



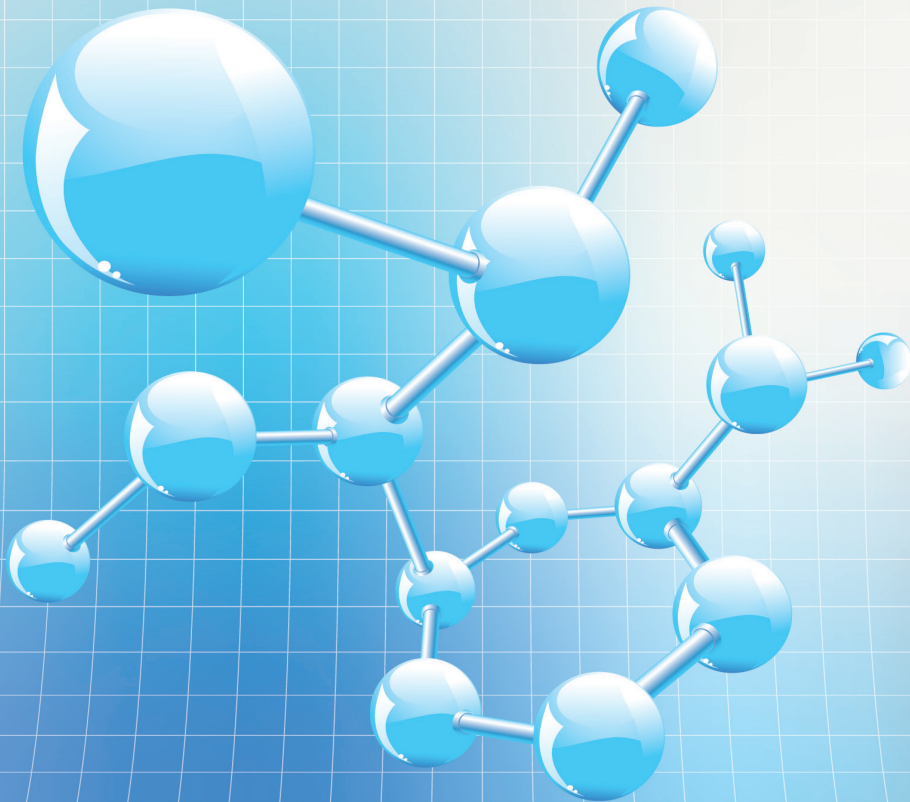
Tạp chí

NGHIÊN CỨU KHOA HỌC

ĐẠI HỌC SAO ĐỎ

SCIENTIFIC JOURNAL - SAO DO UNIVERSITY

**P. ISSN 1859-4190
E. ISSN 2815-553X**



Số 1 (93)

2026

P. ISSN 1859-4190
E. ISSN 2815-553X

■ **Tổng Biên tập**

TS. Đỗ Văn Đĩnh

■ **Phó Tổng biên tập**

TS. Nguyễn Thị Kim Nguyễn

■ **Thư ký Tòa soạn**

PGS.TS. Ngô Hữu Mạnh

■ **Hội đồng Biên tập**

TS. Nguyễn Thị Kim Nguyễn - Chủ tịch Hội đồng

GS.TS. Phạm Thị Ngọc Yến

PGS.TSKH. Trần Hoài Linh

PGS.TS. Nguyễn Văn Liễn

GS.TSKH. Thân Ngọc Hoàn

GS.TSKH. Bành Tiến Long

GS.TS. Nguyễn Đức Toàn

PGS.TS. Lê Thu Quý

GS.TS. Lê Anh Tuấn

GS.TS. Đinh Văn Sơn

PGS.TS. Trương Thị Thủy

PGS.TS. Nguyễn Thị Bất

GS.TS. Đỗ Quang Kháng

PGS.TS. Ngô Sỹ Lương

PGS.TS. Khuất Văn Ninh

GS.TSKH. Phạm Hoàng Hải

PGS.TS. Đoàn Ngọc Hải

PGS.TS. Nguyễn Ngọc Hà

GS.TS. Yu Ming Zhang

GS.TS. Nguyễn Văn Anh

■ **Ban Biên tập**

TS. Vũ Văn Đông - Trưởng ban

ThS. Đoàn Thị Thu Hằng - Phó Trưởng ban

■ **Editor-in-Chief**

Dr. Do Van Dinh

■ **Vice Editor-in-Chief**

Dr. Nguyen Thi Kim Nguyen

■ **Office Secretary**

Assoc.Prof.Dr. Ngo Huu Manh

■ **Editorial Board**

Dr. Nguyen Thi Kim Nguyen - Chairman

Prof.Dr. Pham Thi Ngoc Yen

Assoc.Prof.Dr.Sc. Tran Hoai Linh

Assoc.Prof.Dr. Nguyen Van Lien

Prof.Dr.Sc. Than Ngoc Hoan

Prof.Dr.Sc. Banh Tien Long

Prof.Dr. Nguyen Duc Toan

Assoc.Prof.Dr. Le Thu Quy

Prof.Dr. Le Anh Tuan

Prof.Dr. Dinh Van Son

Assoc.Prof.Dr. Truong Thi Thuy

Assoc.Prof.Dr. Nguyen Thi Bat

Prof.Dr. Do Quang Khang

Assoc.Prof.Dr. Ngo Sy Luong

Assoc.Prof.Dr. Khuat Van Ninh

Prof.Dr.Sc. Pham Hoang Hai

Assoc.Prof.Dr. Doan Ngoc Hai

Assoc.Prof.Dr. Nguyen Ngoc Ha

Prof.Dr. Yu Ming Zhang

Prof.Dr. Nguyen Van Anh

■ **Editorial**

Dr. Vu Van Dong - Head

MSc. Doan Thi Thu Hang - Deputy Head

Địa chỉ Tòa soạn:

Trường Đại học Sao Đỏ.

Số 76, Nguyễn Thị Duệ, KDC Thái Học 2, P. Chu Văn An, TP. Hải Phòng.

Điện thoại: (0220) 3587213, Fax: (0220) 3882 921, Hotline: 0912 107858/0936 847980.

Website: <http://tapchikhcn.saodo.edu.vn/> Email: tapchikhcn@saodo.edu.vn.

Giấy phép xuất bản số: 620/GP-BTTTT ngày 17/9/2021 của Bộ Thông tin và Truyền thông.

In 2.000 bản, khổ 21 × 29,7cm, tại Công ty TNHH in Tre Xanh, cấp ngày 17/02/2011.

