

Mô hình hai chiều trong mô phỏng ảnh hưởng của bias điện áp tới dòng hạt

Two-Dimensional Model for Simulating Electrical Biasing Effects on Particle Flux

Lê Thị Quỳnh Trang^{a,b*}
Le Thi Quynh Trang^{a,b*}

^aViện Nghiên cứu và Phát triển Công Nghệ Cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^aInstitute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

^bKhoa Môi trường và Khoa học Tự nhiên, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^bFaculty of Environment and Natural Sciences, School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

(Ngày nhận bài: 17/06/2025, ngày phản biện xong: 27/06/2025, ngày chấp nhận đăng: 05/11/2025)

Tóm tắt

Mô hình mô phỏng không gian hai chiều được xây dựng để kiểm nghiệm lại ảnh hưởng của bias điện áp lên dòng hạt plasma và thông lượng của chúng tác động lên bề mặt kim loại. Trong mô hình này, dòng hạt electron và ion được thêm vào liên tục và di chuyển xoay quanh các đường sức từ để tiến tới bề mặt kim loại. Kết quả cho thấy rằng, bias điện áp ngăn chặn số lượng lớn các hạt electron và ion tiến tới bề mặt kim loại, giảm tải được dòng hạt tấn công vào khu vực này.

Từ khóa: mô phỏng hai chiều, mô phỏng một chiều, bias điện áp, thông lượng

Abstract

A two-dimensional simulation model is developed to verify the effects of electrical biasing on particle transport and its flux to the material. In this model, the flow of electrons and ions is continuously pumped into the system, moving along the magnetic field line to reach the materials. The numerical results show that electrical biasing prevents many electrons and ions from hitting the material, reducing the particle flux attacking this region.

Keywords: two-dimensional simulation, one-dimensional simulation, electrical biasing, particle flux

1. Đặt vấn đề

Trong các thiết bị điện từ liên quan đến các hạt plasma, những dòng nhiệt hạt có nguồn năng lượng lớn đều có khả năng làm hư hỏng kim loại khi tiếp xúc trực tiếp với chúng. Vỏ lò phản ứng nhiệt hạch, vỏ các tàu vũ trụ, vỏ tàu vệ tinh là những ví dụ cho khu vực chịu sự tấn công trực

tiếp của các dòng nhiệt cao này [1-9]. Đối với trường hợp thiết bị là lò phản ứng nhiệt hạch, câu hỏi được đặt ra trong việc nghiên cứu, đặt mục tiêu đưa lò phản ứng nhiệt hạch vào thực tiễn hiện nay là làm thế nào để có thể giảm tải được dòng nhiệt lớn này đến tấn công vào vùng thu gom nhiệt (khu vực divertor), tránh hư hại thiết

*Tác giả liên hệ: Lê Thị Quỳnh Trang
Email: letquynhtrang4@duytan.edu.vn

bị cũng như thất thoát năng lượng, chất phóng xạ ra môi trường bên ngoài. Có rất nhiều phương pháp đã được đề xuất, thực hiện để giải quyết vấn đề này [10-15]. Hai nguyên lý quan trọng cho các phương pháp giảm nhiệt được áp dụng. Một là làm cho dòng nhiệt bị tiêu tán nhiều nhất có thể bằng bức xạ hoặc thông qua va chạm với các hạt trung hòa tồn tại trong khu vực này. Ý tưởng này hiện tại vẫn chưa được thực thi một cách khả quan vì nó đòi hỏi sự điều chỉnh trong hiệu suất của lõi lò. Phương án thứ hai là tăng sự hình thành các dòng đối lưu. Một trong những cách có thể triển khai phương án này chính là sử dụng bias điện ở divertor [14-15].

Bias điện đã được thực hiện ở một vài lò phản ứng nhiệt hạch như lò DIII-D và TdeV [15]. Phương pháp này được triển khai bằng cách kết nối khu vực divertor với các giá trị điện thế khác nhau nhằm điều khiển mật độ dòng hạt electron và ion, điều khiển dòng chảy theo phương ngang được tạo ra dựa vào sự dịch chuyển $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, và tăng dòng chảy của các hạt plasma ở khu vực rìa của lò. Việc này giúp cho dòng plasma được trải rộng ở diện tích lớn hơn theo bề ngang của các thanh chắn ở divertor, giảm thiểu sự tập trung nguồn nhiệt tại một vị trí. Do đó, phương pháp này có thể giảm được dòng nhiệt mang năng lượng cao tấn công bề mặt kim loại khu vực divertor.

Trong mô phỏng, nghiên cứu về phương thức hoạt động cũng như ảnh hưởng của bias điện vẫn đang còn nhiều hạn chế. Nguyên nhân chủ yếu do khó khăn trong việc xây dựng mô hình mô phỏng sát với thực tế. Trong [16], nhóm chúng tôi đã mô phỏng ảnh hưởng của bias điện áp tới dòng nhiệt hạt ở không gian một chiều. Tuy nhiên, sự di chuyển của dòng hạt theo phương ngang của các thanh chắn divertor cũng như ảnh hưởng của sự dịch chuyển $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ không được xem xét ở bài báo này. Đây là mặt hạn chế của mô hình một chiều. Chính vì điều đó, chúng tôi đã mở rộng mô hình mô phỏng sang không gian hai chiều để nghiên cứu ảnh hưởng của bias điện

