

Đánh giá tác động môi trường tại công trường xây dựng và đề xuất giải pháp giám sát dựa trên IoT

Nguyễn Anh Thư^{1,2}, Mã Ngọc Thanh Huyền^{1,2*}, Kiều Nguyễn Việt Hùng^{1,2}

¹ Bộ môn Thi Công & Quản lý xây dựng, Khoa Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM, Việt Nam

² Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

TỪ KHÓA

Giám sát môi trường
Công trường xây dựng
IoT
Bụi
Tiếng ồn
Độ rung
Khí độc

TÓM TẮT

Công trường xây dựng thường phát sinh nhiều vấn đề môi trường như bụi, tiếng ồn, rung và khí độc, gây ảnh hưởng đến sức khỏe người lao động và cư dân. Nghiên cứu này đánh giá mức độ tác động của các yếu tố trên thông qua khảo sát định lượng hai nhóm đối tượng: người lao động và cư dân lân cận. Phân tích kiểm định T cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa hai nhóm, đặc biệt về cảm nhận tiếng ồn và khí độc. Dựa trên các kết quả và phân tích công nghệ, nghiên cứu đề xuất hệ thống giám sát môi trường dựa trên Internet of Things (IoT), hỗ trợ theo dõi thời gian thực và tích hợp với Building Information Modeling (BIM) hướng đến Digital Twin trong tương lai.

KEYWORDS

Environmental monitoring
Construction site
IoT
Dust
Noise
Vibration
Hazardous gases

ABSTRACT

Construction sites often generate various environmental issues such as dust, noise, vibration, and toxic gases, which negatively impact both workers' health and nearby residents. This study evaluates the perceived impact of these environmental factors through a quantitative survey conducted on two target groups: construction workers and adjacent residents. Independent T-test analysis reveals significant differences between the two groups, particularly in their perception of noise and toxic gases. Based on the survey findings and a review of technological advancements, the study proposes an environmental monitoring system leveraging the Internet of Things (IoT), enabling real-time data tracking and integration with Building Information Modeling (BIM), with the long-term goal of developing a Digital Twin for construction sites.

1. Giới thiệu

Các công trường xây dựng thường phát sinh nhiều vấn đề về môi trường như khói, bụi, khí thải độc hại và độ rung từ máy móc hạng nặng. Bụi mịn phát sinh từ công trường xây dựng có thể gây ra nguy cơ sức khỏe nghiêm trọng cho người lao động trực tiếp và cả cư dân sống gần đó [1]. Bụi được xem là "mối nguy vô hình" thường bị xem nhẹ, nhưng việc hít thở bụi liên tục có thể dẫn đến các bệnh hô hấp mãn tính, thậm chí gây tàn tật hoặc tử vong [2] [3]. Bên cạnh bụi, các loại khói và khí thải độc hại (ví dụ như khí CO từ động cơ, hơi dung môi từ sơn, khói hàn cắt kim loại) cũng gây ảnh hưởng xấu đến sức khỏe: tiếp xúc lâu dài có thể dẫn đến các vấn đề về di truyền [4], gây tổn thương lâu dài cho người lao động. Tiếng ồn trong công trường cũng là tác nhân gây ảnh hưởng trực tiếp đến con người, người lao động thường xuyên tiếp xúc với mức độ tiếng ồn vượt quá giới hạn an toàn, dẫn đến nguy cơ cao mắc các vấn đề về thính giác và sức khỏe tổng thể [5]. Ngoài ra, độ rung sinh ra từ hoạt động thi công (đóng cọc, máy đầm, xe tải nặng) có thể tác động tiêu cực đến cộng đồng và công trình lân cận, rung động quá mức không chỉ gây nứt hỏng kết cấu mà còn ảnh hưởng đến đời sống tinh thần của người dân xung quanh [6].

Môi trường tại công trường xây dựng nếu không được kiểm soát hiệu quả có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe người lao

động và cuộc sống cư dân xung quanh [7]. Dù nhiều quốc gia đã ban hành giới hạn về bụi, tiếng ồn, rung động và yêu cầu các biện pháp giảm thiểu [8] [9] [10], việc giám sát hiện nay vẫn chủ yếu dựa trên kiểm tra định kỳ, dẫn đến phát hiện muộn và khó xử lý kịp thời [11]. Trước thực trạng đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá tác động của các yếu tố môi trường và đề xuất ứng dụng công nghệ IoT như một giải pháp chủ động, nâng cao hiệu quả giám sát tại công trường xây dựng.

2. Tổng quan nghiên cứu

2.1. Phương pháp giám sát môi trường công trình xây dựng hiện nay

Các yếu tố môi trường trên công trường xây dựng – bao gồm bụi mịn, tiếng ồn, rung động và khí thải độc hại – đều có ảnh hưởng lớn đến sức khỏe và an toàn của người lao động cũng như cộng đồng xung quanh. Việc kiểm soát các yếu tố này hiện vẫn chủ yếu dựa vào giám sát định kỳ bằng thiết bị cầm tay hoặc qua quan trắc môi trường thủ công tại một số thời điểm cố định [12]. Các chỉ số như bụi, tiếng ồn và độ rung thường được đo định kỳ, sau đó tổng hợp vào báo cáo giấy hoặc bảng tính. Cách làm này tuy đáp ứng yêu cầu pháp lý, nhưng có hạn chế lớn về độ bao phủ, tính cập nhật và khả năng cảnh báo sớm.

*Liên hệ tác giả: kts.mangoc thanhhuyen@gmail.com

Nhận ngày 08/05/2025, sửa xong ngày 04/06/2025, chấp nhận đăng ngày 05/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.966>



Hình 1. Các thiết bị chuyên dụng quan trắc môi trường định kỳ của công trường.

Sự phát triển của IoT đã mở ra một bước tiến lớn trong việc kết nối mạng lưới các cảm biến thông minh phục vụ quản lý công trường. IoT cho phép các thiết bị cảm biến thu thập và truyền dữ liệu không dây theo thời gian thực, giúp nhà quản lý theo dõi sát sao điều kiện hiện trường từ xa, giám sát môi trường, an toàn lao động và quản lý tiến độ thi công [13]. Các nghiên cứu hiện tại chủ yếu tập trung vào phát triển những hệ thống giám sát bụi mịn (Construction Site Fine Dust Monitoring System – CPMS) [14], triển khai cảm biến đo chất lượng

không khí, thiết lập mạng cảm biến đo rung động kết cấu [15], và ứng dụng thiết bị đeo IoT nhằm nâng cao an toàn cho công nhân [16]. Ngoài ra, một số nghiên cứu đã đề xuất tích hợp dữ liệu từ cảm biến IoT vào mô hình thông tin công trình BIM nhằm nâng cao khả năng phân tích và ra quyết định [17]. Wang et al. (2024) đề xuất một khung tích hợp BIM 4D và dữ liệu cảm biến IoT để theo dõi chất lượng công trình thời gian thực [18]. Tương tự, Thu Anh Nguyen et al. (2020) trình bày phương pháp sử dụng công nghệ 3D laser scanning kết hợp với mô hình BIM để hỗ trợ quản lý khối lượng xây dựng [19].

