MÔ PHỎNG SỰ PHÁT TRIỂN NHIỆT ĐỘ TRONG BÊ TÔNG KHỐI LỚN KHI SỬ DỤNG HỆ THỐNG ỐNG LÀM MÁT BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

FEM Simulation of Temperature Development in Mass Concrete Incorporating an Embedded Cooling Pipe System

Nguyễn Chí Nguyên[1], Hoàng Đình Thịnh[2], Lê Thanh Tú[2]

[1]23XD1 – Khoa kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật-Đại học Đà Nẵng;
nguyenchinguyenute@gmail.com

[2]22XD1 – Khoa kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật-Đại học Đà Nẵng;
hoangdinhthinhute@gmail.com, lttu04.ute.udn@gmail.com

GVHD: TS. Phan Thanh Ngọc

ptngoc@ute.udn.vn

Khoa kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật-Đại học Đà Nẵng

Tóm tắt - Việc kiểm soát nhiệt độ trong bê tông khối lớn là rất cần thiết nhằm ngăn ngừa hiện tượng nứt nhiệt ở giai đoạn sớm do nhiệt thủy hóa gây ra. Nghiên cứu này trình bày một phương pháp phân tích bằng phần tử hữu hạn (FEM) để đánh giá sự phát triển nhiệt độ và ứng suất trong một tường chắn bê tông cốt thép (RC) có tích hợp hệ thống ống làm mát nhúng bên trong (PCS). Mô hình xét đến các đặc tính vật liệu thực tế, trình tự thi công và các điều kiện biên môi trường. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống PCS làm giảm hiệu quả nhiệt độ cực đại tại lõi, trong khi mô hình không sử dụng PCS xuất hiện sự gia tăng nhiệt độ quá mức. Một nghiên cứu tham số được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của đường kính ống, lưu lượng dòng chảy, thời gian làm mát, khoảng cách bố trí ống và nhiệt độ nước làm mát. Kết quả cho thấy hiệu quả làm mát phụ thuộc mạnh vào vận tốc dòng chảy, với một khoảng giá trị tối ưu để truyền nhiệt hiệu quả. Đường kính ống lớn hơn và khoảng cách bố trí hợp lý giúp mở rộng vùng làm mát hiệu quả, trong khi việc tăng quá mức lưu lượng dòng chảy hoặc kéo dài thời gian làm mát chỉ mang lại lợi ích bổ sung hạn chế. Thời gian làm mát 3 ngày và nhiệt độ nước 20 °C được khuyến nghị cho kết cấu nghiên cứu nhằm đảm bảo cả nhiệt độ và ứng suất kéo nằm trong giới hạn cho phép. Những kết quả này cung cấp cơ sở thực tiễn cho việc tối ưu thiết kế hệ thống ống làm mát và nâng cao độ bền của các kết cấu bê tông khối lớn.

Từ khóa - *Phân tích phần tử hữu hạn (FEM), bê tông khối lớn, kiểm soát nhiệt độ, hệ thống ống làm mát*

Abstract - Temperature control in mass concrete is essential to prevent early-age thermal cracking caused by hydration heat. This study presents a FEM analysis approach of temperature and stress development in a RC retaining wall incorporating an embedded pipe cooling system (PCS). The model accounts for realistic material properties, construction sequences, and environmental boundary conditions. The simulation results demonstrate that the PCS effectively reduces the maximum core temperature, whereas the model without PCS exhibits excessive temperature rise. A parametric study is conducted to evaluate the effects of pipe diameter, flow rate, cooling duration, pipe spacing, and cooling water temperature. The results indicate that cooling efficiency is strongly dependent on flow velocity, with an optimal range for effective heat transfer. Larger pipe diameters and appropriate spacing enhance the effective cooling zone, while excessive flow rates and prolonged cooling durations provide limited additional benefits. A cooling duration of three days and a water temperature of 20 °C are recommended for the targeted structure to maintain both temperature and tensile stress within acceptable limits. These findings provide practical guidance for optimizing pipe cooling system design and improving the durability of mass concrete structures.

