

MÔ HÌNH HÓA MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TẠO PLASMA DỰA TRÊN PHẦN MỀM COMSOL MULTIPHYSICS

NUMERICAL MODELLING AND SIMULATION OF A PLASMA GENERATION SYSTEM
BASED ON COMSOL MULTIPHYSICS SOFTWARE

Nguyễn Thái Học^{1,*}, Ngô Trí Dương¹, Nguyễn Xuân Trường¹,
Lê Vũ Quân¹, Nguyễn Thị Hiền¹,
Nguyễn Đức Dương¹, Phạm Trường Sơn²

DOI: <https://doi.org/10.57001/hu1h5804.2026.148>

TÓM TẮT

Trong bối cảnh nông nghiệp thông minh hiện nay, công nghệ plasma lạnh, đặc biệt là các hệ thống Plasma cảm ứng (ICP), đã trở thành giải pháp đột phá trong việc khử khuẩn hạt giống, kích thích nảy mầm và tăng cường sinh trưởng cây trồng nhờ khả năng tạo ra các loài oxy và nitơ phản ứng (RONS) mà không gây tổn thương nhiệt cho tế bào thực vật. Trên thực tế, Plasma lạnh đã được chứng minh là tạo ra các loài oxy và nitơ phản ứng (RONS) như H_2O_2 , NO_2^- , NO_3^- ... có khả năng khử khuẩn và kích thích sinh học. Trong nông nghiệp, plasma lạnh được ứng dụng để xử lý hạt giống và cây con (kích thích nảy mầm, tăng sinh trưởng), khử khuẩn đất và bề mặt nông sản. Nhờ các RONS tồn tại trong nước hoạt hóa plasma (PAW), công nghệ này góp phần tăng năng suất và chất lượng cây trồng mà không gây tổn hại môi trường. Tuy nhiên, do bản chất các hệ cơ điện tử tạo plasma vô cùng phức tạp với sự tương tác đồng thời của điện từ trường, động lực học chất lưu và các phản ứng hóa học, việc mô hình hóa và mô phỏng chi tiết quá trình xây dựng cũng như thay đổi chỉ số của các linh kiện điện tử trở thành bước then chốt để kiểm soát và vận hành hệ thống ổn định. Bài báo này tập trung xây dựng môi trường mô phỏng đa vật lý để tính toán sự biến thiên của điện trường, dòng điện và các tham số cơ điện tử như vị trí cuộn dây hay công suất nguồn RF. Thông qua việc ứng dụng thuật toán tối ưu hóa để tinh chỉnh vị trí cuộn cảm trong khoảng biến thiên $[-3, +3]\text{cm}$ và công suất từ 500W đến 5000W, nghiên cứu đã chứng minh khả năng cải thiện độ đồng nhất của plasma lên tới 39%, giúp đảm bảo quá trình xử lý sinh học trên bề mặt cây trồng diễn ra đồng đều. Những kết quả này mang lại ý nghĩa thực tiễn quan trọng trong sản xuất nông nghiệp, cho phép xác định chính xác ngưỡng an toàn và liều lượng RONS tối ưu để kích thích hạt giống đạt tỷ lệ nảy mầm cao nhất, tiêu diệt hiệu quả nấm bệnh thông qua việc kiểm soát nhiệt độ electron bề mặt, đồng thời giúp rút ngắn thời gian thử nghiệm.

Từ khóa: Hệ thống tạo Plasma, phần mềm COMSOL Multiphysics, Plasma cảm ứng cao tần.

ABSTRACT

In the evolving landscape of smart agriculture, cold plasma technology specifically Inductively Coupled Plasma (ICP) represents a transformative breakthrough for seed disinfection and growth stimulation. These systems harness the power of Reactive Oxygen and Nitrogen Species (RONS), such as H_2O_2 , NO_2^- , NO_3^- ..., to provide potent bio-stimulation and antimicrobial effects without inflicting thermal damage on delicate plant tissues. From the direct treatment of seedlings to the innovative use of Plasma Activated Water (PAW), this technology enhances agricultural productivity and quality while upholding environmental integrity. However, the mechatronic architecture required for plasma generation is profoundly complex, governed by the simultaneous interaction of electromagnetic fields, fluid dynamics, and intricate chemical kinetics. Consequently, detailed multiphysics modeling becomes the indispensable cornerstone for ensuring operational stability and precise system control. This research utilizes COMSOL Multiphysics software to simulate the dynamic evolution of electric fields, currents, and critical mechatronic variables, such as RF power and coil configuration. By implementing the IPOPT optimization algorithm to refine coil placement within a $[-3, +3]\text{cm}$ range and power levels between 500W and 5000W, this study demonstrates a 39% enhancement in plasma uniformity. Such findings offer significant industrial utility, allowing for the precise calibration of safe RONS dosages to maximize germination rates and eradicate pathogens through the meticulous control of surface electron temperatures. Ultimately, this robust modeling approach streamlines experimental cycles and minimizes manufacturing costs, paving the way for the reliable deployment of cold plasma in modern, data-driven farming.

Keywords: Plasma generation system, COMSOL Multiphysics software, Inductively Coupled Plasma.

¹Khoa Cơ - Điện, Học viện Nông nghiệp Việt Nam²Sinh viên ngành Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, Học viện Nông nghiệp Việt Nam

*Email: nguyenthaihoc@vnua.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/3/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh nông nghiệp hiện đại đang chuyển mình mạnh mẽ theo hướng nông nghiệp thông minh, việc ứng dụng các thành tựu của công nghệ thông tin, IoT, AI và đặc biệt là công nghệ lý - sinh như plasma lạnh đã mở ra những hướng đi đột phá trong việc nâng cao năng suất và bảo vệ thực vật [1-5]. Plasma lạnh, đặc biệt là các hệ thống xử lý sinh học cây trồng, đóng vai trò quan trọng trong việc khử trùng hạt giống, kích thích nảy mầm và biến đổi bề mặt sinh học mà không gây hại bằng nhiệt lượng [6-10]. Trong số các công nghệ tạo plasma, Plasma cảm ứng (Inductively Coupled Plasma - ICP) [11, 12] nổi lên như một giải pháp ưu việt nhờ khả năng tạo ra mật độ hạt mang điện cao và độ tinh khiết môi trường phóng điện lớn.