2.2. Các tiêu chuẩn liên quan đến môi trường công trình đang xây dựng

Chứng chỉ Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) và LOTUS là hai hệ thống đánh giá công trình xanh uy tín, phản ánh cam kết phát triển bền vững trong ngành xây dựng. LEED có phạm vi áp dụng toàn cầu với các tiêu chí nghiêm ngặt về năng lượng, nước, vật liệu và môi trường trong nhà; trong khi LOTUS được phát triển riêng cho điều kiện Việt Nam bởi Hội đồng Công trình Xanh Việt Nam (VGBC). Bên cạnh đó, hệ thống pháp luật Việt Nam cũng ban hành nhiều văn bản quy định chi tiết liên quan đến bảo vệ môi trường trong lĩnh vực xây dựng, đặc biệt là ở giai đoạn thi công. Cụ thể được trình bày như Bảng 1, Bảng 2, Bảng 3, Bảng 4 và Bảng 5.

Bảng 1. Các chỉ số về tiếng ồn trong thi công theo các tiêu chuẩn.

Tiêu chí	Giá trị giới hạn		
	LOTUS	LEED	Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về tiếng ồn (QCVN 26:2010/BTNMT) [20]
Mức ồn tối đa ban ngày (6h-21h)	Đề cập đến việc đảm bảo chất lượng âm thanh trong tòa nhà, nhưng không có yêu cầu cụ thể về kiểm soát tiếng ồn trong quá trình xây dựng.	Khuyến nghị giảm thiểu tiếng ồn từ hoạt động xây dựng để bảo vệ môi trường xung quanh, nhưng không cung cấp mức độ Decibel cụ thể.	Không vượt quá 70 dB
Mức ồn tối đa ban đêm (21h-6h)			Không vượt quá 55 dB

Bảng 2. Các chỉ số về độ rung trong thi công theo các tiêu chuẩn.

Tiêu chí	Giá trị giới hạn		
	LOTUS	LEED	Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về độ rung (QCVN 27:2010/BTNMT) [20]
Mức gia tốc rung cho phép ban ngày (6h-21h)	Không có tiêu chí cụ thể về kiểm soát rung động trong tiêu chuẩn LOTUS.	Không có yêu cầu cụ thể về kiểm soát rung động trong tiêu chuẩn LEED.	Không vượt quá 70 dB
Mức gia tốc rung cho phép ban đêm (21h-6h)			Không vượt quá 60 dB

Bảng 3. Bảng chuyển đổi giá trị mức gia tốc rung tính theo dB và gia tốc rung tính theo mét trên giây bình phương (m/s²).

Mức gia tốc rung, dB	55	60	65	70	75
Gia tốc rung, m/s²	0,006	0,010	0,018	0,030	0,055

Bảng 4. Giá trị giới hạn tối đa các thông số cơ bản trong không khí xung quanh theo QCVN 05:2023/BTNMT [21].

Đơn vị: $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$					
STT	Thông số	Trung bình 1 giờ	Trung bình 8 giờ	Trung bình 24 giờ	Trung bình năm
1	SO ₂	350	-	125	50
2	CO	30000	10000	-	-
3	NO ₂	200	-	100	40
4	O ₃	200	120	-	-
5	Tổng bụi lơ lửng (TSP)	300	-	200	100
6	Bụi PM ₁₀	-	-	100	50
7	Bụi PM _{2,5}	-	-	50	45*
Ghi chú: - Dấu (-) là không quy định - (*): Giá trị nồng độ áp dụng từ ngày 01 tháng 01 năm 2026.					

Bảng 5. Ngưỡng nồng độ bụi và khí độc trước khi bàn giao đối với tiêu chuẩn LEED [22] và tiêu chuẩn LOTUS [23].

Chỉ số / Yêu cầu	LEED	LOTUS
PM2.5 (bụi mịn)	$\leq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (nơi không bị ô nhiễm theo EPA), hoặc $\leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (khu vực bị ô nhiễm PM2.5)	Không quy định cụ thể – theo TCVN 13521:2022: $\leq 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (trong 24h)
PM10 (bụi thô)	$\leq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Không quy định cụ thể
Carbon monoxide (CO)	$\leq 9 \text{ ppm}$ (và không vượt quá 2 ppm so với môi trường ngoài trời)	Theo TCVN 13521: $\leq 10 \text{ mg}/\text{m}^3$
Ozone (O ₃)	$\leq 75 \text{ ppb}$	Không quy định cụ thể
NO ₂ (Nitơ dioxide)	Không nêu cụ thể	Theo TCVN 13521: $\leq 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$

2.3. Nhận xét và định hướng triển khai nghiên cứu

Có thể thấy rằng, mặc dù đã có nhiều tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật về kiểm soát môi trường xây dựng (như QCVN 05:2023/BTNMT về bụi và chất ô nhiễm không khí, QCVN 26:2010/BTNMT về tiếng ồn), nhưng trên thực tế việc giám sát vẫn chủ yếu thực hiện theo phương pháp truyền thống, mang tính đối phó và thiếu cập nhật theo thời gian thực. Bên cạnh đó, phần lớn các nghiên cứu hiện hành tập trung vào giải pháp kỹ thuật và dữ liệu đo đạc, trong khi yếu tố cảm nhận thực tế của những người chịu ảnh hưởng trực tiếp, như người lao động và cư dân, lại ít được xem xét.

Việc khảo sát mức độ cảm nhận về bụi, tiếng ồn, rung chấn và khí độc sẽ giúp phản ánh rõ ràng hơn hiện trạng môi trường thi công, từ góc nhìn chủ quan nhưng giàu giá trị thực tế. Điều này có thể tạo cơ sở để đánh giá nhu cầu và tính cấp thiết của việc triển khai các công nghệ giám sát môi trường tiên tiến như IoT – không chỉ từ góc nhìn kỹ thuật mà còn từ nhu cầu sử dụng và mức độ ảnh hưởng thực tế.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này lựa chọn hướng tiếp cận dựa vào khảo sát định lượng cảm nhận của hai nhóm đối tượng: người lao động trong công trường và cư dân sống gần công trình, như một bước đầu trong quá trình đề xuất và đánh giá tính khả thi của mô hình giám sát môi trường tích hợp BIM-IoT tại công trường xây dựng.

