

## Nghiên cứu số về phương pháp bias điện áp sử dụng trong giảm dòng nhiệt thông tới bề mặt kim loại

### Numerical study on reducing high heat flux using electrical biasing

Lê Thị Quỳnh Trang<sup>a,b\*</sup>  
Le Thi Quynh Trang<sup>a,b\*</sup>

<sup>a</sup>Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>a</sup>Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

<sup>b</sup>Khoa Môi trường và Khoa học Tự Nhiên, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>b</sup>Faculty of Environment and Natural Sciences, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 11/03/2024, ngày phản biện xong: 09/04/2024, ngày chấp nhận đăng: 13/05/2024)

### Tóm tắt

Bài báo này sử dụng mô hình mô phỏng Particle-in-Cell để nghiên cứu về việc giảm tải dòng nhiệt cao tới bề mặt kim loại bằng bias điện áp. Dòng electron và ion được bơm liên tục vào hệ và bị hấp thụ hoàn toàn tại bề mặt kim loại. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng, bias điện áp làm giảm thông lượng của plasma tới bề mặt kim loại. Nhiệt thông của electron giảm trong khi nhiệt thông của ion lại tăng lên khi sử dụng bias điện áp âm. Tùy vào mục đích sử dụng, chúng ta có thể tận dụng phương pháp bias này để áp dụng trong giảm dòng nhiệt cao tới bề mặt kim loại.

*Từ khóa:* bias điện áp; nhiệt thông; thông lượng; phương pháp mô phỏng Particle-in-cell.

### Abstract

Reduction of the high heat flux to the materials using electrical biasing is studied using the Particle-in-Cell simulation model. A flow of electrons and ions is injected into the simulation system and they are fully absorbed at the target. Based on the simulation results, we found that electrical biasing can reduce the particle flux to the materials. While electron heat flux is decreased, ion heat flux is raised by using electrical biasing method. Depending on the types of reduction, we can take the advantages of the electrical biasing method in reducing the high heat flux to the materials.

*Keywords:* electrical biasing; heat flux; particle flux; Particle-in-cell model.

### 1. Đặt vấn đề

Mối liên hệ giữa plasma và bề mặt kim loại là một trong những chủ đề quan trọng cho ngành vật lý nhiệt hạch và vũ trụ. Khi hạt electron và ion mang năng lượng cao, chúng dễ dàng dịch chuyển và tấn công vào bề mặt kim loại. Hậu quả

là bề mặt của kim loại có thể bị phá hủy. Ví dụ các hạt năng lượng cao vốn di chuyển với vận tốc gần bằng vận tốc ánh sáng có thể ảnh hưởng tới vệ tinh, hệ thống điện tử, hay phá hủy vỏ tàu kim loại, hay ảnh hưởng tới hệ thống truyền tín hiệu tới trái đất [1-4]. Ở các lò nghiên cứu phản ứng nhiệt hạch (hay thường được gọi là

\*Tác giả liên hệ: Lê Thị Quỳnh Trang

Email: letquynhtrang4@duytan.edu.vn

tokamak), các hạt năng lượng cao khi thoát ra khỏi lõi trung tâm của lò di chuyển dọc theo các đường sức từ và tấn công trực tiếp vào bề mặt kim loại. Chúng có khả năng làm hư hại vỏ lò, đặc biệt là khu vực divertor (vùng đáy của lò phản ứng chuyên dùng để thu gom dòng nhiệt thông, tro hoặc cặn của phản ứng nhiệt hạch và giảm tạp chất có trong lò) [5-6]. Do đó, không chỉ tàu vũ trụ hay vệ tinh nói riêng, mà việc bảo vệ bề mặt kim loại khỏi những nguy hại từ các hạt năng lượng cao đóng vai trò quan trọng trong lĩnh vực nghiên cứu hạt plasma nói chung.

