Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (5V): 45–61

THÔNG GIÓ KHẨN CẤP DỌC HẦM ĐƯỜNG BỘ: SO SÁNH CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH VẬN TỐC TỚI HẠN VÀ ĐỀ XUẤT KHUNG TÍNH TOÁN CHO VIỆT NAM

Nguyễn Thành Trung[a,*], Cù Việt Hưng[b]

[a]*Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

[b]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 08/9/2026, Sửa xong 29/9/2026, Chấp nhận đăng 29/10/2026

Tóm tắt

TCVN 13878:2023 đã quy định các yêu cầu cơ bản về thông gió sự cố trong hầm đường bộ, tuy nhiên chưa hướng dẫn cụ thể lựa chọn đám cháy thiết kế, các tương quan xác định vận tốc tới hạn (V_c) và chiều dài dòng khói ngược (L_b), cũng như yêu cầu kiểm chứng kết quả tính toán. Nghiên cứu tổng hợp, đối chiếu năm phương pháp tính gồm: Kennedy, NFPA, Wu-Bakar, Li-Lei-Ingason và Shi và cs., từ đó đề xuất khung tính toán phù hợp cho điều kiện Việt Nam. Từ dữ liệu 13 hầm đường bộ, nghiên cứu lựa chọn ba nhóm mặt cắt đại diện để phân tích 12 kịch bản cháy với tốc độ toả nhiệt từ 30–150 MW và ba kịch bản cháy xe điện (EV) với Q_{EV} = 8 MW. Kết quả cho thấy, trong 12 kịch bản chính, V_c dao động 2,01–3,95 m/s; mức chênh lệch tương đối giữa các phương pháp từ 24,0–63,3% (trung bình 41,5%) và có xu hướng giảm khi tốc độ toả nhiệt tăng. Đối với các kịch bản *EV*, V_c dao động 1,38–2,48 m/s, mức chênh lệch trung bình 56,6%, cho thấy miền tốc độ toả nhiệt thấp đặc biệt nhạy với lựa chọn tương quan. Quan hệ L_b/H_t theo V/V_c cho kết quả chiều dài dòng khói ngược tăng nhanh khi vận tốc dọc hầm nhỏ hơn V_c. Trên cơ sở đó, nghiên cứu kiến nghị cần công bố rõ đám cháy thiết kế, miền áp dụng của từng tương quan và tăng mức kiểm chứng bằng mô phỏng động lực học chất lưu (CFD) hoặc dữ liệu hiện trường khi hình học và điều kiện biên phức tạp.

Từ khoá: thông gió khẩn cấp; hầm đường bộ; vận tốc tới hạn; chiều dài dòng khói ngược; đám cháy thiết kế.

LONGITUDINAL EMERGENCY VENTILATION IN ROAD TUNNELS: COMPARISON OF METHODS FOR DETERMINING CRITICAL VELOCITY AND PROPOSED CALCULATION FRAMEWORK FOR VIETNAM

Abstract

TCVN 13878:2023 specifies basic requirements for emergency ventilation in road tunnels; however, it does not provide detailed guidance on design fire selection, correlations for determining critical velocity (V_c) and smoke backlayering length (L_b), or requirements for verifying calculation results. This study reviews and compares five calculation methods: Kennedy, NFPA, Wu–Bakar, Li–Lei–Ingason, and Shi et al., and proposes a calculation framework suitable for application in Vietnam. Based on data from 13 road tunnels, three representative groups of tunnel cross-sections were selected to analyze 12 fire scenarios with heat release rates (HRRs) ranging from 30 to 150 MW and three electric vehicle (EV) fire scenarios with Q_{EV} = 8 MW. The results show that, across the 12 main fire scenarios, V_c ranges from 2.01 to 3.95 m/s, while the relative differences among the methods range from 24.0% to 63.3% (averaging 41.5%) and tend to decrease as HRR increases. For the EV fire scenarios, V_c ranges from 1.38 to 2.48 m/s, with an average relative difference of 56.6%, indicating that critical velocity predictions in the low-HRR range are particularly sensitive to the choice of correlation. The relationship between L_b/H_t and V/V_c shows that the backlayering length increases rapidly when the longitudinal airflow velocity falls below V_c. Based on these findings, the study recommends explicitly specifying the design fire, defining the applicability range of each correlation, and strengthening verification through computational fluid dynamics (CFD) simulations or field measurements, particularly for tunnels with complex geometries and boundary conditions.

Keywords: emergency ventilation; road tunnel; critical velocity; backlayering length; design fire.

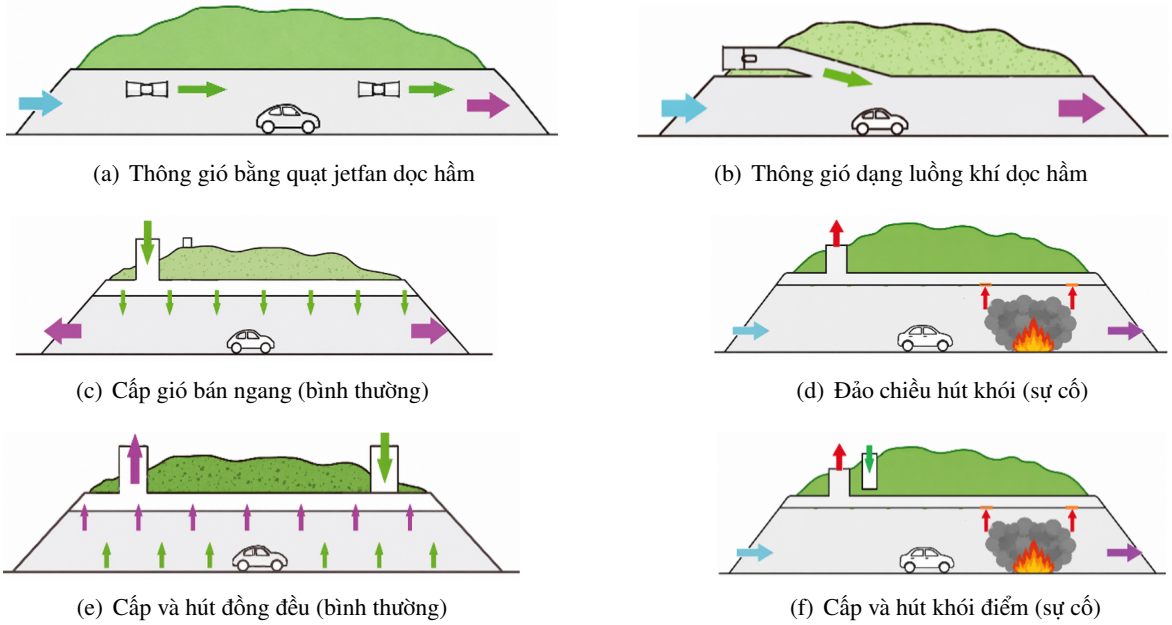
https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(5V)-04 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

[*]Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* trungnt@huce.edu.vn (Trung, N. T.)

1. Giới thiệu

Hầm đường bộ là không gian kín và kéo dài, trong đó sự lan truyền khói có ảnh hưởng trực tiếp đến điều kiện thoát nạn và khả năng tiếp cận của lực lượng chữa cháy khi xảy ra sự cố. Các vụ cháy nghiêm trọng tại Mont Blanc, Tauern và St. Gotthard cho thấy hậu quả có thể gia tăng đáng kể khi đám cháy có công suất lớn, điều kiện thoát nạn bị hạn chế, giao thông phức tạp và chiến lược thông gió không phù hợp [1, 2]. Vì vậy, hệ thống thông gió khẩn cấp không chỉ có chức năng kiểm soát dòng khí trong hầm mà còn là một thành phần của chiến lược an toàn cháy và an toàn sinh mạng, nhằm định hướng lan truyền khói, duy trì điều kiện có thể chịu đựng được trong thời gian thoát nạn và hỗ trợ lực lượng cứu hộ tiếp cận khu vực sự cố.

Nguyên lý thông gió hầm thường có các giải pháp: thông gió tự nhiên, thông gió dọc, bán ngang, ngang toàn phần và hút điểm đơn [3, 4]. Hình 1 minh họa nguyên lý tổ chức dòng khí và kiểm soát khói, còn Bảng 1 tổng hợp phạm vi áp dụng của từng giải pháp. Việc lựa chọn cấu hình phụ thuộc vào tổ chức giao thông, nguy cơ ùn tắc, hình học hầm, lối thoát nạn, khả năng phân vùng cháy và điều kiện bố trí hệ thống kỹ thuật.