3. Nội dung và phương pháp nghiên cứu

3.1. Nội dung nghiên cứu

Nghiên cứu này nhằm mục đích đánh giá tác động của các yếu tố môi trường tại công trường xây dựng và đề xuất giải pháp ứng dụng công nghệ IoT để nâng cao hiệu quả quản lý môi trường. Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố môi trường cụ thể tại công trường xây dựng, bao gồm bụi, tiếng ồn, rung động và khí thải độc hại, thông qua khảo sát cảm nhận của người lao động và cư dân xung quanh. Bên cạnh đó, nghiên cứu hướng đến đề xuất một hệ thống giám sát môi trường dựa trên công nghệ IoT nhằm hỗ trợ theo dõi thời gian thực và nâng cao hiệu quả quản lý môi trường thi công. Mục tiêu này được xây dựng dựa trên các câu hỏi nghiên cứu cụ thể và giả thuyết liên quan đến sự khác biệt trong cảm nhận giữa các nhóm đối tượng. Quy trình nghiên cứu được thực hiện qua 3 bước: Thu thập dữ liệu, xử lý thông tin và phân tích định lượng.

3.2. Phương pháp nghiên cứu

Để thu thập dữ liệu, phương pháp khảo sát định lượng được sử dụng với bảng câu hỏi cấu trúc, áp dụng thang đo Likert 5 mức cho tiêu chí tần suất xảy ra của bốn yếu tố môi trường chính tại công trường xây dựng: (1) Khói, (2) Bụi, (3) Khí thải độc hại gây khó thở, và (4) Độ rung. Việc khảo sát này nhằm phân tích sự khác biệt trong cảm nhận và mức độ ảnh hưởng giữa hai nhóm đối tượng, từ đó cung cấp cái nhìn toàn diện về tác động của các yếu tố môi trường trong và xung quanh công trường xây dựng. Các mức độ về tần suất được đưa ra dưới

dạng câu hỏi: Anh/ chị nhận thấy (1) Khói, (2) Bụi, (3) Khí thải độc hại gây khó thở, và (4) Độ rung từ công trường thường xuyên như thế nào?

Bảng 6. Thang đo Likert 5 mức độ cho tần suất của các yếu tố trong công trường.

Thang đo	Tần suất	Giải thích
1	Không bao giờ	Yếu tố môi trường không xảy ra hoặc xuất hiện cực kỳ hiếm hoi.
2	Hiếm khi	Yếu tố môi trường xuất hiện một cách rất không thường xuyên.
3	Thỉnh thoảng	Yếu tố môi trường thỉnh thoảng xảy ra, nhưng không phải lúc nào cũng xuất hiện.
4	Thường xuyên	Yếu tố môi trường xuất hiện thường xuyên, gây ảnh hưởng lớn vào các thời điểm nhất định.
5	Luôn luôn	Yếu tố môi trường xuất hiện liên tục hoặc hầu như luôn luôn xảy ra, ảnh hưởng trực tiếp

Khảo sát được tiến hành trên hai nhóm đối tượng chính để so sánh góc nhìn: (i) Nhóm người lao động đang làm việc trực tiếp trong công trường, và (ii) Nhóm người dân sinh sống hoặc làm việc ở khu vực xung quanh công trình (bên ngoài hàng rào công trường). Việc chọn hai nhóm này nhằm thu thập đánh giá từ cả người chịu tác động trực tiếp (người lao động) lẫn người chịu tác động gián tiếp (cộng đồng địa phương). Tổng cộng có $N = 80$ người tham gia khảo sát (với $N_1 = 40$ người lao động và $N_2 = 40$ người dân), được chọn theo phương pháp chọn mẫu ngẫu nhiên thuận tiện tại hiện trường. Đây là phương pháp phù hợp trong điều kiện thực địa hạn chế, tuy nhiên có thể tiềm ẩn rủi ro thiên lệch mẫu (bias) do việc lựa chọn phụ thuộc vào sự sẵn có của người được khảo sát tại thời điểm nghiên cứu. Vì vậy, các kết quả mang tính mô tả ban đầu và cần thận trọng khi khái quát hóa sang các bối cảnh công trường khác. Trước khi tham gia, các đối tượng được giới thiệu mục đích nghiên cứu và hướng dẫn cách trả lời thang Likert. Bảng hỏi được phát và thu thập ngay tại chỗ (đối với người lao động trong giờ nghỉ) và phát tận nhà đối với người dân lân cận. Tỷ lệ phản hồi đạt khoảng 95 % với 76 phiếu hợp lệ (đủ số lượng phiếu hợp lệ để phân tích).

Các câu trả lời trên thang Likert được mã hóa từ 1 đến 5 điểm. Đầu tiên, phân tích mô tả được thực hiện: tính giá trị trung bình và độ lệch chuẩn cho mỗi yếu tố môi trường ở từng nhóm đối tượng. Điều này giúp xác định tần suất vấn đề nào xảy ra nhiều nhất theo đánh giá của người lao động và người dân. Tiếp theo, để kiểm tra sự khác biệt giữa hai nhóm đối tượng, nghiên cứu tiến hành phép kiểm định thống kê t độc lập, nhằm so sánh điểm trung bình giữa nhóm người lao động và nhóm người dân cho mỗi yếu tố. Phân tích này giúp xác định xem người lao động trong công trường có cảm nhận mức độ ô nhiễm khác biệt đáng kể so với cộng đồng xung quanh hay không. Toàn bộ quá trình phân tích được thực hiện với mức ý nghĩa thống kê 0.05. Dữ liệu khảo sát được xử lý và phân tích bằng phần mềm IBM SPSS Statistics phiên

bản 26, với các phân tích bao gồm thống kê mô tả, kiểm định Levene về phương sai và phép kiểm định t độc lập (Independent Samples t-Test). Kết quả phân tích sẽ được trình bày trong phần sau để hỗ trợ cho việc thảo luận về giải pháp giám sát môi trường. Sơ đồ quy trình nghiên cứu được trình bày ở Hình 2.

