

TỔNG QUAN VỀ BÊ TÔNG TRONG NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN – PHẦN I: CÁC LOẠI BÊ TÔNG CHỨC NĂNG CHO CÁC HẠNG MỤC CHÍNH

OVERVIEW OF CONCRETE IN NUCLEAR POWER PLANTS – PART I: TYPES OF FUNCTIONAL CONCRETE FOR MAJOR COMPONENTS

Nguyễn Văn Hường^{1*}, Nguyễn Minh Hải¹, Nguyễn Thanh Hải¹, Nguyễn Thị Lộc²,
Nguyễn Văn Chin³, Dương Minh Quang³, Nguyễn Hữu Hải³, Nguyễn Văn Châu⁴

¹Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

²Trường Cao đẳng Giao thông Vận tải Trung ương V, Việt Nam

³Công ty Cổ phần Xây dựng 47, Việt Nam

⁴Công ty TNHH Đầu tư Xây dựng Dacinco, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: nvhuong@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 19/11/2025; Sửa bài / Revised: 31/01/2026; Chấp nhận đăng / Accepted: 16/3/2026)

DOI: 10.31130/ud-jst.2026.24(5A).651

Tóm tắt - Năng lượng điện hạt nhân đóng vai trò quan trọng trong phát triển bền vững, cung cấp nguồn năng lượng sạch đáng tin cậy và giảm phát thải khí nhà kính. Trong các nhà máy điện hạt nhân (NPP), bê tông được sử dụng làm vật liệu chức năng cốt lõi, chịu lực và đảm bảo an toàn hạt nhân qua che chắn phóng xạ. Bài báo tổng hợp các loại bê tông và ứng dụng của chúng, thành phần vật liệu và công nghệ chế tạo cho NPP, nhấn mạnh các loại như bê tông nặng, bê tông hấp thụ neutron, bê tông che chắn song hợp neutron-gamma và bê tông hiệu năng cao. Khung "thiết kế theo chức năng" được đề xuất để tối ưu hóa hiệu suất và độ bền bê tông trong môi trường khắc khe của NPP. Bài báo cũng chỉ ra tiềm năng áp dụng công nghệ vật liệu tiên tiến để nâng cao chất lượng bê tông NPP. Nội dung hướng tới cung cấp cái nhìn tổng quan, làm nền tảng cho triển khai dự án nhà máy điện hạt nhân ở Việt Nam.

Từ khóa - Nhà máy điện hạt nhân; bê tông che chắn bức xạ; bê tông nặng; bê tông hấp thụ neutron; bê tông chức năng cho điện hạt nhân; độ bền bê tông

1. Giới thiệu

Năng lượng đóng vai trò thiết yếu trong việc thúc đẩy tăng trưởng kinh tế bền vững và cải thiện chất lượng cuộc sống. Trong đó, năng lượng hạt nhân không chỉ cung cấp một nguồn năng lượng sạch và đáng tin cậy mà còn mang lại hiệu quả chi phí, giúp giảm thiểu tác động tiêu cực của biến đổi khí hậu. Vai trò của năng lượng hạt nhân trong cơ cấu năng lượng toàn cầu ngày càng trở nên quan trọng, và dự kiến sẽ tiếp tục tăng trưởng trong các thập kỷ tới. Trong nỗ lực này, Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Quốc tế (International Atomic Energy Agency: IAEA) cam kết thúc đẩy việc sử dụng năng lượng hạt nhân một cách hiệu quả và an toàn. Họ hỗ trợ các chương trình hạt nhân hiện có và phát triển mới trên toàn thế giới, đồng thời khuyến khích đổi mới và tăng cường năng lực trong quy hoạch năng lượng, phân tích, quản lý thông tin, và nâng cao kiến thức

Abstract - Nuclear power plays an important role in sustainable development, providing a reliable clean-energy source and contributing to the reduction of greenhouse gas emissions. In nuclear power plants (NPP), concrete is used as a core functional material, carrying structural loads while ensuring nuclear safety through radiation shielding. This paper summarizes the types of concrete and their applications, material composition, and manufacturing technology for NPP, highlighting specific types such as heavyweight concrete, neutron-absorbing concrete, neutron-gamma hybrid shielding concrete, and high-performance concrete, etc. A "functional design" framework is proposed to optimize the performance and durability of concrete in the challenging environments of NPP. The paper also discusses the potential for applying advanced material technologies to enhance the quality of NPP concrete. The content aims to provide an overview that serves as a foundation for the implementation of nuclear power plant projects in Vietnam.

Key words - Nuclear power plants; radiation shielding concrete; heavy concrete; neutron-absorbing concrete; functional concrete for nuclear power plants; concrete durability

về năng lượng hạt nhân [1]. Do đó, trong những năm gần đây, năng lượng hạt nhân đã nổi lên như một giải pháp quan trọng trong việc giảm thiểu phát thải khí nhà kính và ứng phó với biến đổi khí hậu. Sự phát triển này đã biến năng lượng hạt nhân thành một trọng tâm trong quá trình chuyển đổi năng lượng toàn cầu, đóng góp vào mục tiêu bền vững cho tương lai [2]. Tính đến ngày 31/10/2025, trên toàn thế giới có 31 quốc gia đang vận hành 416 nhà máy điện hạt nhân với tổng công suất lắp đặt là 376,261 GW, và 63 nhà máy điện hạt nhân đang xây dựng ở 15 quốc gia với tổng công suất là 66,19 GW [3]. Ở Việt Nam, theo "Điều chỉnh Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 ÷ 2030, tầm nhìn đến năm 2050": Giai đoạn 2030 ÷ 2035 sẽ đưa vào vận hành các Nhà máy điện hạt nhân Ninh Thuận 1&2 với quy mô đạt 4.000 ÷ 6.400 MW; Giai đoạn đến năm 2050 hệ thống cần bổ sung khoảng 8.000 MW nguồn điện