Plasma cảm ứng (ICP) là một môi trường khí được ion hóa mạnh, được tạo ra và duy trì thông qua nguyên lý cảm ứng điện từ. Khác với plasma phóng điện tiếp xúc trực tiếp qua điện cực, năng lượng trong hệ thống ICP được truyền từ một cuộn dây cảm ứng được cấp nguồn tần số vô tuyến (RF - thường là 13,56MHz) vào buồng phóng điện [13]. Về mặt vật lý, ICP tuân thủ giả thuyết giả trung hòa nơi mật độ electron (n_e) và ion (n_i) cân bằng nhau trong không gian phóng điện. Khi dòng điện xoay chiều chạy qua cuộn cảm, nó tạo ra một từ trường biến thiên, từ đó cảm ứng nên một điện trường xoáy trong lòng chất khí trơ (thường là Argon). Điện trường này gia tốc các electron tự do, tạo ra các va chạm ion hóa dây chuyền, chuyển hóa năng lượng điện từ thành động năng hạt và năng lượng kích thích, tạo ra môi trường plasma có mật độ hạt cực cao phục vụ ($> 10^{17}m^{-3}$) cho các tương tác sinh - hóa phức tạp.

Hệ thống ICP là một tổ hợp vật lý cực kỳ phức tạp, nơi diễn ra sự tương tác đồng thời giữa động lực học điện từ, truyền nhiệt, dòng chảy chất lưu và các phản ứng hóa học plasma [14]. Việc mô hình hóa mô phỏng toàn bộ quá trình phát triển và thay đổi các chỉ số điện - cơ của hệ thống mang lại những ý nghĩa then chốt [15-19]. Như tối ưu hóa sự đồng nhất của Plasma; Dự báo và kiểm soát các chỉ số điện - cơ; Hiểu sâu về cơ chế tương tác mẫu. Một

trong những thách thức lớn nhất của ICP là hiện tượng phân bố mật độ hạt không đều (thường cao ở tâm và giảm dần ra biên). Mô phỏng cho phép các nhà khoa học điều chỉnh cấu hình cuộn dây, cường độ dòng điện và từ trường ngoài để đạt được độ đồng nhất cao nhất (có thể cải thiện tới 39% so với hệ thống không điều khiển [13]), đảm bảo quá trình xử lý sinh học trên bề mặt cây trồng được diễn ra đồng đều. Dự báo và kiểm soát các chỉ số điện - cơ: Thông qua mô hình hóa, các thông số như điện trở cuộn dây, độ tự cảm, sự lắng đọng năng lượng và hiệu suất khớp nối nguồn RF được xác định chính xác. Điều này giúp thiết kế hệ thống vận hành ổn định, tránh lãng phí năng lượng và bảo vệ thiết bị trước các biến đổi đột ngột của tải plasma. Hiểu sâu về cơ chế tương tác mẫu: Mô phỏng cung cấp dữ liệu về phân bố nhiệt độ electron tốc độ ion hóa và thông lượng ion mà các phép đo thực nghiệm bằng đầu dò vật lý khó có thể thực hiện một cách toàn diện do sự nhiễu loạn môi trường. Điều này đặc biệt quan trọng khi xử lý các đối tượng nhạy cảm như tế bào thực vật hoặc hạt giống.

Trong xu thế phát triển của nông nghiệp thông minh, việc ứng dụng công nghệ plasma lạnh để xử lý sinh học cây trồng (như kích thích nảy mầm, khử trùng bề mặt và tăng trưởng bền vững) đang trở thành một hướng nghiên cứu trọng tâm. Để triển khai hiệu quả công nghệ này, việc thiết kế và tối ưu hóa các hệ thống tạo plasma cảm ứng đóng vai trò quyết định. Tuy nhiên, bản chất phức tạp của môi trường plasma - nơi giao thoa giữa điện từ trường, động lực học chất lưu và phản ứng hóa học - đặt ra thách thức lớn trong việc kiểm soát các chỉ số điện - cơ. Trong bối cảnh đó, các công cụ mô phỏng số tiên tiến đã trở thành giải pháp tối ưu để nghiên cứu và phát triển hệ thống này. COMSOL Multiphysics là một nền tảng mô phỏng số tiên tiến dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn [20]. Đây là một môi trường phân tích mạnh mẽ cho phép giải quyết các bài toán vật lý đa lĩnh vực thông qua việc giải các hệ phương trình đạo hàm riêng liên kết. Phần mềm này nổi bật với khả năng thiết lập một môi trường mô phỏng tích hợp, giúp người nghiên cứu giải quyết hiệu quả các hiện tượng vật lý phức tạp diễn ra đồng thời như cơ học, điện từ, động lực học chất lưu và hóa học [21]. COMSOL được