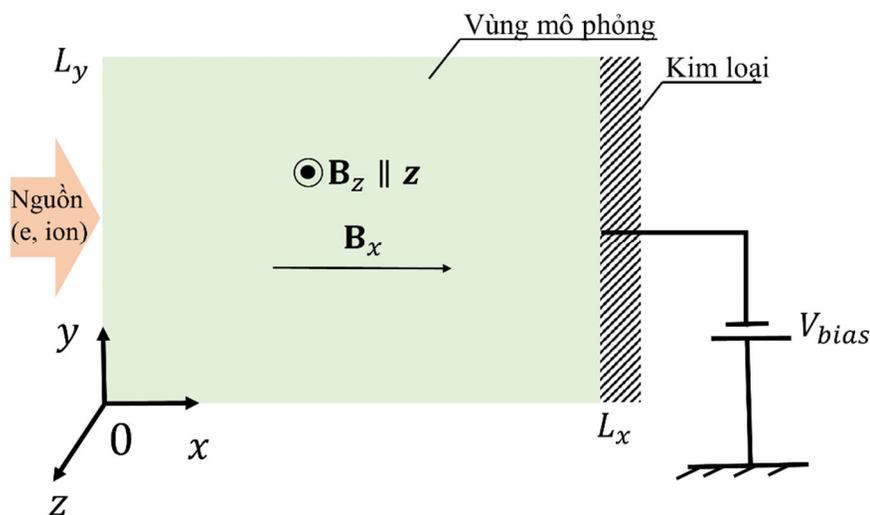
tới dòng hạt tấn công vào bề mặt kim loại. Bài báo này tập trung phân tích kết quả thu được khi sử dụng bias điện áp khi xem xét hai chiều không gian. Mục 2 mô tả mô hình nghiên cứu cũng như phép mô phỏng được sử dụng. Mục 3 bàn luận về kết quả thu được khi sử dụng bias điện áp. Mục 4 đưa ra kết luận cho việc sử dụng phương pháp bias điện áp trong giảm thiểu dòng nhiệt hạt.

2. Mô hình nghiên cứu

Để bao gồm sự di chuyển của dòng hạt dựa vào dịch chuyển $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ được chính xác hơn, mô hình mô phỏng Particle-In-Cell (PIC) được sử dụng. Mô hình này dựa trên việc theo dõi chuyển động của từng hạt plasma theo thời gian và không gian để mô phỏng các trạng thái vĩ mô của hệ plasma [17]. PIC có thể giải quyết dễ dàng các bài toán có liên quan đến tác động của sự dịch chuyển ∇B hay $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ mà các mô hình khác còn gặp nhiều hạn chế [17-19]. Tuy nhiên, để thực hiện những điều này thì mô hình PIC đòi hỏi một lượng lớn bộ nhớ lưu trữ cũng như tiêu tốn lượng lớn thời gian máy tính thực hiện chương trình. Do đó, việc sử dụng mô hình PIC trong nghiên cứu mô phỏng hạt vẫn còn hạn chế. Trong báo cáo này, khu vực nghiên cứu được chọn có kích thước vừa đủ để quan sát trạng thái của plasma cũng như để PIC có thể hoạt động tốt mà không tốn quá nhiều thời gian và bộ nhớ. Tất cả các giá trị bước nhảy theo thời gian Δt , bước nhảy không gian $(\Delta x, \Delta y)$ được lựa chọn sao cho thỏa mãn điều kiện duy trì tính ổn định cao của PIC [18]. PIC hoạt động bằng cách giải quyết các phương trình động lực học của hạt như phương trình chuyển động Newton, phương trình Poisson theo quy trình xoay tròn. Quy trình hoạt động của PIC dựa trên vị trí của hạt để tính toán điện thế, điện trường thông qua phương trình Poisson, sau đó dựa vào điện trường, từ trường để xác định lực Lorentz tác động lên mỗi hạt để hạt di chuyển; vận tốc và vị trí mới của hạt được cập nhật, vòng hoạt động của PIC được bắt đầu lại [17].

Mô hình mô phỏng không gian hai chiều được xây dựng dựa trên mô hình mô phỏng không gian một chiều đã thực hiện ở nghiên cứu trước đây [16]. Chính vì thế, hệ mô phỏng được thực hiện ở nghiên cứu này bao gồm toàn bộ những điều kiện, cách thức hoạt động được thiết lập cho không gian một chiều. Một diện tích nhỏ hình vuông ngay trước bề mặt kim loại khu vực chịu sự tấn công trực tiếp từ dòng nhiệt hạt được đem đi xem xét (như Hình 1). Các hạt plasma được thêm vào hệ theo mỗi bước nhảy thời gian ở khu vực nguồn (lề trái) và bị hấp thụ hoàn toàn ở bề mặt kim loại (lề phải). Để nghiên cứu rõ hơn về ảnh hưởng của

phương pháp bias điện, hai trường hợp có sử dụng và không sử dụng bias điện được so sánh. Trong trường hợp không sử dụng bias điện, điện thế tại bề mặt kim loại được xem như là điện thế biếm định, tất cả các vị trí trên bề mặt kim loại đều có chung một giá trị điện thế. Bias điện được thực hiện ở bề mặt kim loại ngay trên lề phải. Khi sử dụng bias điện áp, giá trị điện thế tại bề mặt kim loại bằng với giá trị của điện áp được đưa vào. Điện thế tại vị trí nguồn được giả sử bằng không. Hai biên theo phương y được áp dụng điều kiện tuần hoàn. Các hạt bị thoát ra ngoài tại biên này sẽ được thêm vào hệ tại biên đối diện.



Hình 1. Mô hình sử dụng cho mô phỏng. Các hạt plasma được thêm vào hệ từ vị trí nguồn. Bias điện áp được kết nối vào bề mặt kim loại.

Từ trường theo phương x và y được xem gần như xấp xỉ là hằng số theo thời gian và không gian. Từ trường theo phương z tỉ lệ nghịch với chiều dài theo phương x của hệ. Khi các hạt plasma di chuyển theo phương ngang đến va chạm với bề mặt kim loại, một điện trường theo phương x được hình thành. Điện trường theo phương x và từ trường theo phương z kết hợp với nhau tạo ra sự dịch chuyển của các hạt theo phương y (sự dịch chuyển $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$). Đây là điểm khác biệt giữa việc xem xét không gian hai chiều và không gian một chiều. Trong không gian hai chiều, sự di chuyển đa chiều của hạt được bao gồm hệ dựa vào phương trình chuyển động của hạt.