¹ The University of Danang - University of Science and Technology, Vietnam (Nguyen Van Huong, Nguyen Minh Hai, Nguyen Thanh Hai)

² Central College of Transport No. 5, Vietnam (Nguyen Thi Loc)

³ Construction Joint Stock Company 47, Vietnam (Nguyen Van Chin, Duong Minh Quang, Nguyen Huu Hai)

⁴ Dacinco Construction Investment Limited Company, Vietnam (Nguyen Van Chau)

bệ tua-bin và bệ máy phát chống rung, hố/ bể bình ngưng và hệ thống hào kỹ thuật; Ở khối công trình phụ trợ là phần còn lại của nhà máy để cung cấp tiện ích, thải nhiệt và kết nối với lưới điện. Bê tông sử dụng cho nhà trạm bơm lấy/xả nước, cửa lấy/xả nước, kênh tuần hoàn, bể nước lạnh, tháp giải nhiệt, móng máy biến áp, tuyến ống hộp, đường hầm kỹ thuật,... [16].

Trong nhà máy điện hạt nhân, bê tông được sử dụng như một hệ vật liệu theo chức năng nhằm đồng thời đáp ứng bảo vệ bức xạ, ổn định kết cấu và độ bền lâu. Ở các khu vực che chắn bức xạ lân cận vùng lò và thiết bị sơ cấp, **bê tông nặng** được dùng nhằm đảm nhiệm vai trò suy giảm (attenuation) bức xạ gamma, giảm thông lượng và năng lượng photon xuyên qua các tường bảo vệ và tường sinh sinh học. Khi trường bức xạ có neutron, cấu hình vật liệu được sử dụng là **bê tông chứa bo** và/hoặc **bê tông giàu hydro**. Tùy phổ nguồn và bố trí kết cấu, hai nhóm vật liệu này có thể bố trí phối lớp với bê tông nặng (γ -n) hoặc trộn trong một **cấp phối lai**. Trong bẫy vùng hoạt (core catcher/melt trap) của các lò phản ứng thế hệ III/III⁺ nhằm kiểm soát kịch bản tai nạn nghiêm trọng khi corium thoát khỏi bình lò thì **bê tông hy sinh** (Sacrificial Concrete: SC) được sử dụng với chủ đích giảm thông lượng nhiệt và ngăn xuyên thủng kết cấu chịu lực bên dưới.

Song song nhiệm vụ che chắn, các kết cấu gồm tường cắt, lõi cứng, sàn, dầm, bệ máy, móng và nhà bao che thường sử dụng **bê tông tính năng cao** (HPC) nhằm duy trì độ bền lâu, tính toàn vẹn vật liệu và khả năng chịu tải trong điều kiện nhiệt-âm-bức xạ và tải trọng phức hợp. Với các cấu kiện có kích thước lớn (bản móng, tường dày, bệ thiết bị) thì triển khai **bê tông khối lớn**; đối với các vùng cốt thép dày, chi tiết xuyên qua và bề mặt lớp lót thép phức tạp thì **bê tông tự lèn** (SCC) là giải pháp để tăng khả năng điền đầy và độ đồng nhất vật liệu. Ngoài ra, các hạng mục hệ thống nước làm mát và công trình phụ trợ sử dụng bê tông có độ chống thấm cao và **bê tông kháng xâm thực** do môi trường (nước biển, clo, sunfat,...); các hạng mục thi công dưới nước áp dụng **bê tông chống rửa trôi** để đảm bảo tính toàn vẹn hỗn hợp và chất lượng lớp đổ. Sự phối hợp có chủ đích các loại bê tông này tạo nên kiến trúc vật liệu tối ưu, bảo đảm các mục tiêu cốt lõi về an toàn bức xạ, chịu lực và độ bền của NPP.

2.2.1. Bê tông nặng che chắn gamma và các biến thể bê tông nặng

Bê tông nặng (heavyweight concrete – HWC) là vật liệu che chắn gamma chủ đạo trong các tường sinh học và vùng bảo vệ quanh lò của NPP. Khác với bê tông thông thường, HWC dùng cốt liệu tỷ trọng cao như barit (BaSO_4), magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) hoặc ilmenit (FeTiO_3) để bê tông đạt khối lượng riêng khoảng 3,4÷3,9 tấn/m³, qua đó tăng hệ số suy giảm tuyến tính và giảm thông lượng photon đến mức yêu cầu. Việc lựa chọn cốt liệu phải tuân thủ nhận dạng khoáng vật, khối lượng riêng và tạp chất theo ASTM C637 [17] và ASTM C638 [18]; và quy trình sản xuất, vận chuyển, thi công HWC phù hợp với ACI 304.3R [19] nhằm kiểm soát phân tầng và bảo đảm độ đồng nhất mật độ theo chiều cao đổ. Chiều dày che chắn không chọn theo kinh nghiệm đơn thuần mà

được xác định bằng mô phỏng gắn với phổ nguồn và kích thước hình học cụ thể, hiện nay ưu tiên mô phỏng Monte Carlo theo ANSI/ANS-6.4 [20] và quy đổi liều theo ANSI/ANS-6.1.1 [21]; các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy cốt liệu oxit sắt, barit, magnetit cho hiệu quả suy giảm gamma cao, song đi kèm nguy cơ tăng phân tầng của hỗn hợp bê tông nếu đường thành phần hạt của cốt liệu không liên tục [22], [23].

