

ẢNH HƯỞNG ĐỒNG THỜI CỦA CỐT LIỆU LỚN TÁI CHẾ VÀ TỶ LỆ NƯỚC/XI MĂNG ĐẾN CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN VÀ MÔ ĐUN ĐÀN HỒI CỦA BÊ TÔNG CỐT LIỆU TÁI CHẾ

Trần Anh Dũng^a, Nguyễn Hoàng Hiệp^a, Nguyễn Ngọc Tân^{a,*}

^a*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 22/01/2025, Sửa xong 17/3/2025, Chấp nhận đăng 04/4/2025

Tóm tắt

Cốt liệu tái chế (CLTC) từ chất thải rắn xây dựng (CTRXD) được thúc đẩy sử dụng trong sản xuất bê tông với mục tiêu phát triển bền vững trong lĩnh vực xây dựng. Giải pháp này giúp giảm khai thác tài nguyên, hạn chế phát thải CO₂ và tăng cường quản lý CTRXD. Tuy nhiên, bê tông cốt liệu tái chế (BTCLTC) vẫn tồn tại một số hạn chế, đặc biệt là tính không đồng nhất do sự biến động trong hàm lượng và chất lượng của CLTC. Nghiên cứu này khảo sát ảnh hưởng đồng thời của cốt liệu lớn tái chế (CLLTC) và tỷ lệ nước/xi măng (N/X) đến tính chất cơ học của BTCLTC, cụ thể là cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi, dựa trên phân tích cơ sở dữ liệu thực nghiệm đã được công bố. Từ đó, các công thức đề xuất được hiệu chỉnh dựa trên công thức của tiêu chuẩn Eurocode 2 (EC2), để dự báo chính xác hơn mô đun đàn hồi BTCLTC khi xét đến ảnh hưởng đồng thời của CLLTC (hàm lượng và chất lượng) và tỷ lệ N/X.

Từ khóa: bê tông cốt liệu tái chế; cường độ chịu nén; mô đun đàn hồi; cốt liệu lớn tái chế; tỷ lệ nước/xi măng.

SIMULTANEOUS EFFECTS OF RECYCLED COARSE AGGREGATES AND WATER-TO-CEMENT RATIO ON THE COMPRESSIVE STRENGTH AND ELASTIC MODULUS OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

Abstract

Recycled aggregates produced from construction and demolition waste (CDW) have been promoted in concrete production with the aim of sustainable development in the construction industry. This solution helps reduce resource extraction, limit CO₂ emissions, and improve the management of CDW. However, recycled aggregate concrete (RAC) still has some limitations, particularly its non-uniformity due to variations in the content and quality of recycled aggregate. This study investigates the simultaneous effects of recycled coarse aggregates and water-to-cement ratio on the mechanical properties of recycled aggregate concrete, specifically compressive strength and elastic modulus, based on the analysis of an experimental database. From this, proposed formulas have been calibrated based on an available formula from Eurocode 2 (EC2) to predict better the elastic modulus of RAC taking into account the simultaneous influence of recycled coarse aggregates (i.e., content and quality) and water-to-cement ratio.

Keywords: recycled aggregate concrete; compressive strength; elastic modulus; recycled coarse aggregate; water-to-cement ratio.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(3V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(3V)-02) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Mở đầu

Bê tông là một trong những loại vật liệu được sử dụng phổ biến nhất trong lĩnh vực xây dựng, với mức độ tiêu thụ vào khoảng 30 tỷ tấn mỗi năm trên toàn thế giới [1]. Tuy nhiên, quá trình sản xuất bê tông cần sử dụng một lượng lớn cốt liệu tự nhiên (CLTN), gây ra các tác động tiêu cực đến môi

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tanann@huce.edu.vn (Tân, N. N.)

trường. Bên cạnh đó, xi măng được sử dụng làm chất kết dính trong quá trình này cũng là nguồn phát thải CO_2 vào không khí. Do đó, ngành xây dựng đang tìm kiếm các giải pháp kỹ thuật phục vụ sản xuất bê tông một cách bền vững [2]. Ví dụ như giải pháp kỹ thuật sử dụng phụ gia khoáng như tro bay, xỉ lò cao để thay thế cho xi măng đã được tích cực nghiên cứu. Huy và cs. [3], Lâm và cs. [4] đã trình bày các nghiên cứu thực nghiệm về sử dụng các loại phụ gia khoáng này trong chế tạo vữa và bê tông cường độ cao. Bên cạnh đó, bê tông cốt liệu tái chế là một trong những giải pháp được quan tâm đặc biệt [5]. BTCLTC là vật liệu bê tông được sản xuất với thành phần cốt liệu thu được từ quá trình xử lý tái chế phế thải xây dựng (hay còn gọi là CTRXD). Việc tái chế CTRXD là một giải pháp kỹ thuật phù hợp với thực tế hiện nay, không chỉ giúp giảm tác động tiêu cực của ngành xây dựng đến môi trường mà còn giúp nâng cao năng lực quản lý CTRXD. Bên cạnh đó, sử dụng CLTC trong bê tông sẽ làm giảm nhu cầu khai thác CLTN, kéo theo việc giảm phát thải CO_2 trong các quá trình phụ trợ (khai thác, vận chuyển).

Trên thế giới và tại Việt Nam đã có những nghiên cứu giúp thu hẹp khoảng cách giữa lý thuyết và thực tế, khi nghiên cứu tính ứng dụng của BTCLTC trong các cấu kiện thay cho bê tông cốt liệu tự nhiên (BTCLTN). Tùy thuộc vào chất lượng của CLTC, tiêu chuẩn của một số quốc gia đã đưa ra khuyến nghị về tỷ lệ thay thế phù hợp khi sử dụng CLTC trong các cấu kiện chịu lực và không chịu lực, ví dụ như tiêu chuẩn IS 383:2016 của Ấn Độ, JGJ/T240 (2011) của Trung Quốc, như trong báo cáo tổng kết của Prajapati và cs. [6]. Tuy nhiên, vẫn còn một số quốc gia, trong đó có Việt Nam, thiếu các chỉ dẫn kỹ thuật phù hợp, dẫn đến việc sử dụng vật liệu này trong xây dựng còn gặp nhiều khó khăn và thách thức. Một số nghiên cứu trong nước về BTCLTC đã được thực hiện gần đây. Có thể kể đến như Quang và cs. [7] đã nghiên cứu ứng xử của cột bê tông cốt thép sử dụng BTCLTC chịu tác dụng của tải trọng nén đúng tâm và chỉ ra khả năng sử dụng thực tế của loại vật liệu này. Tương tự, Tân và cs. [8] đã thí nghiệm và chỉ ra khả năng ứng dụng trong dầm chịu uốn với CLTC sản xuất từ CTRXD thu gom từ công trình trường tiểu học Tân Mai, Hà Nội. Hiền và cs. [9] đã nghiên cứu tấm BTCLTC trên nền cát. Các kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng BTCLTC có thể thay thế cho bê tông thường trong chế tạo các cấu kiện nói trên.

Tuy nhiên, các nghiên cứu này cũng chỉ ra rằng CLTC vẫn còn những hạn chế để có thể sử dụng rộng rãi. Trong đó, sự không đồng nhất về tính chất cơ lý của CLTC là một lý do chính. Sự biến động này gây ảnh hưởng đến cường độ và độ bền của bê tông thành phẩm. Hàm lượng CLTC được sử dụng thay cho CLTN trong cấp phối cũng cần được quan tâm, vì yếu tố này cũng ảnh hưởng trực tiếp đến các tính chất cơ lý của bê tông sau khi đóng rắn [10–13]. Ngoài ra, tỷ lệ N/X cũng là một yếu tố cần được quan tâm, khi tăng tỷ lệ này sẽ làm giảm cường độ chịu nén của BTCLTC [14, 15]. Tại Việt Nam, một số nghiên cứu thực nghiệm đã được thực hiện nhằm xác định cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi của BTCLTC. Quang và cs. [16], Hiền và cs. [17] đã tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm nhằm hiểu rõ ảnh hưởng của hàm lượng CLTC (r) được sử dụng thay thế cho cốt liệu lớn tự nhiên (CLLTN), đến cường độ chịu nén (f_c) và mô đun đàn hồi (E_c) của BTCLTC. Một số nghiên cứu của Tavakoli và cs. [18], Dillmann [19], Kheder và cs. [20], Hoffmann và cs. [21] cũng đã đề xuất những mối liên hệ giữa cấp phối và tính chất cơ lý của BTCLTC. Tuy nhiên, các mô hình dự báo và thực nghiệm chưa có sự tương đồng khi áp dụng cho dữ liệu mới. Hạn chế của các nghiên cứu thực nghiệm này nằm ở số lượng mẫu quan sát còn hạn chế, dẫn đến tính khái quát chưa cao. Việc sử dụng một bộ số liệu lớn hơn là cần thiết để nâng cao tính khái quát cho các nghiên cứu theo định hướng này. Ví dụ, Hiền và cs. [22] đã sử dụng các thuật toán học máy để nghiên cứu sâu hơn về các yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học của BTCLTC với một bộ số liệu có 358 mẫu.

