

ỨNG DỤNG BIM TRONG BẢO DƯỠNG BÊ TÔNG Ở ĐIỀU KIỆN KHÍ HẬU NÓNG ẨM BIM APPLICATION IN CONCRETE CUREMENT IN HOT AND HUMID CLIMATE CONDITIONS

Nguyễn Quý Đức

Trung tâm Tư vấn và Ứng dụng BIM trong xây dựng
Email: ducnq@ibst-bim.vn, 036 936 2002

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses2-13>

TÓM TẮT: Công tác bảo dưỡng bê tông là yếu tố then chốt quyết định chất lượng và tuổi thọ công trình. Tại Việt Nam, khí hậu nóng ẩm vừa thuận lợi cho quá trình thủy hóa xi măng, vừa gây ra nhiều rủi ro như nứt, co ngót do bốc hơi nước nhanh và chênh lệch nhiệt độ. Các phương pháp bảo dưỡng truyền thống như tưới nước và che phủ đơn giản nhưng phụ thuộc nhiều vào yếu tố con người, kém hiệu quả trong điều kiện khắc nghiệt. Các giải pháp tiên tiến hơn như hóa chất tạo màng (curing compound) và bảo dưỡng nội bộ (Internal Curing) giúp duy trì độ ẩm và tăng cường độ bền một cách chủ động. Đột phá đến từ việc ứng dụng công nghệ thông minh như cảm biến IoT và phương pháp độ chín (maturity method) cho phép giám sát cường độ bê tông theo thời gian thực, giúp tối ưu hóa tiến độ thi công. Sự kết hợp giữa Mô hình Thông tin Công trình (BIM) và Digital Twin mở ra chiến lược bảo trì dự đoán, kéo dài tuổi thọ công trình. Việc triển khai công nghệ mới tại Việt Nam còn gặp thách thức về chi phí, nhân lực và khung pháp lý. Tuy nhiên, với lộ trình áp dụng BIM của Chính phủ, ngành xây dựng đang có cơ hội lớn để chuyển đổi số, nâng cao chất lượng và hiệu quả kinh tế.

TỪ KHÓA: Bảo dưỡng bê tông, Khí hậu nóng ẩm, Nứt co ngót (dẻo, nhiệt, khô), Thủy hóa xi măng, Cảm biến IoT, Mô hình Thông tin Công trình (BIM), Hiệu quả kinh tế.

ABSTRACTS: Concrete curing is a key factor in determining a structure's quality and lifespan. In Vietnam, the hot and humid climate both aids the cement hydration process and poses significant risks, such as cracking and shrinkage, due to rapid water evaporation and temperature differences. Traditional curing methods like watering and covering are simple but heavily reliant on human labor and are less effective in harsh conditions. More advanced solutions, such as curing compounds and Internal Curing (IC), actively help to maintain moisture and enhance durability. A major breakthrough comes from applying smart technologies. IoT sensors and the maturity method allow for real-time monitoring of concrete strength, which helps to optimize construction schedules. The combination of Building Information Modeling (BIM) and a Digital Twin introduces a predictive maintenance strategy, extending a structure's lifespan. The implementation of these new technologies in Vietnam still faces challenges related to cost, human resources, and the legal framework. However, with the government's BIM adoption roadmap, the construction industry has a great opportunity to embrace digital transformation, improve quality, and increase economic efficiency.

KEYWORDS: Concrete curing, Hot and humid climate, Shrinkage cracks (plastic, thermal, drying), Cement hydration, IoT sensors, Building Information Modeling (BIM), Economic efficiency.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ: BỐI CẢNH VÀ TẦM QUAN TRỌNG CỦA CÔNG TÁC BẢO DƯỠNG BÊ TÔNG

Công tác bảo dưỡng bê tông là một trong những giai đoạn then chốt, có ảnh hưởng quyết định đến chất lượng, cường độ và tuổi thọ của một công trình xây dựng. Bê tông có thể phát

triển mạnh mẽ trong điều kiện nhiệt độ và độ ẩm phù hợp, nhưng cũng có thể bị suy giảm chất lượng nếu các yếu tố này không được kiểm soát chặt chẽ. Đặc thù khí hậu Việt Nam, với kiểu nhiệt đới gió mùa nóng ẩm quanh năm, mang đến cả thuận lợi và thách thức cho vật liệu này. Nền nhiệt và độ ẩm cao tự nhiên là điều kiện lý

trường cho quá trình thủy hóa xi măng diễn ra hoàn toàn, giúp bê tông đạt cường độ tối ưu và duy trì chất lượng lâu dài. Tuy nhiên, mặt trái của khí hậu nóng ẩm là sự bốc hơi nước nhanh chóng, chênh lệch nhiệt độ lớn giữa lõi và bề mặt, và nguy cơ nứt nẻ, ăn mòn làm thấm dột, giảm đáng kể tuổi thọ công trình.

