



Tích hợp mô phỏng hệ truyền động và khí thải cho xe PHEV với động cơ GDI đạt chuẩn Euro 6d-TEMP

Integrated simulation of powertrain and emission systems for a PHEV with GDI engine complying with Euro 6d-TEMP standard

Nguyễn Hữu Phước<sup>1,\*</sup>, Trần Việt Dũng<sup>2,3</sup>, Đoàn Văn Đồng<sup>2,4</sup>, Lư Huệ Phước<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Công Ty TNHH Công Nghệ Số SDE

<sup>2</sup> Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>3</sup> Nhóm nghiên cứu PATET, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>4</sup> Nhóm nghiên cứu BRIDGE, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Từ khóa:

TÓM TẮT

IFP-Drive  
IFP-Exhaust  
Mô hình hóa  
PHEV  
Phát thải  
Simcenter Amesim

Bài báo trình bày quá trình xây dựng và hiệu chỉnh mô hình mô phỏng tích hợp giữa hệ truyền động và khí thải dành cho xe PHEV sử dụng động cơ GDI 1,25L, đáp ứng tiêu chuẩn Euro 6d-TEMP. Mô hình được phát triển trong phần mềm Simcenter Amesim. Kết quả mô phỏng cho thấy sai số trung bình của nhiệt độ, áp suất khí thải và các chất ô nhiễm (CO, HC, NO<sub>x</sub>, PN) đều dưới 10% so với dữ liệu thực tế thu được từ băng thử động cơ. Mô hình phản ánh chính xác diễn biến chu trình lái WLTC, đặc biệt tại các pha chuyển tiếp như khởi động nguội và tăng tốc. Lượng phát thải PN <math>6 \times 10^{11}</math> hạt/km, NO<sub>x</sub> ở mức 75mg/km, HC ở mức 0,065g/km và CO ở mức 0,85g/km, đều nằm trong giới hạn của tiêu chuẩn Euro 6d-TEMP, khẳng định khả năng ứng dụng của mô hình trong nghiên cứu và phát triển các cấu hình truyền động hybrid tối ưu về năng lượng và phát thải.

Keywords:

ABSTRACT

IFP-Drive  
IFP-Exhaust  
Modeling  
PHEV  
Emissions  
Simcenter Amesim

This paper presents the development and calibration of an integrated simulation model combining the powertrain and exhaust system for a PHEV equipped with a 1.25L GDI engine, compliant with the Euro 6d-TEMP emission standard. The model was developed using the Simcenter Amesim platform. Simulation results show that the mean absolute errors for exhaust temperature, pressure, and pollutant emissions (CO, HC, NO<sub>x</sub>, PN) are all below 10% compared to experimental data obtained from an engine test bench. The model accurately captures the dynamics of the WLTC driving cycle, particularly during transient phases such as cold start and acceleration. Emission levels, including PN <math>6 \times 10^{11}</math> particles/km, NO<sub>x</sub> at 75 mg/km, HC at 0.065 g/km, and CO at 0.85 g/km, remain within the limits set by the Euro 6d-TEMP standard. These results confirm the model's suitability for research and development of energy- and emission-optimized hybrid powertrain configurations.

\* Nguyễn Hữu Phước. Công Ty TNHH Công Nghệ Số SDE

Email: [phuoc.ng@sde.vn](mailto:phuoc.ng@sde.vn)

<https://www.doi.org/10.55228/JTST140505>

Ngày nhận bài: 16/06/2025; Ngày nhận bài sửa: 06/08/2025; Ngày chấp nhận đăng: 03/09/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/9/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

## 1. Đặt vấn đề

Vận tải đường bộ là một tác nhân quan trọng gây ra khí nhà kính, góp phần đáng kể vào hiện tượng nóng lên toàn cầu. Các mục tiêu cắt giảm phát thải CO<sub>2</sub> trên phạm vi toàn cầu đã thúc đẩy quá trình điện khí hóa phương tiện giao thông nhằm giảm lượng khí thải cacbon từ ống thải [1-2]. Trước yêu cầu ngày càng nghiêm ngặt về kiểm soát phát thải khí nhà kính và các chất ô nhiễm từ phương tiện giao thông, xu hướng phát triển các dòng xe sử dụng năng lượng thay thế, đặc biệt là xe hybrid sạc ngoài (Plug-in Hybrid Electric Vehicle – PHEV), đang diễn ra mạnh mẽ. Nghiên cứu tại [3] đã tiến hành đánh giá phát thải thực tế của các xe hạng nhẹ đạt chuẩn Euro 6d-TEMP khi vận hành trong điều kiện mùa đông khắc nghiệt (nhiệt độ từ -8°C đến -1°C và độ cao lên đến 2.000 m). Kết quả cho thấy phát thải NO<sub>x</sub>, CO và số lượng hạt bụi mịn (PN) có xu hướng gia tăng rõ rệt so với vận hành trong điều kiện bình thường, đặc biệt trong giai đoạn khởi động nguội. Tuy nhiên, tất cả các xe được thử nghiệm bao gồm xe diesel, xăng và PHEV vẫn tuân thủ giới hạn phát thải NO<sub>x</sub> và PN theo quy định về phát thải trong điều kiện lái xe thực tế (RDE). Đáng chú ý, mặc dù xe PHEV thể hiện phát thải NO<sub>x</sub> rất thấp dưới mọi điều kiện, nhưng lại có thể phát sinh mức CO và PN cao đột biến trong giai đoạn khởi động nguội khi pin đầy và hệ thống sưởi không được kích hoạt. Việc bật hệ thống sưởi giúp giảm đáng kể phát thải CO và PN bằng cách khởi động sớm động cơ và làm nóng bộ xúc tác. Ngoài ra, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng phát thải CO<sub>2</sub> của xe PHEV có thể tăng 68–148% so với thử nghiệm trong phòng thí nghiệm, dù vẫn thấp hơn so với xe động cơ đốt trong (ICE) truyền thống. Những kết quả này làm rõ ảnh hưởng đáng kể của nhiệt độ môi trường và điều kiện địa hình đến hiệu suất kiểm soát phát thải của các phương tiện hiện đại, đồng thời cho thấy tiềm năng cải thiện trong quản lý hệ thống nhiệt và chiến lược vận hành pin của xe hybrid nhằm tối ưu hóa hiệu quả môi trường trong điều kiện thực tế. Nghiên cứu tại [4] đã phân tích ảnh hưởng của chiều dài hành trình trong các chu trình lái RDE đến phát thải của xe PHEV, với trọng tâm là so sánh giữa chu trình RDE hiện hành (khoảng 30 km mỗi giai đoạn) và các chu trình rút ngắn 16 km và 8 km. Kết quả cho thấy phát thải CO, NO<sub>x</sub>, PN và CO<sub>2</sub> tăng đáng kể trong các chu trình rút ngắn, đặc biệt khi

