

XÂY DỰNG HỆ SỐ PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH ĐẶC TRƯNG CHO XE BUÝT ĐÔ THỊ: CƠ SỞ KIỂM KÊ VÀ GIẢM PHÁT THẢI DEVELOPING SPECIFIC GREENHOUSE GAS EMISSION FACTORS FOR URBAN BUSES: BASIS FOR INVENTORY AND EMISSION REDUCTION

NGUYỄN THỊ YẾN LIÊN

Khoa Môi trường và An toàn Giao thông, Trường Đại học Giao thông vận tải (UTC)

Email liên hệ: nylien@utc.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.933>

Tóm tắt

Phát thải khí nhà kính (KNK) từ giao thông vận tải chiếm tỷ trọng lớn trong tổng phát thải từ lĩnh vực năng lượng tại Việt Nam và dự báo tiếp tục tăng. Hệ số phát thải KNK đặc trưng quốc gia (CSEF) cần được xây dựng để nâng cao độ chính xác kết quả kiểm kê KNK và hỗ trợ chính sách giảm phát thải. Nghiên cứu này thiết lập CSEF cho xe buýt đô thị, gồm CSEF trực tiếp cho xe buýt diesel và gián tiếp cho xe buýt điện, thông qua mô phỏng trên phần mềm MOVES có hiệu chỉnh theo đặc trưng lái thực tại Hà Nội. Theo đó, đặc trưng lái thực của buýt đô thị tại Hà Nội có tốc độ trung bình 16,7 km/h và tập trung chủ yếu ở vùng tải thấp. Kết quả cho thấy xe buýt diesel phát thải khoảng 1.552,9gCO_{2eq}/km, trong khi xe buýt điện phát thải gián tiếp 1.368,2gCO_{2eq}/km khi hệ số phát thải lưới điện là 676,6g/kWh. Sai số giữa mô phỏng và số liệu đo nhỏ hơn 10%, khẳng định độ tin cậy của phương pháp. Kết quả nghiên cứu cho thấy giao thông điện sẽ đóng góp giảm phát thải KNK đáng kể khi Quy hoạch điện VIII được thực thi. Nghiên cứu đóng góp cơ sở khoa học cho kiểm kê KNK Mức 3 theo hướng dẫn IPCC và hỗ trợ hoạch định chính sách giao thông bền vững.

Từ khóa: Hệ số phát thải, xe buýt đô thị, khí nhà kính, MOVES, xe buýt điện, Việt Nam.

Abstract

Greenhouse gas (GHG) emissions from the transport sector account for a significant share of total energy-related emissions in Vietnam and are projected to continue rising. Developing country-specific emission factors (CSEF) is essential to improve inventory accuracy and support mitigation policies. This study establishes CSEF for urban buses, including direct emissions for diesel buses and indirect emissions for electric buses, through simulations using the MOVES

model calibrated with real-world driving characteristics in Hanoi. The Hanoi urban bus driving pattern features an average speed of 16.7 km/h and is concentrated in low-load conditions. Results show that diesel buses emit approximately 1,552.9gCO_{2eq}/km, while electric buses cause 1,368.2gCO_{2eq}/km of indirect emissions based on a national grid emission factor of 676.6 g/kWh. The difference between simulated and measured data is less than 10%, confirming the reliability of the approach. The study results indicate that electric mobility will contribute substantially to GHG emission reductions as Electricity Plan VIII is implemented. This study provides a scientific basis for Tier 3 GHG inventories under IPCC guidelines and supports policy development for sustainable urban transport.

Keywords: Emission factor, greenhouse gas, urban bus, MOVES model, electric bus, Vietnam.

1. Mở đầu

Tại Việt Nam, giao thông vận tải (GTVT) có tỷ trọng đóng góp lượng phát thải KNK đáng kể, chiếm khoảng 18% tổng lượng phát thải KNK năm 2014 từ lĩnh vực sử dụng năng lượng [1]. Kết quả kiểm kê phát thải KNK năm 2020 đã xác định được tổng lượng KNK từ lĩnh vực GTVT lên tới 45,5 triệu tấn, tăng khoảng 1,4 lần so với năm 2014. Trong đó, lĩnh vực đường bộ có tỷ trọng phát thải cao nhất (chiếm 83,2%) và đường thủy đứng ở vị trí thứ 2 (chiếm khoảng 10,1%). Theo Kịch bản phát triển thông thường, lượng phát thải KNK từ lĩnh vực GTVT tại Việt Nam được dự báo vẫn trong xu thế tăng trưởng dương với tốc độ gia tăng trung bình năm trong giai đoạn 2025 - 2050 là 4,7%/năm do nhu cầu vận tải tăng cao và năng lượng chủ yếu đến từ nhiên liệu hóa thạch [2]. Do đó, việc kiểm soát chặt chẽ phát thải từ lĩnh vực GTVT là cấp thiết để Việt Nam có thể hiện thực hóa mục tiêu đưa phát thải ròng về “0” vào năm 2050 như Chính phủ đã cam kết tại COP26.