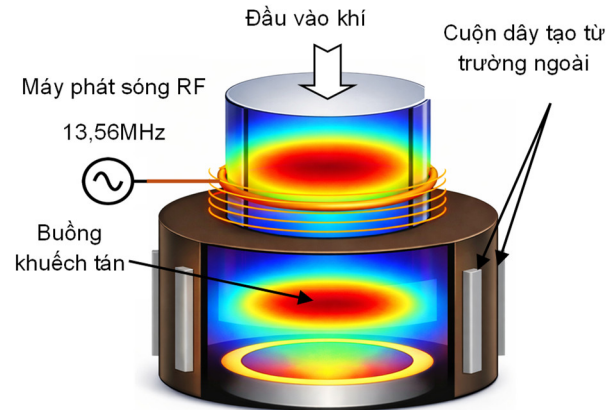
coi là một công cụ phân tích có độ chính xác cao, đặc biệt phù hợp cho các mô hình cấu trúc phức tạp. Trong nghiên cứu hệ thống ICP, COMSOL Multiphysics đóng vai trò như một "phòng thí nghiệm ảo" toàn năng [22]. Vai trò cụ thể của công cụ này trong việc mô phỏng quá trình phát triển và biến đổi các chỉ số điện - cơ được thể hiện qua các khía cạnh sau: Giải quyết tương tác đa vật lý (Multiphysics Coupling): Hệ thống ICP yêu cầu sự liên kết chặt chẽ giữa các thành phần điện và cơ. COMSOL cho phép kết hợp đồng thời mô-đun Từ trường (AC/DC Module) để giải phương trình Maxwell cho các trường điện từ và mô-đun Plasma để giải các phương trình liên tục, phương trình động lượng (xấp xỉ khuếch tán trượt) và phương trình năng lượng của electron. Mô phỏng động lực học hạt và quá trình hình thành: Phần mềm cho phép tích hợp các hàm phân bố năng lượng electron (EEDF) cùng các hệ số phản ứng hóa học phức tạp, ví dụ như quá trình ion hóa từng bước của khí Argon. Điều này giúp tái hiện chính xác toàn bộ quá trình từ giai đoạn đánh thủng ban đầu cho đến khi plasma đạt trạng thái ổn định. Tối ưu hóa thiết kế điện - cơ: COMSOL cung cấp công cụ tối ưu hóa hình học, cho phép tự động thay đổi vị trí và kích thước của các cuộn dây cảm ứng. Vai trò này cực kỳ quan trọng trong việc tìm ra cấu hình thiết kế tốt nhất nhằm giảm thiểu gradient mật độ electron, tạo ra môi trường plasma lý tưởng và đồng nhất cho các ứng dụng nông nghiệp công nghệ cao [23]. Dự báo sự thay đổi các chỉ số hệ thống: Thông qua mô phỏng, các nhà khoa học có thể quan sát sự tương tác giữa các trường điện từ và vùng plasma trên bề mặt thiết bị, từ đó điều chỉnh các thông số vận hành để đạt được hiệu suất năng lượng cao nhất [24]. Tóm lại, việc ứng dụng COMSOL Multiphysics không chỉ giúp rút ngắn đáng kể thời gian nghiên cứu thực nghiệm mà còn tạo ra nền tảng vững chắc để triển khai các hệ thống plasma lạnh thông minh. Đây là bước đệm công nghệ quan trọng để hiện thực hóa việc ứng dụng plasma trong xử lý sinh học cây trồng một cách chính xác và hiệu quả trong ngành nông nghiệp y sinh hiện đại.

Trong bài báo này, các tác giả trình bày về việc xây dựng mô hình hóa mô phỏng môi trường đa vật lý để tính toán sự biến thiên của điện trường, dòng điện và các tham số cơ điện tử như vị trí cuộn dây hay công suất nguồn nhằm tạo nên sự đồng đều về nguồn plasma tạo ra dựa trên hệ thống plasma cảm ứng cao tần.

2. MÔ HÌNH MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TẠO PLASMA CẢM ỨNG CAO TẦN

Plasma cảm ứng (Inductively Coupled Plasma - ICP) là một môi trường khí được ion hóa mạnh, thường sử dụng các khí trơ như Argon (Ar) làm môi trường truyền dẫn

chính. Hệ thống này vận hành dựa trên nguyên lý cảm ứng điện từ, trong đó năng lượng từ trường tần số vô tuyến (RF), điển hình là tại tần số chuẩn 13,56MHz, được truyền vào buồng phóng điện thông qua cuộn cảm ứng. Do cấu trúc đối xứng hình trụ của lò phản ứng ICP, một mô hình đối xứng trục hai chiều đã được thiết lập dựa trên phần mềm mô phỏng đa vật lý COMSOL.



Hình 1. Sơ đồ lò phản ứng ICP tạo plasma lạnh

Hình 1 thể hiện sơ đồ cấu trúc lò phản ứng ICP [25]. Cụ thể, phản ứng hóa học plasma xảy ra trong một buồng phóng điện. Một cuộn dây từ trường đặt bên ngoài được sử dụng để tạo ra từ trường một chiều. Công suất dẫn động của cuộn cảm phía trên của sơ đồ môi được cố định ở mức 200W, và tần số vô tuyến được cố định ở mức 13,56MHz. Khí làm việc là hỗn hợp khí argon-oxy. Hơn nữa, các thông số trong mô phỏng bao gồm dòng điện của cuộn dây từ, áp suất khí và tỷ lệ O_2 , với phạm vi tương ứng được thay đổi 0 - 15 (A), 10 - 20 (mTorr). Các phản ứng hóa học và các hệ số liên quan đến mô hình mô phỏng được cho trong bảng 1.

Bảng 1. Các phản ứng hóa học được sử dụng trong mô hình

Phản ứng số	Phản ứng hóa học	Loại phản ứng	Δe (eV)
1	$e + Ar \rightarrow e + Ar$	Đàn hồi	0
2	$e + Ar \rightarrow e + Ar^+$	Kích thích	11,5
3	$e + Ar^+ \rightarrow e + Ar$	Siêu đàn hồi	-11,5
4	$e + Ar \rightarrow 2e + Ar^+$	Ion hóa	15,8
5	$e + Ar^+ \rightarrow 2e + Ar^+$	Ion hóa	4,24
6	$Ar^+ + Ar^+ \rightarrow e + Ar + Ar$	Ion hóa hóa học	-
7	$Ar^+ + Ar \rightarrow Ar + Ar$	Quá trình dập tắt trạng thái kích thích.	-
Phản ứng bề mặt			
8	$Ar^+ \rightarrow Ar$		
9	$Ar^+ \rightarrow Ar$		

Thông qua các phản ứng hóa học cho trong bảng 1, ta thấy phản ứng 5 thể hiện quá trình ion hóa từng bước đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì sự phóng điện qua khí argon ở áp suất thấp. Trong các phản ứng trên cũng thấy các nguyên tử argon bị kích thích, bị phá hủy thông qua các va chạm siêu đàn hồi với electron, dập tắt bằng các nguyên tử argon trung tính, ion hóa hóa học để hai nguyên tử argon không bền phản ứng với nhau để tạo thành một nguyên tử argon trung tính, một ion argon và một electron (phản ứng 6). Trong đó phản ứng 8 và 9 là các phản ứng xảy ra ở bề mặt. Khi có một nguyên tử argon ở trạng thái siêu bền tương tác với thành bề mặt nó sẽ ngay lập tức trở lại trạng thái cơ bản nguyên tử argon với một xác suất nhất định.