Key words - *FEM analysis, mass concrete, temperature control, pipe cooling system*

1. Đặt vấn đề

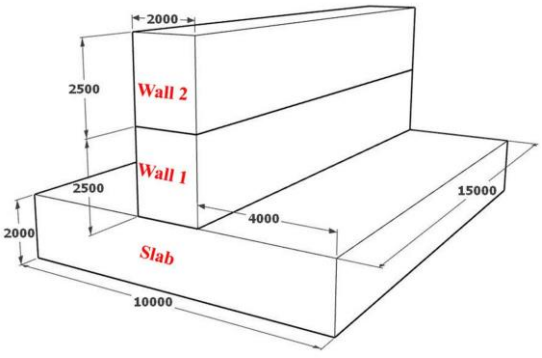
Bê tông khối lớn được sử dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng quy mô lớn như đập thủy điện, móng và trụ cầu, tường chắn, móng công nghiệp nặng và móng nhà cao tầng. Do có thể tích lớn và tỷ lệ diện tích bề mặt trên thể tích nhỏ, nhiệt sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng bị giữ lại trong khối bê tông, dẫn đến sự gia tăng nhiệt độ đáng kể tại vùng lõi [1]. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt tạo ra ứng suất nhiệt trong bê tông. Khi các ứng suất này vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông ở tuổi sớm, các vết nứt nhiệt có thể xuất hiện, ảnh hưởng tiêu cực đến độ bền lâu, khả năng chống thấm và hiệu quả làm việc lâu dài của kết cấu [2, 3]. Để kiểm soát hiện tượng này, nhiều biện pháp đã được nghiên cứu và áp dụng, trong đó hệ thống ống làm mát bên trong sử dụng nước tuần hoàn được xem là một trong những giải pháp hiệu quả nhất [4, 5]. Hệ thống này giúp tản nhiệt thủy hóa, làm giảm nhiệt độ cực đại cũng như giảm chênh lệch nhiệt độ trong khối bê tông. Tuy nhiên, trong thực tế, việc thiết kế và bố trí hệ thống ống làm mát vẫn chủ yếu dựa trên kinh nghiệm. Trong khi đó, quá trình truyền nhiệt trong bê tông khối lớn mang tính phi tuyến và chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như động học thủy hóa, điều kiện môi trường, cấu hình ống, lưu lượng dòng chảy và nhiệt độ nước làm mát [5, 6]. Tại Việt Nam, các nghiên cứu về kiểm soát nhiệt độ trong bê tông khối lớn còn hạn chế, đặc biệt là các nghiên cứu kết hợp mô hình số với điều kiện thi công thực tế. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được xem là công cụ hiệu quả để mô phỏng ứng xử nhiệt và dự đoán sự phát triển nhiệt độ theo không gian và thời gian. Thông qua việc tích hợp các đặc trưng vật liệu, điều kiện biên và trình tự thi công, phương pháp này có thể hỗ trợ thiết kế và tối ưu hóa hệ thống làm mát một cách hợp lý [2, 3]. Vì vậy,

nghiên cứu này tập trung phân tích sự phát triển nhiệt độ và ứng suất trong bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống làm mát bằng phương pháp mô phỏng FEM. Mục tiêu là đánh giá ảnh hưởng của các tham số chính đến hiệu quả kiểm soát nhiệt độ và đề xuất các khuyến nghị thiết kế phù hợp. Kết quả nghiên cứu góp phần nâng cao hiệu quả kiểm soát nhiệt độ, giảm nguy cơ nứt nhiệt ở tuổi sớm và cải thiện độ bền lâu của các kết cấu bê tông khối lớn trong điều kiện Việt Nam.

2. Đối tượng và phương pháp mô phỏng FEM

2.1. Chi tiết hệ tường chắn bê tông cốt thép (RC)

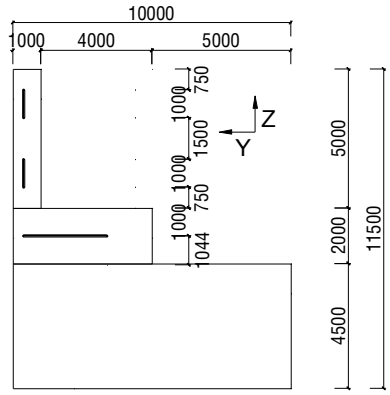
Kết cấu được mô hình hóa trong nghiên cứu này là một hệ tường chắn dạng công xôn bằng bê tông cốt thép điển hình. Như thể hiện trong Hình 1, tường bao gồm hai thành phần kết cấu chính: một bản đáy và một thân tường thẳng đứng, được đổ liền khối để đảm bảo tính liên tục của kết cấu. Thân tường được chia thành hai đoạn, ký hiệu là Tường 1 và Tường 2. Mỗi đoạn có chiều cao 2,5 m, tạo thành tổng chiều cao tường là 5,0 m. Chiều dày của thân tường là đồng nhất 2,0 m trên toàn bộ chiều cao. Tường kéo dài theo phương dọc 15,0 m (Hình 1). Bản đáy có chiều dày 2,0 m, chiều rộng 10,0 m và chiều dài 15,0 m. Thân tường được bố trí đối xứng trên bản đáy. Cấu hình này tạo ra sự phân bố tải trọng đồng đều và các điều kiện biên đối xứng.