Hệ số phát thải (Emission factor, EF) là dữ liệu hữu hiệu để ước tính lượng phát thải khi có thông tin về nguồn thải. Tuy nhiên, dữ liệu EF đặc trưng quốc gia (CSEF) hiện nay đang còn rất hạn chế tại Việt Nam, đặc biệt trong GTVT. Đến nay, chỉ một vài nghiên cứu đã xây dựng được CSEF cho một số phương tiện vận tải (PTVT) tại Việt Nam như: Tàng và cộng sự đã xây dựng CSEF cho xe máy và xe hạng nhẹ [3]; Dũng và cộng sự đã xây dựng CSEF cho xe buýt tại Hà Nội [4]; Liên và cộng sự xây dựng CSEF khí nhà kính cho xe máy [5]. Như vậy, các kết quả nghiên cứu trên PTVT đã được công bố trước đây đều chưa tập trung vào hệ số phát thải KNK của PTVT, trừ nghiên cứu [5]. Mặc dù mức phát thải KNK có thể được xác định dựa trên EF của các KNK riêng lẻ khác, nhưng các KNK này thường không được bao hàm đầy đủ trong các nghiên cứu trước. Điều này gây khó khăn cho việc kiểm kê phát thải KNK theo phương pháp tiếp cận từ dưới lên đối với các PTVT, trong đó có xe buýt - loại phương tiện đang được định hướng phát triển để giảm số lượng phương tiện xe cơ giới cá nhân. Trong xu hướng này, xe buýt điện đang tăng trưởng nhanh. Dù không phát thải trực tiếp từ khí xả, xe buýt điện vẫn gây phát thải gián tiếp do tiêu thụ điện lưới, mức phát thải này là đáng kể trong bối cảnh nhiệt điện chiếm tỷ trọng lớn tại Việt Nam. Tuy nhiên, hiện chưa có nghiên cứu trong nước xây dựng CSEF khí nhà kính gián tiếp cho xe buýt điện.

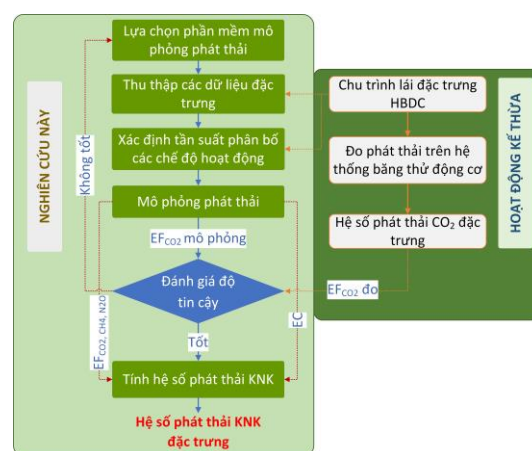
Do đó, nghiên cứu này hướng đến việc xây dựng CSEF đối với KNK cho xe buýt đô thị tại Việt Nam dựa trên các dữ liệu đặc trưng quốc gia. Trong đó, hệ số phát thải KNK trực tiếp được xây dựng cho xe buýt truyền thống và hệ số phát thải KNK gián tiếp được xây dựng cho xe buýt điện. Kết quả nghiên cứu sẽ góp phần nâng cao độ chính xác đối với kết quả kiểm kê KNK, từ đó có thể đạt được Mức 3 theo Ủy ban Liên chính phủ về biến đổi khí hậu (IPCC) [6].

Trong nghiên cứu xây dựng CSEF cho các PTVT, kỹ thuật đo quá trình phát thải của PTVT trong điều kiện có kiểm soát tại phòng thử nghiệm theo chu trình lái đại diện là kỹ thuật được đánh giá là lý tưởng [7]. Tuy nhiên, kỹ thuật này đòi hỏi chi phí lớn, đặc biệt khi triển khai đối với xe hạng nặng. Hiện tại, đối với các xe hạng nặng, các phòng thử nghiệm khí thải động cơ đốt trong tại Việt Nam chỉ đo được trên loại băng thử động cơ (Engine dynamometer), theo chu trình thử động cơ và không đo được đầy đủ các chất ô nhiễm, bao gồm các KNK. Trong khi đó, theo IPCC, việc sử dụng các phần mềm mô phỏng phát thải theo đặc trưng nguồn thải được đánh giá là cách tiếp cận tốt để có thể đạt được kết quả kiểm kê KNK ở Mức độ

3 - cấp độ cao nhất trong hoạt động kiểm kê phát thải [6]. Hiện nay, mô phỏng phát thải được sử dụng phổ biến nhờ tiết kiệm thời gian, chi phí và độ chính xác ngày càng cao nhờ tiến của khoa học công nghệ. Do đó, nghiên cứu này áp dụng phương pháp mô phỏng để xác định hệ số phát thải KNK cho xe buýt đô thị dựa trên đặc trưng quốc gia.

2. Phương pháp nghiên cứu

Nhằm đạt được mục tiêu nghiên cứu và khắc phục các hạn chế đã nêu, nghiên cứu này đã phát triển một quy trình xây dựng CSEF đối với KNK cho xe buýt đô thị như tóm tắt trong Hình 1.



