# ĐÁNH GIÁ CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN CỦA BÊ TÔNG SAU KHI CHỊU NHIỆT ĐỘ CAO ĐƯỢC GIA CƯỜNG BẰNG TẤM FRP

**Phan Tấn Phê[a], Đinh Như Khương[b], Phạm Tâm Truyền[c], Tưởng Hồng Mạnh[d], Trương Gia Toại[e]**

Tóm tắt:

Nghiên cứu này đánh giá cường độ chịu nén của bê tông sau khi chịu nhiệt độ cao và được gia cường bằng tấm CFRP. Tổng cộng 11 mẫu bê tông hình trụ (150 × 300 mm) được thí nghiệm, bao gồm mẫu không gia cường và mẫu gia cường với một và ba lớp CFRP. Kết quả cho thấy nhiệt độ cao làm giảm cường độ chịu nén khoảng 10,2%. Tuy nhiên, việc gia cường bằng CFRP giúp cải thiện đáng kể, với cường độ tăng từ 21.1 MPa lên 42 MPa (1 lớp) và đạt 121,5 MPa (3 lớp). Hiệu quả này chủ yếu do cơ chế kiềm chế nở hông, giúp hạn chế phát triển vết nứt. So sánh với các mô hình hiện có (ACI 440.2R-17, Wu & Wei, Pham & Hadi) cho thấy xu hướng phù hợp, trong đó mô hình Wu & Wei cho kết quả gần thực nghiệm nhất. Một số sai khác xuất hiện ở mẫu nhiều lớp do ảnh hưởng của chất lượng thi công. Kết quả khẳng định hiệu quả của CFRP trong gia cường bê tông sau cháy.

Từ khóa: *Bê tông, nhiệt độ, CFRP, gia cường, mô hình tính toán.*

# ASSESSMENT OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE AFTER EXPOSURE TO ELEVATED TEMPERATURES STRENGTHENED WITH FRP SHEETS

Abstract:

This study evaluates the compressive strength of concrete exposed to elevated temperatures and strengthened with CFRP sheets. A total of 11 cylindrical specimens (150 × 300 mm) were tested, including unstrengthened and CFRP-confined samples with one and three layers. Results show that high temperature reduced compressive strength by about 10.2%. However, CFRP strengthening significantly improved performance, increasing strength from 21.1 MPa to 42 MPa (one layer) and up to 121.5 MPa (three layers). This improvement is mainly attributed to the confinement effect, which restrains lateral expansion and delays crack propagation. Comparison with existing models (ACI 440.2R-17, Wu & Wei, and Pham & Hadi) indicates that all models capture the general trend, while the Wu & Wei model provides the closest prediction. Some discrepancies were observed for multiple CFRP layers due to

[a] Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Đông Á
[b] Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Đông Á
[c] Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Đông Á
[d] Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Đông Á
[e] Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Đông Á. e-mail: toaitg@donga.edu.vn

construction quality. The findings confirm the effectiveness of CFRP in strengthening fire-damaged concrete.

**Keywords:** *Concrete, temperature, CFRP, strengthening, model.*

## Giới thiệu

Trong những năm gần đây, việc nâng cao khả năng chịu lực và độ bền lâu của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) đã trở thành mối quan tâm lớn trong cả nghiên cứu và thực tiễn. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc bao confinement bê tông có thể cải thiện đáng kể cường độ chịu nén và độ dẻo thông qua việc hạn chế biến dạng ngang, từ đó tạo trạng thái ứng suất ba trục và làm chậm quá trình phá hoại.

Sự phát triển của vật liệu polymer cốt sợi (FRP) đã mang lại một giải pháp hiệu quả trong gia cường kết cấu bê tông. Nhờ các đặc tính ưu việt như cường độ kéo cao, khối lượng nhẹ, khả năng chống ăn mòn tốt và dễ thi công, FRP ngày càng được sử dụng rộng rãi thay thế cho các phương pháp gia cường truyền thống bằng thép. Các nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết cho thấy FRP có thể cải thiện đáng kể khả năng chịu nén của bê tông.

