

# MÔ HÌNH HÓA, ĐIỀU KHIỂN VÀ TỐI ƯU ĐA MỤC TIÊU HỆ THỐNG LÀM MÁT ĐỘNG CƠ SỬ DỤNG BƠM NƯỚC ĐIỆN TỬ ĐIỀU KHIỂN PWM

## MODELING, CONTROL, AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF AN ENGINE COOLING SYSTEM USING A PWM-CONTROLLED ELECTRIC WATER PUMP

**Tăng Bá Đại**

Trường Đại học Công nghiệp Việt – Hung

Email: [tbdacnh@gmail.com](mailto:tbdacnh@gmail.com)

### TÓM TẮT

Trong các hệ thống quản lý nhiệt động cơ, việc đồng thời đảm bảo ổn định nhiệt và hiệu quả năng lượng vẫn là một thách thức do đặc tính phi tuyến của quá trình truyền nhiệt. Nghiên cứu này đề xuất một phương pháp điều khiển dựa trên mô hình áp dụng cho hệ thống làm mát sử dụng bơm nước điện tử điều khiển PWM. Mô hình nhiệt dạng tập trung được xây dựng dựa trên cân bằng năng lượng, kết hợp với điều khiển phản hồi tuyến tính theo trạng thái nhiệt, nhằm điều chỉnh lưu lượng chất làm mát theo trạng thái nhiệt. Bài toán tối ưu đa mục tiêu được thiết lập để cân bằng giữa sai lệch nhiệt độ và tiêu thụ năng lượng và được giải bằng thuật toán PSO. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất cải thiện đáng kể so với bơm cơ khí, với thời gian xác lập giảm khoảng 25-30%, sai lệch nhiệt độ giảm hơn 40% và năng lượng tiêu thụ giảm 22-28%. Phân tích Pareto xác định vùng vận hành hiệu quả năng lượng trong khoảng 135-170 W với sai lệch 1,6-2,6°C. Kết quả chứng minh rằng việc tích hợp điều khiển dựa trên mô hình và tối ưu đa mục tiêu góp phần nâng cao hiệu năng hệ thống, đồng thời cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng.

**Từ khóa:** Quản lý nhiệt động cơ; PWM; Bơm nước điện tử; Tối ưu đa mục tiêu.

### ABSTRACT

In engine thermal management systems, simultaneously ensuring thermal stability and energy efficiency remains a significant challenge due to the nonlinear characteristics of heat transfer processes. This study presents a model-based control approach for an engine cooling system employing a PWM-controlled electric water pump. A lumped-parameter thermal model is developed based on energy balance principles and integrated with a linear state-feedback controller to regulate coolant flow according to the engine thermal state. A multi-objective optimization problem is formulated to achieve a trade-off between temperature regulation performance and energy consumption, and is solved using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. Simulation results indicate that the proposed approach significantly outperforms the conventional mechanical water pump, reducing settling time by approximately 25-30%, decreasing temperature deviation by more than 40%, and lowering energy consumption by 22-28%. Pareto analysis identifies an energy-efficient operating region corresponding to a pump power range of 135-170 W and a temperature deviation of 1.6-2.6 °C. The results demonstrate that integrating model-based control with multi-objective optimization effectively improves overall system performance while enhancing energy efficiency.

**Keywords:** Engine thermal management; PWM control; Electric water pump; Multi-objective optimization.



## 1. MỞ ĐẦU

Trong các động cơ đốt trong, hệ thống quản lý nhiệt có vai trò quan trọng trong việc duy trì nhiệt độ làm việc tối ưu, nâng cao hiệu suất, độ bền và giảm phát thải. Tuy nhiên, ở các hệ thống làm mát truyền thống, bơm nước cơ khí được dẫn động trực tiếp từ động cơ nên lưu lượng chất làm mát phụ thuộc vào tốc độ quay, dẫn đến hiện tượng làm mát không tối ưu ở một số chế độ vận hành [5], [7]. Sự phát triển của các hệ thống điều khiển điện tử đã thúc đẩy việc ứng dụng bơm nước điện tử (EWP), cho phép điều chỉnh lưu lượng chất làm mát độc lập với tốc độ động cơ, qua đó nâng cao hiệu quả quản lý nhiệt và giảm tiêu thụ năng lượng [5], [13].

Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng các phương pháp điều khiển và tối ưu hóa nhằm nâng cao hiệu năng của hệ thống làm mát động cơ [8], [12], [16]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu mới tập trung vào từng khía cạnh riêng lẻ như mô hình hóa nhiệt, điều khiển lưu lượng hoặc tối ưu hóa năng lượng. Việc tích hợp đồng thời mô hình nhiệt, điều khiển và tối ưu đa mục tiêu để cân bằng giữa độ ổn định nhiệt và hiệu quả năng lượng vẫn còn hạn chế [4], [6], [9], [10], [14].

Xuất phát từ thực tế đó, nghiên cứu này xây dựng một phương pháp tích hợp cho hệ thống làm mát động cơ sử dụng bơm nước điện tử điều khiển PWM, kết hợp điều khiển phản hồi trạng thái và tối ưu đa mục tiêu bằng thuật toán PSO. Hiệu năng của hệ thống được đánh giá thông qua các chỉ tiêu về độ ổn định nhiệt, đặc tính đáp ứng và hiệu quả sử dụng năng lượng. Đồng thời, tập nghiệm Pareto được phân tích nhằm xác định vùng vận hành tối ưu, bảo đảm sự cân bằng giữa hiệu quả làm mát và hiệu quả năng lượng của hệ thống.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu tập trung xây dựng và đánh giá phương pháp điều khiển tối ưu cho hệ thống làm mát động cơ sử dụng bơm nước điện tử điều khiển PWM, kết hợp mô hình nhiệt, điều khiển phản hồi trạng thái và tối ưu đa mục tiêu bằng thuật toán PSO nhằm nâng cao độ ổn định nhiệt và giảm năng lượng tiêu thụ của hệ thống.

Đối tượng nghiên cứu là hệ thống làm mát của động cơ xăng 4 xi-lanh thẳng hàng dung tích 2,0 L, gồm áo nước làm mát, két tản nhiệt và bơm nước điện tử có công suất 100-300 W. Các điều kiện khảo sát được lựa chọn trong vùng làm việc điển hình của động cơ, với nhiệt độ làm việc tối ưu từ 85-95°C và lưu lượng chất làm mát từ 0,1-0,3 kg/s.

Phạm vi nghiên cứu tập trung đánh giá đặc tính nhiệt, chất lượng điều khiển và hiệu quả năng lượng của hệ thống thông qua mô phỏng; không xem xét phân bố nhiệt cục bộ trong các chi tiết động cơ.

### 2.2. Mô hình toán học hệ thống

Hệ thống làm mát được mô hình hóa theo phương pháp tham số tập trung với hai biến trạng thái là nhiệt độ động cơ ( $T_c$ ) và nhiệt độ chất làm mát ( $T_m$ ). Biến điều khiển của hệ thống là hệ số điều chế PWM của bơm nước điện tử. Các thông số và tham số chính sử dụng trong mô hình được trình bày trong Bảng 1. Các tham số này được lựa chọn từ các tài liệu tham khảo và hiệu chỉnh phù hợp với đặc tính của động cơ xăng dung tích 2,0 L nhằm bảo đảm tính phù hợp trong điều kiện vận hành thực tế của hệ thống làm mát.

Bảng 1. Các thông số đầu vào và tham số của mô hình nhiệt hệ thống làm mát động cơ.

| Ký hiệu    | Đại lượng                               | Giá trị           | Đơn vị      |
|------------|-----------------------------------------|-------------------|-------------|
| $C_e$      | Nhiệt dung tương đương của động cơ      | $4,5 \times 10^4$ | J/K         |
| $C_c$      | Nhiệt dung tương đương của chất làm mát | $8,0 \times 10^3$ | J/K         |
| $A$        | Diện tích trao đổi nhiệt hiệu dụng      | 0,85              | $m^2$       |
| $c_p$      | Nhiệt dung riêng của chất làm mát       | 4180              | J/(kg.K)    |
| $k_p$      | Hệ số đặc trưng của bơm điện            | 0,30              | kg/s        |
| $\Delta p$ | Chênh áp trung bình của hệ thống        | $5 \times 10^4$   | Pa          |
| $\eta$     | Hiệu suất bơm điện                      | 0,70              | -           |
| $T_{ref}$  | Nhiệt độ làm việc mục tiêu              | 90                | $^{\circ}C$ |
| $T_{in}$   | Nhiệt độ chất làm mát đầu vào           | 80                | $^{\circ}C$ |
| $Q_{gen}$  | Công suất nhiệt sinh ra từ động cơ      | 15-45             | kW          |