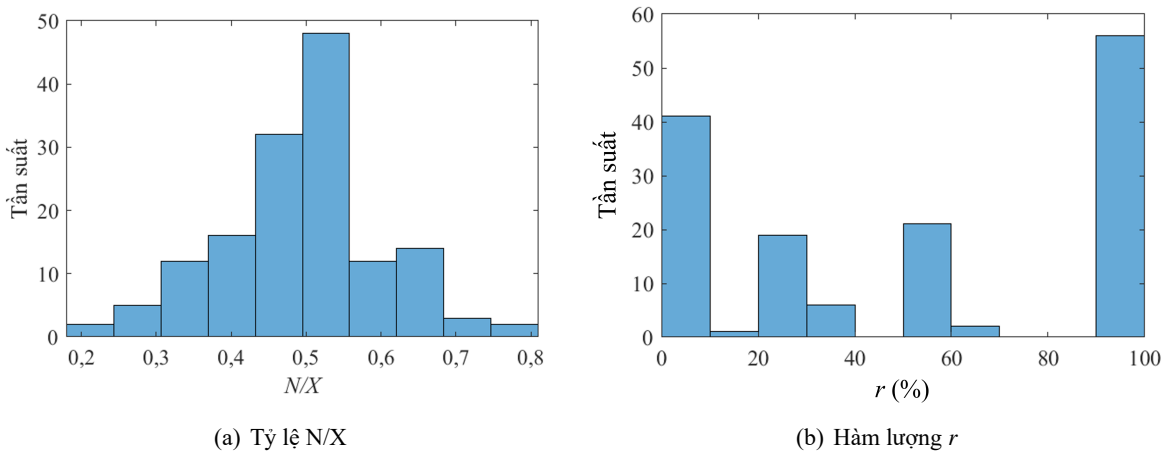
Bài báo này trình bày kết quả một nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng đồng thời của CLTC (hàm lượng và chất lượng) và tỷ lệ N/X đến cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của BTCLTC bằng

phương pháp phân tích dữ liệu. Trong đó, một bộ số liệu được tổng hợp từ nhiều nghiên cứu thực nghiệm được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng đồng thời của CLLTC và tỷ lệ N/X đến hai tính chất cơ học quan trọng của BTCLTC là cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi. Bộ số liệu này sẽ được giới thiệu chi tiết ở phần tiếp theo của bài báo. Cách tiếp cận này sẽ khắc phục được nhược điểm của các nghiên cứu thực nghiệm, nâng cao tính khách quan cho kết quả thu được. Các kết quả thu được giúp chỉ ra mối tương quan giữa cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của BTCLTC.

2. Phân tích bộ số liệu thực nghiệm

Bộ số liệu sử dụng trong nghiên cứu này được tham khảo từ nghiên cứu của Gholampour và cs. [23], trong đó tổng hợp kết quả của 69 nghiên cứu thực nghiệm. Bộ số liệu này gồm các yếu tố liên quan đến cấp phối của BTCLTC, một số tính chất của CLTC và các tính chất cơ lý của mẫu bê tông. Nghiên cứu này chỉ sử dụng một phần của bộ số liệu, tập trung vào 147 mẫu hình trụ có đường kính 100 mm và chiều cao 200 mm, như trình bày trong Bảng A.1, do loại mẫu này có số lượng kết quả nhiều hơn các loại mẫu còn lại. Đồng thời, do nghiên cứu này cũng chỉ tập trung vào sự ảnh hưởng của CLLTC và tỷ lệ N/X, bộ số liệu sử dụng trong nghiên cứu này chỉ bao gồm các tham số như: (i) Tỷ lệ N/X theo khối lượng, (ii) Hàm lượng CLLTC (r , %), (iii) Khối lượng riêng (kg/m^3), và (iv) Độ hút nước của CLLTC. Nghiên cứu này sử dụng các giá trị cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày và mô đun đàn hồi của BTCLTC tương ứng để xây dựng bộ số liệu phù hợp. Giá trị r thay đổi từ 0 đến 100% trong cấp phối bê tông và các mẫu thí nghiệm được chế tạo mà không thêm phụ gia khoáng pozzolan.

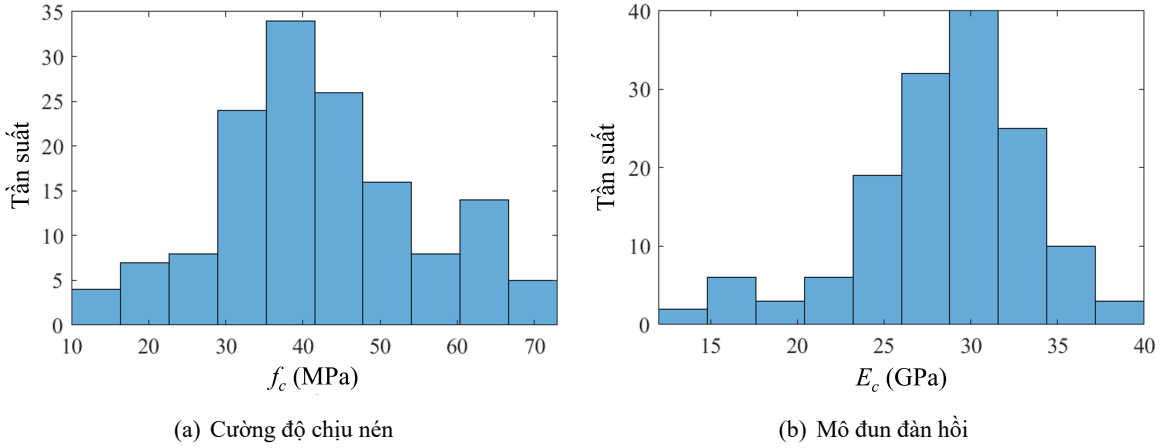
Chất lượng của CLTC, trong nghiên cứu này là cốt liệu lớn, là yếu tố có ảnh hưởng rất lớn đến f_c và E_c của BTCLTC. Khác với một số quốc gia trên thế giới thường phân CLLTC thành 3 hoặc 4 loại, tiêu chuẩn TCVN 11969:2018 [24] chỉ quy định hai loại CLLTC được sử dụng trong sản xuất bê tông. CLLTC loại I phải có khối lượng thể tích không nhỏ hơn 2300 kg/m^3 , độ hút nước không lớn hơn 5% và độ nén dập trong xi lanh không lớn hơn 20%. Trong khi đó, CLLTC loại II có khối lượng thể tích không nhỏ hơn 1800 kg/m^3 , độ hút nước không lớn hơn 20% và độ nén dập không lớn hơn 30%.



Hình 1. Biểu đồ tần suất của (a) tỷ lệ N/X và (b) hàm lượng r

Hình 1 thể hiện sự phân bố của tỷ lệ N/X và hàm lượng r trong thành phần của BTCLTC. Trong đó, các giá trị của tỷ lệ N/X thay đổi từ 0,19 đến 0,80. Hàm lượng CLTC thay thế cũng tập trung hơn ở hai giá trị lần lượt là 0 và 100% (tương ứng với BTCLTN và BTCLTC sử dụng 100% CLLTC). Do sự tập trung của các dữ liệu tại hai giá trị trên, nghiên cứu này sẽ đánh giá ảnh hưởng của r trên các khoảng giá trị nhỏ hơn. Trong khi đó, Hình 2 thể hiện sự phân bố của các giá trị cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của các mẫu được đánh giá. Giá trị của f_c thay đổi chủ yếu trong khoảng từ 10 đến

70 MPa, với giá trị trung bình là 42,1 MPa. Trong khi đó, giá trị của E_c thay đổi chủ yếu trong khoảng từ 20 đến 40 GPa, với giá trị trung bình là 28,5 GPa.

