

KIỂM SOÁT CHẤT LƯỢNG KHÔNG KHÍ TRONG NHÀ GIAI ĐOẠN ĐẦU VẬN HÀNH: KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VÀ KHUYẾN NGHỊ CHO VIỆT NAM

Nguyễn Thành Trung^{a,*}

^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*

Nhận ngày 16/01/2026, Sửa xong 02/02/2026, Chấp nhận đăng 24/02/2026

Tóm tắt

Chất lượng không khí trong nhà (IAQ) trong giai đoạn vận hành ban đầu của tòa nhà (0–12 tháng) thường đạt mức ô nhiễm cao nhất do phát thải từ vật liệu hoàn thiện, đồ nội thất, hoạt động vệ sinh và vận hành thử. Mục tiêu chính của bài báo này là tổng quan các tài liệu quốc tế từ năm 2017–2025 về IAQ trong các tòa nhà mới và được cải tạo, tập trung vào hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (TVOC), formaldehyde (HCHO) và bụi (PM), đồng thời đo kiểm chứng trong năm văn phòng mới ở Việt Nam. Bằng chứng tổng hợp cho thấy TVOC và HCHO đều vượt quá ngưỡng tham chiếu gấp nhiều lần trong những tháng đầu và PM tăng mạnh trong quá trình hoàn thiện nội thất. Kết quả nghiên cứu cho thấy để đạt được IAQ cần thực hiện các biện pháp, bao gồm: (1) kiểm soát phát thải tại nguồn (vật liệu phát thải thấp, thi công sạch và quản lý tiến độ); (2) tăng cường thông gió trước khi sử dụng và các chiến lược thông gió thông minh; (3) lọc/làm sạch không khí; (4) kiểm soát nhiệt độ và độ ẩm để hạn chế phát thải và sự phát triển của nấm mốc; và (5) giám sát liên tục và tích hợp vào hệ thống quản lý tòa nhà (BMS). Dựa trên các nghiên cứu và đánh giá thực tiễn cần triển khai giải pháp cơ bản theo hướng tích hợp nhằm bảo đảm IAQ đạt mức chấp nhận được, qua đó tạo lập môi trường sống và làm việc trong lành, an toàn và có lợi cho sức khỏe người sử dụng.

Từ khoá: chất lượng không khí trong nhà; giai đoạn đầu vận hành; xả khí trước khi đưa vào sử dụng; thông gió trước khi sử dụng; HCHO; TVOC.

INDOOR AIR QUALITY MANAGEMENT IN THE EARLY OCCUPANCY PHASE: INTERNATIONAL EXPERIENCE AND RECOMMENDATIONS FOR VIETNAM

Abstract

Indoor air quality (IAQ) during the early building operation phase (0–12 months) often exhibits the highest pollution levels due to emissions from finishing materials and furnishings, as well as cleaning and commissioning activities. This study conducts a systematic literature review of international studies published between 2017 and 2025 on IAQ in new and renovated buildings, with a focus on total volatile organic compounds (TVOC), formaldehyde (HCHO), and particulate matter (PM), and to validate the findings through field measurements in five newly completed office spaces in Vietnam. The synthesized evidence indicates that TVOC and HCHO commonly exceed reference thresholds by substantial margins in the first months after completion, and PM—particularly during interior finishing—can increase sharply. The review suggests that achieving acceptable IAQ requires an integrated package of measures: (1) source control (low-emission materials, clean construction practices, and schedule management); (2) pre-occupancy flush-out and appropriate ventilation strategies, including smart control where applicable; (3) air cleaning and filtration; (4) temperature and humidity control to limit emissions and prevent mold growth; and (5) continuous monitoring integrated into building management systems (BMS). Based on research and practical assessments, this study shows the need to implement a comprehensive, integrated solution package to ensure acceptable IAQ levels, thereby creating a healthy, safe, and beneficial living and working environment for users.

Keywords: indoor air quality; post-construction phase; early occupancy; pre-occupancy flush-out; pre-use ventilation; HCHO; TVOC.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20\(1V\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(1V)-06) © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Chất lượng không khí trong nhà (Indoor Air Quality - IAQ) đã được Tổ chức Y tế Thế giới (WHO) xác định là một trong những yếu tố môi trường quan trọng nhất ảnh hưởng đến sức khỏe con người

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: trungnt1@huce.edu.vn (Trung, N. T.)

trong thế kỷ 21 [1]. Với thực tế con người dành 80-90% thời gian sống trong các không gian kín, chất lượng không khí trong nhà có tác động trực tiếp và lâu dài đến sức khỏe, năng suất làm việc và chất lượng cuộc sống [1–3]. Trên toàn cầu, ô nhiễm không khí trong nhà được ước tính gây ra khoảng 3,8 triệu ca tử vong sớm mỗi năm, chủ yếu do các bệnh về đường hô hấp, tim mạch và ung thư [1, 4]. Tại các quốc gia phát triển, vấn đề này ngày càng trở nên nghiêm trọng do xu hướng xây dựng các tòa nhà kín gió để tiết kiệm năng lượng, dẫn đến giảm tỷ lệ thông gió tự nhiên và tích tụ các chất ô nhiễm trong nhà [5].

Tại khu vực châu Á - Thái Bình Dương, rủi ro IAQ trở nên cấp bách trong bối cảnh đô thị hóa nhanh, mật độ xây dựng cao và mức độ ô nhiễm không khí ngoài trời gia tăng. Bằng chứng thực nghiệm cho thấy tỷ lệ vượt ngưỡng ở giai đoạn đầu rất lớn; chẳng hạn khảo sát tại các căn hộ mới ghi nhận 83,6% trường hợp formaldehyde vượt tiêu chuẩn, với nồng độ trung bình 0,238 mg/m³ (cao gấp 2,4 lần giới hạn cho phép) [6]. Trên cơ sở các bằng chứng về triệu chứng liên quan tòa nhà và rủi ro phơi nhiễm hóa chất trong nhà (đặc biệt phát thải cao từ vật liệu xây dựng mới), nhiều quốc gia trong khu vực đã sớm hoàn thiện cơ chế quản trị IAQ, tập trung vào kiểm soát phát thải vật liệu và yêu cầu kiểm tra IAQ trước bàn giao và theo dõi sau sử dụng [7, 8]. Song song đó, các chương trình chứng nhận công trình xanh cũng tích hợp chặt chẽ tiêu chí IAQ, nhấn mạnh lựa chọn vật liệu phát thải thấp, kiểm tra IAQ trước bàn giao và giám sát liên tục sau khi đưa vào sử dụng [9, 10].

Việt Nam đang bước vào giai đoạn tăng trưởng kinh tế nhanh cùng với tốc độ đô thị hóa cao. Tuy nhiên, chất lượng không khí trong nhà (IAQ), đặc biệt ở giai đoạn đầu vận hành, vẫn chưa được quan tâm tương xứng với quy mô phát triển. Về mặt pháp lý và kỹ thuật, Việt Nam đã ban hành TCVN 13521:2022 liên quan đến chất lượng không khí trong nhà, tạo cơ sở tham chiếu quan trọng cho đánh giá và quản lý IAQ. Hiện nay, tài liệu hướng dẫn kỹ thuật thiết kế, thi công và vận hành công trình bảo đảm chất lượng không khí trong nhà theo TCVN 13521:2022 đã đề cập ở mức sơ bộ đến các biện pháp thông gió và lọc không khí sau khi hoàn thiện xây dựng [11]. Dù vậy, vẫn thiếu hướng dẫn chuyên biệt cho IAQ trong giai đoạn đầu vận hành, đồng thời chưa hình thành quy trình kiểm định IAQ trước bàn giao mang tính thống nhất, phổ cập và có thể áp dụng rộng rãi. Trên thực tế, nhiều công trình được đưa vào sử dụng gần như ngay sau khi hoàn thành, không có đủ thời gian làm sạch và ổn định trước khi đón người sử dụng. Hệ quả là trong những tháng đầu đến sinh hoạt và làm việc, người lao động thông thường có các biểu hiện điển hình như mùi khó chịu, kích ứng mắt, mũi, họng, đau đầu và mệt mỏi, đây là những triệu chứng phù hợp với bối cảnh phơi nhiễm tăng cao từ vật liệu hoàn thiện, nội thất và hoạt động vệ sinh hoàn thiện trước khi bàn giao. Một thực tế khác là thị trường vật liệu xây dựng và nội thất tại Việt Nam rất đa dạng nhưng còn thiếu cơ chế kiểm soát chặt chẽ về phát thải VOC và HCHO theo vòng đời sản phẩm, có thể các hợp chất này thường ở mức cao tại các công trình sử dụng gỗ công nghiệp và sơn, keo không đạt chuẩn. Cùng với đó là sự hiện diện của hàng nhập khẩu không rõ nguồn gốc, hàng giả, hàng nhái và thông tin kỹ thuật không minh bạch làm suy giảm hiệu lực kiểm soát IAQ ngay từ giai đoạn thiết kế, mua sắm, thi công, đồng thời khiến việc tuân thủ các giá trị tham chiếu trở nên khó khăn khi chuyển sang vận hành thực tế.

