

Mô phỏng Particle-in-Cell cho phương pháp sử dụng các tia điện nhằm giảm dòng nhiệt tới bề mặt kim loại

Particle-in-Cell simulation of using current filaments to reduce particle flux to metal surfaces

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

^a*Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^a*Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam*

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

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

(Ngày nhận bài: 22/01/2025, ngày phản biện xong: 19/02/2025, ngày chấp nhận đăng: 11/03/2025)

Tóm tắt

Phương pháp sử dụng dòng điện để tạo ra từ trường nhằm điều hướng dòng chảy của các hạt plasma ở khu vực chân của vỏ lò phản ứng nhiệt hạch được mô phỏng trong nghiên cứu này. Mô hình Particle-in-Cell được áp dụng để tính toán chuyển động của hạt cũng như thông lượng, nhiệt thông của hạt electron và ion tiến khi tới bề mặt kim loại. Kết quả thu được cho thấy sự khả quan trong việc sử dụng tia điện để điều khiển dòng hạt mang năng lượng cao tần công trực tiếp tới vỏ lò. Nhờ vào sự thay đổi của cấu trúc từ trường, thông lượng, nhiệt thông của hạt giảm đáng kể trước khi dòng hạt tiến tới kim loại.

Từ khóa: Tia điện; mô phỏng hạt; nhiệt thông; divertor.

Abstract

The use of current filaments in order to control the plasma transport entering divertor tokamak is discussed in this work. The Particle-in-Cell simulation was used to compute the transport, particle flux and heat flux of the electrons and ions when they reach the metal surfaces. We obtained a promising result on using current filaments to control the plasma flow entering the first wall of the tokamak. On account of changes in the magnetic structure, the particle flux and heat flux were significantly reduced before the plasma flow reached the metal.

Keywords: current filament; particle simulation; energy flux; divertor.

1. Giới thiệu

Divertor là một phần quan trọng không thể thiếu ở lò phản ứng nhiệt hạch. Divertor thuộc vị trí ở đáy của các ống chân không, hay nằm ở

chân của các vỏ lò. Divertor có nhiệm vụ thu gom nhiệt và tro, các tạp chất được tạo ra trong quá trình diễn ra phản ứng nhiệt hạch nhằm tối ưu hóa sự tinh khiết của nguồn nhiên liệu trong lò, bảo vệ vỏ lò khỏi các dòng hạt mang năng

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

lượng cao thất thoát và tấn công trực tiếp vào bề mặt kim loại bao quanh lò [1-6]. Thông thường để thực hiện những chức năng này, divertor được thiết kế sao cho những tấm chắn của nó có xu hướng hướng về điểm X của lò (điểm giao thoa giữa những đường sức từ kín và đường sức từ hở). Do đó, tại điểm cuối của divertor ngay các bề mặt kim loại, các đường sức từ có xu hướng hội tụ tại một điểm. Như chúng ta đã biết, các đường sức từ có ảnh hưởng trực tiếp lên sự di chuyển của các dòng hạt plasma. Tại khu vực này, từ trường sẽ định hình lại các dòng hạt mang năng lượng cao này, làm cho chúng hội tụ tại một điểm. Giá trị này thông thường sẽ cao hơn rất nhiều lần so với khu vực xung quanh và sẽ cao hơn nhiều so với ngưỡng chịu nhiệt cho phép của kim loại [7-10]. Khi đó, kim loại ở vùng này sẽ bị ăn mòn và hư hại. Một trong những vấn đề then chốt trong tiến hành xây dựng lò phản ứng nhiệt hạch là làm sao để giảm thiểu được sự thiệt hại của vỏ lò từ nguồn nhiệt cao này.

Có rất nhiều giải pháp đã được đưa ra, đề xuất, để giải quyết cho vấn đề này như sử dụng sự cộng hưởng của từ trường, tách rời dòng hạt, hay thiết kế lại divertor có dạng bông tuyết [11-15]. Một trong những ý tưởng để giải quyết vấn đề này là mở rộng, phân tán dòng hạt plasma để nó có thể trải dài nguồn nhiệt lên toàn bộ diện tích của các tấm chắn divertor. Dòng nhiệt hội tụ sẽ được khuếch tán, tránh được tình trạng đỉnh của dòng sẽ cao hơn ngưỡng chịu nhiệt của vật liệu. Một trong những phương pháp được sử dụng cho ý tưởng này là sử dụng bias điện áp tại divertor. Phương pháp này có thể tăng độ rộng của dòng nhiệt, giảm dòng nhiệt cao tới bề mặt kim loại. Nhưng xét theo từng loại hạt riêng lẻ, bias điện áp giảm dòng hạt electron nhưng tăng dòng ion tới bề mặt kim loại trong trường hợp sử dụng bias điện áp âm. Khi sử dụng bias điện áp dương, kết quả thu được sẽ ngược lại [16-17]. Trong rất nhiều kết quả phân tích từ thực nghiệm, các nhà khoa học đã chỉ ra rằng sử dụng từ trường có thể điều khiển hình dạng, kích