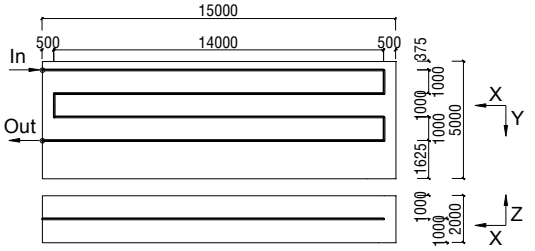
***Hình 1**. Chi tiết của hệ tường chắn bê tông cốt thép (RC)*

2.2. Chi tiết hệ thống ống làm mát

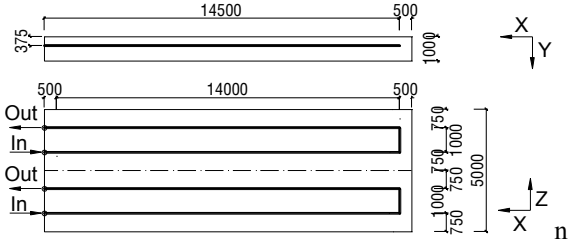
Đối với kết cấu bê tông khối lớn, việc kiểm soát nhiệt độ tối đa bên trong và chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt là rất quan trọng. Theo tiêu chuẩn Việt Nam mới nhất TCVN 14334:2025, nhiệt độ tối đa cho phép thường nằm trong khoảng từ 70 °C đến 85 °C, tùy thuộc vào loại xi măng sử dụng. Chênh lệch nhiệt độ cho phép giữa lõi và bề mặt nằm trong khoảng từ 20 °C đến 29 °C, tùy thuộc vào loại cốt liệu và cấp độ bền của bê tông. Trong nghiên cứu này, trọng tâm được đặt vào việc kiểm soát nhiệt độ tối đa của bê tông bằng các biện pháp thi công, cụ thể là thông qua việc áp dụng hệ thống ống làm mát (PCS), mà không sử dụng thêm các giải pháp liên quan đến vật liệu. Hình 2 mô tả cách bố trí mô hình đối xứng một nửa của kết cấu. Các ống làm mát được bố trí theo dạng zíc zắc với đường kính 40 mm (D40) cho bản đáy và Tường 1, Tường 2. Nước làm mát ở nhiệt độ không đổi 20 °C được tuần hoàn qua các ống (từ đầu vào đến đầu ra) trong 7 ngày đầu sau mỗi giai đoạn đổ bê tông, như minh họa trong Hình 2b, 2c. Lưu lượng dòng chảy được duy trì ở mức 50 L/phút.



a) Hệ thống ống làm mát – Mặt trước



b) Hệ thống ống làm mát trong bản sàn



c) Hệ thống ống làm mát trong tường

***Hình. 2** Chi tiết hệ thống ống làm mát*

2.3. Quy trình mô hình hóa FEM

Một mô hình nửa (half-model) được sử dụng do tính đối xứng của kết cấu, từ đó giúp giảm thời gian tính toán trong khi vẫn đảm bảo độ chính xác của phân tích, như thể hiện trong Hình 3.