Từ các khoảng trống về quản lý IAQ, cần nhấn mạnh giai đoạn đầu vận hành là giai đoạn ô nhiễm không khí nhiều nhất, nhiều nghiên cứu cho thấy tốc độ phát thải VOC và HCHO từ vật liệu xây dựng, sơn, keo dán và nội thất đạt đỉnh trong 1-3 tháng đầu, cao gấp 5-10 lần so với giai đoạn ổn định sau 1 năm [12–15]. Giai đoạn này là thời điểm người sử dụng lần đầu và liên tục tiếp xúc với môi trường trong nhà với nồng độ chất ô nhiễm cao, có thể gây ra các tác động sức khỏe cấp tính như kích ứng đường hô hấp, đau đầu, mệt mỏi [1, 8]. Đồng thời, giai đoạn này là thời điểm quan trọng để áp dụng các biện pháp can thiệp hiệu quả bằng các giải pháp thông gió tăng cường trước khi đưa vào sử dụng để giảm đáng kể nồng độ chất ô nhiễm và rút ngắn thời gian đạt mức an toàn theo tiêu chuẩn [12, 14].

Tuy nhiên, trong thực tiễn tại Việt Nam, nhận thức của các bên liên quan về rủi ro IAQ ở giai đoạn đầu vận hành còn hạn chế. Thêm vào đó, thiếu nguồn nhân lực được đào tạo về đánh giá và quản lý IAQ, cùng với chưa phát triển của thị trường dịch vụ tư vấn IAQ chuyên nghiệp, đã tạo ra những rào cản lớn trong việc chuẩn hóa quy trình và nhân rộng các biện pháp kiểm soát hiệu quả.

Trong bối cảnh đó, bài báo áp dụng phương pháp tổng quan tài liệu, nguồn dữ liệu chính là các nghiên cứu khoa học công bố trên tạp chí quốc tế uy tín giai đoạn 2017–2025, tập trung vào bằng chứng thực nghiệm, các tổng quan hệ thống về IAQ ở giai đoạn đầu vận hành và khảo sát thực địa cho năm văn phòng mới tại Việt Nam.

2. Đặc trưng các chất ô nhiễm không khí trong nhà giai đoạn đầu vận hành

2.1. Đặc trưng giai đoạn đầu vận hành

Giai đoạn đầu vận hành là khoảng thời gian bắt đầu từ khi hoàn thành xây dựng và bàn giao công trình, kéo dài đến khi nồng độ các chất ô nhiễm trong không khí giảm xuống mức ổn định và đạt tiêu chuẩn an toàn. Thời gian này thường dao động từ 6 đến 12 tháng, tùy thuộc vào loại vật liệu sử dụng, điều kiện khí hậu, và các biện pháp can thiệp được áp dụng [12–14].

Giai đoạn này có thể được chia thành ba pha nhỏ: Pha hoàn thiện (0-1 tháng): Giai đoạn ngay sau khi hoàn thành thi công chính, đang trong quá trình hoàn thiện nội thất, lắp đặt thiết bị và dọn dẹp. Đây là pha có nồng độ bụi PM_{2.5} và PM₁₀ cao nhất do hoạt động thi công [6, 16]; Pha “giải phóng” (off-gassing) cao điểm (1-3 tháng): Giai đoạn tốc độ phát thải VOC và formaldehyde từ vật liệu mới đạt đỉnh. Nồng độ TVOC có thể cao gấp 5-10 lần so với giai đoạn ổn định [13, 14]; Pha suy giảm (3-12 tháng): Giai đoạn nồng độ các chất ô nhiễm giảm dần theo hàm số mũ, tiến dần đến mức ổn định [12, 14].

Đặc điểm chính của giai đoạn này có các đặc trưng như sau: Thứ nhất là nồng độ chất ô nhiễm cao và biến động lớn, chất ô nhiễm trong giai đoạn này thường cao hơn 2-10 lần so với giai đoạn ổn định và có sự biến động lớn theo thời gian, nhiệt độ, độ ẩm và tỷ lệ thông gió [13, 14, 17]. Thứ hai là nguồn phát thải rất đa dạng, bao gồm vật liệu xây dựng (bê tông, vữa, gạch, tấm trần, sàn), vật liệu hoàn thiện (sơn, keo dán, chất chống thấm), vật liệu nội thất (gỗ công nghiệp, vải bọc, thảm, vật liệu cách nhiệt), và thiết bị văn phòng mới [3, 16]. Thứ ba là tốc độ phát thải bị ảnh hưởng mạnh bởi điều kiện môi trường. Nhiệt độ và độ ẩm cao làm tăng đáng kể tốc độ phát thải VOC và formaldehyde. Các nghiên cứu cho thấy tốc độ phát thải có thể tăng gấp đôi khi nhiệt độ tăng từ 23 °C lên 30 °C [12, 14]. Thứ tư là tác động mạnh tới sức khỏe người sử dụng, giai đoạn này có nguy cơ cao gặp các triệu chứng của “bệnh nhà kín” (SBS) [8]. Như vậy, giai đoạn này tăng cường các biện pháp như xả khí và thông gió sẽ rút ngắn thời gian đạt mức an toàn môi trường rất cao [12, 14].

2.2. Các chất ô nhiễm chính trong giai đoạn đầu vận hành

a. Bụi mịn (PM_{2.5}) và PM₁₀

Bụi mịn PM_{2.5} và PM₁₀ là các hạt rắn hoặc lỏng lơ lửng trong không khí. Trong giai đoạn đầu vận hành, nguồn chính của bụi mịn bao gồm: Hoạt động hoàn thiện nội thất (cắt, mài, khoan); Bụi xây dựng còn sót lại sau quá trình dọn dẹp; xâm nhập từ bên ngoài qua hệ thống thông gió; Hoạt động của người sử dụng và thiết bị văn phòng [1, 18, 19]. Nghiên cứu tại châu Á cho thấy nồng độ PM₁₀ trong giai đoạn hoàn thiện nội thất có thể đạt 564,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cao gấp nhiều lần tiêu chuẩn WHO (45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cho PM₁₀, 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cho PM_{2.5}) [20]. Tại các văn phòng đã hoàn thành, nồng độ PM_{2.5} thường dao động 10-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, vẫn cao hơn tiêu chuẩn WHO [19]. Trẻ em và người có bệnh lý về hô hấp đặc biệt nhạy cảm với bụi mịn.

b. Formaldehyde (HCHO)

Formaldehyde là một hợp chất hữu cơ dễ bay hơi có mùi hắc, được WHO phân loại là chất gây ung thư nhóm 1. Nguồn chính trong công trình xây dựng bao gồm: Gỗ công nghiệp (MDF, plywood, particleboard) sử dụng keo urea-formaldehyde; Sơn, vecni, keo dán; Vải bọc nội thất, thảm; Một số vật liệu cách nhiệt [12–15, 17, 21]. Nghiên cứu tại Trung Quốc cho thấy 83,6% căn hộ mới có nồng độ formaldehyde vượt tiêu chuẩn WHO ($0,1 \text{ mg/m}^3$), với nồng độ trung bình $0,238 \text{ mg/m}^3$ [6]. Tại Thái Lan, nghiên cứu tại các văn phòng mới phát hiện nồng độ formaldehyde dao động $0,02\text{-}0,15 \text{ mg/m}^3$, với 40% mẫu vượt tiêu chuẩn [21].

