

NGHIÊN CỨU CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐỂ CHẾ TẠO DẦM BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG (UHPC) TẠI VIỆT NAM

RESEARCH ON TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR MANUFACTURING ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC) BEAMS IN VIETNAM

TS. Trần Bá Việt

Hội Bê tông Việt Nam – VCA

Email: vietbach57@yahoo.com

Điện thoại: 0903 406 501

TS. Ngô Văn Thức

Phòng KH&HTQT - Trường ĐHXD Miền Tây

Email: ngovanthuc@mtu.edu.vn

Điện thoại: 0939 423 461

KS. Lương Tiến Hùng

Công ty CP Sản tạo & Chuyển giao CN Việt Nam

Email: luongtienhungvn@gmail.com

Điện thoại: 0365 322 601

Ngày nhận bài: 28/11/2022

Ngày gửi phản biện: 07/12/2022

Ngày chấp nhận đăng: 19/12/2022

Tóm tắt:

Có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm dầm bê tông siêu tính năng (UHPC) tiền chế, như vật liệu thành phần, cấp phối hỗn hợp, điều kiện môi trường và công nghệ thi công. Bài viết này trình bày các nội dung cơ bản về việc nghiên cứu các thông số công nghệ để chế tạo dầm UHPC trong thực tiễn sản xuất tại nhà máy.

Từ khóa: Bê tông siêu tính năng – UHPC, dầm UHPC, phụ gia khoáng hoạt tính, cát thạch anh, phụ gia siêu dẻo, cốt sợi thép.

Abstract:

There are many factors affecting the quality of prefabricated ultra high performance concrete (UHPC) beams, such as component materials, mix grade, environmental conditions and construction technology. This article presents the basic contents of studying the above-mentioned technological parameters to fabricate UHPC beams in production practice at the factory.

Keywords: Ultra High Performance Concrete - UHPC, UHPC beams, active mineral additives, quartz sand, superplasticizer additive, micro steel fiber.

1. TỔNG QUAN

Nghiên cứu công nghệ bê tông siêu tính năng (UHPC) ứng dụng cho kết cấu hạ tầng xây dựng nói chung, hay là hạ tầng giao thông - cầu đường bộ nói riêng là một lĩnh vực nghiên cứu nhận được nhiều sự quan tâm của thế giới cũng như của Việt Nam hiện nay. Mặc dù đã được ứng dụng tại các nước phát triển trong khoảng gần 30 năm nay, nhưng UHPC đối với Việt Nam vẫn là một công nghệ vẫn còn rất mới, với triển vọng ứng dụng cao vì có nhiều tính năng vượt trội hơn so với bê tông thông thường. Đặc biệt, theo Quyết định “phê duyệt chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam thời kỳ 2021-2030, định hướng 2050” của Thủ tướng Chính phủ thì bê tông tiên tiến như UHPC được đề nghị ưu tiên nghiên cứu, phát triển.

Với nhiều tính năng vượt trội, UHPC cho phép chế tạo các dầm cầu với kích thước mỏng, khối lượng nhẹ, mức độ kháng ăn mòn và tuổi thọ cao, thời gian thi công ngắn cùng chi phí bảo trì rất nhỏ. Các nghiên cứu cũng như các công trình đã được thi công tại Việt Nam đã kiểm chứng sự hiệu quả của UHPC khi có cường độ chịu nén từ $120 \div 190$ MPa, cường độ chịu kéo $6 \div 14$ MPa và cường độ chịu uốn $15 \div 40$ MPa. Điều này có được là nhờ sự phối trộn hỗn hợp UHPC với các tỉ lệ vật liệu thành phần hợp lý tạo ra sự tối đa về độ đặc chắc tối đa cùng sự phân tán 3D của cốt sợi thép cường độ cao trong cấu trúc.

Ở Việt Nam, UHPC đã được chuyển

giao cho 3 công ty bê tông lớn và hoàn thành xây dựng 72 cây cầu với các kích thước dầm khác nhau tại 17 tỉnh thành trên toàn quốc. Dự án thể hiện nổi bật nhất các ưu điểm của UHPC chính là dự án “sửa chữa bản mặt cầu Thăng Long”, được bắt đầu vào cuối năm 2020 và thông xe hoạt động trở lại vào đầu năm 2021. Chỉ trong 3 tháng, đã hoàn thành thi công khoảng 2.000 m^3 UHPC tương ứng 28.000 m^2 mặt cầu với chất lượng lớp phủ đáp ứng hoàn toàn yêu cầu thiết kế. Ngoài ra còn có dự án “xây dựng cầu Vàng – Phú Thọ”, đây là lần đầu tiên ứng dụng công nghệ đúc dầm U hở UHPC dạng phân đốt dự ứng lực căng sau, đánh dấu một bước phát triển mới của UHPC tại Việt Nam.





Hình 1. Cầu Vàng là cầu sử dụng dầm UHPC phân đốt căng sau đầu tiên tại Việt Nam.