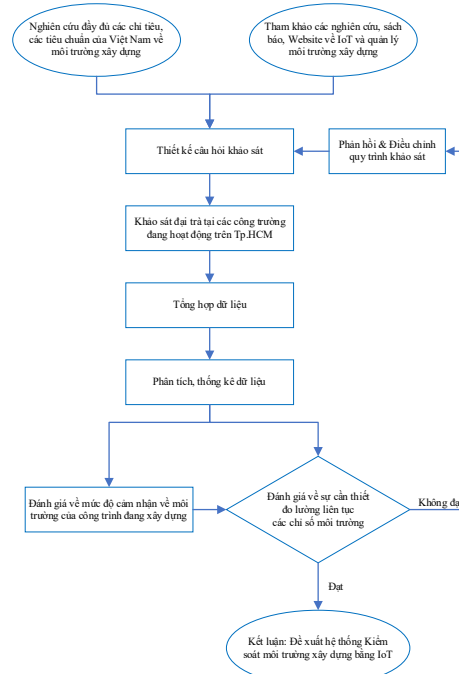
4. Kết quả nghiên cứu

4.1. Thống kê các biến khảo sát

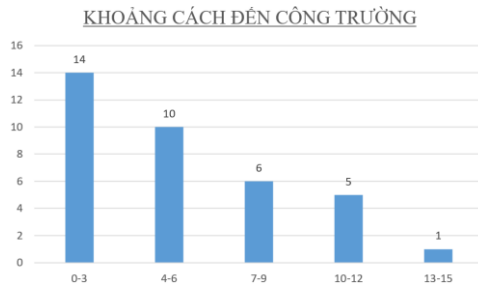
Khảo sát bằng giấy được thực hiện trực tiếp trên 80 người, với 40 người là cư dân sinh sống xung quanh các công trường xây dựng, 40 người là người lao động đang trực tiếp làm việc tại các công trường trên địa bàn thành phố Hồ Chí Minh. Trong số đó có 4 phiếu không hợp lệ, do thiếu thông tin về tần suất hoặc mức độ của các yếu tố nên không đủ thông tin để sử dụng, còn lại 76 phiếu hợp lệ được sử dụng trong nghiên cứu, chiếm 95 %, đảm bảo đầy đủ tính chính xác, tính đại diện cho đối tượng nghiên cứu. Các kết quả được thống kê như sau:

Kết quả khảo sát chia làm 2 nhóm, thể hiện góc nhìn từ phía cộng đồng và phía người lao động.

Kết quả khảo sát cho thấy phần lớn cư dân sinh sống gần công trường trong phạm vi 0–9 m, chiếm đến 83,3 % tổng số người khảo sát. Cụ thể, 38,9 % sống trong vòng 0–3m và 27,8 % trong khoảng 4–6 m – đây là các nhóm có nguy cơ chịu ảnh hưởng trực tiếp và mạnh mẽ từ các yếu tố môi trường như bụi, tiếng ồn và khí thải. Tỷ lệ cư dân giảm dần ở khoảng cách xa hơn, với 16,7 % ở 7–9 m, 13,9 % ở 10–12 m và chỉ 2,8 % ở 13–15 m. Sự phân bố này cho thấy số lượng người tham gia khảo sát chủ yếu tập trung ở vùng lân cận công trường, dễ dàng cảm nhận các yếu tố, làm cơ sở chắc chắn cho kết quả khảo sát có giá trị.

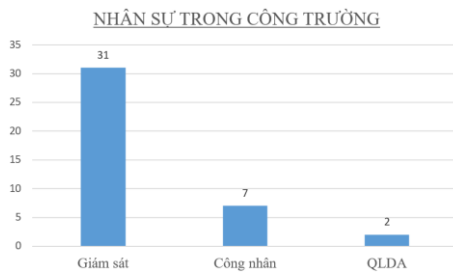


Hình 2. Sơ đồ các bước thực hiện nghiên cứu.



Hình 3. Thống kê khoảng cách tới công trường của cư dân sinh sống bên ngoài.

Biểu đồ phân bố vai trò lao động tại công trường cho thấy đa số người tham gia khảo sát là giám sát (77,5 %), phản ánh vai trò kiểm tra và điều phối kỹ thuật chiếm ưu thế. Nhóm công nhân chiếm 17,5 %, và nhóm quản lý dự án chỉ chiếm 5%, đại diện cho bộ phận điều hành chiến lược và phối hợp tổng thể. Phân bố này cho thấy dữ liệu khảo sát nghiêng về nhóm giám sát, có thể ảnh hưởng đến góc nhìn đánh giá môi trường công trường.



Hình 4. Thống kê vai trò của các cá nhân lao động tại công trường

Việc phân tích các biến khoảng cách tới công trường và vai trò các cá nhân lao động cho thấy được cái nhìn tổng quan, đảm bảo tính đa chiều trong phản hồi, đảm bảo cung cấp nền tảng đầy đủ cho việc đánh giá tác động môi trường tại các công trình đang xây dựng.

4.2. Phân tích các cảm nhận về chất lượng môi trường của công trình xây dựng

Sử dụng thang đo Likert 5 mức độ được trình bày ở Bảng 6, các yếu tố môi trường được mã hóa theo tần suất như Bảng 7.

Sau khi tính toán và xử lý số liệu khảo sát, có được Bảng 8 Kết quả phân tích dữ liệu ở Bảng 8 cho thấy sự khác biệt rõ rệt về cảm nhận tần suất xuất hiện các yếu tố môi trường giữa hai nhóm đối tượng trong và ngoài công trường xây dựng. Cụ thể, nhóm cư dân ngoài công trường ghi nhận tần suất tiếng ồn (Mean = 3.33), bụi (Mean = 3.58), rung động (Mean = 2.83) và khí gây khó thở (Mean = 3.11) đều cao hơn so với nhóm người lao động trong công trường (tương ứng lần lượt là 2.98; 3.45; 2.40; 2.63). Ngoài ra, độ lệch chuẩn của nhóm ngoài công trường cũng cao hơn, phản ánh sự phân tán lớn trong cảm nhận, có thể do ảnh hưởng bởi khoảng cách địa lý, thời gian và điều kiện tiếp xúc không đồng nhất.

Phân tích kiểm định t độc lập (Independent Samples t-Test) được thực hiện nhằm xác định sự khác biệt về tần suất cảm nhận các yếu tố môi trường giữa hai nhóm đối tượng: cư dân ngoài công trường và người lao động trong công trường. Kết quả kiểm định Levene ở Bảng 9. cho thấy phương sai giữa hai nhóm không đồng nhất ở tất cả bốn yếu tố khảo sát (Sig. < 0.05), do đó phân tích sử dụng dòng kiểm định “Equal variances not assumed” để đảm bảo độ tin cậy.

Bảng 7. Các yếu tố khảo sát trong nghiên cứu.

Yếu tố	Thang đo Likert 5 mức độ				
	1	2	3	4	5
1 Tần suất tiếng ồn	Không bao giờ	Hiếm khi	Thỉnh thoảng	Thường xuyên	Luôn luôn
2 Tần suất bụi	Không bao giờ	Hiếm khi	Thỉnh thoảng	Thường xuyên	Luôn luôn
3 Tần suất rung	Không bao giờ	Hiếm khi	Thỉnh thoảng	Thường xuyên	Luôn luôn
4 Tần suất không khí gây khó thở	Không bao giờ	Hiếm khi	Thỉnh thoảng	Thường xuyên	Luôn luôn

Bảng 8. Các thông số dữ liệu khảo sát 8 yếu tố.

