

# Mô hình hóa cơ chế dẫn điện của vật liệu polyetylen mật độ thấp bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Hoàng Mai Quyền<sup>1</sup>, Vũ Thị Thu Nga<sup>2\*</sup>, Nguyễn Mạnh Quân<sup>1</sup>, Severine Le Roy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup>Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

<sup>3</sup>Trung tâm Nghiên cứu Khoa học Quốc gia Pháp

Ngày nhận bài 20/7/2020; ngày chuyển phản biện 22/7/2020; ngày nhận phản biện 20/8/2020; ngày chấp nhận đăng 28/8/2020

## Tóm tắt:

Polyme được sử dụng như vật liệu cách điện ngày càng phổ biến trong nhiều lĩnh vực ứng dụng khác nhau. Trong kỹ thuật điện - điện tử, polyme được sử dụng trong cáp truyền tải điện cao áp, tụ điện, máy biến áp hoặc được sử dụng như là một bộ phận của hệ thống nhúng trong mô đun IGBT nhờ các đặc tính nhiệt và cách điện vượt trội. Một trong những nhược điểm của polyme là chúng tích trữ các điện tích không gian trong một thời gian dài, dẫn đến sự gia tăng của điện trường so với giá trị thiết kế ban đầu. Các mô hình nghiên cứu cơ chế dẫn điện của vật liệu polyme ngày càng được phát triển để có thể dự đoán được cơ chế dẫn điện dưới ứng suất nhiệt - điện. Trong nghiên cứu này, từ mô hình số theo phương pháp thể tích hữu hạn (FVM), nhóm tác giả đã phát triển xây dựng mô hình cơ chế dẫn điện của vật liệu polyetylen mật độ thấp (LDPE) dựa vào phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Kết quả mô phỏng của mô hình này cũng được so sánh, đánh giá với kết quả thực nghiệm và của mô hình số FVM dưới tác động của những điện trường khác nhau đặt trên vật liệu polyetylen mật độ thấp.

**Từ khóa:** cơ chế dẫn điện, điện tích không gian, LDPE, phương pháp phần tử hữu hạn.

**Chỉ số phân loại:** 2.2

## **Đặt vấn đề**

Từ đầu thế kỷ XXI, vật liệu cách điện đã được nghiên cứu ứng dụng mạnh trong nhiều lĩnh vực như điện tử công suất, vi điện tử và đặc biệt là trong lĩnh vực truyền tải điện [1, 2] khi hệ thống truyền tải điện cao áp một chiều (HVDC) ngày càng phát triển để kết nối các lưới điện truyền tải từ các nguồn điện phân tán và tăng cường tính liên kết giữa các lưới điện quy mô lớn [3, 4]. Vật liệu polyme là mối quan tâm hàng đầu của các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực truyền tải điện năng bởi những ưu việt của nó về tính kinh tế, nhiệt độ hoạt động, dễ dàng kết nối và giảm ô nhiễm môi trường [5, 6]. Tuy nhiên, khi các vật liệu polyme chịu các ràng buộc nghiêm trọng và đa vật lý như điện trường mạnh, nhiệt độ cao, chiếu xạ hoặc ma sát cơ học đáng kể, chúng có khả năng lưu trữ các điện tích không gian, có thể ảnh hưởng đến các tính chất điện môi của vật liệu [7, 8]. Sự xuất hiện của điện tích không gian bên trong vật liệu có thể dẫn đến lão hóa sớm vật liệu, nó có thể rút ngắn tuổi thọ của vật liệu cách điện bởi sự hư hỏng điện môi [9, 10]. Sự tích tụ điện tích trong vật liệu khi chịu tác động của trường đặt còn làm biến dạng điện trường cục bộ, khi điện trường bị biến

dạng đạt đến một giá trị đủ lớn sẽ dẫn đến sự cố điện môi [11]. Do đó, nghiên cứu về việc hình thành và vận chuyển điện tích không gian trong các vật liệu gốc polyetylen là vô cùng cần thiết để có được sự hiểu biết sâu sắc và cải thiện các tính chất của vật liệu polyme, phát triển các vật liệu mới hiệu quả hơn.

