

XU HƯỚNG PHÁT TRIỂN Lò PHẢN ỨNG MÔ-ĐUN NHỎ TRÊN THẾ GIỚI

Phạm Như Việt Hà, Bùi Hà Dũng, Nguyễn Thị Thanh Thủy, Trần Việt Phú
Viện Khoa học và Kỹ thuật hạt nhân

Hiện nay trên thế giới đang có sự quan tâm mạnh mẽ đến các lò phản ứng nhỏ và đơn giản hơn để tạo ra điện và nhiệt từ năng lượng hạt nhân. Mối quan tâm này đối với các lò phản ứng điện hạt nhân cỡ nhỏ được thúc đẩy bởi mong muốn giảm tác động của các chi phí vốn và cung cấp điện không dùng các hệ thống lưới điện lớn. Lò phản ứng mô-đun nhỏ (SMR) được định nghĩa là lò phản ứng hạt nhân với công suất điện từ 300 MWe trở xuống, được thiết kế và chế tạo dựa trên công nghệ mô-đun tại nhà máy, theo đuổi mô hình kinh tế sản xuất hàng loạt và thời gian xây dựng ngắn. Các công nghệ liên quan đến SMR rất nhiều và rất đa dạng với hơn 70 thiết kế tính cho đến thời điểm hiện tại.

Bài viết này trình bày tổng quan tình hình phát triển SMR trên thế giới, các đặc điểm thiết kế chính và cân nhắc đối với chu trình nhiên liệu của các thiết kế SMR, và khả năng ứng dụng cùng các lợi ích tiềm năng của các SMR trong tương lai.

1. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH PHÁT TRIỂN Lò PHẢN ỨNG MÔ-ĐUN NHỎ

Khi sản xuất điện hạt nhân được hình thành từ những năm 1950, quy mô của các tổ máy lò phản ứng đã tăng từ 60 MWe lên đến hơn 1600 MWe. Đồng thời, đã có hàng trăm lò phản ứng công suất nhỏ hơn được xây dựng để sử dụng cho hải quân (công suất nhiệt lên đến 190 MW) và làm nguồn neutron, mang lại kinh nghiệm và sự chuyên nghiệp to lớn trong việc chế tạo các lò phản ứng sinh điện cỡ nhỏ [1].

Theo phân loại của Cơ quan Năng lượng nguyên tử quốc tế (IAEA – International Atomic Energy Agency), lò phản ứng mô-đun nhỏ (SMR) được định nghĩa là lò phản ứng hạt nhân với công suất điện từ 300 MWe trở xuống. Đây là các lò phản ứng thuộc thế hệ mới hơn, có các thành phần và hệ thống có thể được chế tạo tại nhà máy và sau đó được vận chuyển dưới dạng mô-đun đến địa điểm để lắp đặt khi có nhu cầu [2]. Hầu hết các thiết kế SMR áp dụng các tính năng an toàn tiên

tiến hoặc thậm chí là các tính năng an toàn vốn có và có thể triển khai như một nhà máy đơn hoặc nhiều mô-đun. Thuật ngữ SMR không đề cập đến một thể hệ lò phản ứng hoặc một tập hợp con các loại công nghệ (có cả các công nghệ SMR thuộc Thế hệ thứ III và Thế hệ thứ IV), mà áp dụng cho công suất danh định của một thiết kế lò phản ứng nhất định và cách thức mà nó được xây dựng. Ngày càng có nhiều sự quan tâm đến các SMR và khả năng ứng dụng của chúng. Trong Hội nghị quốc tế về biến đổi khí hậu và vai trò của điện hạt nhân được tổ chức vào tháng 9 năm 2019, đã cho thấy rằng SMR đang được nhiều quốc gia thành viên coi là một lựa chọn hạt nhân khả thi và tiềm năng để góp phần giảm thiểu biến đổi khí hậu.

SMR đang được phát triển cho tất cả các loại lò phản ứng chính: lò phản ứng làm mát bằng nước nhẹ (LWR – Light Water Reactor), lò phản ứng làm mát bằng khí nhiệt độ cao (HTGR – High Temperature Gas-Cooled Reactor), lò phản ứng làm mát bằng kim loại lỏng, natri và khí với phổ neutron nhanh (FNR – Fast Neutron Reactor), lò

