



HAL
open science

MÔ HÌNH HÓA CƠ CHẾ VẬN CHUYỂN ĐIỆN TÍCH CỦA ĐIỆN MÔI POLYMER TRONG KHÔNG GIAN HAI CHIỀU

Hoàng Mai Quyền, Séverine Le Roy

► **To cite this version:**

Hoàng Mai Quyền, Séverine Le Roy. MÔ HÌNH HÓA CƠ CHẾ VẬN CHUYỂN ĐIỆN TÍCH CỦA ĐIỆN MÔI POLYMER TRONG KHÔNG GIAN HAI CHIỀU. 12th Vietnam National Conference on Solid State Physics & Materials Science (SPMS 2021), Nov 2021, Quy Nhon City, Vietnam. hal-03856471

HAL Id: hal-03856471

<https://hal.science/hal-03856471>

Submitted on 16 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MÔ HÌNH HÓA CƠ CHẾ VẬN CHUYỂN ĐIỆN TÍCH CỦA ĐIỆN MÔI POLYMER TRONG KHÔNG GIAN HAI CHIỀU

Hoàng Mai Quyền^{1*}, Séverine Le Roy²

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, 298 Cầu Diễn, Bắc Từ Liêm, Hà Nội

²CNRS; LAPLACE, Paul Sabatier University, 31062 Toulouse, France

*Email: quyenhm@haui.edu.vn

Tóm tắt:

Điện môi polymer với các ưu điểm nổi trội được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống điện- điện tử. Tuy nhiên khi điện môi làm việc, các điện tích được hình thành và tích trữ bên trong chúng có thể làm tăng điện trường tác dụng, giảm tính chất cách điện và rút ngắn quá trình lão hóa cũng như tuổi thọ của điện môi. Mục đích của nghiên cứu là phát triển một mô hình 2D có khả năng mô tả các cơ chế sản sinh, tích trữ và vận chuyển điện tích bên trong vật liệu polymer, qua đó tìm hiểu được bản chất của các đặc tính điện, đồng thời dự đoán được các đặc tính và hành vi khác nhau của vật liệu polymer dưới ứng suất điện-nhiệt. Mô hình 2D được xây dựng với sự trợ giúp của phần mềm sử dụng phương pháp các phần tử hữu hạn (FEM) - Comsol Multiphysics®. Các giả thuyết vật lý và mô hình toán học được thu thập từ mô hình vận chuyển điện 1D cơ sở, được phát triển trước đó bằng phương pháp thể tích hữu hạn (FVM). Các kết quả mô phỏng thu được từ mô hình 2D sau khi được xây dựng có thể là dòng điện ngoài đi qua điện môi, phân bố điện tích không gian và phân bố điện trường bên trong điện môi. Các kết quả này sau đó được so sánh với các kết quả mô phỏng của mô hình vận chuyển điện tích 1D cũng như các kết quả thực nghiệm trên vật liệu polyethylene mật độ thấp (LDPE) tại các giá trị điện trường đặt khác nhau để xác thực tính đúng đắn của mô hình 2D.

Từ khóa: điện môi polymer, điện tích không gian, Comsol Multiphysics, LDPE.

GIỚI THIỆU

Vật liệu cách điện Polymer ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống điện-điện tử, nhờ các đặc tính nổi trội về cơ học, nhiệt và cách điện của chúng. Thực tế, chúng ít chịu tác động của môi trường làm việc hơn so với các cách điện khác (như cách điện lỏng). Tuy nhiên, trong quá trình làm việc của điện môi polymer, tác dụng của điện trường mạnh, nhiệt độ cao, chiếu xạ hoặc ma sát cơ học lên điện môi dẫn đến sự xuất hiện và tích trữ bên trong chúng các điện tích không gian trong một khoảng thời gian dài, và gây ảnh hưởng đến các tích chất của điện môi [1]. Các điện tích bên trong điện môi có thể rút ngắn quá trình lão hóa cũng như tuổi thọ của vật liệu, làm giảm tích chất cách điện của điện môi [2]. Hơn nữa, các điện tích này là nguyên nhân dẫn đến sự gia tăng của điện trường so với giá trị thiết kế ban đầu. Điều này làm giảm độ tin cậy của các hệ thống có chứa các vật liệu polymer, vì nó có thể phá hủy hệ thống bằng sự cố đánh thủng điện môi [3].