Cho tới nay, có rất nhiều phương pháp từ các nhóm nghiên cứu khác nhau được đưa ra, đề xuất để giảm dòng nhiệt cao này. Một vài trong số đã được đưa vào thực nghiệm để kiểm chứng và tạo ra những kết quả tích cực. Mỗi phương pháp đều có những ưu và khuyết điểm riêng của mình. Thiết kế màng bảo vệ chủ động (active shielding), màng bảo vệ đa lớp (multi-layer shielding) là một vài phương pháp được dùng trong bảo vệ bề mặt kim loại ở tàu vũ trụ [7]. Ở lò phản ứng nhiệt hạch, phương pháp tạo từ trường cộng hưởng (resonance magnetic field), phương pháp tách rời dòng hạt (plasma detachment) được ứng dụng để giảm dòng nhiệt thông tới bề mặt kim loại [8-9]. Trong nghiên cứu gần đây, tôi và nhóm nghiên cứu của mình đã đề cập tới phương pháp sử dụng từ trường ở dạng tập trung trong việc giảm dòng nhiệt thông tới bề mặt kim loại [10,11]. Từ trường ở dạng tập trung là từ trường có độ lớn cực đại ở vùng trung tâm và giảm nhanh ở những vùng xa trung tâm để tạo thành các gương từ trường (magnetic mirrors). Phương pháp này giảm được đáng kể dòng nhiệt cao, chuyển hướng và khuếch tán dòng nhiệt trước khi di chuyển tới bề mặt kim loại.

Một trong những ý tưởng để giảm thiểu dòng nhiệt cao đã được đưa vào thí nghiệm sử dụng cho một số lò phản ứng là sử dụng bias điện [12-13]. Nguồn điện với hiệu điện thế âm hoặc dương được kết nối với kim loại ở vùng divertor.

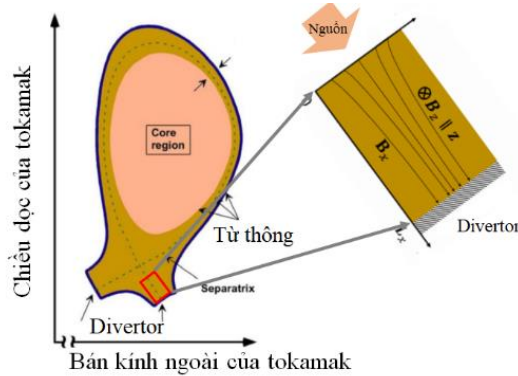
Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng phương pháp này có thể được sử dụng để giảm dòng nhiệt tới bề mặt kim loại song nó cũng tồn tại nhiều nhược điểm như chỉ giảm được dòng nhiệt của điện tích âm hoặc dương. Mặc dù đã được sử dụng nhiều trong thực nghiệm nhưng có rất ít các bài báo sử dụng vệ mô phỏng để phân tích kỹ về quá trình giảm nhiệt từ phương pháp này. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng mô hình Particle-in-cell để mô phỏng ảnh hưởng của phương pháp bias đối với dòng nhiệt electron và ion tới bề mặt kim loại. Particle-in-Cell (PIC) là phương pháp sử dụng phép mô tả động năng, dựa trên chuyển động của từng hạt electron và ion để tính toán điện trường, điện thế tự phát sinh có trong mô hình mô phỏng. PIC phù hợp để nghiên cứu và phân tích từng dòng hạt electron và ion riêng lẻ chịu ảnh hưởng như thế nào dưới sự tác động của phương pháp bias điện áp. Phần 2 giới thiệu mô hình đã được xây dựng để nghiên cứu tính toán ảnh hưởng của bias điện áp. Phần 3 đề cập tới kết quả của mô phỏng. Kết luận và thảo luận về phương pháp bias điện áp sẽ được đề cập ở phần 4.