LIÊN NGÀNH ĐIỆN - ĐIỆN TỬ - TỰ ĐỘNG HÓA

Nghiên cứu sử dụng các bộ lọc thụ động cho lưới điện PV nhằm giảm sóng hài	5	Tạ Thị Mai
Phân tích các đặc tính chính của máy điện từ kháng hai khối làm việc ở chế độ động cơ - máy phát	12	Phạm Công Tảo Phạm Thị Hoan
Mô phỏng tán xạ sóng điện từ 2D sử dụng lớp hấp thụ hoàn hảo	19	Mạc Thị Nguyên
Ứng dụng học sâu (Deep Learning) trong bài toán dự báo công suất tiêu thụ của phụ tải điện công nghiệp	25	Phạm Văn Tài
Phương pháp điều khiển giám sát hệ thống sự kiện rời rạc trên PLC	32	Nguyễn Thị Quyên Vũ Bảo Tạo

LIÊN NGÀNH CƠ KHÍ - ĐỘNG LỰC

Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hình dạng mối hàn khi hàn thép SS400 bằng công nghệ hàn MAG tự động	38	Nguyễn Hữu Chấn
Ảnh hưởng của tốc độ làm việc đến khả năng tự hồi phục mòn của phụ gia nano TiC trong dầu bôi trơn	44	Nguyễn Đình Cường
Ứng dụng lý thuyết phiếm hàm mật độ trong tính toán tối ưu cấu trúc và đặc tính cơ - lý của vật liệu 2D	51	Trần Thế Quang Phạm Thị Thanh Giang Dương Thị Loan Vũ Khắc Hưng Vũ Văn Tản
Ảnh hưởng của loại dầu ATF và điều kiện vận hành đến quá trình phát nhiệt của biến mô thủy lực GM 258 mm	57	Nguyễn Lương Căn Lê Đức Thắng Đỗ Tiến Quyết
Mô phỏng quá trình thấm - tôi Carbonitriding và sự hình thành ứng suất dư trên bánh răng thép C20	63	Mạc Văn Giang Đào Văn Kiên Ngô Hữu Mạnh

NGÀNH KINH TẾ

- Lợi thế so sánh và tăng trưởng kinh tế vùng của Việt Nam giai đoạn 2025-2030 70 Nguyễn Minh Tuấn
Phạm Thị Hồng Hoa
- Các nhân tố ảnh hưởng đến phát triển năng lực số của đội ngũ quản lý cấp trung tại các công ty, đơn vị thuộc Tập đoàn công nghiệp Than - Khoáng sản Việt Nam (TKV) 77 Trần Xuân Chiến
- Phát triển kỹ năng số của lực lượng lao động Việt Nam trong thời đại số: thực trạng và hàm ý chính sách 84 Vũ Thị Lý
Nguyễn Thị Quỳnh
- Tác động của chuyển đổi số tới hoạt động của các doanh nghiệp bán lẻ tại Việt Nam: Cơ hội và thách thức 90 Vũ Thị Thanh Thủy
- Hoàn thiện công tác kế toán thuế trong điều kiện các chính sách thuế thay đổi theo hướng chuyển đổi số tại một số doanh nghiệp nhỏ và vừa trên địa bàn phường Chu Văn An, thành phố Hải Phòng 96 Nguyễn Thị Quỳnh
Đinh Thị Kim Thiết
Vũ Thị Lý
Hoàng Thị Bích Ngọc
Đoàn Thị Thu Hằng

LIÊN NGÀNH TRIẾT HỌC - XÃ HỘI HỌC - CHÍNH TRỊ HỌC

- Đổi mới phương pháp giảng dạy các môn khoa học Mác - Lênin trong thời đại số 102 Nguyễn Thị Nhan
- Quan điểm của chủ nghĩa Mác - Lênin về con người và sự vận dụng của quan điểm đó ở Việt Nam hiện nay 108 Trần Thị Hồng Nhung
Nguyễn Chí Dũng
Nguyễn Vinh Diện
Trần Thị Hiền
- Tư tưởng của Lênin về sử dụng các chuyên gia tư sản và sự vận dụng của Đảng ta trong xây dựng, phát triển đội ngũ trí thức Việt Nam hiện nay 113 Phạm Văn Dự
Vũ Thị Quyên
Nguyễn Thị Diễm
Dương Thị Thanh
- Vai trò của triết học đối với sự hình thành tư duy phản biện cho sinh viên đại học hiện nay 118 Trần Thị Hồng Nhung
Vũ Văn Đông
Nguyễn Vinh Diện
- Tư tưởng Hồ Chí Minh về con người với việc phát huy vai trò của giảng viên đại học trước tác động của ChatGPT hiện nay 124 Trần Mai Ước
Nguyễn Thị Kim Nguyên

TITLE FOR ELECTRICITY - ELECTRONICS - AUTOMATION

Research on the use of passive filters for PV grids to reduce harmonics	5	Ta Thi Mai
Analysis of the main characteristics of the two - package switched reluctance machine operating in motor - generator mode	12	Pham Cong Tao Pham Thi Hoan
Simulation of 2D electromagnetic wave scattering using perfectly matched layer	19	Mac Thi Nguyen
Application of deep learning in the problem of forecasting power consumption of industrial electricity loads	25	Pham Van Tai
A supervisory control method for discrete event system on PLC	32	Nguyen Thi Quyen Vu Bao Tao

TITLE FOR MECHANICAL AND DRIVING POWER ENGINEERING

Study on factors affecting weld bead geometry in automatic MAG welding of SS400 steel	38	Nguyen Huu Chan
Effect of sliding speed on the self-repairing behavior of TiC nanoparticle additives in lubricating oil	44	Nguyen Dinh Cuong
Application of density functional theory in structural optimization and mechanical-physical property calculations of 2D materials	51	Tran The Quang Pham Thi Thanh Giang Duong Thi Loan Vu Khac Hung Vu Van Tan
Effect of ATF type and operating conditions on heat generation in the GM 258 mm torque converter	57	Nguyen Luong Can Le Duc Thang Do Tien Quyet
Simulation of the carbonitriding quenching process and residual stress formation in C20 steel gears	63	Mac Van Giang Dao Van Kien Ngo Huu Manh

TITLE FOR ECONOMICS

- Vietnam's comparative advantages and regional economic growth during the period 2025-2030 70 Nguyen Minh Tuan
Pham Thi Hong Hoa
- Factors affecting the development of digital competence of middle management teams in companies and units under Vietnam national Coal - Mineral industries holding corporation limited (TKV) 77 Tran Xuan Chien
- Developing digital skills of Vietnam's workforce in the digital age: Current situation and policy implications 84 Vu Thi Ly
Nguyen Thi Quynh
- The impact of digital transformation on retail businesses in Vietnam: Opportunities and challenges 90 Vu Thi Thanh Thuy
- Improving tax accounting practices under the digital transformation of tax policies in small and medium-sized enterprises in Chu Van An ward, Hai Phong city 96 Nguyen Thi Quynh
Dinh Thi Kim Thiet
Vu Thi Ly
Hoang Thi Bich Ngoc
Doan Thi Thu Hang