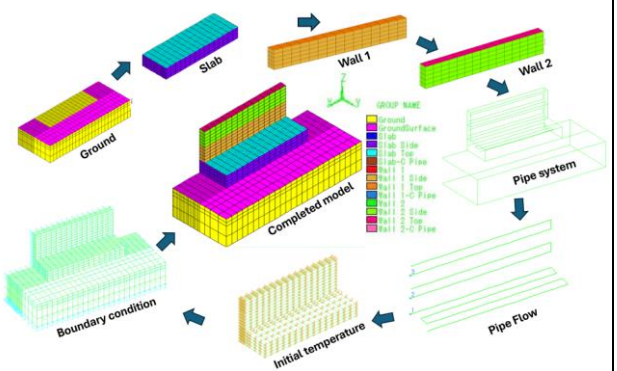
a) Mô hình hình học và chia lưới các cấu kiện: Quy trình mô hình hóa bắt đầu bằng việc xác định nền đất tự nhiên, được giả định là không sinh nhiệt. Sau đó, các cấu kiện của tường chắn được chia lưới, bao gồm bản đáy và các đoạn tường (Tường 1 và Tường 2). Việc phân chia này là cần thiết để mô phỏng chính xác quá trình thi công theo từng giai đoạn và sự kích hoạt tương ứng của các phần tử (Hình 3).

b) Mô phỏng hệ thống ống làm mát và các đầu vào nhiệt: Một hệ thống PCS bên trong được tích hợp vào mô hình nhằm kiểm soát sự gia tăng nhiệt độ trong bê tông khối lớn. Các ống làm mát được mô hình hóa tường minh, và các tham số nhiệt liên quan, bao gồm nhiệt độ ban đầu của bê tông, nhiệt độ môi trường và nhiệt độ nước làm mát, được xác định như các đầu vào phụ thuộc theo thời gian để phản ánh điều kiện thi công thực tế (Hình 3).

c) Đặc tính sinh nhiệt của vật liệu: Các phần tử được phân loại dựa trên đặc tính sinh nhiệt của chúng. Các cấu kiện bê tông, bao gồm bản đáy và các đoạn tường, được xác định là vật liệu sinh nhiệt do quá trình thủy hóa tỏa nhiệt, trong khi nền đất được xem là không sinh nhiệt (Hình 3).

d) Trình tự thi công và phân tích theo thời gian: Quá trình thi công được mô phỏng thông qua quy trình kích hoạt theo từng giai đoạn, tuân theo trình tự đổ bê tông được trình bày trong Bảng 1. Phân tích được thực hiện với các bước thời gian rời rạc nhằm mô tả sự phát triển đồng thời của nhiệt độ và ứng suất trong suốt quá trình thủy hóa và giai đoạn đầu tuổi (Hình 3).

e) Điều kiện biên: Các điều kiện biên nhiệt và cơ học thích hợp được áp dụng để mô phỏng sự tương tác giữa kết cấu, nền đất và môi trường xung quanh. Các điều kiện này bao gồm truyền nhiệt đối lưu tại các bề mặt lộ ra ngoài và các điều kiện liên kết tại các bề mặt tiếp xúc, chi phối sự phát triển ứng suất trong kết cấu (Hình 3).



Hình 3. *Quy trình mô hình hóa FEM*

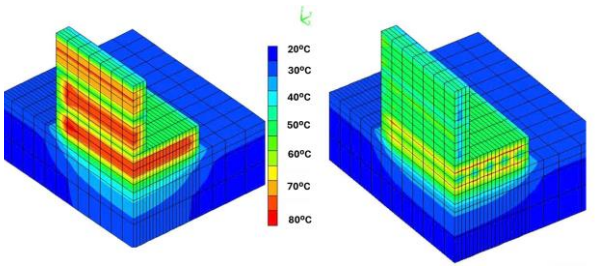
3. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

3.1. Đánh giá độ hiệu quả của phương pháp làm mát

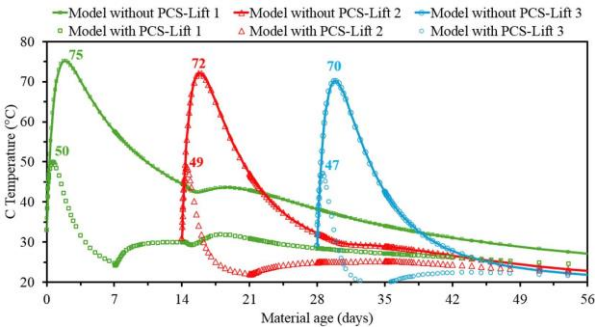
Để đánh giá hiệu quả của phương pháp làm mát bằng ống, hai mô hình phần tử hữu hạn (FEM) đã được xây dựng: một mô hình có tích hợp hệ thống ống làm mát bên trong và một mô hình không có làm mát.

