

Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao chống thấm nước dùng trong xây dựng phần ngầm nhà cao tầng khu vực thành phố Hồ Chí Minh

Võ Quốc Bảo^{1,*}, Nguyễn Vĩnh Bảo², Nguyễn Chí Nhân³

¹ Công ty cổ phần tập đoàn Xây dựng Hòa Bình

² Viện Kiến trúc quốc gia Phân viện kiến trúc Miền Nam

³ Sở Xây Dựng Đồng Tháp

TỪ KHOÁ

Bê tông cường độ cao
Cốt sợi polypropylene
Phần ngầm nhà cao tầng
Cường độ nén
Tính công tác

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao không thấm nước với mục tiêu cải thiện khả năng chịu nén, chống nứt và chống thấm nước phục vụ xây dựng các công trình ngầm, tầng hầm, nhiều tầng nhất là các công trình ngầm tại khu vực TP. Hồ Chí Minh. Năm cấp phối bê tông được thiết kế theo ACI 211.4R-08 với sự kết hợp giữa xi măng Portland hỗn hợp PCB40, tro bay nhiệt điện Duyên Hải, silica fume SF-90 và sợi polypropylene phân tán. Các tính chất công tác, cơ lý và chống thấm của bê tông được xác định theo tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành. Kết quả thí nghiệm cho thấy bê tông đạt cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày từ 63,5 MPa đến 73,6 MPa, cường độ kéo uốn từ 7,40 đến 8,02 MPa, mô đun đàn hồi trung bình trên 37,4 GPa. Độ hút nước dưới 8%, khả năng chống thấm đạt W12-W19 theo TCVN 3116:2022. Hỗn hợp bê tông có tính công tác tốt với độ sụt từ 19,0-22,0 cm, ổn định theo thời gian và không phân tầng, phù hợp cho điều kiện thi công tại công trường. Từ kết quả thu được trong nghiên cứu này có thể khẳng định, bê tông cường độ cao, chống thấm nước tốt là giải pháp bền vững và hiệu quả cho xây dựng hạ tầng phần ngầm tại TP. Hồ Chí Minh, đồng thời góp phần giảm sử dụng xi măng, tận dụng phế thải công nghiệp và hướng tới vật liệu xây dựng thân thiện môi trường.

KEYWORDS

High strength concrete
Polypropylene fiber
Underground structures of high-rise buildings
Compressive strength
Workability

ABSTRACT

The paper presents the results of research on the development of high-strength, watertight concrete aimed at improving compressive strength, crack resistance, and impermeability for the construction of underground and multi-story facilities, especially in Ho Chi Minh City. Five concrete mix designs were prepared according to ACI 211.4R-08, combining blended Portland cement PCB40, Duyen Hai thermal power fly ash, silica fume SF-90, and dispersed polypropylene fibers. Workability, mechanical properties, and impermeability of the concrete were evaluated according to current Vietnamese standards. Experimental results show that the concrete achieved an average 28-day compressive strength of 63.5–73.6 MPa, flexural tensile strength of 7.40–8.02 MPa, and an average elastic modulus above 37.4 GPa. Water absorption was below 8 %, and impermeability reached grades W12–W19 according to TCVN 3116:2022. The concrete mix exhibited good workability, with a slump of 19.0–22.0 cm, remained stable over time, and showed no segregation, suitable for practical field construction. The results confirm that high-strength, watertight concrete is a sustainable and effective solution for underground infrastructure in Ho Chi Minh City, while also reducing cement consumption, utilizing industrial by-products, and promoting environmentally friendly construction materials.

1. Đặt vấn đề

Trong quá trình đô thị hóa nhanh chóng, TP. Hồ Chí Minh đang phải đối mặt với tình trạng thiếu hụt nghiêm trọng quỹ đất xây dựng tại khu vực trung tâm. Mật độ dân cư cao, nhu cầu về giao thông, hạ tầng kỹ thuật và các dịch vụ đô thị ngày càng gia tăng khiến không gian bề mặt không còn đủ để bố trí các công trình phục vụ phát triển kinh tế – xã hội [1]. Trước tình hình thực tế đó, việc phát triển không gian ngầm được xem là một hướng đi tất yếu, nhằm mở rộng không gian sử

dụng đô thị theo chiều sâu, giảm tải áp lực mặt đất và nâng cao hiệu quả khai thác hạ tầng hiện hữu.

TP. Hồ Chí Minh hiện là địa phương đi đầu trong cả nước về quy hoạch và đầu tư các công trình ngầm. Hàng loạt dự án quy mô lớn như tuyến đường sắt đô thị (metro), các nhà ga, bãi đỗ xe ngầm, trung tâm thương mại và hệ thống kỹ thuật ngầm đang được triển khai. Quy hoạch chung thành phố đến năm 2040, tầm nhìn 2060 đã chính thức tích hợp không gian ngầm vào cấu trúc đô thị, xác định đây là thành phần trọng yếu của hạ tầng thông minh, hướng tới phát triển đô thị bền

*Liên hệ tác giả: bao.vo@hbcg.vn

Nhận ngày 15/11/2025, sửa xong ngày 26/11/2025, chấp nhận đăng ngày 27/11/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2026.1184>

vững [2]. Sự hình thành các tuyến Metro số 1, số 2, số 3 và hệ thống bãi đỗ xe ngầm ở khu vực trung tâm Quận 1, Thủ Đức, Bình Thạnh cho thấy nhu cầu về vật liệu và giải pháp kỹ thuật cho các kết cấu ngầm có quy mô và độ phức tạp ngày càng lớn.