Ở các vị trí cốt thép dày, hình dạng phức tạp, bê tông tiếp giáp, vùng quanh ống xuyên, vị trí khó đầm, hạn chế đầm (sợ biến dạng),... trong NPP, thì HWC sẽ biến thể thi công thành dạng bê tông nặng tự lèn (Heavyweight – Self Consolidating Concrete: HW-SCC). HW-SCC tích hợp hiệu quả các loại cốt liệu nặng của HWC với công nghệ tự đầm của SCC nhằm đáp ứng yêu cầu kỹ thuật khắt khe cả tính toàn vẹn về cấu trúc và khả năng che chắn bức xạ hiệu quả. Điều này đạt được nhờ điều chỉnh tỷ lệ giữa các thành phần như cốt liệu, hỗn hợp chất kết dính và đặc biệt là dùng phụ gia siêu dẻo gốc PCE kết hợp phụ gia tăng độ nhót (VMA) [24]. Tiêu chí đánh giá bê tông HW-SCC dựa trên các tiêu chí kỹ thuật như: độ chảy loang (slump-flow), độ nhót (viscosity), khả năng chảy qua hộp L (L-box), khả năng chảy qua vòng J (J-ring), chảy qua phễu V (V-funnel) theo ACI 237R [25]; đối với HW-SCC, cần tiến hành đổ thử trên với kích thước thật (mock-up) để chứng minh hỗn hợp bê tông không phân tầng theo cao độ và khả năng duy trì mật độ mục tiêu trong thời gian vận chuyển và thi công [19], [21].

Ở các tường che chắn dày, bệ máy và bản móng, HWC thường làm việc trong điều kiện bê tông khối lớn (Mass Concrete: MC). Trong trường hợp này bê tông nặng sẽ biến thể thành bê tông nặng khối lớn (Heavyweight – Mass Concrete: HW-MC). Nên HW-MC ngoài yêu cầu khối lượng riêng lớn để che chắn gamma còn phải kiểm soát nghiêm nhiệt thủy hóa và nứt nhiệt. Ở phương diện nhiệt, theo ACI 207 [26], khi thiết kế và thi công yêu cầu xác lập các thông số kỹ thuật mục gồm: nhiệt độ của hỗn hợp bê tông khi đổ (T_f), chênh lệch nhiệt độ trong khối (ΔT) và nhiệt độ lớn nhất ($T_{\max}$) để tránh nứt và đảm bảo độ bền. Điều này có thể đạt được bằng cách: dùng hỗn hợp chất kết dính có nhiệt thủy hóa thấp (tăng SCMs như tro bay, xỉ lò cao,...), làm mát vật liệu, đổ phân đoạn, cách nhiệt bề mặt, bảo dưỡng ẩm kéo dài, và với khối rất dày có thể bố trí ống đối lưu nhiệt; nếu không, ứng suất kéo do nhiệt có thể gây nứt, làm giảm khả năng chống thấm, giảm độ bền bởi tổn công nội sun phát do hình thành ettringite gián đoạn [27], [28]. Các quy trình đánh giá lão hóa cho kết cấu bê tông NPP cũng nhấn mạnh rằng nứt do nhiệt làm tăng thấm và suy giảm hiệu quả che chắn bức xạ, do đó quản lý nhiệt ngay từ thiết kế là điều kiện tiên quyết để bảo toàn chức năng của HW-MC [29].

Tóm lại, HWC cho NPP nên được nhìn nhận theo ba lớp kỹ thuật: (i) vật liệu che chắn gamma HWC, (ii) khả năng tự chảy và tự điền đầy với HW-SCC, và (iii) nhiệt – độ bền trong điều kiện khối lớn với HW-MC. Khi ba lớp kỹ thuật này được tích hợp và xác nhận bằng đo mật độ cùng đo liều tại hiện trường thì hệ che chắn bê tông đạt hiệu năng thiết kế và độ bền vận hành mong muốn.

2.2.2. Bê tông hấp thụ neutron

Trong các không gian lân cận nguồn neutron (vùng lò, đường ống sơ cấp và khoang thao tác phụ cận) của NPP, bê tông hấp thụ neutron (Neutron Shielding Concrete: NSC) được sử dụng để đảm bảo an toàn, giảm bức xạ neutron và duy trì hiệu quả hoạt động của hệ thống. Bê tông hấp thụ neutron cho NPP được thiết kế theo sự phối hợp của hai cơ chế: (i). giảm tốc (moderation) để hạ năng lượng neutron về miền nhiệt; và (ii). hấp thụ (capture) để loại bỏ neutron khỏi trường bức xạ. Hai họ vật liệu tương ứng là bê tông giàu hydro (hydrogenous concrete) và bê tông chứa bo (borated concrete).

