạo cần phải được đánh giá, tối ưu và có độ lặp lại cao.
- Nghiên cứu kích thích được hạt giống (hạt đỗ xanh) nảy mầm nhanh và hiệu quả hơn bằng phương pháp xử lý plasma lạnh. Phương pháp xử lý cần phải được đánh giá, tối ưu và có độ lặp lại cao.
- Nghiên cứu xử lý được chất màu có trong nước thải dư thừa (của các nhà máy nhuộm) bằng công nghệ plasma lạnh. Phương pháp xử lý cần phải được đánh giá, tối ưu.

Đối tượng nghiên cứu:

- Các hạt nano vàng có độ đồng nhất cao với đường kính trung bình 45 nm (đỉnh hấp thụ ở gần 532 nm), độ tinh khiết cao và khả năng ổn định trong dung dịch tốt trong thời gian dài. Các hạt nano vàng này có thể phù hợp ứng dụng làm cảm biến dựa trên hiệu ứng SERS, phù hợp với laser kích thích 532 nm.

- Các đế SERS chế tạo từ các hạt nano kim loại vàng có độ nhạy cao, độ ổn định và lặp lại cao.

- Các hạt đỗ xanh có khả năng nảy mầm.

- Chất màu Methyl blue có trong nước thải dư thừa (của các nhà máy nhuộm).

Phương pháp nghiên cứu

Luận án chủ yếu sử dụng phương pháp thực nghiệm kết hợp đo đạc, tính toán và phân tích cơ chế tương tác của tia plasma lạnh. Hệ thống phát tia plasma jet được chế tạo để xử lý các mẫu nghiên cứu. Các phương pháp phân tích hiện đại như UV-VIS, OES, Raman, SEM, DLS, Zeta, XRD, NMR, LC-MS được dùng để đánh giá đặc điểm của hạt nano vàng và biến đổi hormone trong hạt giống sau xử lý. Ngoài ra, các kỹ thuật chiết tách GA3, đo COD và đánh giá khả năng nảy mầm, sinh trưởng được sử dụng để xác định hiệu quả xử lý của plasma lạnh đối với hạt giống và chất nhuộm Methyl blue.

Bố cục và nội dung của luận án

Luận án gồm 5 chương chính, ngoài phần mở đầu và kết luận.

- Chương 1: Tổng quan về công nghệ plasma lạnh và các thông số vật lý.
- Chương 2: Hóa chất, thiết bị và phương pháp nghiên cứu.
- Chương 3–5: Trình bày kết quả thực nghiệm về tổng hợp hạt nano vàng, xử lý đế SERS, kích thích nảy mầm và phân hủy chất màu bằng plasma lạnh. Cuối luận án là danh mục công trình công bố và tài liệu tham khảo.

Các kết quả mới của luận án

Luận án được thực hiện chủ yếu tại Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, và đã đạt được các kết quả mới như sau:

1-Phát triển hệ plasma jet:Tạo được hệ thống phát tia plasma lạnh với điện áp 2–6 kV, tần số 100 Hz – 80 kHz, khoảng cách chiếu 0.2–2 cm, tốc độ khí 3.4–10 scm. Hệ này phục vụ nghiên cứu ứng dụng tiếp theo.

2-Tổng hợp hạt nano vàng (AuNPs):Đường kính trung bình ~45 nm, độ tinh khiết cao, ổn định trên 6 tháng không cần chất bảo vệ.Điều kiện tối ưu: plasma 5 phút, khoảng cách 0.4 cm, lưu lượng khí 1 L/phút, tần số 40 kHz, nồng độ HAuCl_4 0.2 mM, thể tích 10 ml.Uưu điểm: ổn định, lặp lại cao, nhanh, thân thiện môi trường.

3-Chế tạo đế SERS hiệu quả:Xử lý plasma và laser giúp đế kính giảm độ nhám, tăng bám AuNPs.Độ nhạy tăng 11 lần, tái sử dụng 10 chu kỳ.Hệ số tăng cường EF $\sim 3 \times 10^8$, LOD $\sim 10^{-12}$ M với R6G.Phát hiện amoxicillin trong khoảng 10^{-3} – 10^{-9} M, LOD 9×10^{-10} M, $R^2 = 0.98$.

4-Ứng dụng plasma trong kích thích nảy mầm:Tăng hệ số nảy mầm gấp 11 lần sau 12 giờ, chiều dài cây mầm tăng gần 3 lần sau 96 giờ.Năng lượng tối ưu: 0.08 Wh/hạt, NO: 20–95 ppm.Plasma giúp tạo vết nứt nhỏ, tăng hấp thu nước.NO điều hòa GA3 (gibberellic acid), kích thích tăng trưởng.

5-Xử lý nước thải chứa Methyl Blue:Phân hủy hoàn toàn 20 ml dung dịch 30 ppm sau 55 phút plasma. Điều kiện: $U = 12\text{V DC}$, $f = 33\text{ kHz}$, khí 1 L/phút, khoảng cách 0.5 cm. COD sau xử lý: 42.52 mg/L (trong giới hạn QCVN 13-MT:2015/BTNMT).

CHƯƠNG I:

TỔNG QUAN VỀ CÔNG NGHỆ PLASMA LẠNH

Chương này giới thiệu tổng quan về công nghệ plasma, phân loại thành plasma nóng và lạnh, và các thông số vật lý quan trọng như độ ion hóa, nhiệt độ plasma. Nội dung cũng đề cập cấu hình phát plasma lạnh, sự hình thành gốc phản ứng, và ứng dụng plasma lạnh trong vật liệu, nông nghiệp và môi trường, kèm ví dụ thực nghiệm minh họa.

CHƯƠNG II:

CÁC PHƯƠNG PHÁP VÀ KỸ THUẬT NGHIÊN CỨU

Chương này trình bày các phương pháp và kỹ thuật nghiên cứu được sử dụng trong toàn bộ luận án, bao gồm hệ thống phát plasma lạnh, thiết bị quang phổ và các

phương pháp phân tích hiện đại. Nguyên vật liệu và thiết bị: Liệt kê các hóa chất tinh khiết và thiết bị tiên tiến như UV-VIS, OES, SEM, DLS, Zeta... Phương pháp nghiên cứu: Mô tả chi tiết các kỹ thuật phân tích (OES, Raman, SEM, XRD, NMR, LC-MS...), kỹ thuật chiết hormone, đo COD và đánh giá nẩy mầm. Mỗi phương pháp đều nêu rõ nguyên lý, thông số sử dụng, đảm bảo độ tin cậy và tính lặp lại cho toàn bộ dữ liệu trong luận án.

CHƯƠNG III:

CÔNG NGHỆ PLASMA LẠNH ỨNG DỤNG TRONG TỔNG HỢP CÁC HẠT NANO KIM LOẠI

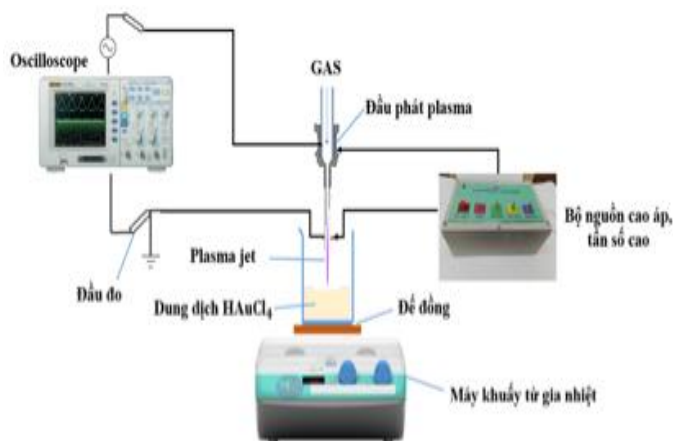
3.1. Khái niệm và tính chất của vật liệu nano kim loại

3.2. Các phương pháp chế tạo hạt nano vàng

3.3. Nghiên cứu chế tạo hạt nano vàng bằng phương pháp plasma jet

3.3.1. Sơ đồ tổng quát các bước chế tạo

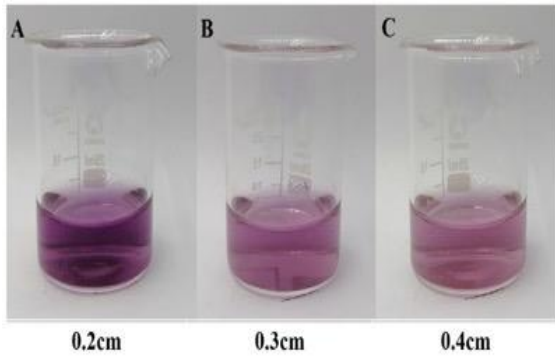
Nhóm nghiên cứu đã thảo luận bước đầu đưa ra trình tự tiến hành các bước cơ bản của một thí nghiệm chế tạo hạt nano Au bằng phương pháp plasma jet (Hình 3.1) và chi tiết các bước được mô tả như hình 3.1. Hình 3.2 mô tả hệ plasma jet được sử dụng để tổng hợp AuNPs.



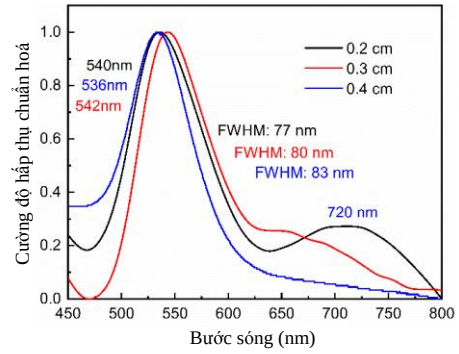
Hình 3.1. Sơ đồ thí nghiệm tổng hợp hạt nano Au bằng hệ plasma jet.

3.3.2. Ảnh hưởng của khoảng cách từ đầu phát plasma đến bề mặt dung dịch

Độ bán rộng (FWHM) của mẫu có khoảng cách $d = 0,4$ cm cho giá trị hẹp nhất, và giá trị này tỷ lệ nghịch khoảng cách giữa đầu phát plasma và bề mặt dung dịch. Mẫu 0,3 cm có một số hạt có kích thước lớn hấp thụ tại các bước sóng từ 620 nm đến 850 nm nhưng đỉnh phổ hấp thụ chính vẫn hẹp.