(a) Thông gió bằng quạt jetfan dọc hầm

(b) Thông gió dạng luồng khí dọc hầm

(c) Cấp gió bán ngang (bình thường)

(d) Đảo chiều hút khói (sự cố)

(e) Cấp và hút đồng đều (bình thường)

(f) Cấp và hút khói điểm (sự cố)

Hình 1. Phân loại hệ thống thông gió hầm

Tại Việt Nam, TCVN 13878:2023 [5] đã dành riêng Mục 12 cho "Thông gió sự cố", trong đó quy định một số thuật ngữ, yêu cầu kỹ thuật và nguyên tắc cơ bản liên quan đến kiểm soát khói, vận tốc dòng khí, thời gian kích hoạt và khả năng duy trì hoạt động của hệ thống trong điều kiện cháy [5]. Đây là cơ sở để định hướng thiết kế nhưng chưa hướng dẫn lựa chọn kịch bản cháy và công suất cháy thiết kế; chưa phân biệt tổng tốc độ tỏa nhiệt (Total Heat Release Rate) và tốc độ tỏa nhiệt đối lưu (Convective Heat Release Rate); chưa chỉ dẫn việc lựa chọn công thức xác định vận tốc tới hạn phù hợp với từng điều kiện hầm; phương pháp đánh giá chiều dài dòng khói ngược (backlayering) khi vận tốc thông gió dọc nhỏ hơn vận tốc tới hạn; chưa xét ảnh hưởng của hình học tiết diện, chiều cao hữu hiệu, độ dốc, gió tự nhiên và các vật cản trong hầm; khi nào cần CFD (Computational Fluid Dynamics) hoặc kiểm chứng hiện trường. Do đó, thực tế thiết kế vẫn phải tham khảo nhiều tài liệu quốc tế và phụ thuộc đáng kể vào kinh nghiệm đơn vị tư vấn, dẫn đến khác biệt về giả thiết, phương

pháp và thông số thiết kế giữa các dự án. Trong lĩnh vực kiểm soát khói tại Việt Nam, Đinh và cs. [6] đã phân tích những khó khăn khi áp dụng các quy định hiện hành trong thiết kế hệ thống hút khói cho nhà cao tầng, qua đó cho thấy nhu cầu hoàn thiện các hướng dẫn kỹ thuật phục vụ thực tiễn thiết kế. Tuy nhiên, các nghiên cứu chuyên biệt về lựa chọn và kiểm chứng phương pháp tính thông gió sự cố hầm đường bộ theo TCVN 13878:2023 còn hạn chế. Do đó, cần xây dựng khung tính toán tích hợp và quy trình lựa chọn, đối chiếu, kiểm chứng các phương pháp phù hợp với điều kiện hầm đường bộ tại Việt Nam.

Bảng 1. So sánh khái quát các giải pháp thông gió khẩn cấp

Phương án	Nguyên lý	Điều kiện phù hợp	Điểm cần lưu ý
Thông gió tự nhiên	trao đổi khí qua cửa hầm, không dùng quạt cưỡng bức	hầm ngắn, rủi ro thấp, điều kiện biên thuận lợi	phụ thuộc mạnh vào gió ngoài và chênh áp
Thông gió dọc hầm	quạt Jetfan tạo dòng dọc hầm để kiểm soát hướng chuyển động khói	hầm một chiều, cấu hình đơn giản, giao thông được kiểm soát	vận tốc tới hạn (V_c) và chiều dài dòng khói ngược (L_b) là thông số chính, nhạy với độ dốc hầm lớn và vật cản
Thông gió bán ngang hầm	một kênh cấp hoặc hút dọc hầm	hầm dài hoặc cần kiểm soát khói theo vùng	tính phân phối lưu lượng và điều khiển van gió
Thông gió ngang toàn phần hầm	kênh cấp và hút gió độc lập	hệ thống lớn, yêu cầu cao về kiểm soát khói	chi phí cao, không gian kỹ thuật và vận hành phức tạp
Thông gió hút khói điểm đơn	hút tập trung gần vùng cháy	hầm dài, hai chiều hoặc có nguy cơ ùn tắc	phụ thuộc việc phát hiện vị trí cháy và mô hình hút khói

Trên thế giới, các tài liệu và hướng dẫn kỹ thuật như NFPA 502, hướng dẫn của Cục Quản lý Đường cao tốc Liên bang Hoa Kỳ (FHWA) và Hiệp hội Đường bộ Thế giới (PIARC) đều tiếp cận bài toán kiểm soát khói trong hầm theo điều kiện cụ thể của từng công trình. Theo đó, việc thiết kế hệ thống thông gió sự cố không chỉ dựa trên một thông số đơn lẻ mà cần xem xét đồng thời đám cháy thiết kế, đặc trưng hình học của hầm, độ dốc, trạng thái giao thông, sự hiện diện của hệ thống chữa cháy cố định, các tiêu chí duy trì điều kiện sống sót cho người thoát nạn và lực lượng cứu hộ, cũng như phương pháp kiểm chứng hiệu quả của hệ thống [3, 4, 7–9]. Tổng quan của Lombardi và cs. cho thấy các nghiên cứu về cháy hầm hiện vẫn tập trung mạnh vào mô hình hóa đám cháy, cơ chế lan truyền và kiểm soát khói, thử nghiệm quy mô lớn, hệ thống điều khiển tự động và sự tương tác giữa thông gió với các hệ thống an toàn khác [10]. Tương tự, báo cáo nghiên cứu của Hội đồng Nghiên cứu Giao thông Hoa Kỳ nhấn mạnh chiến lược kiểm soát khói cần được chọn theo cấu hình hầm, hình thức thông gió và trạng thái giao thông, thay vì chỉ dựa vào chiều dài hầm [11]. Các nghiên cứu gần đây cũng cho thấy vận tốc tới hạn (V_c) và L_b nhạy với độ dốc, vật cản, vị trí nguồn cháy và hầm phân nhánh; đồng thời các mô hình mới có xu hướng kết hợp cơ sở vật lý, dữ liệu thực nghiệm và CFD thay vì chỉ hiệu chỉnh theo tốc độ toả nhiệt HRR (Heat Release Rate) tuyệt đối [12–16].

Một trong những vấn đề kỹ thuật quan trọng của thông gió dọc là xác định V_c (critical velocity)

để hạn chế hoặc ngăn dòng khói lan ngược về phía thượng lưu đám cháy. Cho đến nay, chưa có một tương quan duy nhất đủ tin cậy để áp dụng cho mọi dạng hình học hầm và điều kiện cháy. Các mô hình Thomas, Kennedy [17, 18], các công thức được sử dụng hoặc phát triển trong NFPA, Wu–Bakar, Li–Lei–Ingason, Oka–Atkinson và Shi và cs. [19–21] và các tương quan dựa trên tốc độ tỏa nhiệt không thứ nguyên (Q^*) được xây dựng từ những cơ sở thực nghiệm, mô hình thu nhỏ, giả thiết và miền áp dụng khác nhau. Do đó, V_c có thể thay đổi đáng kể khi thay đổi chiều cao hữu hiệu, diện tích và hình dạng mặt cắt, đường kính thủy lực, độ dốc dọc, mức độ cản trở của phương tiện và cách sử dụng tổng tốc độ tỏa nhiệt (Q) hay thành phần tốc độ tỏa nhiệt đối lưu (Q_c). Khi vận tốc thực tế nhỏ hơn V_c, L_b trở thành một thông số quan trọng để định lượng mức độ lan truyền khói. Vì vậy, đánh giá đồng thời V_c và L_b cho phép chuyển từ yêu cầu tuyệt đối "không xuất hiện dòng khói ngược" sang đánh giá theo mức độ lan truyền khói, qua đó xem xét đầy đủ hơn điều kiện thoát nạn, khả năng tiếp cận chữa cháy và hiệu quả của chiến lược kiểm soát khói.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất một khung lựa chọn, đối chiếu và kiểm chứng các tương quan theo điều kiện và miền áp dụng, không chọn một "công thức chuẩn" duy nhất. Phạm vi tập trung vào hệ thống thông gió dọc hầm. Ba đóng góp chính gồm: (i) tổng hợp và đối chiếu các tương quan xác định V_c, L_b và cách sử dụng Q, Q_c và Q^* trong từng nhóm mô hình; (ii) xây dựng khung tính tích hợp từ lựa chọn đám cháy thiết kế, xác định V_c, đánh giá L_b, kiểm tra các tiêu chí duy trì an toàn sinh tồn đến chọn cấp độ kiểm chứng; (iii) so sánh định lượng trên ba nhóm mặt cắt điển hình của 13 hầm đường bộ tại Việt Nam với 12 kịch bản cho các mức HRR trong khoảng 30–150 MW và ba kịch bản cháy xe điện (EV) ở mức 8 MW. Cách tiếp cận này tận dụng hình học hầm thực tế của Việt Nam và tạo cơ sở đề xuất quy trình tính phù hợp với điều kiện trong nước.

2. Cơ sở và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguồn tài liệu, kịch bản cháy và quy trình nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp tổng quan tài liệu kết hợp phân tích so sánh các phương pháp tính toán. Các nguồn được lựa chọn phục vụ trực tiếp bài toán thông gió sự cố hầm, bao gồm tiêu chuẩn, hướng dẫn kỹ thuật, thử nghiệm quy mô lớn, các tương quan V_c/L_b, nghiên cứu về hình học và điều kiện biên, tiêu chí an toàn sinh tồn, vận hành hệ thống và tốc độ toả nhiệt. Ưu tiên các tài liệu xác định rõ biến đầu vào, miền hiệu chỉnh hoặc có cơ sở thực nghiệm/vật lý phù hợp để đối chiếu với điều kiện hầm đường bộ. Bảng 2 tổng hợp các nguồn NFPA 502 [7, 9], FHWA [8], PIARC [3, 4], NCHRP [11]. Các thử nghiệm quy mô lớn, điển hình như Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program cùng các nghiên cứu của Thomas, Kennedy, Oka–Atkinson, Wu–Bakar, Li–Lei–Ingason và Shi và cs. [17–20, 22, 23] được sử dụng để làm rõ cơ sở phát triển, miền áp dụng và sai khác giữa các phương pháp xác định V_c. Nghiên cứu cũng tham khảo các công trình gần đây về mô hình đối lưu hỗn hợp, vận tốc dưới tới hạn, ảnh hưởng của vật cản, độ dốc, vị trí nguồn cháy, hầm phân nhánh và đặc trưng cháy pin lithium-ion trong hầm [12–16, 24–26].