phản ứng muối nóng chảy (MSR – Molten Salt Reactor) và mới đây nhất là lò phản ứng siêu nhỏ (Micro Reactor). Loại lò LWR có rủi ro công nghệ thấp nhất; nhưng loại lò FNR có thể nhỏ hơn, đơn giản hơn và hoạt động lâu hơn trước khi phải tiếp nhiên liệu. Động lực chính của sự phát triển SMR là đáp ứng nhu cầu phát điện linh hoạt cho nhiều người dùng và ứng dụng hơn, bao gồm thay thế các nhà máy điện hóa thạch đã cũ, cung cấp chế độ đồng phát cho các nước đang phát triển có lưới điện nhỏ, các khu vực xa và ngoài lưới điện, và cho phép các hệ thống năng lượng hạt nhân và năng lượng tái tạo kết hợp với nhau [1, 2]. Nhiều SMR được dự tính cho các thị trường điện hoặc năng lượng thích hợp, nơi các lò phản ứng lớn sẽ không khả thi. Thông qua công nghệ mô-đun hóa, SMR hướng tới tính kinh tế của sản xuất hàng loạt với thời gian xây dựng ngắn hơn. Các SMR có thể triển khai trong thời gian gần sẽ có hiệu suất an toàn tương đương hoặc tốt hơn so với các thiết kế lò phản ứng tiến hóa hiện nay.

Việc phát triển SMR đang được tiến hành ở các nước phương Tây với nhiều vốn đầu tư tư nhân, bao gồm cả các công ty nhỏ. Sự tham gia của những nhà đầu tư mới này cho thấy một sự thay đổi sâu sắc đang chuyển dịch từ nghiên cứu và phát triển (R&D) hạt nhân do chính phủ lãnh đạo và tài trợ sang khu vực tư nhân và những người có mục tiêu kinh doanh mạnh mẽ, thường gắn với mục đích xã hội. Mục đích đó thường là triển khai năng lượng sạch giá cả phải chăng, phát thải cacbon thấp. Các SMR có thể giúp giảm thiểu đáng kể rủi ro tài chính liên quan đến các nhà máy điện hạt nhân quy mô lớn, từ đó cho phép chúng cạnh tranh hiệu quả với các nguồn năng lượng khác [1]. Một cột mốc quan trọng đã đạt được trong việc triển khai công nghệ SMR: Nhà máy điện hạt nhân nổi Akademik Lomonosov ở Liên bang Nga với hai mô-đun lò phản ứng KLT-40S đã được kết nối với lưới điện và bắt đầu vận

hành thương mại vào tháng 5 năm 2020. Hiện trên thế giới có hơn bảy mươi (70) thiết kế SMR đang được phát triển cho nhiều ứng dụng khác nhau, tăng 40% so với năm 2018 [2].

Cấu trúc của bài viết này được trình bày như sau. Mục 1 giới thiệu tổng quan tình hình phát triển SMR trên thế giới. Mục 2 trình bày các đặc điểm thiết kế chính và cân nhắc đối với chu trình nhiên liệu của các thiết kế SMR dựa trên các công nghệ LWR, thế hệ thứ IV và lò phản ứng siêu nhỏ. Mục 3 thảo luận khả năng ứng dụng cùng các lợi ích tiềm năng của các SMR. Cuối cùng, phần kết luận được trình bày ở Mục 4.

2. CÁC ĐẶC ĐIỂM THIẾT KẾ CHÍNH VÀ CHU TRÌNH NHIÊN LIỆU

2.1 Các đặc điểm thiết kế chính

Các thiết kế SMR đang được phát triển sử dụng nhiều loại chất làm mát và dạng nhiên liệu với các mức độ sẵn sàng công nghệ (TRL - Technology Readiness Level) và mức độ sẵn sàng cấp phép (LRL - Licensing Readiness Level) khác nhau. Hầu hết các khái niệm SMR có thể được chia nhóm thành năm loại lớn như sau [3]:

- Loại LWR-SMR một lò phản ứng - sử dụng công nghệ và nhiên liệu LWR đã được kiểm chứng tốt để cung cấp các lò phản ứng độc lập có thể thay thế các tổ máy nhiên liệu hóa thạch nhỏ hoặc được triển khai dưới dạng phát điện phân tán.
- Loại LWR-SMR đa mô-đun - cũng sử dụng công nghệ LWR và có thể được vận hành để thay thế cho công suất tải nền cỡ trung bình hoặc trong một khuôn khổ phát điện phân tán, tùy thuộc vào công suất phát.
- Loại SMR di động/có thể vận chuyển được - hiện đang áp dụng công nghệ LWR và nhằm mục đích dễ dàng di chuyển từ vị trí này đến vị trí khác; ví dụ: lò phản ứng KLT-40S của nhà máy điện hạt

nhân nổi Akademik Lomonosov, Liên bang Nga (Hình 1).

- SMR thế hệ thứ IV - áp dụng các công nghệ tiên tiến, không phải LWR và bao gồm nhiều khái niệm đã được Diễn đàn Quốc tế Thế hệ thứ IV (GIF - Generation IV International Forum) nghiên cứu trong nhiều năm qua.
- SMR siêu nhỏ (MMR – Micro Modular Reactor) - là các thiết kế có công suất dưới 10 MWe, thường có khả năng hoạt động bán tự trị và với khả năng vận chuyển được cải thiện so với các SMR lớn hơn. MMR thường không dựa trên LWR và áp dụng nhiều phương pháp tiếp cận công nghệ khác nhau, bao gồm cả thế hệ thứ IV. MMR chủ yếu dành cho vận hành ngoài lưới điện ở các địa điểm xa xôi, nơi chúng được dự kiến sẽ cạnh tranh với các nguồn điện phổ biến (Hình 2).