Trong nghiên cứu này, hạt được xét chỉ bao gồm các hạt electron và ion. Các hạt trung hòa và những hạt khác không bao gồm trong hệ. Giả sử rằng không có bất kỳ hạt electron và ion nào ở tại thời điểm ban đầu, các hạt được thêm vào hệ trong suốt quá trình diễn ra phép mô phỏng. Số lượng hạt được thêm vào mỗi bước nhảy thời gian phụ thuộc vào thông lượng của nó. Electron và ion có cùng mật độ hạt ở vị trí trước nguồn. Năng lượng của các hạt electron kT_{e0} cao hơn gấp hai lần so với năng lượng của các hạt ion kT_{i0} ở vị trí đầu vào. Lực Lorentz tác động lên mỗi hạt làm cho nó di chuyển phụ thuộc vào tích có hướng của vận tốc và từ trường. Do đó vận

tốc của các hạt được xét theo cả ba chiều không gian trong khi vị trí của chúng có thể được mô tả theo hai chiều. Các giá trị cần thiết được sử dụng trong hệ được liệt kê ở Bảng 1. Mặc dù các giá trị này nhỏ hơn rất nhiều so với thực tế nhưng nó được tính toán để đảm bảo hệ mô phỏng thu được kết quả hợp lý, có thể dùng để phân tích chính xác hiện tượng vật lý có thể xảy ra. Tương tự như ở không gian một chiều, các đại lượng của hạt cũng được chuẩn tắc hóa theo dạng:

$\hat{x} \leftarrow x/\lambda_{De0}$, $\hat{t} \leftarrow \omega_{pe0}t$, $\hat{v} \leftarrow v/v_{e0}$, $\hat{m} \leftarrow m/m_e$, $\hat{\phi} \leftarrow e\phi/m_e v_{e0}^2$, trong đó e đại diện cho điện tích hạt electron; ω_c , ω_p , λ_D lần lượt là tần số cyclotron, tần số plasma và chiều dài Debye [16]. Các giá trị m, v, t, x đại diện cho khối lượng, vận tốc, thời gian và vị trí của hạt. Ngoài ra, 0 biểu thị giá trị của các đại lượng theo giá trị đầu vào ban đầu.

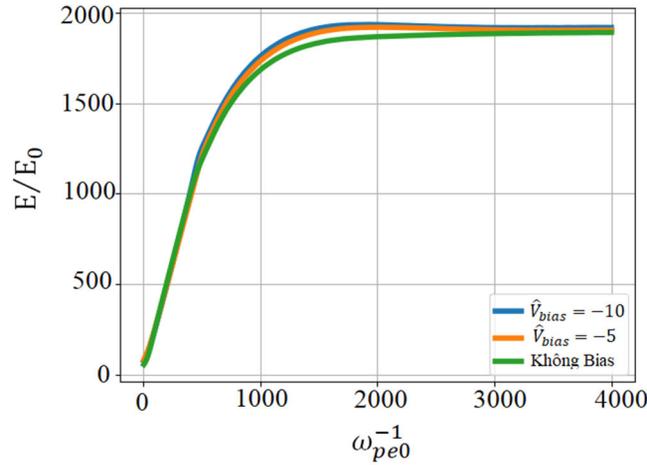
Bảng 1. Các giá trị được sử dụng trong hệ

Kích thước của hệ	$L_x = L_y \approx 42 \lambda_{De0}$
Tỉ lệ giữa khối lượng electron và ion	$m_i/m_e = 1836$
Tỉ lệ giữa nhiệt độ electron và ion	$kT_{e0}/kT_{i0} = 2$
Từ trường	$B_x = 0.2 \text{ T}$ và $B_{z,cyc} \text{ đại} = 1.0 \text{ T}$
Điện áp bias	$ V_{bias} = 10 \frac{kT_{e0}}{e}$
Bước nhảy thời gian	$\Delta x = \Delta y \approx 0.085 \lambda_{D0}$
Bước nhảy không gian	$\Delta t = 0.1 \omega_{pe0}^{-1}$