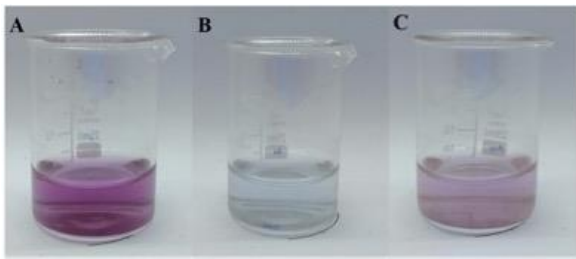
Hình 3.2. Ảnh chụp các mẫu AuNPs với các khoảng cách d khác nhau: (A) 0,2 cm, (B) 0,3 cm và (C) 0,4 cm.



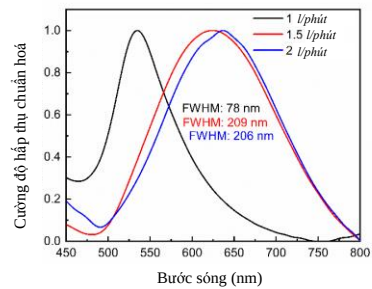
Hình 3.3. Phổ hấp thụ đã được chuẩn hóa của các mẫu AuNPs với các khoảng cách d khác nhau.

3.3.3. Ảnh hưởng của khoảng cách từ đầu phát plasma đến bề mặt dung dịch

Hình 3.6 cho thấy phổ hấp thụ chuẩn hóa của AuNPs tổng hợp với tốc độ dòng khí khác nhau được kiểm soát chính xác bởi van điều khiển lưu lượng khí.

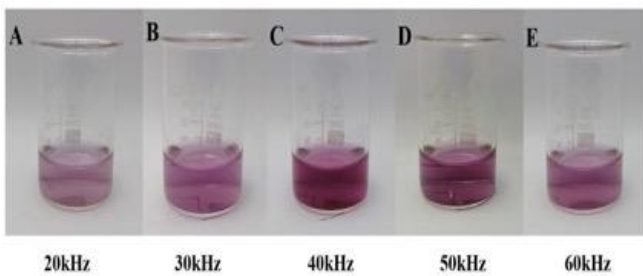


Hình 3.4. Mẫu AuNPs với các lưu lượng khí khác nhau.

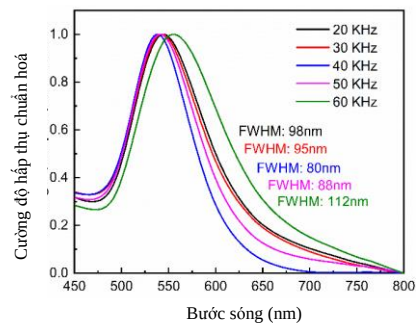


Hình 3.6. Phổ UV-Vis của các mẫu AuNPs với các lưu lượng khí khác nhau

3.3.4. Ảnh hưởng tần số nguồn phát plasma



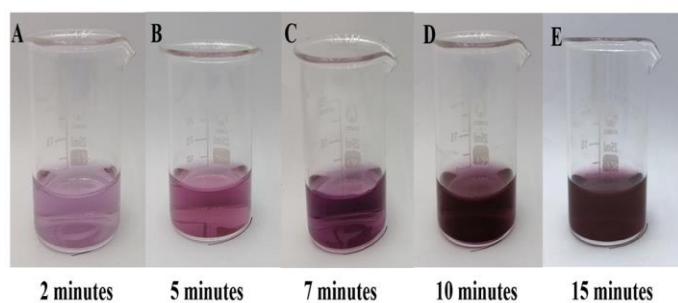
Hình 3.7. Ảnh chụp các mẫu AuNPs với các tần số plasma khác nhau



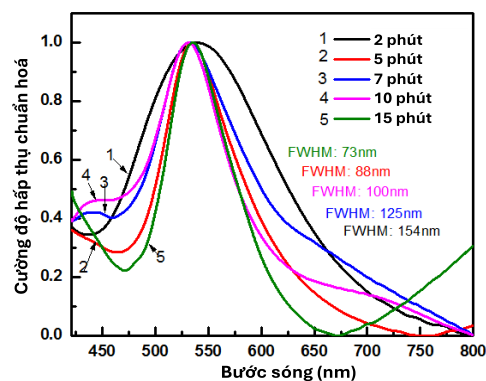
Hình 3.8. Phổ hấp thụ đã được chuẩn hóa của các mẫu AuNPs với các tần số plasma

Tóm lại, để tổng hợp AuNPs có kích thước đồng đều nhất, chúng tôi đã thu được các thông số tối ưu như sau: khoảng cách từ tia plasma đến chất lỏng bề mặt là 0,4 cm, lưu lượng khí là 1 l/phút và tần số cung cấp điện plasma là 40 kHz.

3.3.5. Ảnh hưởng của thời gian tổng hợp



Hình 3.9. Các mẫu AuNps được tổng hợp bằng Plasma jet với thời gian khác nhau: (A) 2 phút; (B) 5 phút; (C) 7 phút; (D) 10 phút và (E) 15 phút.

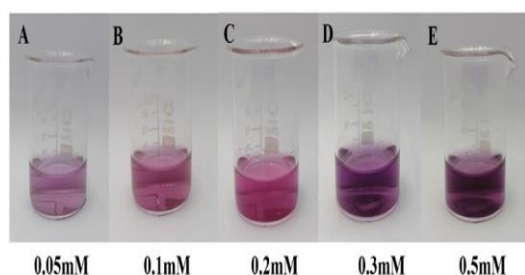


Hình 3.10. Phổ hấp thụ chuẩn hóa của các mẫu AuNps tổng hợp bằng plasma jet với thời gian khác nhau: 2 phút; 5 phút; 7 phút; 10 phút và 15 phút.

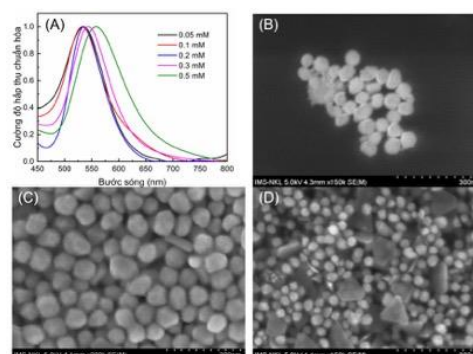
Sau khi tiến hành khảo sát ảnh hưởng của yếu tố thời gian, chúng tôi đã đưa ra kết luận với thời gian tổng hợp mẫu 5 phút phù hợp nhất để tiến hành tổng hợp các mẫu.

3.3.6. Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch tiền chất HAuCl_4

Như vậy, từ các kết quả phân tích phổ hấp thụ, nồng độ tiền chất 0,2 mM được xác định là tối ưu để tổng hợp Au với kích thước đồng đều và số lượng hạt cao.

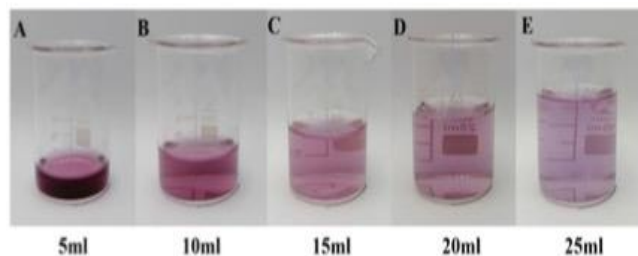


Hình 3.11. Ảnh chụp các mẫu AuNPs với các nồng độ tiền chất khác nhau.

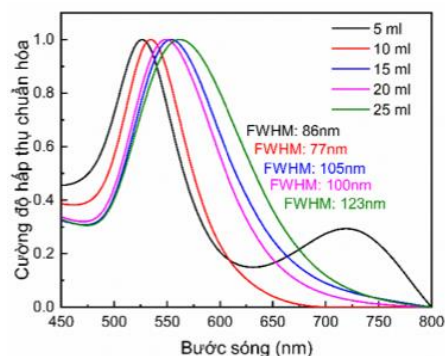


Hình 3.12. (A) Phổ hấp thụ đã được chuẩn hóa, (B)-(D) Ảnh SEM của các mẫu AuNPs với nồng độ tiền chất (B) 0,05 mM, (C) 0,2 mM và (D) 0,5 mM.

3.3.7. Ảnh hưởng của thể tích dung dịch tiền chất HAuCl_4



Hình 3.13. Ảnh chụp AuNPs với các thể tích dung dịch tiền chất khác nhau.



Hình 3.14. Phổ hấp thụ đã được chuẩn hóa của các mẫu AuNPs với các thể tích dung dịch tiền chất khác nhau.

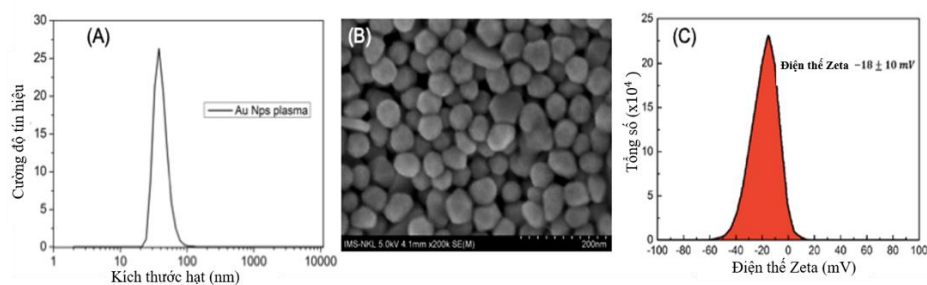
Sau khi thí nghiệm kết thúc, tất cả các mẫu đều được phân tích phổ hấp thụ (Hình 3.14) thể tích 10 ml được xác định là phù hợp nhất để tổng hợp AuNPs trong dung dịch.

