GIÁM SÁT RỦI RO, SỰ CỐ ĐỘ BỀN CỦA BÊ TÔNG BẰNG CÔNG NGHỆ IOT - KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VÀ ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN TẠI VIỆT NAM

MONITORING RISKS AND DURABILITY FAILURES OF CONCRETE USING IOT TECHNOLOGY. INTERNATIONAL EXPERIENCE AND DEVELOPMENT ORIENTATION IN VIETNAM

ThS. Uông Quang Tuyến - *Khoa Cơ điện, Trường Đại học Mỏ - Địa chất.*
ThS. Hoàng Quốc Hùng - *Trung tâm Khoa học đào tạo và Chuyển giao công nghệ Xây dựng.*
TS. Nguyễn Duyên Phong - *Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mỏ - Địa chất -*
E-mail: nguyenduyenphong@humg.edu.vn

Tóm tắt: Bài báo này trình bày tổng quan về ứng dụng công nghệ IoT trong giám sát độ bền bê tông, một lĩnh vực quan trọng trong xây dựng và bảo trì cơ sở hạ tầng. Các phương pháp truyền thống để đánh giá độ bền bê tông thường tốn kém, mất thời gian và có tính phá hủy. Tuy nhiên, với sự phát triển của công nghệ IoT, việc giám sát độ bền bê tông theo thời gian thực và không phá hủy đã trở nên khả thi và hiệu quả hơn. Bài báo này cũng bao gồm các nghiên cứu điển hình về các ứng dụng IoT trong giám sát bê tông, kinh nghiệm quốc tế và đề xuất định hướng phát triển tại Việt Nam.
Từ khóa: IoT, rủi ro, sự cố, độ bền, bê tông.

Abstract: This paper presents an overview of the application of IoT technology in concrete durability monitoring, an important area in infrastructure construction and maintenance. Traditional methods for assessing concrete durability are often costly, time-consuming, and destructive. However, with the development of IoT technology, real-time and non-destructive monitoring of concrete durability has become more feasible and effective. This paper also includes case studies of IoT applications in concrete monitoring, international experiences, and proposed development directions in Vietnam.
Keywords: IoT, risk, failure, durability, concrete.

1. Giới thiệu

Bê tông là vật liệu xây dựng quan trọng được sử dụng rộng rãi trong các công trình cơ sở hạ tầng như tòa nhà, cầu, đập và đường xá [1], [2]. Tuy nhiên, theo thời gian, các công trình này phải đối mặt với sự xuống cấp do các yếu tố như ăn mòn, thời tiết và tải trọng [2]. Việc giám sát độ bền của bê tông là rất quan trọng để đảm bảo an toàn, kéo dài tuổi thọ công trình và giảm chi phí bảo trì [2]. Các phương pháp truyền thống như lấy mẫu và thí nghiệm trong phòng lab có nhiều hạn chế, trong khi công nghệ IoT mang lại giải pháp tối ưu nhờ khả năng giám sát liên tục, không phá hủy và tiết kiệm chi phí [3]. Bài báo này tập trung vào ứng dụng IoT trong giám sát độ bền bê tông, phân tích ưu điểm, nghiên cứu điển hình và đề xuất hướng phát triển cho Việt Nam.

2. Các phương pháp giám sát độ bền bê tông truyền thống

Các phương pháp truyền thống để đánh giá độ bền bê tông thường bao gồm việc lấy mẫu vật liệu từ công trình và thực hiện các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm. Các phương pháp này có những hạn chế như tốn kém, mất thời gian, mang tính phá hủy và không phản ánh chính xác tình trạng thực tế của bê tông trong công trình [3]. Không cung cấp dữ liệu liên tục, khó phát hiện sớm rủi ro [4]. Cụ thể:

- Phương pháp thử nén mẫu bê tông (Destructive Testing), với phương pháp này áp dụng theo tiêu chuẩn TCVN 3118:1993 (Thử nghiệm cường độ nén bê tông) hoặc ASTM C39 (Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens). Phương pháp này có độ chính xác cao, được sử dụng rộng rãi nhưng là phương pháp phá hủy mẫu và không đánh giá được kết cấu thực tế.