Tuy nhiên, sự phát triển nhanh của đô thị lại diễn ra trong bối cảnh TP. Hồ Chí Minh là một trong những khu vực chịu ảnh hưởng nghiêm trọng nhất của biến đổi khí hậu và nước biển dâng ở Việt Nam. Hệ thống sông rạch dày đặc, địa hình thấp, nền đất yếu và chịu lún tự nhiên khiến thành phố đặc biệt dễ tổn thương trước hiện tượng ngập úng [3]. Tình trạng ngập xảy ra thường xuyên hơn với thời gian và phạm vi ảnh hưởng ngày càng lớn. Các nghiên cứu dự báo đến giữa thế kỷ XXI, nhiều khu vực đô thị có nguy cơ bị ngập thường xuyên nếu không có giải pháp thích ứng hiệu quả. Việc khai thác nước ngầm quá mức trong nhiều thập niên qua đã khiến nền đất sụt lún trung bình từ 1 đến 3 cm mỗi năm, làm trầm trọng thêm nguy cơ ngập do sự chênh lệch mực địa hình và dâng triều.

Tổ hợp các yếu tố nói trên đã tạo ra môi trường thủy lực đặc biệt bất lợi đối với công trình ngầm. Mực nước ngầm cao, áp lực thủy tĩnh lớn, sự dao động của mực triều và sự xâm nhập mặn từ hệ thống sông rạch gây ra hàng loạt thách thức về ổn định kết cấu, chống thấm, ăn mòn và tuổi thọ công trình. Nhiều dự án tầng hầm tại khu vực trung tâm TP. Hồ Chí Minh phải chịu áp lực nước ngầm đáng kể ngay trong quá trình thi công, đòi hỏi các giải pháp hạ mực nước phức tạp, tốn kém và tiềm ẩn nguy cơ sụt lún nền xung quanh [4]. Sau khi hoàn thành, các công trình ngầm tiếp tục chịu tác động lâu dài của độ ẩm cao, xâm nhập ion Cl^- và SO_4^{2-} từ môi trường nước ngầm, gây ăn mòn cốt thép trong kết cấu bê tông cốt thép, nứt và suy giảm khả năng chống thấm.

Đặc điểm này làm cho việc lựa chọn vật liệu xây dựng cho phần ngầm trở thành vấn đề trọng yếu. Bê tông dùng trong công trình ngầm không chỉ phải đạt cường độ chịu nén cao mà còn phải có độ đặc chắc, khả năng chống thấm và kháng xâm thực tốt [5]. Trong điều kiện nhiệt độ, độ ẩm và áp lực nước thay đổi liên tục như ở TP. Hồ Chí Minh, các loại bê tông thông thường dễ bị thấm nước, ăn mòn hoặc phá hủy do sự co ngót và giãn nở không đồng đều. Việc nghiên cứu, phát triển các loại bê tông cường độ cao, bền nước, bền ion xâm nhập có khả năng tự bảo vệ cốt thép là cần thiết hiện nay [6]. Vì vậy, có thể nói đây là một hướng nghiên cứu mang tính chiến lược và có ý nghĩa thực tế cao.

Không chỉ dừng lại ở yêu cầu kỹ thuật, tính cấp thiết của việc nghiên cứu vật liệu cho công trình ngầm tại TP. Hồ Chí Minh còn gắn liền với định hướng phát triển đô thị thông minh và phát triển bền vững. Hệ thống hạ tầng ngầm hiện đại sẽ quyết định hiệu quả vận hành của toàn bộ đô thị trong tương lai, đặc biệt trong bối cảnh diện tích đất bề mặt ngày càng hạn hẹp [7]. Nếu vật liệu không đảm bảo độ bền lâu và khả năng chống xâm thực thì chi phí duy tu, bảo dưỡng, sửa chữa cùng rủi ro an toàn công trình sẽ gia tăng đáng kể, làm giảm hiệu quả đầu tư [8]. Do đó, việc chủ động phát triển các loại bê tông bền vững, có khả năng chống ngập và thích ứng điều kiện ngầm ẩm ướt đặc thù của khu vực Nam Bộ không chỉ có ý nghĩa khoa học mà còn mang giá trị thực tiễn rất lớn.

Từ những phân tích trên, có thể thấy nhu cầu nghiên cứu và ứng dụng vật liệu bê tông cường độ cao, bền nước và thân thiện môi trường cho công trình ngầm tại TP. Hồ Chí Minh là hết sức cấp thiết. Đây không chỉ là yêu cầu trước mắt của các dự án hạ tầng trọng điểm như metro, bãi đỗ xe và trung tâm thương mại ngầm, mà còn là nhiệm vụ chiến lược nhằm thích ứng với biến đổi khí hậu, đảm bảo an toàn công trình và hướng đến mục tiêu phát triển đô thị bền vững cho thành phố trong tương lai.

Vì vậy, việc nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao chống thấm nước tốt dùng trong phần ngầm nhà cao tầng khu vực TP. Hồ Chí Minh là rất cần thiết và phù hợp với nhu cầu phát triển mở rộng các cơ sở hạ tầng ngầm cấp bách hiện nay.