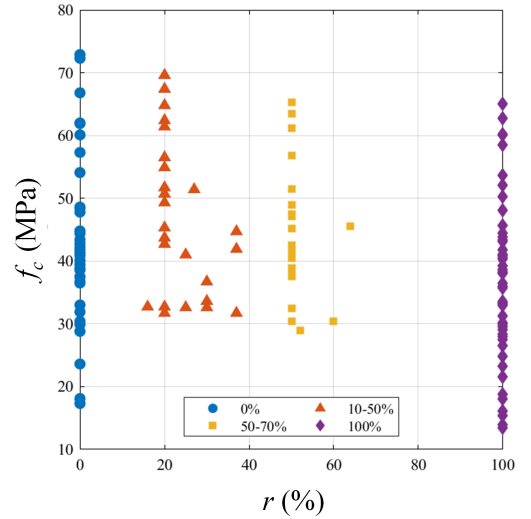


Hình 2. Biểu đồ tần suất của (a) cường độ chịu nén và (b) mô đun đàn hồi

3. Đánh giá ảnh hưởng đồng thời của CLLTC và tỷ lệ N/X

3.1. Ảnh hưởng đồng thời của CLLTC và tỷ lệ N/X đến cường độ chịu nén của BTCLTC

Hình 3 biểu diễn khái quát mối quan hệ giữa hàm lượng CLLTC với cường độ chịu nén của BTCLTC trong bộ số liệu sử dụng cho nghiên cứu này. Bốn nhóm mẫu đã được định nghĩa dựa trên phân bố của bộ số liệu này, bao gồm r bằng 0%, 10–50%, 50–70% và 100%. Các nhóm này có lần lượt 41, 27, 24 và 55 số liệu. Với nhóm bê tông thường ($r = 0\%$), cường độ chịu nén dao động trong khoảng từ 17,3 đến 72,9 MPa. Với nhóm sử dụng CLLTC với tỷ lệ trong khoảng 10–50%, cường độ chịu nén có xu hướng giảm nhẹ. Điều này cho thấy hàm lượng CLLTC thấp không có nhiều ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của BTCLTC. Tuy nhiên, ảnh hưởng của hàm lượng CLLTC tăng lên rõ hơn khi r tăng cao. Đặc biệt, với BTCLTC có $r = 100\%$, cường độ chịu nén giảm, giá trị chủ yếu chỉ nằm trong khoảng từ 20 đến 40 MPa.

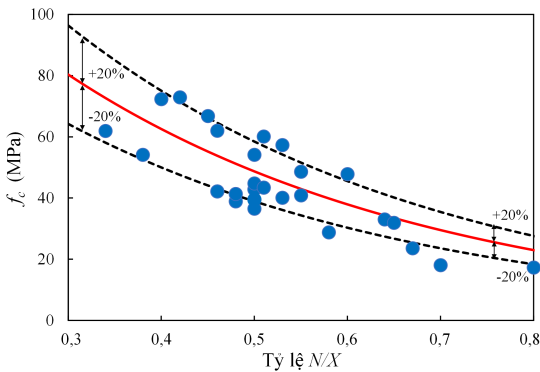


Hình 3. Mối quan hệ giữa r và f_c

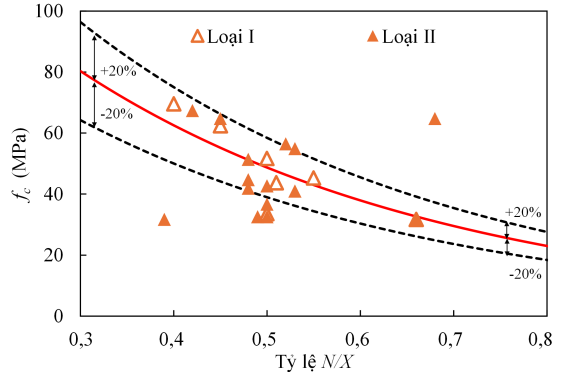
Đối với nhóm mẫu có $r = 0\%$, ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến f_c được thể hiện như Hình 4. Mối quan hệ này được đặc trưng bởi một mô hình hàm số mũ cơ số e như công thức (1), được biểu diễn bằng đường hồi quy nét liền màu đỏ. Bên cạnh đó, hai đường nét đứt màu đen thể hiện khoảng biến thiên $\pm 20\%$ so với giá trị tính toán theo mô hình. Với tỷ lệ N/X thấp (dưới 0,4), giá trị f_c được ghi nhận là cao hơn so với các khoảng khác. Khi tỷ lệ N/X tăng lên, f_c giảm tương đối mạnh dọc theo đường thực nghiệm. Các nhận xét này là phù hợp với lý thuyết đã được nghiên cứu dành cho bê tông thường, như đã được chỉ ra trong hướng dẫn tính toán của Marsh [25].

$$f_c = 170 e^{-2,5N/X} \quad (1)$$

Mô hình hàm số mũ này vẫn có giá trị khi áp dụng cho các mẫu BTCLTC ở trong bộ số liệu. Tuy nhiên, vì tính chất và chất lượng không đồng nhất của CLLTC, tính phù hợp của mô hình đã giảm đi khi mà có nhiều hơn các dữ liệu nằm ở ngoài mô hình. Khi sử dụng mô hình hồi quy này cho nhóm số liệu có r thay đổi từ 10% đến 50%, kết quả vẫn chỉ ra sự tương đồng, như thể hiện trên Hình 5. Tuy nhiên, đã xuất hiện nhiều hơn các giá trị nằm ngoài khoảng $\pm 20\%$ giá trị lý thuyết. Các giá trị cường độ chịu nén của bê tông nằm ngoài phạm vi của mô hình đều do sử dụng CLLTC loại II. CLLTC loại này có chất lượng và độ đồng nhất kém hơn, do đó dẫn đến sự không đồng nhất của các giá trị f_c . Kết quả này nhìn chung là phù hợp với các kết quả được công bố và một số tiêu chuẩn hiện hành, ví dụ tiêu chuẩn EC2 [26] chỉ ra rằng, khi r không lớn hơn 20%, tính chất cơ học của BTCLTC không thay đổi so với BTCLTN. Các giá trị trong bộ số liệu cũng tập trung chủ yếu ở khoảng 20%.



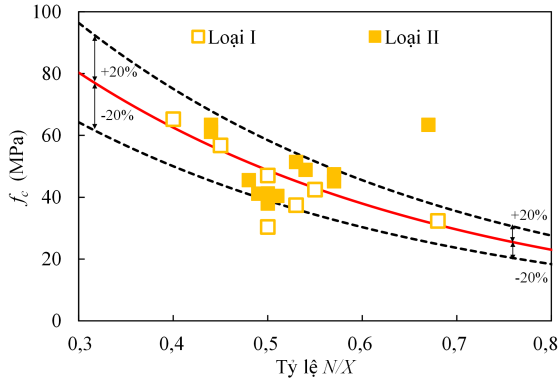
Hình 4. Mối quan hệ giữa N/X và f_c khi $r = 0\%$



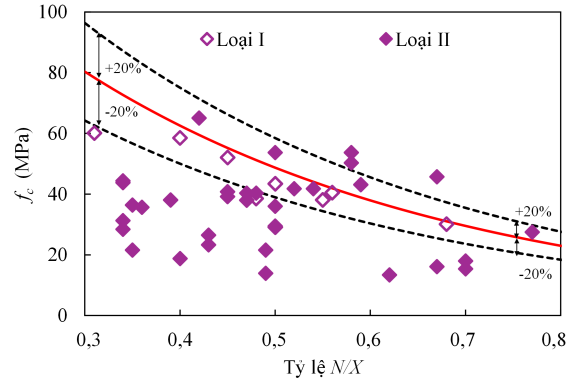
Hình 5. Mối quan hệ giữa N/X và f_c khi $r = 10\text{--}50\%$