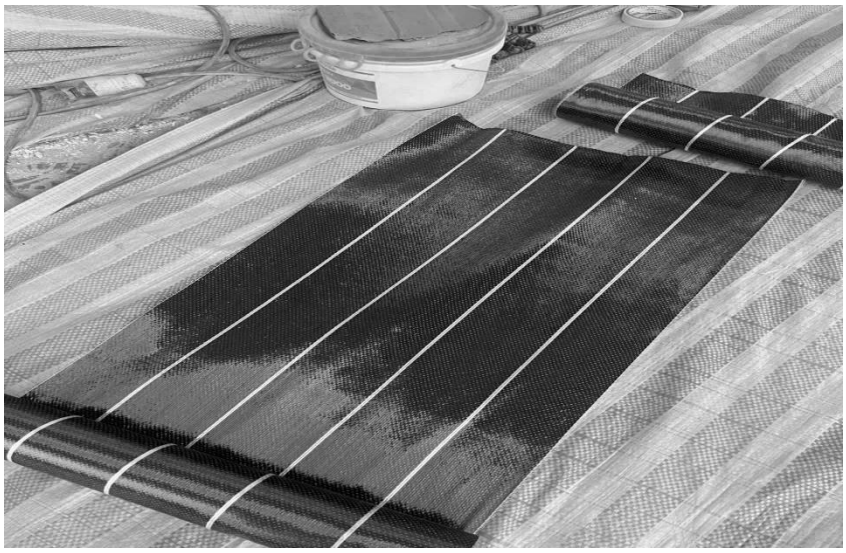
Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện nay chỉ được thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm tiêu chuẩn, trong khi ứng xử của bê tông được gia cường bằng FRP trong các điều kiện khắc nghiệt, đặc biệt là sau khi chịu nhiệt độ cao, vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Nhiệt độ cao có thể làm suy giảm đáng kể tính chất cơ học của bê tông thông qua các cơ chế như nứt nhiệt, bong tróc và suy giảm liên kết, dẫn đến giảm cường độ và tăng tính giòn.

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu này tập trung đánh giá cường độ chịu nén của bê tông sau khi chịu nhiệt độ cao và được gia cường bằng tấm FRP, nhằm góp phần đề xuất giải pháp hiệu quả cho việc phục hồi và nâng cao khả năng chịu lực của kết cấu.

## Chương trình thí nghiệm

### *Vật liệu chế tạo mẫu*

Tấm vải carbon là một loại vật liệu composite tiên tiến thuộc nhóm polymer cốt sợi (FRP), được cấu tạo từ các sợi carbon cường độ cao dệt thành dạng vải và kết hợp với nhựa polymer (thường là epoxy) trong quá trình thi công. Nhờ đặc tính nổi bật như cường độ kéo rất lớn, khối lượng nhẹ, khả năng chống ăn mòn và độ bền lâu cao, tấm vải carbon ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng. Vật liệu này đặc biệt hiệu quả trong việc gia cường và phục hồi kết cấu bê tông, chẳng hạn như tăng cường khả năng chịu lực cho dầm, cột hoặc cải thiện độ dẻo của cấu kiện thông qua cơ chế bao confinement. Ngoài ra, tấm vải carbon còn có ưu điểm thi công linh hoạt, có thể dán hoặc quấn lên bề mặt cấu kiện mà không làm thay đổi đáng kể kích thước hình học, giúp đảm bảo cả yêu cầu kỹ thuật và thẩm mỹ cho công trình.



**Hình 1. Tấm vải carbon**

Trong nghiên cứu này, tấm vải carbon được sử dụng là loại UT70-30G (Hình 1), có thông số kỹ thuật như sau: trong lượng riêng = 1800 kg/m$^3$, độ dày = 0,167 mm, cường độ chịu kéo = 4936,9 MPa, độ giãn dài khi nứt = 2% và Module đàn hồi = 245 GPa.

Trong nghiên cứu này, epoxy bão hòa được sử dụng làm chất kết dính để dán tấm vải sợi carbon lên bề mặt bê tông. Loại epoxy CE5300-B được lựa chọn nhờ khả năng bám dính cao và đảm bảo liên kết hiệu quả giữa bê tông và vật liệu CFRP. Vật liệu này có độ bền cơ học tốt, khả năng kháng ẩm và hóa chất, góp phần nâng cao độ bền và tính ổn định của hệ gia cường. Ngoài ra, với độ nhớt phù hợp và khả năng đóng rắn ở nhiệt độ môi trường, CE5300-B thuận lợi cho thi công thực tế.