2.V ật liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng

- Xi măng Portland hỗn hợp PCB40 (X) của Công ty Xi măng Hà Tiên, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 6260:2020 (Hình 1a);

- Silica fume SF-90 (SF) của công ty Elkem có hàm lượng SiO_2 trên 90 %, độ mịn cao, kích thước hạt nano. Phụ gia silica fume SF-90 được sử dụng với mục đích tăng cường độ đặc của vi cấu trúc bê tông, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 8827:2012 (Hình 1b);

- Tro bay nhiệt điện (TB) nhận từ Nhà máy nhiệt điện Duyên Hải 1 (Trà Vinh). Lượng tro bay nhiệt điện Duyên Hải 1 sẽ thay thế từ 10 ÷ 25 % khối lượng xi măng, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 10302:2014 (Hình 1c);

- Cốt liệu nhỏ: Cát vàng tự nhiên (CV) chất lượng tốt của sông Đồng Nai đã qua rửa sạch loại bỏ tạp chất, thành phần hạt từ 0,15 ÷ 5,0 mm, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 (Hình 2a);

- Cốt liệu lớn: Đá dăm (ĐD) từ đá vôi của mỏ đá ở Đồng Nai, kích thước 10 ÷ 20 mm, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 (Hình 2b);

- Sợi phân tán sử dụng trong nghiên cứu này là sợi tổng hợp polypropylene dạng sợi thẳng (PP) với chiều dài 20 ÷ 30 mm và đường kính 20 ÷ 50 μm , thỏa mãn tiêu chuẩn ASTM C1116/C1116M-23 (Hình 2c);

- Phụ gia siêu dẻo trong nghiên cứu này dùng Sika ViscoCrete®-10 của công ty Sika Việt Nam (SD). Đây là phụ gia siêu dẻo thế hệ 3, giúp duy trì độ sụt cao, giảm nước trộn hiệu quả, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 8826:2024 (Hình 3);

- Nước sạch sinh hoạt (N) được sử dụng để làm nước trộn hỗn hợp bê tông và bảo dưỡng mẫu thí nghiệm, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 4506:2012.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

+ Thiết kế cấp phối bê tông cốt sợi cường độ cao được thực hiện theo hướng dẫn thiết kế của tiêu chuẩn Mỹ ACI 211.4R - 08 [9] và được hiệu chỉnh theo tính chất của các nguyên vật liệu tại Việt Nam;

+ Lấy mẫu, đúc mẫu và bảo dưỡng mẫu bê tông được thực hiện theo TCVN 3105:2022;

- + Xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông được thực hiện theo TCVN 3106:2022;
- + Cường độ chịu nén của bê tông ở các tuổi khác nhau được xác định trên mẫu hình lập phương kích thước 150x150x150 mm theo TCVN 3118:2022.
- + Cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông ở tuổi 28 ngày được xác định trên mẫu hình lăng trụ kích thước 100x100x400 mm theo TCVN 3119:2022.
- + Phân tích hiệu quả kinh tế - kỹ thuật khi sử dụng bê tông cường độ cao ứng dụng trong kết cấu công trình ngầm.

2.3. Cấp phối bê tông cường độ cao

Trong giới hạn của nghiên cứu này đã đưa ra được các yêu cầu kỹ thuật đối với hỗn hợp bê tông và sản phẩm bê tông như sau:

- + Hỗn hợp bê tông cường độ cao có tính công tác tốt, độ sụt xác định ngay sau khi trộn: $SN = 150 \div 250$ mm;
- + Cường độ nén trung bình ở tuổi 28 ngày trên mẫu hình lập phương kích thước 150x150x150 mm là trên 70 MPa;
- + Bê tông sau khi rắn chắc ở tuổi 28 ngày đảm bảo không thấm nước.

Trong giới hạn của nghiên cứu này đã chọn các tỷ lệ vật liệu sử dụng như sau:

- + Tổng hàm lượng chất kết dính sử dụng trong nghiên cứu này là: $CKD = 900$ kg/m³;
- + Tỷ lệ $N/X = 0,28$.
- + Tỷ lệ $CL/CKD = 1,50$.
- + Cốt liệu lớn có kích thước lớn nhất $D_{max} = 20$ mm và được sử dụng với tỷ lệ là 60 % tổng khối lượng cốt liệu;
- + Sợi polypropylene phân tán được sử dụng với hàm lượng 1,5 % hàm lượng xi măng;
- + Hàm lượng tro bay trong nghiên cứu thay đổi dao động từ 0 %; 10 %; 15 %; 20 % và 25 % hàm lượng chất kết dính;
- + Hàm lượng silica fume sử dụng bằng 10 % hàm lượng chất kết dính;
- + Hàm lượng siêu dẻo sử dụng bằng 1,0 % hàm lượng xi măng;
- + Hàm lượng cốt sợi polypropylene sử dụng với hàm lượng là 1,5 kg trong mỗi mét khối bê tông.

Tham khảo tiêu chuẩn Mỹ ACI 211.4R – 08 [9, 10] và các tỷ lệ vật liệu sử dụng đã xác định được các cấp phối bê tông cường độ cao trong nghiên cứu này được trình bày trên Bảng 1.

2.4. Điều kiện bảo dưỡng

Các mẫu bê tông cường độ cao sau khi đổ khuôn và tạo hình sẽ được giữ tĩnh định trong khuôn thép khoảng 24 giờ. Sau đó, mẫu được tháo khuôn và đưa vào giai đoạn bảo dưỡng nhiệt ẩm trong điều kiện hơi nước bão hòa với nhiệt độ duy trì trong khoảng $60 \div 80$ °C và độ ẩm tương đối 100 %, trong thời gian 2 ÷ 3 ngày nhằm thúc đẩy quá trình thủy hóa và phát triển cường độ sớm.

Kết thúc giai đoạn này, các mẫu được chuyển sang bảo dưỡng trong bể nước ở điều kiện tiêu chuẩn cho đến các tuổi thí nghiệm quy định.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Các tính chất của hỗn hợp bê tông cường độ cao ở trạng thái dẻo

Các tính chất của bê tông ở trạng thái dẻo được xác định theo các tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành và được trình trong Bảng 2.