Hình 1. Khung nghiên cứu

2.1. Lựa chọn phần mềm mô phỏng quá trình phát thải của PTVT

Một số phần mềm mô phỏng phát thải phổ biến trong lĩnh vực GTVT như trong Bảng 1.

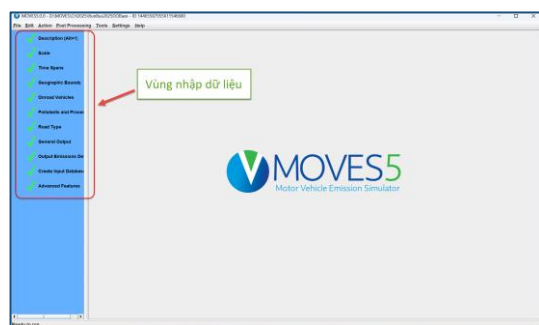
Bảng 1. Một số phần mềm mô phỏng phát thải PTVT

Khía cạnh	Phần mềm			
	COPERT	EMFAC	IVE	MOVES
KC1	Trung bình	Trung bình	Liên tục	Liên tục
KC2	Trung bình	Trung bình	Cao	Cao
KC3	Trung bình	Trung bình	Cao	Cao

Ghi chú: KC1 - Dạng mô phỏng phát thải; KC2 - Khả năng tùy chỉnh và mức độ chi tiết; KC3 - Độ chính xác

Theo Bảng 1, các mô hình mô phỏng phát thải liên tục phản ánh đặc trưng phát thải của PTVT chính xác hơn so với mô hình chỉ dựa trên vận tốc trung bình. Hạn chế của mô hình mô phỏng phát thải liên tục là yêu cầu dữ liệu đầu vào chi tiết, đặc biệt về hành vi

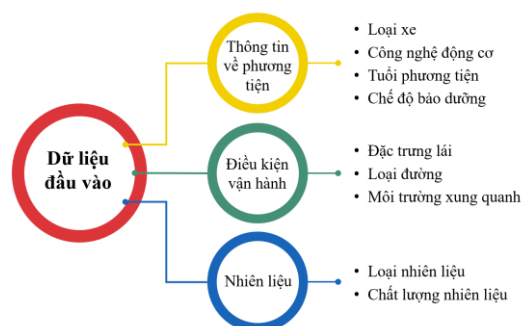
lái. Sự phát triển của thiết bị GPS đã đơn giản hóa việc thu thập dữ liệu, thúc đẩy xu hướng mô phỏng phát thải theo thời gian thực. Trong số các công cụ hiện có, MOVES và IVE được sử dụng phổ biến, cả hai phần mềm đều do Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ phát triển. IVE phù hợp cho kiểm kê phát thải tại các nước đang phát triển với độ chính xác cao (hệ số tương quan > 0,8 [8]) nhưng bị hạn chế về khả năng chi tiết hóa đặc tính nhiên liệu, khả năng mở rộng sang các loại nhiên liệu sạch và chưa được cập nhật từ năm 2008. Ngược lại, MOVES liên tục được cập nhật, nổi bật nhờ khả năng mô phỏng nhu cầu năng lượng và phát thải của PTVT, kể cả xe điện. Lin và cộng sự đã xác nhận độ tin cậy của MOVES với sai số so với kết quả đo chỉ 6,2% đối với CO₂ và 9,1% đối với NO_x [9]. Do đó, phần mềm MOVES đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Hình 2 minh họa giao diện chính của phần mềm MOVES.



Hình 2. Giao diện chính của MOVES

2.2. Thu thập các dữ liệu đặc trưng

Phần mềm có khả năng mô phỏng tốt là phần mềm yêu cầu dữ liệu đầu vào càng chi tiết càng tốt và bao quát hầu hết các yếu tố ảnh hưởng đến đầu ra. Hình 3 tóm tắt các dữ liệu đầu vào theo yêu cầu của phần mềm MOVES.



Hình 3. Các dữ liệu đầu vào phần mềm MOVES

Việc kết hợp cả ba nhóm dữ liệu trên giúp mô hình phản ánh đúng thực tế vận hành của đối tượng nghiên cứu.

Nghiên cứu này tập trung vào xe buýt đô thị (Urban Transit Bus). Để đảm bảo khả năng kiểm chứng kết quả mô phỏng dựa trên dữ liệu EF đặc trưng quốc gia sẵn có tại Việt Nam, đối tượng nghiên cứu được chọn là xe buýt hoạt động tại Hà Nội bởi đã có nghiên cứu xác định CSEF cho xe buýt tại Hà Nội theo phương pháp đo trong điều kiện có kiểm soát tại phòng thử nghiệm (theo [4]). Do đó, dữ liệu đầu vào được sử dụng trong nghiên cứu này như trong Bảng 2.