Hình 1. Nhà máy điện hạt nhân nổi Akademik Lomonosov với hai mô-đun lò phản ứng KLT-40S đã được kết nối với lưới điện và bắt đầu vận hành thương mại vào tháng 5 năm 2020

Các khái niệm SMR dựa trên LWR là các khái niệm hoàn thiện nhất với TRL và LRL cao nhất, và chúng có khả năng sớm nhất để triển khai thương mại. Một số khái niệm đang được xây dựng (như CAREM ở Argentina, ACPR50S ở Trung Quốc) hoặc đang vận hành thương mại (như KLT-40S ở Liên bang Nga). Các thiết kế khác đang đạt được tiến độ cấp phép đáng kể và có thể được xây dựng như các nguyên mẫu ban đầu vào năm 2030.

Những công nghệ này là các biến thể nhỏ và tiến hóa của các lò phản ứng thế hệ thứ II và thế hệ thứ III/III+ đang hoạt động trên toàn thế giới, và được hưởng lợi từ nhiều thập kỷ kinh nghiệm vận hành và quản lý pháp quy.



Hình 2. Các lò phản ứng siêu nhỏ và có thể vận chuyển được [4, 5], có thể cung cấp năng lượng cho các cộng đồng ở vùng sâu vùng xa, hỗ trợ các lưới điện siêu nhỏ độc lập và khôi phục điện cho các khu vực bị thiên tai với khả năng được vận chuyển, lắp đặt và khởi động trong vài ngày

Công nghệ thế hệ thứ IV sử dụng các chất làm mát (kim loại lỏng, muối nóng chảy hoặc khí) và các cấu hình hệ thống khác so với LWR. Mặc dù các thiết kế dựa trên thế hệ thứ IV không có cùng cấp độ kinh nghiệm vận hành và pháp quy như các thiết kế dựa trên LWR và vẫn cần nghiên cứu bổ sung trong một số lĩnh vực (như hiệu suất và khả năng của nhiên liệu và các vật liệu cấu trúc), nhưng các thiết kế này vẫn được hưởng lợi từ lịch sử R&D sâu rộng mà dựa vào đó các nhà phát triển và cơ quan pháp quy có thể học hỏi. Các thiết kế thế hệ thứ IV trưởng thành nhất là các hệ thống làm mát bằng kim loại lỏng hoặc khí với một số lò phản ứng hiện đang hoạt động hoặc đang được xây dựng. Các thiết kế này cũng có thể được sử dụng cho các ứng dụng phi điện nhờ có nhiệt độ đầu ra cao hơn và chu trình nhiên liệu hạt nhân tiên tiến.

Mặc dù có mất mát hiệu suất nhiệt đối với một

số thiết kế LWR-SMR, việc giảm kích thước của công nghệ SMR so với các lò phản ứng hạt nhân lớn truyền thống mang lại một số tính năng ưu việt như sau đối với hầu hết các thiết kế [3]:

- **Thiết kế tích hợp:** Vùng hoạt nhỏ hơn cho phép sử dụng các thiết kế tích hợp, kết hợp tất cả các thành phần của hệ thống cung cấp hơi hạt nhân (NSSS) vào một thùng lò duy nhất. Cấu hình này, với tổng lượng chất làm mát sơ cấp chứa bên trong thùng sơ cấp lớn hơn đáng kể so với cấu hình vòng ngoài truyền thống, làm tăng đáng kể nhiệt dung và quán tính nhiệt của hệ thống. Do đó, cấu hình như vậy sẽ dẫn đến các đặc tính an toàn vốn có được tăng cường và các hệ thống đơn giản, dễ vận hành và bảo trì hơn.
- **An toàn vốn có:** Công suất đầu ra thấp hơn và tỷ lệ bề mặt trên thể tích cao hơn do vùng hoạt nhỏ hơn sẽ làm tăng hiệu quả của các hệ thống an toàn thụ động cho cả các điều kiện hoạt động bình thường và không bình thường. Nhiều thiết kế dựa trên LWR có lượng nước dự trữ rất lớn để làm mát thụ động các hệ thống lò phản ứng ngay cả trong những điều kiện khắc nghiệt. Sự phụ thuộc nhiều hơn vào các hệ thống làm mát thụ động cho phép các thiết kế đơn giản hơn, dễ dàng vận hành và bảo trì.
- **Lượng nhiên liệu trong vùng hoạt ít hơn:** có các lợi ích tại nhà máy và ngoài nhà máy. Tại nhà máy: ít phải che chắn hơn và liều lượng phơi nhiễm bức xạ cho người lao động do đó được giảm bớt. Ngoài nhà máy: lượng nhiên liệu ít hơn hay số hạng nguồn nhỏ hơn làm giảm xác suất xảy ra tai nạn và mức độ phát tán phóng xạ tiềm năng, có thể làm giảm các yêu cầu đối với vùng lập kế hoạch khẩn cấp (EPZ - Emergency Planning Zone). Những lợi ích như vậy có nghĩa là một số SMR có thể được đặt gần nơi cần được cung cấp năng lượng hơn.
- **Cải thiện sự mô-đun hóa và khả năng chế tạo:**