Qua những phân tích trên cho thấy việc nghiên cứu công nghệ cũng như xác định các thông số kỹ thuật để ổn định chất lượng chế tạo dầm UHPC trong thực tiễn tại Việt Nam là rất cần thiết và cấp bách.

2. VẬT LIỆU THÀNH PHẦN

2.1. Cơ sở lựa chọn vật liệu

Để có cường độ vượt trội, xi măng PC phù hợp với TCVN 2682:2009 là vật liệu bắt buộc phải có trong hỗn hợp thành phần vật liệu, với một tỉ lệ hàm lượng tương đối lớn. Silica fume (SF) phù hợp với TCVN 8826:2020 là loại phụ gia khoáng hoạt tính không thể thiếu, việc bổ sung SF không những có thể làm tăng độ đặc chắc của UHPC bằng cách lấp đầy khoảng trống giữa các hạt thô hơn nhờ kích thước hạt nhỏ mà còn làm tăng tính công tác của hỗn hợp UHPC, tăng cường độ, vì loại vật liệu này có dạng hình cầu tối ưu và bề mặt rất mịn.

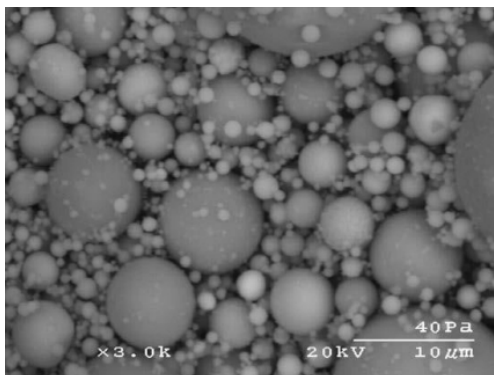
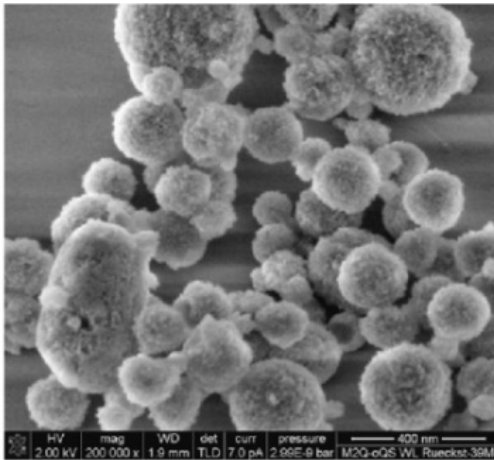
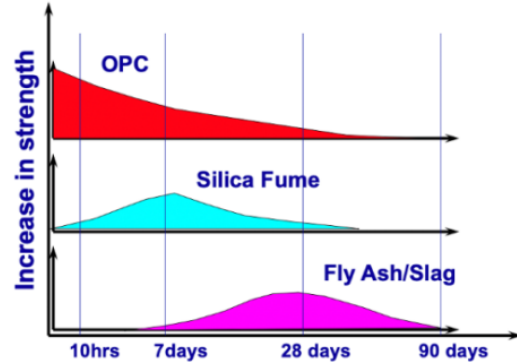


Fig. 5 Strength Development Of Cement, Silica Fume & Fly Ash/Slag



Hình 2. Tác dụng của Silicafume và GGBS đối với sự phát triển cường độ UHPC.

Cũng là loại phụ gia khoáng hoạt tính khác, tương tự như silica fume, đó chính là xỉ lò cao nghiền mịn (GGBS) phù hợp với TCVN 11586:2016. GGBS được dùng cho sản xuất UHPC với tác dụng làm tăng tính công tác và làm giảm sự co khô của UHPC nhờ hiệu ứng microfiller. Do GGBS là vật liệu phụ thu của ngành công nghiệp sản xuất thép nên có giá thành lại rất rẻ so với xi măng và silica fume. Ngoài ra, đối với vùng đồng bằng sông Cửu Long thì UHPC có thể sử dụng bổ sung hoặc thay thế một phần SF và GGBS bằng tro trấu nghiền mịn (RHA), vì tại đây RHA có nguồn cung cấp lớn và chất lượng tương đối ổn định cùng giá thành rất rẻ.