Bảng 2. Dữ liệu đầu vào

Thông số	Giá trị/thông tin	Nguồn
Đặc trưng lái	HBDC	[10]
Tuổi trung bình xe buýt truyền thống	7,5 năm	[4]
Tuổi trung bình xe buýt điện	3,5 năm	[11]
Loại nhiên liệu cho buýt truyền thống	Điezen	
Hàm lượng lưu huỳnh	0,05%	
Chỉ số xê-tan	≥ 46	[12]
Nhiệt độ T90	≤ 360°C	
Độ nhớt động học	≥ 2 mm ² /s	
Nhiệt độ trung bình năm	78,58 °F	[13]
Độ ẩm trung bình năm	75,17 %	

2.3. Xác định phân bố các chế độ hoạt động

Trong MOVES, đặc trưng lái trong điều kiện thực của PTVT được đưa vào quá trình mô phỏng thông qua các tần suất các chế độ hoạt động (gọi là các Bin). Bảng 3 đưa ra định nghĩa các nhóm Bin trong MOVES theo [14].

Trong đó, công suất riêng của xe (VSP) được phát triển lần đầu tiên bởi Jimenez-Palacios [15]:

$$VSP = v \cdot \{a(1 + \varepsilon) + g \cdot g_r + g \cdot C_R\} + 0,5 \cdot \rho_{kk} \cdot C_D \cdot \frac{A_F}{m} \cdot v^3 \quad (1)$$

Với: VSP là công suất riêng tức thời của xe (W/kg); v là tốc độ tức thời của xe (m/s); a là gia tốc tức thời của xe (m/s²); ε là hệ số ($\varepsilon \approx 0,1$); g là gia tốc trọng trường (m/s²); g_r là độ dốc của đường ($g_r = 0$ đối với đường đô thị); A_F là diện tích cản gió phía trước của xe (m²); C_R là hệ số cản lăn của bánh xe; C_D là hệ số cản của không khí; ρ_{kk} là khối lượng riêng của không khí (kg/m³).

Đối với xe buýt từ 60 đến 80 chỗ, MOVES sử dụng công thức tính VSP như sau [14]:

$$VSP = v \cdot (0,0661 + a + g \cdot g_r) + 0,000217 \cdot v^3 \quad (2)$$

Bảng 3. Định nghĩa các chế độ hoạt động trong MOVES

Mã Bin	Định nghĩa	Mã Bin	Định nghĩa
			$12 \leq VSP$;
1	Không tải	26	$25 \leq V < 50$
			$12 \leq VSP < 18$;
11	$VSP < 0$; $1 \leq V < 25$	27	$25 \leq V < 50$
			$18 \leq VSP < 24$;
12	$0 \leq VSP < 3$; $1 \leq V < 25$	28	$25 \leq V < 50$
			$24 \leq VSP < 30$;
13	$3 \leq VSP < 6$; $1 \leq V < 25$	29	$25 \leq V < 50$
			$30 \leq VSP$;
14	$6 \leq VSP < 9$; $1 \leq V < 25$	30	$25 \leq V < 50$
15	$9 \leq VSP < 12$; $1 \leq V < 25$	33	$VSP < 6$; $50 \leq V$
16	$12 \leq VSP$; $1 \leq V < 25$	35	$6 \leq VSP < 12$; $50 \leq V$
21	$VSP < 0$; $25 \leq V < 50$	36	$12 \leq VSP$; $50 \leq V$
			$12 \leq VSP < 18$;

2.4. Đánh giá độ tin cậy

Nghiên cứu này đánh giá độ tin cậy của kết quả mô phỏng phát thải cho xe buýt đô thị tại Việt Nam bằng cách so sánh kết quả mô phỏng với dữ liệu đo trong điều kiện kiểm soát trên băng thử động cơ. Trong đó, kết quả đo phát thải trên băng thử được công bố trong [4]. Hai chất ô nhiễm được sử dụng trong đánh giá độ tin cậy là CO_2 và CO do EF đối với hai chất này có thể phản ánh đầy đủ đặc trưng hàm lượng các-bon trong nhiên liệu cũng như điều kiện đốt cháy [6]. Thước đo sai số phần trăm được sử dụng để đánh giá độ tin cậy, công thức tính như sau:

$$RE = \frac{|y_p - y_o|}{y_o} \times 100\% \quad (3)$$

Trong đó: RE là sai số phần trăm (%); y_p và y_o lần lượt là giá trị mô phỏng và giá trị đo.

Các khoảng giá trị của RE và mức đánh giá kết quả mô phỏng như sau: Độ chính xác cao ($<10\%$), mô phỏng tốt ($10\%-20\%$), mô phỏng hợp lý ($20\%-50\%$), và mô phỏng không chính xác ($>50\%$) [16].

2.5. Tính hệ số phát thải khí nhà kính

Đối với xe buýt truyền thống (sử dụng diesel): Hệ số phát thải KNK trực tiếp đặc trưng cho xe buýt đô thị được xác định dựa trên các EF thu được từ kết quả mô phỏng trên phần mềm MOVES, theo công thức sau [6]:

$$EF_{CO_2eq,tt} = \sum_{i=1}^n EF_i \times GWP_i \quad (4)$$

Trong đó: $EF_{CO_2eq,tt}$ là hệ số phát thải KNK trực tiếp (g/km), EF_i là hệ số phát thải đối với KNK i (bao gồm CO_2 , N_2O và CH_4 [6]) (g/km), GWP_i là tiềm năng làm nóng lên toàn cầu của chất ô nhiễm i , lấy theo AR6 (Bảng 4).