quá trình khởi động nguội chiếm ưu thế. Cụ thể, ở chu trình RDE 8 km phát thải CO và PN tăng lần lượt khoảng 37% và 16,4% so với chu trình RDE tiêu chuẩn, trong khi phát thải NO<sub>x</sub> tăng khoảng 8,7%. Phát thải CO<sub>2</sub> trong khởi động nguội cao đột biến khoảng 600 g/km, giảm dần về mức ổn định 200 g/km sau khoảng 10 km. Ngược lại, trong chu trình khởi động nóng, mức CO<sub>2</sub> thấp hơn 10% nhờ thời gian hoạt động của động cơ điện dài hơn, đặc biệt trong đô thị. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, khi quãng đường giảm tỷ lệ hoạt động bằng động cơ ICE tăng lên do hệ thống hybrid chưa kịp tối ưu hóa phân bổ năng lượng, từ đó làm suy giảm hiệu quả kiểm soát phát thải trong các chu trình ngắn. Công trình [5] đã tiến hành đánh giá phát thải và tiêu thụ năng lượng của xe PHEV trong chu trình RDE. Các thử nghiệm để phản ánh cả chế độ pin đầy và pin yếu, đồng thời kiểm tra ảnh hưởng của hệ thống điều hòa không khí và những đoạn đường dốc không thuộc chu trình RDE. Kết quả cho thấy, ở chế độ pin đầy xe có thể vận hành hoàn toàn bằng điện trong giai đoạn đô thị và ngoại ô, dẫn đến mức phát thải CO, NO<sub>x</sub> và CO<sub>2</sub> gần như bằng không. Tuy nhiên, khi chuyển sang chế độ pin yếu, đặc biệt trong các đoạn đường dốc và tốc độ cao, phát thải CO và NO<sub>x</sub> tăng đáng kể do động cơ ICE phải làm việc nhiều hơn. Ngoài ra, việc sử dụng hệ thống điều hòa không khí cũng góp phần làm tăng mức tiêu thụ nhiên liệu và phát thải, dù mức ảnh hưởng chủ yếu phụ thuộc vào chiến lược quản lý nhiệt và năng lượng của xe. Nghiên cứu này khẳng định rằng hiệu quả về phát thải của PHEV phụ thuộc không chỉ vào công nghệ mà còn vào trạng thái sạc pin, điều kiện địa hình, và vận hành xe trong thực tế.

Trong bối cảnh đó, việc xây dựng mô hình và mô phỏng chính xác phát thải từ động cơ và hệ thống xử lý khí thải trở thành một yêu cầu cấp thiết nhằm đáp ứng các tiêu chuẩn môi trường hiện hành, tiêu biểu như Euro 6d-TEMP. Simcenter Amesim nổi bật như một công cụ mô phỏng hệ thống mạnh mẽ, cho phép tích hợp và ghép nối linh hoạt các mô hình con từ hệ thống truyền động, hệ thống năng lượng đến hệ thống xử lý khí thải nhằm đánh giá toàn diện hiệu suất vận hành và mức phát thải của phương tiện dưới nhiều điều kiện hoạt động khác nhau.

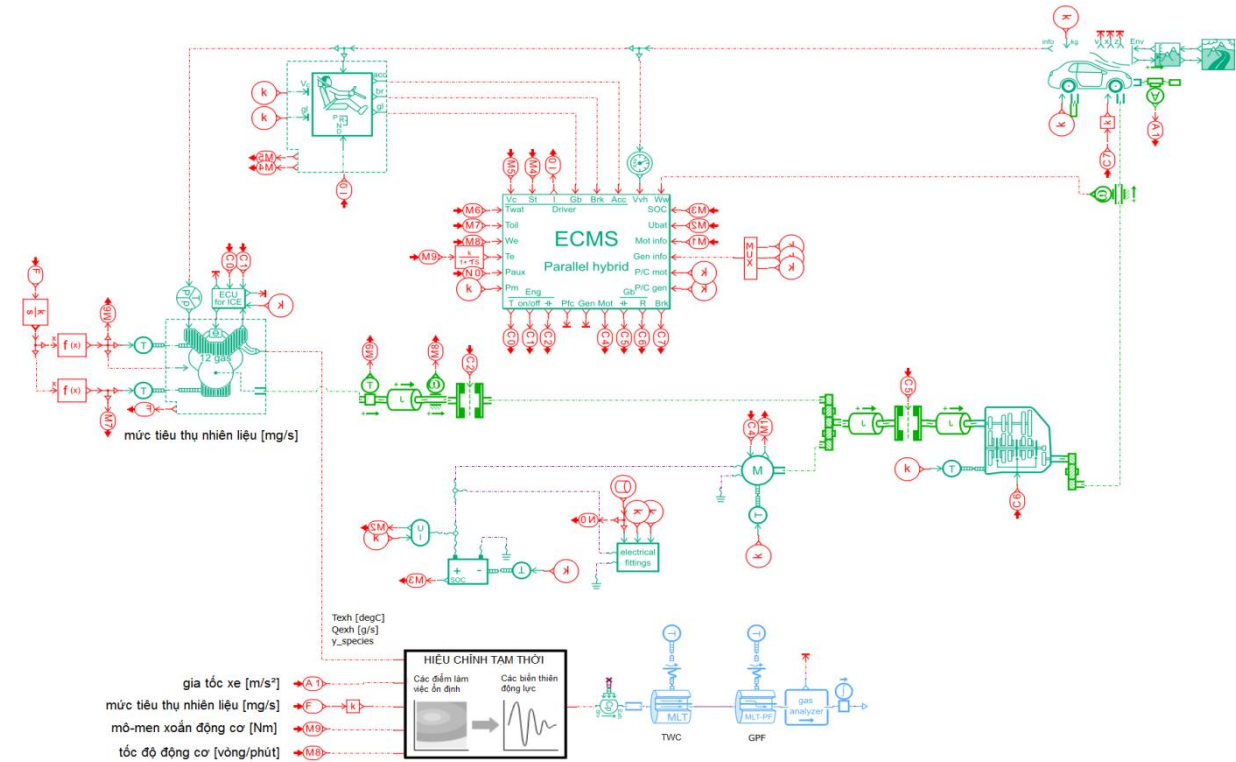
Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau. Phần 2 trình bày các cơ sở lý thuyết và phương pháp

nghiên cứu. Các kết quả được phân tích và đánh giá khi mô phỏng với nhiều trường hợp khác nhau tại phần 3. Cuối cùng là phần kết luận được tóm tắt tại phần 4.

## 2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

Mô hình xe hybrid được xây dựng gồm các khối cơ bản: động cơ phun xăng trực tiếp (GDI), mô-tơ điện,

bộ truyền động và hệ thống khí thải. Mô hình ghép nối bao gồm khối siêu thành phần (supercomponent) trung gian đồng bộ các tín hiệu giữa thư viện IFP-Drive và IFP-Exhaust. Bản đồ động cơ được khai thác từ dữ liệu thử nghiệm thực tế và được mô phỏng theo chu kỳ vận hành tiêu chuẩn, giúp đảm bảo độ chính xác và tính thực tiễn của mô hình.



**Hình 1.** Tổng quan mô hình nghiên cứu trong Simcenter Amesim.

Trong bài báo này, một xe PHEV thuộc phân khúc C-SUV được mô hình hóa với sự hỗ trợ của một khối siêu thành phần nhằm điều chỉnh các hiệu chỉnh tạm thời giữa thư viện IFP-Drive và IFP-Exhaust. Hệ thống truyền động hybrid bao gồm pin lưu trữ năng lượng có dung lượng 10 kWh, được tham số hóa thông qua công cụ định cỡ pin chuyên dụng, cùng với động cơ điện có công suất 60 kW, được cấu hình dựa trên công cụ tạo đặc tính động cơ điện. Động cơ ICE sử dụng là loại GDI dung tích 1,25L. Hệ thống đường ống thải được mô phỏng bao gồm bộ xúc tác ba chiều (TWC) và bộ lọc hạt (GPF) chuyên dùng cho động cơ xăng. Mô hình này cung cấp một nền tảng toàn diện để đánh giá hiệu suất vận hành và phát thải của xe PHEV trong các điều kiện hoạt động thực tế [6-8].