Trong hai thập kỷ gần đây, nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới đã phát triển các mô hình vận chuyển điện tích nhằm mục đích tìm hiểu các cơ chế sản sinh, tích trữ và vận chuyển điện tích bên

trong vật liệu polymer, đồng thời giúp chúng ta dự đoán được các đặc tính và hành vi khác nhau của vật liệu polymer dưới ứng suất điện-nhiệt. Những mô hình này được phát triển cho các loại polymer khác nhau, chẳng hạn như Low Density Polyethylene (LDPE), cross-linked polyethylene (XLPE), Polyethylene Napthalate (PEN), hay Polytetrafluoroethylene (PTFE) [4-7]. Tuy nhiên, các mô hình vận chuyển điện tích trên mới chỉ được phát triển trong không gian 1D. Chúng thường được phát triển bằng cách sử dụng các mô hình 'tự xây dựng' – tức là các mô hình được lập trình bởi các ngôn ngữ khác nhau dựa trên các giả thuyết vật lý, hệ phương trình toán học và các phương pháp số. Tuy nhiên, không đơn giản để phát triển các mô hình 'tự xây dựng' này thành dạng 2D. Mà mô hình 2D lại mở ra cơ hội tốt cho việc tìm hiểu bản chất của các quá trình vật lý xảy ra với vật liệu cách điện polymer dưới các ứng suất điện-nhiệt mà mô hình 1D không thực hiện được. Như là tìm hiểu sự ảnh hưởng của độ nhám bề mặt tới việc phun điện tích vào bên trong vật liệu hay tác động của chất độn nano đối với tính chất cách điện của vật liệu. Do đó, trong báo cáo này, chúng tôi lựa chọn nghiên cứu về mô hình hóa vận chuyển điện tích bên trong vật liệu cách điện polymer trong không gian hai chiều. Một mô hình vận

chuyên điện tích 2D được xây dựng với sự trợ giúp của phần mềm Comsol Multiphysics theo phương pháp các phần tử hữu hạn dựa trên một mô hình cơ sở là mô hình 1D trong [5]. Tiếp đó, chúng tôi lựa chọn vật liệu LDPE để thực hiện xác thực mô hình 2D mới được xây dựng do vật liệu này được sử dụng phổ biến trong thực tế cũng như trong các mô hình 1D 'tự xây dựng'.

XÂY DỰNG MÔ HÌNH VẬN CHUYỂN ĐIỆN TÍCH 2D

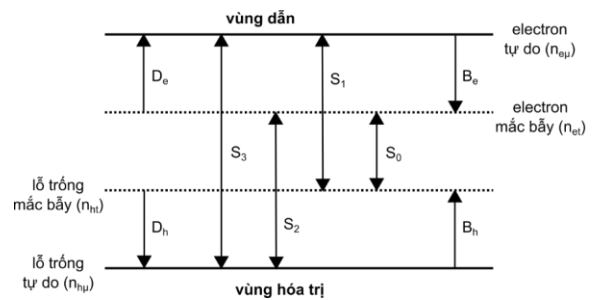
Giả thuyết vật lý và mô hình toán học

Mô hình vận chuyển điện tích trong điện môi polymer trong không gian 2D được xây dựng dựa trên các giả thuyết vật lý và mô hình toán học lấy từ mô hình cơ sở 1D – đã được nhóm nghiên cứu phát triển từ đầu những năm 2000 [5]. Các giả thuyết vật lý được tính hợp vào mô hình 2D như sau:

- Chỉ các hạt mang điện (tức là electron và lỗ trống) mới được xét đến trong mô hình.
- Các điện tích chỉ được sản sinh từ việc phun các hạt mang điện vào bên trong điện môi từ mỗi điện cực, và việc phun này phụ thuộc vào chiều của điện trường ngoài.
- Các hạt mang điện có khả năng di chuyển hiệu quả liên tục nhờ khả năng mắc bẫy và giải bẫy tại các bẫy nông; hệ số linh động của các loại hạt mang điện được coi là hằng số.
- Các hạt mang điện có thể bị mắc vào các bẫy có mức năng lượng (độ sâu) duy nhất cho từng loại hạt; hệ số mắc bẫy được coi là không đổi.
- Các hạt mang điện bị mắc bẫy có thể được thoát ra (giải bẫy) khi có năng lượng nhiệt kích thích.
- Sự kết hợp của các điện tích trái dấu cũng được tích hợp vào mô hình, với các tham số không đổi.

Hình 1 giới thiệu các giả thuyết vật lý được tích hợp vào mô hình được trình bày dưới dạng giản đồ. Trong đó $n_{e\mu}$, n_{et} , $n_{h\mu}$, n_{ht} lần lượt là mật độ điện tích của electron tự do, electron mắc bẫy, lỗ trống tự do và lỗ trống mắc bẫy; S_0 , S_1 , S_2 , S_3 lần lượt là hệ số kết hợp giữa các cặp điện tích trái dấu là electron mắc bẫy – lỗ trống mắc bẫy, electron tự do – lỗ trống mắc bẫy, electron mắc

bẫy – lỗ trống tự do và electron tự do – lỗ trống tự do; B_e , B_h là hệ số mắc bẫy của electron và lỗ trống; D_e , D_h là hệ số giải bẫy của electron và lỗ trống.