Bê tông giàu hydro được thiết kế để tăng tiết diện tán xạ đàn hồi hiệu dụng đối với neutron nhanh, rút ngắn quãng đường giảm tốc về năng lượng thấp (miền nhiệt); nhờ đó, thông lượng neutron tại bề mặt kiểm soát giảm đáng kể. Giải pháp vật liệu gồm cốt liệu /hạt giàu hydro (serpentine, perlite bão hòa, hạt polyetylene) phối trộn với hồ xi măng. Nghiên cứu thực nghiệm cho thấy khi tăng hàm lượng hydro làm giảm hệ số truyền qua của neutron, nhưng kéo theo thách thức về tính công tác, tính đồng nhất (nguy cơ phân tầng và /hoặc tách nước) [22], [30]. Ngoài ra, về độ bền, cần đánh giá ổn định thể tích (giãn nở nhiệt – ẩm), lão hóa, nguy cơ bóc tách tại mặt phân giới giữa hồ xi măng và hạt giàu hydro trong điều kiện làm việc (nhiệt – ẩm – bức xạ) đặc thù của NPP.

Bê tông chứa bo được thiết kế bằng cách bổ sung hạt hấp thụ neutron nhiệt từ đồng vị ^{10}B , thường phân tán dưới dạng hạt boron carbide (B_4C). Việc sử dụng hạt B_4C nhằm tăng tiết diện hấp thụ vĩ mô và loại bỏ neutron đã được giảm tốc một cách hiệu quả thông qua phản ứng (n, α) [31]. Về cấp phối, hạt B_4C cho hiệu quả hấp thụ cao nhưng có thể làm giảm cường độ và ảnh hưởng đến thời gian đóng rắn, do đó tỷ lệ B_4C thường ở mức phù hợp trong điều kiện cụ thể và cần đảm bảo nó được phân bố đồng nhất nhằm tránh làm sai lệch trường liều; borat tan (axít boric (H_3BO_3), borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)) chỉ nên dùng rất hạn chế vì có thể cho bê tông chậm đông kết và ảnh hưởng đến độ bền [22]. Ngoài ra, phản ứng bắt neutron bởi đồng vị ^{10}B có thể tạo ra các bức xạ thứ cấp, chẳng hạn như tia gamma, do đó đòi hỏi các biện pháp che chắn bổ sung. Hơn nữa, tính ổn định và độ bền lâu của bê tông chứa bo trong môi trường bức xạ cần được đánh giá cẩn thận. Việc tiếp xúc với bức xạ có thể ảnh hưởng đến các đặc tính cơ học và vật lý của bê tông theo thời gian, tác động đến hiệu suất che chắn của nó.

2.2.3. Bê tông che chắn song hợp neutron – gamma

Trong thiết kế, bê tông che chắn song hợp neutron – gamma (Neutron–Gamma Shielding Concrete: NGSC) được sử dụng để che chắn đồng thời gamma và neutron, hai hướng triển khai được sử dụng rộng rãi và hỗ trợ cho nhau: (i). hệ hai lớp (L-NGSC); và (ii). cấp phối lai (H-NGSC). Với cấu hình hai lớp, lớp giàu hydro và /hoặc chứa bo được bố trí gần nguồn để giảm tốc và hấp thụ neutron, kế tiếp là lớp bê tông nặng (barit, magnetit, hematit, ilmenit) để suy giảm gamma (bao gồm gamma bức xạ nguyên tử và bức xạ thứ cấp phát sinh khi ^{10}B bắt neutron); chiều dày từng lớp được tối ưu bằng mô phỏng Monte Carlo theo khung ANSI/ANS-6.4 [20] và

quy đổi liều theo ANSI/ANS-6.1.1 [21]. Ở cấu hình cấp phối lai, một cấp phối duy nhất kết hợp cốt liệu nặng với B_4C và hạt giàu hydro nhằm che chắn song hợp neutron – gamma trong một lớp. Loại cấp phối lai thích hợp cho các vùng hạn chế không gian hoặc quanh các lỗ xuyên; tuy vậy cần kiểm soát tính công tác, đồng nhất, khối lượng riêng và cần thực hiện khối đổ thử trước thi công đại trà theo ASTM C637 [17] và ACI 304.3R [19]. Ngoài ra, trong thực tế, tùy theo điều kiện cụ thể, bê tông che chắn song hợp neutron – gamma cũng có biến thể dưới dạng bê tông khối lớn và bê tông nặng tự lên tương ứng được kiểm soát theo ACI 207 [26] và ACI 237R [25]. Dù áp dụng cấu hình hai lớp hay cấp phối lai, hiệu năng che chắn cuối cùng phải được xác nhận tại hiện trường bằng đo suất liều trên các tuyến tới hạn và so sánh với kết quả mô phỏng bức xạ theo dữ liệu thực tế thi công, phù hợp khung phân tích của ANSI/ANS-6.4 [20] và quy đổi liều theo ANSI/ANS-6.1.1 [21].