Như vậy, mô hình sử dụng trong nghiên cứu là mô hình đối xứng trục hai chiều (2D Axisymmetric). Sự tương tác đa vật lý được mô tả thông qua việc giải đồng thời các hệ phương trình:

- Điện từ trường: Sử dụng mô-đun Từ trường (AC/DC Module) để giải hệ phương trình Maxwell, xác định sự phân bố của điện trường xoáy và từ trường biến thiên tạo ra bởi cuộn cảm ứng ở tần số 13,56MHz.

- Động lực học Plasma: Sử dụng mô-đun Plasma để giải phương trình Boltzmann xấp xỉ khuếch tán trượt. Tốc độ thay đổi mật độ electron được thể hiện trong công thức (1).

3. TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH ĐỒNG NHẤT PLASMA

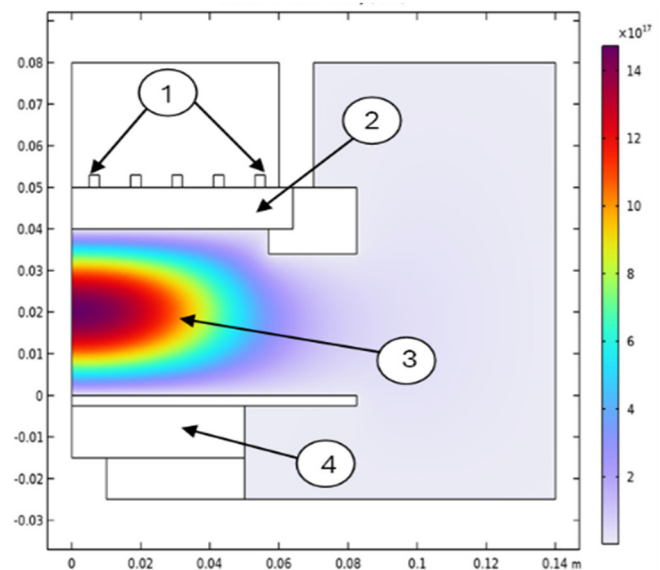
Trong lò phản ứng tạo plasma, quá trình vận chuyển electron được mô tả bởi phương trình Boltzmann trong đó mật độ, động lượng trung bình và năng lượng trung bình của electron được thể hiện trên một hàm thay đổi về cả thời gian và không gian. Tộc độ thay đổi mật độ của electron được mô tả bởi phương trình (1).

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e \quad (1)$$

Trong đó: n_e là mật độ electron, Γ_e là hàm véc tơ dòng electron; R_e là nguồn electron. Để tối ưu hóa quá trình đồng nhất plasma sinh ra trong lò phản ứng sử dụng mô hình lò plasma cảm ứng, thì việc tìm vị trí cho cuộn dây từ trường bên ngoài lò phản ứng nhằm tạo ra từ trường một chiều tốt nhất thúc đẩy các phản ứng tạo plasma đã được chứng minh. Khi đó, hàm mục tiêu là tối thiểu hóa độ dốc của mật độ electron dọc theo hướng xuyên tâm của lò phản ứng và được thể hiện trên công thức (2).

$$\min(Gn) = \min\left(\frac{1}{n_{e0}} \int \sqrt{\nabla n_e^2} dr\right) \quad (2)$$

Trong đó, n_{e0} là hằng số chuẩn hóa.



Hình 2. Mô hình mô phỏng hệ thống tạo plasma trên phần mềm COMSOL Multiphysics: 1. Cuộn dây tạo từ trường; 2. Vật liệu điện môi; 3. Khu vực tạo plasma; 4. Tấm đế lò phản ứng

Trong nghiên cứu này, mô hình mô phỏng hệ thống tạo plasma trên phần mềm COMSOL Multiphysics như thể hiện trên hình 2. Hệ thống đã được xây dựng mô phỏng quá trình tạo plasma khi thay đổi vị trí và công suất của mạch cuộn dây từ trường để đảm bảo quá trình đồng nhất plasma sinh ra trong lò phản ứng. Trong trường hợp này, mật độ electron tại tâm được mô phỏng giữ cố định, công suất của mạch cuộn dây từ trường sẽ được thay đổi dần dần để đảm bảo với mật độ electron tại tâm lò phản ứng được giữ cố định. Bảng 2 thể hiện quá trình thay đổi các thông số vận hành của hệ thống trước và sau khi tối ưu hóa mô hình hệ thống tạo plasma. Qua hình 2 chúng ta có bốn bộ phận chính cấu thành lò phản ứng tạo plasma gồm: 1. Cuộn dây tạo từ trường; 2. Vật liệu điện môi; 3. Khu vực tạo plasma; 4. Tấm đế lò phản ứng.

Bảng 2. Các thông số vận hành hệ thống

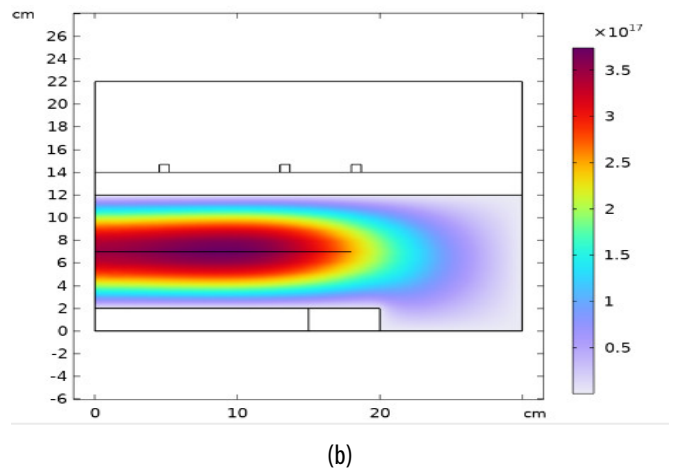
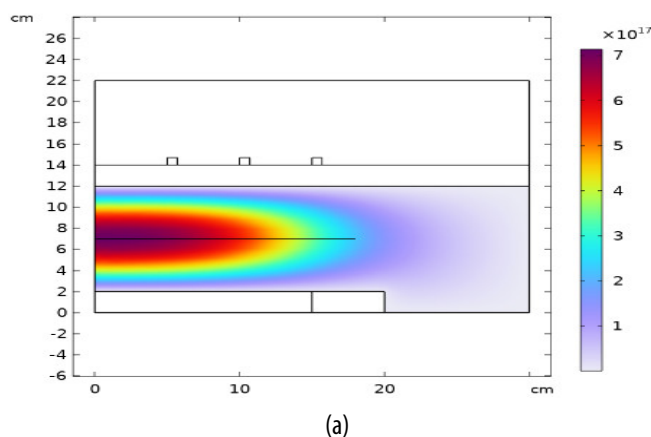
Thông số vận hành	Mô hình ban đầu	Mô hình tối ưu hóa
Vị trí cuộn dây	Sử dụng thông số hình học cố định (r_c) được thiết lập ban đầu dưới dạng mảng.	Chuyển đổi vị trí cuộn dây thành biến tự do trong tính năng Transformation. Cài đặt cho phép các cuộn dây dịch chuyển dọc theo phương hướng tâm trong khoảng biến thiên $[-3, +3]$ cm so với vị trí gốc.
Công suất cuộn dây	Cố định ở mức 1500W	Cài đặt công suất cuộn dây với giá trị ban đầu 1500W, tỷ lệ 1000W và giới hạn trong dải từ 500W đến 5000W.