Như thể hiện trong Hình 4a và 4c, mô hình không có hệ thống làm mát cho thấy nhiệt độ cực đại cao tại lõi của các lớp đổ (Lift) 1, 2 và 3, đạt khoảng 70–75 °C. Ngược lại, mô hình có hệ thống làm mát (Hình 4b và 4c) cho thấy sự giảm đáng kể nhiệt độ cực đại, không chỉ tại lõi mà còn ở các vùng xung quanh các ống làm mát, với giá trị đỉnh khoảng 47–50 °C. Ngoài ra, phân bố nhiệt độ trở nên đồng đều hơn, cho thấy sự giảm gradient nhiệt trong khối bê tông (Hình 4b).

Những kết quả này chứng minh rõ ràng rằng việc tích hợp hệ thống làm mát bên trong có ảnh hưởng đáng kể đến cả giá trị và sự phân bố nhiệt độ trong bê tông khối lớn. Do đó, việc áp dụng hệ thống ống làm mát (PCS) là một giải pháp kỹ thuật hiệu quả và cần thiết để kiểm soát sự gia tăng nhiệt độ và giảm thiểu nứt nhiệt ở giai đoạn đầu, từ đó nâng cao độ bền và hiệu quả làm việc lâu dài của kết cấu bê tông khối lớn.



a) Mô hình không có ống làm mát b) Mô hình có ống làm mát



c) Diễn biến nhiệt độ tại lõi

Hình 4. *Phân bố nhiệt độ và sự phát triển nhiệt độ trong các mô hình FEM có và không có hệ thống ống*

3.2. Ảnh hưởng của đường kính ống và lưu lượng dòng chảy đến phân bố nhiệt độ và vùng ảnh hưởng

Hai trường hợp mô phỏng có tích hợp hệ thống ống làm mát (PCS) với đường kính ống lần lượt là 18 mm (D18) và 40 mm (D40) đã được xem xét để phân tích. Để đánh giá vùng ảnh hưởng hiệu quả của hệ thống làm mát dưới các đường kính ống khác nhau, vận tốc dòng chảy của nước trong ống được sử dụng như một tham số đại diện. Mối quan hệ giữa đường kính ống, lưu lượng và vận tốc dòng chảy được biểu diễn theo (1):

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{66.67Q}{\pi D^2}$$

Trong đó, v là vận tốc dòng chảy của nước trong ống (m/s), Q là lưu lượng thể tích (L/phút), D là đường kính trong của ống (mm), và A là diện tích tiết diện của ống (mm²).

Các trường hợp phân tích tham số xét đến đường kính trong, lưu lượng và vận tốc dòng chảy được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1: *Các trường hợp phân tích tham số cho đường kính ống và lưu lượng*

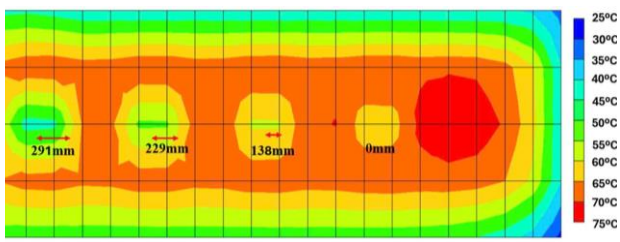
Case	Inner diameter (mm)	Flow rate (L/min)	Flow velocity (m/s)
1	18	50	3.3
2		30	2.0
3		20	1.3
4		10	0.7
5		5	0.3
6		1	0.1
7	30	5	3.3
8		13	2.0
9		30	1.3
10		55	0.7
11		85	0.3
12		140	0.1
13	40	250	3.3
14		150	2.0
15		100	1.3
16		50	0.7
17		25	0.3
18		10	0.1

Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, đối với cả ba đường kính ống (D18, D30 và D40), hiệu quả làm mát, được đặc trưng bởi mức giảm nhiệt độ và phạm vi vùng ảnh hưởng, phụ thuộc mạnh vào vận tốc dòng chảy của nước trong ống. Cụ thể, khi vận tốc dòng chảy quá thấp (0,1 m/s, V0.1) hoặc quá cao (3,3 m/s, V3.3), hiệu quả làm mát trở nên không đáng kể, như thể hiện trong Hình 5. Hiện tượng này liên quan đến cơ chế truyền nhiệt giữa nước tuần hoàn và bê tông xung quanh. Ở vận tốc thấp, truyền nhiệt đối lưu yếu nên khả năng mang nhiệt đi hạn chế. Ngược lại, ở vận tốc quá cao, thời gian lưu của nước trong ống không đủ để trao đổi nhiệt hiệu quả, làm giảm hiệu quả làm mát. Hai yếu tố này cho thấy tồn tại một khoảng vận tốc tối ưu, trong đó đạt được sự cân bằng giữa thời gian lưu đủ lớn và tăng cường truyền nhiệt đối lưu, từ đó tối đa hóa hiệu quả làm mát của hệ thống ống.