Để khắc phục những tác động tiêu cực này, việc áp dụng các phương pháp bảo dưỡng bê tông tối ưu là vô cùng cần thiết. Bài báo này được biên soạn nhằm phân tích một cách có hệ thống các phương pháp bảo dưỡng bê tông, từ truyền thống đến hiện đại, đồng thời đề xuất một lộ trình ứng dụng công nghệ thông minh nhằm nâng cao chất lượng công trình và tối ưu hóa hiệu quả kinh tế. Bài báo sẽ đi sâu vào cơ sở khoa học của các hiện tượng xảy ra trong bê tông dưới tác động của khí hậu nóng ẩm, đánh giá ưu nhược điểm của các giải pháp hiện có và giới thiệu các công nghệ tiên tiến như cảm biến IoT và Mô hình Thông tin Công trình (BIM) như là chìa khóa cho một tương lai xây dựng bền vững, hiệu quả hơn.

1. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ CÁC VẤN ĐỀ CỦA BÊ TÔNG TRONG ĐIỀU KIỆN KHÍ HẬU NÓNG ẨM

1.1. Cơ chế thủy hóa xi măng và vai trò của nước, nhiệt độ

Quá trình đông cứng và phát triển cường độ của bê tông phụ thuộc vào phản ứng hóa học giữa xi măng và nước, được gọi là quá trình thủy hóa. Để bê tông đạt được phẩm chất tốt nhất, quá trình này phải diễn ra trong một môi trường ẩm, không có sự va chạm cơ học. Nước không chỉ là thành phần thiết yếu trong hỗn hợp bê tông mà còn là tác nhân chính duy trì phản ứng thủy hóa. Khi bê tông đã se mặt và có vẻ đông cứng, quá trình thủy hóa bên trong vẫn tiếp tục diễn ra để đạt cường độ tối đa. Trong môi trường quá khô, nước trong bê tông bốc hơi nhanh, không còn đủ lượng nước cần thiết cho quá trình này, khiến cường độ bê tông ngừng phát triển và gây ra hiện tượng rạn nứt.

Nhiệt độ môi trường có ảnh hưởng đáng kể đến tốc độ phản ứng thủy hóa. Ở nhiệt độ bình thường (20-30°C), xi măng thủy hóa diễn ra chậm và ổn định, giúp bê tông phát triển cường độ tốt nhất. Trong điều kiện nhiệt độ cao như khí hậu nóng ẩm đặc trưng tại Việt Nam (trên 40°C), tốc độ thủy hóa tăng lên đáng kể, làm cho bê tông đông kết sớm. Mặc dù điều này có thể giúp bê tông đạt được cường độ ban đầu rất nhanh (có thể đạt 70% mức thiết kế

sau 20 giờ), nhưng về lâu dài, cường độ 28 ngày của bê tông lại có thể bị suy giảm so với khi được bảo dưỡng ở nhiệt độ thấp hơn. Hơn nữa, việc thêm nước vào hỗn hợp để cải thiện tính công tác trong điều kiện nắng nóng lại làm tăng tỷ lệ nước/xi măng, gây giảm cường độ và độ bền tổng thể của bê tông. [1] [2] [3] [4].

1.2. Các dạng hư hỏng bê tông phổ biến do khí hậu nóng ẩm

Khí hậu nóng ẩm là nguyên nhân chính gây ra nhiều dạng hư hỏng phổ biến trong bê tông, ảnh hưởng đến cả tính thẩm mỹ và tính toàn vẹn cấu trúc của công trình.

- Nứt co ngót dẻo:

+ Các vết nứt này xuất hiện trên bề mặt bê tông tươi, ngay sau khi đổ, trong khi bê tông vẫn còn ở trạng thái dẻo. Nguyên nhân chính là do tốc độ bay hơi nước từ bề mặt vượt quá tốc độ nước mao dẫn nổi lên thay thế. Điều kiện gây ra loại nứt này do tốc độ bay hơi cao: bao gồm nhiệt độ môi trường/bê tông cao, độ ẩm không khí thấp, và tốc độ gió lớn.

+ Vết nứt co ngót dẻo thường nông, có dạng mạng nhện hoặc các vết nứt song song. Mặc dù chúng có thể không ảnh hưởng nghiêm trọng đến cường độ cấu trúc nhưng lại gây mất thẩm mỹ và là nguyên nhân tiềm tàng gây thấm, dột về sau.

- Nứt co ngót nhiệt:

+ Quá trình thủy hóa xi măng là một phản ứng tỏa nhiệt mạnh. Ở các cấu kiện bê tông khối lớn, nhiệt độ phần lõi có thể tăng lên rất cao (trên 50°C), trong khi bề mặt tiếp xúc với không khí nguội đi nhanh chóng và co lại. Sự chênh lệch nhiệt độ này tạo ra ứng suất kéo lớn trên bề mặt, vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông và dẫn đến nứt.

+ Vết nứt nhiệt thường sâu hơn các vết nứt co ngót dẻo và có thể ảnh hưởng đến tính toàn vẹn của kết cấu.