Hàm mục tiêu		- Thiết lập: Sử dụng chức năng tính tích phân định hướng mật độ electron hướng tâm; - Mục tiêu: Cực tiểu hóa giá trị định hướng mật độ electron để đạt được sự đồng nhất tối đa plasma tạo ra;
Ràng buộc		Ràng buộc mật độ electron tại tâm phải nằm trong khoảng từ 1 đến 1.1 so với giá trị chuẩn n_{e0} . Điều này giúp duy trì hiệu suất làm việc của lò trong khi vẫn tối ưu hóa độ đồng nhất.
Thuật toán và bước giải	Sử dụng bước giải tĩnh Frequency-Stationary (Study 1)	Sử dụng bước giải Optimization (Study 2) với phương pháp IPOPT (Interior Point Optimizer). Sau đó, cần thêm bước Verification (Study 3) để tính toán lại trên lưới mới (Remesh) nhằm loại bỏ sai số do biến dạng hình học.

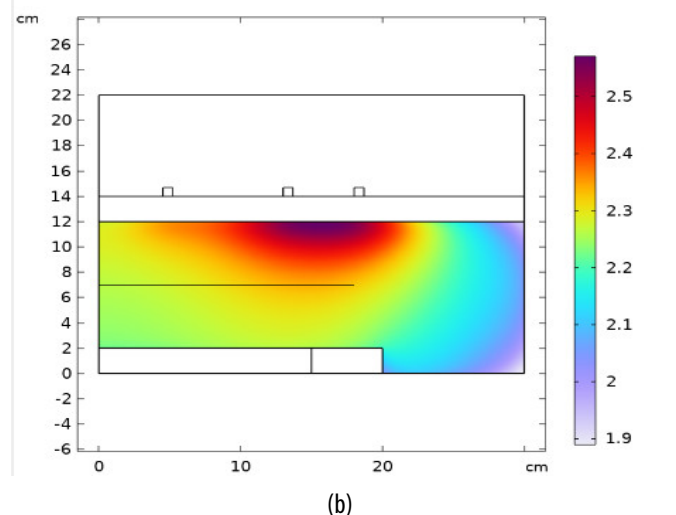
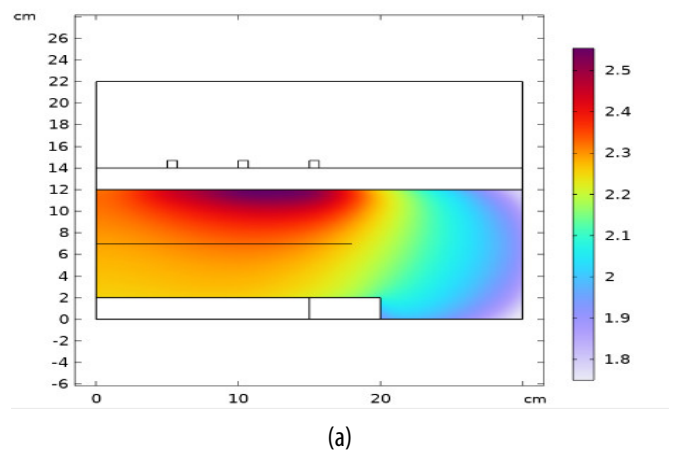
Trong mô hình tối ưu hóa hệ thống, nhóm tác giả sử dụng thuật toán IPOPT bởi bài toán mô hình hóa mô phỏng hệ thống Plasma cảm ứng tồn tại các ràng buộc phi tuyến phức tạp. Trong khi đó IPOPT là thuật toán dựa trên phương pháp điểm nội tại (Interior Point), cực kỳ mạnh mẽ trong việc xử lý các bài toán tối ưu hóa phi tuyến quy mô lớn có ràng buộc chặt chẽ. Bên cạnh đó IPOPT cho thấy sự ổn định cao hơn trong các mô hình tạo plasma nơi mà sự hội tụ của hệ phương trình đa vật lý rất nhạy cảm với sự thay đổi hình học. Ngoài ra IPOPT tương thích tốt với việc chuyển đổi vị trí hình học của cuộn dây thành biến tự do, giúp quá trình tìm kiếm không gian nghiệm hiệu quả hơn so với các phương pháp khác.

4. KẾT QUẢ KHẢO NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

Thông qua việc so sánh mật độ electron được tạo ra trong lò phản ứng được thể hiện trên hình 3a (mô hình thiết kế ban đầu với khoảng cách giữa 3 cuộn dây tạo từ trường ngoài là đều nhau) và hình 3b (mô hình khi khoảng cách giữa 3 cuộn dây được điều chỉnh phù hợp) ta thấy độ đồng đều của mật độ electron được cải thiện đáng kể khi chúng ta thay đổi khoảng cách giữa các cuộn dây.