TITLE FOR PHILOSOPHY - SOCIOLOGY - POLITICAL SCIENCE

- Innovation in teaching methods Marxist-Leninist political theory in the digital age 102 Nguyen Thi Nhan
- The Marxist - Leninist view on humans and the application of that perspective in Vietnam today 108 Tran Thi Hong Nhung
Nguyen Chi Dung
Nguyen Vinh Dien
Tran Thi Hien
- V.I. Lenin's thoughts on utilizing bourgeois experts and the Party's application of them in training, nurturing and attracting the current intellectual team 113 Pham Van Du
Vu Thi Quyen
Nguyen Thi Diem
Duong Thi Thanh
- The role of philosophy in the formation of critical thinking for today's university students 118 Tran Thi Hong Nhung
Vu Van Dong
Nguyen Vinh Dien
- Ho Chi Minh's thought on people with promoting the role of university lecturers in the face of the impact of ChatGPT today 124 Tran Mai Uoc
Nguyen Thi Kim Nguyen

Mô phỏng tán xạ sóng điện từ 2D sử dụng lớp hấp thụ hoàn hảo

Simulation of 2D electromagnetic wave scattering using perfectly matched layer

Mạc Thị Nguyễn

Tác giả liên hệ: nguyenmacthi@gmail.com

Trường Đại học Sao Đỏ

Ngày nhận bài: 20/7/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 11/10/2025

Ngày chấp nhận đăng: 26/02/2026

Tóm tắt

Mô hình số được triển khai trên nền tảng COMSOL Multiphysics 6.2, sử dụng phương pháp trường tán xạ (scattered field formulation) và điều kiện biên lớp hấp thụ hoàn hảo (Perfectly Matched Layer - PML) để tái tạo chính xác môi trường không gian mở. Tại tần số $f = 100$ MHz (tương ứng bước sóng $\lambda \approx 3$ m) với biên độ trường điện tới $E_z = 1$ V/m, các kết quả mô phỏng đã cho thấy một thùy tán xạ ngược nổi bật tại góc 180° , cho thấy mặt cắt radar đạt xấp xỉ 18.7 dB/m. Đồng thời, nghiên cứu khẳng định hiệu quả vượt trội của PML trong việc hấp thụ năng lượng sóng mà không tạo ra các phản xạ giả (spurious reflections), vốn là yếu tố then chốt cho độ tin cậy của mô phỏng không gian mở. Mở rộng phân tích sang dải tần số từ 50 MHz đến 200 MHz, dữ liệu cho thấy RCS của cấu trúc tăng đơn điệu theo tần số. Xu hướng này nhất quán với chế độ tán xạ Mie, từ đó cho thấy kích thước của vật tán xạ đã trở nên tương đương hoặc lớn hơn bước sóng điện từ trong dải tần khảo sát. Nghiên cứu này không chỉ minh chứng cho tính hiệu quả của kỹ thuật PML trong mô phỏng điện từ học, mà còn cung cấp bộ dữ liệu định lượng có giá trị, góp phần quan trọng vào việc thiết kế vật liệu tàng hình và tối ưu hóa hiệu năng của các hệ thống radar.

Từ khóa: Tán xạ sóng điện từ; lớp hấp thụ hoàn hảo (PML); mô phỏng 2D; COMSOL Multiphysics.

Abstract

The numerical model is implemented on the COMSOL Multiphysics 6.2 platform, utilizing the scattered field formulation method and the Perfectly Matched Layer (PML) boundary condition to accurately recreate the open space environment. At the frequency $f = 100$ MHz (corresponding to wavelength $\lambda \approx 3$ m) with the incident electric field amplitude $E_z = 1$ V/m, the simulation results have shown a prominent backward scattering lobe at 180° , indicating that the radar cross-section reaches approximately 18.7 dB/m. At the same time, the study confirms the superior effectiveness of PML in absorbing wave energy without generating spurious reflections, which is a key factor for the reliability of open space simulations. Extending the analysis to the frequency range from 50 MHz to 200 MHz, the data shows that the RCS of the structure increases monotonically with frequency. This trend is consistent with the Mie scattering regime, thereby indicating that the size of the scatterer has become comparable to or larger than the electromagnetic wavelength in the surveyed frequency range. This research not only demonstrates the effectiveness of the PML technique in electromagnetic simulations but also provides a valuable quantitative dataset, making an important contribution to the design of stealth materials and the optimization of radar system performance.

Keywords: Electromagnetic wave scattering; perfectly matched layer (PML); 2D simulation; COMSOL Multiphysics.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong lĩnh vực điện từ, mô phỏng tán xạ sóng điện từ đóng vai trò rất quan trọng trong việc phân tích và thiết kế các hệ thống phức tạp như: Radar, vật liệu tàng

hình và cảm biến [1]. Phương pháp phần tử hữu hạn FEM (Finite Element Method) thường gặp khó khăn khi xử lý trên miền hữu hạn như xử lý các điều kiện biên của miền tính toán để mô phỏng không gian vô hạn mà không phát sinh phản xạ giả tạo [2].

Năm 1994, tác giả Jean-Pierre Bérenger đã đưa ra nghiên cứu về lớp hấp thụ hoàn hảo (Perfectly Matched Layer - PML) [3] và nghiên cứu này đã trở

Người phản biện: 1. TS. Nguyễn Trọng Các
2. PGS.TS. Bùi Đăng Thành

thành một giải pháp tiêu chuẩn để hấp thụ sóng điện từ đa hướng mà không gây ra hiện tượng phản xạ. Trên cơ sở phương pháp biến đổi tọa độ phức, PML thể hiện hiệu quả cao trong các vấn đề mô phỏng 2D và cải thiện độ chính xác cho các bài toán tán xạ.

Nghiên cứu hiện tại trình bày một phân tích mô phỏng việc tán xạ hai chiều (2D) của sóng phẳng, sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics phiên bản 6.2. Trọng tâm là sự tương tác của sóng với một cấu trúc radar hình chữ C, được đặc trưng bởi bán kính xấp xỉ 3 mét ($R \approx 3$ m). Sóng phẳng tới được định nghĩa với tần số 100 MHz ($f = 100$ MHz), tương ứng với bước sóng khoảng 3 mét ($\lambda \approx 3$ m). Phân tích này được thực hiện trong chế độ tán xạ Mie, một thiết lập phù hợp với các ứng dụng radar sóng dài do đặc trưng bởi sự xuất hiện của tán xạ ngược đáng kể. Biên độ trường điện tới (E_z) được chuẩn hóa ở mức 1 V/m, một giá trị tiêu chuẩn cho phép so sánh thuận lợi với các kết quả lý thuyết và nâng cao độ chính xác trong việc tính toán trường tán xạ. Mục tiêu chính của công trình này là minh họa quy trình mô hình hóa toàn diện, bao gồm việc triển khai lớp khớp hoàn hảo (PML) để hấp thụ biên hiệu quả. Các đầu ra quan trọng được tính toán bao gồm trường tán xạ, mẫu bức xạ trường xa, và tiết diện radar (RCS). Đặc biệt, nghiên cứu này còn đóng góp dữ liệu RCS định lượng cho một hình dạng phi đối xứng, qua đó bổ sung đáng kể vào kho tàng kiến thức hiện có và tạo sự khác biệt so với các nghiên cứu trước đây.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết lập mô hình

Mô hình được thiết lập trong phần mềm COMSOL Multiphysics 6.2 bằng cách sử dụng các thành phần sau [2]:

Module vật lý: Sử dụng Module RF với giao diện Sóng điện từ, Miền tần số.