thước cũng như độ lớn của dòng nhiệt hạch [11]. Thí nghiệm tại lò phản ứng EAST (Trung Quốc) đề xuất rằng sử dụng các tia điện có thể thay đổi được hình dạng, cấu trúc của từ trường, do đó, có thể làm giảm nguồn nhiệt cao tới bề mặt vỏ lò [18]. Trong bài báo này, ảnh hưởng của từ trường được tạo ra từ các tia điện lên dòng hạt plasma được nghiên cứu thông qua mô hình mô phỏng Particle-in-Cell (PIC). Mô tả về phương pháp PIC và mô hình thực hiện mô phỏng được đưa ra ở mục 2. Nội dung mục 3 chỉ ra, và phân tích kết quả từ phép mô phỏng. Kết luận về ảnh hưởng của từ trường tới dòng nhiệt hạch được nêu rõ ở mục 4.

2. Mô hình nghiên cứu

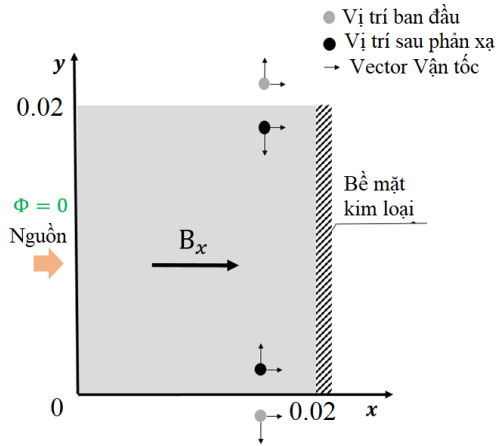
Có rất nhiều mô hình được sử dụng để nghiên cứu chuyển động của các hạt plasma khu vực vùng rìa lò phản ứng nhiệt hạch. Hai mô hình được sử dụng rộng rãi nhất hiện nay là mô hình xem các hạt plasma dịch chuyển như một dòng chất lỏng (fluid model) và mô hình xem xét động lực học của từng hạt (kinetic model). Mô hình chất lỏng thường được sử dụng để giải các phương trình chuyển động của hạt của khu vực rìa lò, tính toán chính xác dựa theo kích thước hình học của divertor [19-20]. Tuy nhiên, phương pháp này lại không thể giải quyết các bài toán có liên quan tới sự xuất hiện của dịch chuyển từ hay dịch chuyển điện có trong lò. Ngược lại, mô hình xem xét động lực học lại có thể mô phỏng được những sự dịch chuyển này [21-22]. Một ví dụ điển hình của phương pháp sử dụng các phương trình động lực học để giải các bài toán plasma là phương pháp PIC. Ở mô hình PIC, hàng ngàn các hạt electron hoặc ion cùng loại ở gần nhau sẽ được gom lại thành nhóm với nhau tạo thành một siêu hạt. Chuyển động của mỗi siêu hạt mô tả tương đối đầy đủ, chính xác chuyển động của từng hạt electron, ion. PIC hoạt động bằng cách theo dõi chuyển động, biến động nhỏ của từng siêu hạt để tính toán nên các trạng thái của plasma như điện

