

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ GIẢM PHÁT THẢI CO₂ CỦA BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO SỬ DỤNG TỔ HỢP PHỤ GIA KHOÁNG SILICA FUME VÀ TRO BAY

Trần Đức Bình^a, Phạm Sỹ Đồng^b, Nguyễn Công Thắng^b, Nguyễn Văn Tuấn^{b,*},

Phạm Xuân Anh^a, Trần Văn Tấn^a

^aKhoa Kinh tế & Quản lý Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 18/10/2021, Sửa xong 31/10/2021, Chấp nhận đăng 02/11/2021

Tóm tắt

Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) là thể hệ bê tông mới với các tính chất vượt trội về tính công tác, tính chất cơ học (cường độ nén > 120 MPa), và độ bền lâu. Tuy vậy, việc phát triển bê tông này dẫn đến tác động bất lợi lớn về môi trường khi lượng xi măng sử dụng (thông thường) là 900-1000 kg/m³. Một trong những giải pháp hiệu quả là sử dụng các phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng nhưng vẫn đạt các tính chất mong muốn. Bài báo này nghiên cứu đánh giá hiệu quả phát thải CO₂ (theo cách tiếp cận vòng đời sản phẩm) của UHPC sử dụng đơn phụ gia khoáng tro bay (FA), silica fume (SF) và hỗn hợp của chúng. Kết quả cho thấy lượng phát thải CO₂ giảm 23,3%, 44,3%, 30,9% khi sử dụng FA, SF, và hỗn hợp SF+FA thay thế xi măng.

Từ khoá: phụ gia khoáng; bê tông chất lượng siêu cao; phát thải CO₂; silica fume; tro bay; đánh giá vòng đời sản phẩm.

EVALUATION OF THE CO₂ EMISSION REDUCTION EFFICIENCY OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE USING A COMBINATION OF SILICA FUME AND FLY ASH

Abstract

Ultra High Performance Concrete (UHPC) is a new generation of concrete with outstanding properties in terms of workability, mechanical properties (compressive strength > 120 MPa), and durability. However, the development of this concrete leads to a big adverse impact on the environment when the amount of cement used (typically) to produce UHPC is 900-1000 kg/m³. One of the effective solutions is to substitute partially cement by mineral admixture but still achieve the desired properties. This paper evaluates the CO₂ emission efficiency (according to the life cycle assessment approach) of UHPC using fly ash (FA), silica fume (SF) and their mixture. The results show that CO₂ emissions are reduced by 23.3%, 44.3%, 30.9% when using FA, SF, and their combination, respectively.

Keywords: mineral admixture; ultra-high performance concrete; CO₂ emission; silica fume; fly ash; life cycle assessment.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-14](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-14) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Xây dựng là một ngành sản xuất vật chất lớn, giúp nâng cao chất lượng cuộc sống và đáp ứng các nhu cầu kinh tế - xã hội của cá nhân, xã hội và quốc gia [1]. Tuy nhiên, lĩnh vực này lại có tác

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tuannv@nuce.edu.vn (Tuấn, N. V.)

động đáng kể đến môi trường và chiếm tỷ trọng lớn trong tổng tác động môi trường toàn cầu [2] với khoảng 30-40% phát thải carbon [3, 4] và 40% năng lượng tiêu thụ [5, 6]. Vào năm 2015, tất cả quốc gia thành viên Liên hợp quốc đã thông qua Mục tiêu phát triển bền vững (Sustainable Development Goals – SDGs), hay còn gọi là Mục tiêu toàn cầu gồm 17 mục tiêu trọng tâm, 169 mục tiêu cụ thể và 232 chỉ tiêu [7]. Đây là sự nối tiếp của Mục tiêu phát triển Thiên niên kỷ (Millennium Development Goals – MDGs), được thông qua ở trụ sở chính Liên hợp quốc vào tháng 9 năm 2000. Một trong các mục tiêu trọng tâm của SDGs là hành động ứng phó với biến đổi khí hậu. Do đó, để đạt được các mục tiêu phát triển bền vững nói chung và giảm thiểu được các gánh nặng cho môi trường nói riêng, đối với ngành xây dựng, đây vừa là thách thức, vừa là cơ hội.

Ngành công nghiệp vật liệu xây dựng là ngành sản xuất, cung ứng các loại vật liệu, cấu kiện xây dựng, là đầu vào cho các công trình xây dựng. Đối với một công trình xây dựng, vật liệu xây dựng giữ vai trò đặc biệt quan trọng, chiếm đến 60% chi phí đầu tư xây dựng công trình. Hai loại vật liệu được sử dụng phổ biến nhất trong xây dựng hiện nay là bê tông và thép, tuy nhiên hai loại vật liệu này lại chiếm tỷ trọng lớn trong tổng phát thải CO₂ toàn cầu. Số liệu thống kê năm 2012 cho thấy, sản lượng xi măng trên toàn thế giới đạt xấp xỉ 3,8 tỷ tấn, phát thải khoảng 3,2 tỷ tấn CO₂, chiếm 8% mức phát thải khí CO₂ hàng năm [8]. Hàm lượng cacbon trong sản xuất thép thay đổi tùy thuộc vào kỹ thuật sản xuất, bình quân 1,9 tấn CO₂ phát thải trên 1 tấn thép thành phẩm [9]. Để giảm thiểu các tác động môi trường gây ra bởi việc sản xuất bê tông và thép, các loại vật liệu thay thế đã được nghiên cứu, chế tạo, như bê tông tái chế [10–12], bê tông UHPC, thép không gỉ, ... Thật vậy, đã có nhiều nghiên cứu chứng minh rằng các loại vật liệu thay thế này thể hiện hiệu quả tốt hơn xét trên quan điểm vòng đời [13–15].

Trong các vật liệu xây dựng, bê tông là vật liệu được sử dụng nhiều nhất trên thế giới, nhiều gấp 2 lần so với tổng lượng các vật liệu xây dựng còn lại, điều này ảnh hưởng rất lớn đến sự phát triển bền vững đối với ngành xây dựng. Theo Mehta [16] đề xuất, sự phát triển bền vững của bê tông có thể được thực hiện bằng 3 giải pháp chính: (1) giảm lượng bê tông tiêu thụ bằng biện pháp nâng cao chất lượng, độ bền của bê tông hoặc thay thế bằng các vật liệu mới; (2) giảm lượng xi măng sử dụng bằng cách tính toán tối ưu thành phần hạt, sử dụng phụ gia hóa học, ...; (3) thay thế xi măng sử dụng bằng các phụ gia khoáng như tro bay, xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn, silica fume, tro trấu, ... Đối với bê tông việc tối ưu thành phần hạt kết hợp sử dụng các loại phụ gia khoáng để nâng cao chất lượng, tăng độ bền lâu cho bê tông là hướng đi phù hợp nhằm giảm lượng CO₂ phát thải tăng tính bền vững trong công trình xây dựng. Bên cạnh đó, một trong những thể hệ bê tông đang được quan tâm nghiên cứu và ứng dụng đó là Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC), đây là loại bê tông có độ chảy cao, cường độ nén rất cao, cường độ uốn lớn (khi sử dụng cốt sợi), độ thấm thấp và độ bền cao [17], Theo ASTM C1856 [18], UHPC có cường độ nén đặc trưng trên 120 MPa, với các yêu cầu về độ bền, độ dẻo dai được xác định. Với các đặc tính vượt trội như vậy, nên việc sử dụng UHPC trong xây dựng sẽ là một giải pháp hiệu quả để giảm được kích thước của cấu kiện, đồng thời giảm lượng bê tông sử dụng cho các công trình.