2.2.4. Bê tông hy sinh

Bê tông hy sinh là loại bê tông chức năng đặc thù được bố trí phía trên lớp kết cấu chịu lực trong bể vùng hoạt của các lò phản ứng thế hệ III/III⁺, nhằm giảm nhẹ hậu quả tương tác corium với kết cấu khi có tai nạn nghiêm trọng [32]. Khác với bê tông kết cấu thông thường, bê tông hy sinh được thiết kế có chủ đích để bị tan chảy hoặc phân hủy có kiểm soát khi tiếp xúc với vật liệu nóng chảy vùng hoạt nhằm làm loãng corium, qua đó hấp thụ năng lượng, hạ thấp thông lượng nhiệt truyền xuống nền chịu lực. Đặc trưng quan trọng của bê tông hy sinh là nhiệt độ nóng chảy thấp, entanpi nóng chảy lớn, đồng thời giảm sinh khí khi phân hủy ở nhiệt độ rất cao. Do đó, về thành phần, bê tông hy sinh thường có hàm lượng SiO_2 , CaO và Al_2O_3 cao, sử dụng cốt liệu silic hoặc alumin, xi măng ít kiềm, và có thể bổ sung oxit sắt hoặc oxit nhôm để điều chỉnh tính chất hóa học của corium sau phản ứng [33]. Các yếu tố này quyết định khả năng tạo lớp dung nham corium ổn định và duy trì truyền nhiệt đối lưu – bức xạ có kiểm soát. Hiệu năng của bê tông hy sinh được đánh giá thông qua thí nghiệm mô phỏng sự tương tác giữa vật liệu vùng hoạt nóng chảy và bê tông (Molten Core–Concrete Interaction: MCCI).

2.2.5. Các loại bê tông khác

Ngoài nhóm bê tông che chắn bức xạ (gamma, neutron và song hợp gamma–neutron), nhà máy điện hạt nhân còn đòi hỏi một hệ bê tông chức năng “phì che chắn” nhưng trực tiếp gắn với an toàn kết cấu, kín nước và độ bền. Các kết cấu thuộc phân loại địa chấn cấp I (seismic category I) thường sử dụng bê tông hiệu năng cao (High Performance Concrete: HPC) với cường độ từ 30 MPa đến 70 MP, mô đun đàn hồi ổn định, hệ số thấm ion nhỏ và bền lâu dưới tác động của nhiệt – ẩm – bức xạ và môi trường xâm thực [8], [34]. Bê tông siêu hiệu năng (Ultra-High Performance Concrete: UHPC) ít dùng đại trà nhưng hữu ích cho hạng mục cục bộ trong NPP như: lớp phủ yêu cầu chống thấm và kháng xâm thực cao, tấm mỏng chịu va đập và gia cường vùng chi tiết phức tạp. Nhờ cường độ nén và uốn /kéo rất cao và độ thấm cực thấp, UHPC giúp giảm bê dày, tăng độ bền khi không gian hạn chế [35], [36]. Ở một số hạng mục chịu va đập và tải

trọng cục bộ, bong tróc khi cháy, bê tông sợi thép (Steel Fiber Reinforced Concrete: SFRC) được dùng cục bộ để tăng độ dẻo và khả năng phân tán năng lượng, hạn chế lan truyền nứt và giảm vỡ [37], [38].

Ngoài ra, một số công nghệ vật liệu tiên tiến đã và đang được nghiên cứu để cải thiện hiệu quả và hiệu suất của bê tông che chắn phóng xạ và kết cấu trong NPP, một số trong số đó bao gồm: vật liệu nano, khoáng chất và cốt liệu kim loại nặng, gia cường bằng cốt sợi kim loại và phi kim, bê tông nhẹ hơn và độ dày nhỏ hơn, vật liệu tái chế thân thiện môi trường,... Những công nghệ và cải tiến mới này hứa hẹn sẽ cải thiện hiệu suất, hiệu quả, chi phí và tính bền vững của bê tông chắn bức xạ, giúp vật liệu

bê tông hiệu quả hơn khi ứng dụng trong các nhà máy điện hạt nhân [14].

2.3. Thiết kế bê tông theo chức năng cho nhà máy điện hạt nhân

Như phân loại các loại bê tông chức năng ở mục 2.2 nhận thấy rằng, trong nhà máy điện hạt nhân, việc lựa chọn bê tông không thể dựa trên một chỉ tiêu đơn lẻ mà phải tuân theo cách tiếp cận thiết kế theo chức năng (functional design). Khung tiếp cận này lấy theo yêu cầu chức năng chi phối của từng hạng mục làm điểm xuất phát, từ đó xác định các chỉ tiêu thiết kế, thông số vật liệu và loại bê tông phù hợp, nhằm đảm bảo an toàn hạt nhân, an toàn kết cấu và độ bền.

Bảng 1. Ảnh xạ yêu cầu chức năng - loại và biến thể bê tông – thông số vật liệu chi phối – rủi ro kỹ thuật – tiêu chí thí nghiệm – hạng mục áp dụng trong NPP