### *Thiết kế cấp phối*

Quy trình thiết kế cấp phối bê tông được thực hiện nhằm đạt cấp bền B20 (mác 250). Cường độ chịu nén thiết kế được xác định là 15,7 MPa đối với mẫu lập phương, tương đương khoảng 12,6 MPa đối với mẫu hình trụ. Dựa trên yêu cầu này, cấp phối bê tông được tính toán và lựa chọn phù hợp với các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu. Thành phần cấp phối chi tiết được trình bày trong Bảng 1.

**Bảng 1. Cấp phối bê tông**

| Xi măng (kg/m$^3$) | Cát (kg/m$^3$) | Đá (kg/m$^3$) | Nước (lít) |
|---|---|---|---|
| 273,5 | 532 | 1022,4 | 173,5 |

Tổng cộng 11 mẫu bê tông hình trụ có kích thước đường kính × chiều cao (150 × 300 mm) đã được chế tạo. Các mẫu được bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn, bao gồm nhiệt độ phòng và độ ẩm ≥ 95% (ngâm trong nước) trong thời gian 28 ngày. Sau đó, các mẫu này được bảo dưỡng trong điều kiện môi trường bình thường cho đến khi tiến hành gia cường.

### *Quy trình gia cường mẫu sau khi nung*

Sau khi kết thúc quá trình nung, các mẫu bê tông được đưa ra môi trường xung quanh để làm nguội tự nhiên, nhằm mô phỏng điều kiện thực tế của kết cấu sau hỏa hoạn. Quá trình nung được thực hiện bằng cách cho mẫu tiếp xúc trực tiếp với lửa trong thời gian 1,5 giờ ở điều kiện nhiệt độ tự nhiên.

Sau đó, vật liệu gia cường được chuẩn bị theo đúng yêu cầu. Tấm vải sợi carbon (CFRP) được cắt theo kích thước thiết kế với bề rộng 300 mm, tương ứng với chiều cao của mẫu. Keo epoxy được cân và trộn theo tỷ lệ do nhà sản xuất quy định, với thời gian đông kết ban đầu khoảng 180-240 phút trong điều kiện nhiệt độ môi trường. Chiều dài chồng nối của tấm CFRP được lựa chọn là 100 mm nhằm đảm bảo hiệu quả làm việc của vật liệu (Truong, 2017).

Quy trình dán CFRP được thực hiện theo các bước tiêu chuẩn như thể hiện trong Hình 2. Trước tiên, một lớp keo lót được phủ lên bề mặt bê tông để tạo lớp kết dính trung gian. Sau khoảng 30 phút, khi lớp keo đạt trạng thái dính bám ban đầu, một lớp keo thứ hai được phủ đều lên bề mặt bằng con lăn. Tiếp theo, tấm CFRP được dán lên bề mặt mẫu theo đúng thiết kế, đảm bảo tiếp xúc tốt và không xuất hiện bọt khí. Một lớp keo epoxy bổ sung được phủ lên bề mặt ngoài của tấm CFRP nhằm tăng cường liên kết. Đối với các trường hợp gia cường nhiều lớp, quy trình này được lặp lại cho từng lớp.

Sau khi hoàn tất quá trình gia cường, các mẫu được để đông cứng trong khoảng 24 giờ để đảm bảo keo epoxy đóng rắn hoàn toàn. Cuối cùng, hai đầu mẫu được xử lý bề mặt và tiến hành thí nghiệm nén dọc trục đến phá hoại để xác định cường độ chịu nén của bê tông.



**Hình 2. Quy trình gia cường mẫu sau khi nung**

### *Thí nghiệm cường độ chịu nén của bê tông*

*Tham số nghiên cứu*

Trong nghiên cứu này, các mẫu thí nghiệm được phân thành bốn nhóm tương ứng với bốn trường hợp khảo sát nhằm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến cường độ chịu nén của bê tông, đồng thời xem xét hiệu quả gia cường bằng tấm CFRP. Cụ thể, nhóm Plain được sử dụng làm mẫu đối chứng, không chịu tác động nhiệt và không được gia cường; nhóm Fire bao gồm các mẫu được nung ở nhiệt độ cao; nhóm Fire-1C gồm các mẫu sau khi chịu nhiệt được gia cường bằng một lớp CFRP; và nhóm Fire-3C gồm các mẫu sau khi chịu nhiệt được gia cường bằng ba lớp CFRP. Mỗi nhóm bao gồm ba mẫu thí nghiệm (trừ nhóm Fire-3C chỉ có hai mẫu), trong đó cường độ chịu nén được xác định thông qua giá trị trung bình của ba (hai đối với Fire-3C) mẫu tương ứng nhằm đảm bảo độ tin cậy của kết quả. Bảng 2 tổng hợp các tham số thí nghiệm trong nghiên cứu này.