3.4. Đặc tính và cơ chế phản ứng tổng hợp AuNPs bằng tia plasma lạnh

3.4.1. Điều kiện tối ưu để tổng hợp dung dịch AuNPs bằng plasma jet

Chúng tôi đã đưa ra được các thông số tối ưu như sau: Khoảng cách từ đầu phát plasma đến chất lỏng trên bề mặt: 0,4 cm; Tốc độ dòng khí: 1 l/phút; Tần số của nguồn cung cấp năng lượng để phát plasma: 40 kHz; Thể tích và nồng độ của dung dịch HAuCl₄ lần lượt là 10 ml và 0,2 mM; thời gian chiếu plasma: 5 phút.

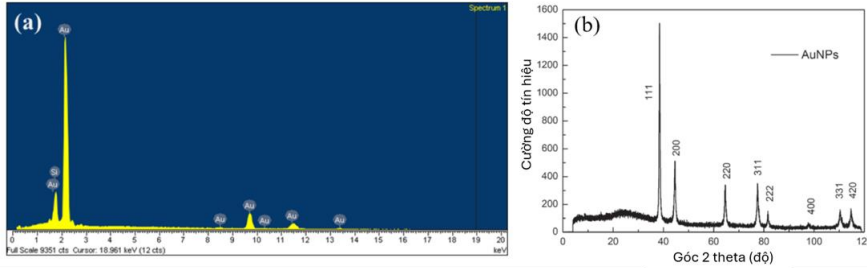
3.4.2. Đánh giá đặc tính của các hạt nano vàng được



Hình 3.15. (A) Phân bố kích thước hạt theo phương pháp DLS, (B) Ảnh SEM và (C) thế zeta của AuNPs được tổng hợp với điều kiện tối ưu

Đường kính trung bình khoảng 45 nm, phù hợp với kết quả đo bằng phương pháp DLS dao động từ 20 - 110 nm, với đường kính trung bình là 45 ± 15 nm.

Hình 3.16 trình bày giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) và phổ EDX, khẳng định cấu trúc tinh thể của các hạt AuNPs chế tạo được.

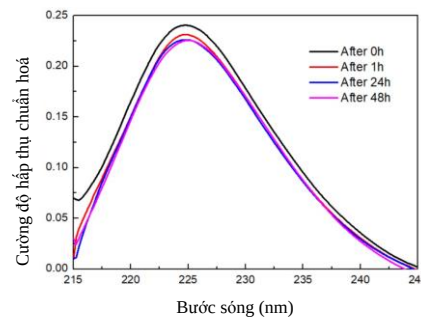


Hình 3.16. (A) Phổ EDX và (B) phổ XRD của AuNPs. Điều này chứng tỏ các AuNPs tổng hợp có độ tinh khiết rất cao.

Phương pháp tổng hợp bằng tia plasma thể hiện ưu điểm vượt trội khi không cần sử dụng chất khử, chất xúc tác hay chất hoạt động bề mặt, đồng thời cho phép tạo ra các hạt AuNPs đồng nhất, ổn định và tinh khiết.

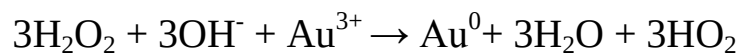
3.4.3. Tìm hiểu cơ chế phản ứng tổng hợp AuNPs bằng tia plasma lạnh

Trong hệ plasma trong chất lỏng, nơi các điện cực được nhúng trực tiếp trong dung dịch, các gốc hydro (H) được sản sinh dồi dào thông qua quá trình điện phân nước, đóng vai trò quan trọng trong việc khử ion vàng.

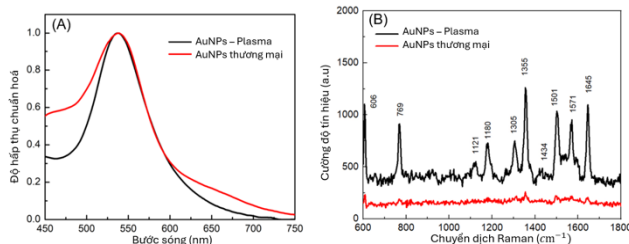


Hình 3.17. Sự thay đổi của phổ hấp thụ của H_2O_2 trong nước được xử lý plasma trong 5 phút sau 0-48 giờ.

Trong phương pháp Plasma tổng hợp AuNPs, phản ứng khử Au^{3+} chủ yếu dựa vào H_2O_2 và OH^- , như được mô tả trong phương trình sau:



3.5. Ứng dụng hạt nano vàng đã chế tạo để phát triển để SERS có độ nhạy cao



Hình 3.18. So sánh (A) Phổ hấp thụ chuẩn hoá và (B) Phổ Raman của AuNPs được tổng hợp bằng phương pháp plasma và AuNPs thương mại.

Nhóm nghiên cứu đã đo phổ Raman của dung dịch R6G nồng độ 10 ppb trên các đế SERS được tạo ra từ (Hình 3.18B).

Cường độ SERS của các đế sử dụng AuNPs tổng hợp bằng plasma cao hơn đáng kể so với các đế từ AuNPs thương mại. Chúng tôi cũng nhấn mạnh rằng cường độ SERS phụ thuộc lớn vào các điều kiện thí nghiệm. Do đó, tín hiệu SERS thấp hơn được quan sát với AuNPs thương mại trong nghiên cứu này không thể được so sánh trực tiếp với các kết quả từ các nghiên cứu khác.

3.6. Kết luận chương 3

Chương này trình bày tổng quan công nghệ plasma lạnh và ứng dụng trong tổng hợp hạt nano kim loại, đặc biệt là nano vàng (AuNPs). Nhóm nghiên cứu đã tối ưu quá trình tổng hợp AuNPs bằng plasma jet mà không cần chất khử hay chất bảo vệ, đạt được hạt kích thước trung bình 45 nm, đồng đều và ổn định. Các thông số tối ưu gồm: khoảng cách plasma 0,4 cm, khí 1 L/phút, tần số 40 kHz, nồng độ HAuCl_4 0,2 mM, thời gian 5 phút. AuNPs tạo ra có hiệu ứng SERS vượt trội so với sản phẩm thương mại, mở ra tiềm năng cho cảm biến sinh học, quang học và xúc tác. Các kết quả của nghiên cứu trong chương này này đã được công bố trên tạp chí Nanotechnology (IF 2.9).

CHƯƠNG IV:

CÔNG NGHỆ PLASMA LẠNH ỨNG DỤNG TRONG CHẾ TẠO ĐẾ SERS ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN CẢM BIẾN HÓA SINH

Mục tiêu chính của nội dung nghiên cứu này là nghiên cứu ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý bề mặt vật liệu ứng dụng trong phát triển cảm biến sinh hóa dựa trên hiệu ứng SERS.

4.1. Nghiên cứu ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý bề mặt vật liệu polycarbonat và SiO_2

4.1.1. Quy trình ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý bề mặt vật liệu

4.1.1.1. Trên vật liệu polycarbonat (PC)

Trong nội dung nghiên cứu này, chúng tôi chủ yếu nghiên cứu và tối ưu hóa hiệu ứng tăng cường năng lượng bề mặt của PC bằng cách xử lý plasma, cho phép tăng cường liên kết của các lớp phủ khác nhau trên bề mặt PC. Ảnh hưởng của việc xử lý bề mặt bằng plasma trên các mẫu PC được tính toán theo phương trình sau:

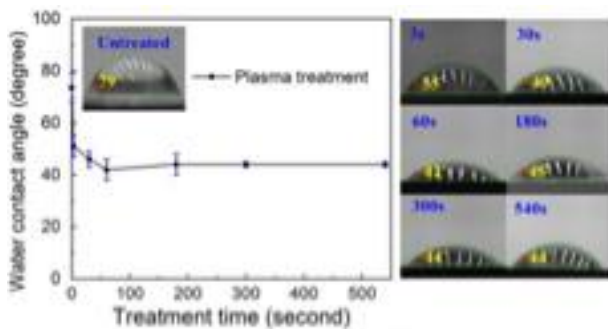
$$H = \frac{WAC_{\text{chưa xử lý}} - WAC_{\text{đã xử lý}}}{WAC_{\text{chưa xử lý}}}$$

4.1.1.2. Trên vật liệu SiO₂

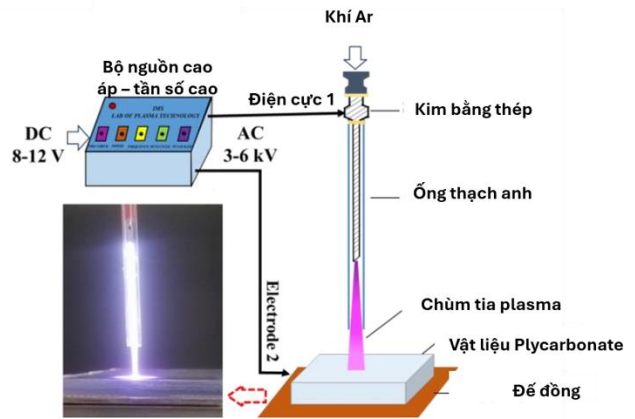
Trong nội dung nghiên cứu này, chúng tôi đã sử dụng công nghệ plasma lạnh lên bề mặt của đế kính thủy tinh (SiO₂) bằng cách chiếu một chùm tia plasma jet lên trên toàn bộ bề mặt được giới hạn bởi băng dính polyimide.

