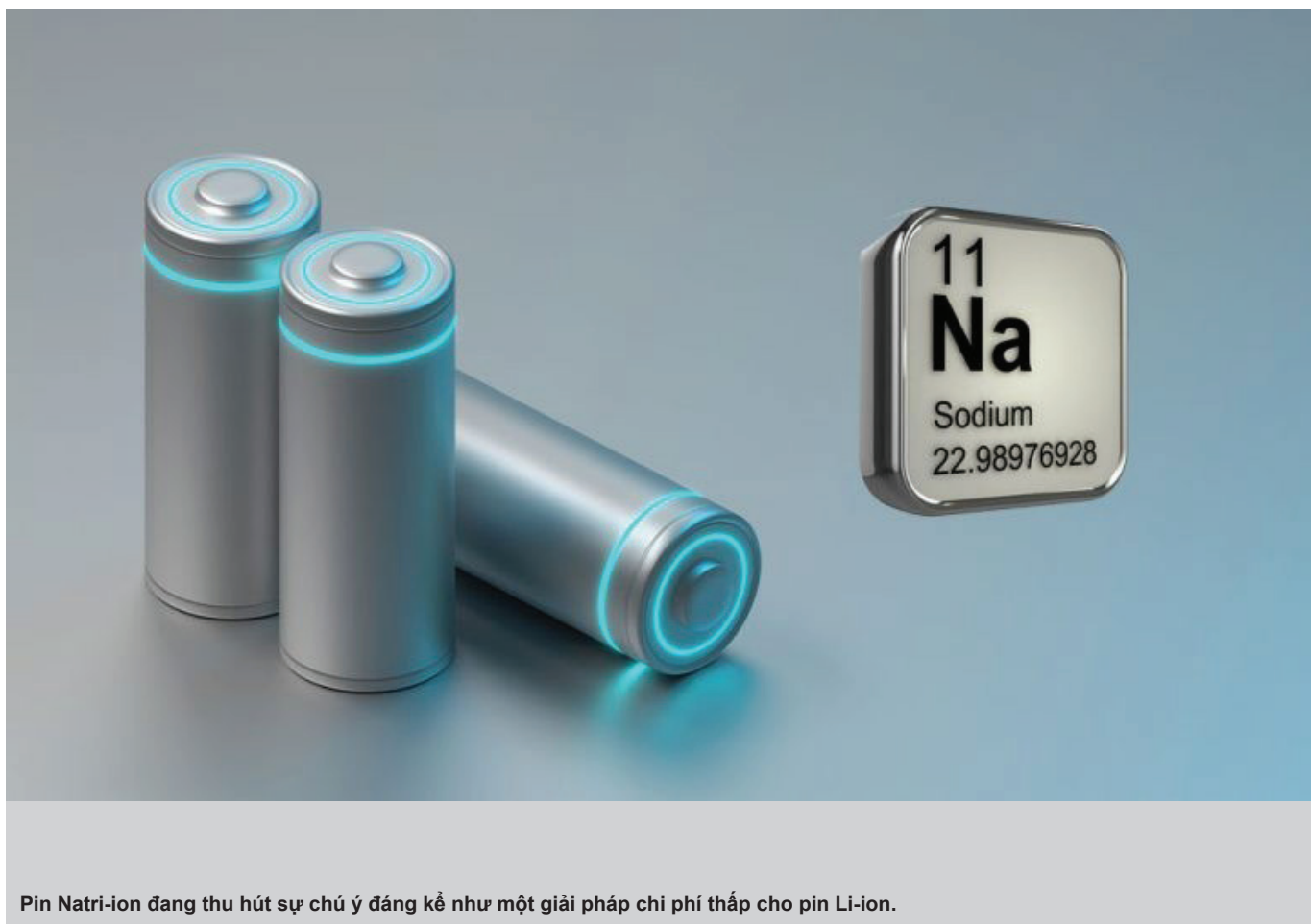




ĐỘNG LỰC VÀ THÁCH THỨC TRONG NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN CÔNG NGHỆ PIN ĐIỆN TRÊN THẾ GIỚI

Đặng Hoàng Hợp, Nguyễn Thùy Dung, Nguyễn Văn Thành, Lê Trọng Tài, Đinh Thị Minh Hiên