Trọng lượng và kích thước trực tiếp quyết định mức độ dễ dàng cho phép các thành phần khác nhau có thể được sản xuất, vận chuyển, nâng lên và lắp đặt. Kích thước nhỏ hơn của các thiết kế SMR cho phép áp dụng các phương án mô-đun hóa đầy tham vọng cũng như áp dụng các kỹ thuật sản xuất mới.

- **Tăng cường tính linh hoạt:** SMR có thể đạt được các chế độ theo tải tăng cường nhờ vào các tính năng thiết kế vốn có, cũng như thông qua việc tối ưu hóa sự vận hành đa mô-đun. Tính linh hoạt của SMR cũng bao gồm các khả năng triển khai (như các hạn chế về địa điểm ít hơn) và tính đa dạng của sản phẩm đầu ra (sản xuất điện và nhiệt kết hợp).

2.2 Các cân nhắc đối với chu trình nhiên liệu

Các SMR đang được phát triển sẽ cần phải được tích hợp với chu trình nhiên liệu hạt nhân, có nghĩa là xây dựng trên cơ sở hạ tầng hiện có, hoặc trong một số trường hợp, dựa trên các khoản đầu tư chuyên dụng vào các năng lực công nghiệp mới. Phạm vi của các khái niệm SMR đang được xem xét, và mức độ hoàn thiện công nghệ tổng thể của chúng, đã dẫn đến việc cân nhắc một số lựa chọn chu trình nhiên liệu. Cho đến nay, rất ít nhà phát triển SMR đã phát triển hoặc cung cấp thông tin đầy đủ các chiến lược của họ trong lĩnh vực này, đặc biệt là liên quan đến phần cuối (back-end) của chu trình nhiên liệu [2, 3].

Các chiến lược chu trình nhiên liệu cho LWR-SMR

LWR-SMR được kỳ vọng sẽ phát triển chu trình nhiên liệu ở phần đầu (front-end) tương thích với các khả năng công nghiệp hiện có, đặc biệt là về mức độ làm giàu (dưới 5%) hoặc loại nhiên liệu và bó nhiên liệu. Phạm vi công nghệ nhiên liệu và độ sâu cháy nhiên liệu cũng có nghĩa là ngay tại bước tiếp cận đầu tiên, nhiên liệu từ LWR-SMR phải tương thích với các giải pháp tái chế nhiên liệu

đối với các quốc gia đã thiết lập chiến lược khép kín chu trình nhiên liệu của họ. Một ngoại lệ liên quan đến SMR nổi trên biển được phát triển ở Liên bang Nga, là quốc gia đang xem xét mức độ làm giàu gần 20%. Hầu hết các nhà phát triển đã không loại trừ khả năng SMR sử dụng nhiên liệu oxit hỗn hợp (MOX – Mixed Oxide), nhưng cho đến nay nó hiếm khi được thảo luận như một ưu tiên cho các lò phản ứng này [3]. Ngoài ra, hiệu suất nhiệt thấp hơn đối với các thiết kế LWR-SMR có nghĩa là yêu cầu lượng uranium trên mỗi đơn vị năng lượng được sản xuất ra sẽ cao hơn và điều này sẽ tác động trực tiếp đến các chi phí chu trình nhiên liệu. Hơn nữa, cũng cần chú ý rằng chu kỳ nạp tải nhiên liệu của LWR-SMR được dự kiến sẽ dài hơn so với các LWR hiện có.

Các chiến lược chu trình nhiên liệu cho SMR thế hệ thứ IV và lò phản ứng siêu nhỏ

Trong khi hầu hết các SMR thế hệ thứ IV và các lò phản ứng siêu nhỏ đang xem xét sử dụng nhiên liệu dựa trên uranium, thì việc phát triển các cơ sở chu trình nhiên liệu mới vẫn được yêu cầu. Một đặc điểm chung cơ bản của một số khái niệm lò phản ứng này là chúng sẽ cung cấp chu kỳ nạp tải nhiên liệu dài hơn nhiều. Các lò phản ứng siêu nhỏ dạng ống nhiệt là một ví dụ chính, với các lò phản ứng này có thời gian nạp tải nhiên liệu lên đến 20 năm. Các SMR thế hệ thứ IV hoạt động với nhiên liệu TRISO (tristructural-isotropic) hoặc với nhiên liệu muối nóng chảy có thể sử dụng các phương pháp nạp tải nhiên liệu trực tuyến. Ngoài ra, một số loại SMR thuộc kiểu lò phản ứng neutron nhanh thế hệ thứ IV hiện đang xem xét sử dụng nhiên liệu dựa trên plutonium.