4.1.2. Khảo sát, đánh giá hiệu quả và thời gian tồn tại của hiệu ứng xử lý bề mặt vật liệu bằng phương pháp plasma jet

4.1.1.1. Trên vật liệu polycarbonat



Hình 4.2. (Trái): sự phụ thuộc của góc tiếp xúc nước (WCA) trên bề mặt PC vào thời gian xử lý plasma; (phải): ảnh chụp các giọt nước trên bề mặt PC trong thời gian xử lý plasma khác nhau

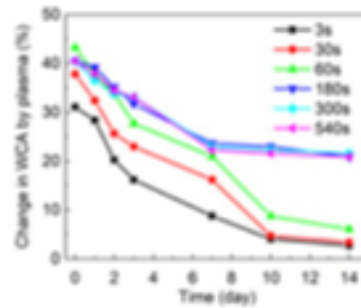


Hình 4.1. Sơ đồ cấu tạo hệ plasma jet để xử lý bề mặt PC và ảnh chụp trong quá trình xử lý plasma

Năng lượng bề mặt cao hơn do xử lý plasma tạo ra dẫn đến tỷ lệ phần trăm thay đổi WCA cao hơn. Do đó, việc theo dõi tỷ lệ phần trăm thay đổi WCA theo thời gian (0 đến 14 ngày) cho phép nghiên cứu tác động lâu dài của xử lý plasma (Hình 4.2).

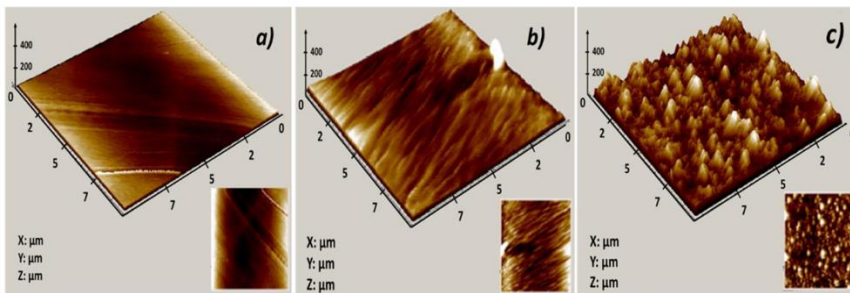
Kết quả cho thấy sau 14 ngày, tỷ lệ phần trăm thay đổi WCA của các mẫu được xử lý trong 3 giây, 30 giây và 60 giây giảm nhanh từ khoảng 40% xuống dưới 10% (hình 4.3).

Hiệu ứng được thể hiện trong hình 4.3, cho thấy rằng plasma gây ra cả biến đổi hóa học (năng lượng bề mặt – liên kết hóa học) và biến đổi vật lý (hình thành các vết nứt do chùm tia plasma tác động lên trên bề mặt PC).



Hình 4.3. Hiệu ứng kéo dài thu được trong nhiều khoảng thời gian chiếu plasma khác nhau (3 giây, 30 giây, 60 giây, 180 giây, 300 giây, 540 giây) trên bề mặt PC từ ngay lập tức đến sau 140 ngày

Đặc biệt, khi thời gian xử lý vượt quá 180 giây, sự thay đổi vật lý vẫn còn duy trì ở mức 20% ngay cả sau 14 ngày.



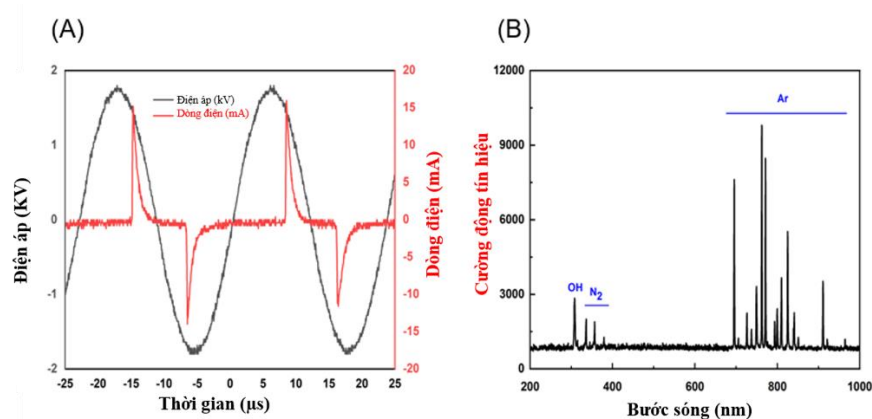
Sự biến đổi bề mặt PC do plasma được quan sát rõ ràng thông qua hình ảnh hiển vi lực nguyên tử (AFM) trong Hình 4.4.

Sự thay đổi hóa học của bề mặt PC có thể giải thích thông qua phân tích tỷ lệ liên kết hóa học.

Hình 4.4. Hình ảnh AFM của bề mặt PC: a) không xử lý plasma, b) xử lý plasma trong 60 giây và c) xử lý plasma trong 540 giây.

Tuy nhiên, nếu thời gian chiếu xạ plasma quá dài, nó có thể dẫn đến quá trình thay đổi tỷ lệ O:C bị bão hòa, khiến góc tiếp xúc của PC chỉ giảm xuống một giá trị nhất định (42°C trong thí nghiệm của chúng tôi).

4.1.1.2. Trên vật liệu SiO₂



Hình 4.5. (A) Đồ thị I-V và (B) Phổ phát xạ quang học của hệ plasma jet.

Tương tự vật liệu PC, chúng tôi chủ yếu thay đổi thời gian chiếu plasma nhằm khảo sát ảnh hưởng của plasma tới những thay đổi trên bề mặt để kính thông qua sự thay đổi trên cấu trúc bề mặt và theo dõi sự thay đổi trong góc tiếp xúc nước (WCA).

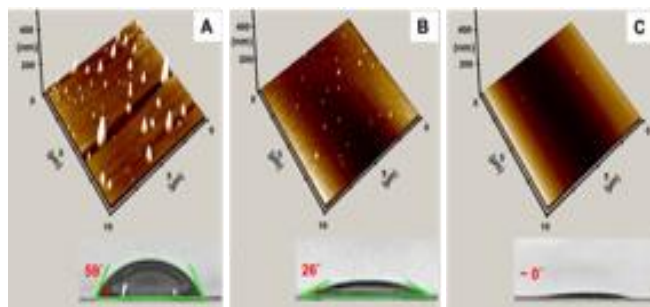
Kết quả cho thấy có hai tác động rõ rệt trên bề mặt kính khi được xử lý bằng plasma: (1) giảm độ nhám của bề mặt kính (từ 200 nm trước khi xử lý plasma thành bề mặt gần như đồng nhất lý tưởng sau 30 giây xử lý plasma); và (2) tăng cường năng lượng bề mặt bằng cách giảm góc tiếp xúc giọt nước từ 59° xuống 26° và xuống gần 0° sau thời gian xử lý plasma lần lượt là 0, 10 và 30 giây.

Hai tác động này giúp cải thiện chất lượng bề mặt kính để lắng đọng AuNPs tốt hơn trên bề mặt này trong bước lắng đọng AuNPs để tạo ra đế SERS.

4.2. Nghiên cứu ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong phát triển cảm biến hóa sinh dựa trên hiệu ứng SERS

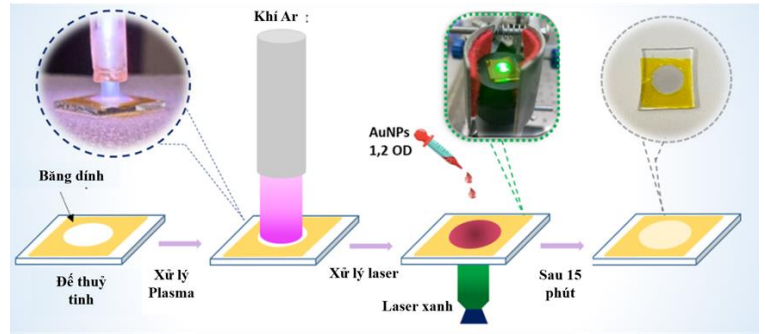
Trong nội dung nghiên cứu này, chúng tôi và nhóm nghiên cứu đã kết hợp phương pháp plasma lạnh và laser để phát triển một phương pháp đơn giản, chi phí thấp nhưng hiệu quả để chế tạo đế SERS nhanh chóng với hiệu suất cao.

4.2.1. Các bước xử lý đế SERS bằng công nghệ plasma jet



Hình 4.5. Ảnh AFM của bề mặt kính và ảnh góc tiếp xúc nước (WCA) (dưới cùng bên phải: (C) trước, (D) sau 10 giây và (E) sau 30 giây xử lý plasma.

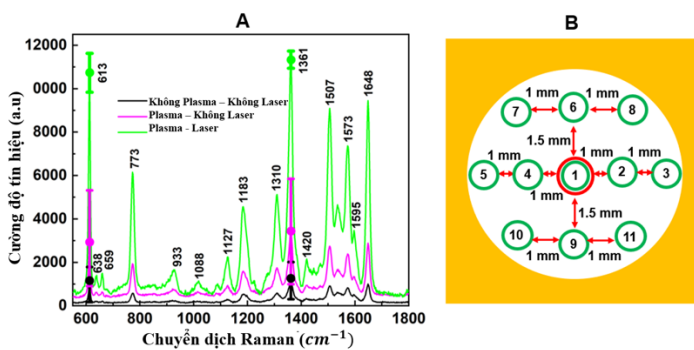
Hình 4.7 mô tả quy trình chế tạo đế SERS bằng phương pháp kết hợp giữa plasma lạnh và laser từ dung dịch AuNPs.



Hình 4.6. Quy trình chế tạo đế SERS kết hợp tiền xử lý plasma và xử lý laser.