Dựa trên nguyên lý cân bằng năng lượng và lý thuyết truyền nhiệt đối lưu [2], động học nhiệt của hệ thống được mô tả bởi các phương trình sau:

Phương trình động lực học: Hệ phương trình năng lượng:

$$C_e \frac{dT_e}{dt} = Q_{gen} - hA(T_e - T_c) \quad (1)$$

$$C_c \frac{dT_c}{dt} = hA(T_e - T_c) - m c_p (T_c - T_{in}) \quad (2)$$

Mô hình truyền nhiệt đối lưu: Hệ số truyền nhiệt đối lưu được xác định thông qua các số vô thứ nguyên Reynolds, Prandtl và Nusselt:

$$Nu = f(Re, Pr), Nu = 0,023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3)$$

Mô hình bơm điện PWM: Quan hệ giữa hệ số PWM và lưu lượng chất làm mát được xấp xỉ tuyến tính trong vùng vận hành khảo sát:

$$m = k_p \cdot D \quad (4)$$

Trong đó:  $k_p$  là hệ số đặc trưng của bơm. Quan hệ tuyến tính được áp dụng trong dải hệ số PWM từ 30% đến 100%.

Để điều chỉnh nhiệt độ làm việc của động cơ, luật điều khiển phản hồi trạng thái được xây dựng dưới dạng:

$$D = K_1(T_e - T_{ref}) + K_2(T_c - T_{in}) \quad (5)$$

Trong đó,  $K_1$  và  $K_2$  là các hệ số điều khiển cần tối ưu,  $T_{ref}$  là nhiệt độ mục tiêu của hệ thống. Giá trị PWM được giới hạn trong khoảng  $0 \leq D \leq 1$  nhằm bảo đảm điều kiện làm việc của bơm điện tử.

### 2.3. Thiết lập bài toán tối ưu và điều kiện mô phỏng

Các hệ số điều khiển ( $K_1$ ) và ( $K_2$ ) được

xác định thông qua bài toán tối ưu đa mục tiêu nhằm cân bằng giữa độ ổn định nhiệt, mức tiêu thụ năng lượng và độ dao động nhiệt của hệ thống:

Bài toán được xây dựng:

$$\min_{K_1, K_2} J(K) = \begin{bmatrix} j_1(K) \\ j_2(K) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong đó:

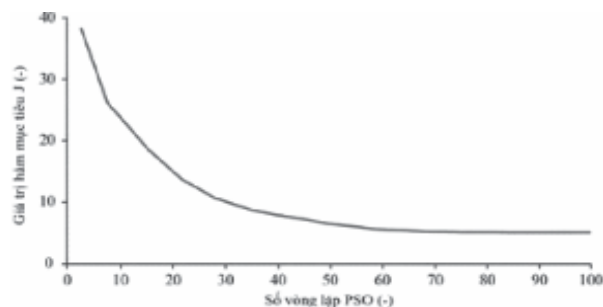
$j_1(K)$ : Hàm mục tiêu đánh giá độ ổn định nhiệt;

$j_2(K)$ : Hàm mục tiêu đánh giá năng lượng tiêu thụ;

$K_1, K_2$ : Các tham số điều khiển cần tối ưu.

Thuật toán PSO được sử dụng để xác định các tham số điều khiển tối ưu với 40 hạt, 100 vòng lặp, hệ số quán tính  $w = 0,7$  và các hệ số cá thể, hệ số bầy đàn lần lượt là  $c_1 = 1,5$  và  $c_2 = 1,5$ . Các tham số này được lựa chọn nhằm bảo đảm khả năng hội tụ ổn định trong quá trình tối ưu.