Các mô hình về cơ chế dẫn trong vật liệu polyme được xây dựng có thể giúp hiểu được cơ chế động của điện tích không gian bên trong vật liệu, hơn nữa toàn bộ các phép đo thực nghiệm hiện có đối với polyetylen cung cấp cơ sở cho việc phát triển các mô hình vận chuyển điện tích không gian trong loại điện môi này. Với mục đích đó, một mô hình theo phương pháp phần tử hữu hạn phát triển từ mô hình số theo phương pháp thể tích hữu hạn [12] đã được phát triển, nhằm hiểu và dự đoán các hiện tượng hình thành và vận chuyển điện tích trong polyetylen mật độ thấp (LDPE) tính đến các hiện tượng phân cực, vận chuyển điện tích khi chúng chịu ứng suất khác nhau. Kết quả tính toán của mô hình này và sự so sánh kết quả của mô hình với kết quả thực nghiệm và của mô hình trước được thể hiện ở phần sau của bài báo.

\*Tác giả liên hệ: Email: ngavtt@epu.edu.vn

# Modelling the conduction mechanisms in low density polyethylene material using finite element method

Mai Quyen Hoang<sup>1</sup>, Thi Thu Nga Vu<sup>2\*</sup>,  
Manh Quan Nguyen<sup>1</sup>, Severine Le Roy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry

<sup>2</sup>Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University

<sup>3</sup>National Centre for Scientific Research, French

Received 20 July 2020; accepted 28 August 2020

## Abstract:

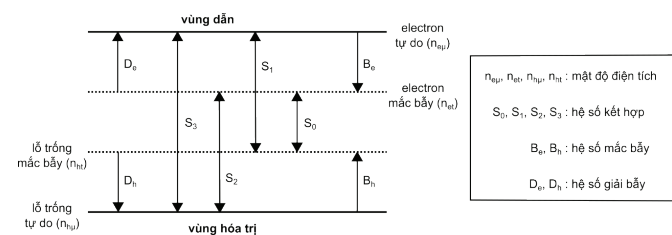
Polymers used as insulating materials are increasingly popular in many different fields. In electrical engineering - electronics, polymers are used in high-voltage transmission cables, capacitors, transformers, or as part of an embedded system in the IGBT module thanks to its superior thermal and electrical insulation properties. One of the disadvantages of polymers is the possible accumulation of space charge in the material volume for a long time, leading to an increase in the electric field compared to the original design value. Charge transport models in polymer materials have been increasingly developed to predict the conduction mechanisms under thermal-electrical stress. In this study, from a finite volume method (FVM), the authors developed a charge transport model in low density polyethylene (LDPE) based on the finite element method (FEM). The simulation results of this model are also compared to experimental results and to the FVM model under different electric fields for LDPE.

**Keywords:** conduction mechanisms, FEM, LDPE, space charge.

**Classification number:** 2.2

## Xây dựng mô hình vận chuyển điện tích, dẫn điện bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Trong những năm đầu thế kỷ XXI, một mô hình hóa vận chuyển điện tích trong các chất cách điện dưới các ứng suất về điện - nhiệt [12, 13] đã được Le Roy và cộng sự thuộc Phòng thí nghiệm Laplace (Toulouse, Pháp) khởi xướng. Đó là một mô hình số, lưỡng cực và một chiều, là hàm của độ dày chất điện môi, mô tả việc phun và vận chuyển các điện tích (electron và lỗ trống) trong một chất điện môi rắn hữu cơ. Hình 1 thể hiện sơ đồ của các cơ chế được tính đến trong mô hình này. Mỗi loại điện tích có thể chuyển động (tự do) hoặc bị mắc bẫy. Hệ số linh động của một electron hoặc một lỗ trống có giá trị không đổi. Trong mô hình vận chuyển điện tích này, chỉ xem xét một mức bẫy sâu và mật độ điện tích tối đa cho mỗi loại điện tích. Sự kết hợp có thể xảy ra giữa các điện tích trái dấu mà không tạo ra một chất mới trong chất cách điện polyme. Mô hình số này được xây dựng dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn FVM, mọi thông số đều được giải trên các phương trình số, do vậy thời gian tính toán là một trong những hạn chế của phương pháp này. Mô hình mới xây dựng dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn - FEM sử dụng phần mềm Comsol Multiphysic phát triển dựa trên cơ sở của mô hình FVM đã được nhóm tác giả nghiên cứu thực hiện.



Hình 1. Sơ đồ cơ chế dẫn của hạt mang điện.