## 2. Mô hình nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, khu vực ở ngay trước bề mặt kim loại ở vùng divertor được mô phỏng lại, như ở Hình 1. Ở đây, kích thước vùng được dùng để mô phỏng được xét rất nhỏ sao cho các đường sức từ gần như là đường thẳng và giả sử rằng chúng đều vuông góc với bề mặt kim loại (trên thực tế, đa số các đường sức từ ở khu vực divertor là những đường cong và hợp với bề mặt kim loại một góc khác không). Hệ mô phỏng (gọi tắt là hệ) chỉ bao gồm các hạt electron và ion, di chuyển từ phía nguồn (bên trái) tới tấn công bề mặt kim loại (bên phải). Các hạt neutral và các tạp chất, tro từ phản ứng nhiệt hạch không được xem xét trong nghiên cứu này. Sự va chạm giữa các hạt điện tích, sự tái tạo lại electron sau khi bị hấp thụ ở bề mặt kim loại cũng không được đề cập đến trong bài báo này. Từ trường được xem xét là một hằng số trong suốt quá trình

mô phỏng trong khi điện trường tự phát sinh được tính toán thông qua các phương trình của phương pháp mô phỏng Particle-in-Cell. Chi tiết về phương pháp mô phỏng Particle-in-Cell,

phương trình cũng như trình tự tiến hành, v.v... được Birdsall đề cập rõ ràng trong cuốn sách của mình [14].



Hình 1. Mô phỏng mặt cắt ngang của tokamak (bên trái) và khu vực dùng cho nghiên cứu này (bên phải). Vùng rất nhỏ ở gần bề mặt kim loại khu vực divertor được đem đi mô phỏng.

Ở thời điểm ban đầu, các hạt plasma không có sẵn ở trong hệ. Các hạt electron và ion được bơm vào hệ trong suốt thời gian tính toán theo chiều từ trái sang phải tại vị trí  $x=0$ . Mật độ electron và ion tại khu vực nguồn là như nhau. Vận tốc ban đầu của electron và ion phụ thuộc vào phân bố Maxwellian, và được tính theo nhiệt độ ban đầu của các hạt. Nhiệt độ được sử dụng ở đơn vị electronvolt (eV). Giả thiết rằng ở phía rìa bên phải, các hạt plasma bị hấp thụ hoàn toàn khi chúng tiếp xúc với bề mặt kim loại. Để dễ dàng cho việc mô phỏng và tính toán, tất cả các giá trị đều được chuẩn tắc hóa về dạng  $\hat{A}$  như sau:  $\hat{x} \leftarrow x/\lambda_{De0}$ ,  $\hat{t} \leftarrow \omega_{pe0}t$ ,  $\hat{v} \leftarrow v/v_{e0}$ ,  $\hat{q} \leftarrow q/e$ ,  $\hat{m} \leftarrow m/m_e$ ,  $\hat{\phi} \leftarrow e\phi/m_e v_{e0}^2$ . Trong đó,  $e, m_e, v_{e0}$  lần lượt là điện tích, khối lượng và vận tốc ban đầu của electron.  $\omega_{pe0}, \omega_{ce0}, \lambda_{De0}$  là kí hiệu của tần số của plasma, tần số của cyclotron và chiều dài Debye [12-14];  $x, t, v, m, q, \phi$  lần lượt là tọa độ vị trí, thời gian, vận tốc, khối lượng, điện tích của hạt plasma;  $\phi, E, B$  thứ tự là điện thế, điện trường và từ trường của hệ. Trong khi từ trường là hằng số được đưa làm giá trị đầu vào thì điện thế và điện trường được tính toán thông qua các phương trình nhờ phương pháp Particle-in-Cell [14-16]. Các giá trị đầu vào được sử dụng cho hệ được liệt kê như ở trong Bảng 1. Trong nghiên