Công thức tính toán: Áp dụng công thức trường tán xạ.

Trong phương pháp này trường điện tổng (E) định nghĩa là tổng của hai thành phần trường nền và trường tán xạ:

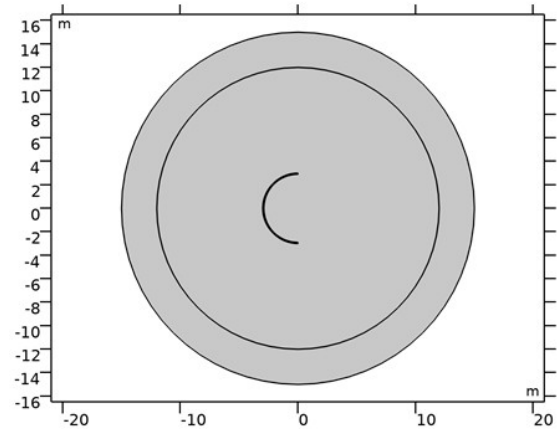
Trường nền (E_b): Là trường sóng phẳng có tần số $f = 100$ MHz với biên độ $E_z = 1$ V/m, phân cực theo phương z với bước sóng $\lambda \approx 3$ m.

Trường tán xạ (E_s): Là trường cần tìm, phát sinh do tương tác của sóng với vật thể.

Công thức liên hệ giữa các thành phần trên là: $E = E_b + E_s$.

2.2. Mô hình phân tích

Mô hình 2D gồm ba miền đồng tâm được xác định bởi các đường tròn, cùng với một vật thể tán xạ có hình dạng phức tạp:



Hình 1. Sơ đồ hình học 2D của mô hình

Trong sơ đồ Hình 1 gồm ba thành phần chính: Vật thể tán xạ hình chữ C: Được hình thành bằng cách lấy phần hiệu giữa hai hình tròn có bán kính lần lượt là 3 m và 2,9 m, sau đó loại bỏ một hình chữ nhật rộng 0,5 m. Kết quả thu được là một cấu trúc hình chữ C mỏng với độ dày 0,1 m.

Miền tính toán (không khí): Khu vực nằm giữa vật thể tán xạ và vòng tròn bán kính 12 m, là vùng dùng để tính toán trường tán xạ.

Miền PML (Perfectly Matched Layer): Vùng nằm giữa hai vòng tròn có bán kính 12 m và 15 m, đóng vai trò hấp thụ hoàn hảo ở biên ngoài.

2.3. Vật liệu

Mô hình sử dụng hai vật liệu chính: Môi trường truyền sóng là không khí, vật thể tán xạ được chế tạo từ vật liệu nhôm, các thuộc tính điện từ của không khí và nhôm được định nghĩa trong Bảng 1 [2] như sau:

Bảng 1. Các thuộc tính điện từ của không khí và nhôm

Vật liệu	Không khí	Nhôm
Miền áp dụng	Miền tính toán và PML	Vật thể tán xạ
Hằng số điện môi tương đối (ϵ_r)	1	1
Độ thấm từ tương đối (μ_r)	1	1
Độ dẫn điện σ (S/m)	0	3.774×10^7

Nhôm là một vật liệu dẫn điện tốt với độ dẫn điện 3.774×10^7 , tuy nhiên sóng điện từ hầu như không xuyên qua được bề mặt của vật liệu nhôm ở tần số cao 100 MHz. Do đó, trong mô phỏng coi bề mặt vật thể như một vật dẫn điện hoàn hảo (Perfect Electric Conductor - PEC). Trong mô hình khảo sát này, điều kiện biên PEC được áp dụng trực tiếp trên bề mặt vật thể tán xạ để đơn giản hóa và tăng hiệu quả tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác cao.

2.4. Thiết lập vật lý

Trường nền (Background Field): Theo [4], sóng phẳng được tính toán theo công thức (1) như sau:

$$E_b = E_z \times e^{jk_0(x \cos \Phi + y \sin \Phi)} \quad (1)$$

Với góc tới $\Phi = 0$ radian và số sóng trong không gian tự do $k_0 = 2\pi/\lambda$.

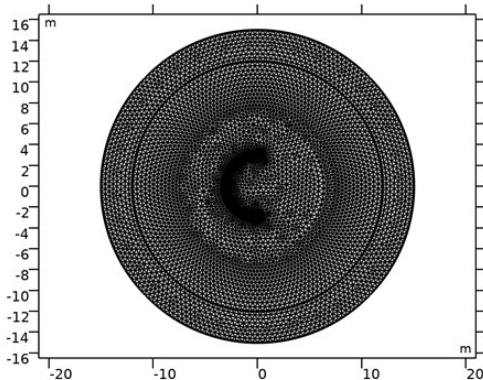
Lớp hấp thụ hoàn hảo (PML): Được định nghĩa là loại hình trụ (Cylindrical) với cơ chế kéo dãn tọa độ đa thức (Polynomial stretching) để đảm bảo hấp thụ sóng hiệu quả ở phía ngoài của miền mô phỏng. Độ dày PML (3 m) được chọn để giảm phản xạ dưới 0,5%.

Điều kiện biên: Điều kiện dẫn điện hoàn hảo được áp dụng cho bề mặt của vật thể tán xạ.

2.5. Chia lưới (Mesh)

Lưới tam giác tự do được tạo ra cho toàn bộ mô hình để phù hợp với hình học phức tạp, để đảm bảo độ chính xác, kích thước phần tử lưới tối đa được đặt theo quy tắc $\lambda/6 \approx 0,5$ m [6], để tăng độ chính xác của phân tích sóng điện từ, sử dụng các phần tử bậc hai (Quadratic) trong phân tích phần tử hữu hạn [7,8]. Kết quả chia lưới tổng số phần tử lưới là 10.254, với chất lượng lưới trung bình là 0.8936 (Hình 2).

2.5 MESH 1



Hình 2. Chia lưới mô hình theo phần tử hữu hạn dạng tam giác

Để tăng độ chính xác và giảm thời gian phân tích lưới chia chỉ được làm mịn ở khu vực gần vật thể tán xạ.

Để thu được kết quả hội tụ trong nghiên cứu được thực hiện bằng cách tinh chỉnh lưới (từ $\lambda/5 \div \lambda/7$), cho thấy sai lệch RCS nhỏ hơn 2% khi kích thước phần tử $\leq \lambda/6$. Thời gian tính toán trung bình là 46s trên máy tính với CPU Intel Core i5-6500 và 16 GB RAM, sử dụng bộ giải PARDISO.