4.2.2. Khảo sát và đánh giá hiệu quả của đế SERS chế tạo được

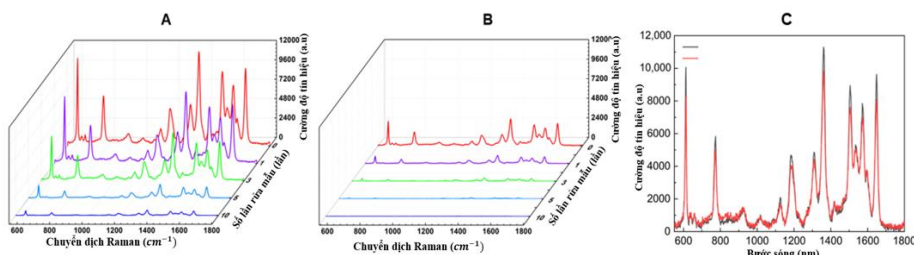
4.2.2.1. Tăng cường cường độ và độ đồng đều của tín hiệu Raman trên một diện tích lớn



Hình 4.7. (A) Phổ Raman của R6G được đo trên đế SERS được chế tạo mà không qua xử lý plasma hoặc laser (đường màu đen), chỉ được tiền xử lý bằng plasma lạnh (đường màu tím) và được xử lý bằng cả plasma lạnh và laser (đường màu xanh). Mỗi phổ Raman là giá trị trung bình của 11 phép đo tại 11 điểm khác nhau phân bố trên toàn bộ bề mặt đế (B) và độ lệch của chúng được hiển thị bằng thanh lỗi trên các đỉnh đặc trưng tại 613 cm^{-1} và 1361 cm^{-1} .

chúng tôi đã so sánh phổ Raman của R6G trên các đế SERS khác nhau: những đế được chế tạo mà không qua bất kỳ phương pháp xử lý bề mặt nào (đường màu đen), đế được xử lý plasma nhưng không được chiếu laser (đường màu tím) và được xử lý bằng cả hai phương pháp laser và plasma (đường màu xanh lá cây). Chúng tôi đã chứng minh được rằng sự kết hợp giữa plasma và laser đã cải thiện chất lượng bề mặt và tạo ra sự phân bố đồng đều hơn của AuNPs trên đế, dẫn đến cường độ Raman được tăng cường và đế SERS đồng đều hơn, do đó, tín hiệu SERS thu được nhất quán hơn (hình 4.8).

4.2.2.2. Cải thiện khả năng tái sử dụng của đế SERS



Hình 4.8. Phổ Raman của R6G sau khi rửa đế 0, 1, 3, 5 và 10 lần để xử lý bằng plasma lạnh và laser (A) so với chỉ xử lý trước bằng plasma lạnh (B); (C) cường độ Raman của R6G trên đế SERS chế tạo được trước và sau 3 tháng ở nhiệt độ phòng.

Chúng tôi đã ghi lại phổ Raman của đế đã được làm sạch trước khi hấp phụ lại các chất phân tích và quá trình này được lặp lại trong 10 chu kỳ rửa và hấp phụ lại.

4.2.2.3. Hệ số tăng cường SERS (EF) và độ nhạy với R6G

Hệ số tăng cường (EF) được tính như

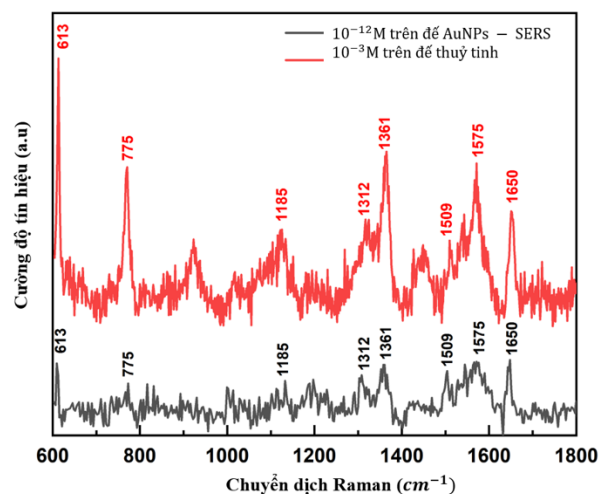
$$\text{sau: } EF_{SERS} = \frac{I_{SERS}}{I_R} \cdot \frac{C_R}{C_{SERS}}$$

trong đó C_R và C_{SERS} là nồng độ R6G tại đế thường (Raman bình thường) và phép đo SERS, và I_R và I_{SERS} lần lượt là cường độ đỉnh của chúng.

Sử dụng tín hiệu Raman của R6G ở 10^{-12} M trên đế SERS và 10^{-3} M trên đế đế kính (hình 4.10), chúng tôi đã tính toán được hệ số tăng cường:

$$\begin{aligned} EF_{SERS} &= \frac{I_{SERS}}{I_R} \cdot \frac{C_R}{C_{SERS}} = \frac{217}{667} \cdot \frac{10^{-3}}{10^{-12}} \\ &= 3,2 \cdot 10^8 \end{aligned}$$

Hơn nữa, chúng tôi quan sát thấy cường độ Raman của R6G trên đế SERS chế tạo vẫn ở mức 85% sau 3 tháng bảo quản ở nhiệt độ phòng (Hình 4.9C).



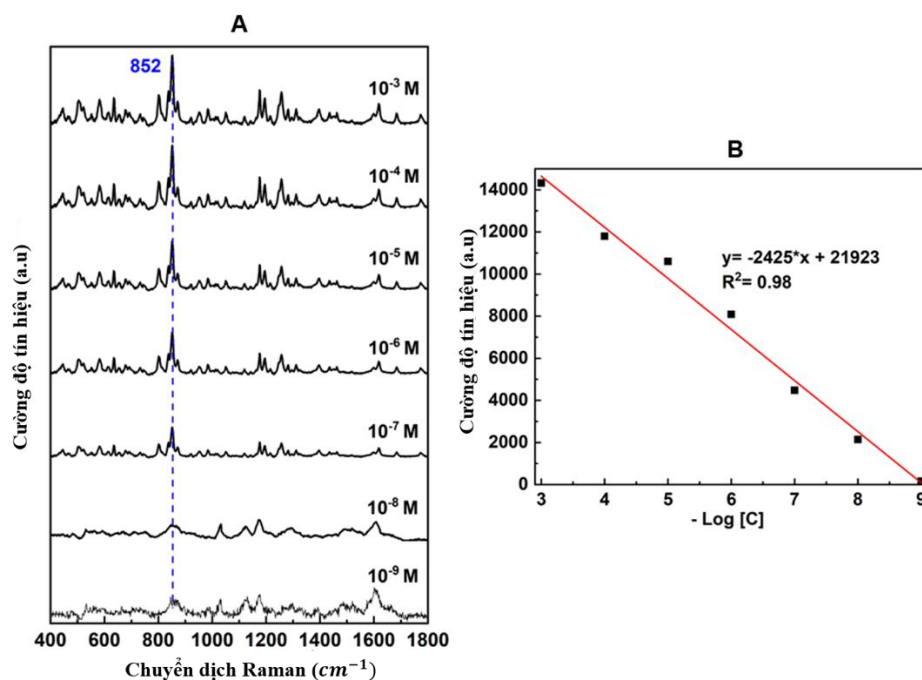
Hình 4.9. Phổ Raman của R6G sau khi rửa đế 0, 1, 3, 5 và 10 lần để xử lý bằng plasma lạnh và laser (A) so với chỉ xử lý trước bằng plasma lạnh (B); (C) cường độ Raman của R6G trên đế SERS chế tạo được trước và sau 3 tháng ở nhiệt độ phòng.

4.3. Thử nghiệm để SERS chế tạo được trong việc phát hiện kháng sinh

Amoxicillin với độ nhạy cao

Hình 4.11A cho thấy phổ SERS của amoxicillin được đo ở các nồng độ khác nhau từ 10^{-3} đến 10^{-9} M, cho thấy các đỉnh đặc trưng ở 1456 cm^{-1} , 1276 cm^{-1} và 852 cm^{-1} .

Với độ tin cậy cao, chỉ số R^2 là 0,98 (Hình 4.11)



Hình 4.10. Phổ SERS của Amoxicillin ở các nồng độ khác nhau (A) và sự phù hợp tuyến tính giữa nồng độ của nó và cường độ đỉnh ở 852 cm^{-1} (B) trên phạm vi nồng độ từ 10^{-3} đến 10^{-9} M.

Chúng tôi đã sử dụng để SERS chế tạo được để phát hiện amoxicillin. Sử dụng tín hiệu Raman của Amoxicillin ở 10^{-6} M trên để SERS và 1 M trên để để kính, chúng tôi đã tính toán được hệ số tăng cường và Giới hạn phát hiện (LOD) được xác định là $0,9 \times 10^{-9}$:

$$\begin{aligned}
 EF_{SERS} &= \frac{I_{SERS}}{I_R} \cdot \frac{C_R}{C_{SERS}} \\
 &= \frac{161}{1887} \cdot \frac{1}{10^{-9}} \\
 &= 8,5 \cdot 10^7
 \end{aligned}$$

4.4. Kết luận chương 4

Chương này trình bày ứng dụng plasma lạnh trong xử lý bề mặt vật liệu để phát triển để cảm biến SERS. Plasma lạnh giúp tăng năng lượng bề mặt, cải thiện tính ưa nước và cấu trúc bề mặt của vật liệu (PC, SiO_2), với thời gian xử lý tối ưu là 60 giây. Kết hợp xử lý plasma và laser tạo để SERS có độ nhạy cao ($EF \sim 3 \times 10^8$, LOD 10^{-12} M), phát hiện amoxicillin hiệu quả với LOD 9×10^{-10} M. Kết quả cho thấy plasma lạnh là công nghệ hiệu quả để cải thiện bề mặt vật liệu, mở ra tiềm năng lớn cho các cảm biến sinh hóa độ nhạy cao. Các kết quả nghiên cứu trong chương này

đã được công bố trên các tạp chí Nanomaterials (IF 4.4), Optical Materials (IF 3.8), và Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption.

CHƯƠNG V:

CÔNG NGHỆ PLASMA LẠNH ỨNG DỤNG TRONG KÍCH THÍCH HẠT GIỐNG NẤY MẦM VÀ XỬ LÝ CHẤT NHUỘM MÀU

5.1. Các thử nghiệm và các bước ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong kích thích hạt giống nảy mầm

5.1.1. Tác động của plasma lạnh lên bề mặt của hạt giống

Công nghệ plasma lạnh trong xử lý bề mặt hạt giống có tác động rõ rệt đến cả đặc tính bề mặt và thành phần bên trong của hạt.

5.1.2. Tác động của plasma lạnh lên sự nảy mầm của hạt giống

Tóm lại, xử lý plasma lạnh, đặc biệt ở liều thấp hoặc thời gian ngắn, có khả năng tăng tỷ lệ nảy mầm, cải thiện sức sống hạt và thúc đẩy sự phát triển của cây con. Tác động này chủ yếu do các thay đổi bề mặt hạt như tăng tính ưa nước và khắc bề mặt, kết hợp với sự kích thích của các enzyme chống oxy hoá.

