

Đánh giá hiệu quả kinh tế và môi trường của bê tông tự lèn sử dụng cốt liệu lớn tái chế và tro bay hàm lượng cao

Nguyễn Hùng Cường^{1*}, Nguyễn Nhật Hùng², Nguyễn Ngọc Toàn¹, Nguyễn Hoàng Minh³, Đỗ Xuân Cường¹, Đặng Hoàng Anh¹, Trần Quỳnh Trang¹, Nguyễn Nam Sơn¹

¹Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

²Bệnh viện Quân y 175

³Trường Đại học RMIT Việt Nam

TỪ KHOÁ

Bê tông tự lèn
Tính công tác
Tro bay hàm lượng cao
Cường độ nén bê tông
Cốt liệu lớn tái chế
Hiệu quả kinh tế

TÓM TẮT

Hoạt động thi công xây dựng công trình tạo ra một lượng lớn chất thải rắn khó phân hủy, đồng thời tiêu thụ đáng kể cốt liệu tự nhiên và phát thải nhiều khí CO₂ vào môi trường. Trước bối cảnh phát triển hạ tầng đô thị nhanh chóng tại Việt Nam, việc nghiên cứu và ứng dụng các vật liệu xây dựng bền vững nhằm tiết kiệm tài nguyên, giảm chi phí cũng như bảo vệ môi trường ngày càng được chú trọng. Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả kinh tế và môi trường của bê tông tự lèn (BTTL) sử dụng cốt liệu lớn tái chế (RCA) và tro bay hàm lượng cao trong điều kiện Việt Nam. Kết quả đánh giá cho thấy BTTL sử dụng 100% RCA và 50% tro bay theo khối lượng bột (xi măng + tro bay) có thể sản xuất BTTL có chi phí thấp hơn khoảng 3,44% so với bê tông truyền thống cùng mác (BT300). Đồng thời, phương án này giúp giảm lượng phát thải CO₂ vào môi trường khoảng 21,3 %. Như vậy, BTTL sử dụng cốt liệu lớn tái chế và tro bay hàm lượng cao là một giải pháp khả thi, không chỉ tối ưu chi phí xây dựng mà còn giảm đáng kể phát thải CO₂ và khai thác tài nguyên, góp phần thúc đẩy phát triển bền vững.

KEYWORDS

Self-compacting concrete
Workability
High-volume fly ash
Compressive strength
Recycled coarse aggregate
Economic efficiency

ABSTRACT

Construction activities generate a large amount of non-biodegradable solid waste, while also consuming a significant volume of natural aggregates and emitting a considerable amount of CO₂ into the environment. In the context of rapid urban infrastructure development in Vietnam, the research and application of sustainable construction materials-aimed at conserving resources, reducing costs, and protecting the environment-are receiving increasing attention. This study evaluates the economic and environmental efficiency of self-compacting concrete (SCC) using recycled coarse aggregates (RCA) and high-volume fly ash under Vietnamese conditions. The evaluation results show that SCC incorporating 100% RCA and 50% fly ash by binder weight (cement + fly ash) can achieve a material cost approximately 3.44% lower than that of conventional concrete of the same grade (BT300). At the same time, this solution helps reduce CO₂ emissions into the environment by around 21.3%. Thus, SCC using recycled coarse aggregates and high-volume fly ash is a feasible solution that not only optimizes construction costs but also significantly reduces CO₂ emissions and the exploitation of natural resources, contributing to the promotion of sustainable development.

1. Mở đầu

Hoạt động thi công xây dựng đã thải ra môi trường một lượng lớn chất thải rắn xây dựng (CTRXD) khó phân hủy. Theo các nghiên cứu trên thế giới, lượng CTRXD phát sinh ước tính khoảng 485 triệu tấn tại Hoa Kỳ, 870 triệu tấn tại Châu Âu và lên đến 1.500 triệu tấn tại Trung Quốc [1]. Tại Việt Nam, theo số liệu thống kê tại địa bàn thành phố Hà Nội, năm 2021 khối lượng CTRXD đạt khoảng 4.186 tấn/ngày đêm và dự kiến sẽ tăng lên 9.431 tấn/ngày đêm vào năm 2025. Tuy nhiên, lượng chất thải được xử lý hiện nay chỉ vào khoảng 1.350

tấn/ngày đêm [2]. Phần CTRXD chưa qua xử lý đang gây ra những tác động tiêu cực nghiêm trọng đối với môi trường tự nhiên. Trong khi đó, một số nghiên cứu cho thấy có tới 90 % CTRXD hiện đang bị chôn lấp có thể được tái sử dụng [1]. Do đó, việc nghiên cứu, tái chế và ứng dụng CTRXD trong lĩnh vực xây dựng là hết sức cần thiết và cấp bách.

