

MÔ PHỎNG TRƯỜNG TĨNH ĐIỆN VÀ LỰA CHỌN HÌNH DẠNG BẮN CỰC CHO THIẾT BỊ PHÂN TÁCH RÁC THẢI ĐIỆN TỬ

ELECTROSTATIC MODELING AND CHOICE OF ELECTRODE SHARE FOR ELECTRONIC WASTE SEPARATION DEVICES

Đinh Quốc Trí, Lê Đức Tùng

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

tri.dinhquoc@hust.edu.vn; tung.leduc1@hust.edu.vn

Tóm tắt - Các hạt có tính chất điện khác nhau thì có quỹ đạo di chuyển khác nhau trong trường tĩnh điện. Do đó, xử lý, phân tách rác thải điện tử bằng công nghệ tĩnh điện là phương pháp cho hiệu quả cao. Để có thể thiết kế, chế tạo thiết bị thì yêu cầu trước tiên là các nhà nghiên cứu phải xác định chính xác được phân bố điện trường tĩnh tạo ra bởi các thiết bị này. Trong nội dung bài báo, tác giả áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH)-tích hợp trong phần mềm Maxwell ANSYS để tính toán mô phỏng trường tĩnh điện. Thông qua kết quả phân tích mô phỏng điện trường với nhiều dạng điện cực khác nhau, tác giả đề xuất lựa chọn được điện cực phù hợp cho thiết bị phân tách rác thải. Kết quả mô phỏng cũng được so sánh với thực nghiệm trên thiết bị phân tách rác thải điện tử được chế tạo.

Từ khóa - rác thải điện tử; thiết bị phân tách rác thải điện tử; điện trường tĩnh; phương pháp phần tử hữu hạn; phần mềm Maxwell ANSYS

Abstract - The particles which have different electrical properties will have different trajectories in electric field. Therefore, the treatment and the separation of electronic waste (e-waste) by electrostatic technology is a highly effective method. In order to design and manufacture the device, the first requirement is that the researchers must pinpoint the distribution of electric fields generated by these devices. In this paper, the authors apply finite element method (FEM) Integrated in Maxwell ANSYS software to calculate and simulate electric fields. And then, through the electric field analysis of different electrode types, the authors propose an electrode share suitable for e-waste separation device. The results from simulation are also compared with those from experiments on the real e-waste separation device.

Key words - E-waste; e-waste separation device; Electrostatic; Finite element method; Maxwell ANSYS software

1. Đặt vấn đề

Chất thải điện tử là một loại chất thải rất độc. Loại chất thải này chứa nhiều thành phần gây ô nhiễm nghiêm trọng, cực kỳ nguy hại cho sức khỏe con người và môi trường như: chì (Pb); cadmium (Cd); thủy ngân (Hg); các hợp chất của brom như: PBBs; PBDEs; asen (thạch tín); CFC; HCFC (có khả năng phá hủy tầng ozone).

Tuy nhiên, ở khía cạnh tích cực, chất thải điện tử thực sự là một “mỏ vàng” theo cả nghĩa đen lẫn nghĩa bóng, bởi chứa nhiều vật liệu quý có thể thu hồi như: vàng; bạc; đồng; platin; niken... Đây là “dòng chất thải có khả năng tiềm tàng”, nếu được xử lý và khai thác đúng cách. Ước tính, trong 1 tấn điện thoại di động có đến 150g vàng, gấp 10 lần lượng vàng trong 1 tấn quặng vàng, chưa kể đến 100kg đồng, 3kg bạc và nhiều kim loại khác. Bởi thế, không xử lý chất thải điện tử đồng nghĩa với việc lãng phí nguồn tài nguyên cực lớn [1].

Vì vậy, việc nghiên cứu và chế tạo các thiết bị tái chế chất thải điện tử là một vấn đề cấp thiết được đặt ra, để có thể khai thác nguồn tài nguyên lớn này và giảm tác hại đến môi trường.