Tương tự, đối với nhóm mẫu có r trong khoảng 50% đến 70%, các giá trị dữ liệu vẫn phù hợp với mô hình đề xuất, như thể hiện trên Hình 6. Tuy nhiên, đã có các giá trị cường độ chịu nén của BTCLTC sử dụng cốt liệu loại I nằm ngoài khoảng của mô hình. Điều này cũng là phù hợp khi hàm lượng CLLTC tăng lên. Dù là CLLTC loại I, tính chất cơ học và tính đồng nhất vẫn kém hơn so với CLLTN. Cần chú ý rằng, các giá trị f_c cao và thấp đột biến so với dự báo của mô hình là các kết quả nghiên cứu của Thomas và cs. [27], trong khi các giá trị f_c thấp đột biến đến từ các kết quả nghiên cứu của Kang và cs. [28]. Kết quả này nhận được là do các kết quả nghiên cứu của Thomas và cs. có mức r thấp so với nhóm, trong khi các kết quả nghiên cứu của Kang và cs. có hàm lượng cốt liệu so với xi măng lại lớn hơn. Cũng cần chú ý rằng điều kiện bảo dưỡng bê tông trong nghiên cứu của Thomas và cs. cũng tốt hơn, nhằm phục vụ nghiên cứu tính môi của BTCLTC. Các yếu tố này do đó cũng thể hiện sự ảnh hưởng đến cường độ của mẫu thí nghiệm, tuy nhiên không nhiều khi so với các yếu tố đang nghiên cứu.

Tuy nhiên, mô hình này không còn phù hợp khi hàm lượng $r = 100\%$, như thể hiện trên Hình 7. Đối với nhóm mẫu này, ảnh hưởng của tỷ lệ N/X giảm đi đáng kể. Dù tỷ lệ N/X vẫn thấp (dưới 0,5), cường độ chịu nén của bê tông vẫn ở mức thấp. Các mẫu thí nghiệm sử dụng CLLTC loại I vẫn nằm trong mô hình được đề xuất trong nghiên cứu này. Còn với các mẫu thí nghiệm sử dụng CLLTC loại II thì 78,3% các giá trị cường độ chịu nén của bê tông trong bộ số liệu thấp đi đáng kể so với đường hồi quy và nằm dưới khoảng $\pm 20\%$ giá trị tính toán. Hai kết quả này phù hợp với các nghiên cứu đã công bố và tiêu chuẩn EC2. Theo tiêu chuẩn này, khi r lớn hơn 40%, cần tiến hành thí nghiệm cho từng mẻ trộn bê tông. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy hàm lượng CLTC cần được kiểm soát chặt chẽ khi sử dụng trong các cấu kiện chịu lực, do tính chất không đồng nhất của CLTC có thể làm suy giảm tính chất cơ học của BTCLTC, dẫn đến việc không đáp ứng yêu cầu thiết kế.

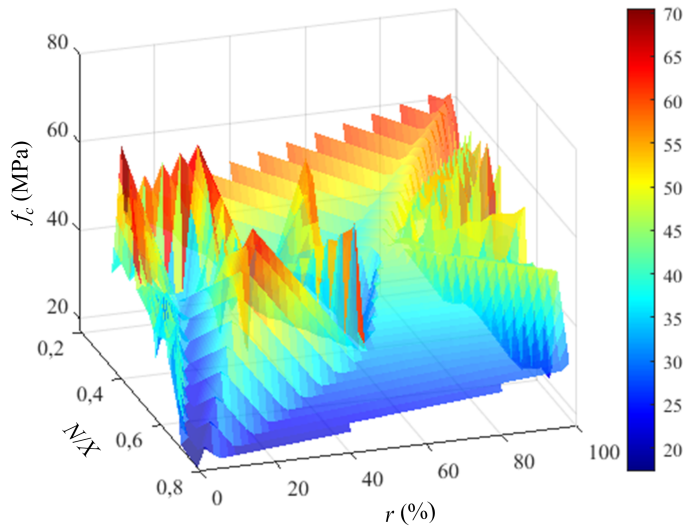


Hình 6. Mối quan hệ giữa N/X và f_c khi $r = 50\text{--}70\%$



Hình 7. Mối quan hệ giữa N/X và f_c khi $r = 100\%$

Hình 8 thể hiện ảnh hưởng đồng thời của CLLTC và tỷ lệ N/X đến cường độ chịu nén của BTCLTC. Tỷ lệ N/X và r đều ảnh hưởng đáng kể đến cường độ chịu nén. Khi tỷ lệ N/X tăng (đến 0,8), giá trị f_c giảm, đặc biệt ở các vùng r cao. Khi r thấp hoặc gần bằng 0, cường độ chịu nén có xu hướng cao hơn. Bê tông đạt cường độ cao nhất ở tỷ lệ N/X thấp (khoảng 0,3 đến 0,4) và hàm lượng r thấp. Điều này cho thấy cần tối ưu cả hai thông số này để BTCLTC đạt được cường độ chịu nén theo yêu cầu. Bằng cách chia nhóm như trên, lượng dữ liệu được đảm bảo tương đối cân đối cho từng nhóm đối tượng nghiên cứu.



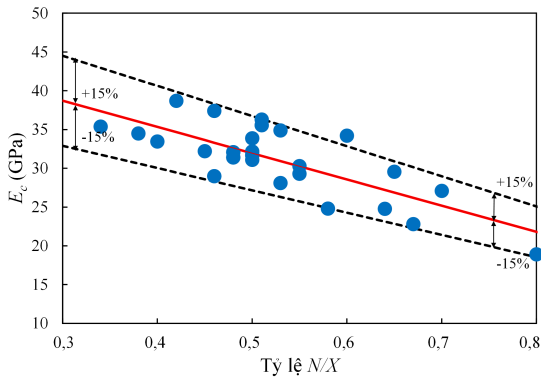
Hình 8. Ảnh hưởng đồng thời của r và tỷ lệ N/X đến f_c

3.2. Ảnh hưởng đồng thời của CLLTC và tỷ lệ N/X đến mô đun đàn hồi của BTCLTC

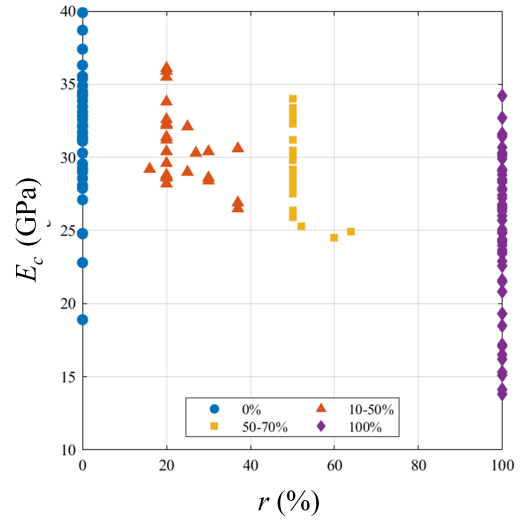
Tương tự, ảnh hưởng của CLLTC đến mô đun đàn hồi của BTCLTC cũng được nghiên cứu. Hình 9 thể hiện mối quan hệ giữa hàm lượng r và mô đun đàn hồi E_c . Các số liệu nghiên cứu cũng được phân loại thành bốn nhóm dựa trên r được sử dụng trong cấp phối bê tông. Với nhóm BTCLTN, mô đun đàn hồi E_c phân bố tập trung trong khoảng từ 27 đến 40 GPa. Giá trị E_c chủ yếu nằm trong khoảng từ 26 đến 36 GPa đối với các giá trị r khác từ 10% đến 50%. Điều này cho thấy ở tỷ lệ thay thế thấp, sự suy giảm mô đun đàn hồi không quá rõ rệt.

Hai nhóm mẫu còn lại, tương ứng với các hàm lượng $r = 50\text{--}70\%$ và $r = 100\%$, mô đun đàn hồi E_c giảm mạnh và chủ yếu nằm trong khoảng từ 23 đến 30 GPa. Hình 9 cũng làm rõ mối quan hệ nghịch biến giữa r và E_c của bê tông trong bộ số liệu này. Mô đun đàn hồi giảm dần khi r tăng, và giảm đáng kể khi thay thế hoàn toàn CLLTN bằng CLLTC.