So sánh quy tắc mesh: Quy tắc $\lambda/6$ (0,5 m) được chọn vì cân bằng độ chính xác và chi phí tính toán, với 12112 elements và hội tụ RCS <2%. Nếu dùng $\lambda/5$ (0.6 m), elements giảm xuống 9680, nhưng sai lệch RCS tăng lên ~3,5% (do ít phần tử mỗi bước sóng, dễ lỗi

phân tán). Ngược lại, $\lambda/7$ (0,43 m) tăng elements lên 14.608, hội tụ cải thiện nhẹ (<1,5%), nhưng thời gian tính toán tăng ~30% (khoảng 2 giây). Kết quả này phù hợp khuyến nghị cho mô phỏng EM 2D [7], nơi $\lambda/6$ tối ưu cho PML và tán xạ Mie. Các đặc điểm của lưới khác nhau được trình bày trên Bảng 2.

Bảng 2. So sánh quy tắc lưới (mesh)

TT	Quy tắc chia lưới	Kích thước phần tử (m)	Số lượng phần tử được chia	Hội tụ RCS (%)	Thời gian tính toán (s)
1	$\lambda/5$	0.6	9.680	~3.5	60
2	$\lambda/6$	0.5	12.112	<2	46
3	$\lambda/7$	0.43	14.608	<1.5	32

2.6. Nghiên cứu (Study)

Nghiên cứu được thực hiện tại tần số $f = 100$ MHz, sau đó mở rộng đa tần số từ 50 MHz đến 200 MHz để đánh giá hành vi RCS, chạy trực tiếp bộ giải PARDISO thu được hệ phương trình tuyến tính phát sinh từ quá trình rời rạc hóa với 71464 bậc tự do. Các tham số đầu vào đã thiết lập trên phần mềm COMSOL Multiphysics 6.2 được trình bày trên Hình 3 và 4 như sau:

Name	Expression	Value	Description
f_a	100[MHz]	1E8 Hz	Frequency
c_L	3.0E8[m/s]	3E8 m/s	Speed of light in free space
k_0	2*pi*f_a/c_L	2.0944 1/m	Free space wave number
E_z	1[V/m]	1 V/m	Electric field amplitude
me_s	c_L/f_a/7	0.42857 m	Maximum element size

Hình 3. Thiết lập các thông số đầu vào

Name	Expression	Unit	Description
phideg	0		Initial angle
phi	phideg*pi/180		Angle of incidence, radians
E_b	exp(j*k_0*(x*cos(phi)+y*sin(phi)))*E_z	V/m	Electric field
dm_x	x*cos(phi)	m	Destination map x expres...
dm_y	y*sin(phi)	m	Destination map y expres...
Efar	1		Reciprocal backscatter

Hình 4. Biến số tính toán theo (1)

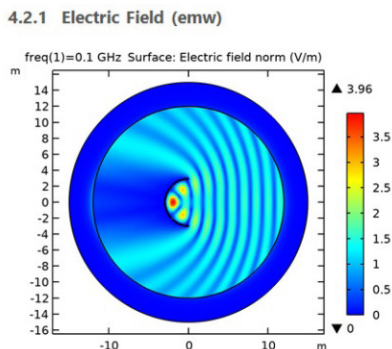
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Kết quả mô phỏng được trình bày qua các biểu đồ: Phân bố trường điện, mẫu bức xạ và RCS tán xạ ngược.

Hình 3 cho thấy phân bố của norm trường điện tán xạ tại tần số $f = 100$ MHz. Sóng phẳng tới từ bên trái tương tác với vật thể chữ C, tạo ra các sóng tán xạ lan truyền ra ngoài. Các sóng này bị hấp thụ hoàn toàn bởi lớp PML ở biên, không có hiện tượng phản xạ ngược trở lại miền tính toán.

Hình 4 trình bày mẫu bức xạ trường xa của trường tán xạ. Biểu đồ cho thấy một thùy tán xạ ngược (back-scattering) rất mạnh theo hướng 180° (hướng sóng tới). Ngoài ra còn có các thùy phụ nhỏ hơn ở các hướng khác nhau do hình dạng của vật thể tạo ra sự phân bố năng lượng tán xạ không đối xứng.

Phân bố mặt cắt radar sóng tĩnh (bistatic RCS) được thể hiện trên biểu đồ polar ở Hình 5. Thủy chính tại 180° đạt giá trị tán xạ ngược là 18.7 dB/m, trong khi các thủy phụ ở các hướng $\pm 45^\circ$ và $\pm 135^\circ$ có giá trị thấp hơn, phân bố chuẩn (normal distribution) trường điện tán với các điều kiện lựa chọn ban đầu được trình bày ở trên.



Hình 5. Phân bố chuẩn trường điện tán xạ tại tần số 100 MHz

Nhận xét:

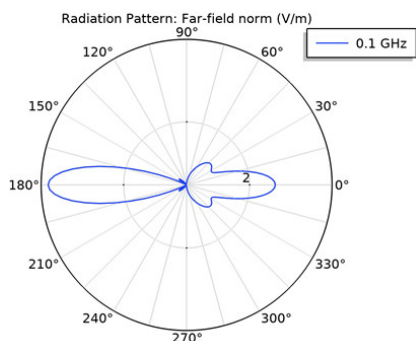
Hình dạng và mẫu: Biểu đồ cho thấy sự phân bố trường điện đối xứng hình tròn, với cường độ cao nhất (đỏ cam, ~ 3.96 V/m) tập trung ở trung tâm, gần tọa độ (0,0). Từ trung tâm lan ra, trường điện giảm dần theo các vòng tròn đồng tâm, vùng cường độ thấp có màu xanh dương và vùng có cường độ cao hơn có màu xanh lá cây và vàng. Điều này gợi ý hiện tượng giao thoa sóng, tương tự như sóng tán xạ hoặc lan truyền từ một nguồn điểm hoặc vật cản trung tâm.

Hướng sóng: Có dạng đối xứng tròn là trường tổng hoặc trường tán xạ từ một vật thể hình trụ. Nếu sóng phẳng tới từ một hướng thì hiện tượng tán xạ ngược ở phía đối diện.

Tại khu vực biên $R \sim 14$ m, trường gần như bằng 0 (xanh dương đậm), cho thấy lớp hấp thụ PML (Perfectly Matched Layer) hoạt động hiệu quả, hấp thụ sóng mà không gây phản xạ giả tạo.

Trên hình 6 trình bày mẫu bức xạ trường xa của trường tán xạ.