- Nứt co ngót khô:

Khi bê tông đã đông cứng, nước trong các lỗ rỗng mao quản tiếp tục bay hơi, gây giảm thể tích và tạo ứng suất kéo. Hiện tượng này xảy ra khi công tác bảo dưỡng không được thực hiện đầy đủ, khiến cường độ bê tông không đạt được mức tối đa. Vết nứt co ngót khô có thể xuất hiện sau vài tháng đến vài năm sau khi đổ bê tông và thường có dạng các vết nứt nhỏ, song song.

Dưới đây là bảng tóm tắt các dạng hư hỏng phổ biến của bê tông do khí hậu nóng ẩm:

Bảng 1: Phân tích các loại vết nứt bê tông và nguyên nhân liên quan đến điều kiện nóng ẩm

STT	Tên vết nứt	Cơ chế hình thành	Đặc điểm vết nứt	Thời gian xuất hiện
1	Nứt co ngót dẻo	Tốc độ bay hơi nước trên bề mặt nhanh hơn tốc độ nước mao dẫn, gây mất nước khi bê tông còn dẻo.	Nông, dạng mạng nhện hoặc song song, thường ở bề mặt.	Vài giờ đầu sau khi đổ.
2	Nứt co ngót nhiệt	Chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt bê tông do phản ứng thủy hóa tỏa nhiệt.	Sâu, có thể ảnh hưởng đến kết cấu, thường ở cấu kiện khối lớn.	Vài giờ đến vài ngày sau khi đổ.
3	Nứt co ngót khô	Nước bay hơi từ các lỗ rỗng mao quản khi bê tông đã cứng, dẫn đến giảm thể tích.	Nhỏ, dạng sợi tóc, song song nhau.	Vài tháng đến vài năm sau khi đổ.

Các hiện tượng này chỉ ra một mối liên hệ chặt chẽ giữa tốc độ thủy hóa xi măng, nhiệt độ và nguy cơ nứt. Nhiệt độ cao trong điều kiện khí hậu nóng ẩm làm tăng tốc độ phản ứng thủy hóa. Tốc độ thủy hóa nhanh khiến bê tông đông kết sớm, nhưng lại có thể giảm cường độ cuối cùng và tăng tốc độ bay hơi nước trên bề mặt. Sự chênh lệch nhiệt độ và độ ẩm giữa lõi và bề mặt bê tông là nguyên nhân trực tiếp gây ra các loại nứt co ngót dẻo và nứt nhiệt. Điều này cho thấy rằng, để bảo dưỡng tối ưu trong điều kiện nóng ẩm, không chỉ cần cung cấp nước mà còn phải kiểm soát tốc độ thủy hóa và duy trì sự cân bằng nhiệt độ, độ ẩm một cách tinh tế.

2. CÁC PHƯƠNG PHÁP BẢO DƯỠNG BÊ TÔNG TRUYỀN THỐNG VÀ HẠN CHẾ TRONG ĐIỀU KIỆN KHÍ HẬU NÓNG ẨM

Các phương pháp bảo dưỡng truyền thống đã được áp dụng rộng rãi trong ngành xây dựng từ lâu. Mặc dù có ưu điểm về tính đơn giản và chi phí ban đầu thấp, chúng bộc lộ nhiều hạn chế khi đối mặt với điều kiện khí hậu khắc nghiệt, đặc biệt là tại các vùng nóng ẩm.

2.1. Bảo dưỡng bằng nước

Đây là phương pháp giữ ẩm cho bê tông hiệu quả nhất, bao gồm tưới nước liên tục hoặc ngâm nước. Kỹ thuật này thường được thực hiện bằng cách phun nước tia nhỏ đều đặn theo chu kỳ không đổi, hoặc xây be bờ để ngâm nước trên các bề mặt

phẳng như sàn mái. Theo các tiêu chuẩn kỹ thuật, công việc tưới nước giữ ẩm cần được duy trì liên tục cả ngày lẫn đêm, đặc biệt là trong 7 ngày đầu sau khi đổ bê tông, với tần suất khoảng 3 giờ/lần vào ban ngày và ít nhất 1 lần vào ban đêm.

Ưu điểm của phương pháp này là đơn giản và nguồn nước có thể dễ dàng lấy từ sông, hồ ao miễn là không chứa tạp chất gây hại cho bê tông. Tuy nhiên, nhược điểm lớn nhất là đòi hỏi sự can thiệp thủ công và giám sát liên tục của nhân công. Trong điều kiện nắng gắt và gió lớn, nước có thể bay hơi quá nhanh, đặc biệt là nếu thời gian giữa hai lần tưới quá dài. Việc tưới nước không đều có thể dẫn đến các vết rạn chân chim, gây mất thẩm mỹ và là nguyên nhân cho hiện tượng ngấm, thấm về sau.

2.2. Bảo dưỡng bằng vật liệu che phủ

Để hạn chế sự bốc hơi nước, người ta thường phủ lên bề mặt bê tông các vật liệu như bao tải ẩm, rơm rạ, cát xây dựng, hoặc bạt nilon. Các vật liệu này có tác dụng bảo vệ bề mặt bê tông khỏi tác động trực tiếp của ánh nắng mặt trời và gió. Đặc biệt, thảm bảo dưỡng bê tông được đánh giá cao nhờ khả năng giữ nước tốt, dễ thi công và bảo vệ bề mặt khỏi các tác động cơ học trong giai đoạn đầu.