Đối với trường hợp D18 (Hình 6a), nhiệt độ cực đại tại lõi thay đổi không đáng kể, dao động từ khoảng 72,5 °C đến 76,7 °C trong các mức lưu lượng khảo sát. Tuy nhiên, vùng làm mát hiệu quả lại rất nhạy với lưu lượng. Bán kính vùng ảnh hưởng lớn nhất đạt được tại các lưu lượng 10 và 30 L/phút, tương ứng khoảng 320 mm và 330 mm.

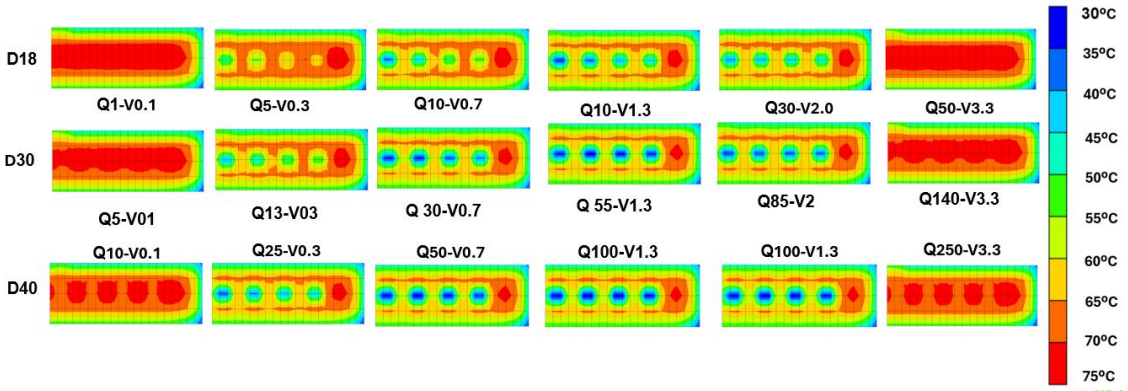
Đối với trường hợp D40 (Hình 6b), xu hướng tương tự cũng được ghi nhận. Nhiệt độ cực đại chỉ biến đổi trong khoảng hẹp, khoảng 72,0 °C đến 74,1 °C, cho thấy lưu lượng có ảnh hưởng hạn chế đến nhiệt độ đỉnh. Tuy nhiên, bán kính vùng làm mát hiệu quả lớn hơn đáng kể so với trường hợp D18, đạt tới 400 mm tại lưu lượng 100 L/phút và duy trì ở mức cao (khoảng 350–390 mm) trong khoảng lưu lượng 25–150 L/phút, trước khi giảm ở các lưu lượng thấp hơn. Xét về thực tế thi công, lưu lượng 25–50 L/phút được xem là phù hợp dựa trên công suất và tính thuận tiện vận hành của các hệ thống bơm tại công trường. Do đó, bán kính vùng làm mát hiệu quả trung bình khoảng 375 mm được khuyến nghị cho cấu hình D40.

Các kết quả này cho thấy đường kính ống có ảnh hưởng đáng kể đến phạm vi không gian của vùng làm mát hiệu quả, trong khi nhiệt độ cực đại của bê tông chỉ bị ảnh hưởng nhẹ bởi sự thay đổi lưu lượng. Đồng thời, đối với mỗi đường kính ống, có thể xác định được một khoảng lưu lượng tối ưu để đạt hiệu quả làm mát cao nhất.