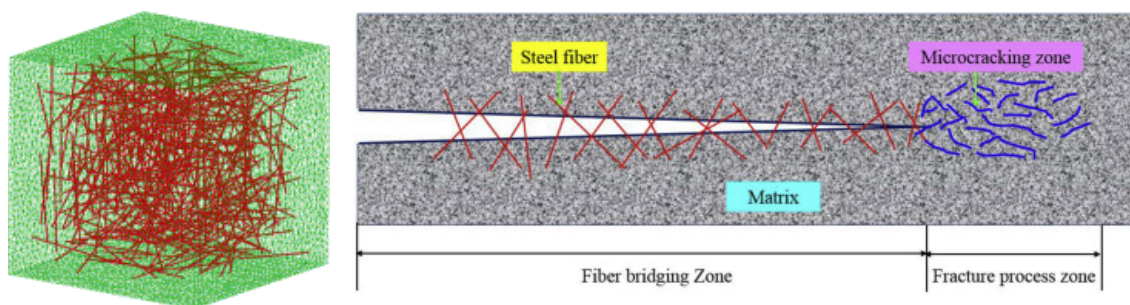
Sự hư hỏng trong các loại bê tông thường bắt đầu bởi sự phá hoại tại vùng chuyển giao thoa (ITZ) giữa chất kết dính và các hạt cốt liệu, đặc biệt là cốt liệu lớn (đá). Do đó, việc loại bỏ các cốt liệu lớn trong hỗn hợp thành phần UHPC là hoàn toàn hợp lý. Việc sử dụng cốt liệu chính là

cát thạch anh phù hợp với TCVN 9036:2011 và ACF 04:2020 làm giảm thiểu các lỗ rỗng ITZ dẫn đến độ xốp tổng thể thấp, từ đó độ bền cơ học của UHPC tăng cao.



Hình 3. Cát thạch anh – nguồn tài nguyên dồi dào và quý giá tại Việt Nam.

Khi có thêm sợi thép phân tán, UHPC tăng vượt trội về đặc tính cường độ chịu kéo – uốn. Ngoài ra, sợi thép cũng giúp tăng đáng kể khả năng chịu nén nhờ việc bọt khí bị giữ lại ít hơn và khả năng chịu biến dạng ngang đã được tăng cường.



Hình 4. Sợi thép phân tán trong kết cấu UHPC

Tính công tác của UHPC không tốt do tỉ lệ N/CKD rất thấp, điều này có thể được cải thiện bằng cách cho bổ sung phụ gia dẻo có khả năng giảm nước ở mức cao, thường dùng là loại gốc PCE phù hợp với TCVN 8826:2011 với mức giảm nước tối đa là khoảng 40%.



Hình 5. Cát thạch anh hiện chưa được khai thác một cách hợp lý.

Ngoại trừ cốt sợi thép phân tán là phải nhập khẩu, các vật liệu còn lại đều có sẵn nguồn cung cấp tại Việt Nam với chủng loại phong phú và nguồn dự trữ dồi dào.

2.2. Kiểm tra chất lượng vật liệu thành phần

Bảng 1. Kết quả kiểm tra chất lượng mẫu xi măng PC40

Nội dung		Đơn vị	PC40
Khối lượng riêng		g/cm ³	3,10
Độ dẻo tiêu chuẩn		%	28,6
Độ ổn định thể tích		mm	1,0
Độ bền uốn	3 ngày	MPa	6,5
	28 ngày		9,7
Độ bền nén	3 ngày	MPa	33,3
	28 ngày		52,6

Bảng 2. Kết quả kiểm tra chất lượng các mẫu phụ gia khoáng

Nội dung		Đơn vị	Kết quả
Silica fume	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,22
	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	310
	Độ ẩm	%	3,6
	Hàm lượng mất khi nung	%	0,6
	Hàm lượng SiO ₂	%	91,6
GGBS	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,86
	Độ ẩm	%	0,85
	Hàm lượng mất khi nung	%	3,7

Bảng 3. Kết quả kiểm tra chất lượng các mẫu cát thạch anh

Nội dung		Đơn vị	Kết quả	
			Cát hạt thô	Cát hạt mịn
Khối lượng riêng		g/cm ³	2,64	2,64
Hàm lượng tạp chất		%	0	0
Độ ẩm		%	0,3	0,5
Lượng sót tích lũy	1,25 mm	%	0,0	0,0
	0,63 mm	%	17,1	0,0
	0,315 mm	%	91,3	0,9
	0,14 mm	%	98,8	89,8
Mô đun độ lớn		-	2,1	0,9
Hàm lượng SiO ₂		%	98,41	98,25
Hàm lượng CL ⁻		%	<0,001	<0,001

Bảng 4. Kết quả kiểm tra chất lượng mẫu cốt sợi thép

Nội dung	Đơn vị	Kết quả
Tỉ lệ hướng sợi	-	65
Hàm lượng tạp chất	%	0
Tỉ lệ sợi sai kích thước hình học	%	0,5
Cường độ chịu kéo	MPa	2800

Bảng 5. Kết quả kiểm tra chất lượng mẫu phụ gia siêu dẻo

Nội dung	Đơn vị	Kết quả
Độ pH	-	6,33
Khối lượng riêng	kg/l	1,06
Hàm lượng chất khô	%	37,8
Hàm lượng tro	%	1,66
Hàm lượng Cl^-	%	0,03

3. CẤP PHỐI SỬ DỤNG

3.1. Nguyên tắc thiết kế cấp phối

Tối ưu hóa thành phần hạt là một trong những khâu then chốt của việc thiết kế cấp phối hỗn hợp UHPC.