5.1.3. Tác động của plasma lên sự phát triển của cây con

Sự phát triển ban đầu của cây con có mối liên hệ chặt chẽ với quá trình nảy mầm, và việc sử dụng plasma lạnh hoặc nước hoạt hóa plasma (PAW) đã được chứng minh là mang lại nhiều cải thiện đáng kể.

5.1.4. Các bước ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý hạt giống

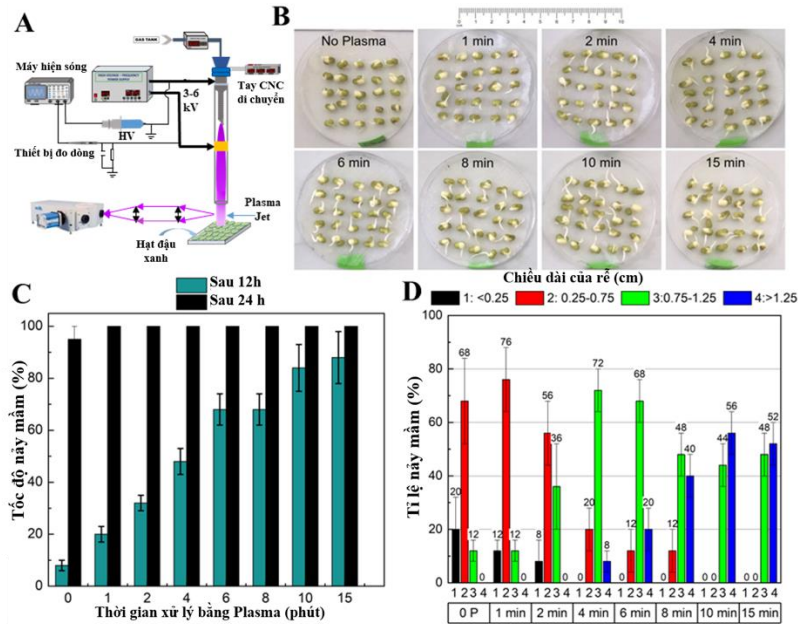
Bao gồm 7 bước chính. Trong quy trình xử lý hạt bằng plasma jet, đảm bảo mỗi bước được thực hiện một cách có hệ thống nhằm đạt hiệu quả tối ưu trong kích thích nảy mầm và tăng trưởng của hạt giống.

5.2. Khảo sát và đánh giá hiệu quả nảy mầm hạt giống sau khi xử lý plasma

Chúng tôi đã tiến hành khảo sát và nghiên cứu hiệu ứng kích thích hạt giống nảy mầm của hạt giá đỗ khi được xử lý bằng plasma lạnh.

5.2.1. Hệ số nảy mầm

Quá trình nảy mầm và phát triển của rễ hạt gạo được cải thiện đáng kể sau khi được xử lý bằng plasma lạnh (Hình 5.1B). Sau 12 tiếng ủ trên vải cotton, hệ số nảy mầm (được định nghĩa là tỷ lệ phần trăm số hạt nảy mầm trên tổng số hạt) tăng từ 8% đến 88% (tăng gấp 11 lần) khi các hạt được xử lý plasma trong 15 phút, so với nhóm hạt không xử lý plasma (Hình 5.1C).



Hình 5.1. (A) Sơ đồ hệ plasma jet xử lý hạt đỗ. (B) Ảnh chụp hạt sau 24h và (C) Hệ số nảy mầm với các thời gian. (D) Ảnh hưởng của thời gian xử lý plasma đến chiều dài rễ ở giai đoạn nảy mầm. Cột sai số được tính từ 5 lần đo khác nhau (tổng số 125 hạt với mỗi thời gian chiếu plasma).

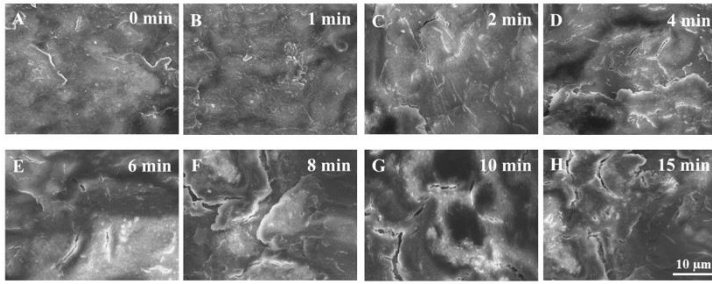
5.2.2. Chiều dài của rễ non ngay sau khi nảy mầm

Đáng chú ý, 60% hạt được xử lý plasma trong 10 phút đạt chiều dài rễ trên 1.25 cm (nhóm 4 – màu xanh nước biển) (Hình 5.1D). Từ kết quả thực nghiệm, thời gian chiếu tối ưu được xác định là 10 phút cho 25 hạt, với công suất plasma là 1.2W, tương đương với liều lượng plasma là 0.08 Wh trên mỗi hạt.

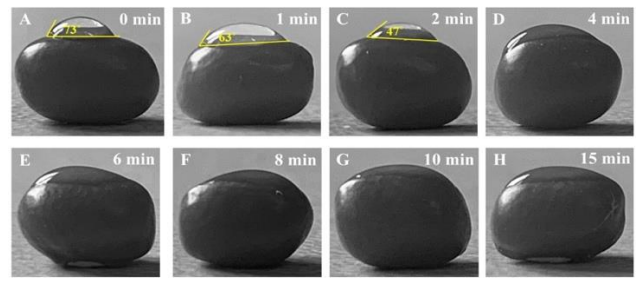
5.3. Cơ chế biến đổi vật lý và hóa sinh do xử lý plasma tạo ra

5.3.1. Những thay đổi vật lý trên bề mặt hạt sau khi xử lý plasma

Kết quả cho thấy, xử lý plasma tạo ra một sự chuyển đổi rõ rệt từ trạng thái bề mặt chỉ dính ướt một phần sang gần như dính ướt hoàn toàn khi so sánh giữa hạt không được xử lý và hạt được xử lý bằng plasma jet.



Hình 5.2. Ảnh SEM chụp bề mặt hạt đỗ khi chưa xử lý plasma (A) 0 phút, và sau khi xử lý plasma sau (B) 1 phút, (C) 2 phút, (D) 4 phút, (E) 6 phút, (F) 8 phút, (G) 10 phút và (H) 15 phút.

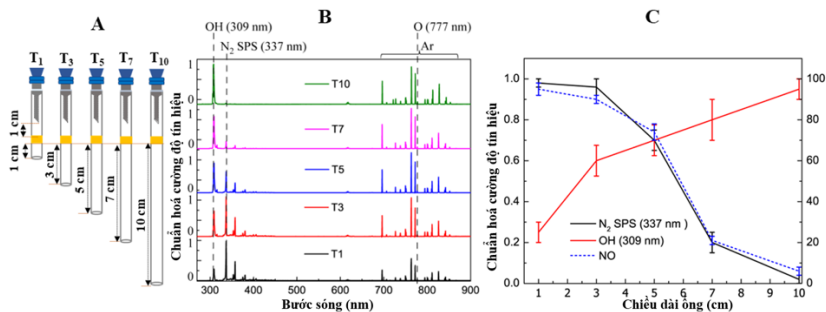


Hình 5.3. Ảnh chụp góc tiếp xúc giọt nước trên bề mặt hạt đỗ khi chưa xử lý plasma (A) 0 phút, và sau khi xử lý plasma sau (B) 1 phút, (C) 2 phút, (D) 4 phút, (E) 6 phút, (F) 8 phút, (G) 10 phút và (H) 15 phút.

5.3.2. Những biến đổi về mặt hóa sinh của hạt sau xử lý plasma

Mặc dù các thay đổi vật lý trên bề mặt hạt có xu hướng tỷ lệ thuận với thời gian xử lý plasma, thời gian chiếu plasma 10 phút đã mang lại hiệu quả kích thích tăng trưởng tối ưu.

5.3.2.1. Ảnh hưởng của chiều dài đầu phát plasma đến tỷ lệ RONS



Hình 5.4. (A) Chiều dài các ống plasma khác nhau mà chúng tôi đã chế tạo. (B) Phổ huỳnh quang của plasma trong khoảng 270–900 nm. (C) Sự phụ thuộc của cường độ huỳnh quang của N_2 SPS (337 nm), gốc tự do OH (309 nm) and nồng độ NO vào các chiều dài ống plasma khác nhau.

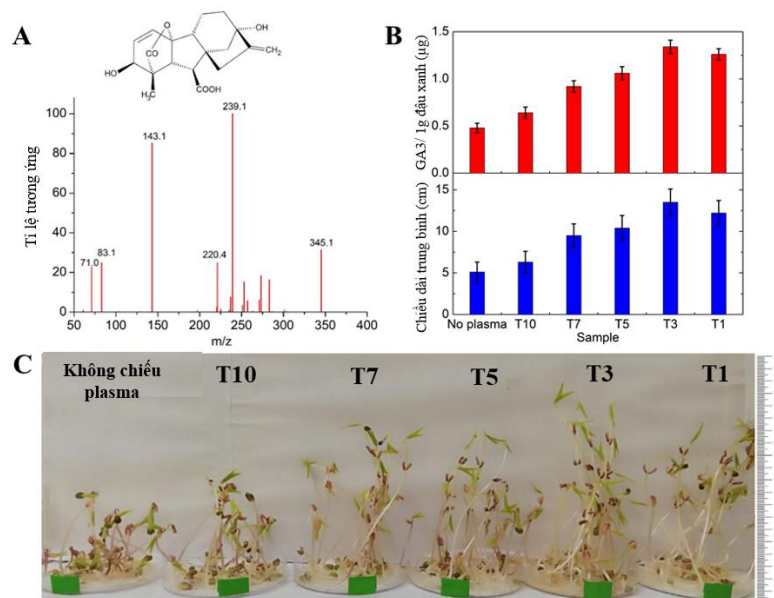
Để đánh giá tác động của plasma lên hormone tăng trưởng, chúng tôi thực hiện chiết tách GA_3 từ hạt đỗ xanh trước và sau khi xử lý plasma.