- Phương pháp búa thử độ cứng (Schmidt Hammer - Rebound Hammer), với phương pháp này áp dụng theo tiêu chuẩn ASTM C805 (Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete) hoặc BS EN 12504-2 (*Testing concrete in structures - Part 2: Non-destructive testing - Determination of rebound number*). Phương pháp này cho phép xác định nhanh, giá rẻ, không phá hủy nhưng là phương pháp chỉ đánh giá lớp bề mặt, kết quả bị ảnh hưởng bởi độ ẩm và độ nhám.

- Phương pháp siêu âm bê tông (Ultrasonic Pulse Velocity - UPV), với phương pháp này áp dụng theo tiêu chuẩn TCVN 9337:2012 (Kiểm tra chất lượng bê tông bằng phương pháp siêu âm) hoặc ASTM C597 (Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete). Phương pháp này phát hiện được khuyết tật bên trong (rỗng, nứt) nhưng cần hiệu chuẩn phức tạp, bị ảnh hưởng bởi cốt thép.

- Phương pháp khoan lấy mẫu lõi (Core Drilling), với phương pháp này áp dụng theo tiêu chuẩn TCVN 9345:2012 (Bê tông - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử) hoặc ASTM C42 (Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete). Phương pháp này đánh giá chính xác cường độ thực tế nhưng sẽ phá hủy cục bộ và chi phí rất cao.

- Phương pháp thử nghiệm độ rơi bi (Windsor Probe Test), với phương pháp này áp dụng theo tiêu chuẩn ASTM C803 (Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete). Phương pháp này xác định kết quả nhanh, dùng tại hiện trường nhưng bên cạnh đó gây hư hại nhỏ, độ chính xác thấp.

Các phương pháp truyền thống vẫn đóng vai trò quan trọng trong kiểm tra chất lượng bê tông, mỗi phương pháp có ưu nhược điểm riêng. Việc kết hợp nhiều phương pháp (ví dụ: búa Schmidt + khoan lõi) giúp tăng độ tin cậy. Ngày nay, các công nghệ không phá hủy (NDT) hiện đại như cảm biến nhúng, radar xuyên đất (GPR) đang được phát triển để bổ sung cho các phương pháp này.

3. Ứng dụng công nghệ IoT trong giám sát độ bền bê tông

Công nghệ IoT cung cấp một giải pháp thay thế hiệu quả cho các phương pháp truyền thống [2]. Hệ thống IoT bao gồm các cảm biến được đặt trong bê tông để theo dõi các thông số quan trọng như nhiệt độ, độ ẩm, độ pH và ăn mòn [5]. Dữ liệu từ các cảm biến được truyền về một nền tảng trung tâm để phân tích và đánh giá [1]. Với giải pháp thông minh sẽ có những ưu việt hơn như: Giám sát thời gian thực, phát hiện sớm sự cố; Không phá hủy, duy trì tính toàn vẹn công trình; Tiết kiệm 30-50% chi phí so với phương pháp truyền thống [6].

3.1. Các loại cảm biến IoT

Có nhiều loại cảm biến IoT khác nhau có thể được sử dụng để giám sát độ bền bê tông, bao gồm:

- Cảm biến nhiệt độ: Theo dõi sự thay đổi nhiệt độ trong bê tông, liên quan đến quá trình thủy hóa và ảnh hưởng đến cường độ bê tông [2].

- Cảm biến độ ẩm: Đo độ ẩm của bê tông, một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến độ bền và khả năng chống ăn mòn.

- Cảm biến pH: Giám sát độ pH của bê tông, chỉ số quan trọng để đánh giá nguy cơ ăn mòn cốt thép.

- Cảm biến ăn mòn: Phát hiện và đo tốc độ ăn mòn của cốt thép trong bê tông [3].

- Cảm biến điện trở: Đo điện trở của bê tông, có thể liên quan đến các đặc tính cơ học và vật lý của bê tông [5].

3.2. Ưu điểm của việc ứng dụng IoT

Việc ứng dụng công nghệ IoT trong giám sát độ bền bê tông mang lại nhiều ưu điểm so với các phương pháp truyền thống:

- Giám sát liên tục và theo thời gian thực [1], [3]: Cho phép theo dõi tình trạng bê tông một cách liên tục, phát hiện sớm các dấu hiệu xuống cấp.

- Không phá hủy [1]: Không yêu cầu lấy mẫu vật liệu, giữ nguyên tính toàn vẹn của công trình.