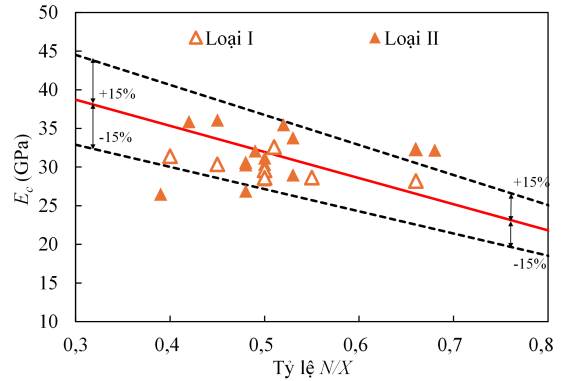
Khi $r = 0\%$, ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến E_c được đặc trưng bởi đường hồi quy tuyến tính, như thể hiện trên Hình 10 và được giới hạn bởi khoảng $\pm 15\%$ so với giá trị tính toán. Các giá trị thực nghiệm trong bộ số liệu phân bố đều xung quanh đường hồi quy này, thể hiện rằng mô hình được xây dựng có tính phù hợp với bộ số liệu được nghiên cứu. Với tỷ lệ N/X thấp, mô đun đàn hồi của bê tông nhìn chung là cao hơn. Khi tỷ lệ N/X tăng lên, E_c giảm theo đường hồi quy. Các nhận xét này là phù hợp với lý thuyết đã được nghiên cứu dành cho bê tông thường, như của Quang và cs. [16].



Hình 10. Ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến E_c khi $r = 0\%$



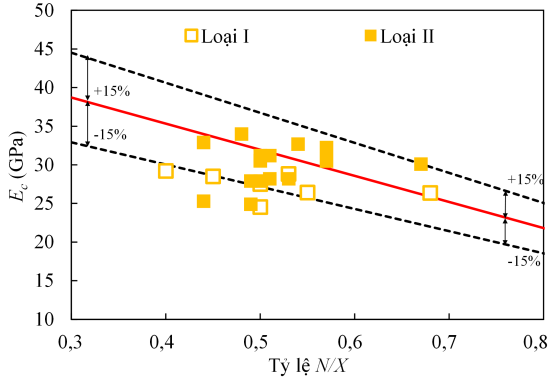
Hình 9. Mối quan hệ giữa r và E_c



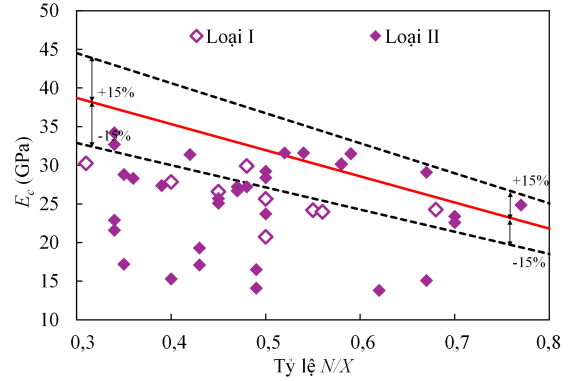
Hình 11. Ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến E_c khi $r = 10\text{--}50\%$

Khi sử dụng mối quan hệ này cho hai nhóm mẫu có r thay đổi từ 10% đến 50% và từ 50% đến 70%, các kết quả chỉ ra vẫn tương đối phù hợp, như thể hiện trên Hình 11 và Hình 12. Tương tự như với các kết quả đã tìm thấy với cường độ chịu nén, giá trị E_c thấp hơn khi hàm lượng CLLTC tăng lên, và có nhiều hơn các giá trị nằm dưới đường hồi quy. Hơn nữa, CLLTC loại I cũng giúp cho mẫu thí nghiệm có mô đun đàn hồi phân bố gần với đường hồi quy hơn so với các mẫu sử dụng CLLTC loại II. Nhìn chung, mô đun đàn hồi của BTCLTC không thay đổi nhiều dưới tác động của N/X. Khi tỷ lệ N/X tăng, thì mô đun đàn hồi của BTCLTC giảm dần.

Tuy nhiên, đường hồi quy này cũng không còn đúng khi $r = 100\%$, như thể hiện trên Hình 13. Với các dữ liệu này, mô đun đàn hồi E_c của BTCLTC giảm đi đáng kể. Hơn nữa, ảnh hưởng của tỷ lệ N/X cũng giảm. Với tỷ lệ N/X thấp (dưới 0,5), mô đun đàn hồi của bê tông vẫn thấp hơn so với đường hồi quy và nằm dưới khoảng $\pm 15\%$ thay đổi so với giá trị tính toán. Kết quả này cũng tương tự với các kết quả đã được tìm thấy, khi mà tính đồng nhất và chất lượng của CLLTC là kém hơn so với CLLTN, dẫn đến giảm tính đồng nhất đối với mô đun đàn hồi của BTCLTC.

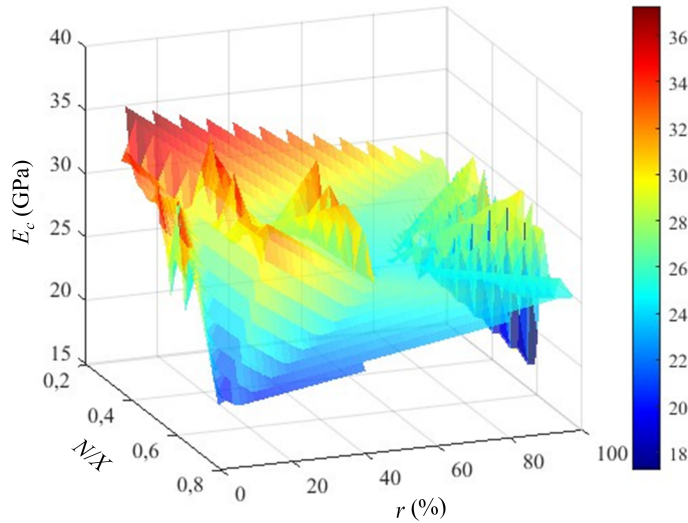


Hình 12. Ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến E_c khi $r = 50-70\%$



Hình 13. Ảnh hưởng của tỷ lệ N/X đến E_c khi $r = 100\%$

Hình 14 thể hiện ảnh hưởng đồng thời của hai yếu tố là hàm lượng thay thế CLLTC và tỷ lệ N/X đến mô đun đàn hồi của BTCLTC. Tỷ lệ N/X và r cũng thể hiện sự ảnh hưởng tương đối lớn đến mô đun đàn hồi của bê tông. Khi tỷ lệ N/X tăng (đến 0,8), giá trị E_c giảm, đặc biệt ở các vùng r cao. Khi r thấp hoặc gần bằng 0, mô đun đàn hồi có xu hướng cao hơn. Bê tông có mô đun đàn hồi cao nhất khi tỷ lệ N/X thấp (khoảng 0,3 đến 0,4) và hàm lượng r thấp. Mặt phẳng được xây dựng bởi r , N/X và E_c tương đối mịn, ít xuất hiện các giá trị đột biến hơn so với mặt phẳng xây dựng bởi r , N/X và f_c trong bộ số liệu được nghiên cứu.