Từ cấp cường độ yêu cầu của phần tính toán kết cấu, xác định được định mức xi măng sử dụng và các phụ gia khoáng bổ sung khác. Chú ý, hàm lượng phụ gia khoáng không được nhỏ hơn 10% xi măng và tổng hàm lượng CKD không được lớn hơn 50% tổng khối lượng thành phần UHPC. Định mức sử dụng cốt sợi thép phân tán cũng được xác định ngay lúc này, tùy thuộc vào yêu cầu về cường độ chịu kéo – uốn có thể điều chỉnh theo các mức cụ thể.

Thành phần cấp phối UHPC sẽ được

thiết kế trên cơ sở cân bằng thể tích tuyệt đối, với giả thiết có một hàm lượng bọt khí xác định, từ đó xác định hàm lượng phụ gia hoá học tối đa. Bước tiếp theo là hiệu chỉnh cân bằng thể tích và đảm bảo khối lượng thể tích $>2.450\text{kg/m}^3$. Tóm lại, cấp phối UHPC phải đảm bảo đồng thời 3 yêu cầu sau:

- Yêu cầu về tính công tác.
- Yêu cầu về tính co ngót.
- Yêu cầu về các chỉ tiêu cơ lý khác, đặc biệt là nén, kéo và uốn.

3.2. Phương pháp bảo dưỡng nhiệt ẩm

Tỷ lệ và tốc độ phản ứng thủy hoá xi măng trong UHPC có thể được tăng lên thông qua quá trình xử lý nhiệt (bảo dưỡng nhiệt ẩm: $t^\circ = 80 \pm 5^\circ\text{C}$, $RH = 100\%$)

liên tục trong 72 giờ.

Việc áp dụng kỹ thuật xử lý nhiệt này nhằm thúc đẩy phản ứng pozzolanic, dẫn đến hình thành các C-S-H, do đó tính chất cơ học cao hơn và tăng cường độ tuổi sớm ngày (sau bảo dưỡng có thể đạt từ $80 \div 95\%$ cường độ 28 ngày).

Và cùng với việc tăng cường độ, quá trình co cứng cũng gần như bị triệt tiêu chỉ sau $24 \div 72$ tiếng bảo dưỡng nhiệt ẩm,

điều đó giảm thiểu nguy cơ gây rạn nứt kết cấu đồng thời tăng nhanh tốc độ thi công UHPC

Kích thước các mẫu thí nghiệm kiểm tra tính chất cơ lý cơ bản của UHPC như sau:

- Cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi: mẫu trụ $d10 \times h20$ cm.
- Cường độ chịu kéo: mẫu $5 \times 10 \times 50$ cm.
- Cường độ chịu uốn: mẫu lập phương $10 \times 10 \times 40$ cm.



Hình 6. Công tác trộn và đúc mẫu kiểm tra chất lượng UHPC.

3.3. Thử nghiệm các tính chất của UHPC



Hình 7. Công tác kiểm tra các tính chất của hỗn hợp UHPC.



Hình 8. Công tác thử nghiệm cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của UHPC



Hình 9. Công tác kiểm tra ứng suất - biến dạng kéo và ứng suất - biến dạng uốn của UHPC



Hình 10. Công tác kiểm tra khả năng chống thấm Ion Clo của UHPC.

Bảng 6. Kết quả kiểm tra các tính chất của hỗn hợp UHPC

Nội dung	Loại mẫu	Đơn vị	UHPC 120/7
Độ chảy xoè	Suttard	cm	172
	C230		208
Hàm lượng bọt khí	Hỗn hợp UHPC	%	2,9
Biến dạng co	Co mềm – R1	µm/m	475
Khối lượng thể tích	Hỗn hợp UHPC	kg/m ³	2445
Thời gian đông kết	Bắt đầu	giờ:phút	7:55
	Kết thúc		9:15

Bảng 7. Kết quả kiểm tra các tính chất của UHPC

Nội dung	Loại mẫu	Đơn vị	UHPC 120/7	
Biến dạng co	Co khô – R28	µm/m	457	
Độ chống thấm lon Clo	UHPC	C	132	
Cường độ chịu nén	R5 sau xử lý nhiệt	MPa	130,4	132,6
			128,9	
			131,3	
	R28 sau xử lý nhiệt	MPa	135,2	138,8
			137,1	
			138,4	
Cường độ chịu kéo	R5 sau xử lý nhiệt	MPa	7,8	8,2
			8,4	
			7,9	
	R28 sau xử lý nhiệt	MPa	8,6	9,1
			8,5	
			8,1	
Cường độ chịu uốn	R28 sau xử lý nhiệt	MPa	20,4	23,0
			21,5	
			21,9	
Modul đàn hồi	R28 sau xử lý nhiệt	GPa	47,31	47,31
Hệ số Poisson's		-	0,20	0,20