trường và điện thế. Thông qua đó, PIC có thể sử dụng các đại lượng vĩ mô (vận tốc, vị trí từng hạt) để tính toán các đại lượng vĩ mô (mật độ, điện thế, v.v.). Phương pháp này có rất nhiều ứng dụng, lợi thế trong việc mô phỏng chuyển động của hạt plasma ở trong nhiều lĩnh vực khác nhau. PIC được dùng để mô phỏng sự chuyển động của electron và ion sau khi thoát ra khỏi bộ nguồn ở tàu vũ trụ [23-24]. Mặc dù có được nhiều ưu điểm thuận lợi nhưng PIC vẫn khó có thể áp dụng rộng rãi cho mọi bài toán mô phỏng hạt plasma. Lý do bởi vì PIC cần theo dõi chuyển động của từng hạt electron, ion riêng lẻ nên nó cần lượng lớn bộ nhớ máy tính để lưu trữ thông tin vị trí, vận tốc của từng hạt. Không có bộ nhớ của bất kỳ máy tính nào đủ lớn để đủ mô phỏng toàn bộ số lượng hạt plasma có trong một lò phản ứng với cùng kích thước thực. Hơn thế nữa, do PIC cần tính toán, cập nhật vị trí của từng hạt plasma trong từng bước nhảy thời gian cực kỳ nhỏ, với số lượng hàng triệu triệu tới tỷ tỷ hạt plasma tối thiểu cần thiết phải có trong những mô hình mô phỏng, việc tính toán, cập nhật vận tốc, vị trí của từng hạt tốn một lượng lớn thời gian chạy của máy tính. Do đó, thông thường PIC được áp dụng để mô phỏng cho khu vực có diện tích nhỏ, số lượng hạt vừa phải để đảm bảo thời gian, bộ nhớ của bất kỳ máy tính, siêu máy tính nào. Tuy nhiên số lượng hạt, kích thước khu vực cũng phải đảm bảo giá trị tối thiểu để có thể thu được kết quả chính xác và giảm được nhiều dữ liệu. Mọi yêu cầu về các thông số cũng như chu trình, vòng tuần hoàn hoạt động của PIC được đề cập ở rất nhiều tài liệu tham khảo nên sẽ không được nhắc lại chi tiết trong bài báo này [25-26].

Trong bài báo này, mô hình PIC không gian hai chiều sẽ được sử dụng để mô phỏng ảnh hưởng của việc sử dụng các tia điện gần khu vực divertor lên dòng nhiệt hạt chảy từ trung tâm của lò tới nó. Xét một diện tích hình vuông có kích thước 0.02m tính từ bề mặt kim loại (Hình 1).

Kích thước này đủ nhỏ để đảm bảo không tốn nhiều thời gian tính toán nhưng vẫn đáp ứng chiều dài tối thiểu cần thiết lớn hơn vài lần so với bán kính Larmor của ion để thu được kết quả mô phỏng hợp lý. Hệ không có sẵn các hạt plasma tại thời điểm ban đầu. Hạt electron và ion sẽ được bơm liên tục vào hệ tại vị trí đầu nguồn và bị hấp thụ hoàn toàn khi chúng va chạm vào bề mặt kim loại. Điện thế tại bề mặt kim loại được giả sử là đồng nhất dọc theo phương của kim loại. Điện thế tại lề bên trái được giả sử bằng không. Các hạt electron và ion được bơm vào hệ phải thỏa mãn điều kiện sao cho vận tốc theo phương song song với đường sức từ của nó luôn dương. Điều kiện này giúp các hạt plasma có thể di chuyển tiến xa hơn vào trong hệ mà không quay ngược lại toàn bộ và thất thoát tại điểm nguồn. Theo phương y, dòng hạt electron và ion được bơm vào hệ có dạng tập trung. Đồ thị của mật độ và vận tốc tại vị trí nguồn dọc theo phương y có dạng phân bố Gaussian. Đỉnh của đồ thị, nơi mật độ (và nhiệt độ) có giá trị cao nhất nằm ngay điểm chính giữa theo phương y của hệ. Độ rộng của phân bố Gaussian được chọn vừa phải sao cho tại gần khu vực trên và dưới của hệ mô phỏng theo phương y, không có bất kỳ hạt plasma nào được bơm vào hệ. Điều kiện này được áp dụng để đảm bảo cho kết quả tính toán được chính xác mà không bị ảnh hưởng bởi các điều kiện biên. Electron và ion có cùng mật độ tại điểm nguồn. Tại đỉnh cao nhất mật độ của nó có giá trị $n_{e0} = n_{i0} = 10^{17} \text{ m}^{-3}$. Nhiệt độ cao nhất tại nguồn của chúng ($k_B T_0$) có giá trị lần lượt là 100 eV và 50eV cho hạt electron và ion. Trong suốt thời gian diễn ra mô phỏng, electron và ion được bơm vào hệ tại mỗi bước nhảy thời gian sao cho mật độ của chúng luôn không đổi tại vị trí nguồn $x=0$. Điều kiện phản xạ được áp dụng tại hai vùng biên theo phương y của hệ. Khi hạt di chuyển ra khỏi hệ tại hai vùng biên này, chúng sẽ bị phản xạ lại vào trong hệ đang xét với chiều vận tốc theo phương y ngược hướng với hướng di chuyển trước đó (Hình 1). Phép mô