Các quy trình xác định tính công tác và quá trình tạo hình mẫu thí nghiệm được thể hiện trong Hình 4.

a) *Tính công tác (độ sụt ngay sau khi nhào trộn xong, mức suy giảm độ sụt sau 15 phút, 30 phút và khả năng phân tầng tách lớp) của hỗn hợp bê tông*

Độ sụt ban đầu của các tổ mẫu dao động từ $19,0 \div 22,5$ cm, cho thấy hỗn hợp có tính lưu động cao, phù hợp với bê tông cường độ cao có sử dụng phụ gia siêu dẻo thế hệ mới (Sika ViscoCrete®-10).

Mức suy giảm độ sụt sau 15 phút và 30 phút lần lượt dao động từ $1,0 \div 2,5$ cm và $2,5 \div 3,5$ cm, tương ứng tỷ lệ tổn thất $5 \div 15$ % so với độ sụt ban đầu. Kết quả này cho thấy hỗn hợp bê tông duy trì tốt tính công tác trong thời gian thi công, kể cả dưới điều kiện nhiệt đới nóng ẩm tại TP. Hồ Chí Minh.

Khả năng phân tầng – tách lớp: Tất cả các tổ mẫu đều được đánh giá là “có tính dẻo tốt đến rất tốt”, cho thấy sự ổn định của cấu trúc hỗn hợp, không xảy ra hiện tượng phân tầng tách lớp – đặc biệt quan trọng khi thi công công trình ngầm có điều kiện nền yếu hoặc bị rung động.

b) *Giá trị khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông ngay sau khi nhào trộn*

Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông dao động từ $2421 \div 2484$ kg/m³. Xu hướng giảm nhẹ về giá trị khối lượng thể tích khi tăng tro bay và sợi polypropylene là hoàn toàn phù hợp với lý thuyết: Với mẫu HSC-01 (không tro bay và không có sợi polypropylene) giá trị khối lượng thể tích là 2484 kg/m³ – lớn nhất, nhưng với mẫu HSC-05 (225 kg Tro bay và 1,5 kg/m³ sợi polypropylene) giá trị khối lượng thể tích là 2421 kg/m³ – nhỏ nhất. Kết quả này phản ánh rằng tro bay và sợi polypropylene là vật liệu nhẹ hơn xi măng và góp phần cải thiện khả năng chống thấm, đồng thời sự hiện diện của sợi phân tán có thể cản trở liên kết giữa các hạt xi măng và phụ gia siêu mịn silica fume (SF-90), dẫn đến giảm nhẹ mật độ bê tông mà vẫn đảm bảo hiệu quả kháng thấm cho kết cấu phần ngầm nhà cao tầng [11, 12].

c) *Ảnh hưởng của hàm lượng sợi polypropylene và hàm lượng tro bay đến tính công tác của hỗn hợp bê tông*

Việc tăng hàm lượng tro bay từ 0 đến 225 kg/m³ và hàm lượng sợi polypropylene 1,5 kg/m³ cho thấy ảnh hưởng rõ rệt đến tính công tác của hỗn hợp bê tông. Khi hàm lượng tro bay tăng, độ sụt ban đầu có xu hướng giảm dần từ 22,0 cm (HSC-01) còn 19,0 cm (HSC-05), sau 30 phút độ sụt giảm nhiều hơn, từ 3,0 cm lên 5,5 cm. Nguyên nhân là do tro bay có hạt mịn và tỷ diện bề mặt lớn, nên hấp thụ nhiều nước để thấm ướt bề mặt và cung cấp nước cho phản ứng thủy hóa của xi măng, làm tăng độ nhớt của hồ xi măng, đồng thời vẫn giữ nước tốt và giảm hiện tượng tách nước.

Mặt khác, sợi polypropylene dạng ngắn phân bố đều trong hỗn hợp bê tông đóng vai trò như một “khung xương mềm” cản trở sự di chuyển tự do của các hạt mịn và nước, từ đó làm giảm độ sụt và tăng độ ổn định của hỗn hợp [13, 14]. Tuy nhiên, nếu hàm lượng sợi vượt ngưỡng tối ưu, hỗn hợp có xu hướng mất tính chảy, khó thi công và làm tăng mức suy giảm độ sụt theo thời gian. Trong nghiên cứu này, hàm lượng sợi được lựa chọn trong khoảng cho phép (khoảng $0,25 \div 0,55$ % theo thể tích), nên hỗn hợp vẫn duy trì được tính công tác tốt, không xảy ra hiện tượng phân tầng tách lớp.

Nhìn chung, tro bay và sợi polypropylene đều có ảnh hưởng nhất định đến tính công tác của bê tông. Tuy nhiên, nhờ sự kết hợp hợp lý giữa phụ gia siêu dẻo, cốt liệu mịn chất lượng cao và tỷ lệ cấp phối hợp lý, hỗn hợp bê tông thu được vẫn đảm bảo tính công tác tốt, không phân tầng tách lớp và khả năng thi công thuận lợi trong điều kiện thực tế.

3.2. Các tính chất của bê tông cường độ cao ở trạng thái cứng rắn

Các tính chất cơ lý của bê tông cường độ cao ở trạng thái cứng rắn được xác định theo các tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành và được trình bày trong Bảng 3 và Bảng 4.