Hiện nay, trên thế giới có rất nhiều phương pháp xử lý chất thải điện tử, từ những phương pháp thủ công thô sơ đến các phương pháp hiện đại tiên tiến như [2]: Công nghệ sử dụng điện phân và hóa học; Công nghệ sử dụng nguyên lý trọng lực; Công nghệ sử dụng nhiệt và hóa học; Công nghệ sử dụng tĩnh điện.

Phương pháp tĩnh điện là một phương pháp hiện đại, không gây ô nhiễm môi trường và sức khỏe người phân loại. Chất thải được nghiền nhỏ và sơ chế. Sau đó, dựa vào tính chất vật lý của các hạt kim loại và phi kim mà khi đưa

qua một trường tĩnh điện sẽ đi với quỹ đạo khác nhau và được hứng ở các khay thu hồi khác nhau [2], [3].

Khi nghiên cứu thiết bị xử lý chất thải điện tử bằng công nghệ cao áp tĩnh điện, một trong những vấn đề quan trọng là phải xác định chính xác phân bố điện trường giữa hai bản cực. Chỉ có xác định chính xác được phân bố này thì mới có thể lựa chọn được hình dạng điện cực hợp lý, xác định được quỹ đạo chuyển động của các hạt khác nhau trong điện trường. Để xác định phân bố trường tĩnh điện, người ta có thể sử dụng phương pháp thực nghiệm (thiết kế mẫu và đo đạc) hoặc phương pháp mô phỏng [4]. Phương pháp thực nghiệm tuy cho kết quả chính xác nhưng lại có chi phí cao. Trên thực tế, các nhà thiết kế thường sử dụng phương pháp mô phỏng, lựa chọn thông số phù hợp rồi sau đó mới thiết kế, chỉnh định mẫu thật. Sau đó so sánh giữa kết quả thực tế đo được từ thí nghiệm và kết quả mô phỏng tính toán lý thuyết. Nếu sự sai khác trong phạm vi chấp nhận được, ta có thể tiến hành sản xuất thiết bị thật.

Bài báo này tập trung nghiên cứu một số vấn đề: Mô phỏng phân bố điện trường bằng phần mềm Maxwell, từ đó tiến hành lựa chọn hình dạng điện cực thích hợp. Kết hợp giữa thực nghiệm và mô phỏng, đưa ra các kiến nghị và đề xuất.

Trong phần 2 của bài báo, tác giả giới thiệu cơ sở lý thuyết trường tĩnh điện, các phương pháp giải bài toán tĩnh điện. Phần 3 trình bày kết quả mô phỏng trường tĩnh điện với các loại điện cực khác nhau. Từ kết quả này cho phép chúng ta lựa chọn hình dạng điện cực thích hợp. Và cuối cùng, so sánh giữa mô phỏng và kết quả đo đạc mẫu thí nghiệm thực tế sẽ được trình bày trong phần 4.

2. Hệ phương trình Maxwell mô tả trường tĩnh điện

Điện trường tĩnh là bài toán nghiên cứu phân bố điện trường ($\mathbf{E}$) trong không gian (Ω) tạo ra bởi phân bố điện tích (ρ). Điện trường tĩnh là một trường hợp riêng của trường điện từ tổng quát và nó được giới hạn bởi hai điều kiện sau:

- Các đại lượng điện không thay đổi theo thời gian. Đạo hàm riêng các đại lượng theo thời gian đều bằng không.
- Không có sự chuyển động của các hạt mang điện, nghĩa là mật độ dòng điện luôn bằng không.

Mô hình trường tĩnh điện trong không gian (Ω), điện tích biên (Γ) được mô tả bằng hệ phương trình:

$$\begin{cases} \text{rot} \mathbf{E} = 0 \\ \text{div} \mathbf{D} = \rho \end{cases} \text{ trong } \Omega,$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E},$$

$$\begin{cases} \mathbf{n} \times \mathbf{E}|_{\Gamma_e} = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{D}|_{\Gamma_d} = 0 \end{cases}, \text{ với } \Gamma = \Gamma_e \cup \Gamma_d$$
(1)

Trong đó:

$\mathbf{E}$ là vec tơ cường độ điện trường (V/m);

$\mathbf{D}$ là vec tơ độ điện dịch (C/m²);

ρ là mật độ điện tích (C/m³);

ε là hằng số điện môi của môi trường (F/m).