Yêu cầu chức năng	Loại bê tông	Biến thể	Thông số vật liệu chi phối	Rủi ro kỹ thuật	Tiêu chí thí nghiệm	Hạng mục NPP
Che chắn gamma	Bê tông nặng (HWC)	HW-SCC; HW-MC	Loại và cấp phối hạt của cốt liệu nặng; số nguyên tử hiệu dụng (Z); phụ gia hóa học.	Phân tầng; không đồng nhất mật độ; nứt do nhiệt.	Khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông và bê tông; quét mật độ gamma; kiểm chứng liều.	Tường sinh học; tường bảo vệ lò; nhà bao che.
Giám thông lượng neutron	Bê tông hấp thụ neutron (NSC)	NS-SCC; NS-MC	Hàm lượng Hydro; hàm lượng ¹⁰ B; tổng xuyên thấu của neutron; phụ gia hóa học.	Tách nước; phân bố B ₄ C không đều; kéo dài thời gian đóng rắn; suy giảm đặc tính cơ học; nứt do nhiệt.	Phân bố B ₄ C; tính lưu biến của hỗn hợp bê tông; suy giảm neutron.	Vùng lân cận lò; khoang thao tác; kênh nhiên liệu.
Che chắn gamma và neutron	Bê tông song hợp (NGSC)	L-NGSC (2 lớp); H-NGSC (lai)	Cốt liệu nặng; số nguyên tử hiệu dụng (Z); hàm lượng Hydro; hàm lượng ¹⁰ B; phụ gia hóa học.	Khó tối ưu phổ bức xạ; khó thi công.	Đo liều trên tuyến tới hạn; kiểm soát theo HWC và NSC.	Tường che chắn tổng hợp; vùng xuyên ống.
Tan chảy khi tiếp xúc với vật liệu nóng chảy vùng hoạt	Bê tông hy sinh (SC)		Cốt liệu; hỗn hợp chất kết dính; oxit.		Thí nghiệm mô phỏng tương tác MCCI.	Bẫy vùng hoạt của lò phản ứng.
Giới hạn rò rỉ khí/ nước	Bê tông kín khí/ kín nước		Cốt liệu; hỗn hợp chất kết dính; phụ gia hóa học.		Độ rỗng; độ thấm.	Nhà bao che; bể nhiên liệu đã qua sử dụng; kênh nhiên liệu.
Kháng địa chấn, kiểm soát nứt	HPC	SFRC; UHPC	Cốt liệu; hỗn hợp chất kết dính; phụ gia hóa học.		Cường độ (nén, uốn); mô đun đàn hồi.	Kết cấu thuộc phân loại địa chấn cấp I.
Tự lèn, lấp đầy	Bê tông tự lèn (SCC)		Cốt liệu; hỗn hợp chất kết dính; phụ gia hóa học		Độ chảy loãng; độ nhót; khả năng chảy qua hộp L; khả năng chảy qua vòng J; chảy qua phễu V.	Vùng cốt thép dày; vùng xuyên ống.
Kiểm soát nhiệt thủy hóa	Bê tông khối lớn (MC)		Hỗn hợp chất kết dính; cốt liệu; phụ gia hóa học.		Nhiệt độ bê tông khi đổ; chênh lệch nhiệt độ; nhiệt độ lớn nhất.	Móng lò; bể thiết bị.

Quy trình thiết kế bê tông theo chức năng cho NPP có thể triển khai theo năm bước chính:

- Bước 1: xác định yêu cầu chức năng của hạng mục (che chắn gamma, hấp thụ neutron, che chắn song hợp neutron – gamma, chịu lực, kín nước/kín khí, kháng địa chấn,...);
- Bước 2: lượng hóa các yêu cầu thành các chỉ tiêu thiết

kế (suất liều cho phép, thông lượng neutron dư, khối lượng riêng yêu cầu, cường độ, giới hạn nhiệt độ, cấp chống thấm,...);

- Bước 3: xác định loại bê tông chức năng và biến thể thi công phù hợp (bê tông nặng, bê tông hấp thụ neutron, bê tông song hợp neutron – gamma, bê tông tự lèn, bê tông khối lớn,...);

- Bước 4: xác định các thông số vật liệu chi phối (loại cốt liệu, khối lượng riêng, hàm lượng hydro hoặc bo, thành phần chất kết dính, loại phụ gia);

- Bước 5: xác nhận thiết kế thông qua mô phỏng bức xạ, đổ thử trên với kích thước thật (mock-up), kiểm soát thi công và đo kiểm hiện trường.

Đầu vào của quá trình thiết kế bê tông theo chức năng bao gồm vị trí hạng mục trong NPP, đặc trưng nguồn bức xạ, yêu cầu an toàn và độ bền và tiêu chuẩn áp dụng; đầu ra là hệ giải pháp bê tông (hỗn hợp bê tông và bê tông) bao gồm loại vật liệu, thông số cấp phối mục tiêu, phương án thi công và yêu cầu kiểm soát chất lượng. Giải pháp chỉ được chấp nhận khi đồng thời đáp ứng yêu cầu an toàn bức xạ, an toàn kết cấu, khả năng thi công và độ bền, trong đó an toàn hạt nhân là tiêu chí ưu tiên cao nhất. Để làm rõ mối liên hệ giữa các yêu cầu chức năng chi phối trong nhà máy điện hạt nhân và giải pháp bê tông tương ứng, Bảng 1 trình bày ma trận ánh xạ giữa mục tiêu chức năng, loại và biến thể bê tông, các thông số vật liệu chi phối, rủi ro kỹ thuật, tiêu chí thí nghiệm và các hạng mục áp dụng điển hình trong NPP.