Hình 1: Cơ chế vận chuyển điện tích không gian trong điện môi polymer.

Hệ phương trình để giải trong mô hình gồm có:

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:

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

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_0 , ϵ_r tương ứng là hằng số điện môi tuyệt đối và tương đối, x là tọa độ không gian, a đại diện cho các electron (e) và lỗ trống (h), j_a là mật độ dòng điện, n_a là mật độ điện tích không gian và μ_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. Ví dụ điều kiện nguồn của electron tự do được mô tả bởi phương trình 4.

$$s_{e\mu}(t) = -B_e n_{e\mu} \left(1 - \frac{n_{\mu t}}{N_{0et}} \right) + \nu n_{et} \exp\left(\frac{-qW_{tre}}{k_B T(t)} \right) - S_1 n_{e\mu} n_{ht} - S_3 n_{e\mu} n_{h\mu} \quad (4)$$

Trong đó T là nhiệt độ tuyệt đối, N_{0et} là mật độ bẫy của các electron, ν là tần số không gian, w_{tre}

là hàng rào năng lượng giải bẫy cho electron, k_B là hệ số Boltzmann.

Với các loại hạt mang điện khác, điều kiện nguồn cũng có dạng tương tự.

Các hệ số của giải bẫy được mô tả bởi phương trình 5.

$$D_{e,h}(t) = \nu \exp\left(\frac{-qw_{tre,h}}{k_B T(t)}\right) \quad (5)$$

Sự phun điện tích vào điện môi từ các điện cực được tích hợp vào mô hình vận chuyển điện tích thông qua biểu thức Schottky sửa đổi (phương trình 6 và 7), cực âm ($x=0$) và ở cực dương ($x=d$), tương ứng cho sự phun electron và lỗ trống.

$$j_{inj_e}(0,t) = AT^2 \exp\left(\frac{-qw_e}{k_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{q}{k_B T} \sqrt{\frac{qE(0,t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

$$j_{inj_h}(d,t) = AT^2 \exp\left(\frac{-qw_h}{k_B T}\right) \left[\exp\left(\frac{q}{k_B T} \sqrt{\frac{qE(d,t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

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

Dòng điện tổng được tính theo biểu thức Maxwell-Ampere, với giả thiết rằng hằng số điện môi tương đối ϵ_r là một hằng số, được viết lại như phương trình 8.

$$J_T(x,t) = j_c(x,t) + \epsilon_0\epsilon_r \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} \quad (8)$$

Kết quả đầu ra của mô hình 2D có thể thu được là phân bố điện tích, điện trường trong điện môi hay mật độ dòng điện ngoài, ...

Phương pháp số

Mô hình vận chuyển điện tích 1D mà chúng tôi sử dụng làm cơ sở để xây dựng mô hình 2D sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn (finite volume method - FVM) để giải các phương trình toán học ở trên. Các phương pháp số được sử dụng trong mô hình FVM 1D này được mô tả chi tiết trong [8]. Mặc dù có chung các giả thuyết vật lý và mô hình toán học với mô hình FVM 1D, mô hình vận chuyển điện tích 2D lại được phát triển bởi phương pháp các thể tích hữu hạn

(finite elements method - FEM) bằng cách sử dụng phần mềm Comsol Multiphysics®. Trong đó, mô-đun Transport of Diluted Species (TDS) được sử dụng để giải phương trình liên tục cho từng loại hạt mang điện. Ưu điểm của mô-đun này là nó đã bao gồm các giải pháp ổn định để hạn chế các dao động. Mô-đun phương trình Poisson được sử dụng để kết hợp các phương trình liên tục này với phương trình Poisson. Bộ giải Backward Differentiation Formula được sử dụng để tích phân theo thời gian (bậc tối đa 2 và bậc tối thiểu 1). Các điều kiện biên cũng được thiết lập ở phía các điện cực.