Tốc độ phát thải formaldehyde từ vật liệu giảm theo hàm số mũ theo thời gian, nhưng quá trình này có thể kéo dài nhiều năm. Các nghiên cứu cho thấy nồng độ formaldehyde giảm 50-70% sau 6 tháng, nhưng vẫn có thể vượt tiêu chuẩn sau 1 năm [13, 14, 17].

c. Tổng hợp các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (TVOC)

TVOC là tổng nồng độ của tất cả các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi trong không khí, bao gồm hàng trăm chất khác nhau. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng nồng độ VOC trong không khí trong nhà thường cao hơn nhiều lần so với ngoài trời, do nhiều nguồn phát thải khác nhau [20, 22]. Các VOC phổ biến trong công trình xây dựng bao gồm: Hydrocarbons thơm (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene-BTEX); Aldehydes (formaldehyde, acetaldehyde); Terpenes (limonene, α -pinene); Esters, ketones, alcohols [3, 14, 16, 23]. Dự án OFFICAIR tại châu Âu ghi nhận nồng độ TVOC trong các văn phòng mới dao động rộng, với một số trường hợp đạt $1955 \text{ }\mu\text{g/m}^3$, vượt xa tiêu chuẩn WHO và tiêu chuẩn tạm thời của Nhật Bản ($400 \text{ }\mu\text{g/m}^3$) [3, 8]. Nghiên cứu tại Hàn Quốc cho thấy nồng độ TVOC trong nhà mới xây dựng với vật liệu thân thiện môi trường dao động $200\text{-}400 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ trong 3 tháng đầu [13].

Tốc độ phát thải TVOC đạt đỉnh trong 1-4 tuần đầu sau khi hoàn thành, sau đó giảm nhanh trong 3 tháng đầu và tiếp tục giảm chậm hơn trong 6-12 tháng tiếp theo [13, 14, 16, 24, 25].

d. Các chất ô nhiễm khác

Carbon dioxide (CO_2) trong không khí trong nhà chủ yếu đến từ hô hấp của con người. Mặc dù không phải là chất ô nhiễm từ vật liệu xây dựng, CO_2 là chỉ số quan trọng đánh giá hiệu quả thông gió. Nồng độ CO_2 cao ($>1000 \text{ ppm}$) cho thấy thông gió không đủ, dẫn đến tích tụ các chất ô nhiễm khác [15, 26]. Nghiên cứu tại Ireland cho thấy nồng độ CO_2 trong các văn phòng và trường học thường xuyên vượt 2000 ppm , đặc biệt trong các không gian thông gió tự nhiên [26]. Tiêu chuẩn ASHRAE khuyến nghị nồng độ CO_2 trong nhà không vượt quá 1100 ppm , tương ứng với mức không cao hơn khoảng 700 ppm so với nồng độ CO_2 ngoài trời (xấp xỉ 400 ppm).

Carbon monoxide (CO): Nguồn chính từ đốt cháy không hoàn toàn, thiết bị sưởi, và xâm nhập từ bãi đỗ xe [27]. Nồng độ CO trong văn phòng thường thấp ($< 5 \text{ ppm}$) nhưng có thể tăng cao trong các tòa nhà có bãi đỗ xe ngầm kết nối trực tiếp.

Nitrogen oxides (NOx): Nguồn từ đốt cháy và xâm nhập từ giao thông bên ngoài. Nồng độ NOx trong văn phòng thường thấp hơn ngoài trời nhưng có thể tăng cao trong các tòa nhà gần đường giao thông đông đúc.

2.3. Nguồn gốc phát thải chính

a. Vật liệu xây dựng

Bê tông và vữa: Bê tông và vữa mới có thể phát thải các VOC từ phụ gia hóa học, đặc biệt là các chất làm chậm đông, chất tăng độ dẻo. Ngoài ra, quá trình đóng rắn của bê tông giải phóng độ ẩm cao, làm tăng độ ẩm tương đối trong không gian, gián tiếp thúc đẩy phát thải VOC từ các vật liệu khác [16].

Gạch, đá ốp lát: Keo dán gạch là nguồn phát thải VOC đáng kể, đặc biệt là các loại keo gốc dung môi. Keo dán gốc nước có phát thải thấp hơn nhưng vẫn chứa một số VOC [16, 23].

b. Vật liệu hoàn thiện

Sơn và vecni: Sơn là một trong những nguồn phát thải VOC lớn nhất trong giai đoạn đầu. Sơn gốc dung môi (solvent-based) có hàm lượng VOC rất cao (300-600 g/L), trong khi sơn gốc nước (water-based) có hàm lượng VOC thấp hơn (50-150 g/L) nhưng vẫn đáng kể. Tốc độ phát thải VOC từ sơn đạt đỉnh trong 24-72 giờ đầu sau khi sơn, sau đó giảm nhanh trong 1-2 tuần [12, 16, 23].

Keo dán và chất trám: Các loại keo dán (adhesives) và chất trám (sealants) sử dụng trong xây dựng thường chứa hàm lượng VOC cao. Keo dán gỗ, keo dán thảm, keo dán gạch, và silicon đều là nguồn phát thải đáng kể [16, 23].

Chất chống thấm: Các sản phẩm chống thấm thường chứa dung môi hữu cơ và có thể phát thải VOC trong thời gian dài.

c. Vật liệu nội thất

Gỗ công nghiệp: Gỗ công nghiệp (MDF, plywood, particleboard, chipboard) sử dụng keo urea-formaldehyde là nguồn phát thải formaldehyde chính và lâu dài nhất trong công trình. Tốc độ phát thải formaldehyde từ gỗ công nghiệp phụ thuộc vào: Loại keo sử dụng (urea-formaldehyde > phenol-formaldehyde > melamine-formaldehyde); Tỷ lệ keo/gỗ; Phương pháp xử lý bề mặt (veneer, laminate, sơn); Thời gian lưu kho sau sản xuất; Nhiệt độ và độ ẩm môi trường [12-15].

Vải bọc và thảm: Vải bọc ghế, rèm cửa, và thảm có thể phát thải VOC từ sợi tổng hợp, chất xử lý chống cháy, chống ẩm, và keo dán. Thảm mới là nguồn phát thải đáng kể của 4-phenylcyclohexene (4-PC), chất gây mùi đặc trưng của thảm mới [16].

Đồ nội thất: Bàn, ghế, tủ làm từ gỗ công nghiệp kết hợp với sơn, vecni, và keo dán là nguồn phát thải phức hợp của formaldehyde và TVOC. Nghiên cứu cho thấy phương pháp xử lý bề mặt có ảnh hưởng lớn đến tốc độ phát thải: đồ nội thất có bề mặt phủ kín (laminate, veneer dày) phát thải thấp hơn đáng kể so với bề mặt chỉ sơn hoặc để trần [15].

d. Thiết bị và sản phẩm tiêu dùng

Thiết bị văn phòng: Máy in, máy photocopy phát thải ozone, VOC, và bụi mịn trong quá trình hoạt động. Máy tính và thiết bị điện tử mới có thể phát thải VOC từ nhựa và mạch điện [3].

Sản phẩm tẩy rửa và chăm sóc: Sản phẩm tẩy rửa, nước hoa, sản phẩm chăm sóc cá nhân là nguồn phát thải VOC từ hoạt động của người sử dụng [3].