Yếu tố		Ngoài công trường		Trong công trường		Levene's Test for Equality of Variances	
		Mean	Độ lệch chuẩn (σ)	Mean	Độ lệch chuẩn (σ)	F	Sig.
1	Tần suất tiếng ồn	3,33	0,86	2,98	0,66	7,20	0,01
2	Tần suất bụi	3,58	1,16	3,45	0,71	4,58	0,04
3	Tần suất rung	2,83	1,34	2,40	0,67	28,68	0
4	Tần suất không khí gây khó thở	3,11	1,26	2,63	0,84	5,74	0,02

Levene's Test kiểm tra xem hai nhóm so sánh có phương sai bằng nhau hay không (nghĩa là dữ liệu có “Equal variances”).

F: Giá trị thống kê kiểm định (F-test), thể hiện mức độ chênh lệch phương sai

Sig. (p-value): Mức ý nghĩa thống kê (giá trị p) để kiểm tra giả thuyết H_0 : phương sai bằng nhau

Bảng 9. Kết quả kiểm định T độc lập giữa hai nhóm đối tượng khảo sát đối với tám yếu tố môi trường xây dựng.

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Tần suất tiếng ồn	Equal variances assumed	7,195	0,009	2,047	74	0,044	0,358	0,175	0,009	0,707
	Equal variances not assumed			2,018	65,340	0,048	0,358	0,178	0,004	0,713
Tần suất bụi	Equal variances assumed	4,579	0,036	0,612	74	0,543	0,133	0,218	-0,301	0,568
	Equal variances not assumed			0,597	57,142	0,553	0,133	0,223	-0,314	0,580
Tần suất rung	Equal variances assumed	28,677	0,000	1,807	74	0,075	0,433	0,240	-0,044	0,911
	Equal variances not assumed			1,750	50,279	0,086	0,433	0,248	-0,064	0,930
Tần suất không khí	Equal variances assumed	5,737	0,019	1,999	74	0,049	0,486	0,243	0,002	0,971
	Equal variances not assumed			1,958	59,890	0,055	0,486	0,248	-0,011	0,983

Kết quả kiểm định t chỉ ra rằng yếu tố tần suất tiếng ồn là duy nhất có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa hai nhóm ($t = 2,018$, $p = 0,048 < 0,05$), với mức độ cảm nhận tiếng ồn cao hơn ở nhóm ngoài công trường. Trong khi đó, tần suất bụi ($p = 0,553$) và tần suất rung ($p = 0,086$) không đạt mức ý nghĩa thống kê, tuy yếu tố rung có giá trị p tiệm cận 0,05; gợi mở một xu hướng khác biệt cần được tiếp tục khảo sát sâu hơn. Đáng chú ý, tần suất khí độc gây khó thở cũng có giá trị p gần mức ý nghĩa ($p = 0,055$), phản ánh cảm nhận tiêu cực hơn từ nhóm cư dân bên ngoài, dù chưa đủ cơ sở để khẳng định chắc chắn sự khác biệt.

Tổng thể, kết quả kiểm định thống kê làm nổi bật hiện tượng các yếu tố môi trường ảnh hưởng không đồng đều giữa hai nhóm khảo sát, đồng thời củng cố nhu cầu thiết lập một hệ thống giám sát môi trường phân tán, đa điểm và theo thời gian thực để phản ánh chính xác hiện trạng tại công trường xây dựng. Kết quả phân tích cho thấy nhóm cư dân ngoài công trường cảm nhận tiếng ồn và khí độc với mức độ cao hơn nhóm người lao động trong công trường, với sự khác biệt có ý nghĩa thống kê. Điều này cho thấy các biện pháp quản lý môi trường hiện tại chủ yếu tập trung bên trong công trường, mà ít chú ý đến phạm vi ảnh hưởng lan tỏa ra khu vực dân cư. Khác với một số nghiên cứu trước đây chủ yếu đo lường chỉ số môi trường bằng thiết bị (như [14], [15]), nghiên cứu này bổ sung thêm góc nhìn cảm nhận của con người, cho phép đánh giá tác động xã hội và nhu cầu thực tiễn của cộng đồng, một hướng tiếp cận ít được đề cập trong nghiên cứu môi trường công trình tại Việt Nam. Ngoài ra, việc đề xuất mô hình IoT không chỉ dựa trên lý thuyết, mà còn được gắn với các yếu tố gây ảnh hưởng cụ thể đã khảo sát. So với nghiên cứu của Kim et al. (2021) [14] hoặc Sepanosian et al. (2024) [15], nghiên cứu này làm rõ hơn nhu cầu cảm nhận thực tế làm cơ sở thúc đẩy ứng dụng IoT, thay vì chỉ tập trung vào khía cạnh kỹ thuật. Đây là điểm mới có thể đóng góp thêm vào hướng tiếp cận lấy con người làm trung tâm trong quản lý môi trường xây dựng.