Để đánh giá sự đánh đổi giữa độ ổn định nhiệt và hiệu quả năng lượng, tập nghiệm Pareto được xây dựng thông qua nhiều lần tối ưu với các bộ trọng số khác nhau của hàm mục tiêu tổng hợp. Các nghiệm không bị trội được sử dụng để xác định vùng vận hành hiệu quả của hệ thống.



Hình 1. Quá trình hội tụ của thuật toán PSO

Hình 1 cho thấy giá trị hàm mục tiêu giảm nhanh trong giai đoạn đầu và gần như ổn định sau khoảng 60 vòng lặp.

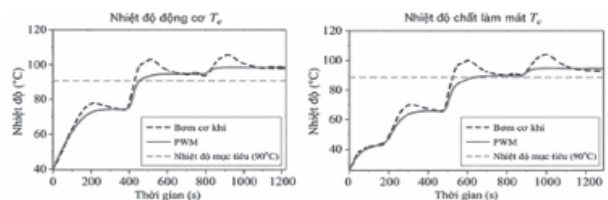
định sau khoảng 70-80 vòng lặp, chứng tỏ thuật toán đạt được nghiệm hội tụ ổn định với cấu hình đã lựa chọn.

Điều kiện mô phỏng: Mô phỏng được thực hiện trên động cơ xăng 4 xi-lanh 2,0 L với tải nhiệt thay đổi theo ba mức 15 kW (0-400 s), 30 kW (400-800 s) và 45 kW (800-1200 s). Nhiệt độ môi trường được giả thiết 25°C, nhiệt độ ban đầu của động cơ và chất làm mát lần lượt là 35°C và 40°C, nhiệt độ mục tiêu là 90°C. Mô phỏng được thực hiện trong MATLAB với bước thời gian 0,1 s. Các chỉ tiêu đánh giá gồm thời gian xác lập, sai lệch nhiệt độ ổn định, RMSE, ITAE và công suất tiêu thụ của bơm.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Đánh giá đặc tính nhiệt và tính hợp lý của mô hình

Hiệu năng của hệ thống được đánh giá thông qua mô phỏng với ba phương pháp: bơm cơ khí, điều khiển PID và bơm nước điện tử điều khiển PWM kết hợp tối ưu PSO. Kết quả trên Hình 2 cho thấy phương pháp đề xuất giúp nhiệt độ động cơ đạt giá trị mục tiêu nhanh hơn, đồng thời giảm dao động nhiệt và sai lệch nhiệt độ so với các phương pháp còn lại.



Hình 2. Đáp ứng nhiệt độ động cơ và chất làm mát

Các chỉ tiêu trong Bảng 2 cho thấy phương pháp điều khiển PWM-PSO cải thiện đáng kể hiệu năng của hệ thống, với thời gian xác lập giảm khoảng 27%, RMSE giảm hơn 40% và công suất tiêu thụ của bơm giảm khoảng 26% so với bơm cơ khí.

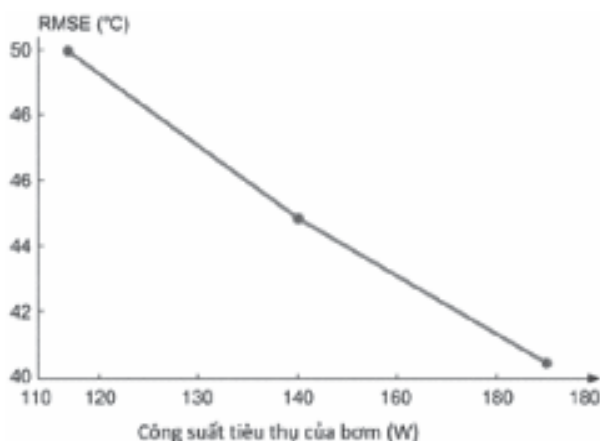
Bảng 2. So sánh các chỉ tiêu đáp ứng nhiệt giữa bơm cơ khí và điều khiển PWM

| Chỉ tiêu              | Bơm cơ khí | PID  | PWM-PSO |
|-----------------------|------------|------|---------|
| Thời gian xác lập (s) | 820        | 690  | 600     |
| Sai lệch ổn định (°C) | 3,5        | 2,5  | 2,0     |
| RMSE (°C)             | 2,85       | 2,10 | 1,65    |
| ITAE                  | 1850       | 1240 | 980     |
| Công suất bơm (W)     | 190        | 150  | 140     |