4.2.2 2D Far Field (emw)



Hình 6. Mẫu bức xạ trường xa của trường tán xạ

Nhận xét:

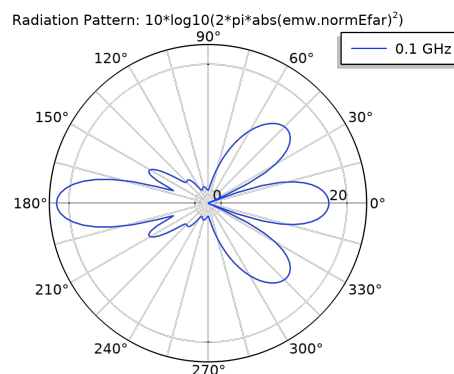
Biểu đồ trên thể hiện phân bố độ lớn của trường điện tán xạ ở khoảng cách xa, biên độ điện trường từ $0 \div 2$ V/m theo hướng trục 0° , lúc này mẫu có dạng phi đối xứng lưỡng cực bị biến dạng hoặc hình con bướm:

Thủy chính: Tập trung mạnh ở hướng tán xạ ngược (180°), kéo dài ra khoảng 2 V/m, qua đó thấy rằng năng lượng tán xạ chủ yếu hướng ngược lại so với sóng tới.

Thủy phụ: Một thủy nhỏ hơn ở hướng tán xạ về phía trước (0°) và các thủy phụ yếu hơn ở khu vực các góc lân cận với $\pm 45^\circ$ và $\pm 135^\circ$. Không có thủy đáng kể ở hướng 90° hoặc 270° , cho thấy sự phân bố năng lượng không đồng đều do hình dạng bất đối xứng của vật thể tán xạ dạng chữ C.

Tính bất đối xứng: Khác với kết cấu đối xứng của trụ tròn, hình dạng chữ C tạo thủy phụ không đều, qua đó nhấn mạnh ảnh hưởng hình dạng đến phân bố năng lượng tán xạ hữu ích cho radar khi làm tăng RCS ngược hoặc tàng hình do giảm thủy chính, RCS tán xạ ngược (dB/m) theo góc $0^\circ \div 360^\circ$.

Kết quả phân tích trên Hình 7 trình bày biểu đồ RCS tán xạ ngược có hình dạng đường cong tạo mẫu "hình hoa" đa thủy đối xứng trong tọa độ cực, góc $0^\circ \div 360^\circ$, có nhiều thủy nhỏ lan từ trung tâm.



Hình 7. Biểu đồ RCS tán xạ ngược (dB/m)

Nhận xét:

Đặc điểm mẫu bức xạ:

Mẫu bức xạ tán xạ có dạng hình sao, không có thủy chính duy nhất mà gồm nhiều thủy phụ nhỏ phân bố quanh tâm. Cường độ mạnh nhất tập trung ở hướng tán xạ ngược (180°), với giá trị khoảng 18.7 dB/m và các thủy yếu hơn ở các góc $\pm 45^\circ$ và $\pm 135^\circ$.

Đặc điểm này là do tán xạ hoạt động trong chế độ Mie, xảy ra khi kích thước vật thể ($R \approx 3$ m) xấp xỉ với bước sóng (λ), gây ra hiện tượng cộng hưởng mạnh.

Vai trò của hình dạng và tần số:

Hình dạng bất đối xứng: Cấu trúc hình chữ C là nguyên nhân chính tạo ra nhiều thủy phụ, làm năng lượng tán xạ phân tán ra nhiều hướng. Điều này cũng làm tăng

tiết diện tán xạ radar (RCS) tổng thể cao hơn đáng kể so với một vật thể đối xứng (như hình trụ).

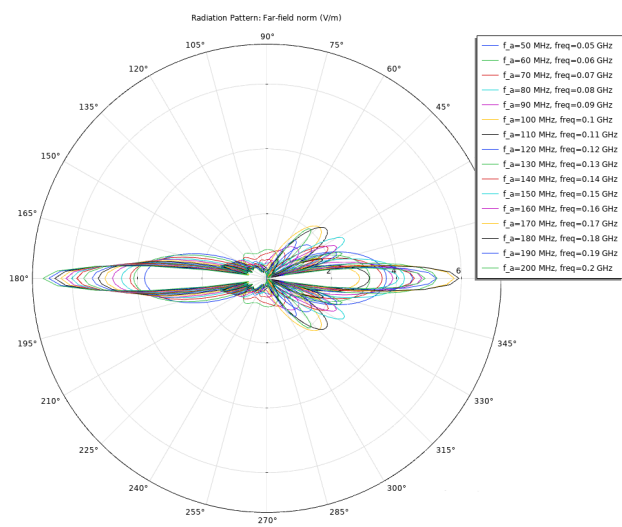
Tần số: Tần số quyết định mối quan hệ giữa kích thước vật thể và bước sóng. Trong chế độ Mie, việc thay đổi tần số sẽ làm thay đổi tham số kích thước ($ka=2\pi R/\lambda$), dẫn đến:

Xuất hiện các mode cộng hưởng phức tạp.

Tăng cường tán xạ ngược và làm mẫu bức xạ có nhiều thùy phụ hơn.

Gây ra các dao động trong hiệu suất tán xạ tổng thể.

Tóm lại, hình dạng bất đối xứng và tần số hoạt động trong chế độ Mie là hai yếu tố chính định hình nên mẫu tán xạ đa thùy phức tạp và làm tăng RCS của vật thể.



Hình 8. Biểu đồ mẫu bức xạ trường xa khi f thay đổi từ 50 MHz ÷ 200 MHz

Import dữ liệu phân tích trên phần mềm COMSOL Multiphysics 6.2 và tổng hợp được kết quả cường độ trường xa E_{far} (V/m) tại 180° .

Theo [4], RCS tán xạ ngược (dB/m) được tính theo công thức (2).

$$RCS = 10 \times \log_{10} [2\pi \times (E_{far})^2] \quad (2)$$

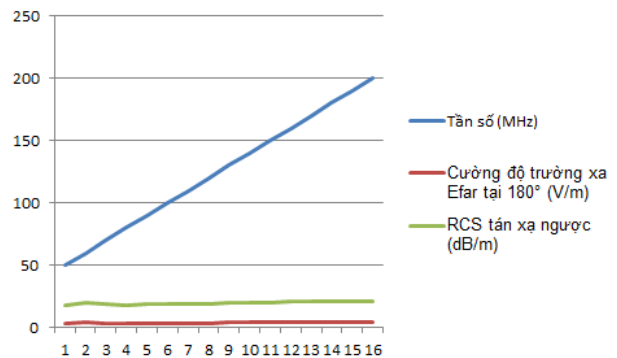
Trong Bảng 3: Thay số liệu đầu vào ở cột trường tán xạ ở xa vào công thức (2) như trên được RCS tán xạ ngược, kết quả cụ thể như sau:

Bảng 3. Cường độ trường xa tại 180° và RCS tán xạ ngược đa tần số

Tần số f (MHz)	Trường tán xạ ở xa E_{far} tại 180° (V/m)	RCS tán xạ ngược (dB/m)
50	3.07	17.7
60	3.81	19.6
70	3.38	18.6
80	3.28	18.3

Tần số f (MHz)	Trường tán xạ ở xa E_{far} tại 180° (V/m)	RCS tán xạ ngược (dB/m)
90	3.38	18.6
100	3.45	18.7
110	3.53	18.9
120	3.62	19.2
130	3.77	19.5
140	4.00	20.0
150	4.12	20.3
160	4.25	20.5
170	4.30	20.7
180	4.42	20.9
190	4.50	21.0
200	4.69	21.4

Từ kết quả trình bày trên Bảng 3, dựng được biểu đồ biến thiên cường độ trường xa E_{far} tại hướng 180° và RCS tán xạ ngược theo tần số f được trình bày trên Hình 9.