cứu này, tỉ số khối lượng giữa electron và ion được sử dụng bằng với tỉ số thực của chúng. Do đó, mặc dù các giá trị đầu vào như mật độ và nhiệt độ được đưa ra khác xa với các giá trị trong thực nghiệm, kết quả trong bài báo này vẫn được chấp nhận để làm rõ hơn về bản chất di chuyển của các hạt plasma cũng như cách hình thành điện thế ở trong hệ. Để hệ được ổn định và đảm bảo độ chính xác cao, các giá trị của bước nhảy thời gian  $\Delta t$  (time-step) và kích thước của mỗi đơn vị độ dài  $\Delta x$  (spacial grid cell) được chọn sao cho thỏa mãn 3 điều kiện sau:  $\Delta x < \lambda_{De0}$ ,  $\omega_{pe0}t < 0.2$ ,  $\omega_{ce0}/\Delta t < 0.2$  [14-16]. Giả thiết rằng điện thế tại nguồn  $x = 0$  bằng không. Tại rìa bên phải, điện áp  $V_{bias}$  được kết nối vào bề mặt kim loại. Trong nghiên cứu này, nhóm chỉ xét ảnh hưởng của điện áp bias mang giá trị âm. Đối với trường hợp sử dụng điện áp bias mang giá trị dương, kết quả thu được cho từng hạt ion và electron sẽ có giá trị ngược lại với kết quả trong bài báo này. Do đó, để tránh trùng lặp, bias điện áp dương không được đưa vào bài báo này. Phần tiếp theo sẽ đề cập kết quả mà phương pháp mô phỏng thu được, cũng như so sánh kết quả các đại lượng của electron và ion khi sử dụng và khi không sử dụng phương pháp bias điện áp.

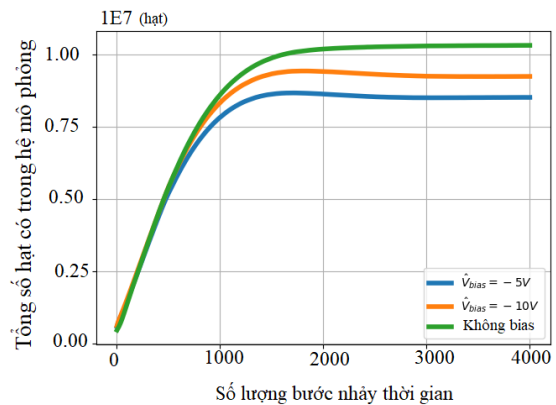
Bảng 1. Các giá trị được sử dụng trong hệ

Kích thước của hệ	$L_x \approx 42 \lambda_{De0}$
Tỉ lệ giữa khối lượng electron và ion	$m_e/m_i = 1/1836$
Tỉ lệ giữa nhiệt độ electron và ion	$kT_{e0}/kT_{i0} = 2$
Mật độ nguồn	$n_e = n_i$
Từ trường	$B_x = 0.2 T$ và $B_z = 1.0 T$
Điện áp bias	$ V_{bias}  = 5, 10 \frac{kT_{e0}}{e}$