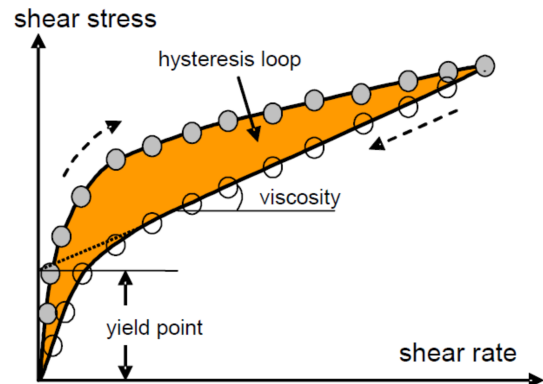
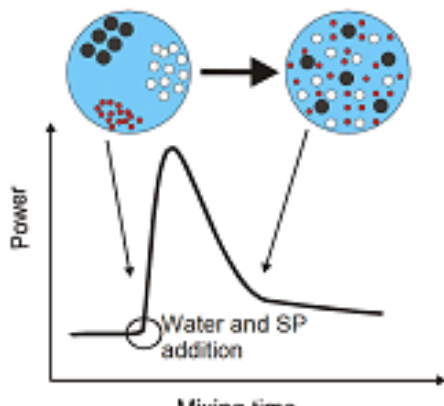
4. QUY TRÌNH CÔNG NGHỆ CHẾ TẠO

Việc xây dựng được quy trình công nghệ sản xuất thi công hoàn chỉnh có ảnh hưởng rất lớn đến tính chất UHPC cũng như chất lượng và ổn định chất lượng sản phẩm đầu ra – cấu kiện UHPC. Không những thế, nó còn ảnh hưởng đến năng suất lao động, hiệu quả kinh tế của đơn vị sản xuất, ứng dụng công nghệ này.

4.1. Công nghệ trộn

Công nghệ hay quy trình trộn có ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng hỗn hợp UHPC cũng như UHPC đã đóng rắn. Ngoài ra, nếu thực hiện quy trình trộn không phù hợp còn làm hư hại và giảm tuổi thọ của biết bị trộn.

Trộn UHPC là một quy trình phức tạp và có thể được chia thành hai phần. Đầu tiên, là trộn phân bố, trạng thái của các hạt hỗn hợp được thay đổi bởi lực và vận tốc cắt thấp. Thứ hai, là trộn phân tán, sự kết tụ của các hạt hỗn hợp được phân tán bởi vận tốc cắt lớn. Trong một thể thống nhất những hiệu ứng này được thể hiện về mặt lý thuyết là UHPC rất dễ chảy (UHPC tự lèn).



Hình 11. Công nghệ trộn có ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng của UHPC.

Do đó, các thông số trộn như hình dạng kích thước hạt, sự phân bố và sự khác biệt trong mật độ cũng như độ nhám bề mặt của chúng có tầm quan trọng chính. Để các hạt bột trong hỗn hợp có thể thay đổi trạng thái của chúng thì động năng trộn phải được cung cấp đủ lớn và lớn hơn bê tông thường rất nhiều. Tùy thuộc vào độ đặc và độ nhớt tương ứng, công suất điện và tiêu thụ điện tăng lên đáng kể. Trộn phân tán cần đảm bảo:

- Lấp đầy khoảng trống giữa các hạt thô và sợi với các hạt mịn hơn.
- Lấp đầy giữa các hạt rắn bằng nước.
- Giải phóng nước, phá các kết tụ, tạo sự phân tán và đồng nhất của các sợi.

4.2. Hệ bệ căng – sàn chế tạo

Công nghệ chế tạo dầm – cấu kiện UHPC căng trước nên được phát triển theo xu hướng công xưởng hoá và cơ giới hoá trên các line sản xuất trong nhà máy với các lí do sau:

- Có thể chế tạo hàng loạt dầm, cấu

kiện trên 1 bộ căng, rút ngắn thời gian thi công sản xuất.

- Đáp ứng yêu cầu phải có giá tạo chịu lực lớn.