Một số thiết kế đang xem xét việc sử dụng nhiên liệu uranium độ giàu thấp HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium). Nhiên liệu HALEU có mức độ làm giàu từ 5 đến 19,75%. Các ứng dụng của HALEU ngày nay chỉ giới hạn trong việc sản xuất các lò nhỏ cho các lò phản ứng nghiên cứu

và sản xuất đồng vị phóng xạ y tế. Nhiên liệu HALEU hiện nay được chế tạo bằng cách làm giảm độ giàu từ các kho dự trữ uranium làm giàu cao (HEU) của Mỹ hoặc Nga. Tuy nhiên, theo báo cáo của Bộ Năng lượng Hoa Kỳ (DOE), nguồn dự trữ HEU có thể cạn kiệt hoàn toàn vào năm 2030-2040. Do đó, nếu không có sự phát triển của các khả năng sản xuất HALEU, sự phát triển của các công nghệ SMR tiên tiến có thể bị hạn chế nghiêm trọng [3-5].

Nguồn cung cấp nhiên liệu HALEU an toàn, an ninh trong tương lai đòi hỏi phải nâng cấp cơ sở hạ tầng chu trình nhiên liệu hạt nhân hiện tại để tuân thủ các giới hạn an toàn tới hạn tiềm ẩn, đặc biệt là phát triển các cơ sở làm giàu, khử chuyển đổi và chế tạo. Hơn nữa, các giải pháp đóng gói và vận chuyển mới sẽ là cần thiết, đặc biệt là để vận chuyển các số lượng lớn HALEU cần thiết cho việc triển khai toàn cầu của các SMR tiên tiến. Việc thiết kế và chứng nhận các công-te-nơ vận tải mới là một quá trình phức tạp và tốn kém, đòi hỏi phải tuân thủ các tiêu chuẩn của Tổ chức Tiêu chuẩn hóa Quốc tế/Viện Tiêu chuẩn Quốc gia Hoa Kỳ (ISO/ANSI) và sự chấp thuận của các cơ quan vận tải có thẩm quyền. Ngoài ra, tác động của nhiên liệu HALEU đến phần cuối (back-end) của chu trình nhiên liệu có thể cần được đánh giá sâu hơn. Việc quản lý lâu dài nhiên liệu hạt nhân đã qua sử dụng và chất thải phóng xạ hoạt độ cao do nhiên liệu HALEU tạo ra có thể yêu cầu cần phải điều chỉnh các phương pháp tiếp cận hiện tại, bao gồm nâng cấp các cơ sở tái chế và các thiết kế thùng chứa mới để lưu trữ tạm thời nhiên liệu đã qua sử dụng.

3. KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG VÀ CÁC LỢI ÍCH TIỀM NĂNG

Các SMR thích hợp cho sản xuất điện nhưng nhiều thiết kế cũng đặc biệt thích hợp để sinh

nhật, khử muối nước biển và sản xuất hydro. Các nghiên cứu điều biến theo tải chi tiết của các SMR để đồng phát hydro đã cho thấy điều này là khả thi. Các nghiên cứu khác cũng đã khảo sát sự kết hợp của SMR với các công nghệ khử muối khác nhau. Các SMR và các lò phản ứng siêu nhỏ cũng được thiết kế phù hợp cho các ứng dụng công nghiệp hơn là các lò phản ứng lớn. Nếu các thiết kế lò phản ứng này, cung cấp nhiệt và năng lượng chất lượng cao, có thể được xây dựng một cách kinh tế ở các quy mô nhỏ, chúng có thể khử cacbon cho một số cơ sở công nghiệp nhất định. Một nơi khác mà các SMR có thể tìm thấy vị trí thích hợp là ở các cộng đồng vùng sâu vùng xa hoặc các lưới điện nhỏ mà không thích hợp để sử dụng một nhà máy điện hạt nhân lớn. Các SMR là đủ nhỏ để có thể vận chuyển bằng tàu thủy, đường sắt hoặc thậm chí bằng xe tải đến địa điểm yêu cầu. Công suất nhỏ, phạm vi ứng dụng và việc bố trí địa điểm dễ dàng của các SMR giúp chúng có thể nhanh chóng mở rộng hạm đội lò phản ứng toàn cầu hiện tại, từ ít hơn 500 lò phản ứng đang hoạt động, đến hàng nghìn lò phản ứng cần thiết để cung cấp năng lượng cacbon thấp cho một loạt các hoạt động của con người trên toàn thế giới. Ngoài ra, các công nghệ hạt nhân mới như các thiết kế SMR tiên tiến sẽ phải hoạt động trong một lưới điện tương lai với mức năng lượng tái tạo cao. Do đó, một khái niệm đã đạt được sức hút đáng kể trong những năm gần đây là hệ thống năng lượng lai tích hợp, trong đó các lò phản ứng như SMR và năng lượng tái tạo kết hợp chặt chẽ với nhau theo cách tối ưu hóa sản lượng của chúng để phục vụ mục đích sản xuất điện và các ứng dụng khác [6].