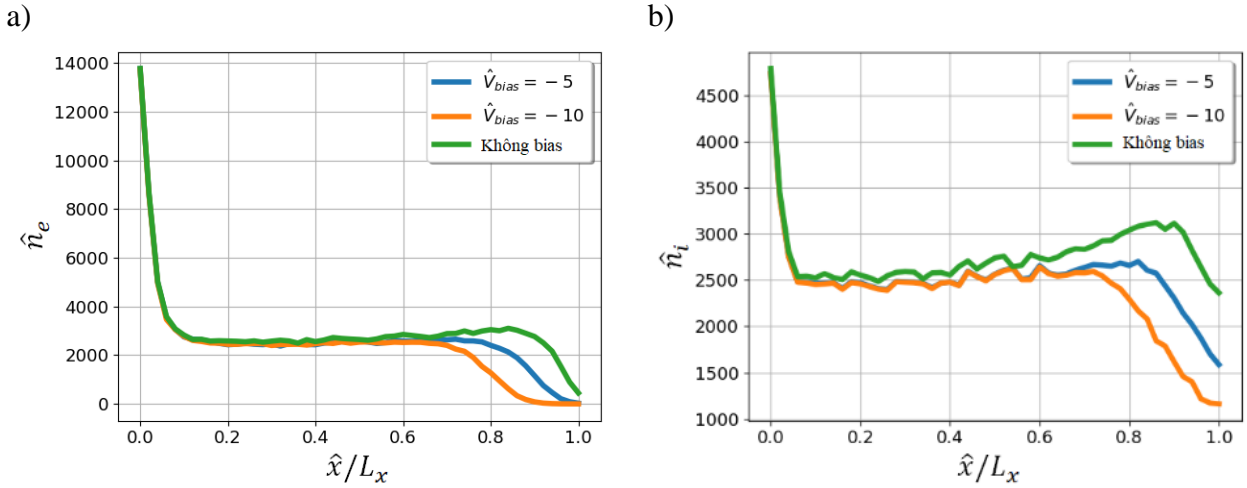
### 3. Kết quả và Thảo luận

Do có sự chênh lệch rõ rệt về khối lượng và vận tốc giữa electron và ion, các hạt electron sẽ di chuyển nhanh hơn tiến gần về phía bề mặt kim loại so với các hạt ion. Điện thế ở vùng kim loại giảm đột ngột do electron mang điện tích âm. Vùng điện tích âm này sẽ thu hút các ion trái dấu di chuyển nhanh dần tiến về phía bề mặt kim loại. Thời gian đủ dài thì số lượng ion tiến tới bề mặt kim loại càng tăng, dẫn đến điện thế cũng tăng dần theo. Lớp vỏ bọc hiệu điện thế được hình thành ngay trước bề mặt kim loại để bảo vệ các hạt electron và ion thoát tại khu vực này. Tới một giá trị nhất định thì số lượng electron và ion trong hệ đạt bão hòa, lượng dịch chuyển và mất mát của các hạt này là tương tự nhau. Electron và ion được bơm liên tiếp vào trong hệ, số lượng electron và ion tăng dần qua thời gian. Khi hệ đạt trạng thái cân bằng hay nồng độ các hạt plasma được bão hòa thì số lượng các hạt plasma này sẽ không tăng nữa và giữ nguyên giá trị với thời gian. Điều này được thể hiện qua Hình 2. Trong bài báo này, có ba trường hợp được nghiên cứu bao gồm: không sử dụng bias điện áp, sử dụng điện áp bias được chuẩn hóa có giá trị bằng -5 và -10. Quá trình các hạt plasma từ khi bắt đầu tăng cho đến khi hệ đạt trạng thái cân bằng là giống nhau giữa trường hợp sử dụng và không sử dụng điện áp bias. Hệ đạt trạng thái

cân bằng gần như là cùng thời điểm đối với các trường hợp so sánh khác nhau. Tuy nhiên, số lượng các hạt plasma có trong hệ sau khi hệ đạt trạng thái cân bằng khác nhau. So sánh với trường hợp không sử dụng bias, bias điện áp làm giảm đáng kể số lượng các hạt plasma có trong hệ để hệ đạt trạng thái cân bằng. Việc giảm của các hạt này sẽ được làm rõ ở phần sau khi xét từng mật độ của electron và ion riêng lẻ. Các đại lượng mật độ, thông lượng và thông hạt dùng để nghiên cứu ảnh hưởng của phương pháp bias điện áp được lấy ra so sánh khi hệ ở trạng thái cân bằng. Khi hệ đạt trạng thái cân bằng (hay bão hòa) tất cả các đại lượng dùng trong hệ đều duy trì hằng số với thời gian.



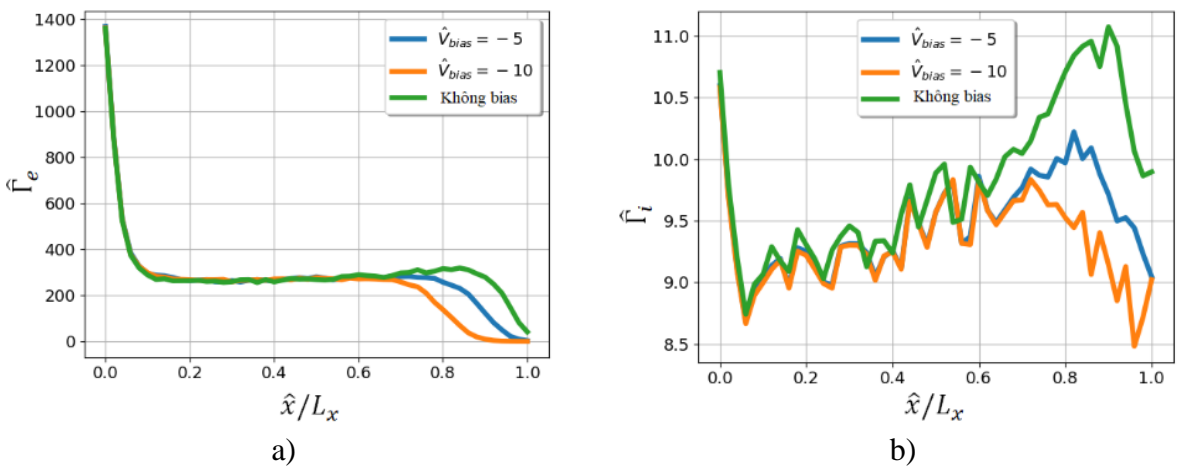
Hình 2. Sự phụ thuộc của tổng số hạt có trong hệ với thời gian mô phỏng.