XÁC THỰC MÔ HÌNH VẬN CHUYỂN ĐIỆN TÍCH 2D BẰNG MÔ HÌNH FVM 1D

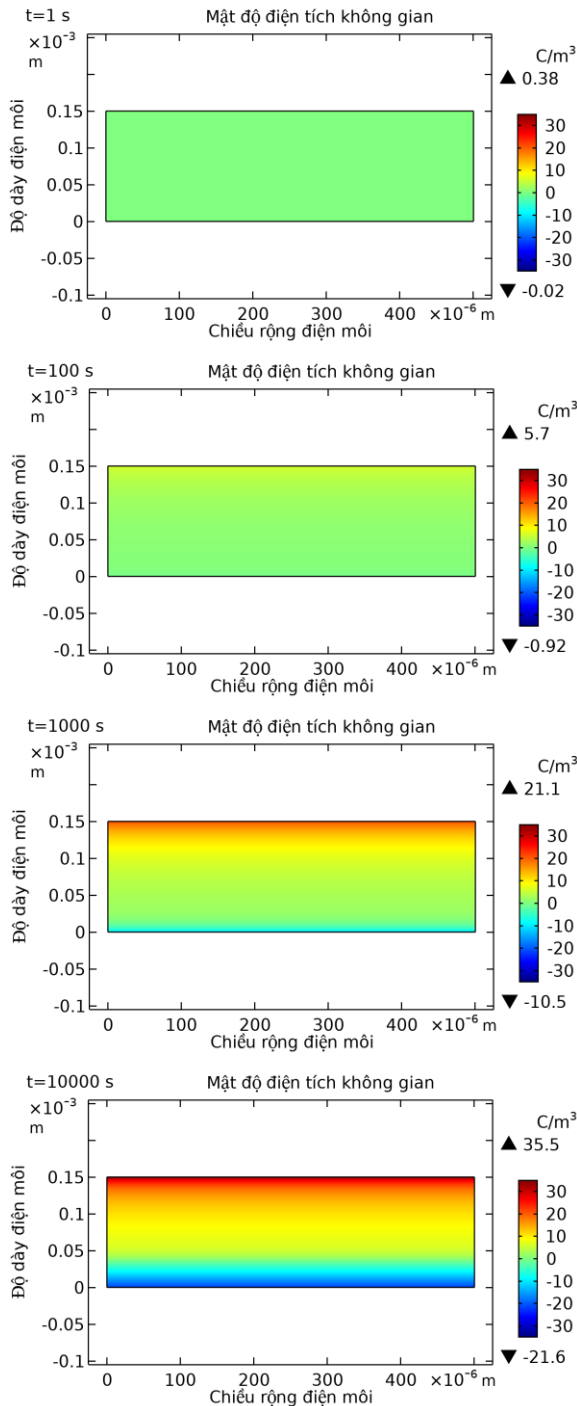
Với mục đích xác thực mô hình vận chuyển điện tích 2D, các kết quả mô phỏng của mô hình 1D và 2D sẽ được so sánh với nhau. Vật liệu được sử dụng trong các mô phỏng này là LDPE có các thông số vi mô cho trong bảng 1.

Bảng 1: Thông số vi mô của vật liệu LDPE dùng trong các mô phỏng.

Thông số	Giá trị
Hệ số kết hợp	
S_0, S_1, S_2	$4.10^{-3} \text{ m}^3\text{C}^{-1}\text{s}^{-1}$
S_3	0
Hệ số mắc bẫy	
B_e	$0,1 \text{ s}^{-1}$
B_h	$0,2 \text{ s}^{-1}$
Hệ số linh động theo trục x và z	
μ_e	$1,0.10^{-14} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$
μ_h	$2,0.10^{-13} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Mật độ bẫy sâu	
N_{0et}	100 C m^{-3}
N_{0ht}	100 C m^{-3}
Hàng rào năng lượng cho sự phun điện tích theo Schottky	
w_e	1.27 eV
w_h	1.16 eV
Hàng rào năng lượng giải bẫy	
w_{tre}	0.96 eV
w_{tth}	0.99 eV

Điện môi mẫu có độ dày là $150\mu\text{m}$, chiều rộng là $500\mu\text{m}$, điện áp đặt lên điện môi trong các mô phỏng là 9kV, tương ứng với điện trường ngoài là 60kV/mm. Các mô phỏng được thực hiện ở nhiệt độ môi trường là 25°C . Trên các hình vẽ biểu diễn kết quả mô phỏng, cathode và anode đặt ở vị trí tương ứng với độ dày điện môi bằng 0 và $150\mu\text{m}$. Hình 2 giới thiệu kết quả mô phỏng về phân bố điện tích không gian trong điện môi theo các kích thước của điện môi, thu được từ

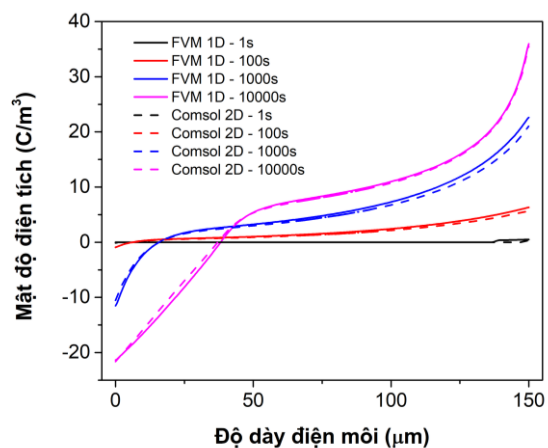
mô hình vận chuyển điện tích 2D tại các thời điểm 1, 100, 1000 và 10000s kể từ khi đặt điện trường lên điện môi.