Đối với xe buýt điện: Hệ số phát thải KNK gián tiếp đặc trưng cho xe buýt đô thị được xác định dựa trên nhu cầu điện năng tiêu thụ thu được từ mô phỏng trên phần mềm MOVES như sau:

$$EF_{CO_2eq,gt} = EC \times EF_{grid} \quad (5)$$

Trong đó: $EF_{CO_2eq,gt}$ là hệ số phát thải KNK gián tiếp (g/km), EC là mức tiêu thụ năng lượng điện (kWh/km); EF_{grid} là hệ số phát thải KNK của lưới điện quốc gia (g/kWh) (Bảng 4).

Bảng 4. Các thông số được sử dụng để tính EF KNK

Thông số	Giá trị	Nguồn
GWP_{CO_2}	1	[17]
GWP_{CH_4}	29,8	[17]
GWP_{N_2O}	273	[17]
EF_{grid} năm 2022 (g/kWh)	676,6	[18]
EF_{grid} năm 2030 (g/kWh)	400	[19]
EF_{grid} năm 2040 (g/kWh)	200	[19]

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc trưng lái thực của xe buýt đô thị

Khi loại xe và loại nhiên liệu cố định thì đặc trưng lái là thông số đầu vào còn lại có ảnh hưởng lớn nhất tới phát thải của PTVT. Bảng 5 đưa ra đặc trưng lái ngoài thực tế của xe buýt đô thị tại Việt Nam, cụ thể tại Hà Nội.

Bảng 5 cho thấy xe buýt đô thị tại Hà Nội vận hành với tốc độ trung bình thấp ($16,7km/h$), tần suất dừng cao ($1,2lần/km$) và tỷ lệ thời gian không tải lớn ($7,6\%$), cùng với tỷ lệ tăng tốc và giảm tốc chiếm ưu thế ($34,2\%$ và $32,7\%$). Những đặc trưng này phản ánh điều kiện giao thông đô thị mật độ cao và nhiều nút giao đồng mức. So với chu trình thử chuẩn ETC-Part 1, HBDC có sự khác biệt đáng kể về các thông số vận hành, với mức chênh lệch từ $6,3\%$ đến 200% , cho thấy việc sử dụng chu trình chuẩn khó phản ánh đầy đủ phát thải trong điều kiện thực tế Việt Nam.

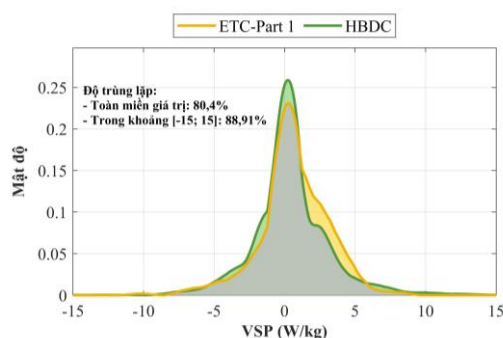
Trong các mô hình mô phỏng phát thải liên tục, VSP cùng phân bố của nó được sử dụng như thông số đầu vào phản ánh đặc trưng vận hành thực tế của

Bảng 5. Thông số đặc trưng lái ngoài thực tế của xe buýt đô thị

Thông số	HBDC	ETC ^(*)
Tỷ lệ thời gian xe tăng tốc (%)	34,2	40,83
Tỷ lệ thời gian xe giảm tốc (%)	32,7	32
Tỷ lệ thời gian xe chạy ổn định (%)	25,5	27,17
Tỷ lệ thời gian xe không tải (%)	7,6	0
Tốc độ trung bình (km/h)	16,7	23,3
Tốc độ cực đại (km/h)	44	50
Gia tốc lớn nhất (m/s ²)	3,1	1,1
Gia tốc nhỏ nhất (m/s ²)	-2,8	-1,6
Tỷ lệ dừng trên 1km (/km)	1,2	0
VSP lớn nhất (W/kg)	22,6	8,9
VSP nhỏ nhất (W/kg)	-19,5	-12,1

Ghi chú: (*) chu trình thử chuẩn châu Âu đối với xe hạng nặng, chu trình ETC-Part 1 (còn được biết đến với tên gọi chu trình thử FIGE đối với xe [20]).