Cục Đổi mới sáng tạo, Bộ Khoa học và Công nghệ

“

Ngành năng lượng điện toàn cầu đang chuyển đổi sâu sắc theo hướng khử cacbon, thúc đẩy việc tích hợp quy mô lớn các nguồn năng lượng tái tạo biến đổi (VRE). Điều này đặt ra thách thức lớn cho sự ổn định lưới điện, đưa công nghệ pin điện trở thành nhân tố then chốt cho hệ thống năng lượng tương lai. Hoạt động nghiên cứu và phát triển (R&D) trong lĩnh vực này được thúc đẩy bởi sự hội tụ của nhiều yếu tố, tuy nhiên, việc triển khai quy mô lớn vẫn còn nhiều rào cản đáng kể.

”

Mức độ hoàn thiện của công nghệ pin

Thế kỷ XXI đang chứng kiến một cuộc chuyển dịch năng lượng toàn cầu từ nhiên liệu hóa thạch sang các nguồn tái tạo nhằm đáp ứng các mục tiêu khí hậu theo thỏa thuận Paris. Tuy nhiên, tính gián đoạn cố hữu của các nguồn năng lượng tái tạo biến đổi (VRE) này lại đặt ra một thách thức lớn đối với sự ổn định vận hành của lưới điện. Việc duy trì độ tin cậy của lưới điện ngày càng trở nên phức tạp và tốn kém dẫn đến việc nâng cao tính linh hoạt của hệ thống điện trở thành ưu tiên hàng đầu. Trong bối cảnh đó, lưu trữ năng lượng điện (EES) đã nổi lên như một công nghệ hỗ trợ mang tính then chốt. Sự phát triển của công nghệ pin điện không chỉ đóng vai trò quan trọng đối với ngành điện mà còn là động lực chính thúc đẩy quá trình điện hóa ngành giao thông.

Bối cảnh phát triển công nghệ pin điện rất phức tạp, bao gồm một loạt các cấu trúc vật liệu ở các giai đoạn hoàn thiện và triển khai thương mại khác nhau. Mức độ sẵn sàng về công nghệ (TRL) có thang đo từ 1 (nguyên lý cơ bản) đến 9 (Công nghệ đã được chứng minh) là một phương pháp rất tốt để đánh giá bối cảnh này.

Các công nghệ đã hoàn thiện (TRL 9): Pin axit-chì là công nghệ pin sạc lâu đời nhất đã được hoàn thiện và thương mại hóa hoàn toàn. Nó vẫn được sử dụng rộng rãi cho việc khởi động, chiếu sáng và đánh lửa (SLI) trong các phương tiện và cho các ứng dụng cung cấp điện liên tục (UPS). Mặc dù chi phí thấp (50-1100 USD/kWh) và có độ tin cậy nhưng mật độ năng lượng thấp (50-80 Wh/l), tuổi thọ chu kỳ hạn chế (3-15 năm) và các nguy cơ môi trường liên quan đến chì đã hạn chế khả năng ứng dụng của nó cho lưới điện quy mô lớn hoặc cho xe điện. Pin Lithium-ion (Li-ion) là công nghệ thống trị trên thị trường hiện nay, làm nền tảng cho cả cuộc cách mạng xe điện và sự mở rộng của hệ thống lưu trữ quy mô lưới điện. Các vật liệu chính như Nickel Mangan Cobalt (NMC) và Lithium Sắt Phosphate (LFP) đều ở mức TRL 9. Pin LFP ngày càng được ưa chuộng cho các ứng dụng lưu trữ tĩnh do có hồ sơ an toàn cao hơn, tuổi thọ chu kỳ dài hơn và không chứa cobalt, mặc dù sở hữu mật độ năng lượng thấp hơn (100-150 Wh/kg) so với các pin NMC (230-270 Wh/kg).