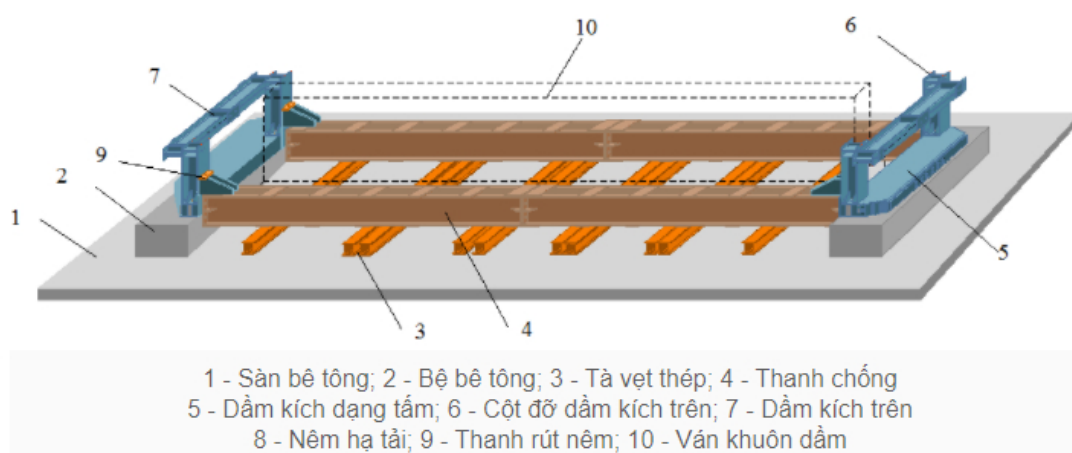
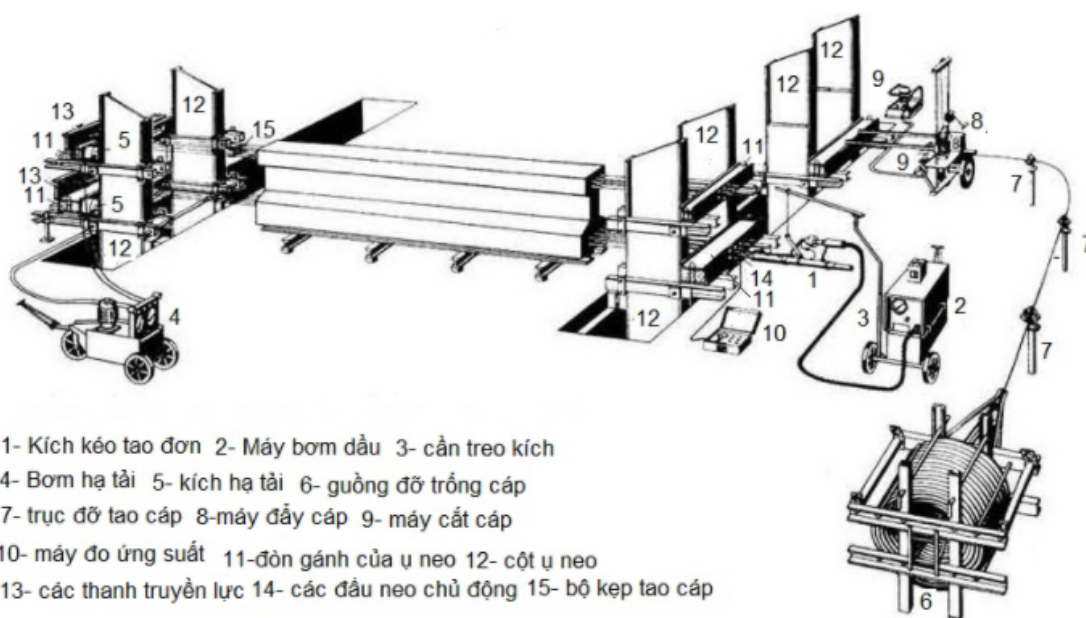
- Quy trình sản xuất được giám sát trên một dây truyền đồng bộ, sản phẩm đầu ra có chất lượng cao, ổn định.

- Có các thiết bị nâng, chuyển hỗ trợ và chủ động sản xuất không bị phụ thuộc vào điều kiện thời tiết.

Dầm UHPC có thể được sản xuất ngay trong nhà máy kiểu hệ theo một trong 2 kiểu bộ căng như sau:

- Bộ căng di động: có thể di chuyển đến các địa điểm khác nhau (nhà máy hoặc công trường), đặc biệt là luân chuyển giữa các phân xưởng.

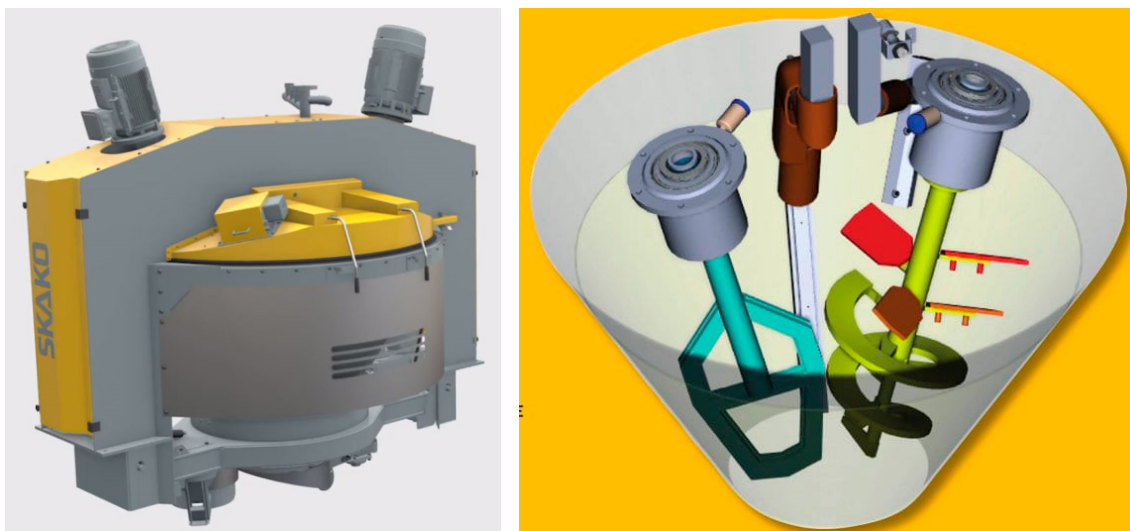
- Bộ căng cố định: cấu tạo gồm ụ neo và hồ thể với kích thước line sản xuất không có giới hạn.