Hình 3. Mật độ của electron (Hình a) và ion (Hình b) có trong hệ tại thời điểm hệ đạt trạng thái cân bằng.

Hình 3 mô tả mật độ của các hạt electron (Hình 3a) và ion (Hình 3b) ở trong hệ. Tại vị trí ban đầu mật độ của cả electron và ion là gần như nhau giữa các trường hợp sử dụng và không sử dụng điện áp bias. Sự chênh lệch khi sử dụng phương pháp này được thể hiện rõ khi xét ở khu vực càng gần bề mặt kim loại. Ở khu vực này, cả hai hình ảnh mật độ thu được của electron và ion cho thấy, sử dụng phương pháp bias điện áp làm giảm đáng kể số lượng các hạt plasma tiến tới bề mặt kim loại. Sử dụng bias điện áp càng lớn (xét giá trị tuyệt đối của nó), số lượng các hạt electron và ion tiến về bề mặt kim loại ít dần. Theo quy tắc vật lý, điện áp âm sẽ kích thích các ion dương chạy về phía mình và đẩy các hạt điện tích âm ra

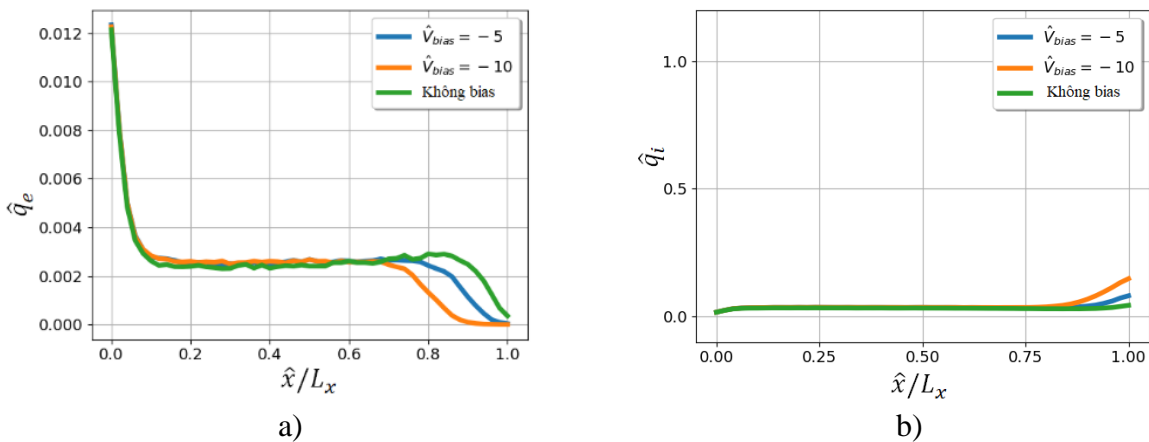
xa. Kết quả rằng, gần bề mặt kim loại, số lượng các hạt electron gần như là bằng không khi có bias điện áp. Khi các hạt electron và ion di chuyển, lớp vỏ bọc điện thế sẽ được hình thành để ngăn chặn sự thoát của các hạt ở trước bề mặt kim loại. Hơn nữa, ion có khối lượng và bán kính Larmor rất lớn. Chúng rất khó khăn trong việc di chuyển và di chuyển chậm hơn rất nhiều so với các hạt electron. Do đó, số lượng của ion ở bề mặt kim loại không bị tăng lên khi bị áp bias điện vào kim loại. Điều này sẽ ảnh hưởng lớn tới thông lượng hạt và nhiệt thông tới bề mặt kim loại.