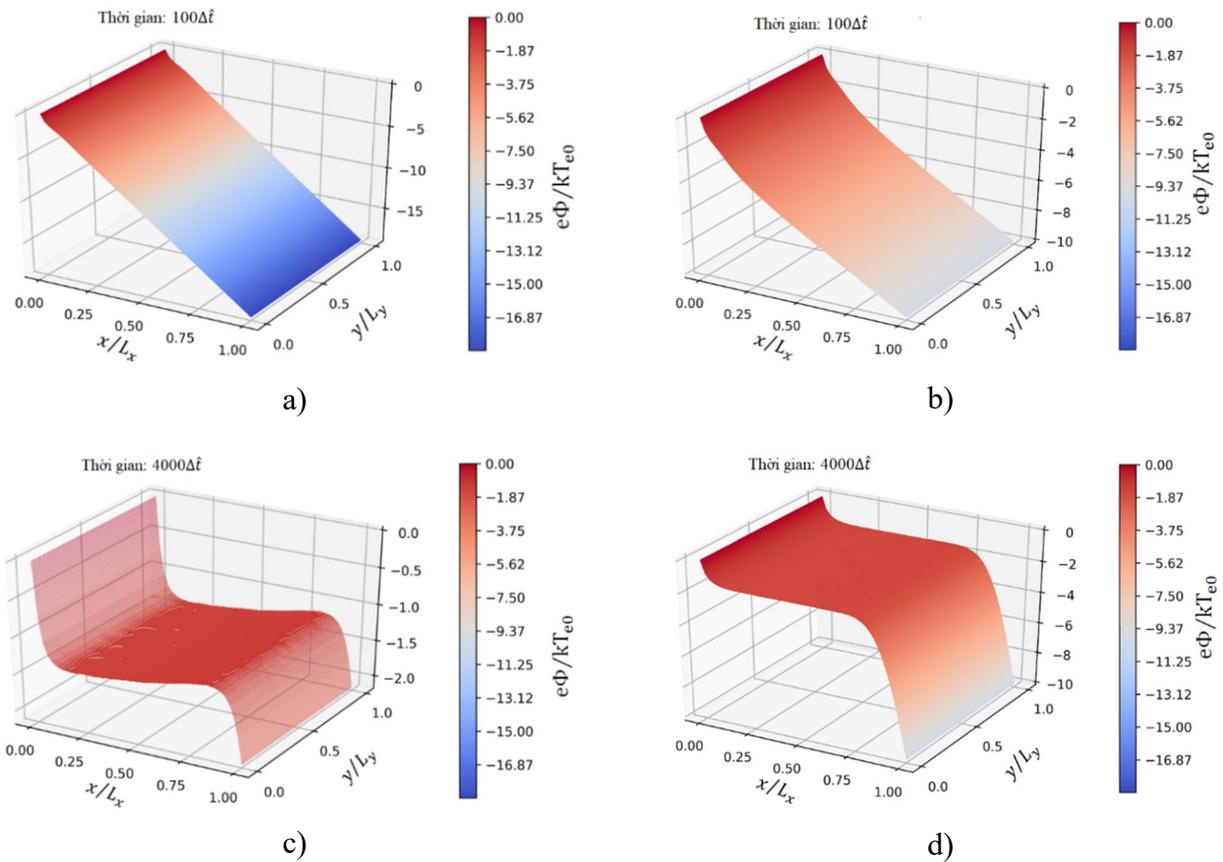
3. Kết quả và thảo luận

Ngay thời điểm bắt đầu, các hạt electron và ion sẽ được tuần tự thêm vào hệ trong mỗi bước nhảy thời gian. Ở những giai đoạn ban đầu này, hạt plasma còn ở một vị trí cách khá xa so với bề mặt nên chúng không bị thất thoát ra bên ngoài. Tổng số lượng hạt cũng như tổng động năng E của hệ tăng lên nhanh chóng. Sau một thời gian, các hạt plasma có thể tiến tới bề mặt kim loại và bị hấp thụ tại đây, hình thành nên lớp vỏ bọc điện thế để chống lại sự mất mát của các hạt này tại bề mặt kim loại. Điều này làm định hình lại luồng di chuyển của các hạt plasma có trong hệ. Một lớp vỏ bọc điện thế cũng được hình thành ngay tại khu vực nguồn nhằm giảm số lượng các hạt thoát ra ngoài tại vị trí nguồn. Sau quá trình định hình, xác định lại dòng chảy, hệ sẽ tiến vào trạng thái ổn định hơn. Điều này cho thấy rõ ở

đồ thị biểu diễn động năng E của hệ, được mô tả ở Hình 2. Động năng của hệ bắt đầu tăng lên đột ngột từ những thời điểm ban đầu khi hạt plasma được thêm liên tục vào hệ và chúng chưa bị thất thoát ra ngoài. Trong giai đoạn từ 1000 Δt tới 2000 Δt , sự tăng lên này bắt đầu chậm lại. Sau thời gian 2000 Δt , tổng động năng của chúng hầu như không còn tăng nữa mà giữ ổn định với thời gian. Trạng thái này gọi là trạng thái cân bằng. Khi hệ đạt được trạng thái cân bằng, không chỉ động năng mà tất cả các giá trị trong hệ đều duy trì ổn định, không biến đổi so với thời gian. Tại đây, số lượng các hạt được thêm vào hệ bằng với số lượng hạt thất thoát ra ngoài. Hệ mô phỏng được duy trì và dừng lại sau khi đạt được trạng thái cân bằng một thời gian (sau 4000 Δt). Các giá trị mật độ, thông lượng của hạt sử dụng trong báo cáo này được đo lường tại thời điểm hệ cân bằng ổn định.



Hình 2. Sự phụ thuộc của động năng E có trong hệ theo thời gian. Hệ đạt trạng thái cân bằng sau 2000 Δt .



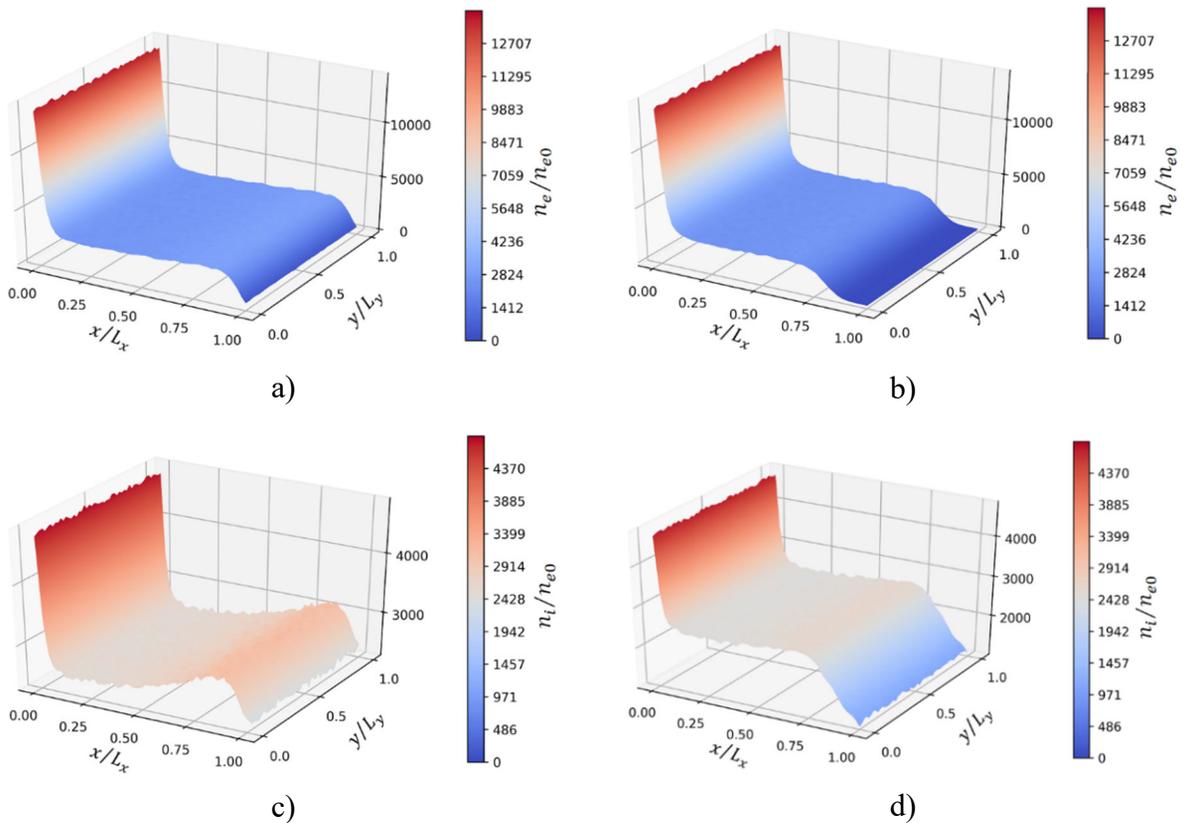
Hình 3. Điện thế của hệ tại những bước thời gian ban đầu ($100\Delta t$) và tại thời điểm hệ đạt được trạng thái cân bằng ($4000\Delta t$). Hình a và c đại diện cho trường hợp không sử dụng bias trong khi Hình b và d hiển thị điện thế khi sử dụng bias điện áp $\hat{V}_{bias} = -10$.