Các hướng dẫn và dữ liệu thực nghiệm cho thấy đám cháy HGV có thể từ vài chục MW đến trên 100 MW. Vì vậy, bốn mức Q = 30, 50, 100 và 150 MW được lựa chọn để bao quát từ đám cháy xe tải trung bình đến kịch bản HGV, đây là các mức phân tích, không phải giá trị thiết kế bắt buộc cho mọi hầm. Đối với xe điện chở người, tham khảo thực nghiệm gần đây cho thấy công suất thường ở mức vài MW tới xấp xỉ 10 MW, do đó 8 MW được chọn để tính toán [28, 29]. Kịch bản EV được tách khỏi nhóm HGV do liên quan đến thời gian cháy kéo dài, quá nhiệt tự phát (thermal runaway), tái bùng cháy và khói độc chứ không chỉ tốc độ giải phóng nhiệt cực đại ($Q_{\max}$). Các nghiên cứu thực nghiệm pin lithium-ion ở điều kiện mô phỏng trong hầm và đo phát thải fluoride cũng cho thấy nguy cơ EV cần được xem xét đồng thời theo nhiệt, khói và độc tính; đặc biệt HF có thể được phát thải ở mức 20–200 mg/Wh năng lượng danh định tùy loại pin và điều kiện thử [25, 26].

Bảng 2. Nguồn tài liệu, nội dung khai thác và mục đích sử dụng trong nghiên cứu

Nguồn tài liệu	Nội dung	Sử dụng trong nghiên cứu
Tiêu chuẩn/hướng dẫn	NFPA 502 [7, 9], FHWA [8], PIARC [3, 4], NCHRP [11].	Thuật ngữ, chiến lược, tiêu chí và nguyên tắc kiểm chứng
Thực nghiệm quy mô lớn	Thử nghiệm thông gió chống cháy hầm (Memorial Tunnel) [22].	Cơ sở hiệu chỉnh, đối chiếu các tương quan
Đám cháy thiết kế và mức HRR	NFPA 502, HRR thay đổi theo loại phương tiện; Memorial Tunnel khảo sát tới 100 MW; xe tải nặng (HGV) từ vài chục đến trên 100 MW [7, 22, 27].	Lựa chọn tổng tốc độ tỏa nhiệt (Q) từ 30, 50, 100, 150 MW như các mức phân tích tham số; 150 MW là kịch bản cận trên đánh giá độ nhạy, không coi là HRR thiết kế điển hình
Mô hình V_c/L_b	Thomas/Kennedy, Oka-Atkinson, Wu-Bakar, Li-Lei-Ingason, Shi và cs. [17–21, 23].	So sánh biến đầu vào, chiều dài đặc trưng, miền áp dụng và sai khác giữa các phương pháp
Kích thước hình học và điều kiện biên	Tỷ lệ mặt cắt hầm, độ dốc, gió, vật cản, tổn thất áp suất. [16, 19, 20]	Xác định nhu cầu hiệu chỉnh hoặc mô phỏng chi tiết
An toàn sinh tồn và triển khai	Điều kiện an toàn sinh tồn, hệ thống giám sát điều khiển và thu thập dữ liệu (SCADA)/Hệ thống phát hiện sự cố tự động (AID), thiết bị, chạy thử, kiểm tra và nghiệm thu.	Liên kết kết quả tính với vận hành và nghiệm thu
Phương tiện mới	Động cơ đốt trong (ICE), Xe điện (EV) và nguồn năng lượng thay thế [25, 28]	Cập nhật đám cháy thiết kế, thời gian cháy và sản phẩm cháy; Đánh giá ảnh hưởng của phương tiện tới V_c; các đặc trưng riêng của EV (thời gian cháy kéo dài, tái bùng cháy và HF)

Trong nghiên cứu này, HRR được sử dụng như thuật ngữ chung; Q ký hiệu tổng tốc độ tỏa nhiệt (*total HRR*), còn Q_c ký hiệu thành phần đối lưu (*convective HRR*). Khi xét đám cháy theo thời gian, tổng HRR được biểu diễn dưới dạng Q_t, với giá trị cực đại $Q_{\max}$. Các phương pháp Kennedy/NFPA sử dụng Q_c, đại diện cho phần nhiệt truyền trực tiếp vào dòng khí, trong khi các tham số không thứ nguyên của Oka–Atkinson, Wu–Bakar, Li–Lei–Ingason và Shi và cs. được xây dựng từ tổng tốc độ tỏa nhiệt (Q). Quan hệ giữa hai đại lượng được viết:

$$Q_c = (1 - X_r).Q \tag{1}$$

Trong đó X_r là tỷ phần nhiệt bức xạ. Trong nghiên cứu này, giá trị $X_r = 0{,}3$ được sử dụng thống

nhất, tương ứng $Q_c = 0{,}7.Q$, phù hợp với giả định về tỷ phần bức xạ 30% trong nghiên cứu của Shi và cs. [23]. Giá trị này chỉ được sử dụng như một giả định chuẩn hóa nhằm bảo đảm điều kiện so sánh nhất quán giữa các phương pháp, không được hiểu là giá trị đại diện cho mọi nhiên liệu hoặc cho cháy pin lithium-ion. Quy trình nghiên cứu gồm ba bước: Bước 1 xác định kịch bản cháy, Q/Q_c, đặc trưng hình học và các đại lượng không thứ nguyên; Bước 2 tính và đối chiếu V_c theo các tương quan khác nhau, đồng thời kiểm tra miền áp dụng của từng phương pháp; Bước 3 sử dụng V/V_c để xác định L_b trong chế độ dưới tới hạn, đề xuất khung lựa chọn, hiệu chỉnh và kiểm chứng phù hợp với điều kiện hầm đường bộ Việt Nam.

2.2. Vận tốc tới hạn, tốc độ tỏa nhiệt không thứ nguyên và các phương pháp tính

Theo NFPA 502, vận tốc tới hạn là "vận tốc ổn định tối thiểu của luồng khí trong hệ thống thông gió di chuyển về phía đám cháy bên trong đường hầm hoặc lối đi, cần thiết để ngăn chặn hiện tượng khói lan ngược tại vị trí đám cháy". Về bản chất, bài toán phản ánh sự tác động giữa lực nổi của khói nóng và động lượng của dòng khí dọc hầm. Các nghiên cứu của Thomas đặt nền tảng cân bằng Froude [17], sau đó Kennedy và cs. phát triển hệ phương trình ứng dụng cho thiết kế thông gió hầm [18]:

$$V_c = K_1.K_g.\left[\frac{g.H.Qc}{\rho.Cp.A.T_f}\right]^{1/3} \tag{2}$$

$$T_f = \frac{Q_c}{\rho.Cp.A.V_c} + T \tag{3}$$

$$K_g = \begin{cases} 1 + 0{,}03747.G^{0{,}8}, & G < 0 \\ 1, & G \geq 0 \end{cases} \tag{4}$$

trong đó K_1 là hệ số Froude thực nghiệm; K_g là hệ số hiệu chỉnh độ dốc; g là gia tốc trọng trường (m/s^2); H là khoảng cách từ đáy nguồn cháy đến trần hầm tại vị trí cháy (m); A là tiết diện dòng khí (m^2); ρ và C_p là khối lượng riêng (kg/m^3) và nhiệt dung riêng của không khí (J/kg K); T là nhiệt độ không khí gần vùng cháy; T_f là nhiệt độ trung bình của khí tại vùng cháy (K); Q_c tốc độ tỏa nhiệt đối lưu; G là độ dốc dọc hầm. Giá trị K và cách xác định T_f phụ thuộc mô hình, kịch bản cháy và dữ liệu hiệu chỉnh.

Phương pháp Kennedy với $K_1 = 0{,}606$ là cơ sở của nhóm phương trình Froude và đã được sử dụng trong NFPA 502 đến phiên bản 2014. Phiên bản năm 2017 giữ cấu trúc này cho K_1 biến thiên theo HRR, nhưng có hạn chế về khả năng áp dụng cho các chiều cao hầm khác nhau và dự báo V_c cao hơn tới 44% so với phiên bản năm 2014 ở miền HRR thấp. Phụ lục D của phiên bản 2020 sau đó bị thu hồi. NFPA 502:2026, được cập nhật Phụ lục D và tiếp tục hoàn thiện các phương trình xác định vận tốc tới hạn và làm rõ giới hạn kiểm chứng. Trong nghiên cứu này phiên bản năm 2017 vẫn được đưa vào ma trận như "phiên bản lịch sử" để lượng hóa mức chênh so với các tương quan khác và cảnh báo rủi ro khi áp dụng tài liệu cũ. Shi và cs. [23] chỉ ra hạn chế của cách gắn K_1 với HRR tuyệt đối khi kích thước hầm thay đổi và đề xuất sử dụng HRR không thứ nguyên Q^*. Để bảo đảm cùng đầu vào khi so sánh, nghiên cứu không đưa các phương trình NFPA 502:2026 vào ma trận tính; Kennedy và NFPA 2017 được giữ lại như các mốc đối chiếu, không được coi là giá trị chuẩn tuyệt đối.

Oka và Atkinson phát triển tương quan dựa trên tốc độ toả nhiệt và vận tốc tới hạn không thứ nguyên (V_c^*):

$$V_c^* = \begin{cases} K_v.0{,}12^{-1/3}.(Q^*)^{1/3}, & Q^* < 0{,}12 \\ K_v, & Q^* > 0{,}12 \end{cases} \tag{5}$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho.Cp.T.\sqrt{g}.H^{5/2}}; \quad V_c^* = \frac{V_c}{\sqrt{g.H}} \tag{6}$$

Trong thí nghiệm, K_v phụ thuộc hình học và vị trí nguồn cháy. Mô hình thể hiện hai miền: V_c tăng theo $Q^{1/3}$ ở HRR thấp và tiến tới vùng gần như không đổi khi HRR tăng. Cách biểu diễn này đặt nền tẩng cho các nghiên cứu sau sử dụng HRR không thứ nguyên nhằm giảm phụ thuộc vào giá trị MW tuyệt đối.