Mô hình này dựa trên một hệ phương trình kết hợp:

Phương trình Poisson:

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = \frac{\rho(x,t)}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (1)$$

Phương trình vận chuyển:

$$j_a(x,t) = \mu_a n_a(x,t) E(x,t) \quad (2)$$

Phương trình liên tục:

$$\frac{q \partial n_a(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial j_a(x,t)}{\partial x} = s_a(x,t) \quad (3)$$

Trong đó: E là cường độ điện trường; q, ρ tương ứng là giá trị điện tích và lượng điện tích trong điện môi; ε<sub>0</sub>, ε<sub>r</sub> tương ứng là hằng số điện môi tuyệt đối và tương đối; x, t là tọa độ không gian, thời gian; a là đại diện cho các electron

và lỗ trống;  $j_a$  là mật độ dòng điện;  $n_a$  là mật độ điện tích không gian;  $\mu_a$  là hệ số linh động của các hạt được xét;  $s_a$  đại diện cho điều kiện nguồn, mô tả sự xuất hiện và biến mất của các điện tích không gian không liên quan đến quá trình vận chuyển thuộc quá trình mắc bẫy, giải bẫy và kết hợp.

Việc phun điện tích vào các điện cực được tính đến thông qua biểu thức Schottky sửa đổi, cực âm ( $x=0$ ) và ở cực dương ( $x=d$ ), tương ứng cho điện tử và lỗ trống:

$$j_{inje}(0,t) = AT^2 \exp\left(\frac{-qw_e}{k_B T}\right) \left[ \exp\left(\frac{q}{k_B T} \sqrt{\frac{qE(0,t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$j_{inj}(d,t) = AT^2 \exp\left(\frac{-qw_h}{k_B T}\right) \left[ \exp\left(\frac{q}{k_B T} \sqrt{\frac{qE(L,t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

Trong đó,  $w_e$  và  $w_h$  là hàng rào năng lượng của sự phun điện tích tương ứng cho điện tử và lỗ trống.

Biểu thức Schottky sửa đổi ở trên (công thức (4), (5)) có tính đến dòng điện khác 0 đi từ điện môi đến kim loại.

Không có rào cản năng lượng nào cho sự giải phóng các hạt mang điện. Từ công thức (2), ta xác định được mật độ dòng điện của điện tích và lỗ trống tương ứng ở anode và cathode:

$$j_e(d,t) = \mu_e n_{e\mu}(d,t) E(d,t) \quad (6)$$

$$j_h(0,t) = \mu_h n_{h\mu}(0,t) E(0,t) \quad (7)$$

Dòng điện tổng được tính theo biểu thức Maxwell-Ampere:

$$J_T(x,t) = j_c(x,t) + \frac{\partial D(x,t)}{\partial t} \quad (8)$$

Trong đó, thành phần thứ nhất ở vế phải thể hiện dòng điện dẫn, thành phần thứ hai là sự dịch chuyển điện tích.

Cho đến nay, hằng số điện môi tương đối  $\epsilon_r$  đã được coi là một hằng số, do đó biểu thức của dòng điện tổng được viết lại như sau:

$$J_T(x,t) = j_c(x,t) + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} \quad (9)$$

Trong quá trình thực hiện tính toán mô phỏng, các hệ số khác cũng được tính đến như: hệ số linh động của các điện tích tự do; hệ số của giải bẫy thông qua hàng rào năng lượng giải bẫy tương ứng cho điện tích và lỗ trống; sự kết hợp giữa các điện tích trái dấu thông qua các hệ số kết hợp.

Mô hình này được nhóm nghiên cứu áp dụng cho vật liệu

LDPE, một chất cách điện polyme phổ biến trong ngành kỹ thuật điện vì nó đóng vai trò là nhựa cơ bản cho cách điện của cáp điện xoay chiều cao áp (HVAC) và một chiều cao áp (HVDC).

**Kết quả mô phỏng**

**Mẫu và điều kiện mô phỏng**

Mô phỏng sử dụng phần mềm Comsol Multiphysic dạng 1D được thực hiện trên mẫu vật liệu phẳng LPDE có kích thước 150  $\mu\text{m}$ , dưới tác dụng của điện trường đặt khác nhau từ 10 đến 60 kV/mm ở nhiệt độ 25°C, thông số đặt cho vật liệu cụ thể được thể hiện trong bảng 1.