2.4. Tác động sức khỏe và nghiên cứu dịch tễ học

a. Tác động cấp tính

Sick Building Syndrome (SBS): đây là “Bệnh nhà kín” tập hợp các triệu chứng sức khỏe mà người sử dụng gặp phải khi ở trong tòa nhà, và các triệu chứng này giảm hoặc biến mất khi rời khỏi tòa nhà. Các triệu chứng chính bao gồm: Kích ứng mắt, mũi, họng, đau đầu, mệt mỏi, buồn ngủ, khó tập trung, kích ứng da, khó thở, ngực tức. Nghiên cứu tại Nhật Bản cho thấy nguy cơ SBS tăng gấp 2,94 lần khi nồng độ TVOC vượt $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nguy cơ còn cao hơn khi có mùi khó chịu ngay cả khi TVOC < $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cho thấy vai trò của các VOC có ngưỡng mùi thấp [8].

Kích ứng đường hô hấp: Formaldehyde gây kích ứng niêm mạc mắt, mũi, họng ở nồng độ thấp (> $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$). Các triệu chứng bao gồm: Cảm giác cay, rát mắt, chảy nước mũi, nghẹt mũi, ho, đau họng, khó thở ở người nhạy cảm [1, 21].

Tác động đến năng suất làm việc: Nghiên cứu cho thấy chất lượng không khí trong nhà kém có tác động tiêu cực đáng kể đến năng suất làm việc: Giảm 5-15% năng suất nhận thức (cognitive performance); Tăng 20-50% tỷ lệ nghỉ ốm; Giảm 10-25% tốc độ xử lý thông tin; Tăng 15-30% tỷ lệ lỗi trong công việc [5].

b. Tác động mãn tính

Ung thư: Formaldehyde được WHO/IARC phân loại là chất gây ung thư nhóm 1. Nghiên cứu dịch tễ học cho thấy nguy cơ ung thư vòm họng tăng 1,4-2,0 lần ở người tiếp xúc dài hạn với formaldehyde nồng độ cao ($> 0,5 \text{ mg/m}^3$) [1]. Benzene, một thành phần của TVOC, là chất gây ung thư máu đã được chứng minh. Bụi mịn có thể xâm nhập sâu vào phổi và thậm chí vào máu, gây ra các bệnh về đường hô hấp, tim mạch, và ung thư phổi [1, 28].

Bệnh hô hấp mãn tính: Tiếp xúc dài hạn với PM2.5 và VOC có liên quan đến: Hen phế quản (nguy cơ tăng 1,3-1,8 lần); Bệnh phổi tắc nghẽn mãn tính-COPD (nguy cơ tăng 1,2-1,5 lần); Viêm phế quản mãn tính (nguy cơ tăng 1,4-2,0 lần) [1].

Tác động đến thai nhi và trẻ em: Phụ nữ mang thai tiếp xúc với formaldehyde và VOC nồng độ cao có nguy cơ (sinh non tăng 1,3-1,6 lần); Thai nhẹ cân (nguy cơ tăng 1,2-1,4 lần); Dị tật bẩm sinh tăng. Trẻ em tiếp xúc với IAQ kém có nguy cơ (hen phế quản tăng 1,5-2,5 lần); Dị ứng (nguy cơ tăng 1,3-1,8 lần); Nhiễm trùng hô hấp (nguy cơ tăng 1,2-1,5 lần) [1].

c. Nhóm dân số nhạy cảm

Một số nhóm dân số đặc biệt nhạy cảm với ô nhiễm không khí trong nhà: Phụ nữ mang thai, Trẻ em và trẻ sơ sinh, Người cao tuổi, Người có bệnh lý về hô hấp (hen, COPD, viêm phổi), Người có bệnh tim mạch, Người suy giảm miễn dịch [1]. Đối với các nhóm này, tiêu chuẩn an toàn cần nghiêm ngặt hơn và các biện pháp bảo vệ cần được tăng cường.

3. Kinh nghiệm quốc tế và nghiên cứu tại Việt Nam

3.1. Các nghiên cứu tại một số nước trên thế giới

Nhiều quốc gia đã triển khai các nghiên cứu và chương trình khảo sát về chất lượng không khí trong nhà tại nhà ở, tòa nhà văn phòng và các không gian sử dụng. Các nghiên cứu này đặc biệt nhấn mạnh giai đoạn đầu đưa công trình vào sử dụng, khi phát thải từ vật liệu hoàn thiện, đồ nội thất và điều kiện vận hành thông gió có thể làm gia tăng nồng độ các chất ô nhiễm (Bảng 1).

Bảng 1. Đối tượng, chất ô nhiễm và đánh giá trong giai đoạn đầu vận hành của một số nghiên cứu trên thế giới

Quốc gia	Đối tượng nghiên cứu	Chất ô nhiễm nghiên cứu	Đánh giá	Nguồn tham khảo
Châu Âu (EU)	37 tòa văn phòng mới xây/mới cải tạo	Aldehyde (HCHO, acetaldehyde); VOC (BTEX, limonene, α -pinene...); TVOC	TVOC biến thiên rất lớn; HCHO phổ biến; yếu tố chi phối mạnh là vật liệu/nội thất, nhiệt-ẩm, sản phẩm tiêu dùng, nguồn ngoài trời.	[3]
Bắc Mỹ	Giám sát dài hạn nhiều văn phòng	Chỉ số IAQ; có xét đến lọc không khí	Hoạt động điều hòa-thông gió mặc định thường không đáp ứng IAQ tốt giai đoạn đầu; tăng thông gió 2-3 lần để cải thiện; thông gió kết hợp lọc là tốt nhất.	[5]

Quốc gia	Đối tượng nghiên cứu	Chất ô nhiễm nghiên cứu	Đánh giá	Nguồn tham khảo
Bắc Mỹ	Tòa nhà xây bằng gỗ (giai đoạn trước và thời gian đầu sử dụng)	VOC (liên quan vật liệu gỗ)	Gỗ tự nhiên VOC thấp hơn gỗ công nghiệp; cần thông gió đủ trước khi đưa vào vận hành.	[29]
Trung Quốc	Căn hộ & công trình công cộng mới trang trí, hoàn thiện	Formaldehyde; TVOC	83,6% căn hộ có HCHO vượt chuẩn; nồng độ cao nhất trong 3 tháng đầu; thông gió và thời gian xả khí là then chốt để đạt IAQ.	[6]
Hàn Quốc	Căn hộ mới (giám sát 6 tháng), so sánh với eco và thông thường	TVOC; Formaldehyde	Các sản phẩm thân thiện (Eco-friendly) vẫn có TVOC cao trong 3 tháng đầu; HCHO suy giảm nhanh hơn; phải tăng thông gió để giảm nồng độ xuống 40–60% ,đạt được IAQ sớm hơn.	[13]
Ấn Độ	Văn phòng mới cải tạo	PM2.5; PM10; TVOC; Formaldehyde	PM cao do ngoài trời xâm nhập; TVOC/HCHO vượt chuẩn trong 3 tháng đầu; cần lọc hiệu quả kết hợp thông gió có kiểm soát.	[30]
Thái Lan	Văn phòng	Formaldehyde	Nguồn chính: đồ gỗ công nghiệp mới; tăng thông gió và giảm phát thải tại nguồn để về mức an toàn [21]	

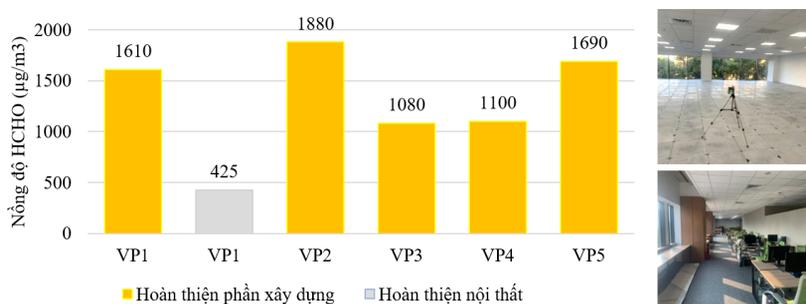
Tổng hợp tại Bảng 1 cho thấy phần lớn các nghiên cứu tập trung vào giai đoạn đầu vận hành, các công trình này đều chỉ ra hiện tượng “đỉnh phát thải” trong khoảng từ 0–3 tháng đầu sau hoàn thiện hoặc cải tạo, đồng thời khẳng định hiệu quả đáng kể của việc tăng cường thông gió và/hoặc kết hợp lọc không khí để giảm nồng độ chất ô nhiễm. Nhóm nghiên cứu tập trung vào vật liệu và đồ nội thất là của EU và Thái Lan góp phần nhận diện các nguồn phát thải chi phối, mô tả động học suy giảm theo thời gian, qua đó cung cấp cơ sở khoa học cho lựa chọn vật liệu, kiểm soát mua sắm, lắp đặt và hoàn thiện quy trình bàn giao.