Hình 2: Phân bố điện tích trong điện môi sau 1, 100, 1000 và 10000s đặt trong điện trường (cathode ở dưới, anode ở trên).

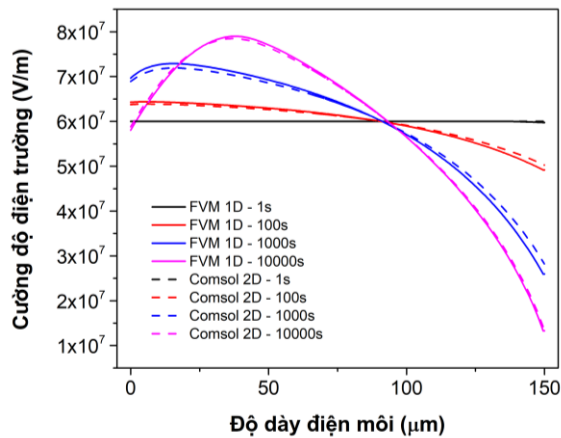
Chúng ta thấy rằng dưới tác dụng của điện trường, các điện tích dương và âm là các điện tích chủ yếu được phun vào điện môi tương ứng từ anode và cathode, trong đó mật độ điện tích dương gần anode lớn hơn mật độ điện tích âm

gần cathode. Theo thời gian, mật độ điện tích tăng và các điện tích di chuyển sâu vào bên trong thể tích điện môi từ các điện cực. Điện môi mẫu là đồng nhất, nên các kết quả mô phỏng tại các vị trí dọc theo chiều rộng của điện môi là như nhau. Để có thể so sánh các kết quả mô phỏng của mô hình 2D và mô hình 1D, chúng tôi thực việc lấy kết quả mô phỏng tại đường cắt đặt ở chính giữa chiều rộng điện môi ($x=250\mu\text{m}$) trong các mô phỏng 2D. Hình 3 giới thiệu kết quả mô phỏng bởi các mô hình 1D và 2D (theo đường cắt) của mật độ điện tích theo độ dày điện môi tại các thời điểm khác nhau. Các kết luận về phân bố điện tích trong điện môi rút ra từ hình 2 tiếp tục được thấy rõ trên hình 3. Kết quả của hai mô hình cho thấy sự tương quan tốt với nhau, gần như trùng khít. Một sự sai khác nhỏ giữa hai mô hình được cho là đến từ các phương pháp số và bộ giải khác nhau được sử dụng trong hai mô hình.



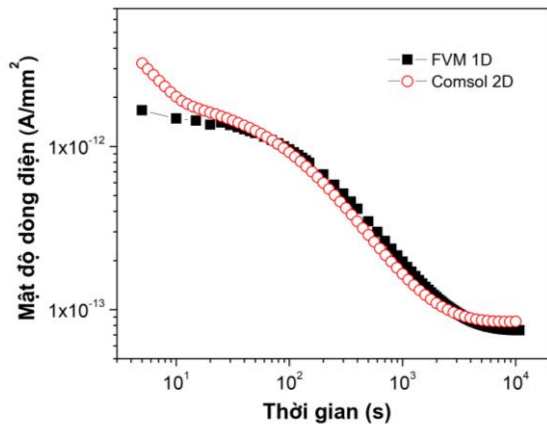
Hình 3: Kết quả mô phỏng bởi các mô hình FVM 1D và Comsol 2D của mật độ điện tích theo độ dày điện môi tại các thời điểm khác nhau (cathode ở bên trái, anode ở bên phải).

Tương tự, kết quả mô phỏng về cường độ điện trường theo độ dày điện môi tại các thời điểm khác nhau thu được từ các mô hình 1D và 2D cũng được so sánh với nhau trên hình 4. Cường độ điện trường được mô phỏng trong hai mô hình gần như trùng nhau. Điện trường có xu hướng giảm ở phía anode và tăng ở phía cathode so với điện trường thiết kế (60kV/mm). Tuy nhiên ở phía cathode, điện trường cực đại có xu hướng dịch chuyển về phía giữa điện môi khi thời gian tác dụng của điện trường lên điện môi tăng. Đến một khoảng thời gian đủ lâu, 10000 s , điện trường ở gần cathode sẽ trở nên nhỏ hơn so với điện trường thiết kế.



Hình 4: Kết quả mô phỏng bởi các mô hình FVM 1D và Cmsol 2D của cường độ điện trường bên trong điện môi theo độ dày điện môi tại các thời điểm khác nhau (cathode ở bên trái, anode ở bên phải).

Khi đặt một điện áp lên điện môi LDPE, mật độ dòng điện ngoài thu được có giá trị nhỏ, thường nằm trong khoảng từ pA/mm^2 đến nA/mm^2 . Các kết quả mô phỏng về mật độ dòng điện ngoài theo hàm thời gian được trình bày trên hình 5.