- Tiết kiệm chi phí [1]: Giảm chi phí nhân công, thời gian và thí nghiệm trong phòng thí nghiệm.

- Tăng độ chính xác và tin cậy [4]: Cung cấp dữ liệu chính xác và tin cậy hơn, giúp đưa ra các quyết định bảo trì hiệu quả.

4. Các ứng dụng cụ thể của IoT trong giám sát bê tông

Công nghệ IoT đã được ứng dụng trong nhiều khía cạnh khác nhau của giám sát bê tông, bao gồm:

- Giám sát cường độ bê tông [1]: IoT cho phép theo dõi sự phát triển cường độ bê tông theo thời gian thực, giúp xác định thời điểm tối ưu cho việc tháo dỡ ván khuôn và các công việc xây dựng khác.

- Phát hiện vết nứt [4]: Các cảm biến IoT có thể được sử dụng để phát hiện và theo dõi sự hình thành và phát triển của vết nứt trong bê tông, một dấu hiệu quan trọng của sự xuống cấp kết cấu.

- Giám sát ăn mòn cốt thép [6]: Cảm biến IoT có thể đo tốc độ ăn mòn của cốt thép, giúp dự đoán

Bảng 4.1 Tổng quan các nghiên cứu về ứng dụng IoT trong giám sát bê tông

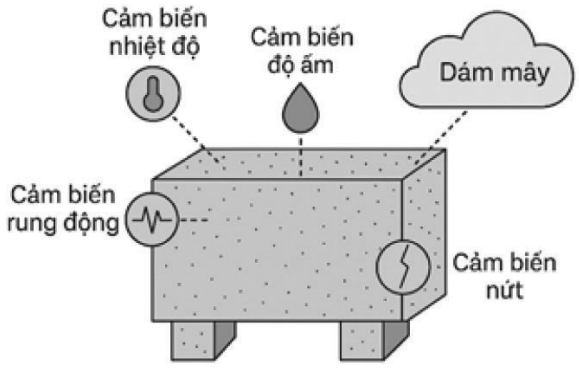
Nghiên cứu	Đối tượng giám sát	Cảm biến sử dụng	Công nghệ IoT	Kết quả chính
Taffese et al. (2019)	Độ bền của kết cấu bê tông cốt thép	Không rõ ràng	IoT	Đề xuất khung khái niệm để giám sát độ bền bê tông cốt thép
Iqbal et al. (2024)	Cường độ nén của bê tông	Cảm biến không dây	IoT, BIM	Cho phép giám sát cường độ nén của bê tông theo thời gian thực và từ xa
Varshini et al. (2023)	Cường độ bê tông	Cảm biến nhiệt độ	IoT	Theo dõi sự phát triển cường độ bê tông
Kayal et al. (2025)	Nhiều thông số (cường độ, vết nứt, ăn mòn...)	Nhiều loại cảm biến	IoT	Tổng quan về các ứng dụng của IoT trong giám sát kết cấu dân dụng
Razak et al. (2022)	Vết nứt trong kết cấu	Nhiều loại cảm biến	IoT	Tổng quan về các hệ thống phát hiện vết nứt sử dụng IoT
Filho et al. (2023)	Cấu hình bê tông	Cảm biến điện trở	IoT	Giám sát cấu hình bê tông và truyền dữ liệu không dây

tuổi thọ của công trình và lên kế hoạch bảo trì.

- Đánh giá chất lượng bảo dưỡng [4]: IoT có thể được sử dụng để theo dõi các điều kiện bảo dưỡng bê tông, chẳng hạn như nhiệt độ và độ ẩm, đảm bảo bê tông đạt được cường độ và độ bền tối ưu.