Hình 3. Mật độ electron thu được với: a) mô hình thiết kế ban đầu; b) mô hình được cấu hình tối ưu hóa

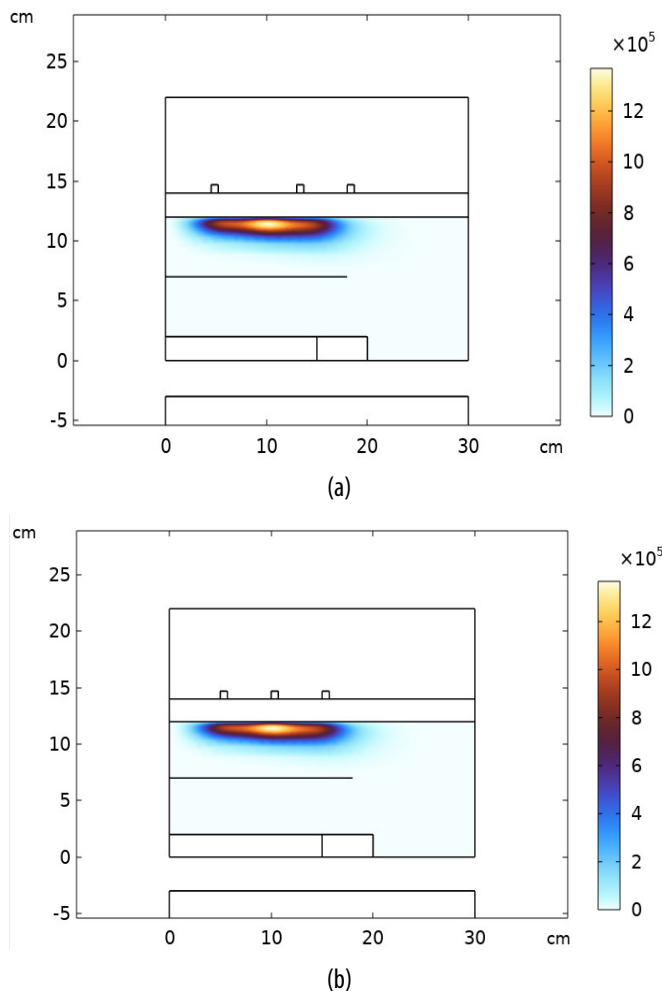


Hình 4. Nhiệt của electron bề mặt lò với: a) mô hình thiết kế ban đầu; b) mô hình được cấu hình tối ưu hóa

Trong hình 4 thể hiện nhiệt độ electron trên bề mặt lò phản ứng. Chúng ta thấy rằng với thiết kế ban đầu khi khoảng cách giữa 3 cuộn dây tạo từ trường cách đều nhau

(hình 4a) thì vùng nhiệt độ cao bố trí đều ngay phía dưới vị trí 3 cuộn dây. Trong khi ở mô hình tối ưu hóa, do khoảng cách giữa cuộn dây thứ 3 cách xa hai cuộn dây phía ngoài lò phản ứng điều này dẫn đến nhiệt độ electron trên bề mặt lò phản ứng giảm đi đáng kể. Khi nhiệt độ dòng plasma giảm sẽ giúp cho các ứng dụng xử lý, tiêu diệt nấm trên các hạt giống trong trồng trọt trở nên hiệu quả hơn.

Hình 5a và 5b thể hiện bản đồ mật độ công suất hấp thụ (Absorbed Power Density) trong buồng plasma cảm ứng, với thang màu giống nhau (từ ~ 0 đến $\sim 1,2 \times 10^6$). Quan sát sơ bộ cho thấy cả hai trường đều có một vùng đỉnh công suất lớn nhất tại gần khu vực trung tâm của buồng, màu vàng rực, tương ứng giá trị đỉnh xấp xỉ $1,2 \times 10^6$.

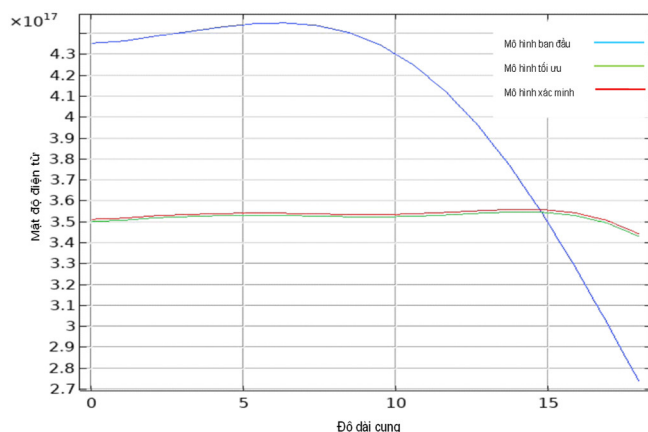


Hình 5. Mật độ công suất hấp thụ với: a) mô hình thiết kế ban đầu; b) mô hình được cấu hình tối ưu hóa

Tuy nhiên, cách phân bố công suất giữa hai ảnh có nét khác biệt đáng kể: Cả hai hình đều có cực đại vào khoảng $1,1 \div 1,2 \times 10^6$ (vùng vàng nhạt). Không có sự khác biệt về biên độ cực đại rõ rệt giữa hai hình; thang màu cho cả hai