Hình 5: Kết quả mô phỏng bởi các mô hình FVM 1D và Cmsol 2D của mật độ dòng điện ngoài.

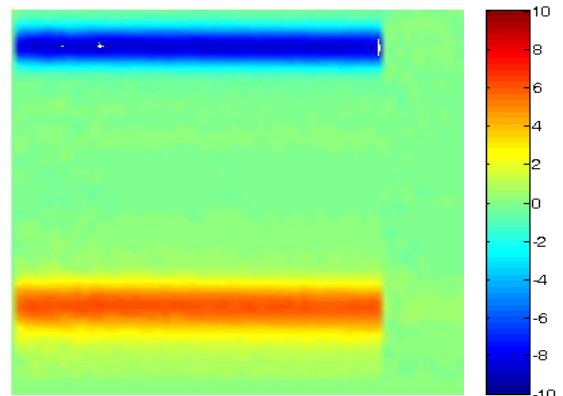
Hai dòng điện ngoài thu được từ mô hình 1D và 2D cũng cho thấy một sự tương quan tốt. Dòng điện giảm theo thời gian và có xu hướng bão hòa ở thời gian dài sau khi đặt điện áp. Tuy nhiên, chúng ta quan sát thấy một sự khác biệt về giá trị mật độ dòng điện tại những giây đầu tiên sau khi đặt điện áp lên điện môi. Hiện tượng dòng điện thu được trên điện môi đạt giá trị cao nhất trong khoảng thời gian ngắn sau khi áp dụng điện áp, liên quan đến quá trình phân cực và dẫn điện trong điện môi, đặc biệt là các quá trình phân cực nhanh [8]. Dòng điện tại khoảng thời gian này nhạy cảm hơn với các bộ giải và sơ đồ số khác

nhau của các mô hình vận chuyển điện tích, FVM 1D và FEM 2D.

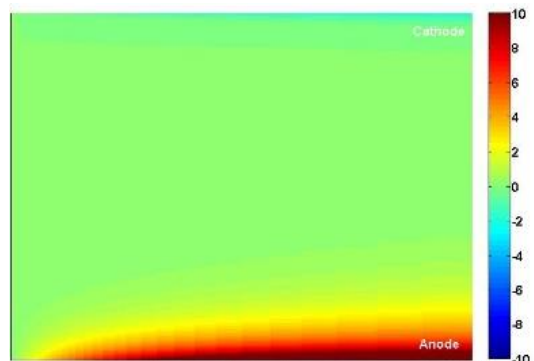
XÁC THỰC MÔ HÌNH VẬN CHUYỂN ĐIỆN TÍCH 2D BẰNG DỮ LIỆU THỰC NGHIỆM

Các dữ liệu thực nghiệm về phân bố điện tích không gian đo được bằng phương pháp Pulse electro acoustic (PEA [9]) và về dòng điện ngoài trên vật liệu LDPE [5] được sử dụng để xác thực mô hình vận chuyển điện tích 2D. Các điều kiện mô phỏng ở mục trên được giữ nguyên, và chúng cũng giống như các điều kiện thí nghiệm. Các giá trị điện trường được sử dụng trong mô phỏng là 10, 40 và 60kV/mm.

Hình 6,7 và 8 giới thiệu các kết quả thực nghiệm và mô phỏng của phân bố điện tích trong điện môi khi điện môi đặt dưới điện trường lần lượt là 10, 40 và 60kV/mm. Trong các thí nghiệm, sau một thời gian áp dụng, điện áp được đưa về 0, điều đó thể hiện thành hai phân điện tích khác biệt trên biểu đồ phân bố điện tích của các kết quả thực nghiệm.

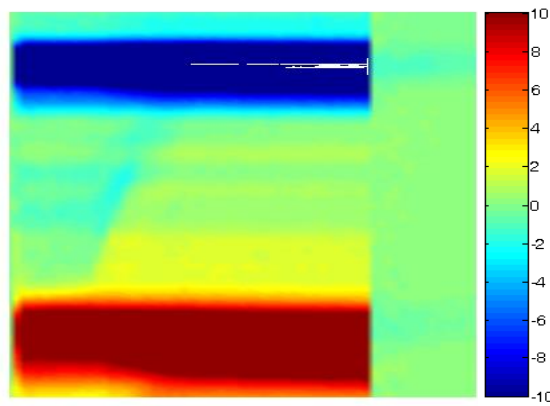


a) Thực nghiệm

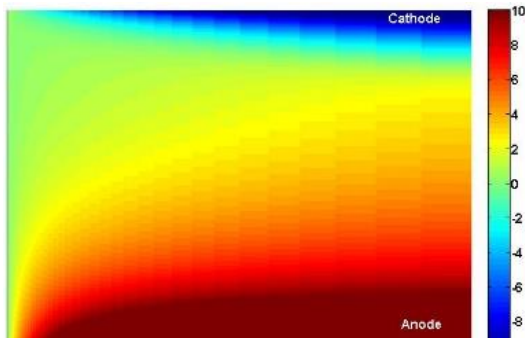


b) Mô phỏng

Hình 6: Kết quả thực nghiệm và mô phỏng của phân bố điện tích trong điện môi theo thời gian (trục hoành) và độ dày của điện môi (trục tung) khi điện môi đặt dưới điện trường 10kV/mm.