Phương trình và điều kiện biên của trường điện tĩnh được tách thành 2 nhóm độc lập, mỗi nhóm chỉ chứa các đại lượng liên quan đến trường từ hoặc trường điện. Ta chỉ khảo sát trường điện tĩnh, đó là trường điện không thay đổi theo thời gian của các điện tích đứng yên.

Để giải hệ phương trình (1), người ta có thể sử dụng phương pháp giải tích hoặc các phương pháp số như phương pháp tích phân số, phương pháp vi phân số [4].

Phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) là một phương pháp vi phân số. Cơ sở của phương pháp này là làm rời rạc hóa các miền liên tục phức tạp của bài toán. Các miền liên tục được chia thành nhiều miền con (các phần tử). Các miền con này được liên kết với nhau bởi các điểm nút. Trên miền con này, các phương trình vi phân tương đương với bài toán được giải xấp xỉ dựa trên các hàm xấp xỉ trên từng phần tử, thỏa mãn các điều kiện biên cùng với sự cân bằng và liên tục giữa các phần tử. Các hàm xấp xỉ này được biểu diễn qua các giá trị của hàm (hoặc giá trị của đạo hàm) tại các nút trên phần tử. Các giá trị này được gọi là các bậc tự do của phần tử và được xem là ẩn số cần tìm của bài toán [4]-[6].

Phương pháp PTHH có khối lượng tính toán lớn, kết quả chính xác hay không phụ thuộc và quá trình chia miền khảo sát thành các miền con. Tuy nhiên, nhược điểm này có thể khắc phục bằng cách sử dụng công cụ máy tính và các phần mềm chuyên dụng. Do đó có thể nói phương pháp PTHH là phương pháp số hiệu quả và thông dụng nhất, rất thích hợp với hàng loạt bài toán vật lý và kỹ thuật, trong đó hàm cần tìm được xác định dựa trên các miền phức tạp gồm nhiều vùng nhỏ có đặc tính hình học và vật lý khác nhau. Phương pháp này cũng rất hiệu quả với các bài toán thiết kế sơ bộ các thiết bị điện - điện tử, xử lý nhanh các thay đổi về kích

thước và hình dạng của thiết bị [4]-[6]. Trước khi sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng, đánh giá phân bố cường độ điện trường, các nhà nghiên cứu của bộ môn Hệ thống điện, trường Đại học Bách khoa Hà Nội sử dụng phương pháp thực nghiệm để chế tạo thiết bị phân tách rác thải điện tử. Phương pháp thực nghiệm tuy cho kết quả tin cậy cao, nhưng có nhược điểm là lãng phí nhiều thời gian và chi phí lớn.

Nghiên cứu này lựa chọn sử dụng phần mềm Maxwell của hãng ANSYS (Phần mềm phân tích và mô phỏng điện từ trường dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn - FEM) để phục vụ cho việc thiết kế sơ bộ và có cái nhìn tổng quan về phân bố điện từ trường của thiết bị xử lý chất thải điện tử. Kết quả thu được sẽ giúp loại bỏ những mẫu thiết kế chế tạo không phù hợp, rút ngắn thời gian và giảm chi phí nghiên cứu [7].

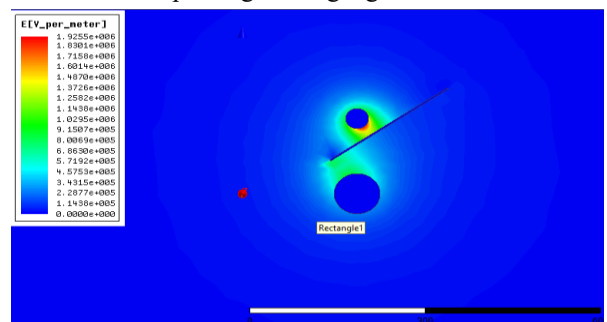
3. Mô phỏng phân bố điện trường bằng phần mềm Maxwell ANSYS