Hình 3 mô tả điện thế của hệ tại thời điểm những bước tính ban đầu ($100\Delta t$) và thời điểm hệ đạt được trạng thái cân bằng ($4000\Delta t$). Tại những thời điểm ban đầu, khi các hạt plasma chưa di chuyển tới bề mặt kim loại, điện thế của

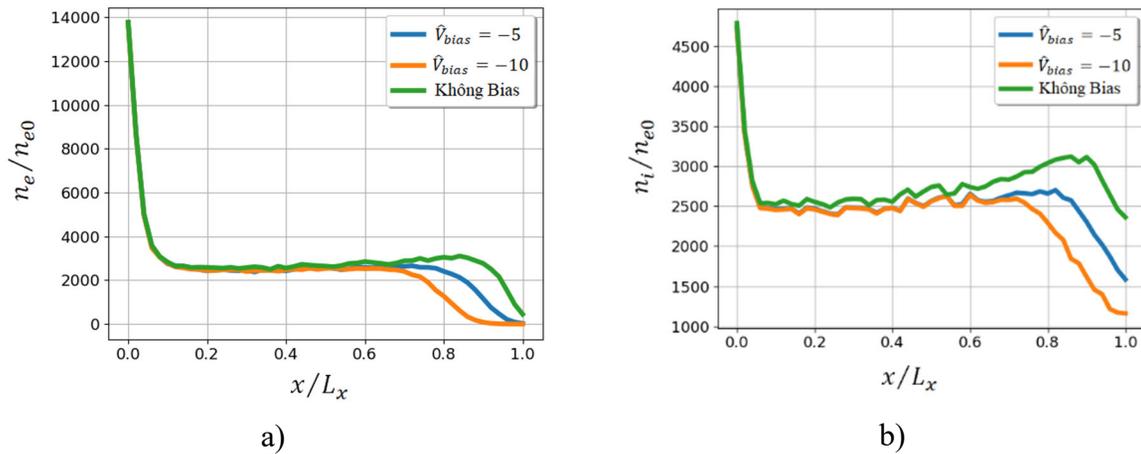
hệ hầu như tuân thủ theo đường tuyến tính theo phương ngang, phương di chuyển của dòng hạt (Hình 3a, và 3b). Khi hạt plasma di chuyển trong hệ, điện thế bắt đầu tăng lên, và khi chúng di chuyển đủ lâu với số lượng đủ lớn giúp hệ đạt

tới trạng thái cân bằng, lớp vỏ bọc điện thế được hình thành ở sát khu vực nguồn và khu vực gần lề phải (Hình 3c và 3d). Thông thường, lớp vỏ bọc điện thế có độ rộng khoảng vài lần kích thước Debye. Ở những khu vực này, mật độ của electron và ion thường khác nhau. Lớp vỏ bọc điện thế ở trước bề mặt kim loại nhằm chống lại sự thất thoát của các hạt electron do chúng di chuyển nhanh gấp nhiều lần hơn so với các hạt ion. Điện thế âm hình thành và thu hút nhiều ion tiến đến khu vực này. Ngược lại, ở khu vực đầu nguồn, số lượng các hạt electron lớn hơn nhiều so với ion do các electron tham gia vào hệ không thể tiến tới bề mặt kim loại đã bị điều hướng

quay ngược lại khu vực nguồn. Ở vùng trung tâm của khu vực đang xét, mật độ của electron và ion gần như là bằng nhau. Điều này thể hiện qua sự không thay đổi của điện thế theo phương x tại thời điểm cân bằng. Hình 3 cũng cho thấy sự khác nhau giữa điện thế ở trường hợp không sử dụng (Hình 3a và 3c) và sử dụng (Hình 3b và 3d) bias điện áp. Điện áp mang giá trị âm được thêm vào ở bề mặt kim loại. Điện áp âm này thu hút ion tiến tới bề mặt kim loại và hạn chế các hạt electron di chuyển tới nó (vì ion mang điện tích dương trái dấu với điện áp bias và các hạt electron mang điện tích âm cùng dấu với điện áp bias).



Hình 4. Mật độ của electron (hình trên) và ion (hình dưới) khi hệ đạt trạng thái cân bằng ở trường hợp không sử dụng (Hình a, c) và sử dụng bias điện áp $\hat{V}_{bias} = -10$ (Hình b, d).