Các thông số đầu vào liên quan đến khí thải động cơ là dữ liệu đo đạc thực nghiệm dùng để mô tả đặc tính động cơ trong các điều kiện tải và tốc độ khác

nhau. Các bản đồ này được xây dựng trên các điểm vận hành ổn định và sẽ được gọi là bản đồ bán tĩnh. Tuy nhiên, do hoạt động thực tế của xe là trạng thái tạm thời với nhiều biến thiên liên tục của hệ truyền động, bản đồ bán tĩnh không phải lúc nào cũng phản ánh chính xác diễn biến phát thải trong các giai đoạn chuyển tiếp. Vì vậy, để mô phỏng chính xác phát thải trong điều kiện bán ổn định, các giá trị phát thải cần được hiệu chỉnh bằng các hệ số tạm thời. Quá trình này tập trung vào một khối siêu thành phần có nhiệm vụ thu thập và áp dụng toàn bộ các hiệu chỉnh tạm thời lên dữ liệu bán tĩnh, nhằm đảm bảo độ chính xác cho các bước xử lý tiếp theo trong chuỗi mô hình khí thải.

Mô hình con động cơ sử dụng là mô hình có 12 kênh khí thải đầu ra từ thư viện IFP-Drive (DRVICE12G01H). Khối siêu thành phần có tên TRANSIENT\_CORRECTIONS bao gồm một số khối

độc lập, mỗi khối thực hiện các hiệu chỉnh riêng biệt và đầu ra của khối này là giá trị khí thải động cơ đã được hiệu chỉnh theo điều kiện vận hành thực tế.

### 2.1. Thông số đầu vào mô hình

Khối chức năng này đảm nhiệm vai trò chuyển đổi các phân số khối lượng đầu ra từ mô hình con động cơ DRVICE12G01H [6] thành lưu lượng khối lượng tương ứng cho từng thành phần khí thải. Quá trình chuyển đổi dựa trên lưu lượng khí thải tổng được xác định từ mô phỏng, cho phép tái cấu trúc dữ liệu phù hợp nhằm phục vụ các phép tính vật lý tiếp theo trong hệ thống xử lý khí thải.

Mục tiêu của bước chuyển đổi là tạo điều kiện áp dụng các hiệu chỉnh tạm thời trên lưu lượng khối lượng thay vì phân số khối lượng, đảm bảo linh hoạt và chính xác trong mô phỏng các tín hiệu. Để duy trì ổn định số học khi lưu lượng khí rất thấp trong các trạng thái bán tải hoặc quá độ, một hàm bão hòa được tích hợp nhằm giới hạn giá trị lưu lượng tối thiểu, tránh sai số do chia cho số gần bằng không và nâng cao độ tin cậy của mô hình trong các điều kiện biên.

### 2.2. Thông số đầu ra mô hình

Trong mô hình mô phỏng hệ thống khí thải, khối chức năng này chịu trách nhiệm chuyển đổi lưu lượng khối lượng khí thải đã hiệu chỉnh thành phân số khối lượng từng thành phần khí. Bước chuyển đổi này để đảm bảo tính tương thích và độ chính xác khi truyền dữ liệu đến các mô hình trong chuỗi xử lý, đặc biệt các mô hình thư viện IFP-Exhaust. Các khối như TWC, ống xả hai lớp đều yêu cầu đầu vào dưới dạng phân số khối lượng để thực hiện chính xác các phép tính động học phản ứng, truyền nhiệt và tổn thất áp suất.

Việc tích hợp hai thư viện mô phỏng IFP-Drive và IFP-Exhaust đặt ra nhiều thách thức kỹ thuật do sự khác biệt về động học và yêu cầu tính toán. Trong khi hệ truyền động yêu cầu cập nhật nhanh các tín hiệu mô-men và tốc độ, hệ thống khí thải lại phản ánh chậm các quá trình nhiệt hóa. Bên cạnh đó, sự không đồng nhất về đơn vị và kiểu dữ liệu cũng đòi hỏi chuẩn hóa trước khi kết nối. Đặc biệt, với các xe có tính năng tắt-mở, lưu lượng khí thải có thể tiệm cận về 0 trong giai đoạn tắt động cơ, dễ dẫn đến lỗi chia cho 0 khi tính phân số khối lượng, gây mất ổn định

mô phỏng. Để khắc phục, một hàm bão hòa được tích hợp nhằm giới hạn giá trị tối thiểu của lưu lượng khí thải (ví dụ  $1e^{-5}$ ), duy trì tính ổn định số học và đảm bảo tính liên tục của kết quả trong toàn bộ chu kỳ vận hành.

### 2.3. Hiệu chỉnh HC và CO

Phát thải HC và CO được hiệu chỉnh bằng cùng một mô hình với các thông số đặc trưng riêng. Một phần hiệu chỉnh, bao gồm hệ số khởi động nguội, được tích hợp trong mô hình DRVICE12G01H. Các hiệu chỉnh tạm thời bổ sung dựa trên độ dốc công suất động cơ nhằm phản ánh ảnh hưởng trạng thái quá độ. Mô hình được mô tả qua các phương trình sau:

$$pol_{EXP} - pol_{QS} = k_{p,pol} \cdot \frac{dPw}{dt} \quad (1)$$

$$pol_{cor} = pol_{QS} + (pol_{EXP} - pol_{QS}) \quad (2)$$

Trong đó:  $pol_{EXP}$  giá trị thực nghiệm của chất ô nhiễm;  $pol_{QS}$  giá trị bán tải từ các điểm ổn định;  $pol_{cor}$  giá trị hiệu chỉnh ứng với lượng khí thải;  $k_{p,pol}$  hệ số hiệu chỉnh tạm thời cho chất ô nhiễm;  $Pw$  công suất có ích của động cơ.

### 2.4. Hiệu chỉnh PN

Hiệu chỉnh phát thải PN bao gồm hai thành phần. Thành phần thứ nhất mô phỏng ảnh hưởng của quá trình khởi động nguội, khi PN chiếm tỷ lệ đáng kể trong tổng phát thải. Mô hình liên kết các pha tăng tốc với các đỉnh phát thải PN thông qua độ dốc công suất tích lũy. Các đỉnh phát thải này được khuếch đại bằng hệ số tín hiệu và làm trơn bằng giá trị trung bình động để loại bỏ nhiễu, đảm bảo tính ổn định của tín hiệu mô phỏng. Quá trình làm nóng động cơ được mô tả thông qua tổng lượng nhiên liệu tiêu thụ, từ đó xác định mức suy giảm của hiệu chỉnh khởi động nguội theo thời gian. Thành phần thứ hai tương tự như mô hình hiệu chỉnh đối với HC và CO.

$$PN_{cor} = k_{p,PN} \cdot \frac{dPw}{dt} \quad (3)$$

Trong đó:  $PN_{cor}$  giá trị đầu ra động cơ mô phỏng;  $k_{p,PN}$  hệ số hiệu chỉnh tạm thời;  $Pw$  công suất có ích của động cơ.

Lưu ý rằng mô hình này không yêu cầu bản đồ khối lượng bụi mịn (PM) tính làm đầu vào. Tuy nhiên, hạn chế của cách tiếp cận này là không tái hiện chính xác các pha vận hành ở tốc độ không đổi. Việc chuyển đổi giữa PM và PN sử dụng hệ số quy đổi kinh nghiệm, với giá trị  $3 \times 10^{12}$  hạt/mg trong nghiên cứu này, tức 1 mg PM tương ứng với  $3 \times 10^{12}$  hạt PN.