Vật liệu để chế tạo UHPC thông thường bao gồm cát quắc với kích thước lớn nhất khoảng 600µm, xi măng, phụ gia khoáng, nước và phụ gia siêu dẻo. Trong đó, lượng xi măng khoảng 900-1000 kg/m³ [19] và đây là nhược điểm lớn nhất của loại bê tông này bởi vì sẽ làm tăng giá thành sản phẩm và ảnh hưởng đến tính chất kỹ thuật, đồng thời việc sử dụng nhiều xi măng sẽ kéo theo sự ảnh hưởng về môi trường do lượng khí cacbonic thải ra trong quá trình sản xuất xi măng [20]. Theo thống kê, vào năm 2012 trên thế giới có khoảng 3,3 tỷ tấn xi măng đã được sản xuất và con số này có thể tăng gấp đôi sau 25 năm [21]. Trên thực tế việc sản xuất 1 tấn xi măng sẽ phát sinh khoảng 0,82 tấn CO₂ [22], điều này kéo theo hậu quả khoảng 2 tỷ tấn CO₂ bị thải ra hàng năm, chiếm 6-7% tổng lượng CO₂ thải ra

toàn cầu.

Do vậy việc nghiên cứu sử dụng phụ gia khoáng thay thế từng phần xi măng trong bê tông UHPC vừa có ý nghĩa về khoa học, đồng thời có ý nghĩa rất to lớn về môi trường, kinh tế và cả về khía cạnh xây dựng phát triển bền vững. Trong số các phụ gia khoáng dùng cho bê tông, tro bay được đánh giá là có triển vọng để thay thế xi măng trong UHPC, với hiệu quả đạt được về kỹ thuật, về kinh tế và môi trường. Xét về mặt kỹ thuật, tro bay có thành phần hoá học với tổng hàm lượng các ôxyt ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) lớn hơn 70% (tro bay loại F theo ASTM C618 [23]). Các ôxyt hoạt tính này có khả năng phản ứng với sản phẩm thuỷ hoá của xi măng (phản ứng pozzolanic) tạo ra các sản phẩm dạng CSH có cường độ cao, bền với môi trường hơn, đặc biệt tăng khả năng chống ăn mòn cho bê tông [24]. Bên cạnh đó, với hình dạng đặc trưng là các hạt hình cầu, mịn (đường kính hạt trung bình khoảng 5-10 μm) nên việc sử dụng tro bay sẽ cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông (hiệu ứng ổ bi – Ball bearing effect), làm tăng tính dẻo cho hỗn hợp bê tông, giảm lượng nước nhào trộn, tăng độ đặc cho bê tông, sẽ làm tăng cường độ cũng như khả năng chống thấm của bê tông [24]. Xét về mặt kinh tế - môi trường, theo thống kê [25], hàng năm ước tính các nhà máy nhiệt điện ở Việt Nam thải ra khoảng 2,3 triệu tấn tro bay, đến năm 2015 sẽ là 5 triệu tấn/năm, điều này sẽ ảnh hưởng rất lớn đến môi trường. Việc nghiên cứu sử dụng tro bay làm phụ gia khoáng sử dụng trong UHPC vừa góp phần làm giảm giá thành cho sản phẩm bê tông, giảm ô nhiễm môi trường, góp phần vào mục tiêu phát triển xây dựng bền vững đồng thời vẫn đảm bảo các tính chất kỹ thuật của UHPC.

Đánh giá vòng đời (LCA) là phương pháp đánh giá tác động môi trường của sản phẩm trong cả vòng đời của sản phẩm đó, bao gồm khai thác vật liệu thô, sản xuất, thi công xây dựng, sử dụng, thải bỏ, và vận chuyển trong cả vòng đời sản phẩm [26–28]. LCA cho phép định lượng các tác động môi trường tiềm ẩn của sản phẩm dựa trên các dòng vật liệu và năng lượng vật lý [29]. Nghiên cứu đầu tiên về LCA được thực hiện vào năm 1969 bởi Viện nghiên cứu Midwest, Hoa Kỳ cho hãng Coca-Cola, để lựa chọn giải pháp đóng chai sản phẩm [30]. Vào năm 1990, Hiệp hội Chất độc môi trường và hoá học (SETAC) bắt đầu tổ chức hội thảo thường niên về LCA để hình thành phương pháp luận, và tài liệu hướng dẫn đầu tiên được công bố vào 3 năm sau đó [31]. Cho đến nay, LCA ngày càng được phát triển về mặt phương pháp luận, tiêu chuẩn và ứng dụng. Theo thời gian, LCA liên tục được hoàn thiện và tiêu chuẩn hoá cấp quốc tế, từ bộ tiêu chuẩn quốc tế đầu tiên về LCA là ISO 14040-43 (1997-2000), và sau đó được ban hành lại thành ISO 14040/44 (2006) [27, 32].

Ở Việt Nam, Bộ Khoa học, Công nghệ và Môi trường (tiền thân của Bộ Khoa học và Công nghệ) đã ban hành bộ tiêu chuẩn TCVN ISO 14040:2000 [33]. Bộ tiêu chuẩn quốc gia này sau đó đã được điều chỉnh và biên soạn lại bởi Ban kỹ thuật tiêu chuẩn quốc gia theo đề nghị của Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng. Năm 2009 Bộ Khoa học và Công nghệ đã công bố Tiêu chuẩn quốc gia TCVN ISO 14040:2009 [34], thay thế cho TCVN ISO 14040:2000.

Trong khuôn khổ một quy trình LCA, tác động môi trường của một sản phẩm có thể được tính toán dưới nhiều loại tác động khác nhau như biến đổi khí hậu (Climate change), suy giảm tầng ozon (Ozone depletion), sự phú dưỡng (Eutrophication), độc tính đối với con người (Human toxicity), ... Nhưng nhìn chung thì loại tác động biến đổi khí hậu được sử dụng phổ biến nhất trong các nghiên cứu về LCA [35]. Loại tác động này được đo lường bằng chỉ tiêu tiềm năng nóng lên toàn cầu (Global Warming Potential – GWP), gây ra bởi sự phát thải của các loại khí nhà kính (Green House Gases – GHGs) ra không khí. Có nhiều loại khí nhà kính như CO_2 , CH_4 , N_2O , ... và tác động của chúng đến môi trường được đo bằng số kg CO_2 quy đổi. Trong nghiên cứu này, chỉ số mức phát thải khí CO_2 được sử dụng để đánh giá tác động môi trường của các loại cấp phối bê tông UHPC sử dụng đơn phụ gia khoáng FA, SF và hỗn hợp của chúng.

2. Nguyên vật liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên vật liệu sử dụng

Vật liệu được sử dụng để chế tạo UHPC gồm có: Cát thạch anh có kích thước hạt từ 100 - 300 μ m, khối lượng thể tích xấp xỉ là 1460 kg/m³, độ ẩm bão hòa bề mặt khô là 1,1%; xi măng (XM) sử dụng trong nghiên cứu là xi măng Pooc lăng PC40 với tính chất thỏa mãn theo TCVN 2682:2009; Silica fume (SF) sử dụng trong nghiên cứu là của hãng Elkem có hàm lượng SiO₂ đạt trên 92%, kích thước hạt trung bình là 0,15 μ m; Tro bay (FA) sử dụng của nhà máy nhiệt điện Phả Lại, có chỉ số hoạt tính cường độ với xi măng đạt 93,4%; Phụ gia siêu dẻo (PGSD) sử dụng trong nghiên cứu có gốc polycarboxylate với hàm lượng chất khô là 30%.

2.2. Cấp phối UHPC

Trong nghiên cứu, cấp phối UHPC sử dụng với hàm lượng SF là 0-10-20-30% và hàm lượng FA sử dụng là 0-10-20-30-50-70%, tỷ lệ N/CKD = 0,16. Mẫu bê tông sau khi được chế tạo sẽ được bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn ($t = 27 \pm 2^\circ\text{C}$, độ ẩm > 95%). Mẫu bê tông được xác định cường độ nén ở tuổi 28 ngày. Tỷ lệ thành phần cấp phối UHPC được thể hiện ở Bảng 1, Bảng 2 và Bảng 3.