Hình 5. Mặt cắt một chiều theo phương x của mật độ electron (Hình a) và ion (Hình b). Kết quả này trùng khớp với kết quả thu được từ mô hình mô phỏng một chiều không gian [16].

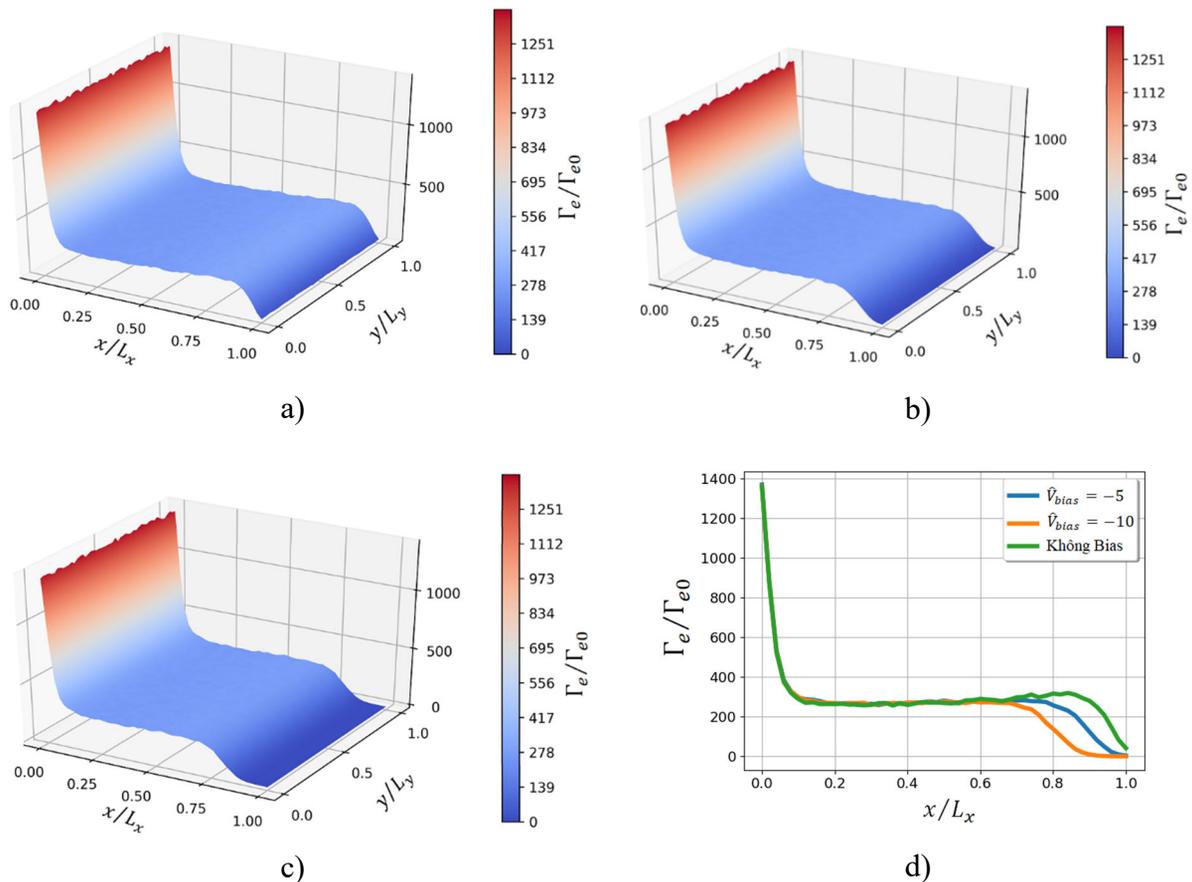
Mật độ của các hạt electron và ion ở thời điểm cân bằng được hiển thị lần lượt ở Hình 4. Hình 4a mô tả mật độ electron cho trường hợp không sử dụng bias điện áp. Hình 4b mô tả mật độ của electron khi sử dụng bias điện áp âm có giá trị chuẩn tắc hóa bằng 10. Tương tự mật độ của ion trong trường hợp không sử dụng và sử dụng bias điện áp được mô tả lần lượt ở Hình 4c và d. Tất cả các hình biểu diễn mật độ đều cho thấy không có sự khác biệt theo phương y về mật độ của các hạt. Điều này được lý giải do điều kiện tuần hoàn được áp dụng tại các biên phương y và các đại lượng đầu vào không phụ thuộc vào y. Nên mặc dù các hạt có di chuyển theo phương y nhờ sự dịch chuyển $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ và các yếu tố khác, không có sự khác biệt lớn xảy ra cho các đại lượng ở phương y này. Do đó, hình ảnh một chiều theo phương x của các đại lượng có thể đem đi xem xét (như ở Hình 5). Nhìn vào những hình ảnh hai chiều hoặc một chiều, cả electron và ion đều cho thấy sự khác biệt của việc sử dụng và không sử dụng bias điện áp. Tại vị trí đầu nguồn, mật độ của các hạt là như nhau cho cả hai trường hợp không và có sử dụng bias điện áp (do điều kiện thêm hạt đầu vào quy định). Tuy nhiên, bias điện áp âm tại bề mặt kim loại hạn chế các electron tiến tới nó (dựa trên nguyên tắc cùng dấu điện tích), số lượng electron tham gia vào hệ giảm. Sự giảm của electron này kéo theo số lượng hạt

ion tham gia vào hệ giảm. Các electron có xu hướng tập trung tại vị trí nguồn hơn là đi tới khu vực xa hơn trong hệ. Hệ quả là các ion cũng bị giữ lại khu vực này. Chỉ một vài ion có vận tốc đủ lớn vượt qua sức hút của đám mây electron gần vùng nguồn có thể tiến tới bề mặt kim loại. Từ đó, số lượng ion tiến tới bề mặt kim loại giảm sút khi bias điện áp được sử dụng.