Các thí nghiệm nhằm xác định tính chất cơ lý của mẫu bê tông cường độ cao được thể hiện trong Hình 5.

a) *Giá trị cường độ nén, cường độ kéo khi uốn và mô đun đàn hồi của mẫu bê tông cường độ cao thí nghiệm*

Kết quả thí nghiệm cho thấy các mẫu bê tông cường độ cao đều đạt cường độ nén 28 ngày từ 63,5 MPa đến 73,6 MPa, trong đó mẫu HSC-02 có giá trị cao nhất là 73,6 MPa. Giá trị cường độ kéo khi uốn dao động trong khoảng $6,85 \div 8,02$ MPa. Đặc biệt với mẫu HSC-01 do thành phần không chứa sợi polypropylene nên cường độ kéo khi uốn có giá trị thấp, chỉ đạt 6,95 MPa. Ngoài ra, mô đun đàn hồi tĩnh được xác định dao động từ $37,4 \div 40,5$ GPa, với mẫu HSC-02 tiếp tục thể hiện giá trị lớn nhất (40,5 GPa). Các kết quả trên cho thấy bê tông cường độ cao không chỉ đạt cường độ nén và mô đun đàn hồi cao, mà còn có khả năng kháng kéo đáng kể, phù hợp cho kết cấu phần ngầm nhà cao tầng chịu lực và yêu cầu kháng thấm.

b) *Đánh giá tốc độ phát triển cường độ nén của các mẫu bê tông cường độ cao thí nghiệm tác các tuổi 1 ngày, 3 ngày, 7 ngày, 14 ngày và 28 ngày*

Quá trình phát triển cường độ nén của các mẫu cho thấy tốc độ tăng cường độ diễn ra mạnh trong 7 ngày đầu tiên. Ở tuổi 1 ngày, các mẫu đạt khoảng $30 \div 35$ % cường độ nén 28 ngày; đến tuổi 3 ngày đạt từ $50 \div 60$ %; đến 7 ngày đạt khoảng $70 \div 80$ %. Trong giai đoạn từ 7 đến 14 ngày, cường độ tiếp tục tăng đều, đạt trên 90 %, và sau 28 ngày thì ổn định ở mức thiết kế. Mẫu HSC-02 thể hiện tốc độ phát triển tốt nhất trong toàn bộ quá trình, cho thấy ảnh hưởng tương hỗ giữa xi măng, tro bay, silica fume và phụ gia siêu dẻo [15, 16]. Tốc độ phát triển cường độ như trên là phù hợp cho thi công công trình yêu cầu tháo dỡ ván khuôn sớm hoặc đưa vào sử dụng nhanh.

c) *Ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi polypropylene và hàm lượng tro bay đến tính cường độ nén và cường độ kéo khi uốn của bê tông*

Sự gia tăng hàm lượng tro bay (từ 0 đến 225 kg/m³) và sợi polypropylene có ảnh hưởng rõ đến cường độ nén và cường độ kéo khi uốn. Mẫu không chứa tro bay và không chứa sợi polypropylene (HSC-01) có cường độ nén đạt 70,5 MPa nhưng giá trị cường độ kéo khi uốn trung bình chỉ đạt 6,85 MPa, thấp hơn đáng kể so với các mẫu có chứa hàm lượng sợi là 1,5 kg, chứng minh hiệu quả của tro bay trong việc tăng mật độ vi cấu trúc và cường độ dài hạn thông qua phản ứng pozzolanic. Tuy nhiên, khi hàm lượng tro bay tăng quá cao (225 kg/m³ trong mẫu HSC-05), cường độ nén giảm do độ thiếu hụt xi măng trong giai đoạn đầu, dẫn tới quá trình thủy hóa chậm, các gel hidro-silicat-Canxi có tính chất kết dính đã giảm đáng kể. Về sợi polypropylene, việc giữ nguyên hàm lượng sợi 1,5 kg/m³ cũng kéo theo sự giảm nhẹ cường độ kéo khi uốn từ 8,02 MPa xuống còn 7,40 MPa. Nhưng đối với mẫu không chứa sợi polypropylene thì cường độ kéo khi uốn đã thấp hơn đáng kể, chỉ đạt khoảng 6,85 MPa. Kết quả này cho thấy sợi polypropylene giúp cải thiện khả năng kháng kéo và hạn chế nứt, từ đó góp phần nâng cao hiệu quả kháng thấm của bê tông cường độ cao trong kết cấu phần ngầm nhà cao tầng. Tuy nhiên cần nghiên cứu thêm để xác định hàm lượng sợi hợp lý để không ảnh hưởng tiêu cực đến tính công tác và độ đồng nhất của hỗn hợp bê tông.

d) *Xác định khối lượng thể tích và tính chống thấm nước của mẫu bê tông cường độ cao thí nghiệm*

Khối lượng thể tích của bê tông sau 28 ngày dao động từ 2408 đến 2462 kg/m³, giảm dần khi tăng hàm lượng tro bay và sợi polypropylene do các vật liệu này nhẹ hơn xi măng và không có khả năng đóng đặc như cốt liệu khoáng. Khả năng chống thấm của các tổ mẫu được đánh giá thông qua thí nghiệm áp lực nước theo TCVN 3116:2022, với mức chống thấm từ W12 đến W16. Mẫu HSC-02 và HSC-03 đạt giá trị W14–W19, tương ứng áp suất chịu nước lên đến 1,85 MPa, cho thấy hiệu quả cải thiện độ đặc chắc nhờ kết hợp hợp lý giữa tro bay, silica fume và sợi polypropylene [17, 18]. Độ hút nước của tất cả mẫu đều nằm trong khoảng từ 6,7 đến 8,0 %, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật cho vật liệu bê tông chống thấm dùng ngoài trời, tiếp xúc lâu dài với nước.