Bảng 1. Cấp phối bê tông UHPC sử dụng đơn phụ gia khoáng FA

CP	N/CKD (theo KL)	C/CKD (theo KL)	FA (% theo KL CKD)	PGSD (% theo KL CKD)	CKD kg/m ³	XM kg/m ³	FA kg/m ³	Cát kg/m ³	Nước kg/m ³	PGSD kg/m ³	R_{n28} , MPa
1	0,16	1	0	0,65	1170	1170	0	1170	183	25,3	134
2	0,16	1	20	0,47	1145	916	229	1145	184	17,9	124
3	0,16	1	30	0,39	1133	793	340	1133	184	14,7	121
4	0,16	1	50	0,25	1110	555	555	1109	184	9,2	113
5	0,16	1	70	0,17	1087	326	761	1088	182	6,2	86

Bảng 2. Cấp phối bê tông UHPC sử dụng đơn phụ gia khoáng SF

CP	N/CKD (theo KL)	C/CKD (theo KL)	SF (% theo KL CKD)	PGSD (% theo KL CKD)	CKD kg/m ³	XM kg/m ³	SF kg/m ³	Cát kg/m ³	Nước kg/m ³	PGSD kg/m ³	R_{n28} , MPa
1	0,16	1		1,4	1170	1170	0	1170	187,2	16,38	125
2	0,16	1	10	1,1	1151	1035,9	115,1	1151	184,16	12,661	131,2
3	0,16	1	20	1,1	1133	906,4	226,6	1133	181,28	12,463	153,5
4	0,16	1	30	1,4	1116	781,2	334,8	1116	178,56	15,624	147

Bảng 3. Cấp phối bê tông UHPC sử dụng hỗn hợp phụ gia khoáng SF và FA

CP	N/CKD (theo KL)	C/CKD (theo KL)	FA (% theo KL CKD)	SF (% theo KL CKD)	PGSD (% theo KL CKD)	CKD kg/m ³	XM kg/m ³	FA kg/m ³	SF kg/m ³	Cát kg/m ³	Nước kg/m ³	PGSD kg/m ³	R_{n28} , MPa
1	0,16	1	0	10	0,58	1151	1036	0	115	1151	182	22,3	146
2	0,16	1	20	10	0,52	1127	789	225	113	1127	180	19,5	149
3	0,16	1	30	10	0,49	1116	669	335	112	1116	179	18,2	141
4	0,16	1	50	10	0,27	1093	437	547	109	1093	181	9,8	115
5	0,16	1	70	10	0,19	1071	214	750	107	1072	179	6,8	63

Đối với hoạt động vận chuyển vật liệu thô, phương tiện vận chuyển được giả định là xe tải chạy bằng dầu diesel, cự ly vận chuyển được tính theo khoảng cách từ các nhà cung ứng vật tư đến trạm trộn bê tông. Dựa vào cự ly vận chuyển và mức phát thải CO₂ cho 1 km vận chuyển, ta tính được tác động môi trường của quá trình vận chuyển vận liệu từ nhà cung cấp đến trạm trộn bê tông, tính cho 1 đơn vị vật liệu thô như Bảng 4. Các vật liệu FA, SF và xi măng được vận chuyển bởi cùng một loại phương tiện vận chuyển, cát và phụ gia siêu dẻo được vận chuyển bởi một loại phương tiện vận chuyển khác. Mức phát thải CO₂ khi vận chuyển 1 kg vật liệu trên quãng đường 1 km được lấy theo [36].

Bảng 4. Mức tiêu hao nhiên liệu trong quá trình vận chuyển vật liệu thô [36]

Loại vật liệu	Cự ly vận chuyển (km)	Mức phát thải CO ₂ của 1 kg vật liệu thô (kg CO ₂ /kg.km)	Tác động môi trường của quá trình vận chuyển (kg CO ₂)
FA	64	0,0000518	0,003315
SF	0	0,0000518	0
Xi măng	225	0,0000518	0,011660
Cát	488	0,0000630	0,030740
PGSD	0	0,0002210	0

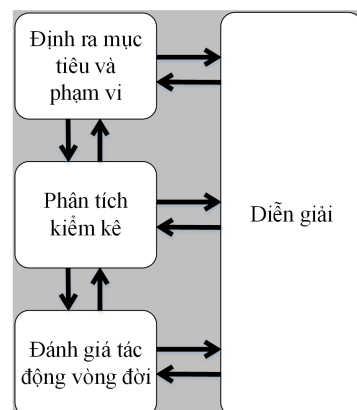
Quá trình chế tạo bê tông gồm quá trình định lượng vật liệu, quá trình trộn, quá trình đầm chặt và quá trình bảo dưỡng. Cụ thể, trong quá trình chế tạo những loại máy xây dựng thuộc nhóm máy sản xuất có công dụng chính để sản xuất bê tông thương phẩm. Máy móc trong quá trình chế tạo UHPC có thể sử dụng dầu hỏa, dầu diesel và điện làm các nguyên liệu đầu vào của quá trình sản xuất. Do quy trình máy móc, thiết bị trộn là giống nhau đối với các cấp phối bê tông, và thời gian trộn coi như tương đương nhau, nên phân tác động môi trường của quá trình trộn bê tông được giả thiết giống nhau và không đưa vào phân tích.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Để đánh giá tác động môi trường của các cấp phối bê tông UHPC sử dụng các loại phụ gia khoáng khác nhau, một nghiên cứu LCA được thực hiện theo Tiêu chuẩn quốc gia hiện hành. Quy trình này được thực hiện qua 4 giai đoạn như trong Hình 1.

Giai đoạn xác định mục tiêu và phạm vi nghiên cứu: Giai đoạn này liên quan đến việc xác định ranh giới hệ thống, thời đoạn phân tích và các đơn vị chức năng. Tùy theo mục tiêu cụ thể mà mức độ đánh giá LCA (độ rộng và sâu) có thể khác nhau.

Giai đoạn phân tích kiểm kê: Bước thứ hai này của LCA đề cập đến việc thu thập và tích hợp dữ liệu đầu vào và đầu ra, sơ cấp hoặc thứ cấp cho các giai đoạn của vòng đời. Đối với mỗi quá trình liên quan đến ranh giới hệ thống, các dòng năng lượng,



Hình 1. Khuôn khổ đánh giá vòng đời

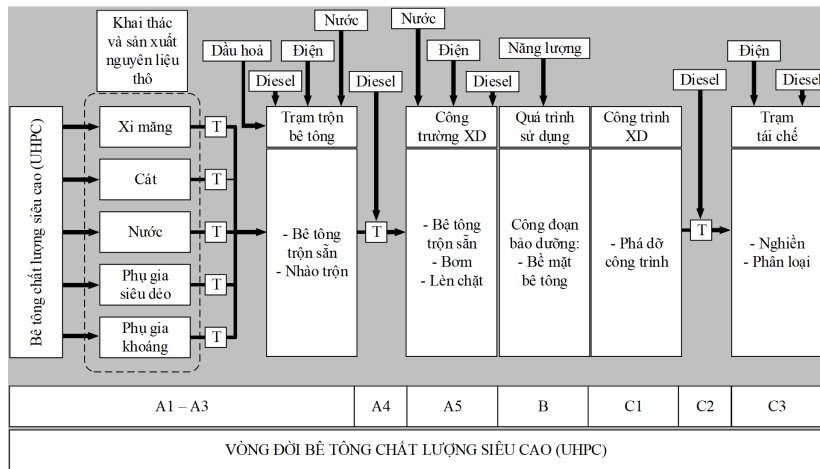
vật liệu, khí thải và chất thải phải được xác định. Giai đoạn này liên quan đến thu thập các dữ liệu cần thiết nhằm thỏa mãn các mục tiêu của nghiên cứu đã định.