Quy trình chiết tách đã được trình bày trong mục 2.2.10. Để phân tách lượng gibberellic acid (GA_3), chúng tôi sử dụng hệ sắc ký lỏng kết hợp phổ khối (LC-MS) như đã trình bày trong mục 2.2.9.

Chúng tôi thiết kế 5 ống plasma với chiều dài lần lượt giống hình 5.4A. Kết quả phân tích phổ huỳnh quang cho thấy sự khác biệt đáng kể ở các đỉnh phát xạ của N_2

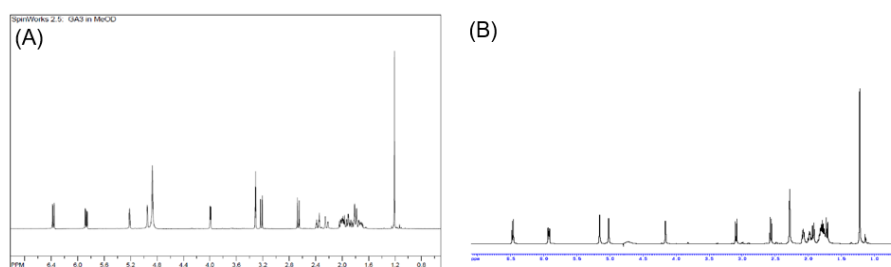
SPS (337 nm) và gốc $\bullet\text{OH}$ (309 nm) khi sử dụng các ống plasma khác nhau (Hình 5.4B), từ đó điều chỉnh tỷ lệ ROS/RNS (Hình 5.4C).

5.3.2.2. Ảnh hưởng của RONS đến sự điều hòa của hormone kích thích tăng trưởng tự nhiên



Hình 5.5. (A) Phổ MS (mass spectrum) từ dung dịch chiết tách và cấu trúc hóa học của gibberellic acid (GA₃). (B) Lượng GA₃ (μg) trong 1g hạt đỏ (màu đỏ, bên trên) và chiều dài trung bình của mầm cây (màu xanh, bên dưới) phụ thuộc vào chiều dài ống plasma. (C) Ảnh chụp các mẫu cây đỏ sau 96 giờ

Trong quá trình chiết tách với hạt đỏ đen, màu sắc từ vỏ hạt hoà tan vào dung dịch chiết tách, gây ảnh hưởng đến kết quả phân tích. Kết quả này chỉ ra rằng sự điều hoà lượng GA₃, được kích thích bởi nồng độ NO trong plasma, là cơ chế hoá sinh dẫn đến hiệu ứng thúc đẩy nảy mầm và phát triển của hạt. Kết quả NMR thu được được đối chiếu với phổ NMR của chất chuẩn và xác nhận rằng chất chiết tách chính là gibberellic acid (GA₃) (Hình 5.6).



Hình 5.6. Phổ cộng hưởng từ hạt nhân NMR của gibberellic acid (GA₃) từ mẫu chiết tách và so sánh với phổ của mẫu chuẩn.

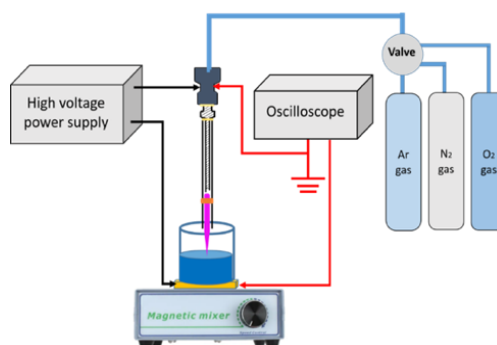
5.4. Các thử nghiệm và các bước ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý chất nhuộm

5.4.1. Các thử nghiệm ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý chất nhuộm

Các gốc phản ứng sinh ra từ plasma lạnh, như $\bullet\text{OH}$, H_2O_2 và O_3 , không chỉ tương tác bề mặt mà còn khuếch tán vào pha lỏng giúp tăng hiệu quả xử lý chất lỏng. Hiệu quả xử lý phụ thuộc nhiều vào thời gian và công suất phát, với các gốc O_3 và $\bullet\text{OH}$ là tác nhân phản ứng chính.

5.4.2. Các bước ứng dụng công nghệ plasma lạnh trong xử lý chất nhuộm

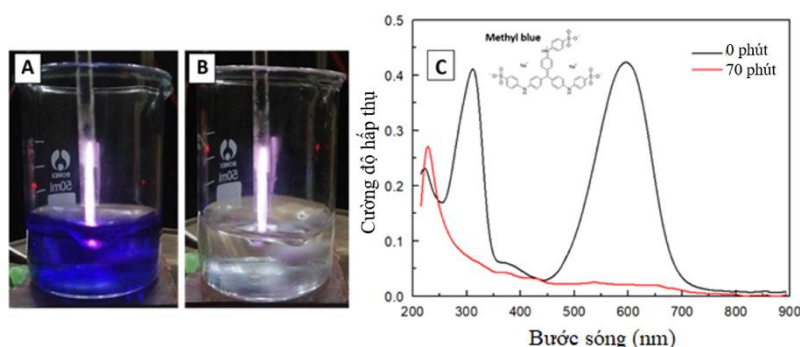
Hình 5.7 mô tả cách bố trí một thí nghiệm xử lý dung dịch chất màu bằng hệ plasma jet được chúng tôi sử dụng trong nội dung nghiên cứu này.



Hình 5.7. Thiết lập của hệ plasma jet được sử dụng để phân hủy dung dịch chất màu

5.5. Khảo sát và đánh giá hiệu quả phân hủy chất nhuộm

5.5.1. Tốc độ phân hủy dung dịch Methyl blue



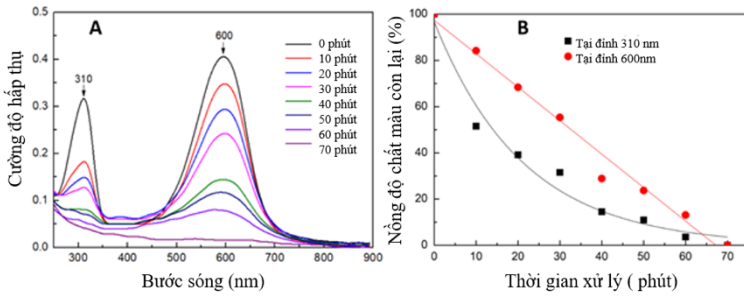
Hình 5.8. Dung dịch Methyl blue (MB) được xử lý bởi hệ Plasma jet trong thời gian 70 phút: (A) Thời gian 0 phút; (B) Thời gian 70 phút; (C) Phổ hấp thụ của dung dịch Methyl blue tại 0 phút và 70 phút được xử lý bằng Plasma jet.

Kết quả phép đo UV -VIS cho thấy hai đỉnh hấp thụ đặc trưng tại 310 nm và 600 nm của dung dịch ban đầu đã hoàn toàn biến mất sau quá trình xử lý. Chúng tôi đã xác định hiệu suất phân hủy (H_{ph}) của MB theo thời gian dựa vào công thức sau:

$$H_{ph} = \frac{C_0 - C_T}{C_0} \times 100\%$$

trong đó: C_0 : nồng độ của dung dịch Methyl Blue tại thời điểm ban đầu với $t = 0$.

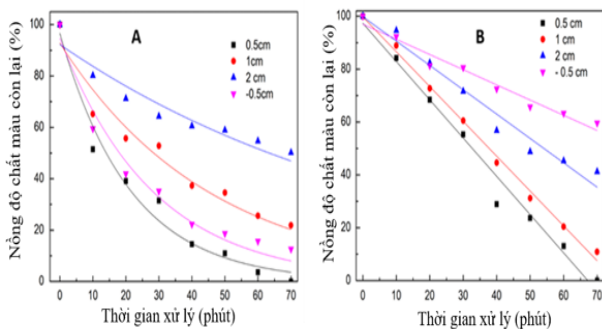
C_t : nồng độ của dung dịch Methyl Blue còn lại sau thời gian xử lý t phút



Hình 5.9. (A) Phổ hấp thụ của dung dịch Methyl Blue trong thời gian xử lý từ 0 -70 phút; (B) Tỷ lệ phần trăm chất màu còn lại theo thời gian xử lý plasma.

Đỉnh tại 310nm phản ánh các cấu trúc vòng Aromatic trong phân tử Methyl Blue, trong khi đỉnh tại 600nm liên quan đến các liên kết C-O, C-N và C-C, thường gắn với các nhóm chức mang màu n-ethyl.

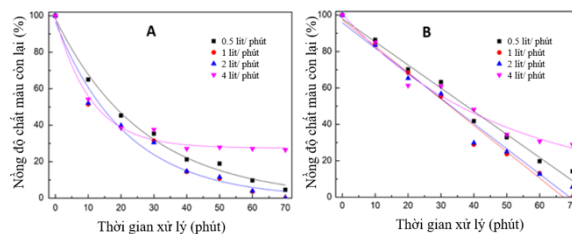
5.5.2. Khoảng cách từ đầu phát plasma đến bề mặt dung dịch (d)



Hình 5.10. Tốc độ phân hủy (A) tại đỉnh 310 nm và (B) tại đỉnh 600 nm khi thay đổi khoảng cách chiếu d: 0,5cm; 1 cm; 2 cm; -0,5 cm.

5.5.3. Ảnh hưởng của tốc độ khí

Từ các kết quả khảo sát, nhóm nghiên cứu đã tối ưu hoá thông số hoạt động của hệ plasma jet để đạt hiệu suất phân hủy dung dịch MB cao nhất, bao gồm khoảng cách $d=0,5\text{cm}$ và tốc độ khí 1 l/phút.