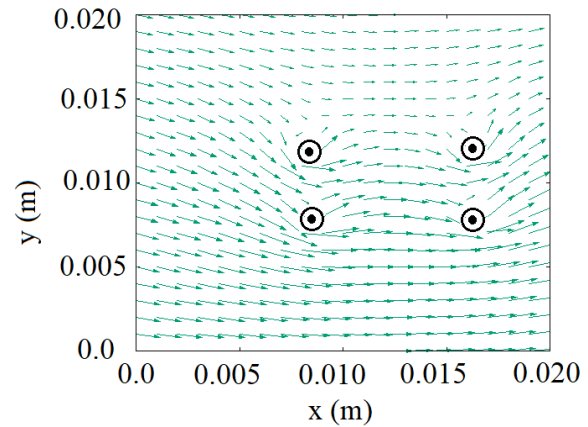
phòng được thực hiện cho tới khi hệ đạt được trạng thái cân bằng, thời điểm mà tất cả trạng thái của plasma hầu như không thay đổi theo thời gian. Mọi kết quả được sử dụng ở mục 3 là kết



Hình 1. Khu vực đem đi mô phỏng. Các hạt electron và ion được bơm vào tại vị trí $x=0$. Các đường thẳng màu đen mô tả các đường sức từ tại thời điểm ban đầu.

Giả sử rằng trong trường hợp ban đầu, tương tự như ở khu vực chân các divertor, các đường sức từ là những đường thẳng song song cách đều nhau theo phương x , phương vuông góc với bề mặt kim loại (Hình 1). Từ trường theo phương x được giả sử bằng 0.02 T , và không có giá trị từ trường nào theo phương y và z . Kết quả của trường hợp này sẽ được đem đi so sánh với trường hợp thứ hai, khi mà các tia điện được thêm vào mô hình. Các tia điện này sẽ được thêm vào theo phương vuông góc với mặt phẳng được xét ở bốn vị trí sao cho trong trường hợp thông thường, dòng hạt sẽ đi qua phía trong của bốn tia này. Đường sức từ được tạo ra bởi sợi dây mang điện có dạng đường cong kín bao quanh sợi dây. Từ trường được tạo ra này có giá trị tỉ lệ nghịch với khoảng cách tới sợi dây. Điều này tạo nên sự tập trung của từ trường. Từ trường có độ lớn cực nhỏ ở khu vực xa các tia điện và mang giá trị cực lớn ở khu vực gần với các tia điện. Những đường sức từ được tạo ra từ tia điện kết hợp với những đường sức từ đều thẳng song song vốn có của hệ sẽ thay đổi hoàn toàn cấu trúc của đường sức từ của hệ. Hình 2 mô tả từ trường của hệ khi bốn tia

quả thu được tại thời điểm cân bằng này. Các hạt trung hòa và tạp chất được tạo ra trong quá trình diễn ra phản ứng nhiệt hạch không bao gồm trong tính toán này.



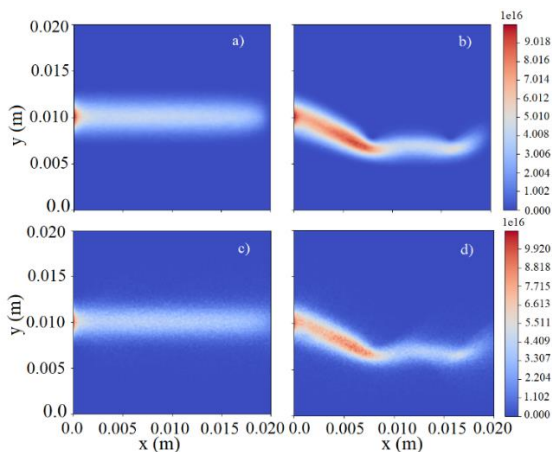
Hình 2. Véc tơ từ trường của hệ mô phỏng sau khi bốn tia mang điện với cường độ 1 kA được thêm vào. Vị trí mỗi tia điện được ký hiệu bởi chấm đen trên hình có chiều từ trong ra ngoài.