Để chế tạo một thiết bị phân tách chất thải điện tử hoạt động với hiệu suất cao, các nhà nghiên cứu chỉ ra rằng thiết bị đó trước tiên phải tạo ra được một vùng trường tĩnh điện tương đối đồng nhất. Dưới đây, tác giả sẽ thực hiện một số tính toán mô phỏng điện trường với các hình dạng điện cực khác nhau để minh chứng và lý giải việc lựa chọn hình dáng điện cực của thiết bị. Để có cái nhìn tổng quan về mối liên hệ giữa hình dáng điện cực và sự phân bố điện từ trường, tác giả đã thực hiện mô phỏng phân bố điện trường với một số trường hợp điện cực như sau: Điện cực dạng trụ-trụ; Điện cực dạng dây dẫn và trụ; Điện cực dạng trụ và hình rẽ quạt. Đây là các hình dạng điện cực thường được sử dụng và cũng đã minh chứng được hiệu quả của nó trong việc phân tách rác thải điện tử [1], [2].

3.1. Trường hợp 1

Các thông số ban đầu:

- Điện cực trên hình trụ, bán kính 20mm, đặt điện áp -30kV;
- Điện cực dưới hình trụ, bán kính 40mm, đặt điện áp +30kV;
- Máng nghiêng dài 250mm, nối đất, nghiêng 35° so với phương nằm ngang.



Hình 1. Phân bố điện trường bán cực trụ+trụ

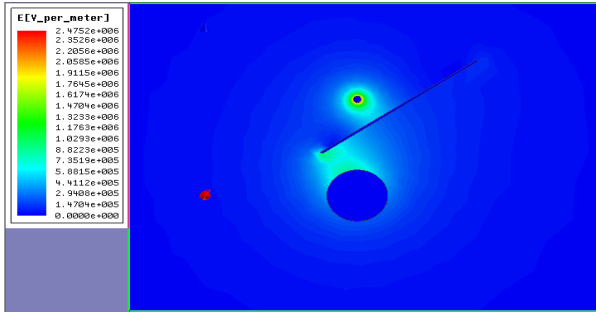
Kết quả mô phỏng phân bố điện trường bằng phần mềm Maxwell được giới thiệu trên Hình 1. Ta có thể nhận thấy: điện trường phân bố không đồng đều giữa các điện cực. Trong vùng không gian hạt bay ra khỏi máng nghiêng, điện trường có giá trị nhỏ. Nếu chế tạo thiết bị sử dụng các điện

cực dạng này thì hiệu suất phân tách chất thải là rất thấp.

3.2. Trường hợp 2

Các thông số đầu vào:

- Điện cực trên là dây dẫn, đặt điện áp -30kV;
- Điện cực dưới hình trụ, bán kính 40mm, đặt điện áp +30kV;
- Máng nghiêng dài 250mm, nối đất, nghiêng 35° so với phương nằm ngang.



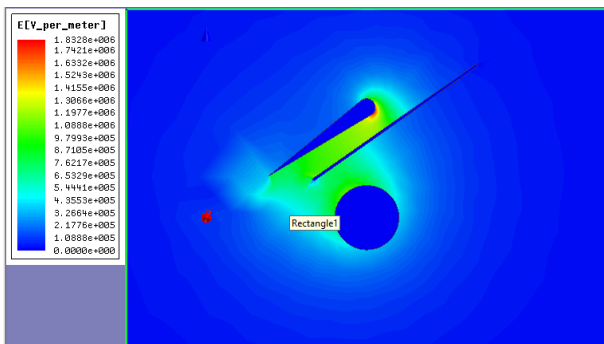
Hình 2. Phân bố điện trường bản cực dây dẫn+trụ

Kết quả mô phỏng phân bố điện trường bằng phần mềm Maxwell được cho trên Hình 2. Điện trường phân bố giữa 2 điện cực là rất yếu. Do đó, phương án đặt dây dẫn làm 1 điện cực là không hiệu quả. Nếu muốn chế tạo thiết bị phân tách dạng này, người ta thường sử dụng từ 3 đến 4 dây dẫn song song và coi chúng như 1 điện cực.