Hình 4. Thông lượng của electron (Hình a) và ion (Hình b) khi hệ đạt trạng thái cân bằng.

Thông lượng và nhiệt thông của hạt phụ thuộc vào vận tốc và mật độ của hạt. Công thức tính thông lượng ( $\Gamma_s$ ) và nhiệt thông ( $q_s$ ) của loại hạt  $s$  (electron hoặc ion) sử dụng trong nghiên cứu này tương tự với công thức được sử dụng trong công bố trước đây của nhóm chúng tôi [10]. Khi thông lượng phụ thuộc vào vận tốc thì nhiệt thông của hạt phụ thuộc vào bình phương của vận tốc. Do đó, biên dạng của hai đại lượng này thu được khác nhau. Hình 4 và hình 5 mô tả thông lượng hạt và nhiệt thông của electron (Hình 4a, 5a) và ion (Hình 4b, 5b). Sự chênh lệch rõ ràng ở mật độ của hạt được thể hiện ở kết quả thông lượng này. Cả thông lượng của hạt electron và ion đều giảm rõ rệt khi sử dụng phương pháp bias điện áp. Điện áp có giá trị càng lớn thì có thể giảm được lượng lớn thông lượng tới bề mặt kim loại. Đối với nhiệt thông của electron cũng cho ra kết quả tương tự khi sử dụng phương pháp bias điện áp ở Hình 5a. Dòng nhiệt thông tiến tới bề mặt kim loại giảm dần khi sử dụng phương pháp này. Nhưng kết quả này lại trái ngược khi xét tới dòng nhiệt thông của ion. Nhiệt thông của ion tăng khi sử dụng bias điện áp trái ngược với xu hướng giảm của electron, xem ở Hình 5b. Điều này được gây ra

bởi điện áp bias mang giá trị âm. Giống như đã đề cập trước đó, điện áp âm có xu hướng đẩy các hạt trái dấu mang điện tích âm ra xa mình và thu hút các hạt trái dấu mang điện tích dương về phía mình. Điện áp âm kích thích các hạt ion tiến về phía nó thông qua việc làm tăng vận tốc của hạt. Do đó, vận tốc của các hạt ion ở gần bề mặt kim loại đạt giá trị cao hơn so với những khu vực khác. Bias với điện áp âm có giá trị càng lớn thì những ion có thể tiến tới bề mặt kim loại có vận tốc càng cao. Nhiệt thông phụ thuộc vào bình phương của vận tốc. Chính vì vậy, tại gần bề mặt của kim loại, nhiệt thông của ion trong trường hợp không sử dụng bias điện áp sẽ có giá trị nhỏ hơn so với sử dụng bias mang điện áp âm. Tuy nhiên, vì vận tốc của các hạt ion nhỏ hơn rất nhiều so với các hạt electron mặc dù khối lượng chúng lớn hơn nghìn lần, tổng nhiệt thông của hệ (tổng nhiệt thông của electron và ion) vẫn giảm khi sử dụng bias điện áp. Trong trường hợp sử dụng giá trị điện áp bias cực kỳ lớn (mang chiều âm) thì mức tăng ở ion mới lớn hơn so với độ giảm ở electron. Khi đó tổng nhiệt lượng của hệ sẽ tăng lên khi so sánh với trường hợp không sử dụng phương pháp này.



Hình 5. Nhiệt thông của electron (Hình a) và ion (Hình b) khi hệ đạt trạng thái cân bằng.