Hình 12. Hệ bộ căng – sàn sản xuất được sử dụng để chế tạo dầm UHPC.

4.2. Lựa chọn thiết bị

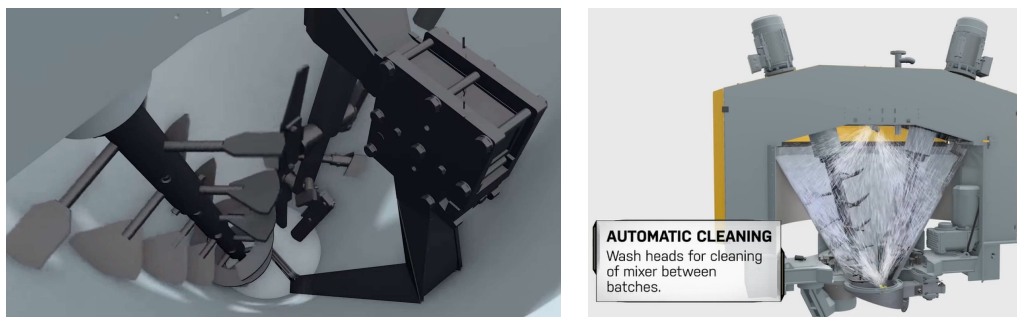
Máy SKAKO với thùng trộn hình côn dòng ROTOCONIX® là loại mới nhất hiện nay trên thế giới, nó kết hợp đồng thời các nguyên tắc trộn khác nhau. Nguyên tắc là trộn vật liệu theo mọi chiều: theo chiều dọc và chiều ngang, không có vùng chết nào trong máy trộn trong quá trình trộn.



Hình 13. Máy trộn SKAKO cho hiệu quả lớn trong chế tạo bê tông siêu tính năng – UHPC.

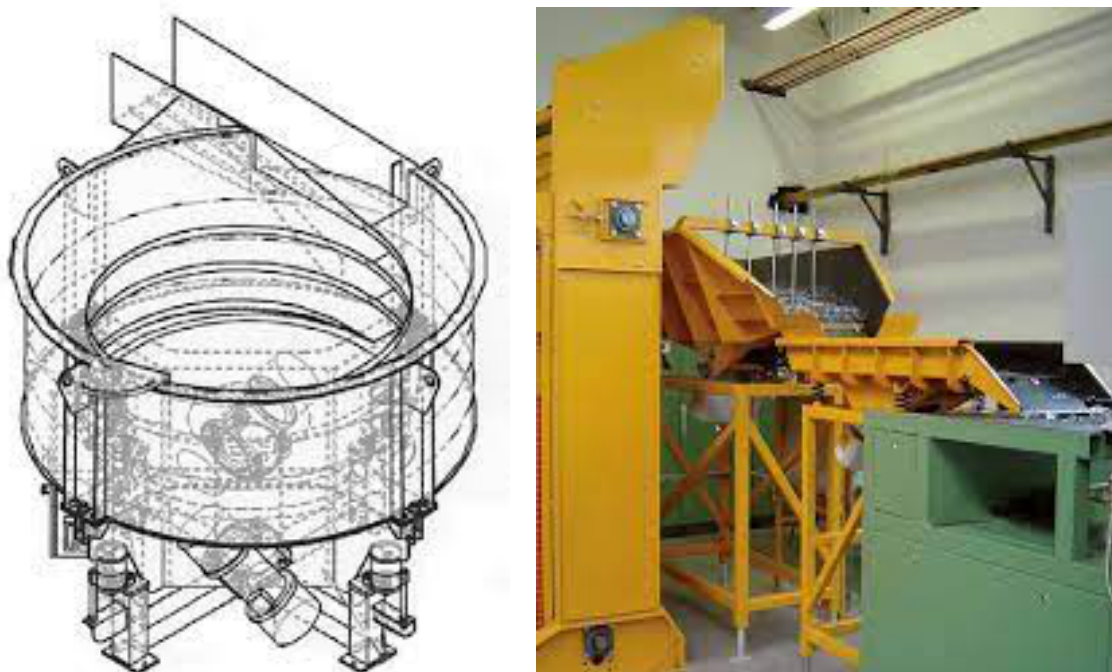
Dạng hình nón của cối trộn quay đảm bảo chất lượng trộn đồng đều không kể mẻ trộn lớn hay nhỏ.. Máy trộn kiểu conic cho phép trộn kết hợp 4 chuyển động theo hai chiều, nên tạo ra hỗn hợp đồng nhất cao. Máy tiêu thụ điện năng vừa phải, mài mòn ở mức trung bình, thời gian trộn khoảng $6 \div 8$ phút, tùy biến thay đổi mẻ trộn nhanh. Có thể làm sạch máy nhanh và triệt để, nên có thể chuyển đổi từ trộn UHPC màu ghi xám sang trộn các loại UHPC màu khác nhau.