điện được thêm vào hệ ban đầu. Cường độ dòng điện của các tia này bằng nhau; giúp tăng khả năng thực thi của phương pháp nếu áp dụng vào thực nghiệm về sau. Trong nghiên cứu này, giá trị cường độ dòng điện được sử dụng là 1 kA . Độ lớn của từ trường tạo ra từ tia điện được tính dựa trên định luật Biot-Savat. Kết quả cho ta thấy véc tơ từ trường của hệ thay đổi, hay đường sức từ đã thay đổi. Bởi vì electron và ion chuyển động theo quỹ đạo xoay quanh các đường sức từ, khi những đường sức này thay đổi phương và hướng không còn là những đường thẳng thì phương và chiều của dòng hạt electron và ion di chuyển bên trong hệ cũng thay đổi theo. Ảnh hưởng của từ trường được tạo ra bởi tia điện tới sự chuyển động của hạt electron và ion, nhiệt năng của nó được đề cập trong phần tới.

3. Kết quả và thảo luận

Hình 3 mô tả mật độ của electron và ion tại thời điểm cân bằng trong hai trường hợp không sử dụng và có sử dụng thêm các tia điện. Trong trường hợp không sử dụng thêm các tia điện, như ở Hình 1 đã chỉ rõ, các đường sức từ là những

đường thẳng song song. Electron và ion sẽ di chuyển quay quanh các đường sức từ. Sự va chạm giữa các hạt mang điện với nhau không được xem xét trong bài toán này do đó dòng hạt của cả ion và electron gần như là đường thẳng từ nguồn tới tấn công trực tiếp vào điểm cuối (kim loại). Tại vị trí nguồn hạt, mật độ electron và ion luôn luôn cao hơn so với vị trí trước bề mặt kim loại. Nguyên nhân của hiện tượng này là do sự hình thành của lớp vỏ bọc điện thế ngay trước bề mặt kim loại. Lớp vỏ bọc này được hình thành khi có các hạt electron và ion tiến tới bề mặt vật liệu nhằm bảo vệ sự thất thoát của toàn bộ các hạt khi tiến tới khu vực này. Trong trường hợp còn lại, các tia điện được thêm vào hệ mô phỏng. Bởi vì đường sức từ của hệ đã thay đổi dẫn theo sự thay đổi quỹ đạo chuyển động của các hạt plasma. Hình 3 chỉ ra rằng, electron và ion phá vỡ quỹ đạo thẳng như trường hợp ban đầu và có xu hướng dịch chuyển xuống phía dưới quanh các tia điện để tiến tới bề mặt kim loại. Số lượng lớn electron và ion bị giữ lại trong hệ quanh các khu vực có sự biến thiên từ trường lớn. Do đó, số lượng electron và ion tiến tới về mặt kim loại

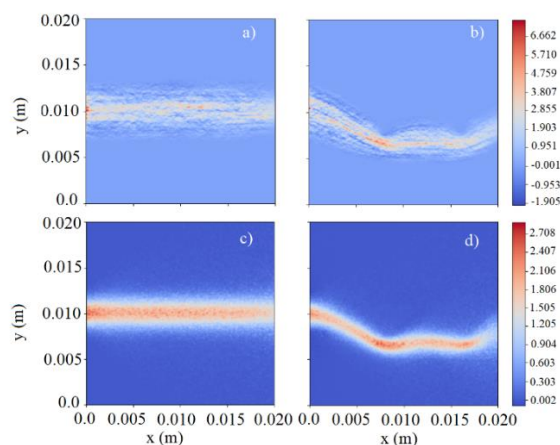


Hình 3. Mật độ của electron trong trường hợp không (Hình a) và có thêm các tia điện (Hình b) vào hệ. Hình c và d theo thứ tự mô tả mật độ của ion trong trường hợp không và có thêm các tia điện vào hệ

Một đại lượng được chú ý khi xét về ảnh hưởng của dòng hạt là nhiệt thông. Nhiệt thông của hạt phụ thuộc vào khối lượng của hạt và bình phương vận tốc của nó. Nhiệt thông của các hạt

giảm đáng kể so với trường hợp đường sức từ là đường thẳng.