#### 4. Kết luận

Tác động của phương pháp bias điện áp lên dòng dịch chuyển của các hạt electron và ion tới bề mặt được đề cập trong bài báo này thông qua

phương pháp mô phỏng sử dụng model mẫu Particle-in-Cell. Mô hình mô phỏng PIC giúp tính toán được điện trường và điện thế tự phát sinh khi có sự dịch chuyển của các hạt electron và ion. Một vùng có kích thước rất nhỏ gần bề mặt

kim loại ở khu vực divertor của lò phản ứng nhiệt hạch được đem ra mô phỏng một chiều. Dòng hạt electron và ion được bơm liên tục trong suốt quá trình mô phỏng, khi giả thiết rằng các hạt được hấp thụ hoàn toàn ở bề mặt kim loại. Kết quả của mô phỏng cho ta thấy rằng, phương pháp bias sử dụng điện áp âm gia tốc các hạt ion tiến tới bề mặt kim loại và đẩy lùi các hạt electron về khu vực đầu nguồn. Thông lượng của cả electron và ion tiến tới bề mặt kim loại được giảm đáng kể khi sử dụng phương pháp này. Trong khi nhiệt thông của electron cũng giảm đáng kể thì nhiệt thông của ion lại tăng lên rõ rệt khi sử dụng phương pháp bias. Bài báo này chỉ nghiên cứu kết quả khi sử dụng điện áp bias mang giá trị âm. Trong trường hợp sử dụng bias điện áp dương, dòng nhiệt thông thu được sẽ có kết quả ngược lại. Nhiệt thông sẽ giảm đáng kể đối với trường hợp của ion và tăng lên đối với các hạt electron. Khi xét riêng về giảm thông lượng và nhiệt lượng từng loại hạt electron và ion riêng lẻ thì bias điện áp có thể giảm được thông lượng cho cả hai loại hạt nhưng chỉ có thể giảm được nhiệt lượng của một loại hạt trong khi làm tăng nhiệt lượng của loại hạt khác. Trong trường hợp xét về giảm tổng thông lượng và nhiệt lượng của plasma tới bề mặt kim loại thì đây là một phương pháp khả quan. Vì vậy, tùy vào mục đích sử dụng và nghiên cứu, bias điện áp có thể được đưa vào xem xét để giảm tải dòng hạt năng lượng cao tới bề mặt kim loại.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hoàn thành trong thời gian theo học nghiên cứu sinh của tôi tại Đại học SOKENDAI, Nhật Bản. Xin được gửi lời cảm ơn chân thành nhất tới 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) đã hỗ trợ và hướng dẫn 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] Mikaelian, T. (2009). arXiv:0906.3884.
- [4] Pilipenko, V. et al. (2006). "Statistical relationships between satellite anomalies at geostationary orbit and high-energy particles". *Adv. Space Res.* 37(6), 1192–1205.
- [5] Crisanti, F. et al. (2011). "FAST: A European ITER satellite experiment in the view of DEMO". *Fusion Eng. Des.* 86(6–8), 497–503.
- [6] Janeschitz, G. & Jct, I. (2001). "Plasma-wall interaction issues in ITER". *J. Nucl. Mater.* 290, 1–11.
- [7] Townsend, L. W. (2001). "Overview of active methods for shielding spacecraft from energetic space radiation". *Phys. Med.* 17, 84–85.
- [8] Matthews, G. F. (1995). "Plasma detachment from divertor targets and limiters". *J. Nucl. Mater.* 220, 104–116.
- [9] 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.
- [10] Le, T. et al. (2021). "Particle simulation of controlling particle and heat flux by magnetic field". *Plasma Fusion Res.* 16, 1401103–1401103.
- [11] Le, T., Suzuki, Y., Hasegawa, H. et al. (2023). "High heat flux reduction to materials using current filaments". *Sci Rep* 13, 8300.
- [12] P Helander, SJ Fielding, RH Cohen, and DD Ryutov. (2000). "Electric biasing of the divertor tiles in compass-d". *Czechoslovak Journal of Physics*, 50 (12):1421-1430.
- [13] GM Staebler. (1995). "Divertor bias experiments". *Journal of nuclear materials*, 220:158-170.
- [14] Birdsall, C. K. & Langdon, A. B. (2004). *Plasma Physics Via Computer Simulation*, CRC Press, London.
- [15] Verboncoeur, J. P. (2005). "Particle simulation of plasmas: Review and advances". *Plasma Phys. Control. Fusion* 47, A231.
- [16] Tskhakaya, D. et al. (2007). "The particle-in-cell method". *Contrib. Plasma Phys.* 47, 563–594.