Giai đoạn đánh giá tác động vòng đời: Ở giai đoạn này, các kết quả phân tích kiểm kê sẽ được chuyển đổi thành các loại tác động môi trường dựa trên các phương pháp đánh giá khoa học.

Giai đoạn diễn giải: Đây là giai đoạn cuối cùng trong một quy trình LCA. Giai đoạn này đưa ra các kết luận, kiến nghị và ra quyết định dựa trên kết quả phân tích kiểm kê và đánh giá tác động vòng đời, phù hợp với mục tiêu và phạm vi đã xác định ở giai đoạn đầu tiên.

a. Xác định mục tiêu và phạm vi nghiên cứu

Như đã trình bày ở trên, mục tiêu nghiên cứu được đặt ra là đánh giá mức độ tác động môi trường ở cấp độ vật liệu của các cấp phối bê tông UHPC sử dụng các loại phụ gia khoáng khác nhau, thông qua mức phát thải khí CO₂, từ đó tính toán hiệu quả môi trường của việc thay đổi phụ gia khoáng trong thành phần bê tông UHPC. LCA là phương pháp đánh giá tác động môi trường trên quan điểm vòng đời. Vòng đời bê tông UHPC được mô tả như trong Hình 2.



Hình 2. Vòng đời bê tông UHPC

A1 - A3 (product stage) là giai đoạn sản xuất chế tạo bê tông UHPC, bao gồm việc khai thác các loại vật liệu thô đầu vào (A1) bao gồm xi măng, cát, nước, phụ gia khoáng, phụ gia siêu dẻo... Các vật liệu thô này sẽ được vận chuyển từ nơi sản xuất đến nhà máy hoặc trạm trộn bê tông (A2) bằng tàu hỏa, tàu thủy, xe tải... Trong nghiên cứu này, phương tiện vận chuyển được sử dụng là xe tải, cự ly vận chuyển được lấy theo số liệu thực tế từ các nhà cung ứng vật tư. Sau khi vận chuyển đến nhà máy/trạm trộn, các thành phần cốt liệu của bê tông được trộn đều cho đến khi đạt sự đồng nhất theo yêu cầu kỹ thuật (A3). Sản phẩm đầu ra của giai đoạn này là bê tông UHPC thành phẩm. Các hoạt động có liên quan đến phát thải khí CO₂ trong giai đoạn A1 – A3 bao gồm việc khai thác, sản xuất vật liệu thô, tiêu thụ nhiên liệu (dầu diesel) trong quá trình vận chuyển và tiêu thụ điện năng, nhiên liệu (dầu hỏa, dầu diesel) trong quá trình trộn hỗn hợp bê tông.

A4 - A5 (construction stage) là giai đoạn thi công xây dựng, bao gồm việc vận chuyển bê tông UHPC thành phẩm (dạng vật liệu hoặc cấu kiện xây dựng) đến công trình xây dựng (A4) và quá trình thi công đối với bê tông UHPC dạng vật liệu hoặc lắp đặt đối với bê tông UHPC dạng cấu kiện (A5). Tác động môi trường trong giai đoạn này đến từ hoạt động vận chuyển bê tông từ nhà máy đến công trường, và hoạt động của máy móc, thiết bị thi công trong quá trình xây dựng.

B (use stage) là giai đoạn vận hành, khai thác công trình, bao gồm các hoạt động như sử dụng công trình, sửa chữa, duy tu và bảo trì công trình. Tùy vào từng loại công trình mà sẽ có các hoạt động sử dụng khác nhau, các hoạt động sử dụng có thể liên quan đến việc sử dụng năng lượng (điện năng) hoặc nhiên liệu (xăng, dầu, dầu diesel). Các hoạt động sửa chữa, bảo trì công trình được thực hiện theo kế hoạch của chủ sở hữu công trình, hoặc theo chế độ, quy định hiện hành về bảo trì công trình xây dựng. Quá trình sửa chữa, bảo trì công trình liên quan đến việc sử dụng vật liệu, máy móc thi công tùy thuộc hình thức và loại hoạt động sửa chữa, bảo trì.

C1 - C3 (end of life stage) là giai đoạn kết thúc vòng đời. Khi đã hết thời hạn sử dụng, công trình sẽ được phá dỡ. Phế thải xây dựng do quá trình phá dỡ sẽ được vận chuyển đến bãi rác (đối với phế thải không tái chế được) hoặc đến trạm tái chế để tái chế và tái sử dụng (đối với phế thải tái chế được).

Dựa trên mục tiêu nghiên cứu và các giới hạn về dữ liệu, phạm vi thực hiện LCA cho bê tông UHPC được giới hạn trong giai đoạn A1 - A3, bao gồm việc khai thác vật liệu thô, vận chuyển vật liệu thô và sản xuất bê tông UHPC. Do đó, các giai đoạn khác như thi công, sử dụng và kết thúc vòng đời không được tính toán trong nghiên cứu LCA này. Đơn vị chức năng (functional unit) trong nghiên cứu LCA này là 1 m³ bê tông UHPC. Các cấp phối bê tông UHPC sử dụng các loại phụ gia khoáng khác nhau được đánh giá mức độ tác động môi trường (phát thải khí CO₂) tính cho 1 m³ bê tông.

b. Đánh giá tác động vòng đời

Như đã trình bày ở trên, chỉ tiêu đo lường tác động môi trường được sử dụng trong nghiên cứu này là Tiềm năng nóng lên toàn cầu GWP, được tính bằng số kg khí CO₂ quy đổi. Khí CO₂ phát thải ra môi trường đến từ các hoạt động như khai thác, sản xuất vật liệu thô (sử dụng nguồn tài nguyên) và tiêu hao nhiên liệu, năng lượng để vận hành máy móc, được xác định theo công thức:

$$GWP_{UHPCi} = GWP_{UHPCi}^{A1} + GWP_{UHPCi}^{A2} + GWP_{UHPCi}^{A3}$$

trong đó: GWP_{UHPCi} là mức phát thải CO₂ của cấp phối bê tông UHPC thứ i ; $GWP_{UHPCi}^{A1,2,3}$ là mức phát thải CO₂ của cấp phối bê tông UHPC thứ i tương ứng với hoạt động khai thác vật liệu thô (A1), vận chuyển vật liệu thô (A2) và sản xuất bê tông UHPC (A3).

$$GWP_{UHPCi}^{A1} = \sum_{j=1}^m VL_{ij} \times CE_{VLIj}$$

trong đó: VL_{ij} là khối lượng của loại vật liệu thành phần thứ j của cấp phối bê tông UHPC thứ i ; CE_{VLIj} là mức phát thải CO₂ khi khai thác 1 đơn vị khối lượng vật liệu thành phần thứ j của cấp phối bê tông UHPC thứ i ; m là số loại vật liệu thành phần của cấp phối bê tông UHPC thứ i .

$$GWP_{UHPCi}^{A2} = \sum_{j=1}^m S_{ij} \times F_T \times CE_{FT}$$

trong đó S_{ij} là cự ly vận chuyển của vật liệu thành phần thứ j của cấp phối bê tông UHPC thứ i ; F_T là mức tiêu hao nhiên liệu của phương tiện vận chuyển; CE_{FT} là mức phát thải CO₂ của 1 đơn vị nhiên liệu tiêu thụ.

$$GWP_{UHPCi}^{A3} = \sum_{k=1}^l M_k \times F_{Mk} \times CE_{FMk}$$

trong đó: M_k là số ca máy loại k sử dụng trong quá trình trộn bê tông; F_{Mk} là mức tiêu hao nhiên liệu/năng lượng của loại máy k ; CE_{FMk} là mức phát thải CO₂ của 1 đơn vị nhiên liệu/năng lượng để vận hành máy k ; l là số loại máy sử dụng trong quá trình trộn bê tông.

Tác động môi trường của các loại vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này được đo bằng mức phát thải CO₂ và tập hợp trong Bảng 5.