Cốt liệu lớn bê tông tái chế (RCA) được tạo ra từ các phế phẩm hoặc cấu trúc bê tông cũ được xử lý và tái sử dụng lại để sản xuất bê tông mới. Sử dụng RCA trong chế tạo bê tông không chỉ giảm được CTRXD và tiết kiệm tài nguyên tự nhiên mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc bảo vệ môi trường [3]. Trong khi đó, tro bay là phụ phẩm từ

*Liên hệ tác giả: cuongnh@huce.edu.vn

Nhận ngày 08/09/2025, sửa xong ngày 15/10/2025, chấp nhận đăng ngày 16/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2025.1049>

ngành sản xuất nhiệt điện. Các nghiên cứu cho thấy sử dụng tro bay hàm lượng cao giảm đáng kể chi phí sản xuất bê tông. Bên cạnh đó, việc sử dụng tro bay hàm lượng cao giúp giảm lượng xi măng sử dụng sản xuất bê tông một cách đáng kể, từ đó góp phần giảm lượng khí thải carbon ra môi trường [4].

Bê tông tự lèn (BTTL) là loại bê tông có độ chảy loãng cao, không bị phân tầng, có thể tự chảy và làm đầy ván khuôn kể cả khu vực có cốt thép dày đặc mà không cần đến sự tác động ngoại lực bên ngoài. Do BTTL phải sử dụng hàm lượng bột và phụ gia hóa học cao nên chi phí vật liệu và kiểm soát chất lượng của BTTL vẫn cao hơn so với bê tông truyền thống [5]. Do đó, việc nghiên cứu giải pháp kết hợp cốt liệu tái chế và tro bay hàm lượng cao trong sản xuất BTTL là cần thiết nhằm giảm chi phí xây dựng, tiết kiệm tài nguyên tự nhiên và góp phần bảo vệ môi trường. Trên thế giới đã có một số nghiên cứu liên quan đến sử dụng RCA trong chế tạo BTTL, cụ thể như:

- Nghiên cứu của tác giả Panda [6] cho thấy cường độ nén, uốn, kéo đứt của BTTL giảm khi tăng hàm lượng RCA. Ngoài ra, các giá trị cường độ uốn thu được từ thực nghiệm có giá trị nhỏ hơn tính toán lý thuyết.

- Nghiên cứu của tác giả Tang [7], việc sử dụng RCA từ 25-50 % không ảnh hưởng tiêu cực đến tính công tác và cường độ nén của bê tông, ngoại trừ việc có thể làm giảm nhẹ mô đun đàn hồi.

- Nghiên cứu của Rizwan [8] đã chỉ ra độ nhớt của hỗn hợp BTTL tăng lên khi tăng hàm lượng RCA thay thế cốt liệu lớn tự nhiên, dẫn đến giảm độ chảy loãng. Cường độ nén của BTTL giảm 30 %, cường độ uốn giảm 15 % khi thay thế RCA với hàm lượng 100 %. Ngoài ra, độ co ngót của BTTL ở tuổi sớm tăng lên tương ứng với lượng tăng hàm lượng thay thế RCA.

- Tác giả Yu [9] đã nghiên cứu cường độ uốn của BTTL bằng thí nghiệm uốn bốn điểm, kết quả cho thấy dạng phá hoại, đường cong ứng suất - biến dạng và khả năng chịu uốn của các mẫu là tương đối tương đồng. Tuy nhiên, momen nứt và bề rộng vết nứt của các mẫu BTTL sử dụng RCA nhỏ hơn các mẫu sử dụng cốt liệu tự nhiên.