**Bảng 2. Tổng hợp các tham số thí nghiệm**

| Nhóm mẫu | Số lượng mẫu | Nung ở nhiệt độ cao | Gia cường tấm CFRP | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 1C | 3C |
| Plain | 3 | - | | |
| Fire | 3 | × | - | - |
| Fire-1C | 3 | × | × | |
| Fire-3C | 2 | × | × | × |

*Quy trình thí nghiệm xác định cường độ chịu nén*

Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của bê tông được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M-20 (Truong, 2017). Sau khi hoàn tất quá trình chế tạo và gia cường, các mẫu được tiến hành thí nghiệm theo quy trình sau (Hình 3): Trước tiên, mẫu bê tông được đặt vào máy nén và căn chỉnh chính xác sao cho trục của mẫu trùng với trục tải trọng, đồng thời đảm bảo bề mặt tiếp xúc vuông góc với bàn nén nhằm tránh sai lệch trong quá trình thí nghiệm. Tiếp theo, tải trọng nén dọc trục được gia tăng liên tục cho đến khi mẫu bị phá hoại, với tốc độ gia tải khoảng 0,5 MPa/s theo tiêu chuẩn. Trong quá trình thí nghiệm, lực tác dụng và biến dạng của mẫu được ghi nhận liên tục. Giá trị lực nén lớn nhất mà mẫu chịu được, ký hiệu là P (kN), được sử dụng để xác định cường độ chịu nén của bê tông. Cường độ chịu nén của bê tông, $f'_c$ (MPa), được xác định theo công thức:

$$f_c' = \frac{4000P_{max}}{\pi d^2} \text{(MPa)} \quad (1)$$

 ISBN: 978-604-45-3797-9



**Hình 3. Thí nghiệm nén mẫu**

## Kết quả thí nghiệm

### *Dạng phá hoại của mẫu*

Hình 4 thể hiện hình ảnh phá hoại của mẫu bê tông gia cường tấm CFRP sau khi chị tác dụng của lực nén dọc trục. Nhìn chung các mẫu bị phá hoại khi lớp CFRP bên ngoài bị đứt ngang, làm giảm khả năng bao che cho bê tông dẫn tới bê tông bị vỡ theo. Điều này cho thấy tấm CFRP làm việc hiệu quả, tạo hiệu ứng kiềm chế nở ngang tốt, dẫn đến sự gia tăng đáng kể cường độ của mẫu. Kết quả này cho thấy chất lượng thi công đóng vai trò quyết định đến hiệu quả gia cường của CFRP, đặc biệt là trong việc đảm bảo sự làm việc đồng thời giữa vật liệu gia cường và bê tông nền.



**Hình 4. Phá hoại của mẫu dưới tác dụng của tải trọng nén**

*Cường độ chịu nén của bê tông*

Bảng 3 trình bày giá trị cường độ chịu nén trung bình của các mẫu bê tông sau 365 ngày dưỡng hộ. Kết quả cho thấy, cường độ chịu nén đã tăng đáng kể từ 12,6 MPa (giá trị thiết kế ban đầu) lên 23,5 MPa, phản ánh quá trình phát triển cường độ theo thời gian của vật liệu. Xu hướng này cũng phù hợp với các kết quả đã được công bố trong nghiên cứu của Khan và cộng sự (Truong, 2017).