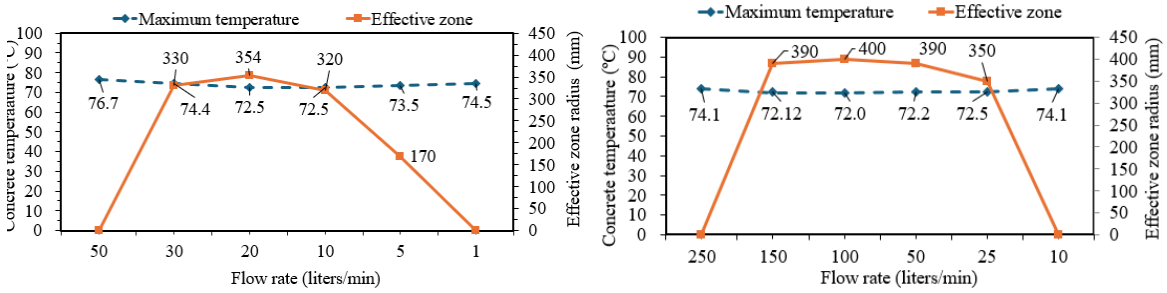


Hình 7*. Bán kính vùng làm mát hiệu quả của mô hình D18–Q5–20°C*

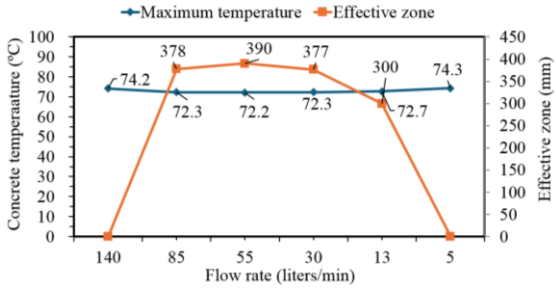
Hình 7 trình bày bán kính vùng làm mát hiệu quả cho trường hợp ống có đường kính 18 mm, lưu lượng 5 L/phút và nhiệt độ nước vào không đổi 20 °C (D18–Q5–20 °C), trong đó vùng hiệu quả được định nghĩa là vùng có nhiệt độ bê tông nhỏ hơn 60 °C. Kết quả cho thấy hiệu quả làm mát giảm dần từ đầu vào đến đầu ra, với bán kính vùng hiệu quả giảm đáng kể và gần như không còn ở gần đầu ra. Hiện tượng này là do nhiệt độ nước tăng dần theo chiều dòng chảy, làm giảm khả năng hấp thụ nhiệt. Do đó, các ống có đường kính nhỏ như D18 có thể gây ra hiện tượng làm mát không đồng đều và kém hiệu quả ở vùng gần đầu ra, vì vậy cần hạn chế sử dụng trong thực tế.



***Hình 5**. Phân bố đường đẳng nhiệt trong các trường hợp phân tích tham số được trình bày trong Bảng 1*



a) Kết quả mô phỏng cho các mô hình D18 *b) Kết quả mô phỏng cho các mô hình D40*



a) Kết quả mô phỏng cho các mô hình D30

***Hình 6**. Ảnh hưởng của đường kính ống và lưu lượng dòng chảy đến phân bố nhiệt độ và vùng ảnh hưởng*

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã khảo sát ứng xử nhiệt – cơ của tường chắn bê tông cốt thép (RC) khối lớn có tích hợp hệ thống ống làm mát nhúng bên trong bằng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEM). Kết quả mô phỏng FEM cho thấy:

(1) Mô hình FEM, với các giả thiết phù hợp về đặc tính vật liệu, trình tự thi công và điều kiện biên môi trường, có khả năng phản ánh hiệu quả của hệ thống ống làm mát nhúng. Kết quả cho thấy sự giảm đáng kể cả về giá trị nhiệt độ cực đại và sự phân bố nhiệt độ trong các vùng lõi của tường chắn bê tông cốt thép.

(2) Đường kính ống ảnh hưởng đáng kể đến phạm vi vùng làm mát, trong khi nhiệt độ cực đại của bê tông chỉ bị ảnh hưởng không đáng kể bởi lưu lượng dòng chảy. Tồn tại một khoảng lưu lượng tối ưu tương ứng với mỗi đường kính ống để đạt hiệu quả làm mát cao nhất. Ngoài ra, các ống có đường kính nhỏ (ví dụ D18) cho thấy sự suy giảm rõ rệt hiệu quả làm mát theo chiều dòng chảy, dẫn đến làm mát không đồng đều và xuất hiện các vùng kém hiệu quả gần đầu ra do nhiệt độ nước tăng lên. Vì vậy, cần tránh sử dụng ống có đường kính quá nhỏ trong thực tế.