3.2. Khảo sát, đo đạc 05 văn phòng mới trước khi sử dụng tại Việt Nam

Việc đo đạc chất lượng không khí tại năm văn phòng mới được tiến hành vào tháng 7 năm 2024. Sau khi công trình hoàn thành và các hoạt động thi công lớn kết thúc, không gian được để ổn định khoảng một tháng trước khi tiến hành khảo sát nhằm thu thập số liệu nền. Quá trình đo được tiến hành khi hệ thống điều hoà, thông gió không hoạt động. Các điểm đo được lựa chọn tại vị trí đại diện cho vùng làm việc điển hình. Mẫu không khí được lấy bằng bơm lấy mẫu SIBATA Minipump MP-W5P Dry cell, hút qua ống hấp phụ phục vụ phân tích HCHO và TVOC; đầu lấy mẫu đặt tại độ cao hô hấp (1,2–1,5 m so với sàn). Thời gian lấy mẫu 60 phút. TVOC (quy đổi theo toluene) được lấy mẫu chủ động bằng bơm hút qua ống hấp phụ SKC 226-01, sau đó phân tích tại phòng thí nghiệm bằng GC/FID

2010 Shimadzu. Formaldehyde (HCHO) được lấy mẫu bằng cùng loại bơm, hút qua cartridge silica gel phủ 2,4-dinitrophenylhydrazine và phân tích bằng HPLC với đầu dò UV. Các dung dịch chuẩn (toluene/formaldehyde) và phụ kiện hiệu chuẩn/chuẩn bị mẫu (heater, micropipette, diffusion fan) được sử dụng để đảm bảo độ tin cậy của quy trình phân tích.

Kết quả đo formaldehyde (HCHO) tại năm văn phòng ở Hà Nội sau khi hoàn thiện phần xây dựng cho thấy nồng độ rất cao. Cụ thể, giá trị HCHO dao động từ 1080 đến 1880 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, trong đó cao nhất tại Văn phòng 2 (1880 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) và thấp nhất tại Văn phòng 3 (1080 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ngoài ra, tại Văn phòng 1 sau khi hoàn thiện nội thất, nồng độ đo được là 425 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vẫn cao khi tham chiếu với TCVN 13521:2022 (Hình 1). Các giá trị đo được đều vượt xa ngưỡng tham chiếu thường được sử dụng trong đánh giá IAQ, khả năng tồn tại nguồn phát thải mạnh từ vật liệu xây dựng hoặc nội thất. Tuy nhiên, số liệu thu được là phép đo đơn lẻ tại một thời điểm, do đó chưa phản ánh đầy đủ phơi nhiễm trung bình theo thời gian và chưa đủ cơ sở để kết luận theo các quy định. Dù vậy, kết quả vẫn là tín hiệu sàng lọc quan trọng, cho thấy nguy cơ phát thải mạnh từ vật liệu hoàn thiện và nội thất, đồng thời gợi ý nhu cầu áp dụng các biện pháp kiểm soát tại nguồn, thông gió tăng cường trước khi sử dụng và kế hoạch giám sát theo thời gian để xác nhận xu hướng suy giảm và đánh giá rủi ro phơi nhiễm thực tế.



Hình 1. Kết quả đo HCHO của 05 văn phòng mới tại Hà Nội

Từ tổng hợp từ các nghiên cứu quốc tế và số liệu đo thực tế của năm công trình tại Việt Nam cho thấy cần thiết kiểm soát IAQ trong giai đoạn đầu vận hành từ việc kiểm soát nguồn thải thông qua lựa chọn vật liệu, đến việc áp dụng thông gió tăng cường trước khi đưa vào sử dụng đồng thời kiểm soát nhiệt-ẩm và điều chỉnh vận hành theo số liệu thu được để làm cơ sở đề xuất giải pháp kiểm soát IAQ đối với từng loại công trình.

4. Một số đề xuất nhằm kiểm soát chất lượng không khí trong giai đoạn đầu vận hành công trình ở Việt Nam

4.1. Giải pháp kiểm soát phát thải tại nguồn

- Lựa chọn vật liệu xanh và chứng nhận: Kiểm soát tại nguồn bắt đầu từ lựa chọn vật liệu nội thất phát thải thấp theo các tiêu chí định lượng và có chứng nhận. Với vật liệu hoàn thiện, ưu tiên sơn gốc nước, keo dán và chất trám gốc nước, tránh sản phẩm chứa dung môi và các hợp chất như toluene, xylene hoặc các thành phần liên quan formaldehyde. Với sàn và đồ gỗ công nghiệp, yêu cầu phát thải formaldehyde thấp, đồng thời ưu tiên bề mặt phủ kín (laminat/veneer dày) để giảm phát thải. Quy trình lựa chọn cần được “chuẩn hóa” theo 3 giai đoạn: (i) thiết kế, lập danh mục vật liệu ưu tiên theo IAQ; (ii) đấu thầu, đưa yêu cầu IAQ vào Hồ sơ mời thầu và đánh giá phương án; (iii) thi công, kiểm tra nhân/chứng chỉ, từ chối vật liệu không đạt và lưu vết hồ sơ vật liệu đã lắp đặt.

- Quy trình thi công sạch (Clean construction process): Thi công sạch nhằm hạn chế phát sinh bụi, VOC và ẩm, đây là ba tác nhân làm suy giảm IAQ và kéo dài thời gian ổn định sau bàn giao. Trước và trong thi công, vật liệu cần được bảo quản khô ráo, kiểm tra loại bỏ vật liệu ẩm/hư hỏng; các bề mặt

đã hoàn thiện phải che phủ, phân vùng và cô lập để tránh tái nhiễm bụi. Thông gió trong thi công cần duy trì liên tục, đặc biệt sau các công việc phát sinh VOC cao (sơn, keo), đồng thời hạn chế vận hành hệ thống HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) để tránh nhiễm bẩn hệ thống.

- Quản lý lịch trình thi công: Quản lý lịch trình là yếu tố quyết định mức rủi ro IAQ khi bàn giao. Trình tự thi công nên tuân thủ nguyên tắc phải hoàn thành hạng mục “ướt” và hạng mục phát sinh bụi trước; các công việc phát sinh VOC cao (sơn, keo, phủ bề mặt) thực hiện càng sớm càng tốt để có thời gian khô và thông gió; sau đó mới lắp sàn, nội thất cố định, thiết bị; cuối cùng là vệ sinh hoàn thiện, xả khí, lắp nội thất di động và đo kiểm IAQ. Cần bố trí hoàn thiện sớm hơn thời điểm bàn giao từ 4–6 tuần để đủ thời gian cho xả khí và kiểm tra IAQ, đồng thời có thời gian xử lý nếu phát hiện vượt ngưỡng.