Bảng 5. Mức phát thải CO₂ của 1 đơn vị vật liệu [36]

STT	Loại vật liệu	Đơn vị tính	GWP của 1 đơn vị vật liệu (kg CO ₂ eq)
1	Xi măng	kg	0,931000
2	Cát	kg	0,002600
3	Nước	kg	0,000196
4	PGSD	kg	0,250000
5	FA	kg	0,019600
6	SF	kg	0,028000

c. Ảnh hưởng của chất kết dính và tác động môi trường đến cường độ bê tông

Đối với vật liệu bê tông, chất kết dính giữ vai trò rất quan trọng, chất kết dính (xi măng, phụ gia, ...) làm nhiệm vụ liên kết các cốt liệu thô với các cốt liệu mịn, và làm cho hỗn hợp bê tông trở thành một khối cứng. Bằng việc sử dụng các loại phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng trong chế tạo bê tông UHPC, tỷ lệ chất kết dính trong hỗn hợp bê tông sẽ thay đổi, kéo theo sự thay đổi về cường độ chịu nén của bê tông, cũng như thay đổi về mức phát thải CO₂. Do đó, để kết quả tính toán có tính so sánh giữa các loại cấp phối, xét về khả năng chịu lực của bê tông, nghiên cứu này xem xét đến mức độ ảnh hưởng của chất kết dính và tác động môi trường để tạo ra 1 MPa cường độ chịu nén của bê tông.

$$f^{CKD} = \frac{m_{UHPCi}^{CKD}}{R_{UHPCi}^n}$$

trong đó: f^{CKD} là hệ số ảnh hưởng của chất kết dính đến cường độ chịu nén của bê tông; m_{UHPCi}^{CKD} là khối lượng chất kết dính của cấp phối bê tông UHPC thứ i ; R_{UHPCi}^n là cường độ chịu nén của cấp phối bê tông UHPC thứ i .

$$f^{CO2} = \frac{GWP_{UHPCi}}{R_{UHPCi}^n}$$

trong đó: f^{CO2} là hệ số ảnh hưởng của phát thải CO₂ đến cường độ chịu nén của bê tông; GWP_{UHPCi} là mức phát thải CO₂ của cấp phối bê tông UHPC thứ i ; R_{UHPCi}^n là cường độ chịu nén của cấp phối bê tông UHPC thứ i .

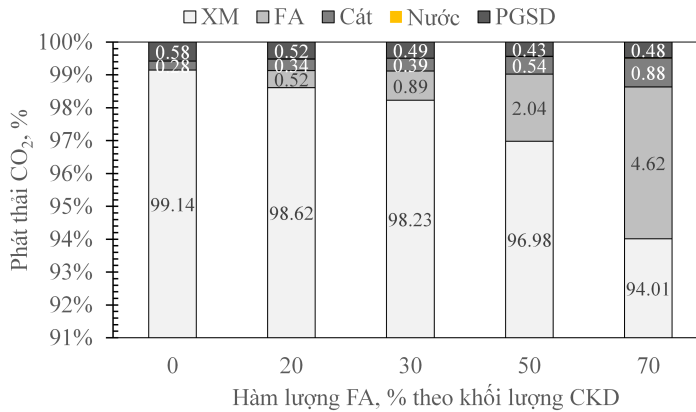
Cường độ chịu nén của mỗi loại cấp phối bê tông được lấy theo kết quả nén mẫu bê tông (hình lập phương có kích thước 100×100×100 mm) của loại cấp phối đó, được bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn trong 28 ngày. Cường độ này chỉ được xét đến khi có giá trị ≥ 120 MPa, bởi nếu cấp phối cho kết quả $R_n < 120$ MPa thì mẫu bê tông đó không phải là bê tông UHPC.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng tro bay

Khi đánh giá hỗn hợp bê tông UHPC sử dụng tro bay, 5 loại cấp phối sử dụng các hàm lượng tro bay khác nhau, dao động từ 0 đến 70% theo khối lượng chất kết dính, được nghiên cứu. Từ Bảng 1 cho thấy, khi thay đổi hàm lượng FA thay đổi, hàm lượng cát trong 5 loại cấp phối vẫn được giữ nguyên và

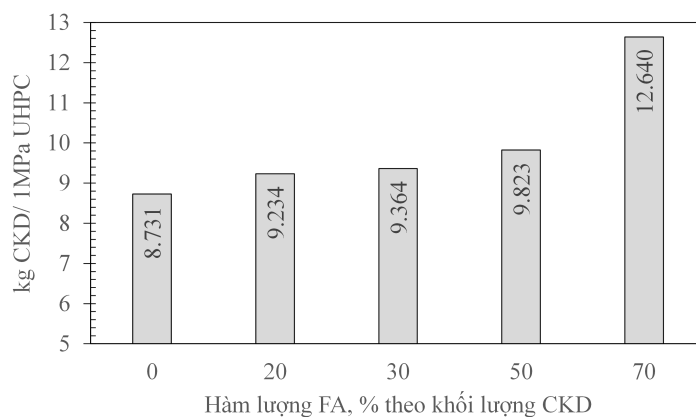
chiếm tỷ trọng lớn nhất (46%). Tuy nhiên hàm lượng xi măng được giảm mạnh từ 46% xuống 14%, và các loại vật còn lại thay đổi không đáng kể. Mức phát thải khí CO₂ của 5 loại cấp phối này được thể hiện qua Hình 3.



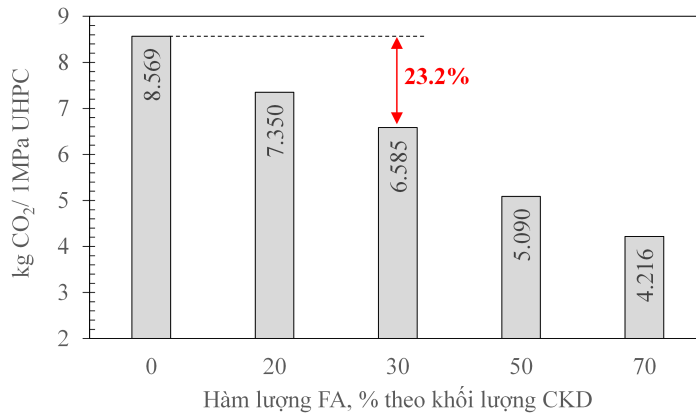
Hình 3. Mức phát thải CO₂ của từng vật liệu thành phần trong các cấp phối UHPC sử dụng tro bay

Xét về tổng thể, với sự thay đổi hàm lượng FA từ 0 đến 70%, mức phát thải khí CO₂ của 1 m³ bê tông UHPC được giảm xuống rất mạnh, từ 1098,67 xuống còn 332,84 kg CO₂/m³. Hiệu quả này đến từ việc tiết kiệm lượng lớn xi măng, nhân tố tác động môi trường lớn nhất trong thành phần cấu tạo của bê tông. Thật vậy, lượng CO₂ do xi măng thải ra được giảm đáng kể từ 1089 xuống còn 304 kg CO₂/m³, tương ứng với 72%. Vì FA được sử dụng để thay thế cho một phần xi măng, nên điều này cũng gây ra thêm một phần tác động môi trường, từ 0 đến 14,92 kg CO₂, tuy nhiên, mức phát thải này là không đáng kể so với phần giảm tác động môi trường do xi măng gây ra. Các loại vật liệu khác cũng có sự thay đổi về mặt phát thải CO₂ nhưng nhìn chung không đáng kể.

Ở một khía cạnh khác, khi thành phần cấp phối bê tông thay đổi thì cường độ chịu lực của cấp phối bê tông đó cũng sẽ thay đổi theo. Bảng 1 cho thấy, với việc sử dụng FA để thay thế một phần xi măng, cường độ chịu nén của bê tông bị giảm đi đáng kể, từ 134 MPa xuống 86 MPa. Do đó, để có thể so sánh hiệu quả của việc thay đổi hàm lượng tro bay trong các loại cấp phối bê tông UHPC, hệ số hàm lượng chất kết dính/MPa và mức phát thải CO₂/MPa được tính toán như Hình 4 và Hình 5.