Tuy nhiên, mỗi loại vật liệu lại có nhược điểm riêng. Ví dụ, bao tải có thể không che phủ hết bề mặt và khó thi công. Nilon tuy có giá thành rẻ và dễ thi công nhưng lại dễ bị gió thổi bay nếu không được cố định cẩn thận. Việc sử dụng các vật liệu phủ này đòi hỏi sự chuẩn bị kỹ lưỡng và giám sát để đảm bảo hiệu quả.

2.3. Giữ nguyên ván khuôn

Một phương pháp bảo dưỡng đơn giản và hiệu quả khác là giữ nguyên ván khuôn sau khi đổ bê tông. Ván khuôn, đặc biệt là ván khuôn gỗ, có khả năng duy trì hơi ẩm rất tốt. Để tăng cường độ ẩm, có thể phun nước trực tiếp vào ván khuôn, đồng thời bảo vệ các bề mặt bê tông hở bằng các tấm phủ. Ván khuôn chỉ nên được tháo dỡ khi cấu kiện bê tông đã đạt đủ sức bền vật liệu để ổn định kết cấu, thường là sau 21 đến 28 ngày trong điều kiện bình thường. Việc tháo dỡ quá sớm có thể dẫn đến sụp đổ cấu kiện, gây tai nạn nghiêm trọng.

2.4. Đánh giá chung và hạn chế

Mặc dù các phương pháp bảo dưỡng truyền thống có chi phí ban đầu thấp hơn so với các giải pháp công nghệ cao, nhưng chúng lại phụ thuộc

lớn vào yếu tố con người và điều kiện môi trường, tiềm ẩn nhiều rủi ro. Các công việc bảo dưỡng thường bị bỏ dở do nhân công mệt mỏi sau khi đổ bê tông, dẫn đến bê tông mất nước và nứt nẻ. Các nhà thầu và chủ đầu tư có thể có tâm lý tiết kiệm chi phí nhân công và vật liệu ban đầu, nhưng điều này có thể dẫn đến chi phí vòng đời (LCC) cao hơn do phải sửa chữa, gia cố công trình về sau. Sự tiết kiệm chi phí ngắn hạn này không đủ để bù đắp những tổn thất do giảm tuổi thọ và chất lượng công trình.

3. CÁC GIẢI PHÁP BẢO DƯỠNG BÊ TÔNG TIỀN TIẾN

Để khắc phục những hạn chế của các phương pháp truyền thống, các giải pháp bảo dưỡng bê tông tiên tiến đã được nghiên cứu và ứng dụng, mang lại hiệu quả cao hơn, giảm sự phụ thuộc vào yếu tố con người và các điều kiện môi trường khắc nghiệt. [5]

3.1. Hóa chất tạo màng (Curing Compound)

Hóa chất tạo màng (curing compound) là một trong những giải pháp bảo dưỡng bê tông tiên tiến được sử dụng rộng rãi. Đây là một dung dịch sẵn sàng sử dụng, khi được phun lên bề mặt bê tông tươi sau khi đã se mặt, sẽ tạo thành một lớp màng mỏng vi tinh thể. Lớp màng này có tác dụng trám các lỗ rỗng và ngăn chặn sự bay hơi nước từ bề mặt. Bằng cách giữ lại độ ẩm cần thiết, hợp chất này giúp quá trình thủy hóa của xi măng diễn ra hoàn toàn, từ đó giúp bê tông đạt được cường độ, độ bền và độ cứng bề mặt tối đa.

Các sản phẩm này thường có màu trắng để phản xạ nhiệt, giúp giảm hấp thụ ánh nắng mặt trời và giữ cho bề mặt bê tông mát hơn. Phương pháp này có nhiều ưu điểm nổi bật: dễ thi công bằng thiết bị phun, tiết kiệm đáng kể chi phí nhân công và tài nguyên nước so với phương pháp tưới nước truyền thống. Nó cũng giúp giảm co ngót, chống nứt chân chim, giảm bám bụi và tăng khả năng kháng sương giá cho bê tông. Hóa chất tạo màng đặc biệt hữu ích cho các bề mặt lớn như đường quốc lộ, bãi đỗ xe, mái che, tường chắn.

Mặc dù hóa chất tạo màng có thể gây phát thải VOCs (hợp chất hữu cơ dễ bay hơi), đặc biệt là loại gốc dung môi, tác động tiêu cực này đang được giảm thiểu bằng việc sử dụng rộng rãi các sản phẩm gốc nước. Về lâu dài, vai trò của nó trong việc tiết kiệm nước và tăng tuổi thọ công trình mang lại những lợi ích môi trường gián tiếp quan trọng, góp phần vào tính bền vững của dự án.