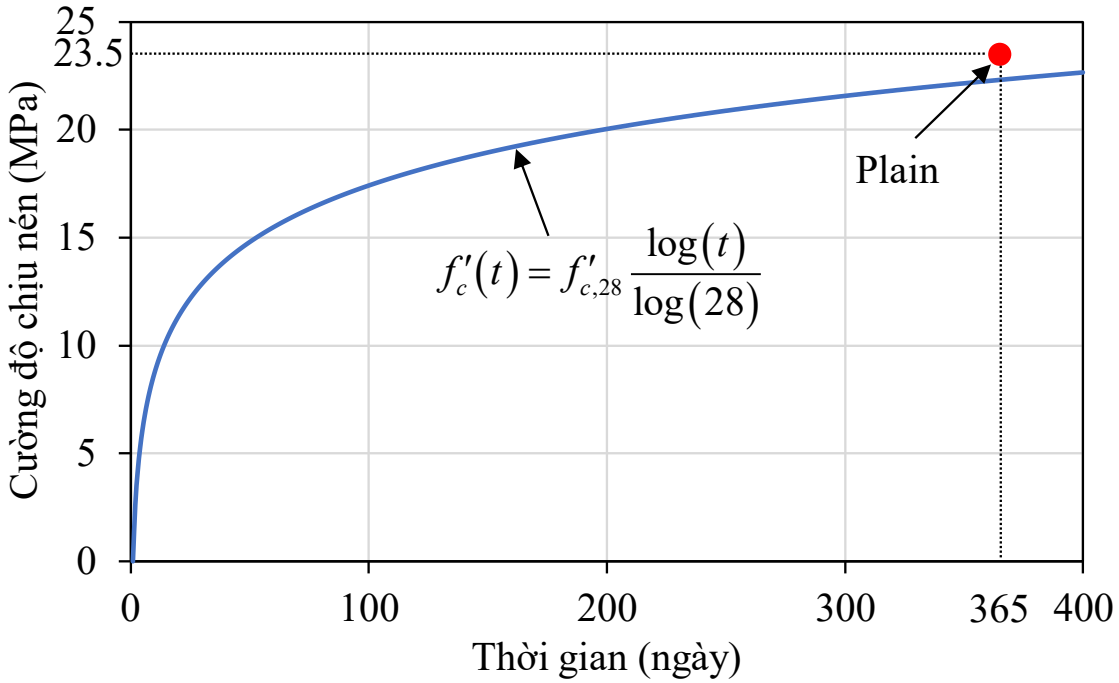
**Bảng 3. Cường độ chịu nén của mẫu**

| Mẫu | Plain | Fire | Fire-1C | Fire-3C |
|---|---|---|---|---|
| Cường độ chịu nén (MPa) | 23,5 | 21,1 | 42 | 121,5 |

Sự phát triển cường độ chịu nén của bê tông theo thời gian có thể được mô tả thông qua công thức thực nghiệm do Bộ Xây dựng đề xuất (công thức (2)).

$$f_c'(t) = f_{c,28}' \frac{log\ log\ (t)}{log\ log\ (28)} \quad (2)$$

Hình 5 minh họa mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và thời gian dưỡng hộ, trong đó có thể nhận thấy giá trị cường độ của mẫu Plain có sự tương đồng tốt với đường cong lý thuyết dự đoán từ công thức này. Điều này cho thấy tính phù hợp và độ tin cậy của mô hình thực nghiệm trong việc đánh giá sự phát triển cường độ của bê tông theo thời gian.




**Hình 5. Cường độ chịu nén của mẫu theo thời gian**

Trong khi đó, sau khi chịu tác động của nhiệt độ cao, cường độ chịu nén của mẫu giảm đáng kể, chỉ còn 21,1 MPa, tương ứng mức suy giảm 10,2% so với mẫu chưa

nung. Hiện tượng này có thể được giải thích bởi sự suy thoái vi cấu trúc của bê tông dưới tác động nhiệt, bao gồm sự hình thành vi khe nứt, mất nước trong các sản phẩm thủy hóa và suy giảm liên kết giữa cốt liệu và hồ xi măng (Xu, 2025).

Tuy nhiên, khi các mẫu sau nung được gia cường bằng tấm CFRP, cường độ chịu nén được cải thiện rõ rệt. Cụ thể, với một lớp CFRP (mẫu Fire-1C), cường độ chịu nén đạt 42 MPa, tăng 99,1% so với mẫu không gia cường (mẫu Fire). Khi số lớp CFRP tăng lên ba lớp (mẫu Fire-3C), cường độ chịu nén tiếp tục gia tăng mạnh, gần gấp ba lần so với mẫu Fire-1C. Kết quả này cho thấy hiệu quả vượt trội của giải pháp gia cường bằng CFRP, đồng thời khẳng định rằng khả năng chịu nén của mẫu phụ thuộc đáng kể vào số lớp vật liệu gia cường bên ngoài, do cơ chế bao confinement ngày càng được tăng cường khi số lớp CFRP tăng lên.