3.3. Trường hợp 3

Các thông số đầu vào:

- Điện cực trên hình rẻ quạt, đặt điện áp -30kV;
- Điện cực dưới hình trụ, bán kính 40mm, đặt điện áp +30kV;
- Máng nghiêng nối đất, dài 250 mm, nghiêng 35° so với phương nằm ngang.



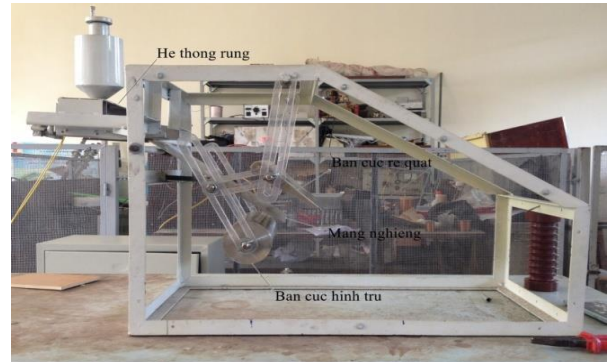
Hình 3. Phân bố điện trường điện cực máng nghiêng+trụ

Kết quả mô phỏng phân bố điện trường bằng phần mềm Maxwell được cho trên Hình 3. Điện trường phân bố tương đối đồng đều giữa 2 bản cực và trong môi trường làm việc của các hạt. Ngoài ra, giá trị điện áp đặt lên hai bản cực không hề ảnh hưởng đến sự phân bố điện trường, mà chỉ ảnh hưởng đến giá trị của điện trường đó.

Như vậy, thông qua một số bài toán mô phỏng trường tĩnh điện với các dạng điện cực khác nhau, chúng ta có thể kết luận rằng, việc lựa chọn điện cực hình rẻ quạt và điện cực hình trụ là hợp lý và có thể chế tạo thiết bị phân tách rác thải đạt hiệu suất cao. Lựa chọn này cũng phù hợp với các

kết quả nghiên cứu của các nhà khoa học Nga [8].

Thiết bị lọc chất thải điện tử với điện cực hình rẻ quạt kết hợp điện cực hình trụ đã được chế tạo thành công tại Phòng thí nghiệm Cao áp, Bộ môn Hệ thống điện, Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội (Hình 4).



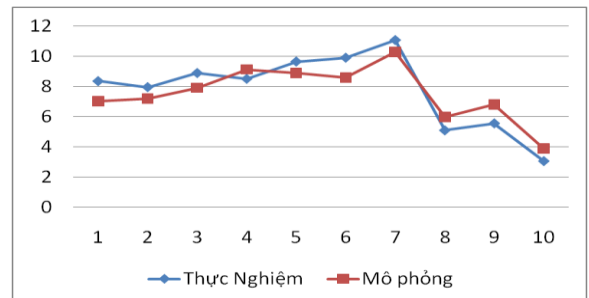
Hình 4. Thiết bị phân tách rác thải điện tử sử dụng điện cực hình rẻ quạt và điện cực hình trụ

4. So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Để so sánh kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng đối với mô hình điện cực hình rẻ quạt và điện cực hình trụ, ta dùng máy đo cường độ điện trường HI- 3604 đo tại nhiều điểm khác nhau. Ta có bảng kết quả như sau:

Bảng 1. Kết quả giá trị điện trường mô phỏng và thực nghiệm

Tọa độ (x,y) cm	(196, 198)	(208, 180)	(185, 210)	(280, 275)	(210, 228)	(235, 245)	(255, 260)	(235, 195)	(180, 185)	(150, 150)
E thực nghiệm (kV/cm)	8,335	7,937	8,872	8,487	9,633	9,887	11,056	5,075	5,537	3,033
E mô phỏng (kV/cm)	7,010	7,186	7,886	9,101	8,866	8,559	10,258	5,948	6,789	3,870



Hình 5. Biểu đồ kết quả thực nghiệm và mô phỏng tại 10 điểm đo ($E(x,y)$ kV/cm)