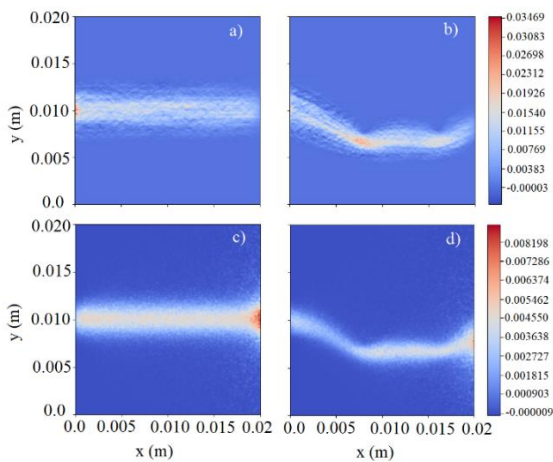
Để hiểu kỹ hơn về ảnh hưởng của các tia điện, thông lượng và nhiệt thông của dòng hạt được đem ra so sánh. Các giá trị thông lượng Γ và nhiệt thông Q của hạt trong báo cáo này đã được đem đi chuẩn hóa: $\hat{\Gamma} \leftarrow \Gamma/\Gamma_{e0}$, $\hat{Q} \leftarrow Q/Q_{e0}$. Hình 4 so sánh thông lượng electron và ion trong hai trường hợp không sử dụng và có sử dụng thêm các tia điện. Thông lượng theo một phương của hạt phụ thuộc vào vị trí và vận tốc của hạt đó theo phương đó. Xét thông lượng theo phương x của hạt, phương mà vật liệu đối diện trực tiếp với dòng nhiệt cao. Thông lượng của electron và ion đều có xu hướng tương tự như hướng của mật độ của nó. Khi dòng hạt bị đổi hướng, thành phần vận tốc theo phương x ban đầu của hạt được phân tán sang các hướng khác nhau. Vận tốc của hạt theo phương x lúc này sẽ nhỏ hơn nhiều so với trường hợp đường sức từ là đường thẳng. Do đó, thông lượng của hạt giảm trước khi tiến tới bề mặt kim loại.



Hình 4. Thông lượng theo phương x của electron (a, b) và ion (c, d) lần lượt trong trường hợp không và có thêm các tia điện vào hệ

electron và ion tại thời điểm cân bằng được hiển thị ở Hình 5. Ở đây, kết quả của hai trường hợp có và không có tia điện cũng được đem ra so sánh. Kết quả mô phỏng cho thấy, trong trường

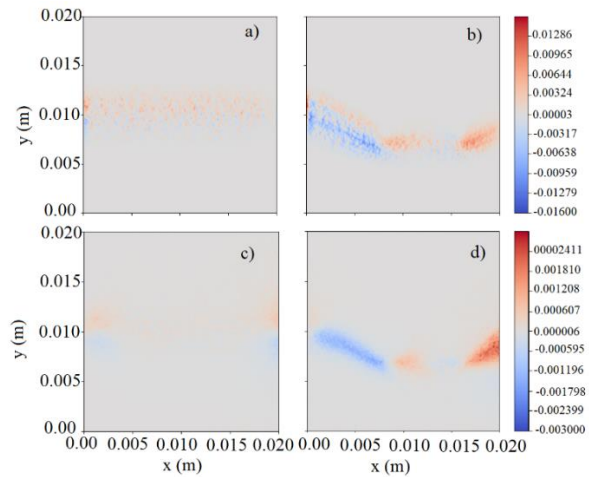
hợp không sử dụng tia điện, một lượng lớn nhiệt thông tập trung trước bề mặt kim loại (màu đỏ nơi đồ thị). Khối lượng của ion lớn gấp ngàn lần so với khối lượng của electron, nên khi có sự biến đổi nhỏ ở vận tốc của hạt, sự biến động của dòng nhiệt thông ion thu được rõ rệt hơn so với đại lượng của electron. Dòng nhiệt thông tới bề mặt kim loại cũng đổi chiều theo chiều của dòng



Hình 5. Các giá trị của nhiệt thông của electron (a, b) và ion (c, d) theo phương x lần lượt trong hai trường hợp không sử dụng và sử dụng tia điện.

Một trong những lý do khác cho sự giảm thiểu của thông lượng và nhiệt thông tới về mặt vật liệu ngoài việc số lượng lớn của các hạt bị giam giữ trong gương từ trường là sự phân tán dòng nhiệt theo các phương khác nhau, đặc biệt là phương y, phương vuông góc với chiều chảy của dòng hạt trong trường hợp ban đầu. Hình 6 mô tả ảnh hưởng của tia điện lên nhiệt thông của electron và ion theo phương y. Bỏ qua chiều của nhiệt thông (màu xanh cho ngược chiều dương, màu đỏ cho cùng chiều với chiều đang xét), nhiệt thông của hạt theo phương y tăng lên rõ ràng khi sử dụng các tia điện. Trong trường hợp đường sức từ là những đường thẳng song song (không sử dụng tia điện), hầu như không có sự biến động, trao đổi chiều của nhiệt thông của hạt theo phương y. Có hai luồng chuyển động song song trái chiều của dòng hạt rõ ràng có trong hệ. Điều này được lý giải do các hạt quay quanh các