Wu và Bakar [19] tiếp tục cách tiếp cận không thứ nguyên nhưng sử dụng đường kính thủy lực $H_d = 4A/P$ làm chiều dài đặc trưng nhằm phản ánh đồng thời diện tích và chu vi mặt cắt. Tương quan được viết:

$$V_c^* = \begin{cases} 0{,}4.(0{,}2)^{-1/3}.(Q'')^{1/3}, & Q'' \le 0{,}2 \\ 0{,}4, & Q'' > 0{,}2 \end{cases} \tag{7}$$

$$Q'' = \frac{Q}{\rho.Cp.T.\sqrt{g}.H_d^{5/2}}; \quad V_c^* = \frac{V_c}{\sqrt{gH_d}} \tag{8}$$

Li, Lei và Ingason sử dụng chiều cao hầm H_t làm chiều dài đặc trưng và đề xuất [20]:

$$V_c = \begin{cases} 0{,}81.(Q^*)^{1/3}.\sqrt{g.H_t}, & Q^* \le 0{,}15 \\ 0{,}43.\sqrt{g.H_t}, & Q^* > 0{,}15 \end{cases} \tag{9}$$

$$Q^* = \frac{Q}{\rho.Cp.T.\sqrt{g}.H_t^{5/2}} \tag{10}$$

Trong các phương trình trên, V_c là vận tốc tới hạn (m/s); Q và Q_c lần lượt là tổng tốc độ tỏa nhiệt và tốc độ tỏa nhiệt đối lưu (W); K_1, K_g và K_v là các hệ số thực nghiệm không thứ nguyên của từng mô hình; g là gia tốc trọng trường (m/s^2); ρ là khối lượng riêng không khí (kg/m^3); C_p là nhiệt dung riêng của không khí [J/(kg.K)]; T và T_f lần lượt là nhiệt độ không khí tiếp cận và nhiệt độ trung bình của khí tại vùng cháy (K); A là diện tích tiết diện dòng khí (m^2); H là khoảng cách từ đáy nguồn cháy đến trần hầm tại vị trí cháy (m); H_t là chiều cao hầm được sử dụng làm kích thước đặc trưng trong các tương quan dựa trên chiều cao; H_d là đường kính thủy lực (m), với P là chu vi bao dòng khí của mặt cắt (m). Q^* là tốc độ toả nhiệt không thứ nguyên chuẩn hóa theo H_t, còn Q'' là tốc độ toả nhiệt không thứ nguyên chuẩn hóa theo H_d.

Các thử nghiệm cho thấy chuyển tiếp xảy ra quanh $Q^* = 0{,}15$ phía trên ngưỡng này, vận tốc tới hạn không thứ nguyên (V_c^*) gần như không đổi. Nghiên cứu còn đối chiếu tương quan với một số dữ liệu đồng thời phát triển quan hệ riêng cho chiều dài lớp khói ngược, tạo liên kết trực tiếp giữa bài toán V_c và chế độ dưới tới hạn được phân tích ở Mục 2.3. Shi và cs. phân tích NFPA 502:2017 và chỉ ra rằng việc xác định K_1 theo HRR tuyệt đối có thể dẫn đến xu hướng dự báo V_c không hợp lý khi áp dụng cho các hầm có chiều cao khác đáng kể so với chiều cao 5 m. Các tác giả đề xuất vẫn giữ hệ phương trình Kennedy/NFPA, nhưng xác định K_1 theo HRR không thứ nguyên Q^* dựa trên chiều cao hầm H_t, thay vì theo giá trị HRR tuyệt đối. Các mức K_1 theo Q^* được Shi và cs. đề xuất như Bảng 3 dưới đây:

Theo cách tiếp cận này, tổng tốc độ toả nhiệt Q được dùng để tính Q^* và chọn K_1, trong khi tốc độ toả nhiệt đối lưu Q_c được đưa vào phương trình Kennedy/NFPA để tính V_c. Việc phân biệt hai đại lượng này để tránh nhầm lẫn tổng HRR và HRR đối lưu. Shi và cs. cũng lưu ý việc lựa chọn chiều dài đặc trưng giữa H_t, H_d và khoảng cách H từ đáy nguồn cháy đến trần, cùng ảnh hưởng của tỷ lệ hình học mặt cắt, vật cản và quy mô thí nghiệm. Như vậy, đây là một đề xuất cải tiến tính V_c trong NFPA 502:2017, không phải là một tương quan thực nghiệm độc lập hay phương pháp thay thế Phụ lục D.

Bảng 3. Giá trị K_1 theo Q^* trong đề xuất của Shi và cs.

Q^*	K_1
< 0,1608	0,87
0,483	0,74
0,804	0,68
1,126	0,64
1,448	0,62
> 1,608	0,606

Trong nghiên cứu này, năm cách tính được so sánh định lượng gồm: Kennedy/NFPA truyền thống với $K_1 = 0{,}606$; NFPA 502:2017 với $K_1 = f(Q)$; Wu–Bakar; Li–Lei–Ingason; và cách tiếp cận Shi với $K_1 = f(Q^*)$. Oka–Atkinson được sử dụng để làm rõ tiến trình phát triển của nhóm tương quan không thứ nguyên nhưng không đưa thành một phương pháp độc lập. Các phương pháp được so sánh song song, không coi phương pháp nào là chuẩn tuyệt đối, dùng tính chéo và lượng hóa độ nhạy. Trong ma trận cơ sở, nguồn cháy giả định bắt đầu tại cao độ mặt đường nên với Kennedy/NFPA lấy $H = H_t$; nếu đáy nguồn cháy nằm cao hơn mặt đường, H phải được xác định lại theo đúng định nghĩa của phương pháp. Một hướng phát triển gần đây là mô hình đối lưu hỗn hợp của Beyer và cs., được hiệu chỉnh bằng dữ liệu thí nghiệm quy mô thực và thu nhỏ kết hợp CFD, nhằm khắc phục một số hạn chế của các tương quan cổ điển và mở rộng khả năng dự báo V_c theo hình học, độ dốc và điều kiện nguồn cháy [12]. Trong nghiên cứu này, mô hình đó chưa được đưa vào ma trận tính số để giữ tính đồng nhất của năm phương pháp, nhưng được sử dụng như nguồn kiểm tra xu hướng và miền áp dụng.

2.3. *Chiều dài dòng khói ngược và chế độ dưới tới hạn*

Dòng khói ngược được hình thành khi lớp khói nóng chuyển động ngược lại với dòng thông gió được tạo ra, lan về phía thượng lưu của đám cháy (Hình 2(a)), làm suy giảm điều kiện thoát nạn và khả năng tiếp cận cứu hộ. Nếu vận tốc dòng khí V đủ lớn, dòng khí dọc hầm đẩy khói về phía hạ lưu của đám cháy, sự lan truyền của lớp khói ở phía thượng lưu bị chậm lại. Khi tiếp tục tăng vận tốc dòng khí dọc đến một giá trị nhất định gọi là vận tốc tới hạn V_c, hiện tượng dòng khói ngược sẽ bị chặn hoàn toàn và nồng độ khói giảm (Hình 2(b)). Trong trường hợp này, khả năng duy trì phân tầng khói thấp. Khi vận tốc thông gió cao hơn nữa, sự phân tầng khói bị phá hủy hoàn toàn (Hình 2(c)).



(a) $V < V_c$ (b) $V = V_c$ (c) $V > V_c$

Hình 2. Ảnh hưởng của vận tốc không khí dọc hầm đến quá trình lan truyền khói

Trong phân tích theo hiệu năng, trường hợp $V < V_c$ có thể được định lượng bằng L_b. Khả năng chấp nhận một giá trị L_b cụ thể phải được xem xét đồng thời với chiến lược kiểm soát khói, vị trí lối thoát, điều kiện an toàn sinh tồn và khả năng tiếp cận chữa cháy. Từ kết quả thực nghiệm, Li-Lei-Ingason đã xác lập quan hệ giữa V/V_c và chiều dài lớp khói ngược không thứ nguyên [20]:

$$\frac{L_b}{H_t} = -18{,}5 \cdot \ln\left(\frac{V}{V_c}\right) \tag{11}$$

Trong đó V là vận tốc dọc hầm thực tế. Công thức (11) cho thấy L_b tăng nhanh khi V/V_c giảm và tiến về 0 khi V/V_c tiến tới 1. Ngưỡng $Q^* = 0{,}15$ chỉ dùng để lựa chọn nhánh xác định V_c. Khi biểu diễn L_b/H_t theo tỷ số V/V_c, hai nhánh được quy về cùng dạng nên ngưỡng này không phải giới hạn riêng của công thức (11). Trong 12 kịch bản chính, Q^* nằm trong khoảng 0,1497–0,8512, chỉ Nhóm III tại $Q = 30$ MW có $Q^* \approx 0{,}1497$ và phải phân nhánh theo giá trị chưa làm tròn. Ba kịch bản EV, 8 MW có $Q^* = 0{,}0399$–$0{,}0454$, đều thuộc nhánh có HRR thấp. Phân biệt này được giữ nhất quán khi tính V_c, công thức (11) được sử dụng trong lớp tính cơ sở không xét vật cản. Gao và cs. đề xuất khái niệm vận tốc dưới tới hạn (sub-critical velocity), cho phép tồn tại lớp khói ngược với điều kiện lớp khói vẫn được duy trì phía trên vùng người thoát nạn; trong mô hình thu nhỏ, vận tốc này vào khoảng 45–60% V_c [24]. Vì vậy, $V < V_c$ không mặc nhiên là không chấp nhận được, nhưng phải đánh giá đồng thời L_b, chiều cao lớp khói và các tiêu chí an toàn sinh tồn.