Nhìn chung, các thử nghiệm đã chỉ ra rằng máy trộn ROTOCONIX® có thể đạt được cường độ UHPC cao hơn một cấp với một lượng xi măng nhất định. Dựa trên khả năng này, có thể tiết kiệm được một phần xi măng, máy trộn ROTOCONIX® được khuyến dùng đặc biệt hiệu quả cho UHPC kết cấu. Máy được đặt hàng sản xuất theo từng yêu cầu cụ thể về cấp, loại và công suất yêu cầu của UHPC.



Hình 14. Không xuất hiện vón cục, đảm bảo hỗn hợp bột thành phần được đồng nhất hoàn toàn.

Cùng với máy trộn cưỡng bức, để chế tạo UHPC còn cần một hệ thống thiết bị khá đặc thù, đó là thiết bị phân tán và định lượng sợi thép. Để nạp được từ từ sợi thép vào thùng trộn và tránh không bị vón cục hay không thể phân tán đều, hệ thống rung lắc để các sợi thép rời nhau ra và rắc với tốc độ vừa đủ vào trong hỗn hợp UHPC. Thời gian nạp sợi tối đa từ khoảng 1 ÷ 2 phút trong chu trình trộn UHPC. Có hai loại chính là loại sàng rung thẳng và sàng rung ly tâm được dùng cho trạm trộn UHPC, hoặc có thể kết hợp cả hai.



Hình 15. Hiện cả hai hệ thống sàng này đều đã được sử dụng để chế tạo UHPC tại Việt Nam.

Thiết bị xử lý nhiệt bao gồm nồi hơi, hệ thống dẫn hơi và buồng bảo dưỡng. Để bảo dưỡng đầm trong nhà máy nên sử dụng lò hơi cố định, bọc ngoài cấu kiện bằng bạt để tạo ra buồng bảo dưỡng.

Với cấu kiện hiện trường cần lò và nồi hơi di động, nếu đầm có chiều dài lớn thì có thể sử dụng đồng thời nhiều nồi hơi. Hệ thống nồi hơi với lò hơi đốt bằng dầu FO, hoặc đốt bằng khí gaz, cùng với bộ control nhiệt độ và hệ thống ống dẫn, van, sensor. Với bộ control có thể cài đặt tự động cho chế độ bảo dưỡng 48 giờ hoặc 72 giờ tại nhiệt độ 80°C hay 90°C, với dao động nhiệt cho phép trong buồng bảo dưỡng là 5°C.



Hình 16. Hệ thống xử lý nhiệt được sử dụng trong dự án “sửa chữa mặt cầu Thăng Long”.

5. KẾT LUẬN

- Đã nghiên cứu và chế tạo được một hệ UHPC với cường độ chịu nén ≥ 120 MPa và cường độ chịu kéo từ ≥ 7 MPa.
- Với quy trình công nghệ chế tạo đã được thiết lập, các nhà máy bê tông quy mô lớn đều có thể làm chủ công nghệ vật liệu, chế tạo cấu kiện đầm UHPC. Thời gian sản xuất nhanh, hàng loạt do đã được modul hoá.
- Các thông số công nghệ như lựa chọn thiết bị trộn chuyên dụng, thời gian trộn, quy trình trộn cũng như bảo dưỡng nhiệt ẩm đã được xác định, hoàn toàn phù hợp với điều kiện Việt Nam.
- Qua các dự án chế tạo và thi công đầm (cầu) UHPC trong hơn 5 năm qua tại nhiều tỉnh thành ở Việt Nam, trong mọi điều kiện thời tiết, cùng vật liệu và cấp phối khác nhau, đã đáp ứng được các yêu cầu thiết kế.

Tài liệu tham khảo:

- [1] BS EN 14889-1, Fibres for concrete – Steel fibres. Definitions, specifications and conformity, 2006.
- [2] AASHTO LRFD, Bridge design specifications, 2017.
- [3] FHWA-HRT-18-036, Material property characterization of ultra high performance concrete.
- [4] ACI PRC-239-18, Ultra high performance concrete, sn emerging technology report.
- [5] WB-DRVN, Report piloting and scaling up building climate resilient bridges in poor rural areas, 2019.