**Bảng 1. Các thông số đặt của vật liệu được dùng trong mô phỏng.**

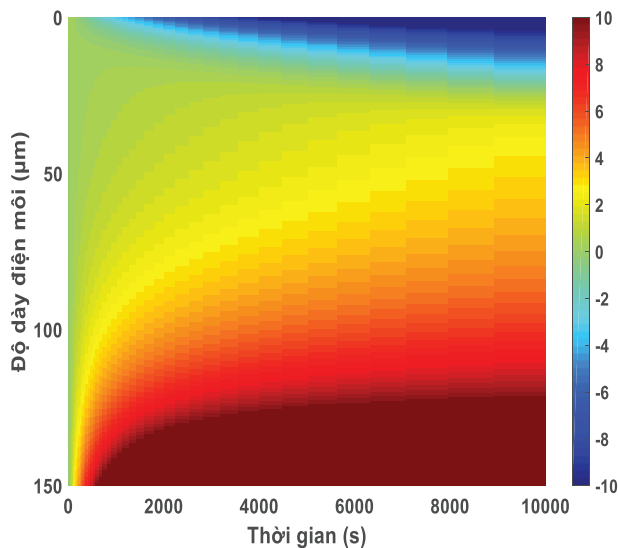
Thông số	Giá trị
<i>Hệ số kết hợp</i>	
$S_0$ (điện tử mắc bẫy và lỗ trống mắc bẫy)	$4.10^{-3} \text{ m}^3\text{C}^{-1}\text{s}^{-1}$
$S_1$ (điện tử tự do và lỗ trống mắc bẫy)	$4.10^{-3} \text{ m}^3\text{C}^{-1}\text{s}^{-1}$
$S_2$ (điện tử mắc bẫy và lỗ trống tự do)	$4.10^{-3} \text{ m}^3\text{C}^{-1}\text{s}^{-1}$
$S_3$ (điện tử tự do và lỗ trống tự do)	0
<i>Hệ số bẫy</i>	
$B_e$ electrons	$0,1 \text{ s}^{-1}$
$B_h$ holes	$0,2 \text{ s}^{-1}$
<i>Sự di chuyển</i>	
Điện tích	$1,0.10^{-14} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Lỗ trống	$2,0.10^{-13} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
<i>Mật độ bẫy sâu</i>	
$N_{\text{oet}}$ của điện tích	$100 \text{ Cm}^{-3}$
$N_{\text{oh}}$ của lỗ trống	$100 \text{ Cm}^{-3}$
<i>Mức năng lượng rào cản cho tiêm điện tích theo Schottky</i>	
$w_{\text{ei}}$ của điện tích	1,27 eV
$w_{\text{hi}}$ của lỗ trống	1,16 eV
<i>Độ lớn năng lượng rào cản của bẫy (detrapping)</i>	
$w_{\text{te}}$ của điện tích	0,96 eV
$w_{\text{th}}$ của lỗ trống	0,99 eV
<i>Mật độ điện tích ban đầu</i>	
$\rho_{\text{ei}}(t=0)$ của điện tích	$-0,5 \text{ Cm}^{-3}$
$\rho_{\text{hi}}(t=0)$ lỗ trống	$0,5 \text{ Cm}^{-3}$

Trong quá trình tính toán mô phỏng của mô hình này có xem xét đến việc tiêm điện tích từ 2 điện cực theo kiểu Schottky sửa đổi, sự di chuyển của điện tích được mô hình hóa bằng sự di chuyển liên tục có tính đến mức độ của bẫy, sự khuếch tán điện tích và sự kết hợp điện tích trái dấu theo thời gian. Do vậy, kết quả về sự phân bố điện tích không gian, điện dẫn hay phân bố điện trường trong vật liệu được mô tả rõ ràng hơn.

**Kết quả mô phỏng**

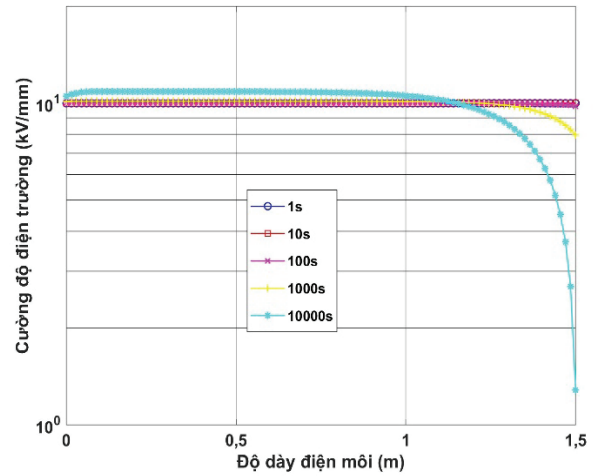
Kết quả quan trọng thu được từ mô hình hóa điện dẫn của vật liệu LDPE gồm: mật độ điện tích không gian phụ thuộc vào thời gian và độ dày của vật liệu; dòng điện trong vật liệu theo thời gian; tốc độ kết hợp theo độ dày điện môi; mật độ của từng loại điện tích (electron, lỗ trống, bẫy), từng loại kết hợp ( $S_0, S_1, S_2, S_3$ ), điện trường...