## Mô hình đánh giá cường độ chịu nén

Để đánh giá cường độ chịu nén của bê tông được gia cường bằng tấm CFRP, các mô hình dự đoán đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây trên thế giới được sử dụng làm cơ sở so sánh và đối chiếu. Việc áp dụng các mô hình này không chỉ giúp kiểm chứng độ chính xác của kết quả thực nghiệm, mà còn cho phép đánh giá mức độ phù hợp và khả năng ứng dụng của từng mô hình trong việc dự đoán ứng xử chịu nén của bê tông gia cường CFRP.

*ACI 440.2R-17 (ACI, 2017)*

Theo ACI 440.2R-17 (ACI, 2017)thì cường độ chịu nén ($f'_{cc}$) của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiềm chế nở ngang bằng tấm CFRP có thể được xác định theo các công thức sau đây:

$$f'_{cc} = f'_c + 3{,}3\psi_f k_a f_l \tag{3a}$$

$$f_l = \frac{2E_f n t_f \varepsilon_{f_e}}{d} \tag{3b}$$

$$\varepsilon_{f_e} = k_e C_e \varepsilon_{f_u} \leq 0{,}004 \tag{3c}$$

Trong đó, $n$ là số lớp gia cường, $\psi_f$là hệ số giảm cường độ (= 0,95), $f'_c$ là cường độ bê tông ban đầu, $k_a$ là đặc trưng hình học của mẫu (= 1,0), $t_f$ là bề dày của tấm carbon (= 0,167 mm), $E_f$ là Module đàn hồi của tấm carbon (= 245 GPa), $f_{fu}$ là cường độ chịu kéo của tấm carbon (= 4936,9 MPa), $\varepsilon_{fe}$ là biến dạng hữu dụng của tấm carbon, $\varepsilon_{fu}$ là biến dạng cực đại của tấm carbon (= $f_{fu}$/ $E_f$ = 0.02), $k_e$ là hệ số giảm biến dạng của tấm carbon (= 0,59), $C_e$ kể đến ảnh hưởng của môi trường (= 0,95), d là dường kính mẫu.

*Mô hình của Wu & Wei (Wu, 2014)*

Trong nghiên cứu của Wu & Wei (Wu, 2014) thì cường độ chịu nén ($f'_{cc}$) của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiềm chế nở ngang bằng tấm CFRP có thể được phỏng đoán theo công thức (Wu, 2014) như sau:

$$f'_{cc} = f'_c \left[0{,}75 + 2{,}7\left(\frac{f_l}{f'_c}\right)^{0{,}9}\right] \quad (4)$$

*Mô hình của Pham & Hadi (Pham, 2014)*

Theo nghiên cứu của (Pham, 2014) thì cường độ chịu nén ($f'_{cc}$) của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiềm chế nở ngang bằng tấm CFRP có thể được đánh giá theo các công thức dưới đây.