chảy của hạt khi thêm vào các tia điện. Do sự biến thiên rộng của từ trường gần các tia điện, từ trường có độ lớn hơn nhiều so với các khu vực khác. Các gương từ trường được hình thành. Các hạt electron và ion bị giữ lại ở khu vực bên trong hệ hơn là tiến tới xa hơn gần khu vực kim loại. Do đó lượng lớn thông lượng và nhiệt thông được giảm khi dòng hạt tiến dần về kim loại.



Hình 6. Các giá trị của nhiệt thông của electron (a, b) và ion (c, d) theo phương y tuần tự trong hai trường hợp không sử dụng và sử dụng tia điện.

đường sức từ thẳng theo phương x tiến tới điểm cuối (chiều dương), và một số hạt khi bị phản xạ, đổi chiều và chuyển động thẳng về khu vực nguồn do lớp vỏ bọc điện thế tại bề mặt kim loại. Trong khi đó, đối với trường hợp sử dụng các tia điện, sự thay đổi của nhiệt thông ở phương y thu được rõ ràng. Điều này chứng tỏ rằng, các hạt có sự dịch chuyển lớn theo phương y. Do các trường hợp va chạm giữa các hạt mang điện tích không được xét trong bài toán này, tổng năng lượng của hạt được bảo toàn. Như vậy, một phần dòng nhiệt của hạt theo phương x ban đầu có thể đã được truyền sang phương y. Từ đó, lượng nhiệt theo phương x tiến tới bề mặt vật liệu giảm và được mở rộng phân tán dọc theo chiều dài của kim loại thay vì hội tụ tại một vị trí như lúc ban đầu. Nghiên cứu này là cơ sở cũng như tiền đề cho việc phát triển, mở rộng nghiên cứu ảnh hưởng của các tia điện ngược chiều, hay sử dụng

cường độ dòng điện khác nhau tới dòng hạt plasma có tới bề mặt kim loại đã được đăng trên một tạp chí khác của nhóm [27].

4. Kết luận

Ứng dụng của sử dụng tia điện trong việc điều khiển dòng hạt plasma cũng như giảm thông lượng, nhiệt thông của nó được đề cập trong bài báo này. Mô hình mô phỏng PIC được sử dụng, tính toán cho nghiên cứu này. Mô hình PIC mang lại lợi thế lớn khi tính toán, áp dụng cho hệ có sự biến động lớn về từ trường so với các mô hình mô phỏng khác khi mô hình này có thể giải quyết tốt các bài toán liên quan tới sự dịch chuyển điện trường hoặc từ trường của hạt. Khi bốn tia điện có cùng chiều, cùng độ lớn được thêm vào hệ thống, từ trường tạo ra từ những tia điện này làm đổi chiều của dòng hạt, giam giữ một phần các hạt plasma ở khu vực gương từ trường và giải phóng một phần năng lượng sang phương khác. Do đó, phương pháp này có thể giảm thiểu sự xâm lược trực tiếp của dòng nhiệt cao tới bề mặt vật liệu ở khu vực divertor. Đây có thể là một phương pháp đáng được cân nhắc khi xem xét ảnh hưởng sự tấn công của dòng nhiệt cao xâm hại tới bề mặt kim loại. Hiện tại, phương pháp này mới được xem xét, mô phỏng ở mô hình hai chiều. Có nhiều khía cạnh khác cần khai phá như dòng chảy của hạt theo phương z sẽ bị ảnh hưởng như thế nào khi tia điện được sử dụng. Những cải tiến cũng như mở rộng mô hình này sang không gian ba chiều sẽ được nghiên cứu và công bố trong những dự án sắp tới.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện trong thời gian theo học nghiên cứu sinh của tôi tại Đại học SOKENDAI, Nhật Bản. Tôi xin được gửi lời biết ơn sâu sắc tới GS. Yasuhiro Suzuki (Đại học Hiroshima, Nhật Bản), TS. Hiroaki Ohtani (NIFS, Nhật Bản), TS. Hiroki Hasegawa (NIFS),