Dựa vào kết quả ở Bảng 1 và biểu đồ Hình 5, ta nhận thấy sự tương đồng của kết quả đo và kết quả mô phỏng. Tuy có sai số nhất định, nhưng có thể giải thích sai số là do những nguyên nhân sau:

- Điện cực được gia công không chính xác: Trong mô hình mô phỏng, các bản cực được coi là phẳng hoàn toàn. Tuy nhiên trong thực nghiệm, do vấn đề kỹ thuật chế tạo, các điện cực thường không phẳng tuyệt đối, cấu tạo bề mặt vẫn có những chỗ lồi lõm.
- Điện áp đặt lên điện cực dao động: Trong thực nghiệm, khi điều chỉnh điện áp đặt lên điện cực, điện áp này không giữ ở một vị trí cố định mà dao động quanh một giá trị.

- Khoảng cách giữa các điện cực có sai lệch: Trong mô hình mô phỏng, khoảng cách điện cực được vẽ một cách chính xác. Trong thực nghiệm, khoảng cách được đo bằng thước nên có sai số. Bên cạnh đó, trong quá trình thực nghiệm, khoảng cách còn bị ảnh hưởng bởi độ rung của khung giá đỡ các điện cực.
- Ảnh hưởng của nhiệt độ, độ ẩm không khí: Trong mô phỏng, các điều kiện và trạng thái của không khí đều là lý tưởng, không xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm.
- Sai số khi sử dụng thiết bị đo: Khi thực hiện đo cường độ điện trường bằng thiết bị thật, do đặc tính của thiết bị đo nên gây ra sai số.

5. Kết luận

Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo, tác giả đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để giải bài toán điện trường tĩnh trong thiết bị tĩnh điện để phân tách rác thải điện tử. Tác giả cũng sử dụng phần mềm Maxwell để mô phỏng trường tĩnh điện của thiết bị xử lý chất thải điện tử, từ đó lựa chọn dạng điện cực phù hợp. Kết quả thu được tương đồng với các kết quả của các nhóm nghiên cứu người Nga. Ngoài ra, thông qua mô hình thiết bị thật được chế tạo, tác giả đã so sánh cường độ điện trường thu được từ mô phỏng và đo đạc thực nghiệm.

Trong các hướng nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả sẽ nghiên cứu xác định quỹ đạo chuyển động của hạt chất

trong trường tĩnh điện. Thông qua mô phỏng trường tĩnh điện và mô phỏng quỹ đạo bay của hạt chất thải, xác định vị trí đặt máng hứng chất thải phân tách để thu được hiệu suất cao nhất.

Ngoài ra các nghiên cứu về đánh giá hiệu suất của thiết bị xử lý chất thải điện tử dạng máng nghiêng theo các thông số: Hình dạng điện cực, góc nghiêng của điện cực, điện áp đặt vào các điện cực, cũng hứa hẹn sẽ thu được nhiều kết quả khả quan.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Stevens, J. Thomas, C. Fotea (2005). *Recovery & Recycling of Waste Electronic Circuit Boards*, University of Surrey Environmental Body.
- [2] Ronald E. Hester, Roy M. Harrison (2009). *Electronic Waste Management*, Royal Society of Chemistry.
- [3] Đinh Quốc Trí (2013). Đánh giá khả năng tích điện của các phần tử dạng hạt có tính chất về điện khác nhau. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 97, 23-27.
- [4] Đặng Văn Đào, Lê Văn Doanh (2001). *Các phương pháp hiện đại trong nghiên cứu tính toán thiết kế kỹ thuật điện*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [5] Gerard Meunier (2008). *The Finite Element Method for Electromagnetic Modeling*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons.
- [6] A.E Bondeson, T. Rylander, and P. Ingelstrom (2005). *Computational Electromagnetics*, Springer, New York.
- [7] Peter Kohnke (1999). *Ansys Theory Reference*, ANSYS.
- [8] Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М (1974). *Основы газодинамики дисперсных систем*, Энергия.

(BBT nhận bài: 07/06/2015, phản biện xong: 29/07/2015)