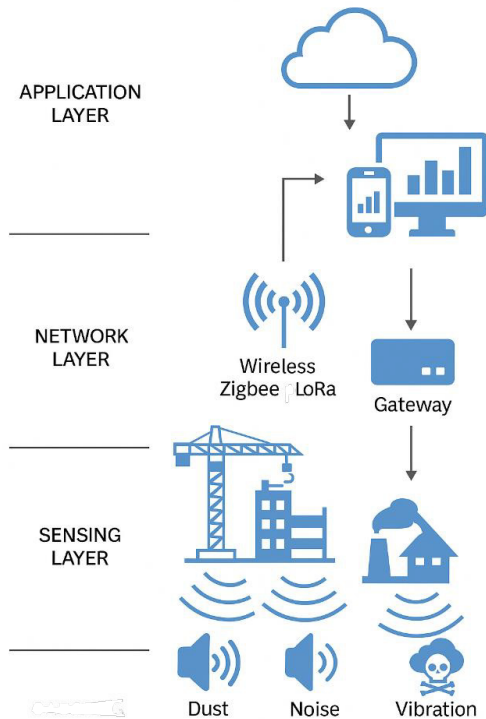
4.3. Tổng kết

Kết quả khảo sát trên cho thấy môi trường tại công trường hiện hữu những rủi ro ảnh hưởng lớn đến con người. Mặc dù đã có các biện pháp quản lý (như phun nước hạn chế bụi [24] [25], đeo khẩu trang [26] [27], che chắn máy móc giảm tiếng ồn/rung [28]), mức độ ảnh hưởng được người tham gia khảo sát đánh giá vẫn cao. Nghiên cứu cho rằng việc giám sát và kiểm soát môi trường hiện tại chưa đủ hiệu quả hoặc chưa theo kịp diễn biến thực tế. Chẳng hạn, bụi có thể bùng phát nhanh chóng ngoài tầm kiểm soát giữa các lần tưới nước, hoặc khí thải độc có thể tích tụ cục bộ mà không được phát hiện kịp thời bằng quan sát thông thường. Do đó, nhu cầu cấp thiết đặt ra là phải có hệ thống giám sát môi trường chủ động hơn, cung cấp dữ liệu liên tục và cảnh báo kịp thời để hỗ trợ đơn vị thi công triển khai biện pháp giảm thiểu nhanh chóng. Dựa trên kết quả nghiên cứu và tổng quan công nghệ, nghiên cứu đề xuất ứng dụng công nghệ IoT như giải pháp tối ưu nhằm nâng cao hiệu quả giám sát môi trường cho công trường xây dựng.

5. Đề xuất ứng dụng công nghệ IoT nhằm nâng cao hiệu quả giám sát môi trường cho công trình xây dựng.

Mặc dù các phương pháp giám sát thủ công truyền thống như quan trắc định kỳ, quan sát trực quan, hoặc kiểm tra bằng thiết bị đo thủ công có thể cung cấp một số thông tin về các yếu tố môi trường tại công trường xây dựng, nhưng chúng đều có nhiều hạn chế. Các phương pháp này không thể giám sát liên tục và không cung cấp dữ liệu theo thời gian thực, dẫn đến việc phát hiện và xử lý các vấn đề môi trường không kịp thời. Hơn nữa, chúng phụ thuộc vào nhân lực và thiếu tính chủ động trong việc cảnh báo sớm. Vì vậy, IoT được chọn làm giải pháp giám sát chủ động, có khả năng thu thập dữ liệu liên tục và cung cấp cảnh báo sớm, giúp nâng cao hiệu quả quản lý môi trường và bảo vệ sức khỏe người lao động cũng như cư dân xung quanh công trường.

5.1. Cấu trúc hệ thống IoT đề xuất (tầng cảm biến, truyền dẫn, phân tích)



Hình 5. Sơ đồ kiến trúc hệ thống IoT giám sát môi trường công trường.

Hình 5 minh họa kiến trúc ba tầng của hệ thống IoT giám sát môi trường công trường xây dựng. Hệ thống IoT giám sát môi trường được thiết kế theo kiến trúc đa tầng để đảm bảo tính linh hoạt và hiệu quả. (1) Tầng cảm biến: bao gồm các thiết bị cảm biến đặt tại hiện trường nhằm đo lường liên tục các thông số môi trường quan trọng (ví dụ: nồng độ bụi PM2.5/PM10, mức ồn dB(A), gia tốc rung, nồng độ khí CO/CO₂, v.v.). Mạng lưới cảm biến này có thể bố trí ở nhiều vị trí trọng yếu quanh công trường để thu thập dữ liệu toàn diện theo thời gian thực [29]. (2) Tầng truyền dẫn: chịu trách nhiệm truyền dữ liệu từ các cảm biến về hệ thống trung tâm một cách tin cậy và kịp thời. Tại công trường, dữ liệu từ cảm biến có thể được tập trung qua các gateway gần đó (thiết bị thu thập và chuyển tiếp dữ liệu) và truyền lên máy chủ (đặt tại trung tâm điều hành hoặc trên nền tảng đám mây). Lựa chọn công nghệ truyền thông IoT phù hợp là rất quan trọng để đảm bảo vùng phủ sóng và tiết kiệm năng lượng. Phương thức kết nối các thiết bị và cảm biến với mạng, bao gồm các giao thức truyền thông như MQTT, HTTP và công nghệ mạng như Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee [30]. (3) Tầng ứng dụng và phân tích: là hệ thống phần mềm và dịch vụ xử lý dữ liệu nhận được. Tầng này có thể triển khai trên máy chủ đám mây hoặc tại chỗ, thực hiện lưu trữ dữ liệu, phân tích và trực quan hóa thông tin môi trường cho người dùng cuối. Người quản lý có thể truy cập kết quả qua giao diện web hoặc ứng dụng di động theo thời gian thực. [31]. Toàn bộ quy trình thu-xử lý được minh họa qua sơ đồ Hình 5 trong bài và làm rõ tính khả thi kỹ thuật của hệ thống.

5.2. Chức năng hệ thống và ứng dụng thực tế

5.2.1. Giám sát liên tục

Khả năng thu thập dữ liệu liên tục 24/7 là ưu điểm nổi bật của hệ thống IoT so với cách đo thủ công gián đoạn. Mọi biến động của môi trường công trường đều được theo dõi theo thời gian thực, giúp phát hiện sớm các xu hướng bất thường. Thông tin liên tục từ nhiều điểm đo cho phép hình thành cái nhìn toàn diện về mức độ ô nhiễm bụi, ồn, rung tại công trường vào mọi thời điểm [14]. Nhờ đó, nhà thầu và cơ quan quản lý có thể theo dõi sát sao chất lượng môi trường và đánh giá hiệu quả của các biện pháp giảm thiểu (như phun nước chống bụi, lắp vách giảm ồn) một cách định lượng thay vì chỉ dựa vào cảm quan. Dữ liệu lịch sử được lưu trữ cũng hỗ trợ phân tích xu hướng dài hạn, phục vụ công tác báo cáo và ra quyết định dựa trên bằng chứng.

5.2.2. Cảnh báo sớm

Hệ thống IoT có khả năng phát cảnh báo tự động ngay khi phát hiện các thông số môi trường vượt ngưỡng cho phép [15]. Ví dụ, nếu nồng độ bụi PM₁₀ vượt quá chuẩn quy định hoặc tiếng ồn ban đêm vượt giới hạn, hệ thống sẽ gửi cảnh báo tức thời qua tin nhắn, email đến quản lý công trường hoặc người có nhiệm vụ giám sát [32]. Tính năng cảnh báo thời gian thực này cho phép đơn vị thi công triển khai ngay các biện pháp ứng phó trước khi tình hình trở nên nghiêm trọng. Chẳng hạn, khi nhận được cảnh báo bụi tăng cao, quản lý có thể cho tạm dừng hoạt động gây bụi và thực hiện phun nước giảm bụi nhanh chóng. Nhờ cảnh báo sớm, các nguy cơ sức khỏe cho người lao động và người dân xung quanh được giảm thiểu, đồng thời công trường duy trì tuân thủ các quy chuẩn môi trường hiện hành. Hệ thống cảnh báo cũng có thể tích hợp đèn hiệu hoặc còi báo động tại chỗ để thông tin kịp thời cho công nhân trong khu vực nguy hiểm (ví dụ cảnh báo rò rỉ khí độc).