3.2. Bảo dưỡng nội bộ (Internal Curing - IC)

Bảo dưỡng nội bộ (IC) là một phương pháp chủ động, giải quyết vấn đề thiếu nước từ sâu bên trong khối bê tông. Phương pháp này sử dụng các tác nhân hấp thụ nước như Superabsorbent Polymers (SAPs) hoặc Lightweight Aggregates (LWA) được trộn trực tiếp vào hỗn hợp bê tông tươi. Các vật liệu này có cấu trúc xốp đặc biệt, cho phép hấp thụ và giữ lại một lượng nước đáng kể ngay trong quá trình trộn.

Khi bê tông bắt đầu đông cứng và khô, các tác nhân IC sẽ từ từ giải phóng nước đã lưu trữ để cung cấp cho quá trình thủy hóa liên tục của xi măng. Cơ chế này giúp giảm thiểu đáng kể hiện tượng co ngót tự sinh (autogenous shrinkage) và co ngót do khô (drying shrinkage), từ đó giảm nguy cơ nứt và tăng cường độ bền lâu dài của bê tông. Đây là giải pháp đặc biệt hiệu quả cho bê tông hiệu năng cao, nơi mà các phương pháp bảo dưỡng bề mặt không thể giải quyết triệt để tình trạng thiếu nước bên trong.

SAPs là một ví dụ điển hình của tác nhân IC, với khả năng hấp thụ nước gấp hàng nghìn lần trọng lượng khô của chúng mà không bị hòa tan. Hiệu quả của SAPs phụ thuộc vào các đặc tính như kích thước hạt, mật độ liên kết ngang và tốc độ giải hấp. Việc sử dụng SAPs trong bê tông không chỉ giúp cải thiện tính công tác mà còn đóng góp vào mục tiêu phát triển bền vững bằng cách giảm nhu cầu sản xuất xi măng.

Sự ra đời của các giải pháp bảo dưỡng tiên tiến này cho thấy một sự chuyển dịch rõ rệt từ phương pháp bảo dưỡng thụ động sang chủ động và bền vững. Trong khi các phương pháp truyền thống chỉ tập trung vào việc ngăn chặn sự mất nước từ bề mặt, các giải pháp như bảo dưỡng nội bộ giải quyết vấn đề từ sâu bên trong, giảm thiểu sự phụ thuộc vào các điều kiện môi trường và yếu tố con người. Hơn nữa, một số loại bê tông hiện đại như bê tông HPFRC có đặc tính tự hàn vết nứt rất tốt, giúp giảm chi phí bảo dưỡng và kéo dài tuổi thọ công trình. Sự phát triển này không chỉ giúp bê tông đạt cường độ tối đa hiệu quả hơn mà còn đóng góp vào mục tiêu giảm phát thải CO₂ của ngành xây dựng.

4. ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ THÔNG MINH TRONG QUY TRÌNH BẢO DƯỠNG BÊ TÔNG

Sự tiến bộ của công nghệ đã mở ra những giải pháp đột phá, cho phép tối ưu hóa quy trình bảo dưỡng bê tông một cách khoa học, chính xác và hiệu quả hơn.

4.1. Công nghệ cảm biến (IoT) và phương pháp Độ chín (Maturity Method)

Công nghệ cảm biến và phương pháp độ chín là một bước tiến quan trọng trong việc giám sát bê tông sau khi đổ. Nguyên lý của phương pháp độ chín (maturity method) là cường độ bê tông có mối tương quan trực tiếp với lịch sử nhiệt độ theo thời gian. Thay vì chỉ dựa vào các mẫu thử nén truyền thống tại phòng thí nghiệm (vốn tốn kém và mất thời gian), phương pháp này sử dụng các cảm biến nhiệt độ không dây, chi phí thấp được nhúng trực tiếp vào bê tông tươi. Các cảm biến này liên tục thu thập dữ liệu về nhiệt độ bên trong khối bê tông và truyền về một nền tảng điện toán đám mây.

Dữ liệu nhiệt độ này sau đó được sử dụng để tính toán chỉ số độ chín (maturity index) theo các công thức chuẩn (như ASTM C1074). Dựa trên một đường cong độ chín-cường độ được hiệu chuẩn trước cho từng loại bê tông, các kỹ sư có thể ước tính chính xác cường độ bê tông tại chỗ theo thời gian thực.

Lợi ích đột phá của phương pháp này là khả năng tối ưu hóa tiến độ thi công. Các nhà quản lý dự án có thể đưa ra các quyết định sáng suốt và kịp thời như: lựa chọn phương pháp và thời gian bảo dưỡng bê tông phù hợp, thời gian tháo dỡ ván khuôn sớm hơn khi bê tông đã đạt cường độ mục tiêu. Điều này giúp bảo dưỡng bê tông kịp thời, tăng chất lượng cấu kiện bê tông và rút ngắn thời gian chu kỳ thi công, giảm chi phí nhân công và vật liệu. Một nghiên cứu điển hình tại tòa tháp Stantec (tại Edmonton, Alberta, Canada) do nhà thầu PCL Construction thi công đã chỉ ra rằng việc sử dụng cảm biến nhiệt không dây SmartRock để tính toán độ chín - cường độ của bê tông có thể tiết kiệm khoảng 0,5 ngày cho mỗi chu kỳ đổ bê tông. Việc sử dụng cảm biến nhiệt độ đã cho phép tăng tốc độ thi công (hoàn thành dự án sớm hơn 4 tháng), loại bỏ sự phụ thuộc vào kết quả thử nghiệm nén mẫu bê tông trong phòng thí nghiệm (thường mất thêm 1 ngày) và tháo dỡ ván khuôn sớm hơn một cách an toàn [6].