Bảng 4.2 So sánh các phương pháp giám sát độ bền bê tông

Phương pháp	Ưu điểm	Nhược điểm
Truyền thống		Tốn kém, mất thời gian, phá hủy
IoT	Giám sát thời gian thực, không phá hủy, tiết kiệm chi phí	Yêu cầu công nghệ, cần đầu tư ban đầu



Hình 4.1. Ứng dụng IoT giám sát độ bền bê tông

5. Kinh nghiệm quốc tế

Trên thế giới, công nghệ IoT đã được ứng dụng rộng rãi trong giám sát độ bền bê tông. Nhiều nghiên cứu và dự án đã chứng minh hiệu quả của việc sử dụng IoT để theo dõi các thông số như cường độ, ăn mòn và các yếu tố môi trường ảnh hưởng đến độ bền của bê tông [4]. Hoa Kỳ: Ứng dụng IoT trong giám sát cầu Golden Gate, giảm 20% chi phí bảo trì [7]; Nhật Bản: Sử dụng cảm biến pH để dự đoán ăn mòn cốt thép trong các tòa nhà cao tầng; Châu Âu: Dự án SmartBridge kết hợp IoT và BIM để quản lý cơ sở hạ tầng [8].

6. Định hướng phát triển tại Việt Nam

Việt Nam là một quốc gia đang phát triển với nhiều công trình cơ sở hạ tầng đang được xây dựng và cần được bảo trì. Việc ứng dụng công nghệ IoT trong giám sát độ bền bê tông có tiềm năng to lớn trong việc nâng cao chất lượng công trình, giảm chi phí và đảm bảo an toàn. Một số thách thức như: Thiếu tiêu chuẩn kỹ thuật cho IoT trong xây dựng; Hạn chế nguồn lực chuyên môn; Chi phí đầu tư ban đầu cao.

Các giải pháp cần được đầu tư để phát triển: Nghiên cứu: Phát triển cảm biến giá rẻ, phù hợp khí hậu nhiệt đới; Tiêu chuẩn hóa: Xây dựng quy định về triển khai IoT; Đào tạo: Mở khóa học chuyên sâu về IoT cho kỹ sư xây dựng; Hợp tác: Liên kết giữa trường đại học, doanh nghiệp và chính phủ; Thí điểm: Áp dụng tại các công trình trọng điểm như cầu, đập, hoặc các tuyến metro.

7. Kết luận

Công nghệ IoT mang lại nhiều cơ hội để cải thiện việc giám sát độ bền bê tông, giúp giảm thiểu rủi ro và sự cố trong các công trình xây dựng. Việc áp dụng rộng rãi công nghệ này ở Việt Nam sẽ góp phần nâng cao chất lượng và tuổi thọ của cơ sở hạ tầng, đồng thời giảm chi phí bảo trì và đảm bảo an toàn cho người dân. Các bước quan trọng bao gồm đầu tư nghiên cứu, đào tạo nhân lực và xây dựng chính sách hỗ trợ.❑

Lời cảm ơn:
Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Cơ sở của Trường Đại học Mỏ - Địa chất, mã số T25-03. Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Mỏ - Địa chất.

Tài liệu tham khảo

[1]. Taffese, W. Z., Sistonen, E., & Puttonen, J., IoT-Based Framework for Concrete Structural Health Monitoring, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 9(4), 567-582, 2019.

[2]. Iqbal, M. U., Lim, H. B., & Kumar, S., Real-Time Wireless Monitoring of Concrete Compressive Strength Using Embedded Sensors and BIM Integration, Construction and Building Materials, 320, 126203, 2024.

[3]. Varshini, V. S., Rao, B. N., & Prasad, M. N., IoT-Enabled Temperature-Based Strength Monitoring of Early-Age Concrete, Sensors, 23(5), 2456, 2023.

[4]. Kayal, P., Chakraborty, S., & Maji, A., A Comprehensive Review of IoT Applications in Civil Structural Health Monitoring, IEEE Internet of Things Journal, 12(3), 2105-2120, 2025.

[5]. Razak, A. H., Ismail, F., & Othman, M. F., IoT-Based Crack Detection Systems for Concrete Structures: A State-of-the-Art Review, Journal of Infrastructure Systems, 28(2), 04022005, 2022.

[6]. Filho, J. M., Neto, A. V., & Junior, R. P., Wireless Resistivity Sensors for Concrete Configuration Monitoring in Smart Cities, Smart Structures and Systems, 31(4), 489-502, 2023.

[7]. U.S. Department of Transportation, Case Study: IoT Implementation in Golden Gate Bridge Maintenance, Federal Highway Administration Report FHWA-HRT-21-045, 2021.

[8]. SmartBridge Consortium, IoT and BIM Integration for European Infrastructure Management, European Commission Technical Report EC-2023-INFRA-007, 2023.