Dưới điện trường đặt 40 kV/mm, sự phân bố điện tích không gian theo thời gian trong vật liệu LDPE theo bảng màu được thể hiện ở hình 2. Bảng màu thể hiện mật độ điện tích từ -10 đến 10 Cm<sup>-3</sup>, tương ứng với độ dày vật liệu từ cathode đến anode (từ 0 đến 150 μm). Quan sát thấy, hiện tượng điện tích đồng nhất ở điện cực anode. Điện tích dương xuất hiện với mật độ lớn tại anode, từ từ di chuyển lan dần vào trong khối vật liệu và có xu hướng di chuyển đến cathode.

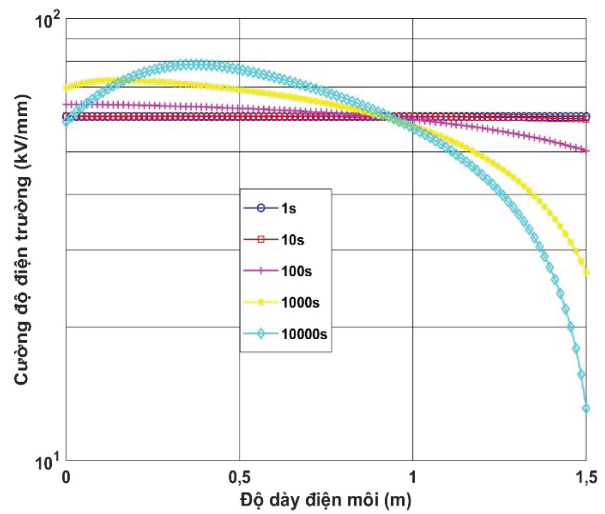


**Hình 2.** Phân bố điện tích không gian theo bảng màu trong khối điện môi theo thời gian và độ dày dưới tác dụng của điện trường đặt 40 kV/mm.

Điện trường thay đổi theo thời gian cũng có thể được tính toán ở các điện trường đặt khác nhau (hình 3). Sau gần 3h (10000s), chỉ có sự thay đổi điện trường ở anode, còn sự thay đổi điện trường trong khối điện môi gần như không đáng kể dưới điện trường đặt là 10 kV/mm (hình 3A). Tuy nhiên khi điện trường tăng lên tới 60 kV/mm, điện trường trong khối điện môi ở gần điện cực cathode có xu hướng tăng dần do sự xuất hiện điện tích không gian với mật độ lớn trong khối điện môi (hình 3B).



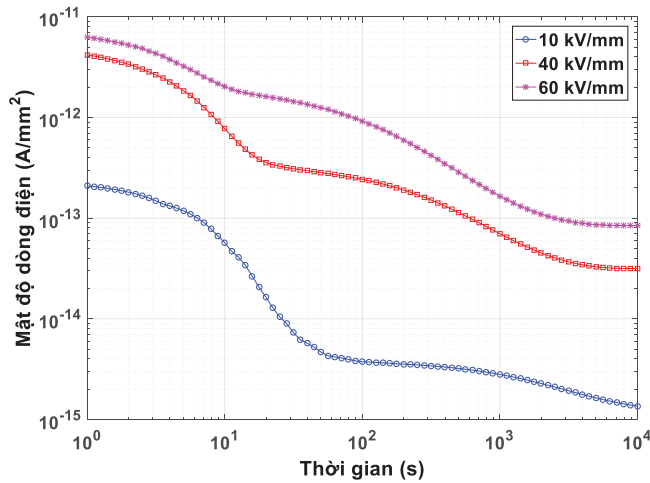
(A)



(B)

**Hình 3.** Sự phân bố điện trường trong khối điện môi theo thời gian dưới tác dụng của điện trường đặt là 10 kV/mm (A) và 60 kV/mm (B).

Mật độ dòng điện cũng là một thông số quan trọng liên quan đến sự xuất hiện điện tích không gian trong vật liệu. Dưới tác dụng của các giá trị điện trường đặt khác nhau, mật độ dòng điện phân bố trong khối điện môi thay đổi theo thời gian được thể hiện trong hình 4. Mật độ dòng điện có xu hướng giảm nhanh ở thời gian đầu khi đặt điện áp, sau đó giảm dần theo thời gian để đạt giá trị ổn định. Ở điện trường 10 kV/mm, sau 10000s dòng điện chưa đạt giá trị ổn định, tuy nhiên khi điện trường tăng lên 40 và 60 kV/mm, dòng điện gần như không thay đổi và đạt giá trị ổn định trong khoảng thời gian 3.10<sup>3</sup>s.