3. Kết luận

Dựa trên tài liệu hiện có, các kết quả nghiên cứu khoa học và tiêu chuẩn và hướng dẫn thiết kế quốc tế, bài báo đã tổng hợp các yêu cầu cũng như công nghệ liên quan đến bê tông cho các nhà máy điện hạt nhân. Các kết luận chính bao gồm:

- Trong các công trình NPP, bê tông là vật liệu nền tảng thiết yếu, đóng vai trò đặc biệt quan trọng. Bê tông được sử dụng như một hệ vật liệu chức năng vừa là kết cấu chịu lực chính, vừa là “hàng rào kỹ thuật” quan trọng bảo đảm an toàn hạt nhân thông qua chức năng che chắn phóng xạ;

- Bê tông sử dụng cho nhà máy điện hạt nhân phải đáp ứng đồng thời nhiều yêu cầu khắt khe về cơ học, độ bền lâu, tính ổn định thể tích, khả năng chịu nhiệt độ cao, chống thấm, ổn định vi cấu trúc dưới bức xạ và đặc biệt là khả năng hạn chế phát tán bức xạ;

- Khung “thiết kế theo chức năng” là nền tảng hợp lý cho bê tông trong NPP: nhóm che chắn bức xạ (bê tông nặng che chắn gamma; bê tông giàu hydro và /hoặc chứa hấp thụ neutron; bê tông che chắn song hợp neutron – gamma), bê tông hy sinh và nhóm phục vụ an toàn kết cấu, kín nước, bền lâu, kháng xâm thực hình thành một hệ thống vật liệu đồng bộ, hiệu quả và an toàn cho NPP;

- Đối với bê tông nặng và bê tông che chắn song hợp sẽ phát triển hai biến thể bê tông tự lèn (khu vực cốt thép dày, hình học phức tạp) và bê tông khối lớn là then chốt để bảo đảm đồng nhất mật độ, khả năng điền đầy và kiểm soát nhiệt và nứt do nhiệt;

- Đối với các hạng mục công trình trong NPP yêu cầu mức độ an toàn địa chấn cấp I, việc sử dụng bê tông hiệu năng cao được khuyến nghị nhằm đảm bảo độ bền lâu dài, khả năng kín nước và kín khí, cũng như khả năng chịu tải tốt và độ ổn định cấu trúc cao. Đối với các kết cấu bê tông thủy công trong môi trường xâm thực, cần thiết phải sử

dụng bê tông có khả năng kháng xâm thực và kín nước để ngăn ngừa tác động tiêu cực từ môi trường;

- Mặc dù, bê tông siêu hiệu năng chưa được sử dụng rộng rãi trong các công trình NPP, nó vẫn có tiềm năng ứng dụng trong các lớp phủ kháng xâm thực, cấu kiện mỏng chịu va đập, và gia cường các chi tiết kỹ thuật trong một số tình huống nhất định. Đồng thời, bê tông cốt sợi cũng mang lại giá trị quan trọng trong một số ứng dụng cụ thể, nhằm nâng cao độ dẻo, khả năng tiêu tán năng lượng và hạn chế sự lan truyền nứt hoặc hiện tượng bóc tách.

Thông qua bài báo này và hai phần tiếp theo của chuỗi bài báo về bê tông cho NPP sẽ lần lượt đi sâu vào bê tông che chắn bức xạ (Phần II) và độ bền của bê tông (Phần III), nhóm tác giả mong muốn đóng góp vào việc xây dựng một khung tham chiếu toàn diện để cung cấp nền tảng vững chắc cho việc lựa chọn và quản lý chất lượng bê tông trong các dự án NPP nhằm hỗ trợ mục tiêu phát triển năng lượng bền vững tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] IAEA, “Energy is essential for sustainable economic growth and improved human welfare,” IAEA, 2025. <https://www.iaea.org/topics/energy> (accessed Nov. 01, 2025).
- [2] X. Guo *et al.*, “Temperature gradient method for extracting background temperature and calculating temperature rise area of nuclear power plants’ thermal discharge,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 187, p. 105850, 2025.
- [3] IAEA, “In Operation & Suspended Operation” 2025. <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx> (accessed Oct. 31, 2025).
- [4] Prime Minister, *Adjustment of the National Power Development Plan for the period 2021–2030, with a vision to 2050*, No. 768/QĐ-TTg, 2025.
- [5] A. M. Neville, “Properties of Concrete, Pearson Education Limited,” *Edinburgh Gate, Harlow Engl.*, pp. 58–661, 2011.
- [6] C. B. Prabir, L. Pierre, and J. N. Dan, “Nuclear power plant concrete structures,” *Trans. SMiRT*, vol. 22, pp. 18–23, 2013.
- [7] D. J. Naus, “Primer on durability of nuclear power plant reinforced concrete structures-A review of pertinent factors”, Oak Ridge National Laboratory, USA, Report ORNL/TM-2006/529, February 2007.
- [8] *Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures*, ACI 349-01, 2001.
- [9] IAEA, “Ageing management of concrete structures in nuclear power plants”, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, Technical Report No. NP-T-3.5, 2016.
- [10] P. Bamonte and P. G. Gambarova, *Infrastructure Systems for Nuclear Energy*, John Wiley & Sons, 2013.
- [11] B. Qi, X. Xiao, J. Liang, L. C. Po, L. Zhang, and J. Tong, “An open time-series simulated dataset covering various accidents for nuclear power plants,” *Sci. data*, vol. 9, no. 1, p. 766, 2022.
- [12] Editorial Board of the Vietnam Energy Magazine, “Ninh Thuận 1 and 2 Nuclear Power Projects – Government Considers Experts’ Proposed Solutions”, *nangluongvietnam.vn*, 09/4/2025. [Online]. Available: <https://nangluongvietnam.vn/du-an-dien-hat-nhan-ninh-thuan-1-va-2-chinh-phu-xem-xet-giai-phap-de-xuat-cua-chuyen-gia-33962.html> [accessed Sep. 19, 2025].
- [13] I. G. Alhindawy, H. Gamal, A. H. Almuqrin, M. I. Sayyed, and K. A. Mahmoud, “Impacts of the calcination temperature on the structural and radiation shielding properties of the NASICON compound synthesized from zircon minerals,” *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 55, no. 5, pp. 1885–1891, 2023.
- [14] S. Barbhuiya, B. B. Das, P. Norman, and T. Qureshi,