Hình 4. Ảnh hưởng của hàm lượng CKD sử dụng FA quy đổi để chế tạo 1 MPa UHPC



Hình 5. Ảnh hưởng của phát thải CO₂ quy đổi để chế tạo 1 MPa UHPC sử dụng FA

Hệ số hàm lượng chất kết dính/MPa phản ánh hàm lượng chất kết dính quy đổi để chế tạo được 1 MPa cường độ chịu nén của bê tông UHPC. Thật vậy, với sự thay đổi hàm lượng FA từ 0 – 30%, hệ số này thay đổi không đáng kể. Nhưng với 2 cấp phối sử dụng 50% và 70% FA, ảnh hưởng của hàm lượng FA đến cường độ bê tông UHPC lại có sự thay đổi rõ rệt. Điều này là do cường độ nén ở độ tuổi 28 ngày của bê tông UHPC sử dụng tro bay hàm lượng lớn bị giảm dần, do đó lượng chất kết dính phải tăng lên (tăng 51% đối với bê tông UHPC sử dụng 70% FA) để đạt 1 MPa cường độ của bê tông. Từ ví dụ của 5 loại cấp phối này, có thể thấy hàm lượng FA tối ưu dùng để chế tạo bê tông UHPC là 30%.

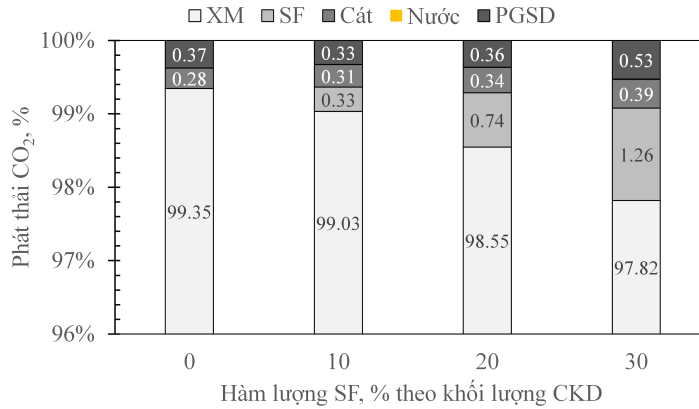
Tương tự, mức phát thải CO₂ quy đổi để tạo ra 1 MPa cường độ bê tông cũng được tính toán cho 5 loại cấp phối sử dụng FA. Kết quả cho thấy rằng khi tăng hàm lượng FA thì phát thải CO₂ quy đổi cho 1 MPa giảm đáng kể. Lượng phát thải CO₂ giảm tương đối đều khi tăng hàm lượng FA từ 0-20%, 20-30%, 30-50% và từ 50-70%. Đặc biệt khi bê tông sử dụng 70% hàm lượng FA thì lượng phát thải CO₂ đã giảm đi hơn 50% so với bê tông không sử dụng FA. Đây là một điều rất quan trọng trong việc chế tạo bê tông UHPC để giảm thiểu phát thải CO₂. Khi xét đến cường độ nén mục tiêu là 120 MPa thì hàm lượng FA sử dụng tương ứng là 30% và lượng phát thải CO₂ giảm 23,2% so với mẫu đối chứng không sử dụng FA.

3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng silica fume

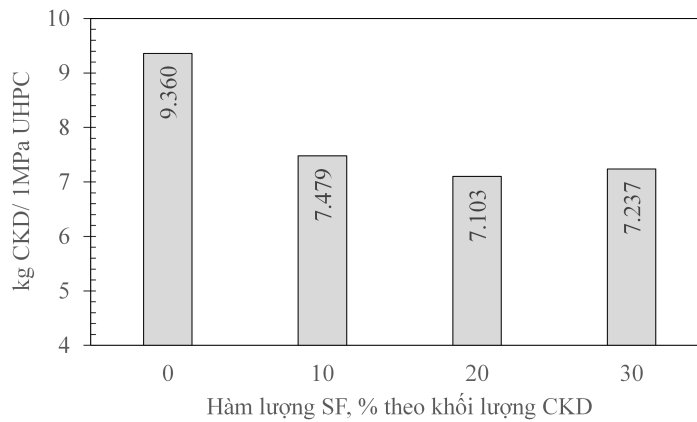
Đối với bê tông UHPC sử dụng phụ gia khoáng silica fume, 4 loại cấp phối với hàm lượng SF từ 0 đến 30% được nghiên cứu. Trong 4 loại cấp phối này, hàm lượng cát chiếm tỷ trọng lớn nhất, theo sau là hàm lượng xi măng, với mức sử dụng hàm lượng SF từ 0 đến 30%, hàm lượng xi măng đã giảm từ 46 xuống 32%. Dựa vào kết quả phân tích kiểm kê và dữ liệu tác động môi trường ở Mục 2, kết quả mức phát thải CO₂ của 4 loại cấp phối bê tông UHPC sử dụng SF được thể hiện qua Hình 6.

Biểu đồ cho thấy khi thay đổi hàm lượng SF từ 0-30% thì lượng phát thải CO₂ do xi măng thải ra giảm 1,53% (từ 99,35 xuống còn 97,82%), của SF tăng từ 0 lên 1,13%. Lượng phát thải CO₂ của các vật liệu khác thay đổi không đáng kể. Điều này có nghĩa là việc sử dụng SF để thay thế một phần xi măng trong chế tạo bê tông UHPC cho phép làm giảm tác động nguy hại đến môi trường, thể hiện qua mức phát thải khí CO₂ giảm.

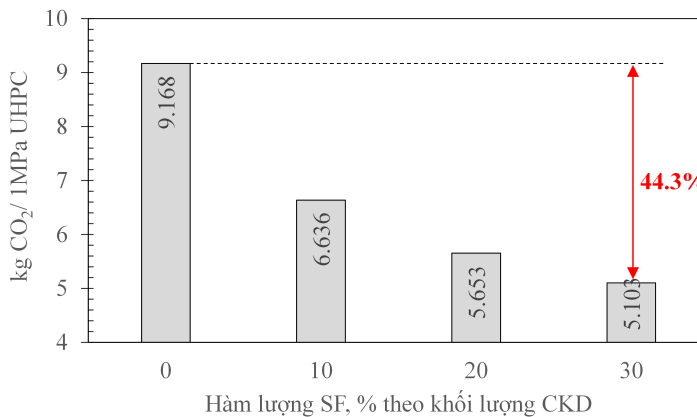
Ảnh hưởng của hàm lượng SF và ảnh hưởng của phát thải CO₂ quy đổi để chế tạo 1 MPa cường độ chịu nén của bê tông được tính toán và thể hiện qua Hình 7 và Hình 8.



Hình 6. Mức phát thải CO₂ của từng vật liệu thành phần trong các cấp phối UHPC sử dụng silica fume



Hình 7. Ảnh hưởng của hàm lượng CKD sử dụng SF quy đổi để chế tạo 1 MPa UHPC



Hình 8. Ảnh hưởng của phát thải CO₂ quy đổi để chế tạo 1 MPa UHPC sử dụng SF

Ảnh hưởng của hàm lượng SF để chế tạo 1 MPa UHPC là không đáng kể với hàm lượng từ 10-30%, nhưng lại rất đáng kể khi hàm lượng FA tăng từ 0 – 10%. Khi tăng hàm lượng SF thì làm giảm lượng chất kết dính. Điều này là do cường độ nén ở độ tuổi 28 ngày của bê tông UHPC sử dụng silica

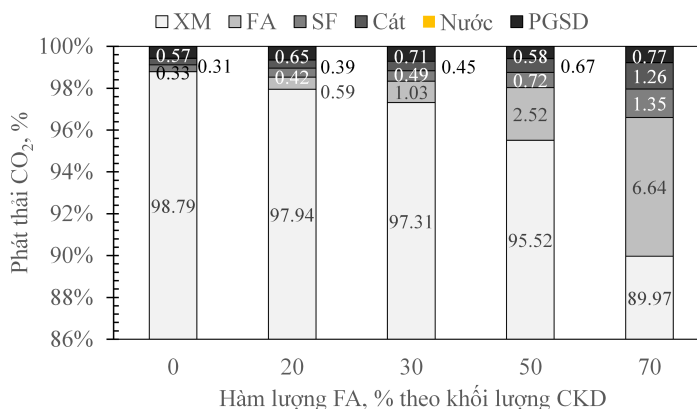
fume tăng, do đó lượng chất kết dính phải giảm đi để đạt 1 MPa cường độ của bê tông.