Để đánh giá tính hợp lý của mô hình, kết quả mô phỏng được đối chiếu với tài liệu tham khảo [5]. Sai số giữa mô hình đề xuất và dữ liệu tham khảo dao động trong khoảng 5-8%, cho thấy mô hình có khả năng phản ánh tương đối chính xác đặc tính nhiệt và xu hướng tiêu thụ năng lượng của hệ thống. Mặc dù nghiên cứu mới dừng ở mô phỏng, các kết quả thu được cho thấy mô hình cho độ tin cậy phù hợp để đánh giá quá trình điều khiển và tối ưu hóa hệ thống.

### 3.2. Tối ưu đa mục tiêu và hiệu quả năng lượng

Bài toán tối ưu đa mục tiêu được xây dựng nhằm cân bằng giữa sai lệch nhiệt độ (RMSE) và công suất tiêu thụ của bơm. Biên Pareto thu được từ quá trình tối ưu được trình bày trên Hình 3.



Hình 3. Biên Pareto giữa RMSE và công suất bơm

Kết quả cho thấy tồn tại mối quan hệ đánh đổi rõ rệt giữa độ ổn định nhiệt và hiệu quả năng lượng. Việc giảm RMSE đòi hỏi tăng công suất bơm để nâng cao lưu lượng chất làm mát, trong khi giảm công suất tiêu thụ sẽ làm gia tăng sai lệch nhiệt độ của hệ thống.

Phân tích biên Pareto cho thấy vùng vận hành hiệu quả năng lượng tương ứng với RMSE từ 1,6-2,6°C và công suất bơm từ 135-170 W. Điểm vận hành được lựa chọn nằm gần điểm uốn của biên Pareto, nơi có thể giảm đáng kể công suất tiêu thụ mà chỉ làm tăng nhỏ sai lệch nhiệt độ.

Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp điều khiển PWM giúp giảm công suất trung bình từ 180 W xuống 140 W và giảm năng lượng tiêu thụ từ 216 kJ xuống 160 kJ, tương ứng mức tiết kiệm khoảng 22-26% so với bơm cơ khí, đồng thời vẫn duy trì nhiệt độ làm việc trong vùng tối ưu. Điều này cho thấy việc kết hợp điều khiển PWM và tối ưu đa mục tiêu bằng PSO có tiềm năng nâng cao cả độ ổn định nhiệt và hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống làm mát động cơ.

### 3.3. Thảo luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp điều khiển PWM kết hợp tối ưu đa mục tiêu bằng PSO mang lại hiệu quả quản lý nhiệt và hiệu quả năng lượng cao hơn so với một số nghiên cứu đã công bố. Cụ thể, nghiên cứu của

Ermakov và cộng sự [5] sử dụng điều khiển thích nghi cho bơm nước điện tử đạt mức giảm sai lệch nhiệt độ khoảng 30% và giảm năng lượng tiêu thụ khoảng 20%, trong khi nghiên cứu của Zhang và cộng sự [15] ghi nhận mức cải thiện tương ứng khoảng 35% và 22%. Trong nghiên cứu này, sai lệch nhiệt độ giảm khoảng 42% và năng lượng tiêu thụ giảm khoảng 26%, cho thấy việc kết hợp điều khiển phản hồi trạng thái với tối ưu đa mục tiêu có khả năng nâng cao đồng thời độ ổn định nhiệt và hiệu quả năng lượng của hệ thống làm mát động cơ. Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn hạn chế do sử dụng mô hình nhiệt dạng tập trung và mới dừng ở mô phỏng; do đó cần thực hiện kiểm chứng thực nghiệm trong các nghiên cứu tiếp theo. Kết quả thu được cũng phù hợp với xu hướng nâng cao hiệu quả quản lý nhiệt được báo cáo trong các nghiên cứu gần đây về hệ thống làm mát động cơ và thiết bị điện công suất [1], [3], [9].