- Tác giả Ahmed [10] chỉ ra rằng có thể sử dụng 100 % RCA để sản xuất BTTL mà chỉ gây ảnh hưởng tối thiểu đến các đặc tính của bê tông. Hỗn hợp BTTL chứa 100 % RCA, 20 % metakaolin và 22 % tro bay được xác định là phương án tối ưu, đáp ứng các yêu cầu về tính công tác theo EFNARC. Việc thay thế hoàn toàn RCA chỉ làm giảm cường độ nén 8,2 % so với mẫu đối chứng.

- Nghiên cứu của Lekshmy [11] cho thấy việc kết hợp cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ tái chế làm giảm khoảng 27 % cường độ nén của BTTL. Sự hiện diện của RCA gây ảnh hưởng bất lợi đến độ bền, đồng thời làm tăng khả năng hấp thụ nước và diện tích truyền qua BTTL khi tỷ lệ RCA gia tăng.

Có thể nhận thấy rằng các nghiên cứu về việc sử dụng RCA trong chế tạo BTTL chủ yếu tập trung đánh giá các đặc tính như tính công tác, cơ lý và độ bền lâu của bê tông. Trong khi đó, các nghiên cứu định lượng hiệu quả kinh tế và môi trường của việc ứng dụng RCA trong điều kiện Việt Nam còn rất hạn chế. Trong bài báo này, tác giả thực hiện nghiên cứu ban đầu nhằm đánh giá hiệu quả kinh tế và môi trường

của BTTL sử dụng cốt liệu lớn tái chế kết hợp với tro bay hàm lượng cao. Các thông số cấp phối và cường độ nén của BTTL được tham khảo từ nghiên cứu [12], trong khi dữ liệu vật liệu phục vụ tính toán được thu thập tại phường Đông Anh, thành phố Hà Nội, với khoảng cách vận chuyển dự kiến 26 km.

2. Vật liệu và cấp phối sử dụng trong đánh giá

Sử dụng vật liệu và cấp phối trong kết quả nghiên cứu [12] để đánh giá hiệu quả kinh tế. Các cấp phối BTTL gồm hàm lượng cốt liệu tái chế 0 % (RCA0) và 100 % (RCA100), tỷ lệ tro bay/bột (TB/B) = 0,5 và tỷ lệ nước/bột (N/B) = 0,38. Thành phần cấp phối cho 1m³ BTTL và cường độ nén của bê tông được thể hiện chi tiết trong bảng 1. Kết quả kiểm tra tính công tác của hỗn hợp BTTL thể hiện ở bảng 2.

Vật liệu sử dụng trong thí nghiệm theo kết quả nghiên cứu [12] bao gồm: Xi măng Vicem Bút Sơn PCB40; Cát vàng, sàng bỏ các hạt có đường kính trên 5mm; Cốt liệu lớn có D_{max} = 20 mm, là đá nghiền, khối lượng riêng 2,630 g/cm³; RCA có D_{max} = 2 cm, khối lượng riêng 2,41 g/cm³; Tro bay: sử dụng tro bay nhiệt điện Phả Lại, tro bay loại F theo tiêu chuẩn ASTM C618; Phụ gia siêu dẻo (SD): sử dụng phụ gia siêu dẻo thế hệ mới loại BiFi-HV298, gốc Polymer cải tiến, có tỷ trọng 1,05 phù hợp tiêu chuẩn ASTM C-494 loại G; Phụ gia biến tính độ nhớt (VMA) sử dụng loại CuLminal loại MHPC400.

RCA trong nghiên cứu được chế tạo bằng cách sử dụng phế thải bê tông thu được từ phá dỡ công trình trên địa bàn thành phố Hà Nội. Sau đó, được tiến hành nghiền tại trạm nghiền phường Đông Anh, Hà Nội. Cốt liệu lớn tái chế có các chỉ tiêu phù hợp với TCVN 11969:2018 [13]. Hình 1 thể hiện RFA được nghiền từ phế thải bê tông.