Ngoài ra, công nghệ này còn giúp kiểm soát nhiệt độ lõi của bê tông khối lớn, tránh nứt nhiệt và đảm bảo chất lượng, độ bền tối đa cho công trình.

4.2. Tích hợp BIM và Digital Twin trong quản lý bảo dưỡng

Mô hình Thông tin Công trình (BIM) không chỉ là một công cụ thiết kế 3D mà còn là một quy trình toàn diện để tạo lập và quản lý dữ liệu số của công trình xuyên suốt vòng đời, từ thiết kế, thi

công đến vận hành và bảo trì. BIM 6D là cấp độ đặc biệt tích hợp các thông tin về quá trình sử dụng, duy tu bảo dưỡng công trình.

Vai trò của BIM trong bảo dưỡng được thể hiện qua khả năng quản lý dữ liệu toàn diện. Mô hình BIM lưu trữ thông tin phi hình học chi tiết về các cấu kiện, vật liệu, lịch sử bảo trì và các thông số kỹ thuật.

Điểm đột phá nằm ở việc kết hợp dữ liệu thời gian thực từ cảm biến (IoT) với mô hình BIM để tạo ra một "Digital Twin" (bản sao kỹ thuật số) của công trình. Digital Twin này cung cấp một cái nhìn trực quan, động về tình trạng cấu trúc, độ biến dạng, rung động và nhiệt độ, cho phép các kỹ sư và nhà quản lý theo dõi "sức khỏe" của công trình từ xa.

Sự kết hợp này mở ra một chiến lược bảo trì hoàn toàn mới: Bảo trì dự đoán (Predictive Maintenance). Bằng cách phân tích dữ liệu lịch sử và thời gian thực từ cảm biến (sử dụng các thuật toán học máy hoặc trí tuệ nhân tạo), các nhà quản lý có thể dự đoán khi nào một bộ phận hoặc cấu trúc có khả năng bị hư hỏng. Điều này cho phép lập kế hoạch bảo trì chủ động, đúng lúc, đúng chỗ, tránh được các sự cố bất ngờ, tiết kiệm chi phí và kéo dài tuổi thọ công trình.

Để đảm bảo khả năng tương tác và trao đổi dữ liệu liền mạch giữa các phần mềm BIM và các hệ thống quản lý bảo trì (CMMS), các tiêu chuẩn dữ liệu mở như IFC (Industry Foundation Classes) và COBie (Construction Operations Building Information Exchange) đóng một vai trò quan trọng.

Sự kết hợp giữa BIM và IoT [7] thể hiện một sự thay đổi cơ bản trong tư duy, chuyển đổi cách tiếp cận từ quản lý công trình tĩnh sang quản lý vòng đời động, dựa trên dữ liệu. Thay vì chỉ tập trung vào giai đoạn thi công, các công nghệ này giúp biến công trình thành một bản sao kỹ thuật số "sống", được cập nhật dữ liệu liên tục từ cảm biến. Dữ liệu này không chỉ giúp tối ưu hóa giai đoạn thi công mà còn kéo dài suốt vòng đời của công trình, cho phép các chủ đầu tư và đơn vị quản lý vận hành thực hiện bảo trì dự đoán, quản lý tài sản hiệu quả hơn và đưa ra các quyết định dựa trên dữ liệu thực tế.

5. PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ KINH TẾ VÀ THÁCH THỨC TRIỂN KHAI TẠI VIỆT NAM

5.1. Phân tích lợi tức đầu tư (ROI) của việc áp dụng công nghệ mới

Việc đầu tư vào các phương pháp bảo dưỡng tiên tiến và công nghệ thông minh có thể mang lại

lợi tức đầu tư (ROI) đáng kể, mặc dù chi phí ban đầu có thể cao.

- Tiết kiệm thời gian và chi phí trực tiếp:

Sử dụng cảm biến và phương pháp độ chín cho phép tháo dỡ ván khuôn sớm hơn một cách an toàn, giúp rút ngắn thời gian chu kỳ thi công, giảm chi phí nhân công và vật liệu. Theo [6] thì việc nhanh hơn 0,5 ngày cho mỗi chu kỳ đổ bê tông, giúp dự án xây dựng hoàn thành tiến độ sớm hơn 4 tháng mang lại lợi ích kinh tế tương ứng rất lớn.

Mô hình BIM cũng giúp quản lý nguồn lực như lao động, vật liệu và thiết bị bảo dưỡng bê tông một cách hiệu quả hơn, tránh được các lãng phí không đáng có.