4.2. Giải pháp tăng cường thông gió

Thông gió là nhóm giải pháp quan trọng thứ hai sau kiểm soát tại nguồn, với vai trò loại bỏ các chất ô nhiễm đã phát thải vào không khí và bổ sung không khí sạch. Trong giai đoạn đầu vận hành, cần ưu tiên các chiến lược thông gió chủ động, liên tục và có kiểm soát, đồng thời cân bằng giữa hiệu quả IAQ và chi phí năng lượng.

- Xả khí: Thông gió tăng cường trước khi đưa công trình vào sử dụng nhằm thải bỏ các chất ô nhiễm phát thải từ vật liệu mới. Quy trình khuyến nghị bắt đầu ngay sau hoàn thiện và vệ sinh công nghiệp, duy trì 2–4 tuần (tối thiểu 2 tuần), vận hành 24/7 với 100% không khí ngoài trời; thể tích trao đổi không khí tối thiểu 0,3 lần/giờ khối tích phòng (khuyến nghị 0,5–1,0 lần), giữ nhiệt độ từ 20–25 °C và độ ẩm nhỏ hơn 60% để hạn chế nguy cơ nấm mốc [31–33]. Điều kiện tiên quyết là hệ thống HVAC hoàn thiện, công trình kín nước, có điện và có giám sát đảm bảo vận hành liên tục.

- Tăng cường tỷ lệ thông gió: Trong 0–3 tháng đầu, khuyến nghị vận hành thông gió cao hơn mức tiêu chuẩn (khoảng 2–3 lần), ưu tiên 100% không khí ngoài trời và hạn chế tái tuần hoàn để tránh “tái phân phối” VOC/HCHO [32, 33]. Về tỷ lệ thông gió, có thể duy trì khoảng 1,0–1,5 lần/giờ; giai đoạn 3–12 tháng giảm xuống mức trung gian (0,7–1,0 lần/giờ) và cho phép tái tuần hoàn có kiểm soát; sau 12 tháng vận hành theo tiêu chuẩn và tối ưu năng lượng [34]. Về chiến lược, thông gió liên tục hiệu quả nhất trong giai đoạn đầu; sau đó có thể chuyển sang gián đoạn kèm thông gió ban đêm/cuối tuần ở mức 30–50% và tăng cường trước giờ làm 1–2 giờ, tránh tắt hoàn toàn để không tích tụ ô nhiễm.

- Thông gió tự nhiên và cơ học: Thông gió tự nhiên có ưu điểm chi phí năng lượng thấp nhưng khó kiểm soát lưu lượng, không lọc được bụi và các chất ô nhiễm ngoài trời và hạn chế kiểm soát nhiệt-ẩm; do đó phù hợp hơn cho công trình thấp tầng, khu vực có không khí ngoài trời tốt, hoặc giai đoạn xả khí khi chưa có người. Ngược lại, thông gió cơ học cho phép kiểm soát chính xác lưu lượng, tích hợp lọc và kiểm soát nhiệt-ẩm, phù hợp với nhà cao tầng và khu vực ô nhiễm và có khí hậu nóng ẩm. Trong điều kiện thích hợp cần kết hợp hai hình thức, tận dụng điều kiện thuận lợi để tiết kiệm năng lượng nhưng vẫn đảm bảo IAQ; nên ưu tiên cơ học cho văn phòng cao tầng và cân nhắc hỗn hợp cho công trình thấp tầng.

- Chiến lược thông gió thông minh: Các chiến lược thông minh giúp tối ưu IAQ và năng lượng khi công trình đã qua giai đoạn phát thải đỉnh. Thông gió theo CO₂ phù hợp sau 3–6 tháng (khi VOC/HCHO giảm), yêu cầu cảm biến CO₂ chính xác và BMS có khả năng điều khiển. Trong 0–3 tháng đầu, không nên giảm thông gió theo nhu cầu mà cần duy trì mức cao định mức.

4.3. Giải pháp lọc và làm sạch không khí

Trong giai đoạn đầu vận hành, thông gió làm pha loãng và thải bỏ ô nhiễm, trong khi các công nghệ lọc đóng vai trò loại bỏ trực tiếp ngay trong không gian sử dụng. Cần lựa chọn công nghệ theo bản chất chất ô nhiễm: dạng hạt (PM, vi sinh) cần lọc cơ học hiệu suất cao; hợp chất khí (VOC/HCHO,

mùi) cần hấp phụ/oxy hóa; các công nghệ tạo phản ứng (PCO/plasma/ion hóa) đòi hỏi đánh giá chặt chẽ về an toàn và sản phẩm phụ.

- Bộ lọc HEPA (High-Efficiency Particulate Air): HEPA là chuẩn lọc hạt hiệu suất cao, điển hình loại bỏ $\geq 99,97\%$ hạt có kích thước $0,3 \mu\text{m}$, nhờ cơ chế chặn, va đập, khuếch tán. Về ứng dụng, HEPA có thể tích hợp trong hệ thống HVAC trung tâm hoặc dùng dưới dạng máy lọc di động theo phòng. Khi nâng cấp lên HEPA, cần kiểm tra tổn thất áp suất của quạt, có thể làm tăng chi phí vận hành và yêu cầu thiết kế lại. Bảo trì (thay lọc định kỳ, kiểm tra độ kín) là điều kiện bắt buộc để duy trì hiệu quả.

- Lọc carbon hoạt tính (Activated Carbon Filter): Carbon hoạt tính hấp phụ VOC và mùi nhờ diện tích bề mặt rất lớn và hệ lỗ rỗng vi mô. Trong IAQ giai đoạn đầu, carbon hoạt tính đóng vai trò then chốt để xử lý TVOC và mùi, và có thể xử lý một phần formaldehyde, đặc biệt khi dùng carbon tẩm hóa chất chuyên dụng. Carbon hoạt tính thường được bố trí sau HEPA để tránh bụi làm “bít” bề mặt hấp phụ, áp dụng cả trong HVAC lẫn máy lọc di động kết hợp (HEPA và carbon hoạt tính).

- Quang xúc tác (Photocatalytic Oxidation – PCO): PCO sử dụng xúc tác (thường TiO_2) dưới chiếu xạ UV để tạo gốc oxy hóa mạnh, có khả năng phân hủy VOC/HCHO thay vì chỉ hấp phụ. Ưu điểm là tiềm năng xử lý khí và ức chế vi sinh, giảm phụ thuộc thay lọc; tuy nhiên hiệu quả phụ thuộc rất lớn vào thiết kế (diện tích xúc tác, cường độ UV, thời gian tiếp xúc) và có nguy cơ tạo sản phẩm phụ (ví dụ ozone hoặc aldehyde thứ cấp) nếu kiểm soát không tốt.

- Plasma và ion hóa: Plasma có thể phân hủy VOC/khử mùi/điệt khuẩn, song một số cấu hình có khả năng phát sinh ozone và sản phẩm phụ không mong muốn. Ion hóa phát ra ion nhằm làm hạt kết tụ/lắng đọng hoặc dễ lọc hơn. Khuyến nghị chung là chỉ dùng thiết bị có chứng nhận không tạo ozone, không coi đây là giải pháp chính, và nên tích hợp sau khi đã có nền tảng thông gió kết hợp lọc cơ học và hấp phụ khí.

4.4. Kiểm soát nhiệt độ và độ ẩm

Trong giai đoạn đầu vận hành, kiểm soát nhiệt độ và độ ẩm là thành phần then chốt của chiến lược IAQ vì chúng chi phối trực tiếp động học phát thải VOC/HCHO từ vật liệu hoàn thiện và đồ nội thất, đồng thời liên quan chặt chẽ đến nguy cơ nấm mốc và tiện nghi. Nhiệt độ và độ ẩm cao có thể làm “tăng tốc” phát thải, khiến hiệu quả thông gió và lọc bị suy giảm [14, 17]. Với khí hậu nóng ẩm ở Việt Nam, khuyến nghị vận hành điều hòa để duy trì nhiệt độ khoảng $23\text{--}25^\circ\text{C}$ và độ ẩm $50\text{--}60\%$ trong giai đoạn đầu sử dụng [12].