## 2.5. Hiệu chỉnh nhiệt độ khí thải khi ra khỏi động cơ

Các bản đồ hiệu suất bán kính không đáp ứng yêu cầu mô phỏng trong nghiên cứu này, do mục tiêu là dự đoán nhiệt độ khí thải trong điều kiện vận hành quá độ. Do đó, cần xét đến các hiện tượng đặc trưng như biến thiên lưu lượng khí thải, quán tính nhiệt của hệ thống và truyền nhiệt đối lưu với môi trường. Một mô hình tín hiệu đã được phát triển nhằm tích hợp các yếu tố này, cho phép mô phỏng chính xác sự biến đổi nhiệt độ khí thải trong điều kiện vận hành thực tế.

$$T_{exhcor,i} = T_{QScor,i-1} + T_{exhcor,i-1} \cdot \frac{t_{exh}}{1+t_{exh}} \quad (4)$$

Trong đó:  $T_{exhcor,i}$  nhiệt độ khí thải đã hiệu chỉnh tại bước  $i$ ;  $T_{QScor,i}$  nhiệt độ khí thải gần tính với sự hiệu chỉnh tính đến chế độ khởi động nguội, tại bước  $i$ ;  $t_{exh}$  hàm số lưu lượng khí thải.

Hằng số thời gian nhiệt của đường ống thải được tính toán khi động cơ đang hoạt động:

$$t_{exh} = c_1 \cdot (1 + c_2 \cdot \exp(-\frac{Q_{exh}}{c_3})) \quad (5)$$

Trong đó  $c_1, c_2, c_3$  tham số mô hình. Khi động cơ dừng, dòng khí thải không còn lưu thông, mặc dù khí còn nóng trong đường ống thải. Tuy nhiên, sự biến đổi nhiệt độ của khí trong điều kiện này diễn ra chậm hơn so với khi động cơ đang chạy. Do đó, hằng số thời gian nhiệt được thiết lập cao hơn với giá trị 1000s, nhằm phản ánh chính xác đặc tính truyền nhiệt trong giai đoạn động cơ tắt.

Chế độ gia nhiệt chất xúc tác khi khởi động nguội được mô phỏng bằng công thức sau:

$$T_{QS,catheat} = T_{QS} \cdot (1 + d_1 \cdot \exp(-\frac{t}{d_2})) \quad (6)$$

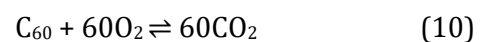
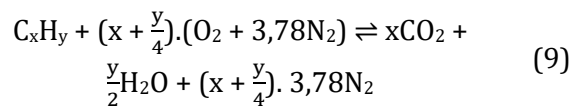
Trong đó:  $d_1, d_2$  tham số mô hình. Lưu ý rằng nó có thể bị vô hiệu hóa bằng cách chỉ cần đặt  $d_1$  thành 0. Sau đó, nhiệt độ tinh hiệu chỉnh được tính như:

$$T_{QScor} = \max(T_{QS,catheat}, \min(T_{lim,max}, T_{lim})) \quad (7)$$

Trong đó:  $T_{lim,max}$  là giới hạn nhiệt độ tối đa cho vật liệu đường ống thải;  $T_{lim}$  biểu thị nhiệt độ vật liệu, là giá trị thấp nhất cho nhiệt độ của khí thải và thay đổi theo điều kiện vận hành động cơ. Nhiệt độ sản này được mô phỏng theo động lực trễ bậc nhất với hằng số thời gian 25s. Khi động cơ ngừng, nhiệt độ khí thải tối thiểu giảm dần về nhiệt độ không khí xung quanh. Ở trạng thái không tải, nhiệt độ sản tiến gần tới giới hạn nhiệt độ dưới của đường ống, là tham số toàn cục của mô hình. Trong quá trình chuyển đổi động cơ (ví dụ tăng tốc), một giá trị tích phân của mức tiêu thụ nhiên liệu trong giai đoạn này được cộng thêm vào giới hạn nhiệt độ dưới, khiến nhiệt độ sản dao động tùy thuộc điều kiện vận hành và quá trình làm mát vật liệu đường ống thải.

## 2.6. Cân bằng khối lượng

Sau khi thực hiện hiệu chỉnh tạm thời, việc xác minh cân bằng khối lượng tổng thể của từng nguyên tố hóa học là vô cùng quan trọng. Bước này đảm bảo tổng các phân số khối lượng tại đầu ra của khối tiêu thành phần bằng một. Các nguyên tố C, H và O được cân bằng thông qua việc giải hệ phương trình tương ứng. Cụ thể, khi lượng CO phát sinh tăng do các hiệu ứng tạm thời, lượng CO<sub>2</sub> sẽ giảm tương ứng và O<sub>2</sub> sẽ được điều chỉnh sao cho tổng khối lượng nguyên tố được bảo toàn [9-13]. Các phương trình cân bằng khối lượng cho từng nguyên tố được trình bày như sau:



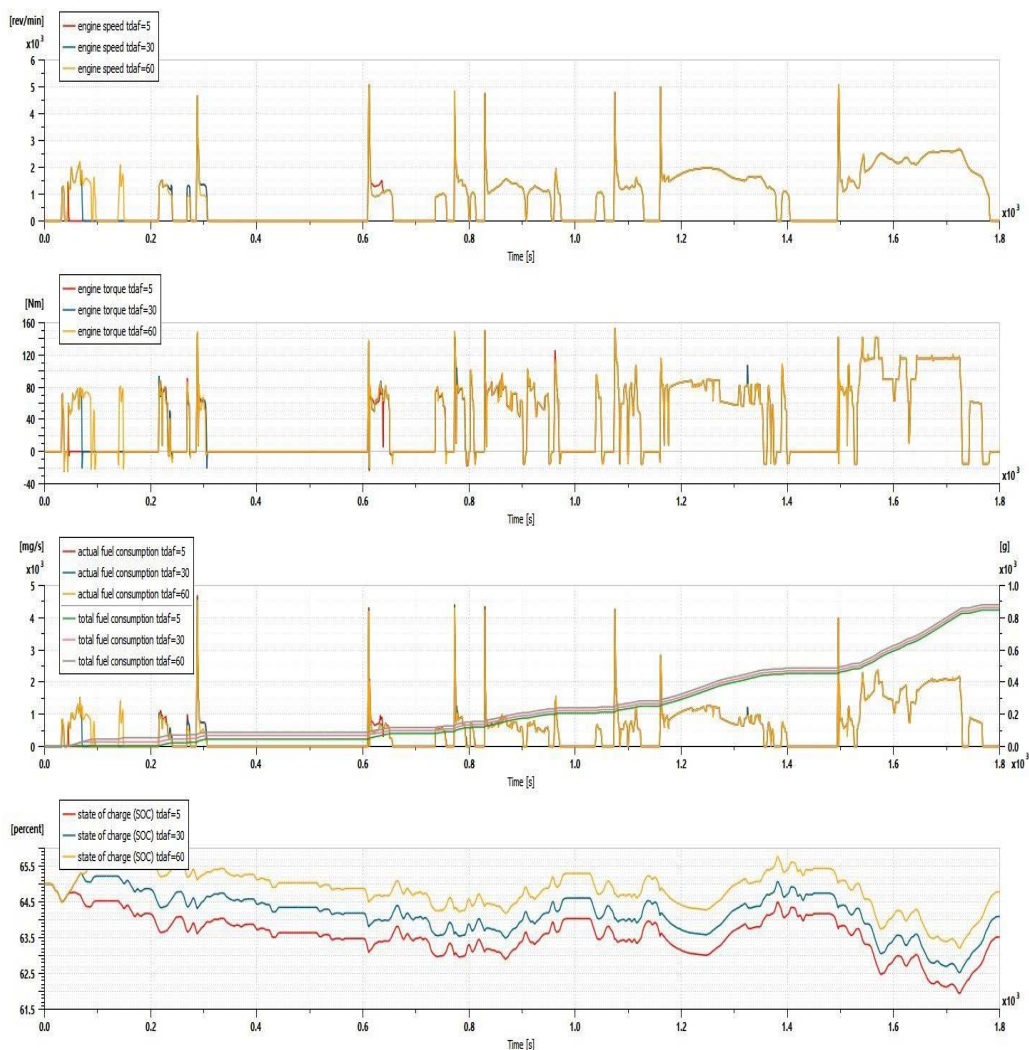
## 2.7. Đường ống thải

Hệ thống ống thải trong nghiên cứu này được cấu hình bao gồm bộ TWC và bộ GPF nhằm đảm bảo khả năng xử lý hiệu quả các chất ô nhiễm động cơ. Quá trình hiệu chuẩn được thực hiện bằng công cụ EXHCALIB, công cụ này sử dụng các thuật toán nội suy, khớp dữ liệu hoặc tối ưu hóa để tự động điều chỉnh các thông số mô hình cho phù hợp với dữ liệu thực nghiệm hoặc các mục tiêu phát thải quy định. Việc hiệu chuẩn bằng phương pháp luận chuyên biệt, được thiết kế riêng cho mô hình hóa và tinh chỉnh các đặc tính động lực học, hóa học của các thành phần TWC và GPF. Cách tiếp cận này cho phép thiết lập thông số một cách chính xác, bảo đảm mô hình hệ thống xử lý khí thải phản ánh trung thực đặc tính thực tế dưới các điều kiện vận hành khác nhau của phương tiện.

## 3. Kết quả nghiên cứu

Trong PHEV, động cơ ICE không hoạt động liên tục mà có thể tắt-mở nhiều lần, dẫn đến nhiệt độ ống thải giảm về mức nhiệt độ môi trường trong các khoảng nghỉ kéo dài. Để xúc tác hoạt động hiệu quả, ống thải phải đạt nhiệt độ kích hoạt xúc tác. Mô phỏng này đánh giá ảnh hưởng của thời điểm khởi động ICE lần đầu đến phát thải. Nhiệt độ ban đầu của ICE được giả định bằng nhiệt độ môi trường, tương ứng với khởi động nguội. Thời gian trì hoãn trước khi ICE khởi động được kiểm soát bằng tham số  $t_{daf}$  trong chiến lược điều khiển phân phối năng lượng (ECMS).

Hệ số S trong ECMS quy đổi điện năng tiêu thụ sang đơn vị tương đương nhiên liệu, hỗ trợ quyết định phân bổ công suất giữa ICE và mô-tơ điện, đồng thời duy trì trạng thái sạc (SOC) trong phạm vi  $\pm 2\%$  suốt chu trình lái tiêu chuẩn (WLTC). Ba mốc thời gian khởi động khảo sát gồm: 5s, 30s và 60s [14-18].



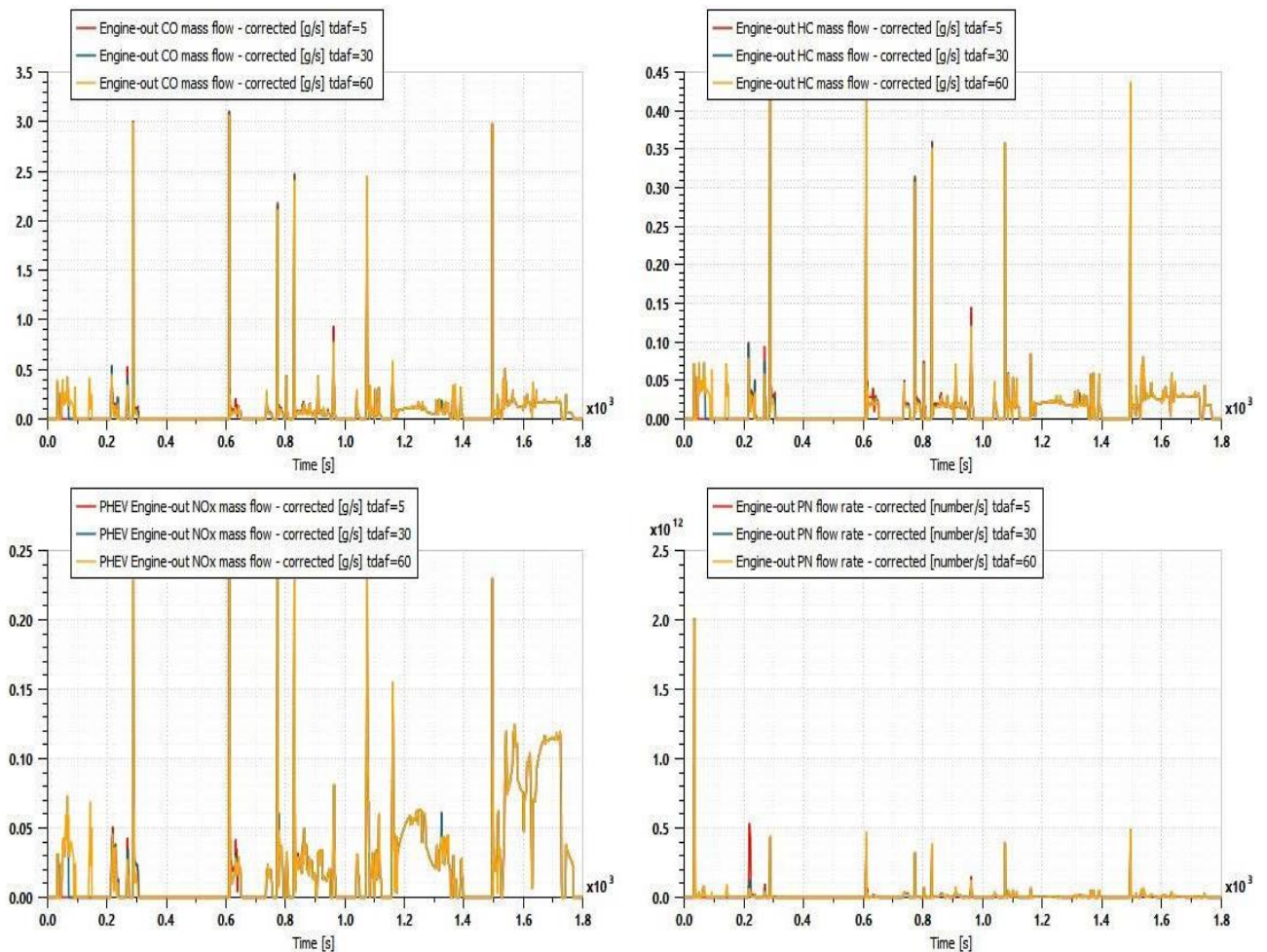
**Hình 2.** So sánh tốc độ, mô-men xoắn động cơ và SOC của pin tương ứng ba mốc thời gian trì hoãn khởi động nguội lần đầu ( $t_{daf}$ ).

Hình 2 trình bày tập hợp các biểu đồ mô tả đặc trưng vận hành của hệ truyền động hybrid dưới tác động của chu trình WLTC.