(3) Sự cân bằng giữa hiệu quả làm mát và hiệu quả kinh tế có thể đạt được thông qua phân tích FEM. Đối với trường hợp sử dụng ống đường kính 40 mm, nhiệt độ nước làm mát 20 °C và lưu lượng 50 L/phút, khoảng cách bố trí ống 1000 mm được khuyến nghị.

(4) Thời gian làm mát 3 ngày được đề xuất như một giải pháp kinh tế nhằm kiểm soát cả nhiệt độ cực đại của bê tông (41,1 °C) và ứng suất kéo, đạt hiệu quả tương đương với các thời gian làm mát dài hơn đối với kết cấu nghiên cứu.

(5) Nhiệt độ nước làm mát cao hơn dẫn đến ứng suất kéo tăng lên, trong khi nhiệt độ thấp hơn giúp cải thiện khả năng chống nứt. Nhiệt độ nước 20 °C đảm bảo kiểm soát ứng suất hiệu quả đồng thời vẫn phù hợp về mặt thực tiễn và kinh tế, do đó được khuyến nghị cho kết cấu nghiên cứu.

Tài liệu tham khảo

[1] G. Sun, et al., "Prediction of the hydration heat, temperature distribution and thermal stress of mass concrete," Case Studies in Construction Materials, 24: p. e05748, 2026.

[2] T. N. Phan, A. Hosoda, A. I. Zerin, K. Temamoto and K. Tani, "Comprehensive evaluation of early-age transverse cracking risk in durable RC deck slabs on multi-span steel girder bridges considering thermal and stepwise construction stresses: A replication study with extension," 26(6): p. 7326-7345, 2025.

[3] A. I. Zerin, A. Hosoda, S. Komatsu and H. Ishii, "Full scale thermal stress simulation of multiple span steel box girder bridge evaluating early age transverse cracking risk of durable RC deck slab," Journal of Advanced Concrete Technology, 18(7): p. 420-436, 2020.

[4] S. Wang, J. Duan, Y. Zhang, S. He and X. Hao, "Optimization of cooling system parameters with temperature field of mass concrete during hydration," Case Studies in Thermal Engineering, 64: p. 105456, 2024

[5] A. Tasri and A. Susilawati, "Effect of cooling water temperature and space between cooling pipes of post-cooling system on temperature and thermal stress in mass concrete," Journal of Building Engineering, 24: p. 100731, 2019.

[6] Z. Bofang, 17 - Pipe Cooling of Mass Concrete, in Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete, Z. Bofang, Editor. 2014, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 341-

Thông tin về tác giả

	Nguyễn Chí Nguyên: - Sinh viên lớp 23XD1, *Khoa kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật-Đại học Đà Nẵng* ; - Lĩnh vực quan tâm: Mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn FEM, Bê tông khối lớn - Điện thoại: 0944606768
	Hoàng Đình Thinh: - Sinh viên lớp 22XD1, *Khoa kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật-Đại học Đà Nẵng*; - Lĩnh vực quan tâm: Mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn FEM, Bê tông khối lớn - Điện thoại: 0944554864
	Lê Thanh Tú: - Sinh viên lớp 23XD1, *Khoa kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật-Đại học Đà Nẵng*; - Lĩnh vực quan tâm: Mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn FEM, Bê tông khối lớn - Điện thoại: 078 5680223
	TS. Phan Thanh Ngọc: - 01/2015-nay: Giảng viên, khoa Kỹ thuật Xây dựng, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật-Đại học Đà Nẵng - 10/2023-4/2025: Trợ lý Giáo sư Thỉnh giảng, trường Đại học Quốc gia Yokohama, Nhật Bản - 10/2022-9/2023: Nghiên cứu sau Tiến sĩ, trường Đại học Quốc gia Yokohama, Nhật Bản - 10/2019-9/2022: Học Tiến sĩ tại trường Đại học Quốc gia Yokohama, Nhật Bản - 04/2017-03/2019: Học Thạc sĩ tại trường Đại học Quốc gia Yokohama, Nhật Bản - 01/2014-01/2015: Giảng viên tập sự, khoa Kỹ thuật Xây dựng, trường Cao đẳng Công nghệ-Đại học Đà Nẵng - Lĩnh vực quan tâm: Mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn FEM, Bê tông khối lớn - Điện thoại: 0935553550