Hình 4. Mật độ dòng điện theo thời gian ở các điện trường đặt khác nhau.

**Xác thực mô hình**

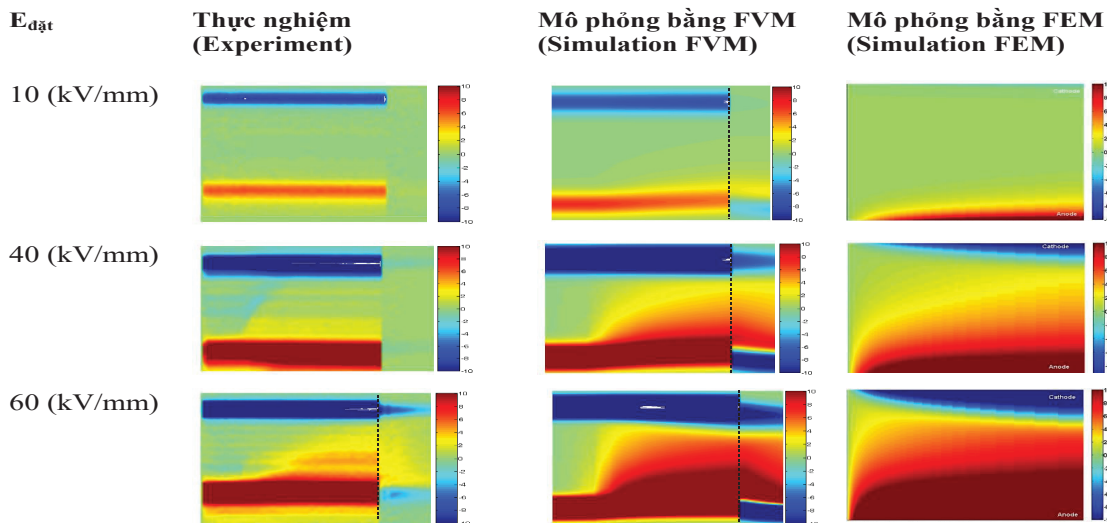
Kết quả mô phỏng từ phương pháp FEM tính toán qua phần mềm Comsol Multiphysic được so sánh với kết quả đo thực nghiệm bằng phương pháp PEA (Pulse electro acoustic) và mô hình tính toán bằng phương pháp FVM [12]. Ở cả 2 mô hình, mật độ điện tích ban đầu của điện tích dương và âm tương ứng ở 10 kV/mm là 0,1 Cm<sup>-3</sup>, ở 40 và 60 kV/mm là 0,5 Cm<sup>-3</sup>.

**Điện tích không gian**

Sự phân bố điện tích không gian trong khối điện môi bằng thực nghiệm - phương pháp FVM (khi có điện trường đặt, sau đó điện trường trở về 0) và FEM (chỉ thể hiện ở trạng thái khi có điện trường đặt) được thể hiện trong hình 5.

Kết quả thực nghiệm cho thấy, ở điện trường đặt 10 kV/mm, không quan sát thấy có điện tích không gian trong khối điện môi. Khi tăng điện trường, điện tích dương (màu đỏ) được quan sát thấy xuất hiện ở anode, di chuyển dần dần qua khối điện môi đến điện cực cathode trong khoảng 100s. Phần lớn vật liệu LDPE sau đó được tích điện dương cho đến khi kết thúc bước phân cực. Sự gia tăng của điện trường làm sự gia tăng mật độ điện tích. Sau khi điện trường về 0, các điện tích dương biến mất, thời gian biến mất tăng khi điện trường đặt tăng.

Khi so sánh với kết quả mô phỏng theo phương pháp FEM với phương pháp FVM và thực nghiệm với 3 mức điện trường đặt khác nhau cho thấy mô hình có thể tái hiện hầu hết các đặc điểm được nêu bật trong thí nghiệm, tức là sự thống trị của các điện tích dương, thời gian vận chuyển và mật độ điện tích không gian trong điện môi. Trong quá trình phân cực, các mô hình mô phỏng có thể so sánh với các mẫu thử nghiệm, cho các điện trường 10 và 40 kV/mm. Tuy nhiên, đối với điện trường 60 kV/mm, lượng điện tích mô phỏng bên trong chất điện môi cao hơn so với thí nghiệm. Hơn nữa, các điện tích âm (màu xanh) được quan sát bên cạnh cực âm cho các trường cao hơn này. Điều này mâu thuẫn với những gì được quan sát bằng thực nghiệm. Sự gia tăng mật độ điện tích không gian ở điện trường cao và sự hiện diện của điện tích âm bên trong khối có thể được liên hệ với việc tạo ra các điện tích ở các điện cực. So sánh giữa 2 phương pháp mô phỏng, phương pháp FEM có sự gia tăng điện tích ở thời gian đầu nhanh hơn so với phương pháp FVM, nguyên nhân do bước thời gian tính toán bởi FEM nhỏ hơn rất nhiều so với FVM nên thể hiện sự gia tăng điện tích phân bố rõ ràng hơn.