- Lợi ích tài chính gián tiếp:

Các nghiên cứu đã chứng minh lợi tức đầu tư (ROI) ấn tượng của việc áp dụng BIM. Số liệu từ một số dự án tại Việt Nam cho thấy việc áp dụng BIM rút ngắn thời gian thực hiện gói thầu thi công xây lắp từ 12 - 15% so với tiến độ ký kết trong hợp đồng mang lại hiệu quả tài chính tương ứng [8].

5.2. Thực trạng và thách thức triển khai tại Việt Nam

Mặc dù tiềm năng của các công nghệ tiên tiến là rất lớn, việc triển khai chúng tại Việt Nam vẫn đối mặt với nhiều rào cản đáng kể, liên quan đến bốn yếu tố chính: con người, công nghệ, quy trình và pháp lý.

Rào cản về con người: Lực lượng lao động trong ngành xây dựng Việt Nam đã quen với quy trình truyền thống và thường ngại thay đổi. Hơn nữa, sự thiếu hụt nhân lực có kiến thức và kỹ năng chuyên môn về BIM và IoT là một thách thức lớn, đặc biệt là đối với các dự án quy mô lớn.

Rào cản về công nghệ: Chi phí đầu tư ban đầu cho phần cứng, phần mềm (như Revit, Navisworks) và các khóa đào tạo là khá cao. Nhiều doanh nghiệp, đặc biệt là các công ty vừa và nhỏ, gặp khó khăn về ngân sách. Bên cạnh đó, cơ sở hạ tầng công nghệ hiện có của nhiều đơn vị vẫn còn hạn chế, chưa đủ mạnh để chạy các phần mềm BIM.

Rào cản về quy trình và pháp lý: Ngành xây dựng Việt Nam vẫn thiếu một khung pháp lý rõ ràng, bao gồm các quy chuẩn, tiêu chuẩn BIM quốc gia và hướng dẫn thực hiện. Điều này gây khó khăn trong việc thiết lập quy trình hợp tác và phân chia trách nhiệm giữa các bên liên quan trong dự án.

Tuy nhiên, Chính phủ Việt Nam đã nhận thức được tầm quan trọng của các công nghệ này và

đang tích cực thúc đẩy việc áp dụng. Quyết định số 258/QĐ-TTg phê duyệt Lộ trình áp dụng BIM trong hoạt động xây dựng, với mục tiêu bắt buộc áp dụng cho các dự án vốn nhà nước từ năm 2023 và các công trình cấp II trở lên từ năm 2025, là một động lực pháp lý quan trọng. Mục tiêu của lộ trình này là tiết kiệm ít nhất 30% tổng chi phí và tăng tính minh bạch trong quản lý.

Rào cản tâm lý chính là việc các nhà đầu tư còn lo ngại về chi phí đầu tư ban đầu và lợi ích chưa rõ ràng. Tuy nhiên, các phân tích lợi tức đầu tư (ROI) cho thấy sự e ngại này có thể không chính xác khi nhìn vào lợi ích dài hạn. Việc áp dụng công nghệ thông minh cho phép các doanh nghiệp chuyển đổi tư duy, từ bỏ phương pháp quản lý truyền thống dễ dẫn đến lãng phí và hướng tới một mô hình hiệu quả hơn. Vượt qua rào cản về nhận thức và chi phí ban đầu là chìa khóa để ngành xây dựng Việt Nam tận dụng được những lợi ích kinh tế to lớn trong dài hạn.

6. KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT TỐI ƯU HÓA

6.1. Tóm tắt các vấn đề chính

Bài báo đã phân tích các khía cạnh của công tác bảo dưỡng bê tông, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nóng ẩm của Việt Nam. Các vấn đề có thể được tóm tắt như sau:

- Ảnh hưởng của khí hậu nóng ẩm: Khí hậu nóng ẩm gây ra những rủi ro đáng kể như nứt co ngót dẻo, nứt nhiệt, và nứt co ngót khô do tốc độ thủy hóa nhanh và bốc hơi nước đột ngột, ảnh hưởng đến cường độ và tuổi thọ công trình.

- Hạn chế của phương pháp truyền thống: Các phương pháp bảo dưỡng truyền thống như tưới nước và che phủ vật liệu tuy đơn giản và chi phí ban đầu thấp nhưng lại phụ thuộc lớn vào yếu tố con người và có thể không hiệu quả trong điều kiện khắc nghiệt, tiềm ẩn rủi ro phát sinh chi phí sửa chữa cao về lâu dài.

- Tiềm năng của giải pháp tiên tiến: Các giải pháp tiên tiến như hóa chất tạo màng (curing compound) và bảo dưỡng nội bộ (internal curing) mang lại hiệu quả vượt trội trong việc giữ ẩm, giảm co ngót, và tăng cường độ bền.