3.3. Phân tích hiệu quả kinh tế - kỹ thuật khi sử dụng bê tông cường độ cao ứng dụng trong kết cấu công trình ngầm

a) *Khả năng ứng dụng bê tông cường độ cao trong kết cấu công trình ngầm*

Bê tông cường độ cao mang lại nhiều ưu điểm vượt trội, đặc biệt phù hợp cho các kết cấu công trình ngầm trong điều kiện áp lực nước ngầm lớn như tại TP. Hồ Chí Minh. Đối với các tường và sàn tầng hầm chịu áp lực nước ngầm lớn và tải trọng dòng chảy, bê tông cường độ cao giúp tăng cường khả năng chịu lực lâu dài, hạn chế đáng kể hiện tượng nứt do co ngót và đặc biệt hầu như không thấm, từ đó nâng cao độ bền tổng thể của công trình khi tiếp xúc trực tiếp với áp lực nước ngầm lớn.

Trong các bộ phận như tường tầng hầm, sàn tầng hầm hay các lớp phủ bảo vệ kết cấu dưới lòng đất, bê tông cường độ cao có khả năng hạn chế nứt bề mặt, chống nước ngầm hiệu quả và ngăn chặn sự xâm nhập

của nước mặn cùng ion clorua. Điều này đảm bảo tính chống thấm và chống xâm thực hóa học cho kết cấu, kéo dài tuổi thọ công trình.

Hơn nữa, việc tận dụng các vật liệu nội địa như xi măng PCB40 Hà Tiên, tro bay nhiệt điện Duyên Hải 1, đá vôi và các phụ gia trong thành phần bê tông cường độ cao không chỉ giúp giảm chi phí nguyên liệu mà còn hỗ trợ phát triển vật liệu xây dựng thân thiện với môi trường. Về lâu dài, việc sử dụng bê tông cường độ cao còn giúp giảm chi phí duy tu, sửa chữa cho kết cấu phần ngầm nhà cao tầng, nhờ hạn chế các hư hỏng do thấm nước và xâm thực từ nước ngầm tại TP. Hồ Chí Minh, từ đó kéo dài tuổi thọ của kết cấu hạ tầng phần ngầm của nhà cao tầng trong điều kiện khí hậu nước ngầm, triều cường và nước nhiễm mặn.

b) Hiệu quả kinh tế kỹ thuật

Việc áp dụng bê tông cường độ cao không chỉ mang lại lợi ích về mặt kỹ thuật mà còn đạt được hiệu quả kinh tế đáng kể. Nhờ cường độ

cao và khả năng chống xâm thực tốt, bê tông cường độ cao cho phép giảm chiều dày lớp bê tông bảo vệ, qua đó tiết kiệm vật liệu xây dựng và không gian thi công.

Khả năng tự bảo vệ nứt của loại bê tông này cùng với việc giảm thiểu yêu cầu gia cố cốt thép giúp tiết kiệm chi phí cốp pha và đặc biệt thuận lợi cho việc thi công dưới nước [19, 20]. Đồng thời, việc giảm bớt các bước lắp đặt thép phụ chống nứt hoặc lưới neo sẽ rút ngắn đáng kể thời gian thi công và nâng cao năng suất lao động. Quan trọng hơn, việc sử dụng bê tông cường độ cao giúp nâng cao mức độ an toàn và độ bền cho kết cấu phần ngầm trong điều kiện áp lực nước ngầm lớn, đồng thời hạn chế thấm nước và giảm nguy cơ hư hỏng do xâm nhập nước ngầm, góp phần đảm bảo tính ổn định cho các công trình nhà cao tầng tại TP. Hồ Chí Minh.

Sự khác biệt về hiệu quả giữa bê tông cường độ cao và bê tông xi măng truyền thống được tổng hợp trong Bảng 5.



a. Xi măng Portland hỗn hợp PCB40 Hà Tiên



b. Silica fume SF-90 của công ty Elkem



c. Tro bay nhiệt điện Duyên Hải 1

Hình 1. Hỗn hợp chất kết dính sử dụng trong nghiên cứu.



a. Cát vàng tại sông Đồng Nai



b. Đá dăm từ đá vôi của mỏ đá ở Đồng Nai



c. Cốt sợi tổng hợp polypropylene phân tán

Hình 2. Cốt liệu và cốt sợi polypropylene phân tán.



Hình 3. Phụ gia siêu dẻo vào nước sạch nhằm trộn hỗn hợp bê tông.

Bảng 1. Cấp phối bê tông cường độ cao.

STT	Ký hiệu mẫu	Cấp phối vật liệu cho 1 m ³ hỗn hợp bê tông cường độ cao (kg/m ³)							
		X	TB	SF	PP	SD	ĐD	CV	N
1	HSC-01*	810	0	90	0	8,1	810	540	227
2	HSC-02	720	90	90	1,5	7,2	810	540	202
3	HSC-03	675	135	90	1,5	6,75	810	540	189
4	HSC-04	630	180	90	1,5	6,3	810	540	176
5	HSC-05	585	225	90	1,5	5,85	810	540	164

Bảng 2. Tính chất của hỗn hợp bê tông.