đều lên tới 12×10^5 chứng tỏ cùng ngưỡng tối đa. Về phạm vi và hình dạng vùng đỉnh: Ở hình 5a vùng công suất cao chủ yếu tập trung gần tâm buồng, có dạng elip hẹp về ngang. Trong khi đó, ở hình 5b, vùng đỉnh lan rộng hơn về phía phải và hơi hạ thấp một chút. Điều này được thấy qua việc vùng màu vàng - cam dần rộng ở hình 5b, tạo thành vùng đậm kéo dài đến gần thành bên phải và đáy thấp hơn. Độ lan truyền công suất ở hình 5b do đó lớn hơn hình 5a, làm tăng diện tích bề mặt phát xạ mạnh. Nói cách khác, hình 5b cho thấy phân bố công suất đồng đều hơn ra xung quanh so với hình 5a, ở đó công suất dồn tập trung hơn tại trung tâm. Tính đồng nhất: Tính toán sơ bộ vùng có giá trị lớn (vùng vàng) cho thấy hình 5b có diện tích lớn hơn một chút so với hình 5a, ám chỉ độ đồng nhất công suất tốt hơn. Điều này có thể tính bằng tỉ số giữa vùng cường độ cao và toàn bộ vùng quan sát. Hình 5b có vùng màu cam/đỏ phân bố rộng dọc tâm và lan ra bên phải, trong khi hình 5a chủ yếu xấp xỉ vùng trung tâm. Dẫu vậy, sự khác biệt về độ đồng đều không quá lớn; cả hai đều có sự lệch tâm nhẹ. Tóm lại, hai hình cho thấy cường độ công suất cực đại tương đương ($\sim 1,2 \times 10^6$), nhưng phân bố không gian khác biệt: hình 5b có vùng công suất cao lan rộng hơn và đồng đều hơn so với hình 5a. Điều này gợi ý trong điều kiện vận hành hoặc thiết kế, những yếu tố như vị trí cuộn tạo từ trường hoặc thông số khí có thể khác nhau giữa hai trường hợp, ảnh hưởng trực tiếp đến cấu trúc plasma. Sự so sánh này giúp hiểu rõ ảnh hưởng của thay đổi thiết kế lên mật độ năng lượng plasma. Hình 6 thể hiện đồ thị mật độ electron (đơn vị 10^{17}cm^{-3}) theo khoảng cách (trục ngang) tại ba vị trí khảo sát trong buồng plasma (mỗi đường mang màu khác nhau). Đường màu xanh dương bắt đầu ở giá trị cao $\sim 4,3 \times 10^{17}$ tại $x \approx 0$, tăng lên đỉnh $\sim 4,35 \times 10^{17}$ quanh $x = 5$, sau đó giảm dần xuống $\sim 2,8 \times 10^{17}$ tại $x = 18$. Hai đường màu đỏ và xanh lá luôn ở mức thấp hơn ($\sim 3,5 \div 3,6 \times 10^{17}$), gần như phẳng từ $x = 0$ đến ~ 15 , chỉ tăng nhẹ và tập trung về $\sim 3,55 \times 10^{17}$ quanh trung tâm rồi giảm nhẹ sau $x = 15$. Mật độ electron cao tập trung (đường xanh dương) có thể tương ứng với vùng trung tâm plasma nhận được nhiều năng lượng từ trường RF nhất, dẫn đến ion hóa mạnh hơn. Mật độ đồng đều thấp hơn (đường đỏ, xanh lá) thường thuộc các vị trí xa tâm hơn hoặc gần thành buồng, nơi mật độ thấp và ít biến động. Chênh lệch này cho ta thấy cấu hình plasma có đỉnh ở trung tâm và giảm ra biên. Trong ứng dụng xử lý hạt giống, sự không đồng đều mật độ này có thể ảnh hưởng đến hiệu quả khử khuẩn và kích thích: vùng có mật độ electron cao sẽ khử khuẩn mạnh hơn. Do đó, hiểu rõ và cân bằng phân bố mật độ này là cần thiết để xử lý đồng đều mẫu (gia tăng

khuyết tán plasma hoặc điều chỉnh cấu hình điện từ để đạt độ đồng đều cao hơn). So với hai đường xanh lá và đỏ, đường xanh dương biểu thị mật độ electron cao và biến thiên lớn, trong khi hai đường kia cho thấy mật độ thấp và ổn định hơn. Kết quả này chỉ ra plasma có khả năng tập trung năng lượng tại một khu vực nhất định, cần được điều chỉnh để đạt sự đồng nhất mong muốn trong ứng dụng nông nghiệp.



Hình 6. So sánh mật độ điện tử giữa các mô hình

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khẳng định vai trò then chốt của việc mô hình hóa và mô phỏng các phần tử cơ điện tử trong việc phát triển hệ thống tạo plasma cảm ứng (ICP) phục vụ nông nghiệp thông minh. Trong bối cảnh sản xuất hiện đại, các hệ thống ICP là một tổ hợp vật lý cực kỳ phức tạp với sự tương tác đa chiều giữa điện từ trường, nhiệt động lực học và hóa học plasma. Việc sử dụng mô hình mô phỏng cho phép các nhà khoa học dự báo chính xác các chỉ số điện - cơ như công suất, và vị trí đặt cuộn dây tạo từ trường ngoài cho buồng tạo plasma, từ đó tìm ra được các thông số vận hành tối ưu cho hệ thống tạo plasma, tránh lãng phí năng lượng và bảo vệ thiết bị trước các tác động biến đổi đột ngột từ ngoài vào hệ thống. Bên cạnh đó dòng plasma tạo ra sẽ ổn định có thể sử dụng hiệu quả trên các đối tượng nông nghiệp có độ nhạy cảm cao như tế bào thực vật hay hạt giống, mô phỏng cung cấp dữ liệu quan trọng về thông lượng ion và nhiệt độ electron mà các phép đo thực nghiệm khó thực hiện toàn diện, giúp đảm bảo hiệu quả xử lý sinh học mà không gây hại cho mẫu.

Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc tối ưu hóa vị trí và công suất của cuộn dây tạo từ trường mang lại sự cải thiện vượt bậc về hiệu suất hệ thống. Thông qua thuật toán tối ưu hóa IPOPT trên phần mềm COMSOL, khi cho phép vị trí cuộn dây biến thiên trong khoảng $[-3, +3]$ cm và điều chỉnh công suất cuộn dây (tăng lên mức 1800W,

độ đồng nhất của plasma đã được cải thiện đáng kể (lên tới 39%) so với thiết kế ban đầu. Sự thay đổi cấu hình này không chỉ giúp phân bố mật độ electron đều khắp bề mặt xử lý mà còn làm giảm nhiệt độ electron trên bề mặt lò phản ứng, tạo điều kiện lý tưởng cho các ứng dụng tiêu diệt nấm bệnh trên hạt giống một cách hiệu quả và an toàn.