Hình 14. Tương quan ảnh hưởng của r , N/X và E_c

4. Mối tương quan giữa cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của BTCLTC

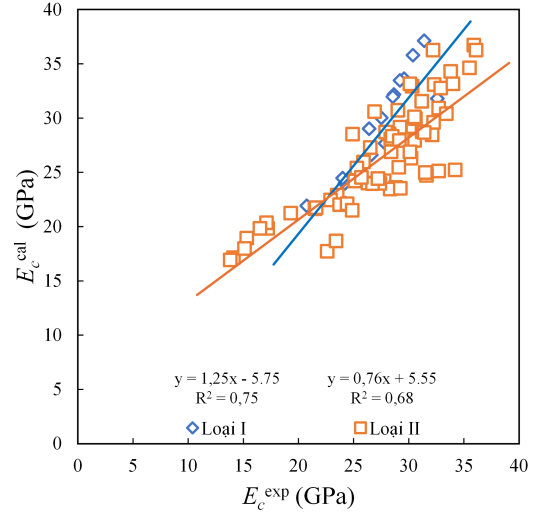
Nhiều nghiên cứu đã đề cập đến việc dự báo mô đun đàn hồi dựa trên cường độ chịu nén của BTCLTC và các yếu tố ảnh hưởng như tỷ lệ N/X hoặc hàm lượng thay thế CLLTC. Tuy nhiên, các nghiên cứu này lại chưa đề cập đến yếu tố ảnh hưởng là chất lượng cốt liệu. Thật vậy, tiêu chuẩn EC2 đưa ra mô hình dự báo E_c (MPa) theo f_c (MPa) và r (%) như công thức (2), với k_E lấy bằng 9500 là hệ số ảnh hưởng của cốt liệu.

$$E_c = 9500(1 - 0,25r)f_c^{1/3} \quad (2)$$

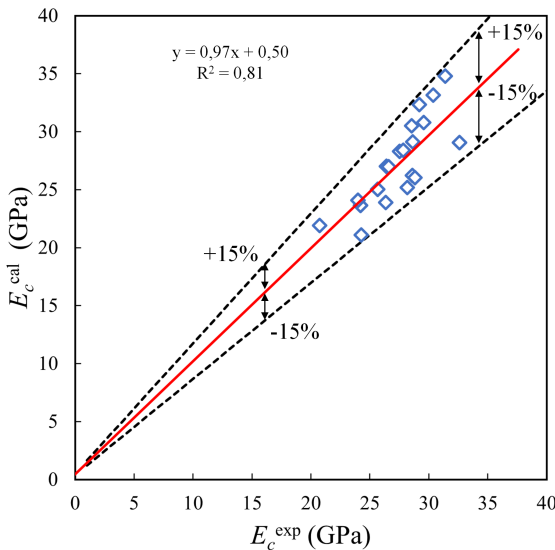
Tuy nhiên, công thức này không xét đến ảnh hưởng của chất lượng cốt liệu và tỷ lệ N/X. Hình 15 biểu diễn sự so sánh giữa mô đun đàn hồi thí nghiệm (E_c^{exp}) và mô đun đàn hồi tính toán (E_c^{cal}) theo tiêu chuẩn EC2. Công thức của EC2 đánh giá tương đối tốt giá trị của E_c , khi hệ số xác định (R^2) tương đối cao. Bên cạnh đó, công thức này cũng đánh giá quá cao giá trị E_c cho CLLTC loại I, và đánh giá quá thấp giá trị E_c cho CLLTC loại II. Do đó, dựa trên các kết quả đã có với bộ số liệu này, công thức (2) sẽ được hiệu chỉnh để phù hợp hơn với bộ số liệu được nghiên cứu.

Hình 16 giới thiệu mối tương quan giá trị E_c thí nghiệm và tính toán cho bộ số liệu. CLLTC loại I có chất lượng tốt hơn, giúp cho BTCLTC có chất lượng ổn định hơn cho đến khi $r = 100\%$. Hàm lượng CLLTC và tỷ lệ N/X có ảnh hưởng tương đối giống nhau lên giá trị E_c . Do đó, công thức (3) được đề xuất để tính đến ảnh hưởng đồng thời của hai yếu tố này. Giá trị của k_E cũng không thay đổi trong trường hợp này. Công thức này giúp cho hai giá trị E_c^{exp} và E_c^{cal} có giá trị xấp xỉ nhau, như thể hiện trên Hình 16. Các so sánh giữa E_c^{exp} và E_c^{cal} cũng nằm trong vùng $\pm 15\%$ giá trị thực nghiệm, giúp nâng cao độ chính xác của các giá trị tính toán.

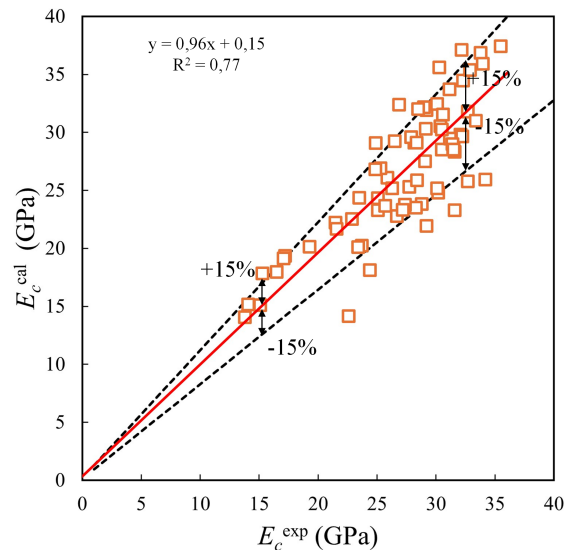
$$E_c = 9500(1 - 0,15r - 0,2N/X)f_c^{1/3} \quad (3)$$



Hình 15. So sánh mô đun đàn hồi của BTCLTC theo EC2 và thực nghiệm



Hình 16. So sánh mô đun đàn hồi của BTCLTC sử dụng CLLTC loại I



Hình 17. Đánh giá mô đun đàn hồi của BTCLTC sử dụng CLLTC loại II

Đối với nhóm mẫu sử dụng CLLTC loại II, có thể thấy rằng tỷ lệ N/X và CLLTC có ảnh hưởng nhiều hơn đến các giá trị f_c và E_c nên các giá trị thu được phân tán hơn. Do đó, công thức (2) cũng cần được điều chỉnh để đảm bảo thể hiện mối tương quan này. Trong nghiên cứu này, công thức (4) được đề xuất để thể hiện mối tương quan của các yếu tố trên. Với CLLTC loại II, ảnh hưởng của chất

lượng cốt liệu và hàm lượng là nhiều hơn so với tỷ lệ N/X, do đó, các hệ số cũng được điều chỉnh tương ứng. Bên cạnh đó, giá trị lũy thừa của f_c cũng được lựa chọn bằng 1/2,5 để phù hợp với sự suy giảm cường độ của bê tông là nhiều hơn so với sự suy giảm về mô đun đàn hồi. Công thức này cho phép dự báo các giá trị E_c^{cal} gần với các giá trị E_c^{exp} hơn. Tuy nhiên, vẫn có khoảng 20% các giá trị vẫn nằm ngoài khoảng $\pm 15\%$ giá trị thực nghiệm như thể hiện trên Hình 17. Do đó, các nghiên cứu bổ sung để rút ra mô hình có độ chính xác cao hơn là cần thiết.

$$E_c = 9500(1 - 0,3r - 0,3N/X)f_c^{1/2,5} \quad (4)$$

Bảng 1. So sánh sai số dự báo giữa công thức đề xuất và một số công thức đã công bố

Mô hình dự báo	Công thức	RMSE (GPa)	MAE (GPa)
Đề xuất	Với CLLTC loại I: $E_c = 9500(1 - 0,15r - 0,2N/X)f_c^{1/3}$ Với CLLTC loại II: $E_c = 9500(1 - 0,3r - 0,3N/X)f_c^{1/2,5}$	3,00	2,34
Tavakoli và cs. [18]	$E_c = 378f_c + 8242$	4,81	4,00
Dillmann [19]	$E_c = 634,43f_c + 3057,6$	6,07	4,46
Kheder và cs. [20]	$E_c = 4993f_c^{0,422}$	4,66	3,92
Hoffmann và cs. [21]	$E_c = 6800\sqrt[3]{f_c}$	5,16	4,51
EC2 [26]	$E_c = 9500(1 - 0,25r)f_c^{1/3}$	3,56	2,80

Các chỉ số thống kê như độ lệch bình phương trung bình gốc (RMSE) và sai số tuyệt đối trung bình (MAE) đã được sử dụng để đánh giá độ chính xác của các công thức đề xuất. Các giá trị RMSE và MAE được tính toán lần lượt theo công thức (5) và (6), với giá trị thực nghiệm $E_{c,i}^{exp}$ và giá trị tính toán $E_{c,i}^{cal}$ thứ i cho bộ số liệu có n mẫu.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{c,i}^{exp} - E_{c,i}^{cal})^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_{c,i}^{exp} - E_{c,i}^{cal}| \quad (6)$$