4.5. Giải pháp giám sát liên tục và tích hợp quản lý tòa nhà

Trong giai đoạn đầu vận hành, IAQ chịu tác động đồng thời từ nguồn phát thải (vật liệu và nội thất), điều kiện thông gió, lọc khí và trạng thái nhiệt-ẩm. Vì vậy, cách tiếp cận hiệu quả là tổ chức giải pháp tích hợp có mục tiêu, lộ trình theo thời gian và cơ chế giám sát, điều khiển để duy trì hiệu quả ổn định.

- Giải pháp tích hợp: Nguyên tắc cốt lõi là nhiều lớp kiểm soát: kiểm soát tại nguồn để giảm tải ô nhiễm; thông gió để pha loãng và xả khí; lọc để loại bỏ bụi hoặc khí; kiểm soát nhiệt-ẩm để hạn chế gia tốc phát thải và nấm mốc; giám sát để xác nhận tuân thủ và hiệu chỉnh vận hành. Trên cơ sở đó có thể đo kiểm IAQ trước bàn giao và đánh giá lại sau 1, 3, 6 tháng để theo dõi xu hướng suy giảm.

- Hệ thống quản lý tòa nhà thông minh (Smart BMS): Smart BMS là “hạ tầng điều hành” giúp chuyển các giải pháp từ dạng khuyến nghị sang vận hành ổn định. Về chức năng, BMS thu thập dữ liệu từ cảm biến IAQ, lưu trữ–phân tích và hiển thị, đồng thời tự động điều khiển thông gió, nhiệt ẩm và thiết bị lọc theo ngưỡng hoặc theo thuật toán tối ưu, giúp phát hiện sớm sai lệch vận hành và giảm rủi ro khiếu nại.

- Hiện thị IAQ công khai: Công khai hóa IAQ là một công cụ quản trị quan trọng, giúp tăng minh bạch, nâng cao nhận thức người sử dụng và tạo động lực duy trì vận hành tốt. Nội dung hiện thị nên tập trung vào các chỉ số dễ hiểu và có ý nghĩa vận hành (PM_{2.5}, CO₂, TVOC, nhiệt độ, độ ẩm), kèm xu hướng theo thời gian, so sánh với tiêu chuẩn và khuyến nghị hành động. Đáng chú ý, các nghiên cứu trong nước về thiết kế–xây dựng mạng lưới giám sát bụi PM_{2.5} và PM₁₀ theo thời gian thực cho thấy tính khả thi của việc thu thập, truyền dữ liệu liên tục để phục vụ cảnh báo và truyền thông rủi ro tại Việt Nam [35, 36]. Khi được thiết kế hợp lý và dựa trên dữ liệu tin cậy, hiện thị IAQ không chỉ nâng cao sự tin cậy và hài lòng của người sử dụng, mà còn hỗ trợ điều chỉnh hành vi theo hướng có lợi cho chất lượng không khí trong nhà.

5. Kết luận

Bài báo đã thực hiện tổng hợp có hệ thống các nghiên cứu quốc tế về chất lượng không khí trong nhà ở giai đoạn đầu vận hành công trình và đề xuất các giải pháp cho Việt Nam. Kết quả cho thấy giai đoạn từ 1 đến 3 tháng sau hoàn thiện là thời kỳ có rủi ro IAQ cao nhất, khi nồng độ TVOC, HCHO và bụi mịn thường đạt mức đỉnh. Điều này dẫn đến các hệ quả sức khỏe đáng kể, bao gồm tăng nguy cơ mắc hội chứng “bệnh nhà kín” và suy giảm năng suất lao động. Các yếu tố ảnh hưởng chính bao gồm: (i) vật liệu xây dựng, hoàn thiện và nội thất là nguồn phát thải quyết định; (ii) nhiệt độ và độ ẩm làm thúc đẩy tốc độ phát thải; (iii) thông gió là yếu tố then chốt giúp pha loãng và loại bỏ chất ô nhiễm; và (iv) nồng độ các chất ô nhiễm có xu hướng giảm dần theo thời gian, song tốc độ giảm phụ thuộc mạnh vào điều kiện vận hành và thông gió.

Về giải pháp, tổng hợp các nghiên cứu cho thấy việc kiểm soát tại nguồn thông qua sử dụng vật liệu phát thải VOC thấp là biện pháp hiệu quả và bền vững nhất về mặt kinh tế; việc xả khí trong khoảng 2–4 tuần có thể giảm đáng kể nồng độ ban đầu; đồng thời cần tăng cường lưu lượng thông gió (tối thiểu từ 2 đến 3 lần so với mức thông thường) trong giai đoạn đầu, kết hợp với bộ lọc không khí và kiểm soát nhiệt-ẩm để đạt hiệu quả tối ưu.

Nghiên cứu này đóng góp vào lĩnh vực IAQ tại Việt Nam theo ba khía cạnh chính: Thứ nhất, cung cấp tổng quan có hệ thống về đặc trưng IAQ giai đoạn đầu vận hành. Thứ hai, qua việc so sánh các nghiên cứu từ châu Âu, Bắc Mỹ, châu Á với khảo sát thực tế tại một số văn phòng mới ở Việt Nam, bài báo làm rõ các yếu tố then chốt ảnh hưởng đến việc cải thiện IAQ, bao gồm vật liệu phát thải thấp, quy trình bàn giao có xả khí và giám sát IAQ trong giai đoạn vận hành ban đầu. Thứ ba, nhận diện các rào cản chính về thị trường vật liệu, năng lực kỹ thuật, khả năng thử nghiệm và khoảng trống pháp lý, từ đó đưa ra cơ sở để các bên liên quan (chủ đầu tư, nhà thầu, cơ quan quản lý) thúc đẩy áp dụng các biện pháp kiểm soát IAQ một cách nhất quán và khả thi hơn tại Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

- [1] Maung, T. Z., Bishop, J. E., Holt, E., Turner, A. M., Pfrang, C. (2022). [Indoor Air Pollution and the Health of Vulnerable Groups: A Systematic Review Focused on Particulate Matter \(PM\), Volatile Organic Compounds \(VOCs\) and Their Effects on Children and People with Pre-Existing Lung Disease](#). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14):8752.
- [2] Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., Engelmann, W. H. (2001). [The National Human Activity Pattern Survey \(NHAPS\): a resource for assessing exposure to environmental pollutants](#). *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 11(3):231–252.
- [3] Spinazzè, A., Campagnolo, D., Cattaneo, A., Urso, P., Sakellaris, I. A., Saraga, D. E., Mandin, C., Canha, N., Mabilia, R., Perreca, E., Mihucz, V. G., Szigeti, T., Ventura, G., Oliveira Fernandes, E., Kluzenaar, Y., Cornelissen, E., Hänninen, O., Carrer, P., Wolkoff, P., Cavallo, D. M., Bartzis, J. G. (2020). [Indoor gaseous air pollutants determinants in office buildings—The OFFICAIR project](#). *Indoor Air*, 30(1):76–87.