2.4. Dữ liệu hầm Việt Nam và thiết lập ma trận phân tích tham số

Trong Bảng 4, nghiên cứu từ cơ sở dữ liệu 13 hầm đường bộ Việt Nam, ba nhóm mặt cắt điển hình được chọn để xây dựng ma trận tính toán. Phần lớn các hầm sử dụng thông gió dọc bằng jet fan, phù hợp với phạm vi nghiên cứu. Các mặt cắt không quy đổi này thành hình chữ nhật tương đương; H_t, A và chu vi P được giữ theo dữ liệu thực, còn $H_d = 4A/P$ được tính riêng cho tương quan Wu-Bakar.

Bảng 4. Đặc trưng hình học của ba nhóm mặt cắt hầm sử dụng trong phân tích

Nhóm	Số hầm	B (m)	H_t (m)	A (m^2)	P (m)	$H_d = 4A/P$ (m)
I	5	14,0	7,6	85,0	36,9265	9,21
II	4	14,0	7,6	88,0	37,3624	9,42
III	4	15,0	8,0	98,9	39,8478	9,93

Ba nhóm mặt cắt có $H_t = 7{,}6$–$8{,}0$ m, $A = 85{,}0$–$98{,}9$ m^2, $H_d = 9{,}21$–$9{,}93$ m và $B/H_t = 1{,}84$–$1{,}88$. Miền hình học này tương đối hẹp và được dùng để so sánh phương pháp, không đại diện cho toàn bộ hầm đường bộ Việt Nam. Việc giữ A, P và H_t bảo đảm mỗi tương quan sử dụng đúng đại lượng hình học theo định nghĩa gốc. Ba mặt cắt được kết hợp với $Q = 30$, 50, 100 và 150 MW để tạo 12 kịch bản chính. $Q_{EV} = 8$ MW được áp dụng cho cả ba mặt cắt như ba kịch bản xe điện ở miền HRR thấp, nâng tổng số trường hợp lên 15. Bảng 5 liệt kê các giả định chung thông số đầu vào của các phương pháp tính. Tính chất không khí và giả định nhiệt được giữ thống nhất giữa các tương quan; độ dốc, gió nền và vật cản được đặt bằng "0" trong lớp cơ sở và xem xét tại Mục 3.4.

Bảng 5. Các giả định chung cho ma trận phân tích tham số

Thông số	Giá trị sử dụng	Ghi chú
Mặt cắt	Nhóm I; II; III	H_t, A, P lấy trực tiếp từ dữ liệu 13 hầm
Q (MW)	30; 50; 100; 150	12 kịch bản chính
Q_{EV} (MW)	8	3 kịch bản xe điện chở người
Tỷ phần bức xạ X_r	0,30	$Q_c = 0{,}70.Q$
ρ (kg/m^3)	1,20	Giữ cố định
C_p [J/(kg.K)]	1005	Giữ cố định
T (K)	293	Không khí tiếp cận
K_g	1,00	Lớp cơ sở: chưa hiệu chỉnh độ dốc
Vật cản/gió nền	Không xét	Đưa sang lớp kiểm chứng

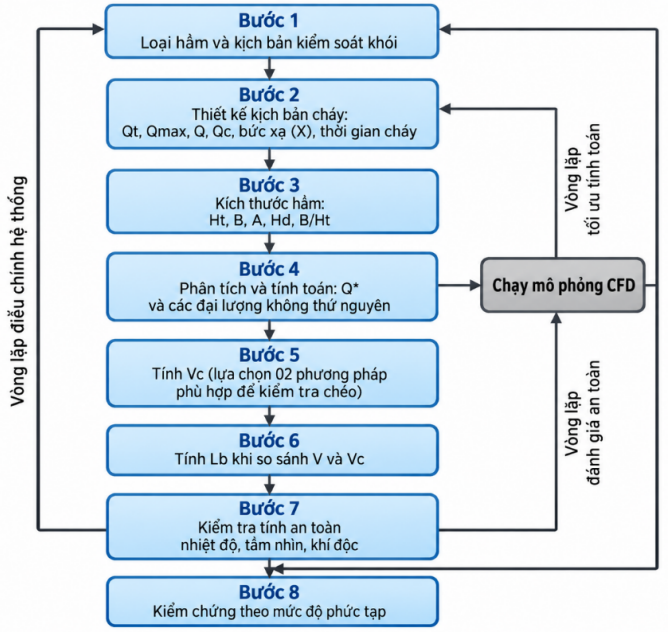
Năm cách tính V_c được áp dụng trên cùng dữ liệu đầu vào: Kennedy/NFPA truyền thống (K_1 = 0,606), NFPA 502 với K_1 phụ thuộc tổng HRR, Wu-Bakar, Li-Lei-Ingason và Shi và cs. với K_1 phụ thuộc Q^*. Để tạo trường giá trị liên tục phục vụ so sánh, K_1 của NFPA 2017 và Shi được nội suy tuyến tính theo Bảng 3. Cách nội suy này chỉ phục vụ phân tích tham số, không được hiểu là quy tắc lựa chọn K_1 trong thiết kế quy phạm. Để định lượng mức phân tán do lựa chọn tương quan, nghiên cứu sử dụng biên độ chênh lệch tương đối:

$$R_{Vc} = \frac{V_{c,\max} - V_{c,\min}}{V_{c,\text{tb}}} \; x \; 100\% \tag{12}$$

trong đó $V_{c,\max}$, $V_{c,\min}$ và $V_{c,\text{tb}}$ lần lượt là giá trị lớn nhất, nhỏ nhất và trung bình của năm phương pháp trong cùng một kịch bản.

3. Khung tính toán đề xuất và kết quả phân tích cho Việt Nam

Từ các phân tích trên, vấn đề cốt lõi không phải chọn "một công thức tốt nhất", mà là tổ chức đúng chuỗi đầu vào - mô hình - hiệu chỉnh - kiểm chứng. Khung đề xuất trong Hình 3 gồm tám bước: Bước 1–3 xác định phạm vi vật lý; Bước 4–6 xác lập các đại lượng thiết kế. Tại Bước 5, năm phương pháp tạo thành tập tham chiếu; với một hầm cụ thể, lựa chọn hai phương pháp phù hợp miền áp dụng để tính và kiểm tra chéo V_c. Bước 7 kiểm tra điều kiện an toàn sinh tồn theo tiêu chí nhiệt độ, tầm nhìn và độc tính theo hướng dẫn áp dụng [3, 4, 8, 11]; còn Bước 8 xác định mức mô phỏng hoặc thử nghiệm cần thiết. Các ngưỡng an toàn phụ thuộc chiến lược thoát nạn và mục tiêu từng dự án nên nghiên cứu không áp đặt một bộ giá trị chung cho mọi hầm.



Hình 3. Khung tính toán đề xuất cho hệ thống thông gió khẩn cấp hầm đường bộ

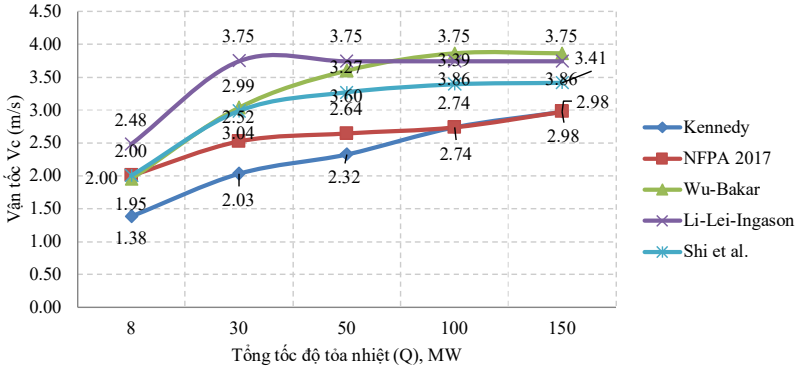
3.1. So sánh vận tốc tới hạn giữa các phương pháp

Trên cơ sở 15 trường hợp thiết lập ở Mục 2.4, năm phương pháp xác định V_c được áp dụng trên cùng một tập đầu vào để so sánh trực tiếp. Bảng 6 thể hiện giá trị đặc trưng của V_c của 12 kịch bản được tổng hợp theo khoảng biến thiên, giá trị trung bình và mức phân tán.

Bảng 6. Khoảng giá trị V_c của 5 phương pháp trong 12 kịch bản chính

Phương pháp	$V_{c,\min}$ (m/s)	$V_{c,\max}$ (m/s)	$V_{c,\text{tb}}$ (m/s)	Nhận xét trong miền khảo sát
Kennedy/NFPA trước năm 2014	2,01	2,99	2,52	Tăng theo Q; phụ thuộc Q_c, A và H.
NFPA 502:2017	2,49	2,99	2,72	NFPA 502:2017 theo cách diễn giải của Shi và cs.; hội tụ Kennedy ở tốc độ toả nhiệt cao.
Wu-Bakar (2000)	2,99	3,95	3,59	Có 6/12 kịch bản $Q'' \leq 0{,}20$; Có 6/12 mà V_c gần như không đổi khi tốc độ toả nhiệt tăng.
Li-Lei-Ingason (2010)	3,71	3,81	3,75	Có 11/12 kịch bản $Q^* > 0{,}15$, tương ứng miền mà V_c gần như không đổi theo Q.
Shi và cs. (2023)	2,95	3,46	3,27	$K1 = f(Q^*)$; phản ánh quy mô đám cháy theo Ht.