- Biểu đồ thứ nhất thể hiện biến thiên tốc độ động cơ (vòng/phút) và tải động cơ (%) theo thời gian, thể hiện các pha khởi động-ngắt nghỉ đặc trưng cho chiến lược tắt-mở động cơ và điều phối mô-men theo yêu cầu.
- Biểu đồ thứ hai thể hiện mô-men xoắn của động cơ (Nm), tiêu thụ nhiên liệu tức thời và tích lũy. Phân tích cho thấy mô-men xoắn dao động

mạnh tại các pha tăng tốc, khả năng tối ưu nhiên liệu nhờ sự hỗ trợ của mô-tơ điện, đặc biệt là trong các pha tải thấp và trung bình.

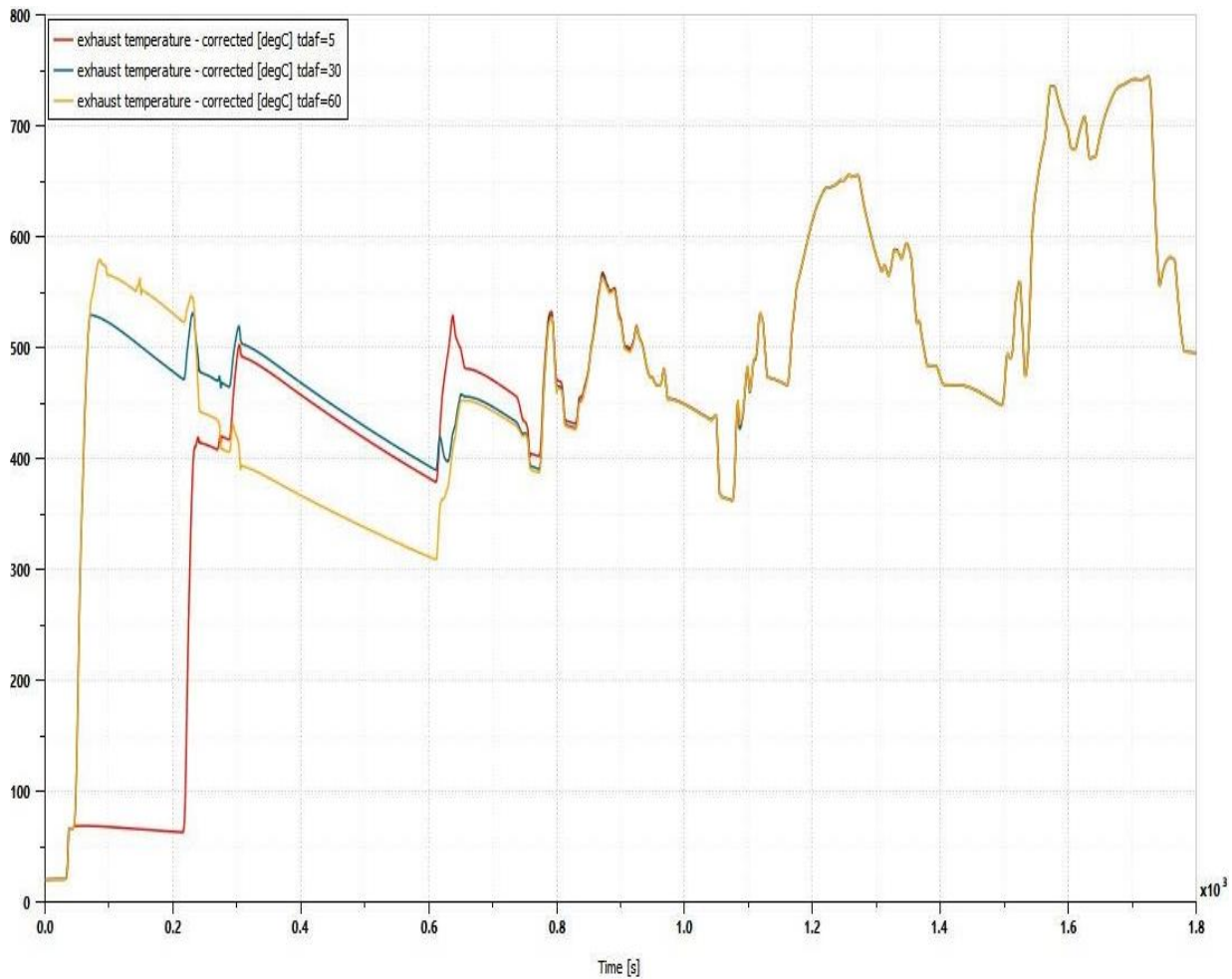
- Biểu đồ thứ ba thể hiện quá trình tích lũy tiêu hao nhiên liệu và quãng đường di chuyển, phản ánh hiệu suất vận hành theo từng giai đoạn của chu trình.
- Biểu đồ thứ tư thể hiện trạng thái sạc SOC, cho thấy sự suy giảm nhưng ổn định nhờ cơ chế tái sinh năng lượng hiệu quả trong các pha giảm tốc và phanh.



**Hình 3.** So sánh CO, HC, NO<sub>x</sub>, PN và lưu lượng khí thải sau hiệu chỉnh tương ứng ba mốc thời gian trì hoãn khởi động nguội lần đầu ( $t_{daf}$ ).

Hình 3 cho thấy khi thời gian trì hoãn đến lần khởi động động cơ đầu tiên ( $t_{daf}$ ) tăng, phát thải CO, HC, NO<sub>x</sub> và PN trong giai đoạn ngắt động cơ cũng có xu hướng tăng. Điều này phản ánh sự tích tụ các chất ô nhiễm khi xúc tác chưa đạt đến nhiệt độ kích hoạt trong thời gian nghỉ kéo dài. Ngoài ra, ảnh hưởng của nhiệt độ động cơ cao hơn tại lần khởi

động thứ hai được thể hiện rõ qua đỉnh phát thải xuất hiện ở pha này, đặc biệt trong trường hợp  $t_{daf}$  ngắn (5s, đường cong màu đỏ). Đây là kết quả của quá trình tăng tốc độ làm nóng xúc tác sau khởi động nguội ban đầu, dẫn đến phản ứng oxy hóa và khử xảy ra mạnh hơn tại thời điểm tái khởi động [19–21].



**Hình 4.** So sánh nhiệt độ động cơ sau hiệu chỉnh tùy thuộc thời gian khởi động nguội lần đầu ( $t_{daf}$ ).

Hình 4 thể hiện sự thay đổi nhiệt độ khí thải tại ba vị trí sau động cơ (node 5), sau bộ TWC (node 10), và sau bộ GPF (node 40). Ở giai đoạn khởi động (0–0,3s), nhiệt độ tại node 5 tăng nhanh do quá trình đánh lửa ban đầu trong khi các vị trí TWC và GPF tăng chậm hơn do trễ nhiệt và truyền nhiệt trong hệ thống thải. Giai đoạn trung gian (0,3–1,2s) ghi nhận nhiệt độ dao động từ 400–600°C, đủ duy trì hiệu quả hoạt động của TWC. Ở các pha tăng tốc (sau 1,2s), nhiệt độ tại node 5 đạt gần 800°C, các node sau cũng tăng nhưng thấp hơn do tổn thất nhiệt.

Kết quả cho thấy mô hình phản ánh hợp lý quá trình truyền nhiệt và đáp ứng nhiệt động của hệ thống thải, đồng thời xác nhận hiệu quả xử lý khí thải của TWC và GPF trong điều kiện vận hành thực tế.