Kết quả RMSE và MAE được trình bày chi tiết trong Bảng 1, cho thấy công thức đề xuất trong nghiên cứu này có sai số dự báo nhỏ hơn so với một số nghiên cứu trước đây [18–21] và tiêu chuẩn EC2 [26]. Kết quả sai số này phản ánh sự phù hợp tốt hơn giữa giá trị tính toán và thực nghiệm đối với bộ số liệu sử dụng trong nghiên cứu này.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã trình bày các kết quả phân tích dựa trên một bộ số liệu được tổng hợp từ các nghiên cứu thực nghiệm đã công bố, nhằm đánh giá ảnh hưởng đồng thời của CLLTC (hàm lượng và chất lượng) và tỷ lệ N/X trong cấp phối đến cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của BTCLTC. Bộ số liệu này đại diện cho 147 mẫu thí nghiệm, với hàm lượng CLLTC thay thế cho CLLTN từ 0 đến 100% và tỷ lệ N/X thay đổi từ 0,3 đến 0,9 thường được sử dụng trong sản xuất bê tông. Các kết luận chính của nghiên cứu, bao gồm:

- Tỷ lệ N/X và hàm lượng CLLTC ảnh hưởng đáng kể đến cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của BTCLTC. Mô hình hàm số mũ phù hợp để đánh giá mối quan hệ giữa tỷ lệ N/X và cường độ chịu nén, trong khi mô đun đàn hồi có quan hệ tuyến tính với tỷ lệ N/X . Kết quả cho thấy bê tông đạt cường độ và mô đun đàn hồi cao nhất khi tỷ lệ N/X thấp (0,3–0,4) và hàm lượng CLLTC nhỏ hơn 50%. Mặt phẳng biểu diễn mối quan hệ giữa r , N/X và mô đun đàn hồi có độ mịn cao hơn so với mặt phẳng của r , N/X và cường độ chịu nén.

- Khi $r = 100\%$, các mô hình hồi quy giữa tỷ lệ N/X và f_c hoặc giữa N/X và E_c không còn đúng nữa. Các tính chất cơ học của bê tông kém hơn so với dự báo. Điều này là hoàn toàn phù hợp, khi tính chất cơ lý của CLLTC kém đồng nhất hơn CLLTN. Do đó, BTCLTC sử dụng 100% CLLTC chỉ được khuyến dùng cho kết cấu không chịu lực.

- Bên cạnh đó, dựa trên tiêu chuẩn EC2, nghiên cứu này đã đề xuất hai công thức dự báo mô đun đàn hồi dựa trên cường độ chịu nén của BTCLTC có tính đến ảnh hưởng đồng thời của CLLTC (hàm lượng r thay đổi từ 0 đến 100%, chất lượng được phân loại phù hợp với TCVN 11969:2018) và tỷ lệ N/X . Các công thức này được đề xuất nhằm phù hợp với CLLTC và BTCLTC sản xuất tại Việt Nam.

Tuy nhiên, bộ số liệu sử dụng thu thập từ các nghiên cứu công bố đến năm 2017, không bao gồm các số liệu của bê tông cốt liệu tái chế ở Việt Nam, là một hạn chế của nghiên cứu này. Do đó, bộ số liệu có thể được bổ sung và cập nhật liên tục, để xác minh lại độ tin cậy của các công thức đề xuất trong nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Concrete needs to lose its colossal carbon footprint. *Nature*, 597(2021):593–594.
- [2] Xiao, J.-Z., Li, J.-B., Zhang, C. (2006). On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview. *Materials and Structures*, 39(6):655–664.
- [3] Ngo, S.-H., Nguyen, N.-T., Nguyen, X.-H. (2022). Assessing the Effect of GGBFS Content on Mechanical and Durability Properties of High-Strength Mortars. *Civil Engineering Journal*, 8(5):938–950.
- [4] Lâm, N. T., Kiên, T. T., Đại, B. D. (2021). Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng lớn tro bay của nhà máy nhiệt điện Quảng Ninh. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15(6V):1–11.
- [5] Ibrahim, Y. E.-H. (2019). Durability and structural performance of recycled aggregate concrete: A review. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 10(3):135.
- [6] Prajapati, R., Amadi, I., Kosuri, M., Kahabi, N., Ram V, G., Basavaraj, A. S., Dhandapani, Y., Kanjee, J., Selvam, M., Santhanam, M., Alexander, M., Ballim, Y., Gettu, R., Beushausen, H. (2023). Recycled concrete aggregates and their influence on concrete properties.
- [7] Quang, N. T., Cuong, T. V., Tan, N. N., Tan, N. H., Kawamoto, K., Giang, N. H. (2022). Experimental studies on behaviors of reinforced concrete column structures made of recycled aggregates under concentric loads. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 16(2):1–11.
- [8] Nghiem, H. T., Cuong, T. V., Tân, N. N., Minh, P. Q., Dung, N. T., Kawamoto, K. (2024). An empirical study of the behavior of recycled aggregate concrete beams from CDW in Hanoi, Vietnam. *International Journal of GEOMATE*, 26(118):122–132.
- [9] Hiền, N. X., Minh, P. Q., Tân, N. N. (2024). Tầm bê tông cốt liệu tái chế trên nền cát: Từ thiết kế đến ứng dụng. *Tạp chí Xây dựng*, (10):194–194.
- [10] Al Ajmani, H., Suleiman, F., Abuzayed, I., Tamimi, A. (2019). Evaluation of concrete strength made with recycled aggregate. *Buildings*, 9(3):56.
- [11] Ali, B., Qureshi, L. A., Shah, S. H. A., Rehman, S. U., Hussain, I., Iqbal, M. (2020). A step towards durable, ductile and sustainable concrete: Simultaneous incorporation of recycled aggregates, glass fiber and fly ash. *Construction and Building Materials*, 251:118980.
- [12] Babalola, O. E., Awoyera, P. O., Tran, M. T., Le, D.-H., Olalusi, O. B., Vilorio, A., Ovallos-Gazabon, D. (2020). Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete with ternary binder system and optimized mix proportion. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3):6521–6532.

- [13] Çakır, Ö. (2014). [Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate \(RCA\) concrete with mineral additives](#). *Construction and Building Materials*, 68:17–25.
- [14] Thomas, C., Setián, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., Sánchez de Juan, M. (2013). [Durability of recycled aggregate concrete](#). *Construction and Building Materials*, 40:1054–1065.
- [15] Sosa, M. E., Villagrán Zaccardi, Y. A., Zega, C. J. (2021). [A critical review of the resulting effective water-to-cement ratio of fine recycled aggregate concrete](#). *Construction and Building Materials*, 313: 125536.
- [16] Quang, N. T., Cường, T. V., Tân, N. N., Tân, N. H., Giang, N. H. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của tỷ lệ sử dụng cốt liệu lớn tái chế đến sự phát triển cường độ nén và mô đun đàn hồi của bê tông theo thời gian](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 15(1V):48–59.
- [17] Hiền, N. X., Minh, P. Q., Tân, N. N. (2024). Nghiên cứu cường độ nén và mô đun đàn hồi của bê tông cốt liệu tái chế sử dụng bê tông phá dỡ và xi lò cao nghiền mịn. *Tạp chí Xây dựng*, 07:156–160.
- [18] Tavakoli, M., Soroushian, P. (1996). [Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate](#). *ACI Materials Journal*, 93(2):182–190.
- [19] Dillmann, R. (1998). Concrete with recycled concrete aggregate. *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, 239–253.
- [20] Kheder, G. F., Al-Windawi, S. A. (2005). [Variation in mechanical properties of natural and recycled aggregate concrete as related to the strength of their binding mortar](#). *Materials and Structures*, 38(7): 701–709.
- [21] Hoffmann, C., Schubert, S., Leemann, A., Motavalli, M. (2012). [Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material](#). *Construction and Building Materials*, 35:701–709.
- [22] Nguyen, X. H., Phan, Q. M., Nguyen, N. T., Tran, V. Q. (2023). [Interpretable machine learning model for evaluating mechanical properties of concrete made with recycled concrete aggregate](#). *Structural Concrete*, 25(4):2890–2914.
- [23] Gholampour, A., Gandomi, A. H., Ozbakkaloglu, T. (2017). [New formulations for mechanical properties of recycled aggregate concrete using gene expression programming](#). *Construction and Building Materials*, 130:122–145.
- [24] TCVN 11969:2018 (2018). *Cốt liệu lớn tái chế cho bê tông*.
- [25] Marsh, B. (1988). *Design of normal concrete mixes*. London, UK.
- [26] EN 1992 (2023). *Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*. Brussels, Belgium.
- [27] Thomas, C., Sosa, I., Setián, J., Polanco, J. A., Cimentada, A. I. (2014). [Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete](#). *Journal of Cleaner Production*, 65:397–405.
- [28] Kang, T. H.-K., Kim, W., Kwak, Y.-K., Hong, S.-G. (2014). [Flexural testing of reinforced concrete beams with recycled concrete aggregates](#). *ACI Structural Journal*, 111(3):607–616.