Trong 12 kịch bản chính (Q = 30–150 MW), V_c của năm phương pháp biến thiên từ 2,01 đến 3,95 m/s. Với từng kịch bản, biên độ chênh lệch tương đối R_{Vc} tính theo công thức (12) từ 24,0–63,3% (trung bình 41,5%). Khi phân nhóm theo HRR, R_{Vc} trung bình giảm từ 59,9% ở 30 MW xuống 45,6% ở 50 MW, 34,2% ở 100 MW và 26,2% ở 150 MW. Sai khác lớn nhất xuất hiện ở miền HRR thấp và trung bình; khi HRR tăng, một số mô hình chuyển sang miền V_c gần như không đổi nên mức phân tán được thu hẹp. Trên Hình 4, tại Q_{EV} = 8 MW, giá trị V_c trung bình của ba mặt cắt theo năm phương pháp nằm trong khoảng 1,38–2,48 m/s, cho thấy miền HRR thấp đặc biệt nhạy với lựa chọn tương quan. Giá trị V_c thấp hơn không đồng nghĩa với mức nguy hiểm cháy tổng thể thấp hơn.



Hình 4. Vận tốc tới hạn trung bình của 3 mặt cắt theo HRR và EV

Hình 4 cho thấy Li-Lei-Ingason gần như không đổi theo Q trong phần lớn ma trận: 11/12 kịch bản có $Q^* > 0{,}15$, chỉ Nhóm III tại 30 MW nằm sát dưới ngưỡng. Với Wu-Bakar, 6/12 kịch bản 30–50 MW thuộc ở nhánh $Q'' \leq 0{,}20$, còn sáu kịch bản 100–150 MW chuyển sang miền V_c gần như không đổi. Kennedy tiếp tục tăng theo Q, trong khi NFPA 2017 và Shi thay đổi K_1. Ở kịch bản 8 MW đối với EV, Li-Lei-Ingason và Wu-Bakar đều ở nhánh phụ thuộc HRR; đồng thời NFPA 2017 và Shi cùng nhận $K_1 = 0{,}87$ do Q và Q^* nằm dưới các ngưỡng thấp tương ứng. Sự phân tán giữa năm phương pháp chủ yếu từ bốn khác biệt: (i) chiều dài đặc trưng H/H_t hoặc H_d; (ii) sử dụng tổng HRR Q hay thành phần đối lưu Q_c; (iii) ngưỡng chuyển tiếp/bão hòa của Q^* hoặc Q''; và (iv) hệ số thực nghiệm từ các bộ dữ liệu, quy mô và hình học khác nhau. Vì vậy, R_{V_c} lớn ở miền HRR thấp phản ánh độ nhạy do lựa chọn tương quan, không phải sai số so với "giá trị đúng" duy nhất.

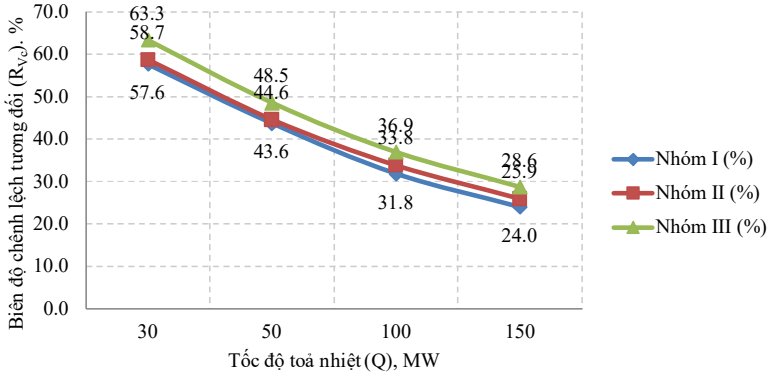
Bảng 7. Cơ sở và miền áp dụng kiểm tra khi sử dụng năm phương pháp xác định V_c

Phương pháp	Biến tính toán và chiều dài đặc trưng	Cần lưu ý	
Kennedy/NFPA trước năm 2014	H, A, Q_c; $K_1 = 0{,}606$	Không dùng ngưỡng Q^*; độ dốc tính qua Kg. Dữ liệu Memorial Tunnel có mặt cắt cong/điều kiện thử riêng nên không quy về một miền B/H hình chữ nhật duy nhất	Dùng như mốc tính; phải kiểm tra H, độ dốc và điều kiện biên
NFPA 502:2017	H, A, Q_c và tổng Q để chọn K_1	K_1 phụ thuộc HRR tuyệt đối; Shi và cs. chỉ ra hạn chế khi kích thước hầm khác đáng kể so với 5 m dùng để xây dựng phương pháp	Không ngoại suy như công thức quy phạm hiện hành; tính chéo với phương pháp khác
Wu–Bakar	$H_d = 4A/P$; Q''	Độ dốc thí nghiệm cơ sở: "0"; $Q'' \leq 0{,}20$: V_c phụ thuộc HRR; $Q'' > 0{,}20$: tiến tới bão hòa	Phù hợp để phản ánh ảnh hưởng mặt cắt qua H_d; thận trọng ngoài hình học thực nghiệm
Li–Lei–Ingason	H_t; Q^*; đồng thời có tương quan L_b	Độ dốc thí nghiệm cơ sở: "0"; $Q^* \leq 0{,}15$ và $Q^* > 0{,}15$ là hai nhánh tính V_c; tương quan L_b được xây dựng cùng tập dữ liệu	Thuận lợi liên kết V_c–L_b; vật cản phải xét bằng quan hệ hiệu chỉnh riêng
Shi và cs.	H_t; Q^* để chọn K_1; Q_c trong phương trình Kennedy	Các nút K_1 tính theo Q^* ở Bảng 3; mục tiêu giảm phụ thuộc kích thước. Lưu ý cơ sở mô hình phù hợp nhất với dạng hầm gần vuông	Dùng cho phân tích độ nhạy/tính chéo; không thay thế kiểm chứng khi hình học phức tạp

Bảng 7 cho thấy miền áp dụng của năm phương pháp không hoàn toàn trùng nhau. Khi thiết kế một hầm cụ thể, cần ưu tiên tương quan có biến hình học và điều kiện biên gần với công trình, đồng thời kiểm tra chéo bằng ít nhất một phương pháp khác. Nếu hình học hoặc điều kiện biên nằm ngoài dữ liệu gốc, hoặc sai khác giữa các phương pháp, kết quả chỉ nên dùng để sàng lọc và cần tăng mức kiểm chứng bằng CFD, mô hình hoặc dữ liệu hiện trường.

3.2. Ảnh hưởng của đặc trưng hình học mặt cắt

Trong nhóm mặt cắt khảo sát, đặc trưng hình học được phản ánh thông qua H_t, A, P, H_d và B/H_t. Đối với 12 kịch bản chính, biên độ chênh lệch tương đối trung bình giữa các phương pháp tính lần lượt là 39,3% ở Nhóm I, 40,7% ở Nhóm II và 44,3% ở Nhóm III. Sự khác biệt về biên độ chênh lệch giữa ba nhóm tương đối nhỏ, trong khi biên độ chênh lệch trung bình theo mức HRR giảm đáng kể từ 59,9% ở 30 MW xuống 26,2% ở 150 MW. Như vậy, trong miền hình học của 13 hầm khảo sát, mức HRR ảnh hưởng rõ rệt đến V_c nhiều hơn là kích thước hình học giữa ba nhóm.



Hình 5. Biên độ chênh lệch tương đối giữa các phương pháp theo HRR và ba nhóm mặt cắt

Kết quả Hình 5 cho thấy ảnh hưởng hình học tương đối nhỏ do ba nhóm mặt cắt có kích thước gần nhau. Khi áp dụng cho mặt cắt rộng-nông, có giếng đứng, thay đổi tiết diện đột ngột hoặc H_d ngoài miền khảo sát, cần tính chéo bằng tương quan nhạy hình học và ưu tiên CFD thay vì ngoại suy trực tiếp. Các nghiên cứu gần đây cho thấy độ dốc hầm làm thay đổi V_c [14]; vị trí nguồn cháy trong hầm phân nhánh ảnh hưởng đến V_c [15]; độ dốc kết hợp góc phân nhánh chi phối cả V_c và L_b [16]; vị trí vật cản tại thượng lưu quan trọng đối với V_c và L_b [13]. Vì vậy, ba nhóm mặt cắt chỉ dùng so sánh tương quan trong miền hình học khảo sát, không ngoại suy cho cấu hình phức tạp.