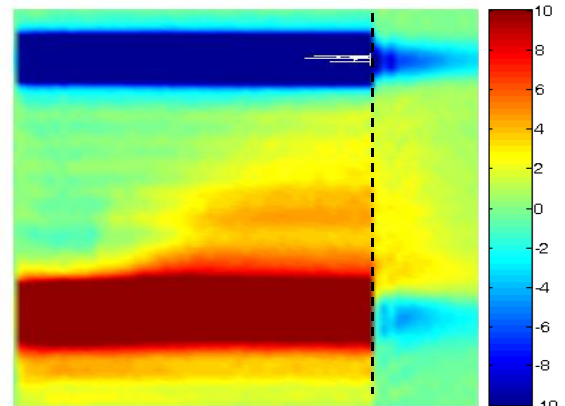
a) Thực nghiệm



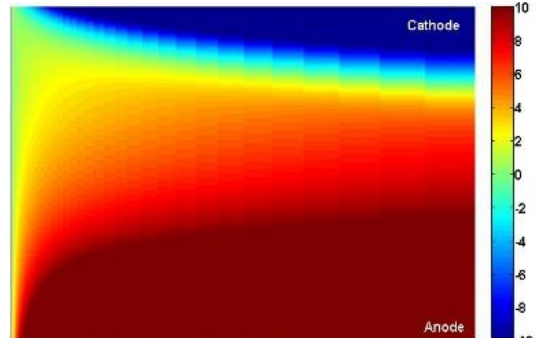
b) Mô phỏng

Hình 7: Kết quả thực nghiệm và mô phỏng của phân bố điện tích trong điện môi theo thời gian (trục hoành) và độ dày của điện môi (trục tung) khi điện môi đặt dưới điện trường 40kV/mm.

So sánh kết quả thực nghiệm với kết quả mô phỏng tại ba mức điện trường đặt khác nhau cho thấy mô hình có thể tái hiện hầu hết các đặc điểm nổi bật về phân bố điện tích trong thí nghiệm. Đó là sự xuất hiện của các điện tích dương ở phía anode và các điện tích âm ở phía cathode khi có một điện áp đặt vào điện môi. Sự xuất hiện này không nhiều ở điện trường nghiên cứu thấp nhất, 10kV/mm, nhưng trở nên càng nổi bật khi điện trường tăng lên 40 và 60kV/mm. Đối với vật liệu LDPE, mật độ điện tích dương bên trong khối điện môi chiếm ưu thế hơn so với các điện tích âm. Tuy nhiên, có sự khác nhau về tốc độ phun điện tích từ điện cực vào điện môi giữa các kết quả mô phỏng và thí nghiệm. Ở đây, quá trình phun điện tích vào điện môi xảy ra trong mô phỏng có tốc độ nhanh hơn là trong thí nghiệm. Mặc dù các thí nghiệm hay mô phỏng đều cho thấy các loại điện tích có xu hướng tăng thêm và di chuyển về phía điện cực đối diện, nhưng tốc độ xảy ra các hiện tượng này có sự khác nhau giữa thí nghiệm và mô phỏng. Theo đó, tốc độ phát triển và di chuyển về phía cực đối diện của cả hai loại hạt mang điện trong các mô phỏng đều nhanh hơn trong các thí nghiệm.



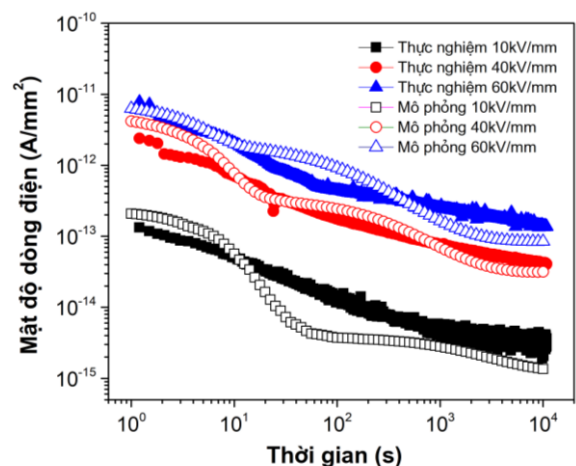
a) Thực nghiệm



b) Mô phỏng

Hình 8: Kết quả thực nghiệm và mô phỏng của phân bố điện tích trong điện môi theo thời gian (trục hoành) và độ dày của điện môi (trục tung) khi điện môi đặt dưới điện trường 60kV/mm.