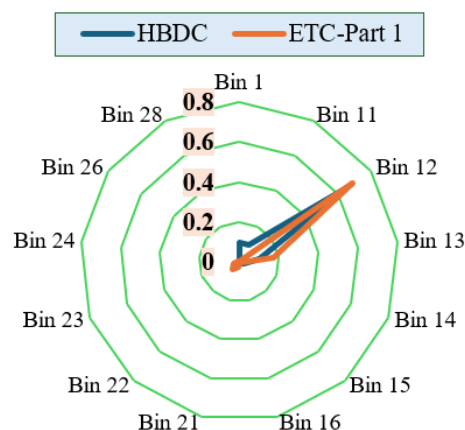
phương tiện. Do đó, nghiên cứu này phân tích đặc trưng lái ngoài thực tế của xe buýt đô thị tại Hà Nội theo VSP và sự phân bố VSP. Hình 4 mô tả phân bố VSP của chu trình HBDC, chu trình lái được tổng hợp từ bộ dữ liệu lái ngoài thực tế của xe buýt tại Hà Nội. Theo Hình 4, phân bố VSP của chu trình HBDC phản ánh đúng đặc trưng vận hành của xe buýt tại Hà Nội: tập trung mạnh quanh vùng tải thấp, phù hợp với tỉ lệ xe hoạt động ở chế độ không tải và chế độ giảm tốc lớn, tốc độ trung bình nhỏ. So với ETC-Part1, HBDC có mật độ cao hơn ở vùng VSP gần 0 và ít xuất hiện ở vùng VSP dương lớn. Do đó, EF của xe buýt khi hoạt động theo HBDC sẽ cao hơn so với khi hoạt động theo ETC-Part 1 ngay cả khi mức độ trùng lặp trong phân bố VSP của hai chu trình đạt khoảng 80,4%.



Hình 4. Phân bố VSP của HBDC so với ETC-Part1

Phân bố các chế độ hoạt động của đặc trưng lái đối với xe buýt đô thị tại Hà Nội theo các nhóm Bin theo định nghĩa trong MOVES được đưa ra trên Hình 5. Kết quả trên Hình 5 cho thấy đặc trưng lái ngoài thực

tế của xe buýt đô thị tại Hà Nội tập trung chủ yếu ở nhóm Bin 12 (tới 65,6%), theo sau là Bin 13 (chiếm 10,3%). So với ETC-Part 1, HBDC ít xuất hiện ở các BIN tải cao, trong khi ETC phân bố rộng hơn, bao quát nhiều tình huống tăng tốc mạnh. Những khác biệt này nhấn mạnh rằng việc xây dựng CSEF cần dựa trên đặc trưng lái ngoài thực tế thay vì sử dụng các chu trình thử chuẩn - loại chu trình được sử dụng trong thử công nhận kiểu.



Hình 5. Phân bố theo BIN của HBDC so với ETC-Part1

Ghi chú: Các Bin không xuất hiện trong HBDC và ETC-Part 1 không được biểu diễn trên Hình 5.

3.2. Độ tin cậy của kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng phát thải và kết quả đo phát thải của cùng một mẫu xe buýt đô thị, theo chu trình HBDC được đưa ra trong Bảng 6. Bảng 6 cho thấy sai số phần trăm giữa kết quả mô phỏng và kết quả đo đều ở mức thấp, lần lượt là 3,5% và 6,4% đối với CO và CO₂. Như vậy, tất cả giá trị của thước đo RE đều nhỏ hơn giá trị ngưỡng 10%. Điều này có nghĩa là kết quả mô phỏng có độ chính xác cao khi áp dụng cho xe buýt đô thị theo các đặc trưng của Việt Nam. Các nghiên cứu trước đây đã chứng minh độ tin cậy của phần mềm MOVES khi được hiệu chỉnh theo dữ liệu địa phương. Lin và cộng sự cũng đã xác nhận độ tin cậy của MOVES thông qua so sánh kết quả chạy mô phỏng có tích hợp dữ liệu GPS với số liệu đo thực tế, mức chênh lệch chỉ khoảng 4-5% [9]. Nói cách khác, MOVES đạt được độ chính xác cao, đặc biệt khi sử dụng dữ liệu giao thông đặc thù trong phạm vi nghiên cứu.

Kết quả nghiên cứu đã góp phần khẳng định tính khả thi của việc ứng dụng MOVES để phát triển các CSEF cho PTVT, đặc biệt với các chất ô nhiễm khó đo, đồng thời mở rộng áp dụng cho các nhiên liệu sạch.

Bảng 6. So sánh kết quả mô phỏng và kết quả đo

Chất ô nhiễm	Hệ số phát thải (g/km)		RE (%)
	Mô phỏng	Đo đạc ^(*)	
CO	2,8	2,9	3,5
CO ₂	1495,4	1596,9	6,4

Ghi chú: (*) kết quả theo [4]

3.3. Hệ số phát thải KNK đặc trưng

Kết quả mô phỏng phát thải và tiêu hao năng lượng của xe buýt đô thị theo đặc trưng lái của Hà Nội trên phần mềm MOVES đối với các KNK được đưa ra trong Bảng 7 và Bảng 8.