3.3. Quan hệ giữa V_c và chiều dài dòng khói ngược L_b

Do chưa có dữ liệu vận tốc dọc thực tế của từng hầm, nghiên cứu không gán một giá trị V chung mà biểu diễn chế độ dưới tới hạn thông qua tỷ số V/V_c. Quan hệ L_b/H_t theo V/V_c của Li-Lei-Ingason được dùng cho lớp cơ sở không xét vật cản. Ngưỡng $Q^* = 0{,}15$ chỉ dùng để lựa chọn nhánh V_c, không phải giới hạn riêng của quan hệ L_b. TCVN 13878:2023 có một ràng buộc vận hành đối với vận tốc dọc lớn nhất $V_{\max,\mathrm{TCVN}}$ là 12 m/s đối với hầm một chiều, 8 m/s đối với hầm hai chiều và 7 m/s đối với hầm có hành lang bộ [5]. Do đó, đối với kịch bản yêu cầu ngăn dòng khói ngược hoàn toàn, cần thỏa mãn $V_c \le V \le V_{\max,\mathrm{TCVN}}$; nếu $V < V_c$ thì L_b phải định lượng và kiểm tra cùng điều kiện thoát nạn, còn nếu $V_c > V_{\max,\mathrm{TCVN}}$ thì không thể chỉ tăng vận tốc mà cần phân chia khoang/vùng thông gió hoặc thay đổi chiến lược kiểm soát khói. Khi xung đột vẫn tồn tại, có thể chuyển sang phân vùng, hút khói điểm, bán ngang hoặc ngang toàn phần, kết hợp các hệ an toàn khác và kiểm chứng bằng CFD. Ràng buộc này được tích hợp tại Bước 8 của Hình 3.

Bảng 8. Quan hệ lớp khói ngược theo tỷ số V/V_c đối với H_t = 7,6 và 8,0 m

V/V_c	L_b/H_t	L_b khi H_t = 7,6 m	L_b khi H_t = 8,0 m
0,6	9,45	71,8	75,6
0,7	6,60	50,1	52,8
0,8	4,13	31,4	33,0
0,9	1,95	14,8	15,6
1,0	0,00	0,0	0,0

Kết quả trong Bảng 8 cho thấy chiều dài dòng khói ngược tăng phi tuyến khi vận tốc dọc giảm dưới vận tốc tới hạn. Khi V/V_c giảm từ 0,9 xuống 0,8, L_b/H_t tăng lên hai lần từ 1,95 lên 4,13; tương ứng L_b tăng từ 14,8 lên 31,4 m đối với H_t = 7,6 m và từ 15,6 lên 33,0 m đối với H_t = 8,0 m. Khi vận tốc chỉ đạt $0{,}6V_c$, L_b/H_t tăng tới 9,45, tương ứng chiều dài dòng khói ngược khoảng 71,8–75,6 m trong hai mặt cắt khảo sát. Ngược lại khi V tiến tới V_c, L_b tiến về 0 theo định nghĩa của vận tốc tới hạn. Do đó, V_c không nên được xem xét như một chỉ tiêu độc lập. Trong trường hợp $V < V_c$, cần đánh giá đồng thời L_b, vị trí lối thoát, điều kiện an toàn sinh tồn và chiến lược kiểm soát khói trước khi lựa chọn vận tốc vận hành và cấu hình hệ thống thông gió.

3.4. Khả năng áp dụng, kiểm chứng và giới hạn nghiên cứu

Ma trận tính được xây dựng để so sánh các tương quan V_c/L_b trên cùng điều kiện đầu vào, các yếu tố như độ dốc dọc, gió nền, vật cản, tổn thất áp suất do cháy, suy giảm lực đẩy của quạt ở nhiệt độ cao và tương tác với hệ thống chữa cháy cố định chưa đưa trực tiếp vào ma trận. Khi áp dụng cho một hầm cụ thể, các yếu tố này cần được bổ sung trước bước lựa chọn quy mô và cấu hình thiết bị, kết quả tính phải được liên kết với hệ điều khiển và vận hành. Hệ SCADA/AID có vai trò phát hiện sự cố, xác định kịch bản điều khiển và kích hoạt các thiết bị, lớp phát hiện (CCTV-AID, đầu báo nhiệt, báo cháy), lớp điều khiển trung tâm và lớp chấp hành (quạt, van, hệ thống cảnh báo) [3, 4, 8]. Sau lắp đặt, hiệu quả của hệ thống cần được kiểm tra thông qua chạy thử, nghiệm thu, thử nghiệm tích hợp và thử nghiệm khói phù hợp với quy mô công trình. Do đó, việc đưa độ dốc, vật cản và hình học phức tạp sang lớp hiệu chỉnh/kiểm chứng là phù hợp hơn so với việc gộp chúng vào một hệ số chung trong tính toán. Để lượng hóa ảnh hưởng của một số giả định, nghiên cứu phân tích độ nhạy cho trường hợp đại diện Nhóm II với Q = 50 MW, K_1 = 0,606 và các thông số trong Bảng 5. Trường hợp cơ sở với X_r = 0,30, $H = H_t$ và G = 0% là V_c = 2,33 m/s. Phân tích này chỉ nhằm định lượng độ nhạy của nhóm phương trình Kennedy/NFPA, không dùng để áp hệ số hiệu chỉnh đồng loạt cho các tương quan còn lại.

Kết quả trong Bảng 9 cho thấy giả định $H = H_t$ có ảnh hưởng đáng kể trong phương trình Kennedy: khi đáy nguồn cháy cao hơn mặt đường và H giảm còn $0{,}8H_t$ hoặc $0{,}6H_t$, V_c giảm tương ứng khoảng 8,0% và 17,5%. Do đó, $H = H_t$ chỉ phù hợp khi giả định đáy nguồn cháy tại mặt đường; với cabin, khoang động cơ hoặc thùng xe cao, phải xác định $H = H_t - z_0$ và kiểm chứng ảnh hưởng hình học cục bộ. Đối với X_r, khoảng 0,20–0,40 làm V_c thay đổi khoảng +3,4% đến −3,9% ở 50 MW. Điều này khẳng định X_r = 0,30 là giả định so sánh chứ không phải đặc tính cố định của cháy EV. Gió nền không làm thay đổi định nghĩa V_c của tương quan nhưng làm thay đổi vận tốc dọc hữu hiệu tại đám cháy. Vì vậy gió nền phải được đưa vào bài toán CFD thay vì gộp vào một hệ số V_c chung. Đối với vật cản, thí nghiệm của Li và Ingason [13] cho thấy tỷ lệ giảm V_c phụ thuộc kích thước và vị trí vật cản; với vật cản đơn ở thượng lưu gần nguồn cháy, hệ số tương quan trung bình xấp xỉ 0,88. Kết quả này hữu ích để sàng lọc và không được xem là hệ số phổ quát cho mọi trạng thái ùn tắc.

Đối với xe điện và các phương tiện sử dụng nguồn năng lượng mới, nghiên cứu không đề xuất một tương quan V_c riêng. Đặc trưng cháy cần được phản ánh thông qua Q_t, tốc độ tỏa nhiệt cực đại,

thời gian cháy, khả năng tái bùng cháy và độc tính của sản phẩm cháy. Các thông tin này được đưa vào bước xác định đám cháy thiết kế và đánh giá điều kiện an toàn sinh tồn; sau đó V_c và L_b vẫn được xác định bằng tương quan phù hợp với hình học và điều kiện hầm. Vì vậy, các nghiên cứu về EV [28, 29] nên được sử dụng để xây dựng kịch bản cháy và tiêu chí an toàn, thay vì giả định một hệ số hiệu chỉnh V_c cho mọi hầm. Kết quả thực nghiệm cũng cho thấy hình dạng trần hầm ảnh hưởng đến trường nhiệt, khói và khả năng quan sát khi pin lithium-ion mất kiểm soát nhiệt [25]; đồng thời cháy pin lithium-ion có thể phát thải lượng HF đáng kể, tạo nguy cơ độc cấp tính [26]. Vì vậy, đánh giá EV trong hầm nên bổ sung các tiêu chí độc tính/điều kiện sinh tồn bên cạnh HRR đỉnh, thời gian cháy và khả năng tái bùng cháy. Ba trường hợp $Q_{\mathrm{EV}} = 8$ MW trong nghiên cứu chỉ là kịch bản bổ sung để khảo sát độ nhạy của V_c ở miền HRR thấp, không phải đánh giá đầy đủ rủi ro cháy xe điện. Đánh giá an toàn sinh mạng đối với EV cần bổ sung diễn biến HRR theo thời gian, quá nhiệt tự phát, khả năng tái bùng cháy, tốc độ sinh khói và độc tính như HF; khi chưa có đủ dữ liệu đầu vào, các nội dung này phải được xử lý như giới hạn nghiên cứu và hướng kiểm chứng tiếp theo [25, 26, 28, 29].

Bảng 9. Phân tích độ nhạy của V_c đối với X_r, chiều cao H và độ dốc

Biến thay đổi	Giá trị	V_c (m/s)	Thay đổi so với cơ sở
Phương án cơ sở	$X_r = 0{,}30$; $H/H_t = 1{,}0$; $G = 0\%$	2,33	0%
Tỷ phần bức xạ	$X_r = 0{,}20$	2,40	+3,4%
Tỷ phần bức xạ	$X_r = 0{,}40$	2,24	−3,9%
Chiều cao nguồn cháy	$H/H_t = 0{,}80$ (đáy nguồn cao 1,52 m)	2,14	−8,0%
Chiều cao nguồn cháy	$H/H_t = 0{,}60$ (đáy nguồn cao 3,04 m)	1,92	−17,5%
Độ dốc bất lợi theo Kennedy	$\lvert G\rvert = 1\%$	2,42	+4,2%
Độ dốc bất lợi theo Kennedy	$\lvert G\rvert = 3\%$	2,56	+10,1%
Độ dốc bất lợi theo Kennedy	$\lvert G\rvert = 5\%$	2,68	+15,2%