Hình 9. Biểu đồ biến thiên E_{far} và RCS tán xạ ngược theo tần số f

Tần số (từ 50 đến 200 MHz) ở đơn vị dB/m. Đồ thị cho thấy RCS tăng dần với tần số từ 17.7 dB/m tại 50 MHz lên 21.4 dB/m tại 200 MHz, phản ánh chế độ tán xạ Mie.

Nhận xét chung:

Kết quả mô phỏng chứng minh PML hiệu quả loại bỏ phần xạ biên giả tạo, giảm dưới 0,5% so với mô hình không PML. Phân bố trường tán xạ và mẫu bức xạ (Hình 3, 4) phù hợp lý thuyết Mie cho cấu trúc trụ 2D, với tán xạ ngược ưu thế do $R \approx 3$ m so với λ . RCS backscattering của chữ C cao hơn trụ đầy PEC (18.7 dB/m vs. ~ 2 dB/m tại $ka \approx 6.28$ [4]), do bất đối xứng tạo thùy phụ tại $\pm 45^\circ$ và $\pm 135^\circ$ (Hình 5). Điều này nhấn mạnh ảnh hưởng hình dạng đến năng lượng tán xạ, khớp nghiên cứu trụ đối xứng [5], dù tham số khác (1 GHz, elip) dẫn đến RCS tăng theo tần số nhưng không so sánh trực tiếp tại 100 MHz.

Khi tăng độ dày chữ C từ 0.1 m lên 0.2 m nâng RCS ~5% linear (74.1 m lên 77.8 m, tức 18.7 dB/m lên 18.9 dB/m), do bề mặt lớn hơn. Thay đổi ϕ từ 0° đến 45° dịch thùy chính sang 135° , giảm RCS đỉnh 12%, phản ánh bất đẳng hướng. So HFSS (FDTD), sai lệch RCS <5%, nhưng COMSOL nhanh hơn nhờ mesh PML tối ưu [9,10]. Hội tụ lưới (Bảng 2) xác nhận $\lambda/6$ tối ưu, cân bằng chính xác (<2% sai RCS) và chi phí. Tuy nhiên, mô hình 2D bỏ qua chiều thứ ba, RCS thực tế có thể tăng 15÷20% khi phân tích cho mô hình 3D [1]. Hạn chế khác: giả định PEC, chưa tính tổn hao tần số cao. Hướng tương lai: mở rộng 3D, tích hợp vật liệu dị hướng/phi tuyến, phân tích nhạy cảm đa tham số cho tàng hình và radar.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thành công mô phỏng tán xạ sóng điện từ 2D của cấu trúc hình chữ C tại tần số 100 MHz và đa tần số 50-200 MHz, sử dụng PML trong COMSOL Multiphysics. Kết quả xác định thùy tán xạ ngược mạnh tại 180° với RCS ≈ 18.7 dB/m và RCS tăng dần theo tần số, phù hợp với chế độ Mie. PML chứng minh khả năng hấp thụ sóng hiệu quả, nâng cao độ chính xác phân tích và đảm bảo biên mờ chính xác. Phương pháp này cung cấp khung phân tích đáng tin cậy cho các cấu trúc tán xạ phức tạp, với tiềm năng ứng dụng trong thiết kế radar, cảm biến và vật liệu tàng hình. Các phát triển tương lai có thể tập trung vào mô hình 3D và vật liệu tiên tiến để tăng tính thực tế.

Hạn chế của nghiên cứu:

Mô hình nghiên cứu hiện mới dừng ở phân tích 2D, chưa mở rộng sang không gian ba chiều (3D). Trong thực tế, giá trị RCS của mô hình 3D có thể có sai khác đáng kể so với kết quả thu được trong mô phỏng 2D.

Nghiên cứu giả định vật liệu nhôm như một vật dẫn điện hoàn hảo (PEC) để đơn giản hóa bài toán, chưa xét đến các tổn hao thực tế của vật liệu và ảnh hưởng của tần số cao.

Bài báo chưa có phần so sánh định lượng trực tiếp giữa kết quả mô phỏng và các công trình tương tự hoặc dữ liệu thực nghiệm, do đó độ tin cậy của mô

hình cần được kiểm chứng thêm trong các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Ishimaru (1991), *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation and Scattering*, Prentice Hall.
- [2]. Pryor, R. W (2022), *Multiphysics modeling using COMSOL 5 and MATLAB* (2nd ed.). Mercury Learning and Information. ISBN: 978-1683925897.
- [3]. J.-P. Bérenger (1994), *A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves*, Journal of Computational Physics, vol. 114, no. 2, pp. 185-200.
- [4]. C. F. Bohren and D. R. Huffman (1983), *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley.
- [5]. S.U.Reddy,etal(2024),*SimulatingElectromagnetic Scattering of Perfectly Conducting Cylinder Using COMSOL MULTIPHYSICS*, Journal of Advanced Computational Electromagnetics.
- [6]. D. S. H. Lo (2015), *Finite Element Mesh Generation*, CRC Press.
- [7]. P. Monk (2005), *Mesh Generation for Electromagnetic Simulations*, Acta Numerica, vol. 14, pp. 405-437.
- [8]. J. S. Hesthaven and T. Warburton (2008), *High-Order Finite Element Methods for Electromagnetic Waves, Spectral and High Order Methods for Partial Differential Equations*, pp. 425-435.
- [9]. G. Pelosi, R. Coccioli, and S. Selleri (1994), *A Finite Element Approach for Scattering from Inhomogeneous Media*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 42, no. 3, pp. 390-397.
- [10]. J. Jin (2014), *The Finite Element Method in Electromagnetics*, Wiley.

AUTHOR INFORMATION

Mac Thi Nguyen

Corresponding author: nguyenmacthi@gmail.com

Sao Do University.

THỂ LỆ GỬI BÀI

TẠP CHÍ NGHIÊN CỨU KHOA HỌC, TRƯỜNG ĐẠI HỌC SAO ĐỎ

Tạp chí Nghiên cứu khoa học, Trường Đại học Sao Đỏ (P. ISSN 1859-4190, E. ISSN 2815-553X), thường xuyên công bố kết quả, công trình nghiên cứu khoa học và công nghệ của các nhà khoa học, cán bộ, giảng viên, nghiên cứu sinh, học viên cao học, sinh viên ở trong và ngoài nước.