Khi tăng hàm lượng SF thì lượng phát thải CO₂ tính quy đổi về 1 MPa cường độ nén của bê tông UHPC giảm rất đáng kể. Lượng phát thải CO₂ giảm mạnh 44,4% (từ 9,17 xuống còn 5,1 kg CO₂/1 MPa UHPC), khi sử dụng tới 30% hàm lượng silica fume so với bê tông không sử dụng. Như vậy việc sử dụng phụ gia khoáng silica fume vừa làm giảm hàm lượng CKD, vừa làm giảm lượng phát thải CO₂. Đây là một điều rất quan trọng trong việc chế tạo bê tông UHPC để giảm thiểu phát thải CO₂.

3.3. Ảnh hưởng của hỗn hợp tro bay và silica fume

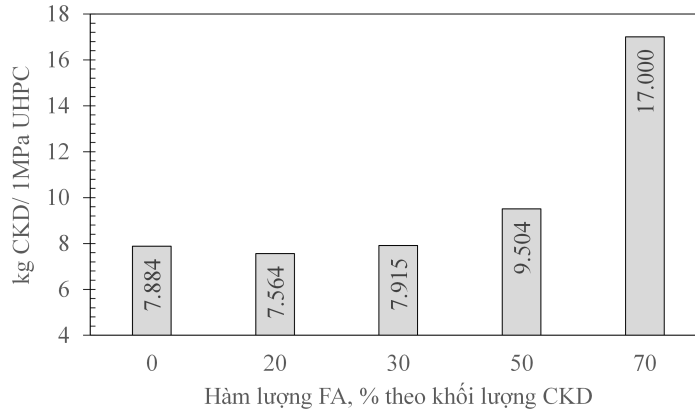
Có 05 loại cấp phối bê tông UHPC sử dụng hỗn hợp tro bay và silica fume được nghiên cứu (Bảng 3). Hàm lượng tro bay được thay đổi từ 0-70% theo khối lượng chất kết dính, trong khi hàm lượng silica fume lấy bằng 10% khối lượng chất kết dính. Ngoài ra tỷ lệ nước/chất kết dính được thay đổi theo 4 cấp độ 0,12; 0,14; 0,16 và 0,18 theo khối lượng. Xét thành phần cấu tạo của 20 loại cấp phối này, cát vẫn là vật liệu có hàm lượng nhiều nhất, hàm lượng xi măng giảm và hàm lượng FA tăng, các vật liệu khác thay đổi không đáng kể. Khi sử dụng 10% SF và thay đổi hàm lượng FA từ 0-70%, mức phát thải CO₂ giảm đi rất nhiều. Đặc biệt khi sử dụng tới 70% FA thì lượng CO₂ giảm 754,89 kg CO₂/m³ (từ 976,34 xuống còn 221,45 kg CO₂/m³). Lượng phát thải CO₂ của xi măng giảm 765,29 kg CO₂/m³, của FA thì tăng 14,7 kg CO₂/m³, mức tăng này của FA là rất nhỏ, không đáng kể so với mức giảm phát thải của xi măng. Của các vật liệu khác thay đổi không đáng kể.

Phân tích 5 loại cấp phối cùng tỷ lệ N/CKD = 0,16 với hàm lượng tro bay thay đổi như Hình 9, ta thấy khi tăng hàm lượng sử dụng FA từ 0% lên 70% thì lượng phát thải CO₂ của xi măng giảm tương đối nhiều (từ 98,79% xuống còn 89,97%, giảm 8,82%). Giảm dần ở 0-50% FA sau đó giảm ở 50-70% FA giảm 5,55%. Bên cạnh đó, hàm lượng CO₂ của các vật liệu khác tăng, tăng nhiều nhất là của FA từ 0 lên 6,638%, lượng phát thải CO₂ của các vật liệu khác thay đổi nhưng không đáng kể.



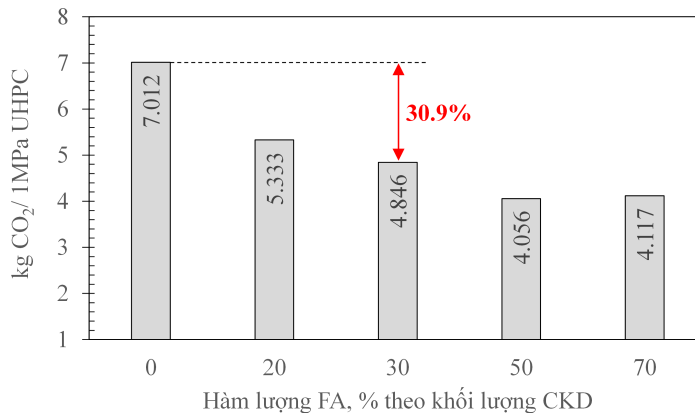
Hình 9. Mức phát thải CO₂ của từng vật liệu thành phần trong các cấp phối UHPC sử dụng hỗn hợp FA và SF, SF = 10%

Ảnh hưởng của hàm lượng CKD quy đổi để chế tạo 1 MPa UHPC sử dụng hàm lượng 10% SF và thay đổi FA từ 0-70% được thể hiện ở Hình 10. Ảnh hưởng của hàm lượng FA để chế tạo 1MPa UHPC là không đáng kể với hàm lượng từ 0-30%, nhưng lại rất đáng kể khi hàm lượng FA tăng từ 30 – 70%. Điều này là do cường độ nén ở độ tuổi 28 ngày của bê tông UHPC sử dụng tro bay hàm lượng lớn bị giảm dần, do đó lượng chất kết dính phải tăng lên (thậm chí đến 116% đối với bê tông UHPC sử dụng 70% FA) để đạt 1 MPa cường độ của bê tông. Như thế hàm lượng tối ưu dùng để chế tạo UHPC khi sử dụng 30% FA.



Hình 10. Ảnh hưởng của hàm lượng CKD sử dụng hỗn hợp FA và SF để chế tạo 1 MPa UHPC

Ảnh hưởng của phát thải CO_2 quy đổi để chế tạo 1 MPa UHPC sử dụng hàm lượng 10% SF và thay đổi FA từ 0-70% được thể hiện ở Hình 11. Khi tăng hàm lượng FA, lượng phát thải CO_2 giảm rất đáng kể khi tính quy đổi về 1 MPa cường độ nén của bê tông UHPC. Lượng phát thải CO_2 giảm rất mạnh khi tăng hàm lượng FA từ 0-30% (giảm 30,8%) sau đó giảm dần từ 30-70%. Đặc biệt khi bê tông sử dụng 70% hàm lượng FA thì lượng phát thải CO_2 đã giảm đi 41,3% so với bê tông không sử dụng FA. Đây là một điều rất quan trọng trong việc chế tạo bê tông UHPC để giảm thiểu phát thải CO_2 . Khi xét đến cường độ nén mục tiêu là 120 MPa thì hàm lượng FA sử dụng tương ứng là 30% và lượng phát thải CO_2 giảm 30,9% so với mẫu đối chứng không sử dụng hỗn hợp FA và SF.