Giới hạn của nghiên cứu tập trung ở bốn nhóm chính: (i) sử dụng các mức HRR cực đại rời rạc thay vì đầy đủ đường Q_t, đồng thời chưa xét trực tiếp độ dốc, gió nền và vật cản; (ii) ba nhóm mặt cắt chỉ đại diện cho 13 hầm khảo sát, chưa bao quát các dạng hình học đặc biệt; (iii) kết quả tập trung vào lớp tính V_c/L_b, chưa bao gồm đầy đủ lựa chọn thiết bị, điều khiển, dự phòng và chế độ an toàn khi sự cố; và (iv) chưa có CFD, chạy thử hoặc dữ liệu hiện trường để kiểm chứng cho từng hầm cụ thể. Do đó, các kết quả của nghiên cứu nên được xem là xây dựng khung tính toán và lựa chọn mức kiểm chứng, không phải là đề xuất thành các điều khoản quy phạm của TCVN 13878:2023. Cập nhật tại Phụ lục D của NFPA 502:2026 cho thấy phương pháp xác định vận tốc kiểm soát khói vẫn đang được hoàn thiện, không chỉ xét vận tốc tới hạn mà còn đưa vào khái niệm vận tốc khống chế dòng khói ngược và nhấn mạnh mục tiêu duy trì lớp khói ổn định cùng các điều kiện an toàn sinh tồn. NFPA cũng lưu ý chưa có phương pháp tính đủ tin cậy để xác định vận tốc khống chế dòng khói ngược cho các hầm quy mô thực và khuyến nghị CFD được kiểm chứng bằng dữ liệu quy mô thực. Do đó, đối với các dự án hầm đường bộ tại Việt Nam, cần tham khảo phiên bản NFPA 502 hiện hành cùng các sửa đổi liên quan, đồng thời kiểm tra phạm vi áp dụng và mức độ kiểm chứng của từng phương pháp, đồng thời xem xét những hạn chế đã được nhận diện.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng khung phân tích thông gió khẩn cấp hầm đường bộ từ đám cháy thiết kế, đặc trưng hình học và cách biểu diễn HRR đến V_c, L_b và mức kiểm chứng. Khoảng trống đáng chú ý trong điều kiện Việt Nam không chỉ là thiếu một công thức V_c cụ thể trong TCVN 13878:2023, mà

còn thiếu quy trình giúp lựa chọn và kiểm tra tương quan theo miền áp dụng. Ba nhóm mặt cắt từ dữ liệu 13 hầm được sử dụng có H_t = 7,6–8,0 m, A = 85,0–98,9 m^2 và H_d = 9,21–9,93 m. Các mặt cắt này kết hợp với Q = 30, 50, 100 và 150 MW tạo 12 kịch bản chính cùng ba kịch bản với Q_{EV} = 8 MW được bổ sung cho xe điện chở người.

Trong 12 kịch bản chính, năm phương pháp so sánh cho V_c = 2,01–3,95 m/s. Biên độ chênh lệch tương đối giữa các phương pháp từ 24,0–63,3%, trung bình 41,5%; giá trị trung bình giảm từ 59,9% tại 30 MW xuống 26,2% tại 150 MW. Ba kịch bản EV, 8 MW cho V_c từ 1,38–2,48 m/s và biên độ chênh lệch trung bình 56,6%, cho thấy miền HRR thấp nhạy với lựa chọn tương quan. Quan hệ L_b và H_t trong công thức (11) cho thấy khi vận tốc dọc giảm dưới V_c, phạm vi khói lan ngược tăng nhanh; tại $V = 0{,}6V_c$, L_b nằm trong khoảng 71,8–75,6 m đối với hai chiều cao khảo sát. Vì vậy, V_c cần được đánh giá đồng thời với L_b và điều kiện thoát nạn thay vì sử dụng như một chỉ tiêu độc lập.

Kết quả tính toán cho thấy không nên áp dụng một tương quan duy nhất cho mọi điều kiện hầm. Hồ sơ tính cần xác định rõ đám cháy thiết kế, phân biệt tổng tốc độ tỏa nhiệt (Q) và thành phần đối lưu (Q_c), các thông số hình học và chiều dài đặc trưng, phạm vi áp dụng của từng tương quan, đồng thời thực hiện tính toán đối chiếu bằng các phương pháp khác nhau để đánh giá mức độ sai khác của kết quả. Khi hình học, độ dốc, gió nền, vật cản, giao thông hoặc tương tác với hệ chữa cháy cố định trở nên phức tạp, cần tăng mức kiểm chứng bằng CFD và dữ liệu hiện trường. Các kết quả của nghiên cứu có ý nghĩa như một khung đề xuất và so sánh phương pháp; việc chuyển hóa thành hướng dẫn thiết kế hoặc quy phạm cần được bổ sung bằng dữ liệu dự án, mô phỏng, chạy thử và nghiệm thu cho các hầm đại diện tại Việt Nam. Trong bước lựa chọn vận tốc vận hành, V cần được kiểm tra đồng thời với V_c và giới hạn $V_{\mathrm{max,TCVN}}$ theo TCVN 13878:2023; nếu hai ràng buộc xung đột, cần xem xét lại phân vùng hoặc chiến lược thông gió thay vì điều chỉnh công suất quạt.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, các tác giả đã sử dụng chatGPT để cải thiện ngôn ngữ hoặc khả năng diễn đạt của bản thảo. Các tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] Lacroix, D. (2001). The Mont Blanc Tunnel fire: What happened and what has been learned. *Proceedings of the 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, Madrid, Spain.

[2] Beard, A. N. (2009). Fire safety in tunnels. *Fire Safety Journal*, 44(2):276–278.

[3] PIARC (2011). *Operational strategies for emergency ventilation*. La Défense Cedex, France.

[4] PIARC (2019). *Fire and smoke control in road tunnels*. La Défense Cedex, France.

[5] TCVN 13878:2023. *Phòng cháy chữa cháy – hầm đường bộ – yêu cầu thiết kế*. Hà Nội.

[6] Lan, Đ. T. P., Chinh, P. M., Huyền, L. T., Sĩ, N. V., Trung, N. T. (2023). Nghiên cứu áp dụng QCVN 06: 2021/BXD trong thiết kế hệ thống hút khói cho tòa nhà cao tầng ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 17(3V):174–182.

[7] NFPA 502. *Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways*. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.

[8] Bergeson, B. (2020). *Fixed fire fighting and emergency ventilation systems for highway tunnels – literature survey and synthesis*. Washington, DC.

[9] TIA 26-1 (TIA Log #1862) to NFPA 502 (2026). *Tentative interim amendment TIA 26-1 (TIA Log #1862) to NFPA 502, standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways, 2026 edition, Annex D*. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.

[10] Lombardi, M., Berardi, D., Galuppi, M. (2023). A critical review of fire tests and safety systems in road tunnels: Limitations and open points. *Fire*, 6(5):213.

[11] Maevski, I. (2017). *Guidelines for emergency ventilation smoke control in roadway tunnels*. Washington, DC.

[12] Beyer, M., Stacey, C., Brenn, G. (2025). A mixed convection model for estimating the critical velocity to prevent smoke backlayering in tunnels. *Fire Technology*, 61(2):295–342.
[13] Li, Y. Z., Ingason, H. (2024). Influence of upstream blockage on smoke control in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 147:104197.
[14] Jiang, L., Xiao, M. (2022). Effect of tunnel slope on the critical velocity of densimetric plumes and fire plumes in ventilated tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 123:104394.
[15] Chen, C., Jiao, W., Zhang, Y., Shi, C., Lei, P., Fan, C. (2023). Experimental investigation on the influence of longitudinal fire location on critical velocity in a T-shaped tunnel fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 134:104983.
[16] Huang, Y., Luo, C., Liu, X., Tang, F., Dong, B., Zhong, H. (2024). Evaluating the smoke back-layering length and critical velocity in branched tunnel fire with sloped mainline: An experimental study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 143:105498.
[17] Thomas, P. H. (1958). *The movement of buoyant fluid against a stream and the venting of underground fires*. Borehamwood, UK.
[18] Kennedy, W. D., Gonzales, J. A., Sanchez, J. G. (1996). Derivation and application of the SES critical velocity equations. *ASHRAE Transactions*, 102(2):40–44.
[19] Wu, Y., Bakar, M. Z. A. (2000). Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity. *Fire Safety Journal*, 35(4):363–390.
[20] Li, Y. Z., Lei, B., Ingason, H. (2010). Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 45(6-8):361–370.
[21] Oka, Y., Atkinson, G. T. (1995). Control of smoke flow in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 25(4): 305–322.
[22] Massachusetts Highway Department, Federal Highway Administration (1995). *Memorial Tunnel fire ventilation test program – comprehensive test report*. West Virginia, USA.
[23] Shi, Y. S., Bowman, I., De Los Rios, N., Harvey, N., Lopez, K., Pelessone, L. (2023). NFPA 502 critical velocity calculation methodologies and dimensionless heat release rate. *Tenth International Symposium on Tunnel Safety and Security*.
[24] Gao, D., Chen, X., Yang, X., Tong, Y. O., Lin, P. (2022). Experimental study of sub-critical velocity in longitudinally ventilated tunnels. *Fire Technology*, 58(1):571–590.
[25] Ouyang, D., Pang, Y., Liu, B., Wang, Z. (2024). An experimental investigation on thermal runaway features of lithium-ion cells under tunnel situations. *Process Safety and Environmental Protection*, 181: 26–32.
[26] Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Mellander, B.-E. (2017). Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific Reports*, 7(1):10018.
[27] Klote, J. H., Milke, J. A., Turnbull, P. G., Kashef, A., Ferreira, M. J. (2012). *Handbook of smoke control engineering*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
[28] Sturm, P., Fößleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S. F., Krausbar, S., Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire Safety Journal*, 134: 103695.
[29] Tohir, M. Z. M., Martín-Gómez, C. (2025). Evaluating fire severity in electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A statistical approach to heat release rates. *Fire Technology*, 61(5):2957–2998.