- [4] Roser, M. (2021). *Data review: how many people die from air pollution?*
- [5] Pahlavikhah Varnosfaderani, M., Heydarian, A., Jazizadeh, F. (2024). *A longitudinal study of IAQ metrics and the efficacy of default HVAC ventilation. Building and Environment*, 254:111353.
- [6] Chang, T., Ren, D., Shen, Z., Huang, Y., Sun, J., Cao, J., Zhou, J., Liu, H., Xu, H., Zheng, C., Pan, H., He, C. (2017). *Indoor Air Pollution Levels in Decorated Residences and Public Places over Xi'an, China. Aerosol and Air Quality Research*, 17(9):2197–2205.
- [7] Suzuki, N., Nakaoka, H., Nakayama, Y., Tsumura, K., Takaguchi, K., Takaya, K., Eguchi, A., Hanazato, M., Todaka, E., Mori, C. (2021). *Association between sum of volatile organic compounds and occurrence of building-related symptoms in humans: A study in real full-scale laboratory houses. Science of The Total Environment*, 750:141635.
- [8] Tsumura, K., Nakaoka, H., Suzuki, N., Takaguchi, K., Nakayama, Y., Shimatani, K., Mori, C. (2023). *Is indoor environment a risk factor of building-related symptoms? PLOS ONE*, 18(1):e0279757.
- [9] Lee, J., Wargoeki, P., Chan, Y., Chen, L., Tham, K. (2019). *Indoor environmental quality, occupant satisfaction, and acute building-related health symptoms in Green Mark-certified compared with non-certified office buildings. Indoor Air*, 29(1):112–129.
- [10] Tham, K. W., Wargoeki, P., Tan, Y. F. (2015). *Indoor environmental quality, occupant perception, prevalence of sick building syndrome symptoms, and sick leave in a Green Mark Platinum-rated versus a non-Green Mark-rated building: A case study. Science and Technology for the Built Environment*, 21(1): 35–44.
- [11] Hà, P. T. H., Trung, N. T., Tuấn, N. V., Tới, P. V., Dũng, T. Q., Trần Thị Minh Nguyệt, Đ. T. C., Phương, N. T. K., Lợi, T. T., Hoa, N. T. (2025). *Hướng dẫn kỹ thuật thiết kế, thi công và vận hành công trình đảm bảo chất lượng không khí trong nhà theo TCVN 13521:2022*. Nhà xuất bản Xây dựng, NXB Xây dựng.
- [12] Cheng, Z., Lei, N., Xiong, J. (2025). *Investigating the early-stage emissions of formaldehyde/VOCs from building materials and their influencing factors. Environmental Technology*, 46(28):5709–5724.
- [13] Jung, C., Abdelaziz Mahmoud, N. S., Al Qassimi, N., Elsamanoudy, G. (2023). *Preliminary Study on the Emission Dynamics of TVOC and Formaldehyde in Homes with Eco-Friendly Materials: Beyond Green Building. Buildings*, 13(11):2847.
- [14] Mai, J.-L., Yang, W.-W., Zeng, Y., Guan, Y.-F., Chen, S.-J. (2024). *Volatile organic compounds (VOCs) in residential indoor air during interior finish period: Sources, variations, and health risks. Hygiene and Environmental Health Advances*, 9:100087.
- [15] Sherzad, M., Jung, C. (2022). *Evaluating the emission of VOCs and HCHO from furniture based on the surface finish methods and retention periods. Frontiers in Built Environment*, 8:1062255.
- [16] Guo, S., Liang, W. (2024). *Volatile organic compounds and odor emissions characteristics of building materials and comparisons with the on-site measurements during interior construction stages. Building and Environment*, 252:111257.
- [17] Lin, W.-T., Tsai, R.-Y., Chen, H.-L., Tsay, Y.-S., Lee, C.-C. (2022). *Probabilistic Prediction Models and Influence Factors of Indoor Formaldehyde and VOC Levels in Newly Renovated Houses. Atmosphere*, 13 (5):675.
- [18] Kumar, P., Singh, S., Tyagi, E., Pathak, V. M., Gupta, S., Singh, R. (2024). *Role of Gases, VOC, PM2.5, and PM10 in Biological Contamination in Indoor Areas. Airborne Biocontaminants and Their Impact on Human Health*, Wiley, 89–107.
- [19] Tepeneu, A., Chambre, D., Surdea-Blaga, T., Lupitu, A., Moisa, C., Copolovici, D. M., Copolovici, L. (2025). *The Variability of Indoor Air Pollutants in the Office and Their Impact on the Workers' Health. Polish Journal of Environmental Studies*, 34(1):835–849.
- [20] Shin, S. H., Jo, W. K. (2012). *Volatile organic compound concentrations, emission rates, and source apportionment in newly-built apartments at pre-occupancy stage. Chemosphere*, 89(5):569–578.
- [21] Chuthong, W., Surawattanasakul, V., Sapbamrer, R., Sirikul, W. (2024). *Investigating exceedances of formaldehyde levels and source identification in offices of an academic medical institute. Journal of Occupational Health*, 66(1).
- [22] Harb, P., Locoge, N., Thevenet, F. (2018). *Emissions and treatment of VOCs emitted from wood-based construction materials: Impact on indoor air quality. Chemical Engineering Journal*, 354:641–652.

- [23] Liang, W., Hu, Y., Ren, L., Xu, Y. (2024). Volatile organic compounds and odor emissions from typical building materials and air sample storage time analysis. *Building and Environment*, 255:111433.
- [24] Gallon, V., Le Cann, P., Sanchez, M., Dematteo, C., Le Bot, B. (2020). Emissions of VOCs, SVOCs, and mold during the construction process: Contribution to indoor air quality and future occupants' exposure. *Indoor Air*, 30(4):691–710.
- [25] Shin, S.-H., Jo, W.-K. (2013). Longitudinal variations in indoor VOC concentrations after moving into new apartments and indoor source characterization. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(6):3696–3707.
- [26] Collison, A., McGrath, J., Byrne, M. (2024). 187 An evaluation of indoor environmental quality in offices and schools in Ireland. *Annals of Work Exposures and Health*, 68(Supplement_1):1–1.
- [27] Anh Le, H., Thuy Linh, L. (2019). Assessment of Indoor and Ambient Air Pollution at Complex Buildings in Hanoi. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 35(3).
- [28] Trung, N. T., Anh, H. Q., Tue, N. M., Suzuki, G., Takahashi, S., Tanabe, S., Khai, N. M., Hong, T. T., Dau, P. T., Thuy, P. C., Tuyen, L. H. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne particulate matter samples from Hanoi, Vietnam: Particle size distribution, aryl hydrocarbon ligand receptor activity, and implication for cancer risk assessment. *Chemosphere*, 280:130720.
- [29] Alapieti, T., Vornanen-Winqvist, C., Mikkola, R., Salonen, H. (2023). Measured and perceived indoor air quality in three low-energy wooden test buildings. *Wood Material Science & Engineering*, 18(3): 827–840.
- [30] Shukla, P., Mishra, S., Goswami, S. (2024). A field study of investigation of indoor environmental quality status in Indian offices: Concerns and influencing building factors. *Journal of Building Engineering*, 86: 108648.
- [31] ASHRAE, ANSI/ASHRAE/USGBC/IES Standard 189.1-2009 (2009). *Standard for the Design of High-performance Green Buildings: Except Low-rise Residential Buildings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [32] Lee, K., Park, S.-I., Park, J. S. (2024). Flushing newly built residential buildings with outdoor air for reducing formaldehyde and VOCs concentrations. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 23(5):1646–1657.
- [33] Marzouk, O. A. (2024). Evolution of the (Energy and Atmosphere) credit category in the LEED green buildings rating system for (Building Design and Construction: New Construction), from version 4.0 to version 4.1. *Journal of Infrastructure Policy and Development*, 8(8):5306.
- [34] Liu, N., Zhang, X., Wang, L., Liang, K., Zhang, Y., Cao, J. (2022). Early-Stage Emissions of Formaldehyde and Volatile Organic Compounds from Building Materials: Model Development, Evaluation, and Applications. *Environmental Science & Technology*, 56(20):14680–14689.
- [35] Hiếu, B. T., Trung, N. T. (2018). Đánh giá độ tin cậy của thiết bị giám sát chất lượng môi trường không khí trong công tác quan trắc môi trường không khí xung quanh. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 12(4):106–114.
- [36] Trung, N. T., Lan, Đ. T. P., Duân, Đ. H., Tuyền, L. H. (2020). Thiết kế và xây dựng mạng lưới giám sát bụi PM_{2,5} và PM₁₀ theo thời gian thực. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 14(1V):114–120.