5.2.3. Truy vết sự cố và truy xuất nguồn gốc:

Khi xảy ra sự cố môi trường (ví dụ: bụi phát tán gây khiếu nại của cư dân, thiết bị gây rung làm nứt nhà dân), hệ thống IoT cung cấp dữ liệu lưu trữ chi tiết để truy vết nguyên nhân. Nhờ có log dữ liệu theo thời gian và theo không gian, nhà quản lý có thể xác định thời điểm và vị trí chính xác xuất hiện thông số bất thường, từ đó liên hệ đến hoạt động thi công tương ứng [15]. Ví dụ, dữ liệu cho thấy tiếng ồn vượt ngưỡng xảy ra vào đêm muộn tại khu vực cổng chính có thể liên quan đến việc vận chuyển vật liệu ngoài giờ quy định. Tương tự, một đợt rung mạnh ghi nhận bởi cảm biến có thể trùng với thời điểm đóng cọc hoặc nổ mìn. Việc phân tích hồi tố này giúp xác định trách nhiệm và đề ra biện pháp phòng ngừa tái diễn sự cố. Ngoài ra, dữ liệu lịch sử đáng tin cậy từ hệ thống IoT sẽ hỗ trợ cho việc chứng minh tuân thủ các quy định môi trường trước cơ quan chức năng. Toàn bộ thông số về bụi, tiếng ồn... được ghi lại minh bạch sẽ là cơ sở khoa học để đánh giá mức độ tác động của công trường, thay vì các báo cáo chủ

quan. Nhìn chung, chức năng truy vết và lưu trữ dữ liệu của IoT giúp nâng cao tính minh bạch và trách nhiệm giải trình trong quản lý môi trường xây dựng.

5.3. Tính khả thi và định hướng phát triển

Với sự trưởng thành của các công nghệ cảm biến và IoT hiện nay, đề xuất hệ thống trên có tính khả thi cao để triển khai thực tế. Các cảm biến môi trường không dây ngày càng đáng tin cậy và chi phí hợp lý, phù hợp cho điều kiện khắc nghiệt của công trường. Hệ thống có thể bắt đầu bằng một dự án thí điểm quy mô nhỏ tại một công trường cụ thể để đánh giá hiệu quả kinh tế-kỹ thuật. Thông qua dự án thí điểm, các thông số về độ chính xác, độ bền thiết bị, phạm vi phủ sóng, v.v. sẽ được kiểm chứng thực tế. Kết quả nghiên cứu của chúng tôi sẽ làm cơ sở cho việc triển khai thí điểm hệ thống IoT tại các công trường trong tương lai gần. Nếu thành công, mô hình này có thể nhân rộng ra nhiều dự án xây dựng khác, tạo thành một giải pháp chuẩn trong quản lý môi trường xây dựng.

Tích hợp BIM: Một hướng đi quan trọng là tích hợp dữ liệu cảm biến IoT vào mô hình thông tin công trình BIM, nhằm tạo ra hệ thống quản lý hợp nhất. Việc này cho phép giám sát các chỉ số môi trường theo thời gian thực trực tiếp trên mô hình số 3D của công trường, nâng cao hiệu quả theo dõi và điều phối thi công. Nghiên cứu cho thấy việc kết hợp BIM với dữ liệu cảm biến real-time giúp theo dõi tình trạng công trường một cách trực quan và chính xác hơn [17]. Sự tích hợp này cũng đặt nền móng cho quá trình hình thành song sinh số (Digital twin) của công trình. Digital twin mức độ cao sẽ hỗ trợ đắc lực cho công tác quản lý thi công thông minh, khi mà người quản lý có thể giám sát và tương tác với công trường từ xa thông qua bản sao số [33]. Các quyết định như điều chỉnh lịch thi công, bổ sung biện pháp an toàn, tối ưu hóa vận hành thiết bị có thể được đưa ra kịp thời dựa trên thông tin phân tích từ digital twin [34]. Giải pháp giám sát môi trường dựa trên IoT không chỉ mang lại lợi ích kỹ thuật mà còn có giá trị kinh tế – xã hội rõ rệt. Hệ thống cho phép giảm chi phí thuê chuyên gia giám sát định kỳ (ước tính khoảng 10–15 triệu đồng/tháng/công trình), đồng thời hỗ trợ đơn vị thi công kịp thời phát hiện – xử lý vi phạm, tránh bị xử phạt hành chính. Về xã hội, cư dân xung quanh được bảo vệ tốt hơn về môi trường sống, góp phần nâng cao hình ảnh công trình thân thiện, chuyên nghiệp và bền vững. Những lợi ích này cho thấy mô hình đề xuất có tính ứng dụng thực tiễn cao, đặc biệt với các công trình đô thị tại Việt Nam hiện nay. Hướng phát triển này phù hợp với xu thế Chuyển đổi số và Công nghiệp 4.0 trong ngành xây dựng, nơi mà dữ liệu và tự động hóa được tận dụng tối đa để nâng cao hiệu quả và tính bền vững.

5.4. Tổng kết

Giải pháp IoT đề xuất hứa hẹn mang lại cách tiếp cận chủ động, toàn diện và thông minh trong giám sát môi trường công trường xây dựng. Việc áp dụng IoT không chỉ giúp theo dõi liên tục và cảnh báo kịp thời, mà còn tạo nền tảng cho các công nghệ tiên tiến như BIM và

digital twin, góp phần hiện đại hóa công tác quản lý môi trường và nâng cao an toàn lao động trong ngành xây dựng [17]. Các bước triển khai thí điểm và tích hợp hệ thống sẽ được tiếp tục nghiên cứu, nhằm hướng đến việc ứng dụng rộng rãi giải pháp này trong thực tiễn một cách hiệu quả nhất.