- Đột phá từ công nghệ thông minh: Sự kết hợp giữa cảm biến IoT và phương pháp độ chín (maturity method) cho phép giám sát cường độ bê tông theo thời gian thực, tối ưu hóa tiến độ thi công và tháo dỡ ván khuôn sớm an toàn. Tích hợp BIM và Digital Twin tạo ra một nền tảng quản lý vòng

đời công trình toàn diện, cho phép thực hiện bảo trì dự đoán và đưa ra các quyết định dựa trên dữ liệu chính xác.

Cơ hội và Thách thức tại Việt Nam: Việt Nam đang có lộ trình rõ ràng để áp dụng BIM. Tuy nhiên, các thách thức về chi phí đầu tư ban đầu, sự thiếu hụt nhân lực có kỹ năng và khung pháp lý hoàn chỉnh vẫn là rào cản cần vượt qua.

6.2. Đề xuất tối ưu hóa

Dựa trên những phân tích trên, các đề xuất sau đây được đưa ra nhằm tối ưu hóa công tác bảo dưỡng bê tông trong điều kiện khí hậu nóng ẩm tại Việt Nam:

- Đối với các dự án vừa và nhỏ: Thay vì chỉ dựa vào phương pháp tưới nước thủ công, nên kết hợp phương pháp giữ nguyên ván khuôn và sử dụng hóa chất tạo màng (curing compound). Điều này vừa giúp giảm chi phí nhân công, vừa đảm bảo hiệu quả chống mất nước, giảm nguy cơ nứt nẻ và nâng cao chất lượng bề mặt bê tông một cách đáng kể.

- Đối với các dự án lớn, phức tạp: Cần áp dụng một chiến lược toàn diện, tích hợp các công nghệ thông minh ngay từ giai đoạn đầu.

+ Giai đoạn thi công: Ứng dụng cảm biến IoT và phương pháp độ chín (maturity method) để giám sát cường độ bê tông theo thời gian thực. Điều này cho phép lựa chọn phương pháp và thời gian bảo dưỡng phù hợp nhất giúp tăng chất lượng cấu kiện bê tông, đồng thời giúp tháo dỡ ván khuôn sớm một cách an toàn, rút ngắn đáng kể thời gian thi công và tối ưu hóa chi phí.

+ Giai đoạn vận hành: Xây dựng mô hình BIM và tích hợp dữ liệu từ cảm biến để tạo ra Digital Twin của công trình. Nền tảng này sẽ là cơ sở cho việc triển khai bảo trì dự đoán (predictive maintenance), giúp các nhà quản lý chủ động phát hiện và khắc phục các vấn đề tiềm ẩn, kéo dài tuổi thọ công trình và giảm thiểu chi phí bảo trì.

- Về mặt vĩ mô và chính sách: Đề thúc đẩy quá trình chuyển đổi số trong ngành xây dựng, cần có sự phối hợp chặt chẽ giữa các cơ quan quản lý, doanh nghiệp và các tổ chức đào tạo.

Bộ Xây dựng và các cơ quan liên quan cần đẩy nhanh việc hoàn thiện và ban hành các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia về BIM và các ứng dụng công nghệ liên quan, như tiêu chuẩn về cảm biến bê tông.

Chính phủ nên có các chính sách khuyến khích cho các doanh nghiệp khi đầu tư vào công nghệ mới và đào tạo nhân lực.

Các trường đại học và trung tâm đào tạo cần tăng cường các chương trình giảng dạy về BIM, IoT và phân tích dữ liệu để xây dựng đội ngũ chuyên gia chất lượng cao, đáp ứng nhu cầu của thị trường.

Bằng cách kết hợp linh hoạt các giải pháp tiên tiến và tận dụng hiệu quả công nghệ, ngành xây dựng Việt Nam hoàn toàn có thể vượt qua những khó khăn của điều kiện khí hậu nóng ẩm, tạo ra những công trình chất lượng, bền vững và hiệu quả kinh tế cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. TCVN 8828:2011: Bê tông - Yêu cầu bảo dưỡng ẩm tự nhiên.
- [2]. Nguyễn Tiến Đích (2011). Công tác bê tông trong điều kiện nóng ẩm Việt Nam.
- [3]. Neville, A.M. (2011). Properties of Concrete, Pearson.
- [4]. Murdock, L. J., Brook, K. M. (1990). Concrete Materials and Practice.
- [5]. ACI 308R-16 (2016) – Guide to External Curing of Concrete.
- [6]. How to Save 4 Months on a Schedule? PCL Builds the 70-Story Stantec Tower Using SmartRock:
<https://www.giatecscientific.com/case-study/pcl-construction/>
- [7]. Fahad Iqbal, Shiraz Ahmed, Muhammad Abu Bakar Tariq (2024). BIM-IoT integration for remote real-time concrete compressive strength monitoring. Ain Shams Engineering Journal.
- [8]. Định hướng tạo lập cơ chế, chính sách áp dụng BIM có tính ràng buộc cao:
<https://tapchixaydung.vn/dinh-huong-cao-lap-co-che-chinh-sach-ap-dung-bim-co-tinh-rang-buoc-cao-20201224000028234.html>.