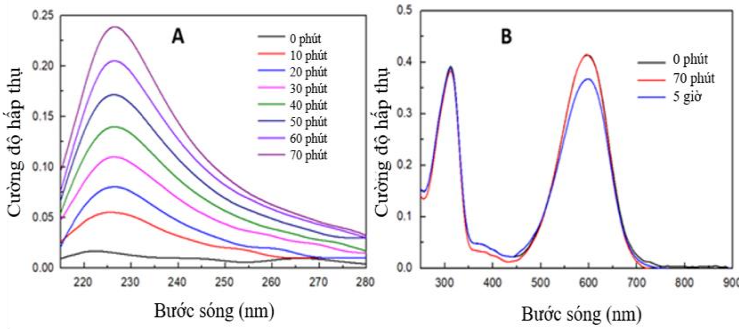
Hình 5.11. Tốc độ phân hủy tại (A) đỉnh 310nm và (B) tốc độ mất màu tại đỉnh 600 nm với tốc độ khí: 0.5 l/phút; 1 l/phút; 2 l/phút; 4 l/phút.

Hiệu suất này cho phép tính toán tỷ lệ phần trăm nồng độ dung dịch chất màu còn lại so với nồng độ ban đầu. Từ kết quả thu được ở Hình 5.9, chúng tôi quan sát thấy sự suy giảm khác biệt về cường độ hấp thụ tại hai đỉnh hấp thụ đặc trưng: 310nm và 600nm.

Chúng tôi đã tối ưu hoá các thông số của hệ plasma jet nhằm tăng tốc độ phân hủy dung dịch. Các yếu tố được điều chỉnh bao gồm: (1) khoảng cách từ đầu phát plasma đến bề mặt dung dịch và (2) tốc độ dòng khí. Khoảng cách $d = 0,5\text{cm}$ đạt hiệu suất cao nhất.

5.6. Cơ chế phân hủy chất nhuộm bằng công nghệ plasma lạnh

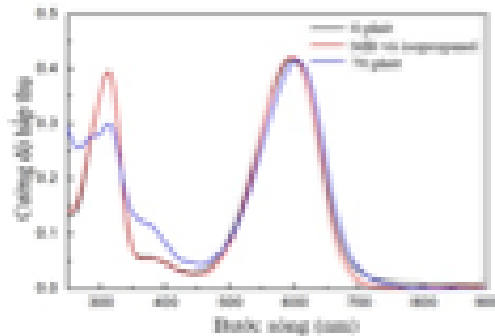
5.6.1. Ảnh hưởng của H_2O_2



Hình 5.12. (A) Phổ hấp thụ của H_2O_2 thu được sau khi chiếu plasma vào nước cất trong thời gian 0 – 70 phút; (B) Phổ hấp thụ của 30ppm dung dịch Methyl Blue sau 70 phút, 5 giờ phản ứng với dung dịch H_2O_2 nồng độ 24 mg/l.

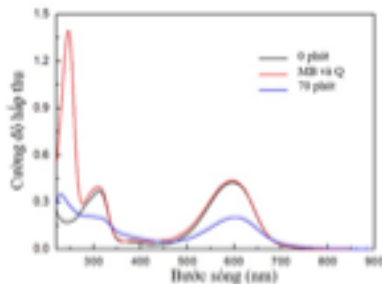
5.6.2. Ảnh hưởng của $\bullet OH$ (hydroxyl radicals)

Từ hình 5.13 chúng tôi kết luận rằng, $\bullet OH$ là tác nhân ảnh hưởng chính đến quá trình phân hủy chất màu bằng plasma lạnh



Hình 5.13. Phổ hấp thụ của dung dịch Methyl Blue phân hủy bởi Plasma jet khi có mặt isopropanol.

5.6.3. Ảnh hưởng của $\bullet O_2^-$ (superoxide radicals anion)



Hình 5.14. Phổ hấp thụ của dung dịch Methyl Blue phân hủy bởi plasma jet khi có mặt 1,4- benzoquinone

H_2O_2 có đỉnh hấp thụ tại bước sóng 225nm, do đó chúng tôi có thể định lượng H_2O_2 tạo ra theo thời gian chiếu Plasma thông qua sử dụng phép đo phổ hấp thụ.

Hình 5.12 đã thể hiện giá trị cường độ tín hiệu của H_2O_2 thu được sau các khoảng thời gian chiếu.

Từ đó, nhóm nghiên cứu đưa ra kết luận: $\bullet OH$ là gốc oxy hóa mạnh và có sự ảnh hưởng chính trong quá trình phân hủy và hoàn toàn quyết định quá trình mất màu

5.7. Kết luận chương 5

Trong chương này, chúng tôi chỉ ra rằng Xử lý bằng plasma jet giúp cải thiện bề mặt hạt giống, tăng hấp thu nước và điều hòa hormone GA₃, từ đó nâng hệ số nảy mầm gấp 11 lần sau 12 giờ và chiều dài cây mầm gấp 3 lần sau 96 giờ. Plasma cung cấp năng lượng 0.08 Wh/hạt và NO 20–95 ppm là tối ưu. Trong xử lý chất màu, plasma jet ($U = 12\text{V DC}$, $f = 33\text{ kHz}$, khí 1 L/phút, khoảng cách 0.5 cm) phân hủy hoàn toàn 20 ml dung dịch Methyl blue 30 ppm sau 55 phút. COD sau xử lý đạt 42,52 mg/L, nằm trong ngưỡng cho phép theo QCVN 13-MT:2015/BTNMT. Các kết quả nghiên cứu trong chương này đã được công bố trên các tạp chí Applied Sciences (IF 2.5) [63], Materials Advances (IF 5.2) [137], và Communications in Physics[60].

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án nghiên cứu ứng dụng plasma lạnh trong tổng hợp hạt nano vàng, xử lý bề mặt để SERS, kích thích nảy mầm và phân hủy chất màu.

1. Xây dựng hệ plasma jet hoạt động ổn định, dùng làm công cụ nghiên cứu.
2. Tổng hợp hạt nano vàng đồng đều (45 nm), ổn định >6 tháng mà không cần chất khử, với thông số tối ưu và phân tích đặc tính bằng SEM, XRD, UV-Vis, DLS.
3. Chế tạo đế SERS nhạy cao ($EF \sim 3 \times 10^8$, $LOD \sim 10^{-12}\text{ M}$), tái sử dụng 10 lần, hiệu quả trong phát hiện amoxicillin.
4. Kích thích nảy mầm hiệu quả, tăng hệ số nảy mầm 11 lần sau 12 giờ, chiều dài cây mầm gấp 3 lần, do NO trong plasma điều hòa GA₃.
5. Xử lý phân hủy chất màu Methyl blue, với thông số tối ưu, COD sau xử lý đạt chuẩn QCVN. Phân tích cho thấy •OH đóng vai trò chính trong quá trình phân hủy.

Kết luận, plasma lạnh là công nghệ hiệu quả, thân thiện môi trường với tiềm năng ứng dụng rộng trong vật liệu, nông nghiệp và y sinh.

DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ XUẤT BẢN LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Le Thi Quynh Xuan**, Nguyen Nhat Linh, Dao Nguyen Thuan, 2021, Synthesis of stabilizer-free, homogeneous gold nanoparticles by cold atmospheric-pressure plasma jet and their optical sensing property. *Nanotechnology*, 33(10), 105603.
2. **Le, T. Q. X.**, Nguyen Nhat Linh, Nguyen Thanh Tung, Eun Ha Choi, Nguyen Quang Liem, Nagendra Kumar Kaushik, Dao Nguyen Thuan, 2022, Effects of cold plasma treatment on physical modification and endogenous hormone regulation in enhancing seed germination and radicle growth of mung bean. *Applied Sciences*, 12(20), 10308.
3. **Le Thi Quynh Xuan**, Pham Thanh Binh, Nguyen Minh Thu, Nguyen Thu Loan, Nguyen Van Chuc, Dao Nguyen Thuan, 2024, A Novel Method for Rapid and High-Performance SERS Substrate Fabrication by Combination of Cold Plasma and Laser Treatment. *Nanomaterials*, 14(21), 1689.
4. Nguyen Thi Huyen, Luong Chuc Quynh Ngan, **Le Thi Quynh Xuan**, Tran Ai Suong Suong, Cao Thi Thanh, Nguyen Van Tu, Pham Thanh Binh, Tran Ai Tan, Nguyen Viet Tuyen, Dao Tran Cao, Pham Van Hai, Vu Xuan Hoa, Nguyen Van Chuc, 2025, Reduced graphene oxide-carbon nanotubes nanocomposites-decorated porous silver nanodendrites for highly efficient SERS sensing. *Optical Materials*, 116935.
5. **Le Thi Quynh Xuan**, Tran Hong Quan, Trinh Thu Ha, Dao Nguyen Thuan, 2021, Removal of rhodamine B dye by plasma jet oxidation process. *Communications in Physics*, 31(1), 95-102.
6. **Le Thi Quynh Xuan**, Nguyen Tuan Minh, Nguyen Van Chuc, Dao Nguyen Thuan, 2021, Enhancing surface energy of polycarbonate by atmospheric pressure plasma jet. *Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption*, 10(1S), 293-296.
7. **Le Thi Quynh Xuan**, Tran Thi Thu Huong, 2020, Degradation of methyl blue by an approach using plasma jet processing, The 11th International Conference on Photonics & Applications.
8. **Le Thi Quynh Xuan**, Dao Nguyen Thuan, 2021, Degradation rhodamine b in solution by atmospheric pressure plasma jet, *The 10th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology*.
9. **Le Thi Quynh Xuan**, Pham Thanh Binh, Nguyen Van Chuc, Dao Nguyen Thuan, 2024, A novel method for rapid and high-performance SERS substrate fabrication by combination of cold plasma and laser treatment, *The 11th International Workshop on Advanced Materials Science and Nanotechnology*.
10. Đào Nguyên Thuận, **Lê Thi Quỳnh Xuân**, Quy trình chế tạo hạt nano vàng bằng phương pháp plasma jet, Cục sở hữu trí tuệ, Chấp nhận đơn 2021.