## 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng mô hình nhiệt và đề xuất phương pháp điều khiển phản hồi trạng thái cho hệ thống làm mát động cơ sử dụng bơm nước điện tử điều khiển PWM, kết hợp tối ưu đa mục tiêu bằng thuật toán PSO. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất giúp giảm khoảng 27% thời gian xác lập, 43% RMSE và 26% năng lượng tiêu thụ so với bơm cơ khí. Phân tích Pareto xác định vùng vận hành hiệu quả năng lượng trong khoảng 135-170 W, bảo đảm sự cân bằng giữa độ ổn định nhiệt và hiệu quả năng lượng. Tuy nhiên, các kết luận chủ yếu phản ánh xu hướng cải thiện hiệu năng dưới các giả thiết mô hình hóa đã đặt ra. Trong tương lai, cần thực hiện kiểm chứng thực nghiệm và hoàn thiện mô hình nhằm nâng cao độ chính xác và khả năng ứng dụng thực tế. ❖

Ngày nhận bài: 05/5/2026

Ngày phản biện: 10/5/2026

## Tài liệu tham khảo:

- [1]. R. Alamian, M. N. Hagh, and A. K. Saha, "High-performance rotor cooling with ducted liquid in completely cold-formed modular motor shaft". arXiv preprint arXiv:2510.22029, 2025.
- [2]. A. Bejan, "Convection Heat Transfer", 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [3]. M. B. Ben Hamida, M. A. Mellouli, and M. H. Ben Amar, "Thermoeconomic optimization of a hybrid power and cooling facility using waste heat recovery from a marine diesel engine". Scientific Reports, vol. 15, Art. no. 30810, 2025.
- [4]. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II". IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
- [5]. A. Ermakov, V. Makhkamov, and A. Sidorov, "Development and research of the adaptive cooling system with an electric pump". International Journal of Heat and Technology, vol. 39, no. 2, pp. 521-529, 2021.
- [6]. D. Ö. Esen and S. A. Shabaneh, "Integrated thermal management strategies for electric vehicles: A system-level review". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 151, no. 4, pp. 1-25, 2026.
- [7]. N. N. Farida, A. H. Pratama, and M. F. Hidayat, "Effect of engine rotation on mechanical water pump and microcontroller-based electric water pump for liquid-cooled engines". Journal of Thermal Mechanics, vol. 12, no. 1, pp. 45-56, 2025.
- [8]. Q. Hu, Y. Wang, X. Lin, and Z. Chen, "Integrated power and thermal management of connected HEVs via multi-horizon MPC". arXiv preprint arXiv:2003.08855, 2020.
- [9]. R. Jahedan, P. Khayyer, and M. Kiani, "Automated enumeration of reconfigurable architectures for thermal management systems in battery electric vehicles". arXiv preprint arXiv:2511.21855, 2025.
- [10]. L. Martellucci and R. Capata, "Optimization of an innovative cooling system for motorsport application". International Journal of Thermofluids, vol. 24, Art. no. 100944, 2024.
- [11]. L. Tan, Y. Zhang, and H. Wang, "Hydraulic performance prediction and optimization of an engine cooling water pump using computational fluid dynamics". PLOS ONE, vol. 16, no. 6, e0252784, 2021.
- [12]. W. Tian, X. Zhao, and J. Liu, "Optimization of a dual-channel water-cooling system using a multi-objective genetic algorithm". Journal of Marine Science and Engineering, vol. 12, no. 12, Art. no. 2158, 2024.
- [13]. Y. Zou, H. Li, and J. Chen, "Performance prediction of electronic fan and water pump based on joint simulation and machine learning". Scientific Reports, vol. 15, Art. no. 15672, 2025.
- [14]. S. A. A. Shah, M. A. Khan, and M. Asif, "Advanced thermal management strategies for internal combustion engines: A review". Applied Thermal Engineering, vol. 241, Art. no. 122345, 2024.
- [15]. J. Zhang, Y. Liu, and H. Chen, "Energy-efficient control of electric coolant pumps in automotive thermal management systems". Energy Conversion and Management, vol. 297, Art. no. 117743, 2024.
- [16]. P. Kumar and R. Singh, "Multi-objective optimization of automotive cooling systems using evolutionary algorithms". International Journal of Thermal Sciences, vol. 195, Art. no. 108732, 2025.