Cuối cùng, hình 5 cho thấy lượng khí thải mô phỏng từ ống thải trong ba thời gian khởi động khác nhau. Như dự đoán, lượng CO, HC, NO<sub>x</sub> và PN cao hơn ở đầu chu kỳ do nhiệt độ TWC và GPF còn thấp. Sau giai đoạn khởi động nguội, các pha vận hành gần như

giống nhau nên sự chênh lệch về khí thải tích lũy không thay đổi nhiều.

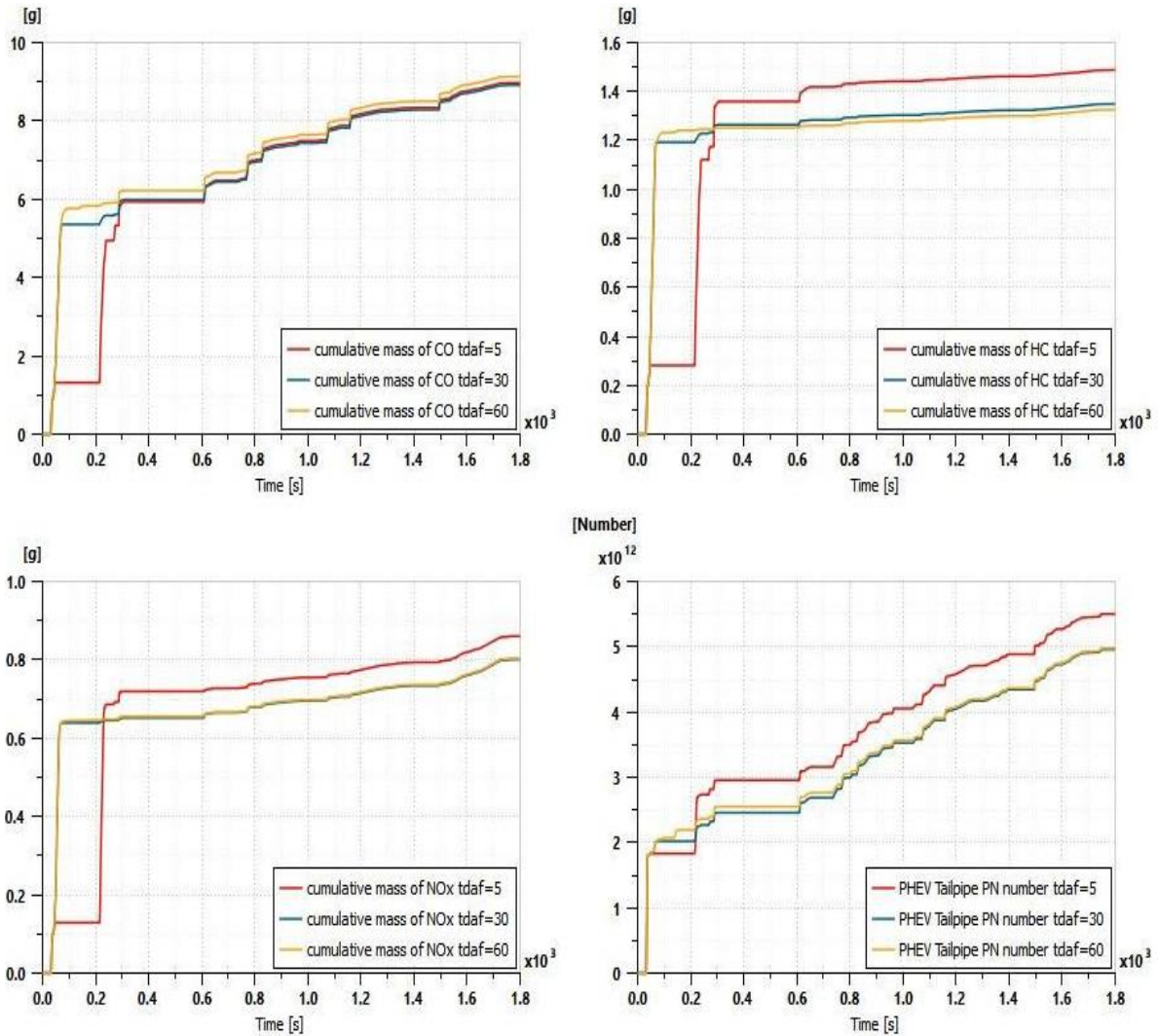
So sánh với hình 3, có thể thấy quá trình khởi động động cơ ảnh hưởng rõ rệt đến phát thải từ ống thải. Dù khí thải tại thời điểm động cơ ngừng hoạt động cao hơn khi thời gian trì hoãn khởi động lớn, nhưng lượng khí thải tổng từ ống lại thấp hơn nhờ quá trình làm nguội xúc tác nhanh hơn, giúp giảm phát thải sau đó.

Để kiểm chứng độ chính xác của mô hình, kết quả mô phỏng được so sánh với dữ liệu thực tế thu từ băng thử động cơ của xe PHEV sử dụng động cơ GDI 1,25L [6]. Các thông số đối chiếu gồm: nhiệt độ và áp suất khí thải tại các vị trí đặc trưng, cùng với lượng phát thải CO, HC, NO<sub>x</sub> và PN. Sai số được đánh giá bằng phương pháp sai số trung bình tuyệt đối (MAE) và sai số phần trăm trung bình tuyệt đối (MAPE), với kết quả như sau:

- Nhiệt độ khí thải: sai số MAPE < 7%;
- Áp suất khí thải: sai số MAPE < 10%;

- Giá trị phát thải (CO, HC, NO<sub>x</sub>): sai số MAPE từ 5–12%.

Tất cả sai số đều nằm trong giới hạn cho phép đối với mô hình hóa hệ thống động lực và khí thải, cho thấy mô hình đạt độ chính xác cần thiết để ứng dụng trong nghiên cứu phát triển xe hybrid thế hệ mới.



**Hình 5.** So sánh lượng khí thải tích lũy từ ống thải HC, CO, NO<sub>x</sub> và PN tùy thuộc vào thời gian khởi động nguội lần đầu (tdaf).

#### 4. Kết luận

Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình xây dựng có khả năng phản ánh chính xác các biến thiên tức thời của nhiệt độ, lưu lượng và áp suất khí thải tại các vị trí then chốt trong hệ thống thải, cả trước và sau cụm xử lý. Đặc biệt, áp suất khí thải tăng nhanh trong các pha tăng tốc và giảm khi động cơ hoạt động ở tải thấp hoặc ngắt phù hợp với thực tế. Sai số trung bình của các chất ô nhiễm chính (CO, HC, NO<sub>x</sub>, PN) sau hiệu chỉnh đều dưới 10% cho thấy độ tin cậy cao. Việc mô phỏng nhiệt độ và áp suất theo thời gian giúp đánh giá hiệu quả TWC và GPF, nhất là trong các pha chuyển tiếp như khởi động nguội. Tích hợp hệ truyền

động hybrid góp phần giảm tải cho động cơ ICE trong các pha tăng tốc, từ đó giảm phát thải đáng kể. Mô hình kết hợp IFP-Drive và IFP-Exhaust trong phần mềm Simcenter Amesim thể hiện hiệu quả trong việc phân tích đồng thời năng lượng, áp suất và phát thải.