3. Đánh giá hiệu quả kinh tế và môi trường của BTTL sử dụng cốt liệu lớn tái chế chế và hàm lượng tro bay cao

Hiệu quả kinh tế của BTTL sử dụng RCA và tro bay hàm lượng cao được đánh giá qua chi phí vật liệu sản xuất BTTL. Tác giả tiến hành tính toán chi phí sản xuất BTTL các cấp phối RCA0, RCA100 và bê tông truyền thống có cường độ nén M300 (BT300). Định mức cấp phối vật liệu cho bê tông BT300 (mã hiệu 11.12524) tra theo ĐM 12/2021 [14] của Bộ Xây dựng (bảng 3). Giá vật tư được lấy theo công bố giá tháng 6 năm 2025 trên địa bàn xã Đông Anh, Hà Nội (Thông báo giá 01.02/2025/CBGVL-SXD ngày 15/6/2025 của Sở Xây dựng Hà Nội) và tham khảo giá vật tư trên thị trường tại thời điểm tính toán gồm: xi măng PCB40: 1.250.000 đồng/tấn, cát vàng: 637.000 đồng/m³, đá 1x2: 358.000 đồng/m³, tro bay: 270.000 đồng/tấn, phụ gia siêu dẻo: 25.000 đồng/lít, VMA: 100.000 đồng/kg. Chi phí sản xuất RCA bao gồm chi phí bốc xếp, vận chuyển, phân loại phế thải và nghiền. Tính toán chi phí sản xuất RCA được vận dụng theo hướng dẫn [15], kết quả có giá trị khoảng 318.438 đồng/m³. Bảng 4 thể hiện chi phí vật liệu trước thuế sản xuất BTTL và bê tông truyền thống. Bảng 5 thể hiện chi phí trước thuế sản xuất RCA.

Kết quả tính toán cho thấy chi phí vật liệu sản xuất bê tông của các cấp phối RCA0, RCA100, BT300 lần lượt là 1.060.631 đồng/m³, 1.086.850 đồng/m³ và 1.125.537 đồng/m³. Khi sử dụng RCA với cự ly vận chuyển 26 km, chi phí sản xuất BTTL của cấp phối RCA100 chỉ tăng khoảng 2,47 % so với RCA0. Nguyên nhân là do lượng phụ gia siêu dẻo cần thiết để duy trì tính công tác của hỗn hợp bê tông tăng lên khi thay thế cốt liệu lớn tự nhiên bằng RCA. Tuy nhiên, so với bê tông truyền

thống có cường độ nén tương đương (BT300), chi phí vật liệu của cấp phối RCA100 giảm khoảng 3,44 %. Sự giảm này chủ yếu xuất phát từ chi phí sản xuất RCA thấp hơn khoảng 11 % so với đá 1 × 2. Ngoài ra, giá thành tro bay thấp hơn khoảng 78,4 % so với xi măng, do đó việc sử dụng tro bay hàm lượng cao góp phần đáng kể vào việc giảm chi phí sản xuất BTTL so với bê tông truyền thống cùng cấp cường độ nén.

Bảng 1. Thành phần cấp phối cho 1m³ BTTL [12].

Ký hiệu	XM PC40 (kg)	Tro bay (kg)	Cát (kg)	Đá (kg)	RCA (kg)	Nước (kg)	SD (kg)	VMA (kg)	Cường độ nén (MPa)
RCA 0	282,4	282,4	748,8	770	0	214,6	2,86	0,21	30,93
RCA 100	282,4	282,4	748,8	0	770	214,6	4,70	0,21	29,50

Bảng 2. Tính công tác của BTTL theo [12].

Ký hiệu	SF (mm)	T500 (s)	Vfunnel (s)	Lbox	Jring (mm)	Sr (%)
RCA0	720	3,10	9,5	0,91	8,6	8,7
RCA100	700	4,80	11,5	0,82	9,8	6,9



(a) Hoạt động phân loại chất thải rắn tại Hà Nội



(b) RCA

Hình 1. Cốt liệu lớn được nghiền từ phế thải bê tông.

Bảng 3. Định mức cấp phối vật liệu bê tông truyền thống BT300 [14].

Mã hiệu	Xi măng (kg)	Đá (m ³)	Cát (m ³)	Nước (lít)	Siêu dẻo (kg)
11.12524	370	0,783	0,48	200	2,96

Bảng 4. Chi phí vật liệu của BTTL và bê tông truyền thống (đơn vị: đồng/m³).