Kinh tế và các động lực chi phí

Quy mô của nền kinh tế thường được sử dụng để giảm các chi phí phát điện của những nhà máy điện hạt nhân lớn thông thường. Điều này, cùng với việc triển khai các hạm đội được tiêu chuẩn

hóa và xây dựng nhiều lò phản ứng trên một địa điểm duy nhất đã cho phép các nhà máy điện hạt nhân hiện có đạt được chi phí thấp. Ở giai đoạn này, chi phí thực sự của các SMR và các lợi ích kinh tế của chúng vẫn chưa được kiểm chứng. Tuy nhiên, các SMR áp dụng một cách tiếp cận khác đối với các lò phản ứng lớn nhằm cố gắng giảm chi phí và tối đa hóa các lợi ích kinh tế. Các yếu tố quan trọng nhất là:

- Giảm chi phí vốn sử dụng cho một lò phản ứng đơn lẻ. Điều này làm cho khoản đầu tư có khả năng mở rộng và “có thể được ngân hàng chiết khấu” hơn, có nghĩa là sẽ dễ dàng hơn để tìm nguồn tài chính cần thiết - bao gồm cả nguồn tài chính tư nhân.
- Mô-đun hóa. Quá trình chuyển đổi thiết kế và xây dựng tại chỗ của một nhà máy hạt nhân điển hình sang chế tạo các mô-đun tại nhà máy để vận chuyển và lắp đặt tại hiện trường. Chế tạo tại nhà máy rẻ hơn xây dựng tại chỗ và kiểm soát chất lượng dễ dàng hơn, mặc dù những lợi ích này có thể bị hạn chế bởi sự sẵn có của phương tiện vận chuyển giá rẻ. Các SMR có lợi thế khác biệt so với các lò phản ứng lớn vì có thể có tỷ lệ các bộ phận được sản xuất tại nhà máy cao hơn.
- Nhiều lò phản ứng tại một địa điểm. Số lượng lò phản ứng được lắp đặt cùng một địa điểm càng nhiều thì tổng chi phí đầu tư cho mỗi lò phản ứng càng nhỏ. Ngoài ra, doanh thu từ (các) lò phản ứng đầu tiên có thể được sử dụng để tài trợ cho việc xây dựng các lò phản ứng tiếp theo. Điều này đúng với cả các lò phản ứng lớn và nhỏ, tuy nhiên, có thể lắp đặt thêm nhiều SMR trước khi bị hạn chế bởi các giới hạn về địa điểm khác.
- Học hỏi và các nền kinh tế sản xuất hàng loạt. Có khả năng là nhiều lò phản ứng của một thiết kế SMR nhất định sẽ được sản xuất hơn so với một thiết kế lò phản ứng lớn nhất định. Do đó có thể xảy ra quá trình đặt hàng các bộ phận với số

lượng lớn. Điều này cho phép các SMR khai thác các nền kinh tế sản xuất hàng loạt và hưởng lợi từ một quy trình mua sắm được tiêu chuẩn hóa hơn. Hoàn thành việc lắp đặt một số lượng lớn hơn các lò phản ứng cũng sẽ cải thiện các tốc độ học hỏi.

- Các cân nhắc danh mục đầu tư. Quy mô càng nhỏ thì càng dễ dàng đa dạng hóa danh mục đầu tư được tạo ra. Kích thước nhỏ và các tính năng an toàn thụ động của các SMR cũng phù hợp với các quốc gia có lưới điện nhỏ hơn và ít kinh nghiệm hơn về điện hạt nhân.
- Nhiều thiết kế SMR được cho là sẽ đơn giản hơn các thiết kế lò phản ứng lớn ngày nay. Bằng cách dựa trên các nguyên tắc vật lý tự nhiên để duy trì an toàn, giảm nhu cầu về nhiều hệ thống an toàn chủ động, chúng sẽ giảm độ phức tạp và các chi phí liên quan.

Ngoài ra, việc xây dựng các SMR dự kiến sẽ ngắn hơn so với các lò phản ứng lớn. Điều này rất quan trọng vì tiến độ xây dựng có ảnh hưởng lớn đến kinh tế xây dựng điện hạt nhân theo hai cách. Thứ nhất, nó sẽ giảm các chi phí cố định hàng ngày. Trên một công trường xây dựng hạt nhân, nơi có hàng nghìn người làm việc và các trang thiết bị đắt tiền (ví dụ: các cần cẩu) đang được sử dụng, các chi phí cố định hàng ngày là đáng kể. Thứ hai, nó sẽ mang lại doanh thu cho dự án. Thời gian xây dựng SMR ngắn hơn có nghĩa là điện/nhiệt - và doanh thu - được tạo ra sớm hơn so với một dự án lớn hơn.