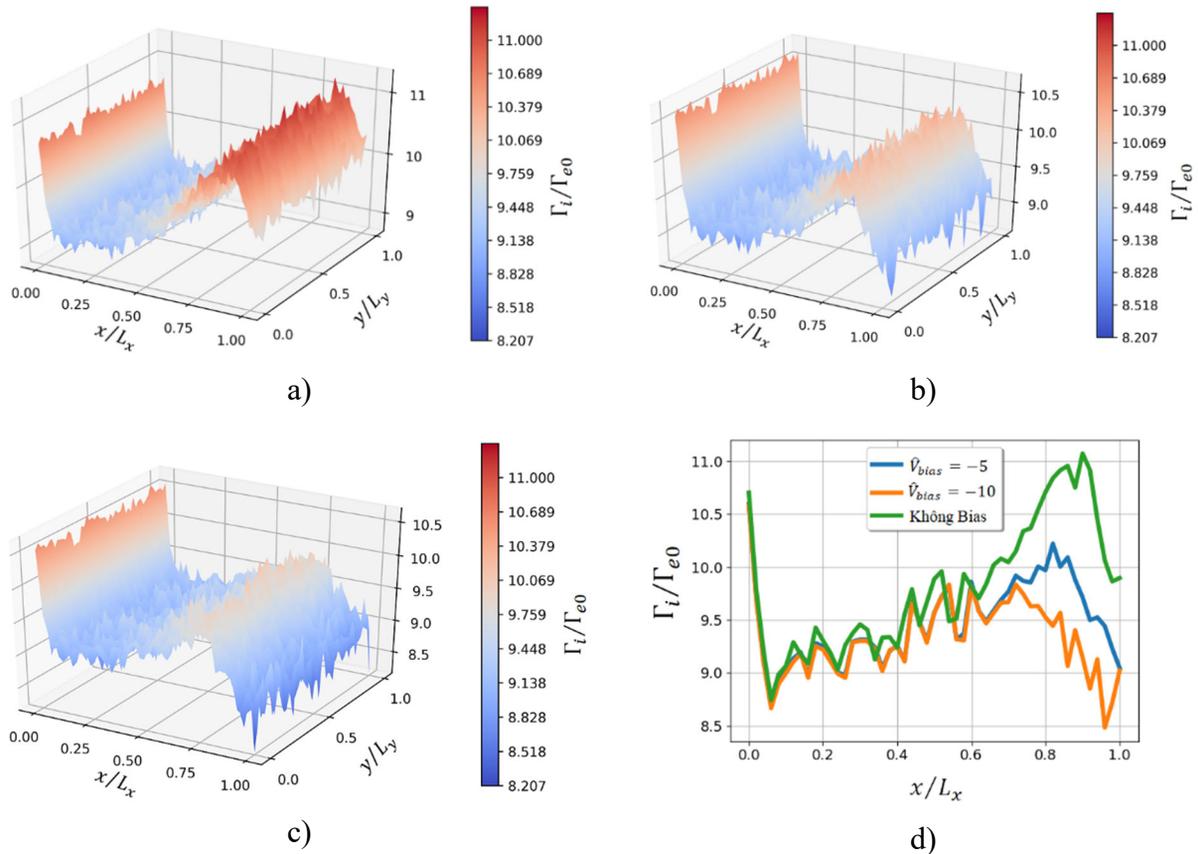
Sự khác biệt trong mật độ của hạt ảnh hưởng tới thông lượng của chúng. Thông lượng của hạt ở các trường hợp không và có sử dụng bias điện áp mang giá trị $V_{bias} = -5$ và -10 , và hình ảnh mặt cắt một chiều theo phương x của nó được mô tả lần lượt ở Hình 6a, b, c, d cho electron và Hình 7a, b, c, d cho ion. Thông lượng của hạt giảm xuống do số lượng các hạt tiến tới bề mặt kim loại đã bị hạn chế. Ngay trước bề mặt kim loại, thông lượng của cả electron và ion ở trường hợp có sử dụng bias điện áp giảm gần như bằng không so với trường hợp ban đầu không sử dụng bias điện áp. Nói cách khác, bias điện áp giúp giảm thông lượng hạt tấn công bề mặt kim loại. Kết luận này đồng nhất với kết luận được rút ra ở mô hình mô phỏng không gian một chiều [16]. Kết quả mặt cắt một chiều theo phương x của mật độ (Hình 5) và thông lượng (Hình 6d và 7d) trùng khớp với kết quả thu được từ mô hình mô phỏng một chiều ở nghiên cứu trước đây [16]. Điều này cho phép khẳng định sự chính xác của

mô hình mô phỏng hai chiều đã được xây dựng. Hình ảnh thu được của ion bị nhiễu loạn, gồ ghề hơn hình ảnh thu được của electron. Nguyên nhân chủ yếu do các hạt electron nhỏ nhẹ hơn gấp ngàn lần so với các hạt ion. Chúng dễ dàng di chuyển linh hoạt bên trong hệ. Toàn bộ vị trí bên trong hệ dễ dàng bị lấp đầy. Trong khi đó, các hạt ion có kích thước và khối lượng lớn hơn. Chúng tạo ra cách biệt lớn giữa hai vị trí trong mỗi lần dịch chuyển, dẫn đến hình ảnh thu được

không được mịn và mượt mà như hình ảnh thu được từ các hạt electron. Sai số từ việc mô phỏng sự dịch chuyển của các hạt này có thể được giảm tránh bằng cách tăng số lượng các hạt electron và ion có trong mỗi một đơn vị diện tích hoặc lấy trung bình cộng theo thời gian vài bước nhảy của các đại lượng khi xét kết quả tại một thời điểm tức thời. Các phương pháp này đã được áp dụng để thu được các kết quả có trong bài báo này.