Hình 9 giới thiệu các kết quả thực nghiệm và mô phỏng về dòng điện ngoài tại các giá trị điện trường khác nhau.



Hình 9: Kết quả thực nghiệm và mô phỏng của mật độ dòng điện ngoài khi điện môi đặt dưới các điện trường 10, 40 và 60kV/mm.

Trong mỗi điện trường đặt, kết quả thí nghiệm cho thấy dòng điện giảm dần nhưng chưa đạt trạng thái ổn định sau 10000s phân cực. Trên

mỗi đường dòng điện thực nghiệm, chúng ta đều quan sát được một sự thay đổi về độ dốc của đường cong, làm cho dòng điện có hai độ dốc chính. Sự thay đổi độ dốc này xảy ra sớm hơn khi điện trường đặt cao hơn. Độ dốc thứ nhất có thể được giải thích bằng sự phân cực của các lưỡng cực bên trong khối điện môi ngay sau khi đặt điện áp lên điện môi. Ngay cả khi LDPE và vật liệu 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 thực nghiệm có liên hệ với cơ chế dẫn điện của các điện tích tự do trong điện môi [6]. Đối với kết quả mô phỏng, giá trị thu được cho thấy sự tái tạo tốt khoảng giá trị của mật độ dòng điện thực nghiệm và dòng điện qua điện môi tăng khi điện trường tăng. Ở 10 kV/mm dòng điện mô phỏng chưa đạt giá trị ổn định, khi điện trường tăng đến 40 và 60 kV/mm, dòng điện đã đạt trạng thái ổn định. Thực tế, mô hình vận chuyển điện tích mô tả cơ chế dịch chuyển và dẫn điện của các điện tích bên trong điện môi mà chưa tích hợp đầy đủ các cơ chế phân cực. 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 điện mô phỏng. So sánh giữa hai loại kết quả thực nghiệm và mô phỏng, mô hình 2D đã cho mật độ dòng điện tương quan tốt so với thực nghiệm.

KẾT LUẬN

Mô hình vận chuyển điện tích 2D được phát triển trên vật liệu cách điện polymer để tìm hiểu bản chất và cơ chế hoạt động của các điện tích, thường xuất hiện trong vật liệu cách điện hữu cơ rắn khi chúng đặt dưới tác dụng của một điện trường mạnh, từ đó dự đoán được các đặc tính điện – nhiệt của vật liệu. Mô hình được phát triển trong báo cáo này dựa trên các giả thuyết vật lý, mô hình toán học thu thập được trong các nghiên cứu trước đây và sử dụng các sơ đồ số trong phần mềm Comsol Multiphysics® theo phương pháp phần tử hữu hạn. Các kết quả mô phỏng của mô hình 2D đã được xác thực bởi các kết quả thực nghiệm và mô phỏng 1D theo phương

pháp thể tích hữu hạn. Sự phát triển mô hình 2D sẽ mở ra các hướng nghiên cứu mới mà các mô hình 1D trước đây không thực hiện được. Qua đó, mô hình 2D sẽ được sử dụng và phát triển thêm để nghiên cứu các hiện tượng xảy ra trên bề mặt và trong thể tích vật liệu polymer.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.02-2019.33.

Tài liệu tham khảo

1. G.C. Montanari and P.H.F. Morshuis, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12, 4, pp.754-767 (2005).
2. J.C. Fothergill, G.C. Montanari, G.C. Stevens and C. Laurent, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10, 3, pp.514-527 (2003).
3. U. Riechert, J. Kindersberger and J. Speck, Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 4, pp.216-219 (1999).
4. J. A. Anta, G. Marcelli, M. Meunier and N. Quirke, J. Appl. Phys., 92, pp. 1002-1008 (2002).
5. S. Le Roy, G. Teyssedre, C. Laurent, G.C. Montanari and F. Palmieri, J. Phys. D: Appl. Phys., 39, pp. 1427-1436 (2006).
6. M.Q. Hoang, L. Boudou, S. Le Roy and G. Teyssedre, Journal of Applied Physics, 119, pp. 224105 (2016).
7. M.Q. Hoang, M.Q. Nguyen, T.T.N. Vu and S. Le Roy, Bản B của Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 63, pp. 27 (2021).
8. S. Le Roy, G. Teyssedre and C. Laurent, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 13, pp. 239-246 (2006).
9. T. Maeno, H. Kushibe, T. Takada et C.M. Cooke, Proceedings of 1985 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), New York, USA, pp. 389-397 (1985).