STT	Ký hiệu mẫu	Khối lượng thể tích hỗn hợp bê tông (kg/m ³)	Độ sụt ngay sau khi trộn (cm)	Độ sụt sau 15 phút (cm)	Độ sụt sau 30 phút (cm)	Sự phân tầng tách lớp của hỗn hợp bê tông
1	HSC-01	2484	22,5	21,0	19,0	Hỗn hợp bê tông có độ dẻo rất tốt
2	HSC-02	2460	21,5	19,0	18,0	Hỗn hợp bê tông có độ dẻo rất tốt
3	HSC-03	2447	20,5	18,5	17,5	Hỗn hợp bê tông có độ dẻo rất tốt
4	HSC-04	2434	20,0	18,0	17,5	Hỗn hợp bê tông có độ dẻo rất tốt
5	HSC-05	2421	19,0	18,0	16,5	Hỗn hợp bê tông có độ dẻo rất tốt



a). Xác định tính công tác của hỗn hợp bê tông



b). Mẫu bê tông thí nghiệm

Hình 4. Xác định tính công tác và tạo hình mẫu thí nghiệm.

Bảng 3. Tính chất của bê tông cường độ cao.

STT	Ký hiệu mẫu	Khối lượng thể tích của mẫu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày (kg/m ³)	Mô đun đàn hồi tĩnh của mẫu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày (MGa)	Độ hút nước của mẫu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày (%)	Độ chống thấm của tổ mẫu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày (MPa)	Mức chống thấm (W) theo TCVN 3116:2022
1	HSC-01	2462	39,0	7,05	1,72	W16-W17
2	HSC-02	2450	40,5	6,78	1,85	W18-W19
3	HSC-03	2428	39,6	7,0	1,5	W14- W16
4	HSC-04	2415	38,1	7,36	1,3	W12-W13
5	HSC-05	2408	37,4	7,55	1,2	W12

Bảng 4. Giá trị cường độ nén và cường độ kéo khi uốn của bê tông cường độ cao.

STT	Ký hiệu mẫu	Giá trị cường độ nén trung bình (MPa) tại các tuổi:					Cường độ kéo khi uốn (MPa) tại tuổi 28 ngày
		1 ngày	3 ngày	7 ngày	14 ngày	28 ngày	
1	HSC-01	27,6	47,4	61,5	67,1	70,5	6,85
2	HSC-02	28,8	49,5	64,2	70,0	73,6	8,02
3	HSC-03	27,7	47,6	61,7	67,3	70,8	7,88
4	HSC-04	26,2	45,0	58,4	63,7	67,0	7,65
5	HSC-05	24,9	42,7	55,4	60,4	63,5	7,40

* Mẫu bê tông đối chứng, không sử dụng tro bay và sợi polypropylene



a). Bảo dưỡng mẫu bê tông sau khi tạo hình



b). Nén mẫu bê tông thí nghiệm

Hình 5. Thí nghiệm xác định tính chất cơ lý của mẫu bê tông cường độ cao.

Bảng 5. So sánh bê tông cường độ cao và bê tông xi măng truyền thống.

Tiêu chí	Bê tông cường độ cao	Bê tông xi măng truyền thống
Cường độ nén	Cao, ổn định, đạt trên 70 MPa	Không cao và dễ nứt khi chịu tải kéo
Khả năng chống thấm	Chống thấm rất tốt, hầu như không thấm nước nếu được thi công tốt	Chống thấm không tốt, thường bị thấm khi áp lực nước ngầm lớn
Trọng lượng	Nhẹ hơn	Nặng hơn
Khả năng chống ăn mòn cốt thép	Tốt, cốt thép không bị ăn mòn như trong bê tông truyền thống	Thép bên trong dễ bị ăn mòn, giảm tuổi thọ của bê tông
Tính công tác	Dễ thi công khi hàm lượng sợi nhỏ, nhưng khó thi công khi hàm lượng sợi tăng lên	Dễ thi công nhưng có thể cần gia cố thêm
Độ bền và tuổi thọ	Cao, ít bảo trì	Tuổi thọ phụ thuộc vào bảo dưỡng
Giá thành	Cao hơn khoảng 10-20 % do sợi polypropylene và các loại phụ gia khoáng	Thấp hơn vì dùng các loại vật liệu phổ biến

4. Kết luận và kiến nghị

Từ những kết quả thực nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm đã rút ra một số kết luận như sau:

- Bê tông cường độ cao được thiết kế và chế tạo trong nghiên cứu đã đạt cường độ nén 28 ngày từ 63,5 MPa đến 73,6 MPa, đi kèm với cường độ kéo khi uốn từ 6,85 đến 8,02 MPa và mô đun đàn hồi lên tới 40,5 GPa, cho thấy khả năng chịu lực tổng thể cao, phù hợp cho các kết cấu có yêu cầu kháng nứt và độ cứng lớn.

- Hỗn hợp bê tông có tính công tác tốt, độ sụt lớn và ổn định theo thời gian, không xảy ra phân tầng – tách lớp, giúp đảm bảo khả năng thi công thuận lợi và đồng đều trong điều kiện thực tế tại các tầng hầm nhà cao tầng, các đường hầm tàu điện ngầm, đường hầm dân dụng trong khu vực TP. Hồ Chí Minh.

- Khả năng chống thấm nước của vật liệu được cải thiện rõ rệt nhờ sử dụng kết hợp tro bay, silica fume và sợi polypropylene, với mức chống thấm đạt W14–W19, độ hút nước dưới 8 %, hoàn toàn đáp ứng tiêu chuẩn Việt Nam cho kết cấu tiếp xúc nước thường xuyên.

- Việc sử dụng tro bay nhiệt điện thay thế một phần xi măng không chỉ duy trì hoặc cải thiện các tính chất cơ lý của bê tông cường

độ cao mà còn góp phần giảm phát thải CO₂, giảm chi phí vật liệu, hướng tới giải pháp bê tông xanh – thân thiện môi trường.

- Sản phẩm bê tông cường độ cao trong nghiên cứu có thể xem là giải pháp bền vững và hiệu quả trong xây dựng kết cấu công trình ngầm tại khu vực TP. Hồ Chí Minh, đáp ứng đồng thời các yêu cầu về cơ học, thi công và môi trường.