Hình 6. Thông lượng của electron khi hệ đạt trạng thái cân bằng ở trường hợp không sử dụng (Hình a) và sử dụng bias điện áp $V_{bias} = -5$ (Hình b), $V_{bias} = -10$ (Hình c). Mặt cắt một chiều theo phương x của các trường hợp được mô tả ở Hình d.



Hình 7. Thông lượng của ion khí hệ đạt trạng thái cân bằng ở trường hợp không sử dụng (Hình a) và sử dụng bias điện áp $V_{bias} = -5$ (Hình b), $V_{bias} = -10$ (Hình c). Mặt cắt một chiều theo phương x của các trường hợp được mô tả ở Hình d.

4. Kết luận

Ảnh hưởng của bias điện áp lên mật độ và thông lượng của các hạt plasma ở khu vực trước bề mặt kim loại được mô phỏng theo không gian hai chiều. Kết quả này cho thấy tác dụng giảm tải dòng hạt mang năng lượng cao tới bề mặt kim loại khi bias điện áp được kết nối vào kim loại. Kết quả trong phép mô phỏng không gian hai chiều cũng đồng nhất với kết quả mô phỏng trong không gian một chiều. Kết quả này giúp khẳng định rõ ràng thêm về tác động của phương pháp bias này trong việc giảm tải dòng nhiệt. Kết quả này cũng giúp xác minh tính đúng đắn của mô hình mô phỏng hai chiều, cho phép phát triển và xây dựng nên những mô hình mô phỏng phức tạp hơn bằng việc áp dụng thêm các điều kiện sát với thực tế, giúp cho mô hình mô phỏng và thực tiễn được tiến gần nhau hơn. Ví dụ, mô hình mô

phỏng mới có thể xem xét thêm sự va chạm giữa các hạt mang điện, cải thiện các điều kiện biên hoặc xem xét trường hợp từ trường bất đối xứng. Hệ mô phỏng bao gồm những yếu tố này sẽ được chúng tôi phát triển và triển khai ở các nghiên cứu trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện dưới sự hướng dẫn của GS. Yasuhiro Suzuki (Đại học Hiroshima, Nhật Bản), TS. Hiroki Hasegawa (Viện Nghiên cứu Quốc gia về Phản ứng Nhiệt hạch (NIFS), Nhật Bản), TS. Toseo Moritaka (NIFS) trong thời gian tôi theo học nghiên cứu sinh tại Đại học SOKENDAI, Nhật Bản. Tôi xin gửi lời biết ơn chân thành tới các giáo sư của mình đã hỗ trợ, giúp đỡ tôi hoàn thành nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Anderson, P. C. (2012). "Characteristics of spacecraft charging in low Earth orbit". *J. Geophys. Res. Space Phys.* 117, A7.
- [2] Chen, H. F. et al. (2009). "High energy charged particle experiment: A payload proposal to KuaFu-B mission". *Adv. Space Res.* 44(1), 39–45.
- [3] Engelhart, D. P., Plis, E. A., Ferguson, D., Johnston, W. R., Cooper, R., & Hoffmann, R. C. (2019). *Space plasma interactions with spacecraft materials. Plasma science and technology-basic fundamentals and modern applications*, 225-245.
- [4] Lai, Shu T. (1989). "An overview of electron and ion beam effects in charging and discharging to spacecraft." *IEEE Transactions on Nuclear Science* 36.6: 2027-2032.
- [5] Ortner, H. M., and Stadermann, F. J. (2009). "Degradation of space exposed surfaces by hypervelocity dust bombardment, and refractory materials for space." *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 27.6949-956.
- [6] Pilipenko, V. et al. (2006). "Statistical relationships between satellite anomalies at geostationary orbit and high-energy particles". *Adv. Space Res.* 37(6), 1192–1205.
- [7] Shen, Zicai, et al. (2019). "Protection of materials from space radiation environments on spacecraft." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 585. No. 1. IOP Publishing.
- [8] Crisanti, F. et al. (2011). "FAST: A European ITER satellite experiment in the view of DEMO". *Fusion Eng. Des.* 86(6–8), 497–503.
- [9] Janeschitz, G. & Jct, I. (2001). "Plasma-wall interaction issues in ITER". *J. Nucl. Mater.* 290, 1–11.
- [10] Le, T. et al. (2021). "Particle simulation of controlling particle and heat flux by magnetic field". *Plasma Fusion Res.* 16, 1401103–1401103.
- [11] Matthews, G. F. (1995). "Plasma detachment from divertor targets and limiters". *J. Nucl. Mater.* 220, 104–116.
- [12] Schmitz, O. et al. (2016). "Three-dimensional modeling of plasma edge transport and divertor fluxes during application of resonant magnetic perturbations on ITER". *Nucl. Fusion* 56(6), 066008
- [13] Le, T., Suzuki, Y., Hasegawa, H. et al. (2023). "High heat flux reduction to materials using current filaments". *Sci Rep* 13, 8300.
- [14] Helander, P., Fielding, S. J., Cohen, R. H., & Ryutov, D. D. (2000). Electric biasing of the divertor tiles in COMPASS-D. *Czechoslovak Journal of Physics*, 50(12), 1421-1430.
- [15] GM Staebler. (1995). "Divertor bias experiments". *Journal of Nuclear Materials*, 220:158-170.
- [16] Trang, L.T.Q. (2024). "Nghiên cứu số về phương pháp bias điện áp sử dụng trong giảm dòng nhiệt thông tới bề mặt kim loại". *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Duy Tân*, 04 (65) 8/2024.
- [17] Birdsall, C. K. & Langdon, A. B. (2004). *Plasma Physics Via Computer Simulation*, CRC Press, London.
- [18] Tskhakaya, D. et al. (2007). "The particle-in-cell method". *Contrib. Plasma Phys.* 47, 563–594.
- [19] Verboncoeur, J. P. (2005). "Particle simulation of plasmas: Review and advances". *Plasma Phys. Control. Fusion* 47, A231.