$$f'_{cc} = 0{,}7f'_c + 1{,}8f_l + 5{,}7\frac{nt_f}{d} + 13 \quad (5)$$

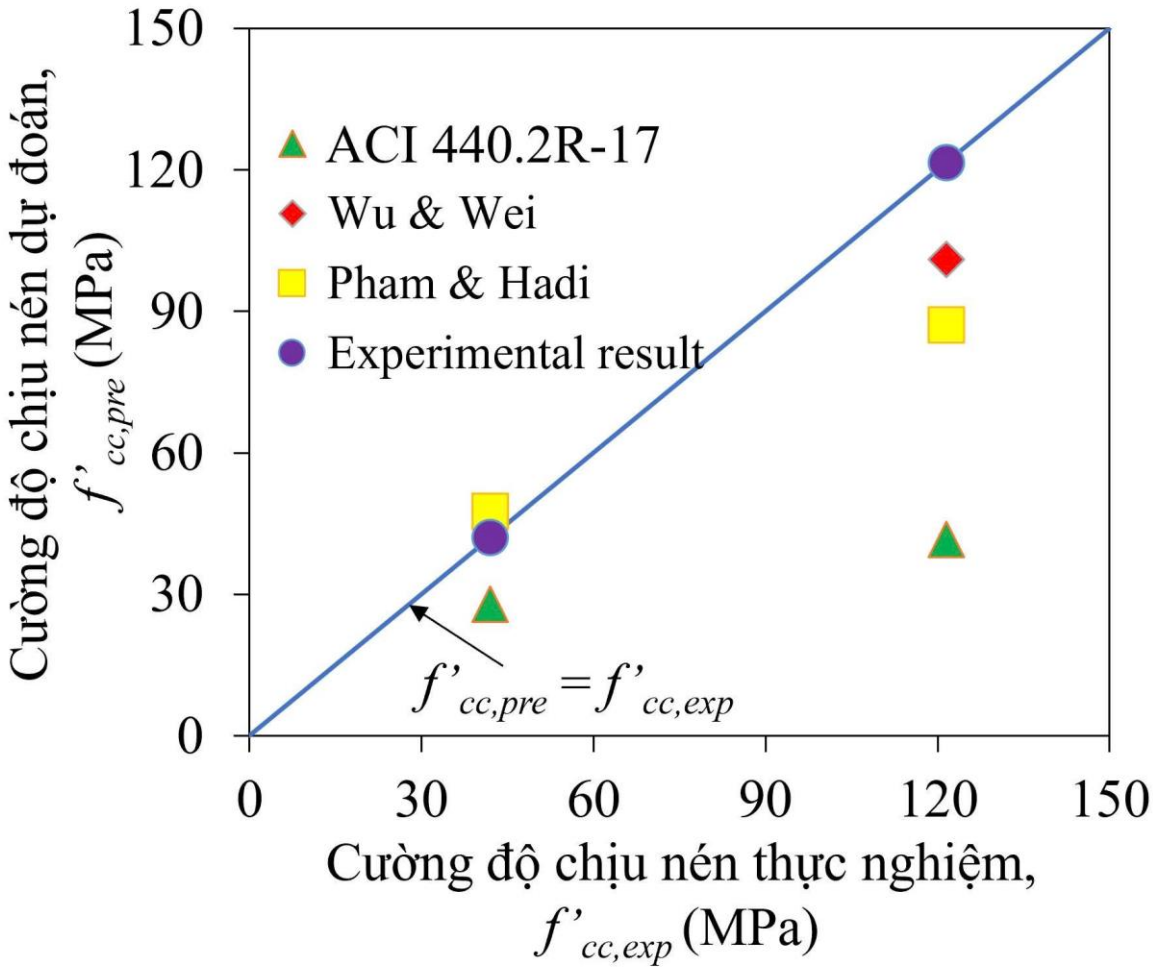
## Đánh giá kết quả

Bảng 4 trình bày kết quả dự đoán cường độ chịu nén của bê tông gia cường bằng tấm CFRP theo các tiêu chuẩn và mô hình khác nhau, trong khi Hình 6 thể hiện sự so sánh giữa giá trị dự đoán và kết quả thực nghiệm. Kết quả phân tích cho thấy xu hướng biến thiên cường độ chịu nén của các mẫu bê tông bọc CFRP trong nghiên cứu này nhìn chung phù hợp với các mô hình dự báo đã được công bố trước đó, tiêu biểu như ACI 440.2R-17 (ACI , 2017), Wu & Wei (Wu, 2014) và Pham & Hadi (Pham, 2014). Đặc biệt, đối với các mẫu chịu nhiệt và được gia cường một lớp CFRP (Fire-1C), kết quả thực nghiệm có sự tương đồng khá tốt với các giá trị dự đoán từ các mô hình.