- Đề xuất mở rộng nghiên cứu ngoài hiện trường tại các tầng hầm nhà cao tầng trong khu vực TP. Hồ Chí Minh nhằm đánh giá thực tế hiệu quả thi công, độ bền lâu dài và khả năng kháng thấm của bê tông.

- Khuyến khích tận dụng tro bay, đá vôi, sợi polypropylene và phụ gia nội địa để giảm giá thành sản phẩm, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn và phát triển công trình ngầm và hạ tầng bền vững, thích ứng biến đổi khí hậu tại khu vực kinh tế trọng điểm phía Nam.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Nguyễn Quang Vinh (1993). Thành phố Hồ Chí Minh: con đường xử lý hài hòa lợi ích các nhóm xã hội trên lĩnh vực nhà ở đô thị. Tạp chí Xã hội học, số 3 (1993).
- [2]. Huỳnh Thanh Điền (2024). Mô hình hợp tác công tư trong phát triển nhà ở xã hội thành phố Hồ Chí Minh. Kỳ yếu Hội thảo Nâng cao hiệu quả quản lý,

- khai thác, sử dụng và phát huy các nguồn lực nhằm phát triển kinh tế - xã hội Thành phố Hồ Chí Minh. Thành ủy Thành phố Hồ Chí Minh. NXB Tài Chính. 40-52.
- [3]. Trần Thị Vân, Hà Dương Xuân Bảo, Đinh Thị Kim Phượng, Nguyễn Thị Tuyết Mai, Đặng Thị Mai Nhung (2017). Đặc điểm môi trường nhiệt và diễn biến đảo nhiệt đô thị bề mặt khu vực Bắc Thành phố Hồ Chí Minh. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ (2017): 11-20.
- [4]. Vu Minh Ngan, Dat Chi Nguyen, Luyen Van Nguyen (2022). Applications of jet-grouting technology in the Metroline No. 1 project at Ho Chi Minh City. Journal of Mining and Earth Sciences Vol 63, no. 2 (2022): 72-80.
- [5]. Đào Viết Đoàn, Tăng Văn Lâm (2015). Bê tông công trình ngầm và mỏ. Nhà xuất bản Xây dựng, 285 trang.
- [6]. Nguyen Cong Hau, Nguyen Thi Thu Thuy (2025), Nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia khoáng hoạt tính cao và sợi hỗn hợp lên các tính chất của bê tông tính năng cao sử dụng nguyên vật liệu phía Nam. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng.
- [7]. Trần Quang Phú, Trần Minh Cường (2023). Một số vấn đề về quy hoạch không gian ngầm cho phát triển đô thị tại thành phố Hồ Chí Minh. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng 13, no. 01 (2023): 108-Trang.
- [8]. Phan N. Duy, Lee Chapman, Miles Tight, Phan N. Linh, Le V. Thuong, (2017) Increasing vulnerability to floods in new development areas: evidence from Ho Chi Minh City, International Journal of Climate Change Strategies and Management, <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-12-2016-0169>.
- [9]. American Concrete Institute. (2008). ACI 211.4R-08: Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute
- [10]. Phạm Hữu Hanh (2009), Bê tông cường độ cao – Bê tông chất lượng cao, bài giảng dành cho học viên Cao học Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng, Hà Nội.
- [11]. Nguyễn Thành Công, Hoàng Phó Uyên. Nghiên cứu bê tông cốt sợi thủy tinh để sử dụng trong công trình thủy lợi ven biển, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, 2018.
- [12]. Nguyễn Thị Thắng, Vũ Thị Hương Lê. Nghiên cứu ảnh hưởng của cốt sợi phân tán đến một số tính chất của bê tông trong môi trường, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Xây dựng, 2022.
- [13]. Lê Anh Thắng , Tô Minh Đoàn (2024). Đánh giá các tính chất cơ học của bê tông cường độ cao kết hợp cát mịn cửa sông với tro bay và gia cường bằng sợi polypropylene. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng 14, no. 05 (2024): 30-Trang.
- [14]. Nguyễn Công Thắng , Phạm Văn Tuấn , Lê Việt Hùng , Nguyễn Văn Tuấn , Lê Trung Thành. Nghiên cứu ảnh hưởng của cốt sợi đến tính chất của bê tông nhẹ cường độ cao từ hạt vi cầu rỗng Cenospheres từ tro bay. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng. Năm 2024
- [15]. Bùi Danh Đại (2010), Phụ gia khoáng hoạt tính cao cho bê tông chất lượng cao, Bài giảng dành cho Cao học Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng, Hà Nội.
- [16]. P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials McGraw-Hill Education.
- [17]. Nguyễn Văn Tuấn, Phạm Hữu Hanh, Nguyễn Công Thắng, Lê Trung Thành, Văn Viết Thiên An, Hoàng Tuấn Nghĩa (2017). Bê tông chất lượng siêu cao. Nhà xuất bản Xây dựng, 301 trang.
- [18]. Medeiros, M. H. F., Helene, P. (2008). Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. Construction and Building Materials, 22(8), 1470–1479.
- [19]. Al-Tayeb, M. M., Abu-Lebdeh, T. M., & Huseien, G. F. (2018). Strength of Different Fiber Reinforced Concrete in Marine Environment. ResearchGate.
- [20]. Vũ Quốc Vương (2025). Nghiên cứu nguyên nhân nứt kết cấu bê tông và giải pháp khắc phục. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng 15, no. 02 (2025): 100-Trang.