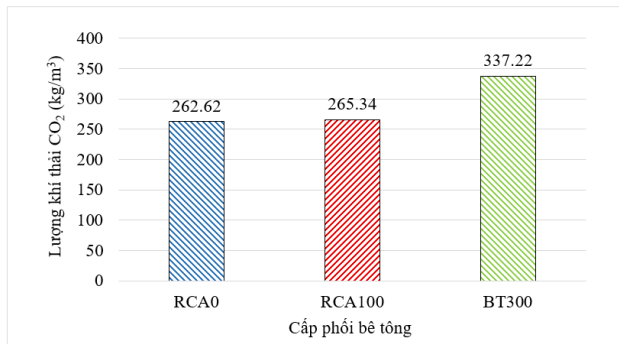
Cấp phối	Xi măng	Tro bay	Đá/RCA	Cát	Siêu dẻo	VMA	Nước	Tổng
RCA0	353.000	76.248	179.000	340.704	71.500	37.000	3.179	1.060.631
RCA100	353.000	76.248	159.219	340.704	117.500	37.000	3.179	1.086.850
BT300	462.500	0	280.314	305.760	74.000	0	2.963	1.125.537

Bảng 5. Chi phí trước thuế sản xuất RCA.

TT	Thành phần hao phí	Đơn vị	Định mức	Đơn giá	Thành tiền
1	Máy nghiền $125m^3/h$	ca	0,0019	8.356.914	15.878
2	Chi phí xúc lên phương tiện vận chuyển	m^3	1	33.810	33.810
3	Chi phí vận chuyển (tạm tính 26km)	m^3	1	251.993	251.993
4	Nhân công 3/7	công	0,01196	267.026	3.194
5	Máy đào $1,25m^3$	ca	0,00328	3.802.802	12.473
6	Máy ủi 110CV	ca	0,00057	1.912.099	1.090
	Tổng cộng	đồng/ m^3			318.438

Hiệu quả môi trường của việc áp dụng BTTL sử dụng RCA và tro bay hàm lượng cao được đánh giá thông qua lượng phát thải CO_2 ra môi trường trong quá trình sản xuất. Trong nghiên cứu này, định mức phát thải khí thải CO_2 trên 1 kg vật liệu được sử dụng như sau: xi măng 0,885 kg, tro bay $1,96 \times 10^{-2}$ kg, cát $2,34 \times 10^{-3}$ kg, đá $5,71 \times 10^{-3}$ kg, siêu dẻo 0,34 kg, nước $1,96 \times 10^{-4}$ kg [16]. Cốt liệu lớn tái chế từ phế thải bê tông (RCA) 0,00843 kg [17].

Theo kết quả tính toán ở hình 2 cho thấy lượng khí thải CO_2 phát sinh khi sản xuất 1 m^3 bê tông đối với các cấp phối RCA0, RCA100 và BT300 lần lượt là 262,62 kg, 265,34 kg và 337,22 kg. So với cấp phối RCA0, lượng khí thải CO_2 của cấp phối RCA100 tăng không đáng kể, khoảng 1,03 %. Tuy nhiên, so với bê tông truyền thống BT300, lượng khí thải CO_2 của cấp phối RCA100 giảm khoảng 21,3 %. Nguyên nhân chủ yếu là do lượng phát thải CO_2 của xi măng cao hơn rất nhiều so với tro bay. Vì vậy, việc sử dụng hàm lượng tro bay cao trong chế tạo BTTL đã góp phần đáng kể vào việc giảm lượng khí thải CO_2 ra môi trường.



Hình 2. Khí thải CO_2 phát sinh trong quá trình sản xuất bê tông.

4. Kết luận

Tại Việt Nam, việc nghiên cứu và ứng dụng BTTL sử dụng cốt liệu lớn tái chế và tro bay hàm lượng cao vẫn còn hạn chế. Kết quả nghiên cứu ban đầu cho thấy BTTL sử dụng 100 % RCA kết hợp hàm lượng tro bay cao mang lại hiệu quả kinh tế và môi trường đáng kể:

- Chi phí vật liệu sản xuất BTTL khoảng 1.086.850 đồng/ m^3 , cao hơn khoảng 2,47 % so với BTTL sử dụng đá tự nhiên. Tuy nhiên, so với bê tông truyền thống có cùng mác (M300), chi phí này giảm khoảng 3,44 %.

- Lượng phát thải CO_2 khi sản xuất 1 m^3 BTTL khoảng 265,34 kg, tăng nhẹ 1,03 % so với BTTL sử dụng đá tự nhiên nhưng giảm tới 21,3 % so với bê tông truyền thống có cường độ nén tương đương.