**Bảng 4. Cường độ chịu nén của bê tông**

| Mẫu | | Nghiên cứu hiện tại | ACI 400.2R-17, 2017 | Wu & Wei, 2014 | Pham & Hadi, 2014 |
|---|---|---|---|---|---|
| Cường độ chịu nén (MPa) | Plain | 23,5 | - | - | - |
| | Fire | 21,1 | - | - | - |
| | Fire-1C | 42 | 27,9 | 47,5 | 47,6 |
| | Fire-3C | 121,5 | 41,6 | 101,0 | 87,2 |

 ISBN: 978-604-45-3797-9




**Hình 6. So sánh kết quả từ các mô hình với kết quả thí nghiệm**

Tuy nhiên, ở trường hợp gia cường ba lớp CFRP (Fire-3C), sự sai lệch giữa kết quả thực nghiệm và dự báo trở nên rõ rệt. Cụ thể, cường độ chịu nén đo được thấp hơn đáng kể so với các giá trị dự đoán. Sự khác biệt này có thể bắt nguồn từ các hạn chế trong quá trình thi công gia cường, đặc biệt khi số lớp CFRP tăng lên, dẫn đến việc giảm hiệu quả làm việc đồng thời giữa bê tông và vật liệu bọc. Điều này nhấn mạnh vai trò quan trọng của chất lượng thi công, bao gồm quy trình dán, ép và kiểm soát liên kết giữa các lớp CFRP cũng như giữa CFRP và bề mặt bê tông.

Nhìn chung, mặc dù các mô hình hiện có có khả năng dự đoán xu hướng gia tăng cường độ chịu nén của bê tông bọc CFRP, vẫn tồn tại sai khác nhất định so với kết quả thực nghiệm. Nguyên nhân có thể do sự khác biệt về đặc tính vật liệu CFRP, điều kiện thí nghiệm và kỹ thuật thi công giữa các nghiên cứu. Do đó, việc lựa chọn mô hình cần được cân nhắc phù hợp với điều kiện áp dụng cụ thể. Trong số các mô hình được khảo sát, mô hình của Wu & Wei (Wu, 2014) cho kết quả gần với thực nghiệm nhất và có thể được xem là lựa chọn phù hợp cho mục đích thiết kế.

## Kết luận

Trong nghiên cứu này, 11 mẫu bê tông hình trụ (150 × 300 mm) đã được chế tạo, nung ở nhiệt độ cao và gia cường bằng một hoặc ba lớp CFRP. Từ kết quả thí nghiệm, có thể rút ra các kết luận chính như sau:

(1) Gia cường bằng CFRP là giải pháp hiệu quả để phục hồi và nâng cao cường độ chịu nén của bê tông sau khi chịu nhiệt độ cao. Cường độ chịu nén tăng đáng kể và phụ thuộc vào số lớp CFRP.

(2) Cơ chế gia cường chủ yếu là hiệu ứng kiềm chế nở hông (confinement), giúp hạn chế phát triển vi khe nứt, đồng thời cải thiện cả cường độ chịu nén và biến dạng cực hạn. Các đại lượng này tăng theo số lớp CFRP.

(3) Tuy nhiên, khi tăng số lớp CFRP, hiệu quả gia cường có thể bị ảnh hưởng bởi chất lượng thi công, dẫn đến sai khác giữa kết quả thực nghiệm và dự đoán lý thuyết.

(4) So sánh với các mô hình hiện có cho thấy xu hướng kết quả phù hợp, trong đó mô hình của Wu & Wei cho độ chính xác cao nhất, mặc dù vẫn tồn tại sai khác do ảnh hưởng của vật liệu, nhiệt độ và điều kiện thi công.

## Tài liệu tham khảo

Truong, G. T., Kim, J.-C., & Choi, K.-K. (2017). Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods. *Engineering Structures, 134*, 217-235.

ASTM International. (2020). *ASTM C39/C39M-20: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.

Khan, F. A., Fahad, M., Shahzada, K., Alam, H., & Ali, N. (2015). Utilization of waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, 4*(3), 040311.

Xu, J., Wang, H., Wu, W., Lin, L., & Yu, Y. (2025). Predicting compressive strength of concrete at elevated temperatures and optimizing its mixture proportions. *Case Studies in Construction Materials, 22*, e04480.

ACI Committee 440. (2017). *ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. American Concrete Institute.

Wu, Y. F., & Wei, Y. (2014). General stress-strain model for steel and FRP confined concrete. *Journal of Composites for Construction, 19*, 04014069.

Pham, T. M., & Hadi, M. N. S. (2014). Confinement model for FRP confined normal- and high-strength concrete circular columns. *Construction and Building Materials, 69*, 83-90.