Bảng 7. Hệ số phát thải KNK đặc trưng đối với xe buýt đô thị sử dụng Diesel

Chất ô nhiễm	Hệ số phát thải (g/km)	
	Nghiên cứu này	Nghiên cứu khác
CO ₂	1495,4	1596,9 [4] 1471 [21]
CH ₄	0,025	0 [21]
N ₂ O	0,208	-
CO _{2eq}	1552,9	-

Bảng 8. Hệ số phát thải KNK gián tiếp đặc trưng của xe buýt điện đô thị tại Hà Nội

Nguồn dữ liệu	Tiêu thụ năng lượng		Hệ số phát thải KNK gián tiếp (gCO _{2eq} /km)
	MBTU /km	kWh/km	
Nghiên cứu này	0,0069	2,02	1368,2 (hiện tại)
			808,9 (năm 2030)
			404,3 (năm 2040)
VinBus [11]	-	1,08-1,28	-
Buýt điện tại Đức [22]	-	1,65-1,84	-
Buýt điện tại Pháp [23](*)	-	2,4-4,6	-

Kết quả trong Bảng 7 cho thấy EF KNK trực tiếp của xe buýt đô thị sử dụng nhiên liệu diesel vào khoảng 1.552,9 gCO_{2eq}/km, trong đó CO₂ chiếm tỷ trọng lớn nhất; CH₄ và N₂O đóng góp không đáng kể nhưng vẫn cần tính đến do giá trị GWP cao. So sánh với nghiên cứu trước đây [4], sai lệch chỉ khoảng 6,4% đối với CO₂, khẳng định độ tin cậy của mô hình

MOVES khi được hiệu chỉnh theo đặc trưng hoạt động ngoài thực tế. So với nghiên cứu [21], nghiên cứu sử dụng IVE để mô phỏng quá trình phát thải cho xe buýt tại Hà Nội, thì có thể thấy rằng khả năng nắm bắt đặc trưng lái của PTVT trong MOVES tốt hơn. Thứ nhất, IVE đã không nắm bắt được phát thải CH₄ trong khi theo IPCC trong lĩnh vực năng lượng, sự phát thải này là chắc chắn có, dù không đáng kể. Thứ hai, sai số phần trăm của kết quả mô phỏng phát thải CO₂ bằng IVE so với kết quả đo là 7,8%, cao hơn mức 6,4% đạt được khi mô phỏng bằng MOVES.

Đối với xe buýt điện, Bảng 8 cho thấy mức tiêu thụ điện năng trung bình theo mô phỏng là 2,02kWh/km, tương ứng với EF gián tiếp là 1.368,2gCO_{2eq}/km khi EF lưới điện của Việt Nam hiện tại là 676,6g/kWh. So sánh với dữ liệu thực tế của VinBus (1,08-1,28 kWh/km) và các nghiên cứu quốc tế (Đức: 1,65-1,84 kWh/km; Pháp: 2,4-4,6 kWh/km), có thể thấy rằng kết quả mô phỏng mức tiêu thụ năng lượng điện nằm trong khoảng hợp lý, phản ánh đặc trưng vận hành đô thị với nhiều điểm dừng và tốc độ thấp.

So sánh hệ số phát thải KNK gián tiếp của xe buýt điện với hệ số phát thải KNK trực tiếp của xe buýt truyền thống có thể thấy rằng hiệu quả giảm phát thải KNK tổng thể là không đáng kể khi cơ cấu nguồn điện Việt Nam còn phụ thuộc lớn vào nhiệt điện than. Tuy nhiên, mức giảm phát thải KNK thông qua giải pháp thay thế xe buýt truyền thống bằng xe buýt điện có thể đạt trên 47,9% vào năm 2030 và trên 74,1% vào năm 2040 khi lưới điện quốc gia giảm tỉ trọng điện than theo Quy hoạch điện VIII và hệ thống giao thông tiếp tục được cải thiện.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng hệ số phát thải KNK đặc trưng cho xe buýt đô thị tại Việt Nam dựa trên đặc trưng quốc gia, bao gồm EF trực tiếp cho xe buýt sử dụng nhiên liệu diesel và EF gián tiếp cho xe buýt điện. Kết quả cho thấy hệ số phát thải KNK của xe buýt truyền thống đạt khoảng 1.552,9gCO_{2eq}/km, trong khi xe buýt điện có EF gián tiếp khoảng 1.368,2gCO_{2eq}/km. Sai số giữa kết quả mô phỏng và số liệu đo thực tế nhỏ hơn 10%, khẳng định độ tin cậy của phương pháp sử dụng phần mềm MOVES khi được hiệu chỉnh theo đặc trưng quốc gia.

Hiệu quả giảm phát thải của xe điện hiện còn hạn chế do cơ cấu điện Việt Nam phụ thuộc nhiều vào nhiệt điện than. Tuy vậy, Quy hoạch điện VIII cho thấy tiềm năng cắt giảm phát thải rất lớn khi thúc đẩy giao thông điện. Do đó, để đạt mục tiêu phát thải ròng