6. Kết luận

Nghiên cứu này đã khảo sát và đánh giá cảm nhận của cư dân và người lao động về mức độ ảnh hưởng của bụi, tiếng ồn, rung và khí độc tại công trường xây dựng. Phân tích dữ liệu cho thấy tiếng ồn và khí độc là hai yếu tố có sự khác biệt đáng kể giữa hai nhóm. Từ đó, nghiên cứu đề xuất hệ thống giám sát môi trường dựa trên công nghệ IoT nhằm theo dõi thời gian thực, đưa ra cảnh báo sớm và tích hợp với BIM cho mục tiêu quản lý môi trường bền vững. Trong tương lai, cần tiếp tục triển khai thí điểm giải pháp này tại các công trình thực tế để đánh giá hiệu quả kinh tế – kỹ thuật.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số: DS2025-20-12. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. E. Sekhavati and R. J. Yengejeh, "Particulate matter exposure in construction sites is associated with health effects in workers," *Frontiers in Public Health*, vol. 11. 2023.
- [2]. E. F. Boadu, S. R. Okeke, C. Boadi, E. Osei Bonsu, and I. Y. Addo, "Work-related respiratory health conditions among construction workers: a systematic narrative review," *BMJ Open Respiratory Research*, vol. 10, no. 1. 2023.
- [3]. N. D. Tran *et al.*, "The long term impact of Pm2.5 on mortality in Ho Chi Minh city, 2018," *Tạp chí Y tế Công cộng*, vol. 55. 2021.
- [4]. S. Sardas, G. Z. Omurtag, A. Tozan, H. Gül, and D. Beyoglu, "Evaluation of DNA damage in construction-site workers occupationally exposed to welding fumes and solvent-based paints in Turkey," *Toxicology and Industrial Health*, vol. 26, no. 9. pp. 601–608, 2010.
- [5]. R. Neitzel, N. S. Seixas, J. Camp, and M. Yost, "An assessment of occupational noise exposures in four construction trades," *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 60, no. 6. pp. 807–817, 1999.
- [6]. L. Nguyen Ngoc, L. Nguyen Chau, T. Bui Tien, and N. Nguyen Thi Cam, "Evaluating the impact of construction-induced vibration on nearby structures when building road embankment in Hanoi," *Transport and Communications Science Journal*, vol. 75, no. 1. pp. 1140–1148, 2024.
- [7]. F. Lan, J. Pan, Y. Zhou, and X. Huang, "Impact of the Built Environment on Residents' Health: Evidence from the China Labor Dynamics Survey in 2016," *Journal of Environmental and Public Health*, vol. 2023. pp. 1–13, 2023.
- [8]. "WHO Air Quality Guidelines," *Risks of Hazardous Wastes*. p. 379, 2011.
- [9]. European Parliament, "Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council," *Commission Directive (EU) 2015/1480 of 2015*, vol. L 226, no. 2015. pp. 1–62, 2008.
- [10]. M. Deland, "The Clean Air Act.," *Environmental Science & Technology*, vol.

- 14, no. 12. p. 1437, 1980.
- [11]. V. Van Tran, D. Park, and Y. C. Lee, "Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 8. 2020.
- [12]. California Department of Transportation, "Construction Site Monitoring Program Guidance Manual," no. August. 2013.
- [13]. A. M. Khan, K. A. Alrasheed, A. Waqar, H. Almujiab, and O. Benjeddou, "Internet of things (IoT) for safety and efficiency in construction building site operations," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1. 2024.
- [14]. H. Kim, S. Tae, P. Zheng, G. Kang, and H. Lee, "Development of IoT-based particulate matter monitoring system for construction sites," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 21. 2021.
- [15]. T. Sepanosian, X. Kupers, P. Joza, F. Massah, and R. Bemthuis, "An IoT-Based Architecture for Real-Time Emission Monitoring at Construction Sites," *Proceedings - 2024 26th International Conference on Business Informatics, CBI 2024*. pp. 139–148, 2024.
- [16]. Đ. T. Sỹ, N. H. Đại, L. G. Huy, and N. H. Thành, "Ứng dụng công nghệ IoT tích hợp vào nón bảo hộ phục vụ công tác quản lý an toàn lao động tại công trường," *Tạp chí Vật liệu Xây dựng - Bộ Xây dựng*, vol. 13, no. 01, Feb. 2023.
- [17]. T. D. Nguyen and S. Adhikari, "The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 13. 2023.
- [18]. W. Juan, L. Hanbin, P.-M. Feniosky, Z. Wei, and F. Weili, "An Integrated BIM-IoT Framework for Real-Time Quality Monitoring in Construction Site," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 150, no. 11, p. 5024013, Nov. 2024.
- [19]. T. A. Nguyen, S. T. Do, T. A. Pham, and M. C. Nguyen, "Application of BIM and 3D laser scanning for quantity surveying and quality management in construction projects," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2428. 2021.
- [20]. Bộ Tài nguyên và Môi trường, *TT 39/2010/TT-BTNMT Quy định Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về môi trường*. 2020.
- [21]. Bộ Tài nguyên và Môi trường, *QCVN 05:2023/BTNMT: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí - National technical regulation on Air Quality*. 2023.
- [22]. USGBC, "LEED v4 for Building Design and Construction 2014." 2014.
- [23]. VGBC – Vietnam Green Building Council, *LOTUS NC V3: Hướng dẫn Kỹ thuật Yêu cầu chung.pdf*. 2019.
- [24]. Y. B. Ham *et al.*, "Particulate matter reduction efficiency analysis of sprinkler system as targeted control measures for construction activity," *Heliyon*, vol. 10, no. 7. 2024.
- [25]. Environmental Protection Agency US, "Stormwater Best Management Practice-Dust Control." 2021.
- [26]. G. Tao, J. Feng, H. Feng, H. Feng, and K. Zhang, "Reducing Construction Dust Pollution by Planning Construction Site Layout," *Buildings*, vol. 12, no. 5. 2022.
- [27]. S. Sumardiyono *et al.*, "The Impact of Workplace Dust Exposure and Mask Usage on Pulmonary Function in Construction Environments," *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, vol. 17, no. 1. pp. 12–21, 2025.
- [28]. S. Saleh, S. Woskie, and A. Bello, "The Use of Noise Dampening Mats to Reduce Heavy-Equipment Noise Exposures in Construction," *Safety and Health at Work*, vol. 8, no. 2. pp. 226–230, 2017.
- [29]. J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013.
- [30]. R. Buyya and A. V. Dastjerdi, *Internet of Things: Principles and Paradigms*. 2016.
- [31]. C. Perera, A. Zaslavsky, P. Christen, and D. Georgakopoulos, "Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 414–454, 2014.
- [32]. S. G. S. Choodarathnakara A L, Punitha S, Vinutha, Shwetha B D, Abhishek H J, "Real Time Iot Based Air and Noise Pollution Monitoring System," no. June. 2022.
- [33]. T. Wang, V. J. L. Gan, D. Hu, and H. Liu, "Digital twin-enabled built environment sensing and monitoring through semantic enrichment of BIM with SensorML," *Automation in Construction*, vol. 144. 2022.
- [34]. Y. Zou, Z. Wang, H. Pan, F. Liao, W. Tu, and Z. Sun, "Digital Twin Construction Method for Monitoring Operation Status of Building Machine Jacking Operation," *Buildings*, vol. 14, no. 8. 2024.