A. Phụ lục

Bảng A.1. Bộ số liệu sử dụng trong nghiên cứu

STT	N/X	r (%)	Loại CLLTC ¹	f_c (MPa)	E (GPa)	STT	N/X	r (%)	Loại CLLTC ¹	f_c (MPa)	E (GPa)
1	0,80	0	-	17,3	18,90	13	0,53	0	-	40,1	28,10
2	0,70	0	-	18,1	27,10	14	0,42	0	-	38,6	29,20
3	0,67	0	-	23,6	22,80	15	0,48	0	-	38,9	32,09
4	0,58	0	-	28,8	24,80	16	0,55	0	-	40,9	29,30
5	0,52	0	-	29,9	31,10	17	0,50	0	-	39,5	31,72
6	0,65	0	-	30,4	27,88	18	0,48	0	-	41,3	31,40
7	0,65	0	-	31,9	29,57	19	0,52	0	-	41,8	32,80
8	0,64	0	-	33,0	24,77	20	0,46	0	-	42,2	29,00
9	0,50	0	-	36,5	31,67	21	0,50	0	-	42,8	32,15
10	0,60	0	-	36,6	28,57	22	0,51	0	-	43,4	35,55
11	0,55	0	-	36,7	31,26	23	0,45	0	-	44,4	34,50
12	0,35	0	-	37,5	33,10	24	0,50	0	-	44,8	33,88

STT	N/X	r (%)	Loại CLLTC ¹	f_c (MPa)	E (GPa)	STT	N/X	r (%)	Loại CLLTC ¹	f_c (MPa)	E (GPa)
25	0,60	0	-	47,8	34,20	87	0,39	37	Loại II	31,7	26,5
26	0,34	0	-	48,4	39,90	88	0,48	37	Loại II	41,9	30,6
27	0,55	0	-	48,6	30,30	89	0,48	37	Loại II	44,7	26,9
28	0,47	0	-	48,6	31,30	90	0,50	50	Loại II	30,4	25,9
29	0,50	0	-	54,1	31,10	91	0,50	50	Loại II	38,0	30,5
30	0,38	0	-	54,1	34,50	92	0,51	50	Loại II	40,5	28,2
31	0,53	0	-	57,3	34,90	93	0,49	50	Loại II	41,2	27,9
32	0,51	0	-	60,1	36,30	94	0,50	50	Loại II	41,3	31,2
33	0,34	0	-	61,9	35,38	95	0,57	50	Loại II	45,2	32,3
34	0,46	0	-	62,0	37,40	96	0,57	50	Loại II	47,5	30,5
35	0,67	0	-	62,0	34,90	97	0,54	50	Loại II	48,9	33,4
36	0,45	0	-	66,8	32,21	98	0,53	50	Loại II	51,5	32,7
37	0,52	0	-	41,8	32,60	99	0,44	50	Loại II	61,2	32,9
38	0,45	0	-	44,4	34,30	100	0,44	50	Loại II	63,5	34,0
39	0,42	0	-	38,6	29,10	101	0,67	50	Loại II	63,5	30,1
40	0,40	0	-	72,3	33,47	102	0,36	52	Loại II	29,0	25,3
41	0,42	0	-	72,9	38,70	103	0,48	64	Loại II	45,6	24,9
42	0,66	20	Loại I	31,7	28,2	104	0,59	100	Loại II	13,4	13,8
43	0,51	20	Loại I	43,7	32,6	105	0,48	100	Loại II	13,9	14,1
44	0,55	20	Loại I	45,3	28,7	106	0,67	100	Loại II	15,4	22,6
45	0,50	20	Loại I	51,7	29,6	107	0,59	100	Loại II	16,1	15,1
46	0,51	20	Loại I	50,7	28,6	108	0,67	100	Loại II	18,0	23,4
47	0,46	20	Loại I	61,4	31,4	109	0,49	100	Loại II	18,0	16,2
48	0,65	20	Loại I	32,7	28,8	110	0,40	100	Loại II	18,8	15,3
49	0,45	20	Loại I	62,4	30,4	111	0,35	100	Loại II	21,6	17,2
50	0,40	20	Loại I	69,6	31,4	112	0,49	100	Loại II	21,6	16,5
51	0,50	30	Loại I	33,6	28,6	113	0,43	100	Loại II	23,3	17,1
52	0,68	50	Loại I	32,4	26,4	114	0,43	100	Loại II	26,5	19,3
53	0,53	50	Loại I	37,5	28,8	115	0,77	100	Loại II	27,5	24,9
54	0,52	50	Loại I	38,9	29,8	116	0,28	100	Loại II	28,0	21,5
55	0,55	50	Loại I	42,5	26,4	117	0,34	100	Loại II	28,4	21,6
56	0,50	50	Loại I	47,1	27,5	118	0,50	100	Loại II	29,5	23,7
57	0,55	50	Loại I	42,3	26,4	119	0,70	100	Loại II	29,9	24,4
58	0,45	50	Loại I	56,8	28,5	120	0,34	100	Loại II	31,3	22,9
59	0,40	50	Loại I	65,3	29,2	121	0,28	100	Loại II	32,9	24,3
60	0,50	60	Loại I	30,4	24,5	122	0,23	100	Loại II	33,2	23,5
61	0,65	100	Loại I	24,8	18,5	123	0,60	100	Loại II	33,6	24,8
62	0,50	100	Loại I	29,1	20,8	124	0,36	100	Loại II	35,7	28,3
63	0,68	100	Loại I	30,1	24,3	125	0,50	100	Loại II	36,0	29,2
64	0,55	100	Loại I	33,3	26,5	126	0,35	100	Loại II	36,4	28,8
65	0,55	100	Loại I	38,1	24,2	127	0,39	100	Loại II	38,1	27,4
66	0,48	100	Loại I	38,6	29,9	128	0,28	100	Loại II	38,3	26,3
67	0,56	100	Loại I	40,5	24,0	129	0,29	100	Loại II	39,3	27,8
68	0,45	100	Loại I	41,0	26,0	130	0,47	100	Loại II	38,0	26,7
69	0,50	100	Loại I	43,4	25,7	131	0,45	100	Loại II	39,2	25,1
70	0,45	100	Loại I	52,1	26,6	132	0,47	100	Loại II	40,3	27,2
71	0,40	100	Loại I	58,5	27,9	133	0,52	100	Loại II	41,1	26,5
72	0,31	100	Loại I	60,1	30,3	134	0,45	100	Loại II	40,8	25,7
73	0,40	16	Loại II	32,7	29,2	135	0,50	100	Loại II	41,8	31,6
74	0,50	20	Loại II	42,7	31,2	136	0,58	100	Loại II	43,1	31,5
75	0,59	20	Loại II	49,3	32,3	137	0,34	100	Loại II	43,8	32,7
76	0,53	20	Loại II	54,9	33,8	138	0,34	100	Loại II	44,4	34,2
77	0,52	20	Loại II	56,5	35,5	139	0,62	100	Loại II	45,7	29,1
78	0,43	20	Loại II	67,3	36,9	140	0,47	100	Loại II	48,1	30,7
79	0,45	20	Loại II	64,8	36,1	141	0,52	100	Loại II	50,3	30,2
80	0,68	20	Loại II	64,8	32,2	142	0,54	100	Loại II	53,7	30,1
81	0,42	20	Loại II	67,4	35,9	143	0,49	100	Loại II	53,7	28,4
82	0,49	25	Loại II	32,6	32,1	144	0,27	100	Loại II	60,2	29,1
83	0,53	25	Loại II	41,0	29,0	145	0,19	100	Loại II	62,8	28,5
84	0,48	27	Loại II	51,4	30,3	146	0,42	100	Loại II	65,1	31,4
85	0,50	30	Loại II	32,6	28,4	147	0,70	100	Loại II	65,1	26,8
86	0,50	30	Loại II	36,7	30,4						

¹Loại I, II của CLLTC được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 11969:2018 [24].