Trong thời gian tới, việc tiếp tục sử dụng các phần mềm mô phỏng đa vật lý như COMSOL Multiphysics sẽ là định hướng nghiên cứu trọng tâm để chuẩn hóa các thiết bị tạo plasma lạnh. Các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc mô hình hóa sâu hơn sự tương tác giữa các loài phản ứng (RONS) với từng loại tế bào cây trồng cụ thể nhằm xây dựng các kịch bản xử lý tối ưu cho từng loại hạt giống. Bên cạnh đó, việc tích hợp thêm các mô hình điều khiển thông minh dựa trên AI để tự động hóa quá trình hiệu chỉnh các tham số cơ điện tử trong thời gian thực sẽ giúp nâng cao năng suất và giá trị kinh tế, đưa công nghệ plasma trở thành một công cụ phổ biến và tin cậy trong nền nông nghiệp số bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Domonkos M., Tichá P., Trejbal J., Demo P., "Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry," *Applied Sciences*, 11(11), p.4809, 2021.
- [2]. Mohan B., Karthik C., Thingujam D., Pajerowska-Mukhtar K.M., Thomas V., Mukhtar M.S., "Plasma Optimization as a Novel Tool to Explore Plant-Microbe Interactions in Climate Smart Agriculture," *Microorganisms*, 13(1), p.146, 2025.
- [3]. Hashizume H., Kitano H., Mizuno H., Abe A., Hsiao S.N., Yuasa G., Tohno S., Tanaka H., Matsumoto S., Sakakibara H., Kita E., "Direct plasma treatment of caryopses after flowering in brewer's rice cultivar Yamadanishiki enhanced those grain qualities through "Smart Agriculture System", " *Scientific Reports*, 14(1), p.29454, 2024.
- [4]. Varilla C., Marcone M., Annor G.A., "Potential of cold plasma technology in ensuring the safety of foods and agricultural produce: A review," *Foods*, 9(10), p.1435, 2020.
- [5]. Ghazali M.H., Keener K.M., Pan Y., Zou S., Cheng J.H., "Cold plasma-integrated bio-based packaging for meat quality and safety monitoring: A mini review," *Food Wellness*, 1(1), p.100004, 2025.
- [6]. Priatama R.A., Pervitasari A.N., Park S., Park S.J., Lee Y.K., "Current advancements in the molecular mechanism of plasma treatment for seed germination and plant growth," *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), p.4609, 2022.
- [7]. Mildaziene V., Ivankov A., Sera B., Baniulis D., "Biochemical and physiological plant processes affected by seed treatment with non-thermal plasma," *Plants*, 11(7), p.856, 2022.

- [8]. Randeniya L.K., de Groot G.J., "Non-thermal plasma treatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: A review," *Plasma Processes and Polymers*, 12(7), 608-623, 2015.
- [9]. Čechová L., Marinova P., Benova E., Topalova Y., Yotinov I., Todorova Y., Šimoníková L., Novotný K., Buday J., Modlitbová P., Kozáková Z., "Plasma treatment of water and wastewater as a promising approach to promote plant growth," *Journal of Physics D: Applied Physics*, 58(11), p.115204, 2025.
- [10]. Mohandoss S., Mohan H., Balasubramaniyan N., Loganathan S., "Non-Thermal Plasma Treatment of Dye-Contaminated Wastewater: A Sustainable Approach for Pollutant Degradation and Enhanced Plant Growth," *Plasma*, 8(4), p.40, 2025.
- [11]. Hopwood J., "Review of inductively coupled plasmas for plasma processing," *Plasma Sources Science and Technology*, 1(2), 109-116, 1992.
- [12]. Mazarakioti E.C., Zotos A., Thomatou A.A., Kontogeorgos A., Patakas A., Ladavos A., "Inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), a useful tool in authenticity of agricultural products' and foods' origin," *Foods*, 11(22), p.3705, 2022.
- [13]. Zhao Y., Zhou X., Zhang J., Song S., Zhao Y., "Improving plasma uniformity in the inductively coupled plasma by external magnetic field," *Physics of Plasmas*, 31(8), 2024.
- [14]. Hill S.J. ed., *Inductively coupled plasma spectrometry and its applications*. John Wiley & Sons, 2008.
- [15]. Brezmes A.O., Breittkopf C., "Fast and reliable simulations of argon inductively coupled plasma using COMSOL," *Vacuum*, 116, 65-72, 2015.
- [16]. Bernardi D., Colombo V., Ghedini E., Mentrelli A., "Three-dimensional modelling of inductively coupled plasma torches," *The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, 22(1), 119-125, 2003.
- [17]. Degrez G., Vanden Abeele D., Barbante P., Bottin B., "Numerical simulation of inductively coupled plasma flows under chemical non-equilibrium," *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 14(4), 538-558, 2004.
- [18]. Jia C., Linhong J., Yu Z., Yixiang S., "Fluid model of inductively coupled plasma etcher based on COMSOL," *Journal of Semiconductors*, 31(3), p.032004, 2010.
- [19]. Bolot R., Coddet C., Schreuders C., Leparoux M., Siegmann S., "Modeling of an inductively coupled plasma for the synthesis of nanoparticles," *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(5), 690-697, 2007.
- [20]. Vajdi M., Moghanlou F.S., Sharifianjazi F., Asl M.S., Shokouhimehr M., "A review on the Comsol Multiphysics studies of heat transfer in advanced ceramics," *Journal of Composites and Compounds*, 2(2), 35-43, 2020.
- [21]. Iliev I.K., Gizzatullin A.R., Filimonova A.A., Chichirova N.D., Beloev I.H., "Numerical simulation of processes in an electrochemical cell using COMSOL Multiphysics," *Energies*, 16(21), p.7265, 2023.
- [22]. Shahbazian A., Salem M.K., Ghoranneviss M., "Artificial intelligence-driven optimization of ICP source design using COMSOL simulations," *Physics of Plasmas*, 32(11), 2025.
- [23]. Han C.K., Yang Y.Y., Liu W.F., Cheng J., Lu Y.J., Ji L.H., "Simulation of Ion Energy Distributions in ICP Reactor with Bias Voltages Using COMSOL." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 281, 1, p. 012051, IOP Publishing, 2017.
- [24]. Lin Z., Xie B., Yu W., Zhou X., Liu L., "Multiphysics Coupling Simulation of Inductively Coupled Plasma (ICP): Regulation Mechanism of Coil Power on Temperature Field," in *China Conference on Transportation and Energy Integration Technologies*, 534-540, Singapore: Springer Nature Singapore, 2025.
- [25]. Dussart R., Tillocher T., Lefauchaux P., Boufnichel M., "Plasma cryogenic etching of silicon: from the early days to today's advanced technologies," *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(12), p.123001, 2014

AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Thai Hoc¹, Ngo Tri Duong¹, Nguyen Xuan Truong¹,
Le Vu Quan¹, Nguyen Thi Hien¹, Nguyen Duc Duong¹,
Pham Truong Son²**

¹Faculty of Engineering, Vietnam National University of Agriculture, Vietnam

²Student in Control and Automation Engineering, Vietnam National University of Agriculture, Vietnam