TS. Toseo Moritaka (NIFS) – những người đã hỗ trợ và hướng dẫn tôi hoàn thành nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Janeschitz, G., et al. (1995). "The ITER divertor concept." *Journal of Nuclear Materials* 220 : 73-88.
- [2] König, R., et al. (2002). "The divertor program in stellarators." *Plasma physics and controlled fusion* 44.11: 2365.
- [3] Masuzaki, Suguru, et al. (2002). "The divertor plasma characteristics in the Large Helical Device." *Nuclear fusion* 42.6: 750.
- [4] Schneider, R., et al. (1999). "Role of divertor geometry on detachment in ASDEX Upgrade." *Journal of nuclear materials* 266: 175-181.
- [5] Ohya, N., et al. (1994). "The large helical device (LHD) helical divertor." *Nuclear fusion* 34.3: 387.
- [6] You, J. H., et al. (2022). "Divertor of the European DEMO: Engineering and technologies for power exhaust." *Fusion Engineering and Design* 175: 113010.
- [7] Pitts, R. A., et al. (2009). "Status and physics basis of the ITER divertor." *Physica scripta* 2009.T138: 014001.
- [8] You, J. H., et al. (2018). "European divertor target concepts for DEMO: Design rationales and high heat flux performance." *Nuclear Materials and Energy* 16: 1-11.
- [9] Budaev, V. P. (2016). "Results of high heat flux tests of tungsten divertor targets under plasma heat loads expected in ITER and tokamaks." *Physics of Atomic Nuclei* 79: 1137-1162.
- [10] Raffray, A. R., et al. (1999). "Critical heat flux analysis and R&D for the design of the ITER divertor." *Fusion Engineering and Design* 45.4: 377-407.
- [11] Schmitz, O. et al. (2016). "Tree-dimensional modeling of plasma edge transport and divertor fluxes during application of resonant magnetic perturbations on ITER". *Nucl. Fusion* 56(6), 066008
- [12] Matthews, G. F. (1995). "Plasma detachment from divertor targets and limiters". *J. Nucl. Mater.* 220, 104–116.
- [13] Ryutov, D. D., and V. A. Soukhanovskii. (2015). "The snowflake divertor." *Physics of Plasmas* 22.11.
- [14] Ryutov, D. D., et al. (2008). "The magnetic field structure of a snowflake divertor." *Physics of Plasmas* 15.9.
- [15] Kotschenreuther, Mike, et al. (2013). "Magnetic geometry and physics of advanced divertors: The X-divertor and the snowflake." *Physics of Plasmas* 20.10.

- [16] Staebler, G. M. (1995). "Divertor bias experiments." *Journal of nuclear materials* 220: 158-170.
- [17] Fielding, S. J., et al. (2001). "Divertor target heat load reduction by electrical biasing, and application to COMPASS-D." *Journal of nuclear materials* 290: 859-862.
- [18] Rack, M., et al. (2014). "Modelling of LHW-induced helical current filaments on EAST: study of an alternative method of applying RMPs." *Nuclear fusion* 54.6: 064016.
- [19] Vold, E. L., F. Najmabadi, and R. W. Conn. (1991). "Fluid model equations for the tokamak plasma edge." *Physics of Fluids B: Plasma Physics* 3.11: 3132-3152.
- [20] Schneider, R., and A. Runov. (2007). "Challenges in plasma edge fluid modelling." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 49.7: S87.
- [21] Cohen, R. H., and X. Q. Xu. (2008). "Progress in kinetic simulation of edge plasmas." *Contributions to Plasma Physics* 48.1-3: 212-223.
- [22] Takizuka, T. (2017). "Kinetic effects in edge plasma: kinetic modeling for edge plasma and detached divertor." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 59.3: 034008.
- [23] Nishii, Keita, and Deborah A. Levin. (2023). "Three-Dimensional kinetic simulation of an ion thruster plume with carbon backsputtering in a vacuum chamber." *arXiv preprint arXiv:2303.07496*.
- [24] Nishii, Keita, and Deborah A. Levin. (2023). "Kinetic simulation of ion thruster plume neutralization in a vacuum chamber." *Plasma Sources Science and Technology* 32.11: 115009.
- [25] Tskhakaya, D. et al. (2007). "The particle-in-cell method". *Contrib. Plasma Phys.* 47, 563–594.
- [26] Birdsall, C. K. & Langdon, A. B. (2004). *Plasma Physics Via Computer Simulation*, CRC Press, London.
- [27] Le, T., Suzuki, Y., Hasegawa, H. *et al.* (2023). "High heat flux reduction to materials using current filaments". *Sci Rep* 13, 8300.