Kinh nghiệm xây dựng các nhà máy hạt nhân lớn cho thấy ba yếu tố đặc biệt quan trọng để giảm tiến độ và chi phí xây dựng, đó là: (i) các hoạt động xây dựng liên tục trong thời gian dài để duy trì lực lượng lao động có trình độ và kinh nghiệm; (ii) xây dựng hàng loạt của cùng một thiết kế; và (iii) nhiều lò phản ứng tại cùng một địa điểm. Rõ ràng là các SMR cũng có thể được hưởng lợi từ tất cả những khía cạnh này vì cần phải xây dựng

nhiều lò phản ứng hơn và điều này có thể sẽ được lan truyền trong một thời gian dài hơn. Tương tự các lò phản ứng lớn, SMR sẽ có vai trò cung cấp năng lượng cacbon thấp trong một hỗn hợp năng lượng bền vững trong tương lai, đáp ứng nhu cầu rộng rãi của người sử dụng và những ứng dụng năng lượng khác nhau.

Tầm quan trọng của việc cấp phép lò phản ứng

Cấp phép là một trong những yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến việc thẩm định đầu tư và khả năng tồn tại của các dự án nhà máy điện hạt nhân. Các quy trình cấp phép hiện tại đã được điều chỉnh theo thời gian để phù hợp với thiết kế và phê duyệt địa điểm của các thiết kế lò phản ứng lớn. Những thay đổi đối với quy trình cấp phép có thể giúp nhận ra nhiều lợi thế kinh tế - kỹ thuật của các SMR. Ví dụ, việc giảm quy mô của khu vực EPZ theo yêu cầu pháp quy sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho việc bố trí SMR với các hoạt động công nghiệp khác. Việc cấp phép có khả năng là một thách thức đối với các SMR, vì chi phí cấp giấy phép thiết kế, xây dựng và vận hành không nhất thiết phải ít hơn đối với các lò phản ứng lớn [1, 6]. Một thách thức liên quan đến cấp phép khác là sự khác biệt giữa các chế độ cấp phép công nghệ lò phản ứng ở cấp quốc gia của các quốc gia khác nhau [6]. Giấy phép thiết kế có được ở một quốc gia chỉ có giá trị đối với quốc gia đó. Một quá trình cấp phép có thể mất nhiều năm và tiêu tốn hàng trăm triệu đô la với tất cả các chi phí phát sinh thậm chí trước khi có khả năng một dự án sẽ được tiến hành. Do đó, quá trình cấp phép là một cam kết rủi ro đối với các bên liên quan phải trả tiền cho nó, và thậm chí nhiều hơn nữa khi các khoản đầu tư được thực hiện nhỏ hơn, như trường hợp của các SMR.

4. KẾT LUẬN

Các lò phản ứng mô-đun nhỏ (SMR) đang đạt

được những tiến bộ để trở thành một sản phẩm hạt nhân khả thi về mặt thương mại vào đầu những năm 2030. Các tính năng kinh tế - kỹ thuật của chúng, mà một số trong đó đã được chứng minh trong các ngành công nghiệp khác, không chỉ có thể giúp vượt qua những thách thức giao hàng thường gặp phải trong các dự án hạt nhân lớn gần đây mà còn mở rộng các giá trị của công nghệ hạt nhân để cung cấp điện và nhiệt cacbon thấp một cách linh hoạt và có thể điều biến được trên một số lĩnh vực.

Khi đánh giá tính hợp lý về mặt kinh tế của SMR, câu hỏi về thị trường vẫn là trọng tâm. Một mặt, nếu SMR được chế tạo theo kiểu sản xuất hàng loạt, tương tự như máy bay thương mại, thì lợi ích kinh tế có thể rất đáng kể. Tuy nhiên, điều này đòi hỏi thị trường cho một thiết kế đơn lẻ phải tương đối lớn, tức là nhấn mạnh sự cần thiết của một thị trường toàn cầu, đồng thời gợi ý rằng chỉ một tập hợp con nhỏ trong số nhiều thiết kế đang được phát triển cuối cùng sẽ có thể thiết lập một thị trường toàn cầu như vậy. Để đạt được thị trường toàn cầu trong mọi trường hợp sẽ đòi hỏi các mức độ hài hòa hóa pháp quy và hợp nhất thị trường cao hơn. Mặt khác, hầu hết các thiết kế SMR chưa đạt đến giai đoạn hoàn thiện nâng cao và các thuộc tính của chúng vẫn cần được thử nghiệm và chứng minh. Các SMR dựa trên LWR gắn với khả năng thương mại hơn so với các hệ thống thế hệ thứ IV, do đó cần có những nỗ lực nghiên cứu và phát triển bổ sung. Bởi vậy, một mức độ không chắc chắn nhất định tồn tại, ảnh hưởng trực tiếp đến nhận thức rủi ro và do đó góp phần hạn chế quy mô tiềm năng của thị trường. Khi các SMR có sự trưởng thành nhờ những thiết kế trình diễn đầu tiên dự kiến được đưa vào vận hành thử vào cuối những năm 2020, một số rủi ro này sẽ giảm dần theo thời gian, làm tăng sự quan tâm từ các khách hàng tiềm năng. Sự quan tâm gia tăng này sẽ hỗ trợ việc thiết lập một chuỗi cung ứng mạnh