Hình 11. Ảnh hưởng của phát thải CO_2 quy đổi để chế tạo 1 MPa UHPC sử dụng FA

4. Kết luận

Trong bê tông nói chung và UHPC nói riêng, xi măng chiếm một tỷ trọng lớn so với các loại vật liệu còn lại khi xét đến phát thải CO_2 . Do đó, để giảm tác động môi trường đối với chế tạo UHPC thì giải pháp giảm mức sử dụng xi măng bằng thay thế một phần bởi các loại phụ gia khoáng khác nhau như FA, SF và hỗn hợp FA+SF là một giải pháp hiệu quả. Kết quả cho thấy, việc sử dụng các phụ gia khoáng này để thay thế một phần xi măng giúp làm giảm đáng kể lượng phát thải CO_2 khi chế tạo bê tông UHPC, và hiệu quả này khác nhau đối với từng loại cấp phối, cụ thể như sau:

- Đối với cấp phối dùng đơn phụ gia khoáng FA, lượng phát thải CO₂ giảm rất đáng kể (23,2%) khi tăng hàm lượng FA từ 0-30%, nghĩa là giảm từ 8,569 kg CO₂-eq xuống còn 6,565 kg CO₂-eq tính cho 1 MPa UHPC;
- Đối với cấp phối dùng đơn phụ gia khoáng SF, lượng phát thải CO₂ giảm rất đáng kể 44,3% khi tăng hàm lượng SF từ 0-30%, nghĩa là giảm từ 9,168 kg CO₂-eq xuống còn 5,103 kg CO₂-eq tính cho 1 MPa UHPC;
- Đối với cấp phối dùng hỗn hợp phụ gia khoáng 10% SF và FA, lượng phát thải CO₂ (tính cho 1 MPa UHPC) giảm đáng kể 30,9% khi tăng hàm lượng FA từ 0-30%, nghĩa là giảm từ 7,012 kg CO₂-eq xuống còn 4,846 kg CO₂-eq tính cho 1 MPa UHPC.

Tài liệu tham khảo

- [1] Goel, A., Ganesh, L. S., Kaur, A. (2019). Sustainability integration in the management of construction projects: A morphological analysis of over two decades' research literature. *Journal of Cleaner Production*, 236:117676.
- [2] Hollberg, A., Ruth, J. (2016). LCA in architectural design—a parametric approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7):943–960.
- [3] Lu, K., Wang, H. et al. (2019). Estimation of building's life cycle carbon emissions based on life cycle assessment and building information modeling: a case study of a hospital building in China. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7(06):147.
- [4] Lu, K., Jiang, X., Tam, V. W. Y., Li, M., Wang, H., Xia, B., Chen, Q. (2019). Development of a carbon emissions analysis framework using building information modeling and life cycle assessment for the construction of hospital projects. *Sustainability*, 11(22):6274.
- [5] Goel, A., Ganesh, L. S., Kaur, A. (2019). Sustainability integration in the management of construction projects: A morphological analysis of over two decades' research literature. *Journal of Cleaner Production*, 236:117676.
- [6] Yung, P., Wang, X. (2014). A 6D CAD model for the automatic assessment of building sustainability. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(8):131.
- [7] <https://sdgs.un.org/goals>.
- [8] Miller, S. A., Horvath, A., Monteiro, P. J. M. (2016). Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. *Environmental Research Letters*, 11(7): 074029.
- [9] Quader, M. A., Ahmed, S., Ghazilla, R. R., Ahmed, S. (2014). CO₂ Capture and Storage for the Iron and Steel Manufacturing Industry Challenges and Opportunities. *Journal of Applied Science and Agriculture*, 9(21):60–7.
- [10] Teng, J. G., Zhao, J. L., Yu, T., Li, L.-J., Guo, Y. C. (2016). Behavior of FRP-confined compound concrete containing recycled concrete lumps. *Journal of Composites for Construction*, 20(1):04015038.
- [11] Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., Grasley, Z. (2019). Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *Journal of cleaner production*, 225:414–425.
- [12] Geng, Y., Wang, Y., Chen, J., Zhao, M. (2020). Time-dependent behaviour of 100% recycled coarse aggregate concrete filled steel tubes subjected to high sustained load level. *Engineering Structures*, 210: 110353.
- [13] Dong, Y. (2018). Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 167: 414–425.
- [14] Nijenhuis, C. V., Walbridge, S., Hansson, C. (2017). Life-cycle cost analysis of concrete structures reinforced with stainless steel reinforcing bars. *IABSE Symposium Report*, International Association for Bridge and Structural Engineering, 109(56):872–879.

- [15] Younis, A., Ebead, U., Judd, S. (2018). [Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement](#). *Construction and Building Materials*, 175:152–160.
- [16] Malhotra, V. M., Mehta, P. K. (2002). *High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories*. Ottawa, Canada.
- [17] AFGC-SETRA (2002). *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes (UHPFRC)-State of the Art*. AFGC Publication, Paris, France.
- [18] ASTM C1856-2017 (2017). [Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete](#). ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [19] Richard, P., Cheyrezy, M. H. (1994). Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. *Special Publication*, 144:507–518.
- [20] Voo, Y. L., Foster, S. J. (2010). [Characteristics of ultra-high performance ‘ductile’ concrete and its impact on sustainable construction](#). *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3(3):168–187.
- [21] Edwards, P. (2015). The rise and potential peak of cement demand in the urbanized world. *Urbanization, City Growth, and the New United Nations Development Agenda*.
- [22] Wilson, J. L., Tagaza, E. (2006). [Green buildings in Australia: drivers and barriers](#). *Australian Journal of Structural Engineering*, 7(1):57–63.
- [23] Mehta, P. K., Malhotra, V. (2002). *High-performance high-volume fly ash concrete*. ACCA.
- [24] Malhotra, V. M. (1996). [High-volume fly ash and slag concrete](#). *Concrete Admixtures Handbook*, Elsevier, 800–838.
- [25] Long, L. Đ. (2010). *Nghiên cứu sử dụng tro nhiệt điện đốt than tầng sôi tuần hoàn có khử khí sulfua (CFBC) của Nhà máy Nhiệt điện Cao Ngạn cho sản xuất vật liệu xây dựng*. Báo cáo tổng kết đề tài khoa học và công nghệ, Viện Vật liệu Xây dựng.
- [26] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., Jullien, A., Ventura, A. (2010). [LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete](#). *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12):1231–1240.
- [27] ISO 14040:2006. *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. The International Standards Organisation, Geneva, Switzerland.
- [28] Norris, G. A. (2001). [Integrating life cycle cost analysis and LCA](#). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(2):118–120.
- [29] ISO 14044:2006. *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines*. The International Standards Organisation, Geneva, Switzerland.
- [30] Baumann, H., Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker’s Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Applications*. Studentlitteratur AB, Lund, Sweden.
- [31] Consoli, F., Allen, D., Boustead, I., Fava, J., Franklin, W., Jensen, A. A., de Oude, N., Parrish, R., Perri-man, R., Postlethwaite, D., Quay, B., Séguin, J., Vigon, B. (1993). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC): Pensacola, FL, USA.
- [32] Klöpffer, W. (2008). [Life cycle sustainability assessment of products](#). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2):89–95.
- [33] TCVN ISO 14040:2000 (ISO 14040:1997). *Về quản lý môi trường - Đánh giá chu trình sống của sản phẩm - Nguyên tắc và khuôn khổ*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [34] TCVN ISO 14040:2009 (ISO 14040:2006). *Quản lý môi trường - Đánh giá vòng đời của sản phẩm - Nguyên tắc và khuôn khổ*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [35] Salehi, S., Arashpour, M., Kodikara, J., Guppy, R. (2021). [Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials](#). *Journal of Cleaner Production*, page 127936.
- [36] Yang, K.-H., Jung, Y.-B., Cho, M.-S., Tae, S.-H. (2015). [Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete](#). *Journal of Cleaner Production*, 103:774–783.