- "A comprehensive review of radiation shielding concrete: Properties, design, evaluation, and applications," *Struct. Concr.*, vol. 26, no. 2, pp. 1809–1855, 2025.
- [15] M. A. H. Abdullah *et al.*, "Recent trends in advanced radiation shielding concrete for construction of facilities: materials and properties," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 14, p. 2830, 2022.
- [16] Albert Einstein, "Nuclear Power Plant", *nuclear-power.com*, may. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/> [accessed Sep. 26, 2025].
- [17] *Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete*. ASTM C637-20, 2020.
- [18] *Standard Descriptive Nomenclature of Constituents of Aggregates for Radiation-Shielding Concrete*, ASTM C638-20, 2020.
- [19] *Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing*, ACI 304.3R-20, 2020.
- [20] *Nuclear Analysis and Design of Concrete Radiation Shielding for Nuclear Power Plants*, ANSI/ANS-6.4-2006 (R2021), 2021.
- [21] *Photon and Neutron Fluence-to-Dose Conversion Coefficients*, ANSI/ANS-6.1.1, 2020.
- [22] I. Akkurt, C. Basyigit, S. Kilincarslan, B. Mavi, and A. Akkurt, "Radiation shielding of concretes containing different aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 2, pp. 153–157, 2006.
- [23] K.-H. Yang, J.-S. Mun, and H. Lee, "Workability and mechanical properties of heavyweight magnetite concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 111, no. 3, p. 273, 2014.
- [24] K. Kalauni, P. Czihak, S. Chaturvedi, M. T. Palou, and A. Vedrtam, "Performance and Design Considerations for Heavyweight Self-Compacting Concrete Using Magnetite and Barite Aggregates," *J. Build. Eng.*, p. 113626, 2025.
- [25] *Self-Consolidating Concrete*. ACI 237R-07 (Reapproved 2019), 2019.
- [26] *Mass Concrete—Guide*, ACI PRC-207.1-21, 2021.
- [27] V.-H. Nguyen, N. Leklou, J.-E. Aubert, and P. Mounanga, "The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 479–484, 2013.
- [28] V.-H. Nguyen, N. Leklou, and P. Mounanga, "Development of accelerated test methods by electromigration to assess the risk of internal sulfate attack in heat-cured mortar and concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 455, p. 139185, 2024.
- [29] IAEA, "Ageing management of concrete structures in nuclear power plants", International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, Technical Report No. NP-T-3.5, 2016.
- [30] M. SeyyedMohsen, T. Hassan, P. Reza, and G. Masumeh, "Optimization concrete shielding composition composed of different minerals for neutron and gamma radiation emitted from 18 MeV Linac using Monte-Carlo simulation" *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 18, no. 1, p. 101223, 2025.
- [31] M. H. Kharita, S. Yousef, and M. AlNassar, "Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete" *Prog. Nucl. Energy*, vol. 53, no. 2, pp. 207–211, 2011.
- [32] J. Vitázková and E. Cazzoli, "Common Risk Target for severe accidents of nuclear power plants based on IAEA INES scale" *Nuclear engineering and design*, vol. 262, pp. 106–125, 2013.
- [33] H. Chu, J. Jiang, F. Wang, S. Ju, L. Wang, and D. Wang, "Feasibility of producing cement-based sacrificial materials with strontium ferrite: A preliminary study" *Construction and Building Materials*, vol. 318, 125967, 2022.
- [34] *Section III-Rules for Construction of Nuclear Facility Components-Division 2-Code for Concrete Containments*, BPVC.III.2, 2025.
- [35] G. S. Anunike, M. Tarabin, and O. A. Hisseine, "Ultra-high-performance concrete for nuclear applications: A review of raw materials and mix design approaches," *Constr. Build. Mater.*, vol. 438, p. 136938, 2024.
- [36] H. Othman, T. Sabrah, and H. Marzouk, "Conceptual design of ultra-high performance fiber reinforced concrete nuclear waste container," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 51, no. 2, pp. 588–599, 2019.
- [37] J. J. Kim, G.-J. Park, D. J. Kim, J. H. Moon, and J. H. Lee, "High-rate tensile behavior of steel fiber-reinforced concrete for nuclear power plants," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 266, pp. 43–54, 2014.
- [38] M. A. E. M. Ali, A. F. Tawfic, M. A. Abdelgawad, M. Mahdy, and A. Omar, "Gamma and neutrons shielding using innovative fiber reinforced concrete," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 145, p. 104133, 2022.