mẽ và bí quyết xây dựng bền vững, dẫn đến các chi phí vốn có tính cạnh tranh hơn. Do đó, thị trường SMR tiềm năng sẽ không bị giới hạn bởi các cân nhắc kinh tế và sẽ đòi hỏi nỗ lực phối hợp giữa các chính phủ, cơ quan pháp quy, nhà cung cấp và chủ sở hữu tương lai để đồng thời giải quyết những thách thức của hiện tại và trong tương lai.

Các SMR và lò phản ứng siêu nhỏ sẽ mở rộng các cơ hội triển khai công nghệ hạt nhân. Do có kích thước nhỏ hơn, các tính năng an toàn thụ động tăng cường và các khu vực lập kế hoạch khẩn cấp nhỏ hơn, chúng có thể đơn giản đến những nơi mà các lò phản ứng quy mô lớn không thể. Chúng cung cấp các lựa chọn cho khách hàng một nguồn năng lượng sạch ổn định và đáng tin cậy mà không cần các yêu cầu về bất động sản và các chi phí vốn của một dự án xây dựng lớn. Các cường quốc hạt nhân trên thế giới, đặc biệt là Hoa Kỳ, hiện đang hỗ trợ phát triển các lò phản ứng tiên tiến như SMR và lò phản ứng siêu nhỏ có thể dùng cho các quá trình sử dụng nhiều năng lượng hiện đang dựa vào nhiên liệu hóa thạch, bao gồm sản xuất hydro, khử muối nước biển, sưởi ấm, lọc dầu và sản xuất phân bón. Điều này mở ra cơ hội thị trường quan trọng cho các nhà phát triển hạt nhân và cơ hội làm giảm đáng kể lượng khí thải cacbon trong các quá trình công nghiệp trên quy mô toàn cầu. Gần đây, IAEA cũng đã nghiên cứu và công bố lộ trình công nghệ của việc triển khai các SMR với mục đích hỗ trợ các quốc gia thành viên trong lĩnh vực này cũng như để thúc đẩy việc tăng cường hợp tác, chia sẻ kiến thức và giúp đảm bảo những nỗ lực của các nhà phát triển công nghệ, ngành công nghiệp, người sử dụng và cơ quan quản lý tập trung vào một mục tiêu chung [7].

Xu hướng phát triển SMR trên thế giới hiện nay và triển vọng khả thi về mặt thương mại của một số thiết kế SMR tiên tiến vào đầu những năm

2030 mở ra các cơ hội thuận lợi cho các quốc gia mới về hạt nhân như Việt Nam để học hỏi, hợp tác và trao đổi kinh nghiệm với các quốc gia đang quan tâm, nghiên cứu và triển khai các công nghệ SMR. Điều này có thể thực sự quan trọng, giúp các quốc gia như Việt Nam vừa có thể theo kịp tình hình nghiên cứu, triển khai các công nghệ SMR trên thế giới và trong khu vực vừa có thể dần dần xây dựng, nâng cao các năng lực về kỹ thuật, pháp lý và chính sách liên quan đến các công nghệ SMR.

Pathways, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, 2021. https://unece.org/sites/default/files/2021-03/UNECE%20Use%20of%20nuclear%20fuel%20resources%20for%20sustainable%20development_%20Final_0.pdf

[7] IAEA, Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, IAEA Nuclear Energy Series No. NR-T-1.18, Vienna, 2021. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944_web.pdf

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] WNA, Small Modular Reactors, Updated September 2021. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>.

[2] IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2020 Edition. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

[3] OECD, Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, NEA No. 7560, 2021. https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560_smr_report.pdf

[4] DOE, DOE-NE Strategic Vision, Office of Nuclear Energy, 08 January 2021. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/DOE-NE%20Strategic%20Vision%20-Web%20-%2001.08.2021.pdf>

[5] Nuclear Innovation Alliance, Partnership for Global Security, U.S. Advanced Nuclear Energy Strategy for Domestic Prosperity, Climate Protection, National Security, and Global Leadership, February 2021. <https://nuclearinnovationalliance.org/us-advanced-nuclear-energy-strategy>

[6] UNECE, Application of the United Nations Framework Classification for Resources and the United Nations Resource Management System: Use of Nuclear Fuel Resources for Sustainable Development - Entry