Việc áp dụng giải pháp BTTL sử dụng cốt liệu lớn tái chế và tro bay hàm lượng cao trong các công trình không chỉ góp phần giảm giá thành xây dựng mà còn mang lại lợi ích đáng kể trong bảo vệ môi trường và tiết kiệm tài nguyên thiên nhiên.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Hiền, Trần Thu, and Thu Hien Tran, "Tổng quan: Tái chế chất thải rắn xây dựng thành cốt liệu," *tạp chí Khoa học & Công nghệ đại học Duy Tân*, 2020.
- [2]. Hanh V.K, Huyen N.T, "Nghiên cứu quản lý chất thải rắn xây dựng tại Hà Nội theo định hướng kinh tế tuần hoàn," *Tạp chí Môi Trường*, 1, 3-7, 2022.
- [3]. Marinković, S., Josa, I., Braymand, S., & Tošić, N., "Sustainability assessment of recycled aggregate concrete structures: a critical view on the current state-of-knowledge and practice," *Structural Concrete*, 24, 2, 1956-1979, 2023. DOI:10.1002/suco.202201254.
- [4]. Hung, Cuong Nguyen, "High-volume fly ash self-compacting concrete for coastal constructions: A sustainable development solution," *Journal Of Materials & Construction*, 14, 01, 18- 23, 2024. DOI: 10.54772/jomc.v14i01.704.
- [5]. M. Tuyan, A. Mardani-Aghabaglou, and K. Ramyar, "Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate," *Materials and Design*, 53, 983–991, 2014. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.100.
- [6]. Panda, K. C., & Bal, P. K., "Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate," *Procedia Engineering*, 51, 159-164, 2013. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.01.023.
- [7]. Tang, W. C., Ryan, P. C., Cui, H. Z., & Liao, W., "Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate," *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 1-11, 2016. DOI: 10.1155/2016/2761294.
- [8]. Rizwan, S. A., Irfan-ul-Hassan, M., Rahim, A., Ali, S., Sultan, A., Syamsunur, D., & Md Yusoff, N. I., "Recycled Coarse Aggregate for Sustainable Self-Compacting Concrete and Mortar," *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 2022. DOI: 10.1155/2022/4566531.
- [9]. Yu, F., Wang, M., Yao, D., & Yang, W., "Study on flexural behavior of self-compacting concrete beams with recycled aggregates," *Buildings*, 12, 7, 881, 2022. DOI: 10.3390/buildings12070881.
- [10]. Ahmed, S., El-Zohairy, A., Eisa, A. S., Mohamed, M. A. E. A. B., & Abdo, A., "Experimental Investigation of Self-Compacting Concrete with Recycled

- Concrete Aggregate," *Buildings*, 13, 4, 856, 2023. DOI: 10.3390/buildings13040856.
- [11]. Lekshmy Raghavan, P., Nalanth, N., "Analysis of Durability in Self Compacting Concrete with Recycled Concrete Aggregates," *Civil Engineering and Architecture*, 11, 4, 1824 - 1834, 2023. DOI: 10.13189/cea.2023.110413.
- [12]. Nguyen, Hung Cuong, "The Influence of Recycled Coarse Aggregate Content on the Properties of High-Fly-Ash Self-Compacting Concrete," *Civil Engineering Journal*, 10, 51-61, 2024. DOI: 10.28991/CEJ-SP2024-010-04.
- [13]. Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 11969:2018 cốt liệu lớn tái chế cho bê tông.
- [14]. Bộ Xây dựng Việt Nam (2021). Ban hành định mức xây dựng. Thông tư 12/2021/TT-BXD, ngày 31/08/2021.
- [15]. Sở Xây dựng tỉnh Điện Biên (2016). Định mức dự toán đặc thù khai thác, chế biến đá, cát, sỏi các loại. Số 196/CB-SXD.
- [16]. Zhao, Hui, et al., "Sustainable self-compacting concrete containing high-amount industrial by-product fly ash as supplementary cementitious materials," *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 3616-3628, 2022. DOI: 10.1007/s11356-021-15883-2.
- [17]. WANG, Ting, et al. "Estimating the carbon emission of construction waste recycling using grey model and life cycle assessment: a case study of Shanghai," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 14, 8507, 2022. DOI: 10.3390/ijerph19148507.