Tổng thể, mô hình đưa ra có tính ổn định cao, khả năng hiệu chỉnh linh hoạt và đáp ứng tốt các yêu cầu nghiên cứu phát triển hệ truyền động tiên tiến. Dưới điều kiện mô phỏng chu trình WLTC, lượng phát thải CO (~0,85g/km), HC (~0,065g/km), NO<sub>x</sub> (~75mg/km) và PN (<6×10<sup>11</sup> hạt/km) đều nằm trong giới hạn tiêu chuẩn Euro 6d-TEMP. Hướng nghiên cứu tiếp theo nhóm tác giả sẽ mở rộng mô

phông với chu trình RDE có tính ngẫu nhiên và thay đổi địa hình, thời tiết. Đồng thời tiến hành mô phỏng đánh giá hiệu suất của TWC thể hệ mới với lớp xúc tác đa chức năng và GPF có khả năng tự tái sinh lọc PN siêu mịn, với mục tiêu khẳng định tiềm năng ứng dụng của mô hình trong việc đánh giá và phát triển công nghệ giảm phát thải, hướng tới tiêu chuẩn Euro 7.

### Đóng góp của các tác giả trong bài báo

**Nguyễn Hữu Phước:** Phương pháp, quản lý dữ liệu, phân tích chính thức, viết bản thảo gốc, biên soạn – đánh giá và biên tập. **Trần Việt Dũng:** Biên soạn dữ liệu, phân tích dữ liệu, điều tra, xác minh. **Đoàn Văn Đồng:** Quản lý dữ liệu, phân tích dữ liệu, mô phỏng số, viết bản thảo gốc. **Lu Huệ Phước:** Phương pháp, phân tích dữ liệu, viết bản thảo gốc, chỉnh sửa bản thảo, phản hồi ý kiến phản biện.

### Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

### Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

1<sup>st</sup> Nguyen Huu Phuoc\*. *SDE Digital Technology Company Limited*

2<sup>nd</sup> Tran Viet Dung. *PATET Research Group, University of Transport Ho Chi Minh City*

3<sup>rd</sup> Doan Van Dong. *BRIDGE Research Group, University of Transport Ho Chi Minh City*

4<sup>th</sup> Lu Hue Phuoc. *University of Transport Ho Chi Minh City*

\*Corresponding author: phuoc.ng@sde.vn

### Tài liệu tham khảo

- [1] F.D.B. Albuquerque, M.A. Maraqa, R. Chowdhury, T. Maura, and M. Alzard, "Greenhouse gas emissions associated with road transport projects: current status, benchmarking, and assessment tools," *Transportation Research Procedia*, vol. 48, pp. 2018-2030, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.261>
- [2] T. Ercan, N.C. Onat, N. Keya, O. Tatari, N. Eluru, and M. Kucukvar, "Autonomous electric vehicles can reduce carbon emissions and air pollution in cities," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 112, pp. 103472, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103472>
- [3] R. Suarez-Bertoa, V. Valverde, J. Pavlovic, M. Clairotte, T. Selleri, V. Franco, Z. Kregar, and C. Astorga, "On-road emissions of Euro 6d-TEMP passenger cars on Alpine routes during the winter period," *Environ. Sci.: Atmos.*, vol. 1, pp. 125-139, 2021, doi: [10.1039/DOEA00010H](https://doi.org/10.1039/DOEA00010H)
- [4] K. Skobieć and J. Pielecha, "Analysis of the Exhaust Emissions of Hybrid Vehicles for the Current and Future RDE Driving Cycle," *Energies*, vol. 15, no. 22, pp. 8691, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/en15228691>
- [5] M.V. Prati, M.A. Costagliola, R. Giuzio, C. Corsetti, and C. Beatrice, "Emissions and energy consumption of a plug-in hybrid passenger car in Real Driving Emission (RDE) test," *Transportation Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 100069, 2021, doi: [10.1016/j.treng.2021.100069](https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100069)
- [6] Siemens Digital Industries Software, "Simcenter Amesim Documentation," *Siemens PLM*, 2022.
- [7] IFP Energies nouvelles (IFPEN), "Public Research on Hybrid Powertrain Simulation," *IFPEN Technical Report*, 2021. [Online]. Available: <https://www.ifpenergiesnouvelles.com>. (Accessed: 10-Jun-2025).
- [8] C. Chen, X. Wang, Z. Xie, Z. Lei, and C. Shangguan, "Research on Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Energy Management Strategy with Dynamic Planning Considering Engine Start/Stop," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 8, pp. 350, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/wevj15080350>
- [9] R.D. Rosa, L. Romagnuolo, E. Frosina, L. Belli, and A. Senatore, "Validation of a Lumped Parameter Model of the Battery Thermal Management System of a Hybrid Train by Means of Ultrasonic Clamp-On Flow Sensor Measurements and Hydronic Optimization," *Sensors*, vol. 23, no. 1, pp. 390, 2022, doi: [10.3390/s23010390](https://doi.org/10.3390/s23010390)
- [10] C. Santarelli, C. Helbig, A. Li, B. Honel, T. Nyhues, and F. Bohm, "A Multi-Disciplinary Approach for the Electrical and Thermal Characterization of Battery Packs—Case Study for an Electric Race Car," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 102, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/wevj14040102>
- [11] A.M. Shamekhi, and A.H. Shamekhi "Spark Ignition Engine Modeling and Control System Design: A Guide to Model-in-the-Loop Hierarchical Control Methodology," *CRC Press*, 1st Edition, 2023, doi: <https://doi.org/10.1201/9781003323044>
- [12] C. Mi and M.A. Masrur, "Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives", *Wiley & Sons Ltd*, second Edition, 2017.
- [13] I. Husain, "Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals," 3rd ed., Boca Raton, FL, USA: *CRC Press*, 2021.
- [14] J. Lock, K. Clasén, J. Sjöblom, and T. McKelvey, "Cold-Start Modeling and On-Line Optimal Control

- of the Three-Way Catalyst," *Emiss. Control Sci. Technol.*, vol. 7, pp. 321-347, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s40825-021-00199-x>
- [15] A. Clenci, B. Cioc, J. Berquez, V.I. Siman, R. Stoica, and R. Niculescu, "Results on the Use of an Original Burner for Reducing the Three-Way Catalyst Light-Off Time," *Inventions*, vol. 9, no. 6, pp. 112, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/inventions9060112>
- [16] R. Eickenhorst and T. Koch, "An experimental study on aging effects of fuel-cut events including sound optimized torque reduction on modern three-way catalysts," *Automot. Engine Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 1-23, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s41104-024-00144-4>
- [17] International Energy Agency (IEA), "Global EV Outlook 2023: Catching Up with Climate Ambitions," Paris, France, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. (Accessed: 10-Jun-2025).
- [18] Tesla Inc., "Battery Day Presentation," Sep. 2020. [Online]. Available: <https://www.tesla.com/2020shareholdermeeting>. (Accessed: 10-Jun-2025).
- [19] G. Brinklow, J.M. Herreros, S.Z. Rezaei, A. Tsolakis, P. Millington, and A. Kolpin, "Primary and Secondary Emissions Reduction Using Cylinder Deactivation Strategies for Gasoline Direct Injection Engines in Hybrid Vehicles," *Automot. Innovation*, vol. 8, pp. 508-518, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s42154-024-00328-6>
- [20] M. Feinauer, S. Ehrenberger, F. Epple, T. Schripp, and T. Grein, "Investigating Particulate and Nitrogen Oxides Emissions of a Plug-In Hybrid Electric Vehicle for a Real-World Driving Scenario," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 1404, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app12031404>
- [21] H.C. Frey, X. Zheng, and J. Hu, "Variability in Measured Real-World Operational Energy Use and Emission Rates of a Plug-In Hybrid Electric Vehicle," *Energies*, vol. 13, no. 5, pp. 1140, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13051140>.