Hình 5. Phân bố điện tích không gian theo hàm thời gian và độ dày của điện môi ở điện trường đặt 10, 40, 60 kV/mm thu được khi tiến hành thực nghiệm - mô phỏng bằng FVM - mô phỏng bằng FEM.

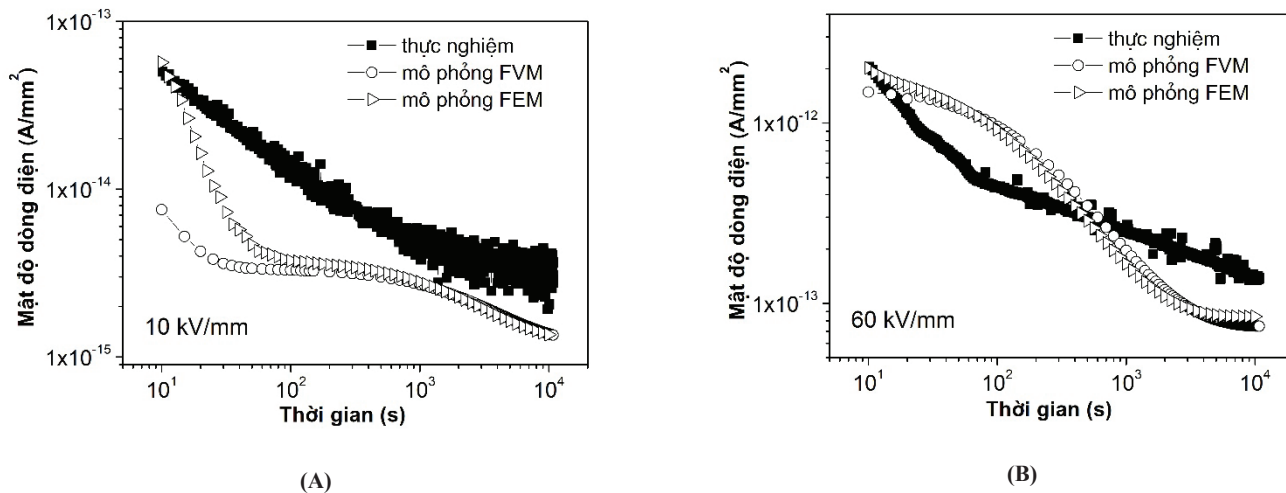
**Mật độ dòng điện**

Dưới điều kiện mô phỏng và thí nghiệm như nhau, sự phân bố mật độ dòng điện trong khoảng thời gian đặt điện trường (10 và 60 kV/mm) được thể hiện trong hình 6. Trong mỗi điện trường đặt, kết quả thí nghiệm cho thấy dòng điện giảm dần nhưng chưa đạt trạng thái ổn định sau 3h phân cực. Bên cạnh đó còn xuất hiện độ dốc của đường cong cho thấy sự thay đổi trong cơ chế chi phối của dòng điện tích. Sự thay đổi độ dốc này xảy ra sớm hơn khi điện trường đặt cao hơn, tạo ra hiện tượng phụ thuộc vào trường. Độ dốc đầu tiên này có thể được giải thích bằng sự phân cực của các lưỡng cực bên trong khối. Ngay cả khi PE thể hiện sự phân cực yếu, nhưng cơ chế phân cực vẫn chiếm ưu thế trong thời gian ngắn và là hàm của điện trường trong LDPE. Độ dốc thứ hai của các đường cong thí nghiệm tương ứng với việc di chuyển các điện tích.

sung mật độ ban đầu của điện tích, có một chút khác biệt giữa thí nghiệm và mô phỏng trong thời gian ngắn. So sánh giữa 2 hình thức mô phỏng, phương pháp FEM thể hiện giá trị dòng điện ban đầu gần hơn với phương pháp FVM do bước thời gian tính toán và cơ chế vận chuyển điện tích ban đầu của phương pháp FEM rõ ràng hơn.