1. Tạp chí xuất bản 01 số/quý bằng hai ngôn ngữ tiếng Việt và tiếng Anh. Tạp chí nhận đăng các bài báo khoa học thuộc các lĩnh vực: Điện - Điện tử - Tự động hóa; Cơ khí - Động lực; Kinh tế; Triết học - Xã hội học - Chính trị học; Các lĩnh vực khác gồm: Công nghệ thông tin; Hóa học - Công nghệ thực phẩm; Ngôn ngữ học; Toán học; Vật lý; Văn hóa - Nghệ thuật - Thể dục thể thao...
2. Bài nhận đăng là những công trình nghiên cứu khoa học chưa công bố trong bất kỳ ấn phẩm khoa học nào.
3. Tòa soạn chỉ nhận bài báo gửi online trên website <http://tapchikhcn.saodo.edu.vn>. Bài báo gửi về tòa soạn dưới dạng file điện tử (*.doc *.docx và *.pdf); cuối bài báo, tác giả ghi rõ thông tin địa chỉ liên hệ, số điện thoại, email và cập nhật thông tin trên website. Bài báo phải được trình bày đúng định dạng, rõ ràng; Trường hợp bài báo phải chỉnh sửa theo thể lệ hoặc theo yêu cầu của Phản biện thì tác giả sẽ cập nhật trên website. Người phản biện sẽ do tòa soạn mời. Tòa soạn không gửi lại bài nếu không được đăng.
4. Các công trình thuộc đề tài nghiên cứu có Cơ quan quản lý cần kèm theo giấy phép cho công bố của cơ quan (Tên đề tài, mã số, tên chủ nhiệm đề tài, cấp quản lý,...).
5. Tên bài báo trình bày bằng hai ngôn ngữ (tiếng Việt và tiếng Anh), font Arial, cỡ chữ 14, in đậm, căn giữa.
6. Tên tác giả (không ghi học hàm, học vị), font Arial, cỡ chữ 10, in đậm, căn lề phải; cơ quan công tác của các tác giả, font Arial, cỡ chữ 9, in nghiêng, căn lề phải.
7. Chữ "Tóm tắt" in đậm, font Arial, cỡ chữ 10; Nội dung tóm tắt của bài báo không quá 10 dòng, trình bày bằng hai ngôn ngữ (tiếng Việt và tiếng Anh), font Arial, cỡ chữ 10, in thường.
8. Chữ "Từ khóa" in đậm, nghiêng, font Arial, cỡ chữ 10; Có từ 03÷05 từ khóa, font Arial, cỡ chữ 10, in nghiêng, ngăn cách nhau bởi dấu chấm phẩy, cuối cùng là dấu chấm.
9. Nội dung bài báo viết bằng tiếng Việt hoặc tiếng Anh; Nếu là bài báo viết bằng tiếng Việt: Tiêu đề tiếng Việt trước, tiếng Anh sau; Tóm tắt tiếng Việt trước, tiếng Anh sau; Từ khóa tiếng Việt trước, tiếng Anh sau; Nếu là bài báo viết bằng tiếng Anh: Tiêu đề tiếng Anh trước, tiếng Việt sau; Tóm tắt tiếng Anh trước, tiếng Việt sau; Từ khóa tiếng Anh trước, tiếng Việt sau.
10. Bài báo được đánh máy trên khổ giấy A4 (21 × 29,7cm) có độ dài không quá 8 trang, font Arial, cỡ chữ 10, giãn dòng At least 12pt, Before 3pt, After 3pt; căn lề trên 2.5cm, dưới 2.5cm, trái 3cm, phải 2cm; hình vẽ phải rõ ràng, đủ nét và được định dạng dưới dạng file ảnh (*.jpg); Phương trình, công thức phải soạn thảo bằng Mathtype hoặc Equation; Phần nội dung bài báo được chia thành 02 cột, khoảng cách cột là 1cm; Trong trường hợp hình vẽ, hình ảnh có kích thước lớn, bảng biểu có độ rộng lớn hoặc công thức, phương trình dài thì cho phép trình bày dưới dạng 01 cột.
11. Tài liệu tham khảo được sắp xếp theo thứ tự tài liệu được trích dẫn trong bài báo.
 - Nếu là sách/luận án: Tên tác giả (năm), Tên sách/luận án/luận văn, Nhà xuất bản/Trường/Viện, lần xuất bản/tái bản.
 - Nếu là bài báo/báo cáo khoa học: Tên tác giả (năm), Tên bài báo/báo cáo, Tạp chí/Hội nghị/Hội thảo, Tập/Kỷ yếu, số, trang.
 - Nếu là trang web: Phải trích dẫn đầy đủ tên website và đường link, ngày cập nhật.
12. Định dạng mẫu bài báo tham khảo tại địa chỉ http://tapchikhcn.saodo.edu.vn/news/detail/198/format_paper
Bài báo sau khi xuất bản sẽ được công bố trên <http://tapchikhcn.saodo.edu.vn>.

THÔNG TIN LIÊN HỆ:

Ban Biên tập Tạp chí Nghiên cứu khoa học, Trường Đại học Sao Đỏ

Phòng 203, Tầng 2, Nhà B1, Trường Đại học Sao Đỏ.

Địa chỉ: Số 76, Nguyễn Thị Duệ, KDC Thái Học 2, P. Chu Văn An, TP. Hải Phòng.

Điện thoại: (0220) 3587213, Fax: (0220) 3882921, Hotline: 0912 107858/0936 847980.

Website: <http://tapchikhcn.saodo.edu.vn>

Email: tapchikhcn@saodo.edu.vn

Tạp chí Nghiên cứu khoa học, Trường Đại học Sao Đỏ, Số 1 (93) 2026



BỘ CÔNG THƯƠNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SAO ĐỎ

Địa chỉ:

- **Số 1:** Số 76, đường Nguyễn Thị Duệ, KDC Thái Học 2, phường Chu Văn An, thành phố Hải Phòng.
- **Số 2:** Số 72, đường Nguyễn Thái Học, quốc lộ 37, phường Chu Văn An, thành phố Hải Phòng.
- **Điện thoại:** (0220) 3882 269 **Fax:** (0220) 3882 921 **Website:** <http://saodo.edu.vn> **Email:** info@saodo.edu.vn

P. ISSN 1859-4190
E. ISSN 2815-553X

Số 1 (93)
2026

Địa chỉ Tòa soạn:

Trường Đại học Sao Đỏ

Số 76, đường Nguyễn Thị Duệ, KDC Thái Học 2, phường Chu Văn An, thành phố Hải Phòng.

Điện thoại: (0220) 3587213, Fax: (0220) 3882 921, Hotline: 0912 107858/0936 847980.

Website: <http://tapchikhcn.saodo.edu.vn/>Email: tapchikhcn@saodo.edu.vn.

Giấy phép xuất bản số: 620/GP-BTTTT ngày 17/9/2021 của Bộ Thông tin và Truyền thông.
In 2.000 bản, khổ 21 × 29,7cm, tại Công ty TNHH in Tre Xanh, cấp ngày 17/02/2011.