“0” vào năm 2050, Việt Nam cần song song đẩy mạnh chuyển dịch sang năng lượng tái tạo. Kết quả nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho kiểm kê KNK ở Mức 3 theo IPCC và hỗ trợ hoạch định chính sách giảm phát thải trong giao thông vận tải.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. E. Oh, M. J. Dos Anjos Ribeiro Cordeiro, J. A. Rogers, K. Nguyen, D. Bongardt, L. T. Dang, and V. A. Tuan, (2019), *Addressing Climate Change in Transport: Volume 1: Pathway to Low-Carbon Transport*. WB, GIZ.
- [2] Tổ chức Hợp tác quốc tế Đức (GIZ), (2024), *Kịch bản hướng tới phát thải ròng bằng "0" trong ngành Giao thông vận tải tại Việt Nam*.
- [3] H. D. Tung, H. Y. Tong, W. T. Hung, and N. T. N. Anh, (2011), *Development of emission factors and emission inventories for motorcycles and light duty vehicles in the urban region in Vietnam*, Science of the Total Environment, Vol.409, pp.2761-2767.
- [4] T.-D. Nghiem, Y.-L. T. Nguyen, A.-T. Le, N.-D. Bui, and H.-T. Pham, (2019), *Development of the specific emission factors for buses in Hanoi, Vietnam*, Environmental Science and Pollution Research, Vol.26, pp.24176-24189.
- [5] Y. L. T. Nguyen and H. Y. T. Than, (2023), *Estimating the greenhouse gas emission factor of motorcycles under real-world driving conditions in Hanoi: a case study*, Transport and Communications Science Journal, Vol.74, pp.764-774.
- [6] IPCC, (2019), *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- [7] H. Y. Tong and W. T. Hung, (2010), *A Framework for Developing Driving Cycles with On-Road Driving Data*, Transport Reviews, Vol.30, pp.589-615.
- [8] H. Guo, Q.-y. Zhang, Y. Shi, and D.-h. Wang, (2007), *Evaluation of the International Vehicle Emission (IVE) model with on-road remote sensing measurements*, Journal of Environmental Sciences (China), Vol.19, pp.818-826.
- [9] C. Lin, X. Zhou, D. Wu, and B. Gong, (2019), *Estimation of Emissions at Signalized Intersections Using an Improved MOVES Model with GPS Data*, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol.16, pp.1-14.
- [10] Y.-L. T. Nguyen, T.-D. Nghiem, A.-T. Le, and N.-D. Bui, (2019), *Development of the typical driving cycle for buses in Hanoi, Vietnam*, Journal of the Air & Waste Management Association, Vol.69, pp.423-437.
- [11] VinBus, (2025), *Xe Buýt điện VinBus và những thông tin cần biết*, [Online]. Available: <https://vinbus.vn/xe-buyt-dien-vinbus-va-nhung-thong-tin-can-biet>. (Accessed Dec. 12, 2025).
- [12] Bộ Khoa học và Công nghệ, (2022), *QCVN 01:2022/BKHCN: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về xăng, nhiên liệu diesel và nhiên liệu sinh học*.
- [13] Cục Thống kê, (2025), *Đơn vị hành chính, đất đai và khí hậu*, [Online]. Available: <https://www.nso.gov.vn/so-lieu-thong-ke/>. (Accessed Oct. 10, 2025).
- [14] U.S.E.P.A., (2025), *MOVES and Mobile Source Emissions Research*, [Online]. Available: <https://www.epa.gov/moves>. (Accessed Oct. 12, 2025).
- [15] J. L. Jimenez-Palacios, (1999), *Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle-specific power and TILDAS remote sensing*, Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [16] L. T. Le, G. Lee, K.-S. Park, and H. Kim, (2020), *Neural network-based fuel consumption estimation for container ships in Korea*, Maritime Policy & Management, Vol.47, pp.615-632.
- [17] IPCC, (2025), *IPCC Sixth Assessment Report, Chapter 7*, [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/#7.6>. (Accessed Aug. 17, 2025).
- [18] Cục Biến đổi khí hậu, (2024), *Hệ số phát thải lưới điện Việt Nam 2022*, Công văn số 327/BĐKH-PTCBT, ngày 19/3/2024.
- [19] Center K, (2025), *Forecast of the CO₂ Emission Factor of Vietnam's Electricity Grid by 2030*, [Online]. Available: <https://khinhakinh.com.vn/du-bao-he-so-phat-thai-luoi-dien-viet-nam-nam-2030-giai-ma-tac-dong-tu-de-an-dieu-chinh-quy-hoach-dien-viii/>. (Accessed Aug. 10, 2025).
- [20] T. J. Barlow, S. Latham, I. S. McCrae, and P. G. Boulter, (2009), *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*, in TRL Published Project Report,

Department for Transport, UK.

- [21] N. T. Y. Lien and N. T. Dung, (2018), *Health co-benefits of climate change mitigation for the bus system of Hanoi*, Vietnam Journal of Science and Technology, Vol.56, pp.312-323.
- [22] Sustainable Bus, (2025), *Electric bus range, focus on electricity consumption. A sum-up*, [Online]. Available: <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-range-electricity-consumption/>. (Accessed Oct. 19, 2025).

- [23] H. Basma, C. Mansour, M. Haddad, M. Nemer, and P. Stabat, (2022), *Energy consumption and battery sizing for different types of electric bus service*, Energy, Vol.239, pp.1-15.

Ngày nhận bài:	13/12/2025
Ngày nhận bản sửa:	05/01/2026
Ngày duyệt đăng:	08/01/2026