**Kết luận**

Mô hình được phát triển cung cấp kết quả chấp nhận được của điện tích không gian, điện trường và dòng điện. Một mối tương quan giữa phép đo thí nghiệm, mô phỏng theo phương pháp FVM và FEM đã được so sánh. Sự ưu việt của mô hình mô phỏng theo phương pháp FEM đã được thể hiện rõ nét ở thời gian ban đầu so với phương pháp FVM. Tuy nhiên, mô hình không thể thể hiện hoàn toàn tất cả các cơ chế của quá trình dẫn một cách chính xác như trong thực nghiệm. Điều này được giải thích bởi các giả



Hình 6. Mật độ dòng điện theo thời gian của thực nghiệm, phương pháp FVM và phương pháp FEM ở điện trường 10 kV/mm (A) và 60 kV/mm (B).

Đối với kết quả mô phỏng theo phương pháp FVM và FEM, ở 10 kV/mm dòng điện cũng chưa đạt giá trị ổn định. Tuy nhiên, khi điện trường tăng đến 40 và 60 kV/mm, dòng điện mô phỏng đã đạt trạng thái ổn định sau khoảng thời gian  $3 \cdot 10^3$ s nhưng mô phỏng không thể thể hiện các đường cong thử nghiệm trong thời gian ngắn, vì các cơ chế phân cực không được tính đến trong mô hình. Tuy nhiên, việc bổ sung mật độ điện tích ban đầu trong mô phỏng cho phép có được sự thay đổi độ dốc trong mật độ dòng mô phỏng, do sự thay đổi của cơ chế dẫn (tức là độ dốc thứ nhất: dòng điện do sự vận chuyển của điện tích ban đầu). Mặc dù có sự bổ

thuyết vật lý của mô hình, đặc biệt là việc tạo ra điện tích (tức là tiêm vào các điện cực), không được mô tả trong mô hình. Kết quả của nghiên cứu này là tiền đề để xây dựng và xác thực mô hình vận chuyển điện tích trong không gian 2D bằng phương pháp phần tử hữu hạn với sự trợ giúp của phần mềm Comsol Multiphysics.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1] T. Fukuda (1988), "Technological progress in high-voltage XLPE power cables in Japan", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 4, pp.9-16.

- [2] K. Ogawa, T. Kosugi, N. Kato, Y. Kawawata (1990), "The world's first use of 500 kV XLPE insulated aluminium sheathed power cables at the Shimogo and Imaichi power stations", *IEEE Transactions on Power Delivery*, **5**, pp.26-32.
- [3] SIEMENS (2011), *HVDC - High voltage direct current transmission*, Siemens AG - Energy Sector.
- [4] W. Long and S. Nilsson (2007), "HVDC transmission: yesterday and today", *IEEE Power & Energy Magazine*, **5(2)**, pp.22-31.
- [5] G. Mazzanti and M. Marzinotto (2013), *Extruded cables for high-voltage direct - current transmission: advances in research and development*, IEEE Press-Wiley.
- [6] Y. Murata, et al. (2013), "Development of high voltage DC-XLPE cable system", *SEI Technical Review*, **76**, pp.55-62.
- [7] T. Mizutani, H. Semi and K. Kaneko (2000), "Space charge behavior in low-density polyethylene", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **7(4)**, pp.503-508.
- [8] G.C. Montanari and P.H.F. Morshuis (2005), "Space charge phenomenology in polymeric insulating materials", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **12(4)**, pp.754-767.
- [9] J.C. Fothergill, et al. (2003), "Electrical, microstructural, physical and chemical characterization of HV XLPE cable peelings for an electrical aging diagnostic data base", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **10(3)**, pp.514-527.
- [10] T.T.N. Vu, G. Teyssedre, S. Le Roy and C. Laurent (2017), "Space charge criteria in the assessment of insulation materials for HVDC", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **24(3)**, pp.1405-1414.
- [11] U. Riechert, J. Kindersberger, and J. Speck (1999), "Effects of short-time voltage drops and polarity reversals on breakdown behaviour of cross-linked polyethylene", *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, **4**, pp.216-219.
- [12] S. Le Roy, G. Teyssedre, C. Laurent, G.C. Montanari and F. Palmieri (2006), "Description of charge transport in polyethylene using a fluid model with a constant mobility: fitting model and experiments", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, pp.1427-1436.
- [13] S. Le Roy, F. Baudoin, L. Boudou, C. Laurent, G. Teyssedre (2010), "Thermo - stimulated depolarization currents in polyethylene films. Numerical simulations and experiments", *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, pp.1-4.