Các công nghệ đã được chứng minh và đang trong quá trình thương mại hóa (TRL 7-8): Pin Natri-Lưu huỳnh (NaS) và Natri-Niken-Clorua (ZEBRA) là các loại pin nhiệt độ cao được phát triển dành cho các ứng dụng lưu trữ tĩnh quy mô lưới điện. Chúng có mật độ năng lượng cao (150-250 Wh/l) và tuổi thọ vận hành dài nhưng yêu cầu duy trì nhiệt độ hoạt động cao (khoảng 300°C) tạo ra sự phức tạp đáng kể về an toàn và vận hành [1, 2]. Đối với Pin dòng chảy Redox (RFB), nổi bật nhất trong dòng pin này là hệ thống dựa trên vanadium (VRFB) là loại pin phát triển nhất và đang được triển khai trong các dự án quy mô lưới điện. Ưu điểm chính trong cấu tạo của chúng là sự tách biệt giữa công suất và dung lượng, cho phép lưu trữ rất linh hoạt và trong thời gian dài. Tuy nhiên, chúng hiện có chi phí vốn cao hơn và mật độ năng lượng thấp hơn (15-40 Wh/kg) so với pin Li-ion [3].

Các công nghệ mới nổi (TRL 4-6): Đầu tiên là xét đến Pin Natri-ion (Na-ion), công nghệ này đang thu hút sự chú ý đáng kể như một giải pháp thay thế bền vững và chi phí thấp cho Li-ion, sử dụng natri dồi dào và rẻ tiền. Nhà sản xuất Trung Quốc CATL đã thương mại hóa thế hệ pin Na-ion đầu tiên của mình. Mặc dù mật độ năng lượng của chúng hiện thấp hơn Li-ion (75-150 Wh/kg), hiệu suất vượt trội ở nhiệt độ thấp và các đặc tính an toàn vốn có lại là những ưu điểm lớn. Chúng được dự báo sẽ chiếm lĩnh thị phần ngày càng tăng, đặc biệt là trong phân khúc lưu trữ tĩnh và xe điện giá rẻ [4, 5].

Thứ hai là Pin thể rắn (SSB) thường được coi là công nghệ mũi nhọn tiếp theo trong công nghệ pin nhằm mục đích thay thế chất điện phân lỏng dễ cháy của pin Li-ion thông thường bằng một vật liệu rắn. Sự chuyển đổi này hứa hẹn những cải tiến mang tính biến đổi cả về an toàn và mật độ năng lượng. Một số công ty đang trong giai đoạn phát triển SSB tiên tiến để đạt chuẩn cho ngành ô tô nhưng công nghệ này vẫn còn khoảng năm năm hoặc hơn nữa mới có thể được triển khai thương mại rộng rãi [4].

Cuối cùng là Pin kim loại - không khí có cấu trúc vật liệu như: kẽm - không khí; sắt - không khí có mật độ năng lượng lý thuyết cực kỳ cao bằng cách sử dụng oxy từ không khí xung quanh làm cực âm. Chúng



Pin Lithium-ion (Li-ion) là công nghệ đang thống trị trên thị trường hiện nay.

đang được phát triển cho các ứng dụng lưu trữ dài hạn nhưng hiện phải đối mặt với những thách thức lớn liên quan đến hiệu suất chu trình nạp-xả và tuổi thọ chu kỳ [5].

Các công nghệ còn đang trong quá trình nghiên cứu và bị giới hạn phát triển (TRL 1-3): Đây là nền tảng cho các thế hệ pin tương lai, tập trung vào việc vượt qua những thách thức khoa học cơ bản trước khi có thể tính đến việc sản xuất thử nghiệm. Tiêu biểu là Pin Kẽm-ion và Nhôm-ion (TRL 2-3) sử dụng các nguyên liệu thô dồi dào, giá rẻ hơn lithium. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện tại vẫn đang tập trung giải quyết các vấn đề cố hữu như sự hình thành đuôi gai (dendrite) làm giảm tuổi thọ và việc tìm kiếm chất điện phân tối ưu để cải thiện hiệu suất [6]. Tương tự, nhiều biến thể mới của Pin Thể rắn và Pin Lithium-Lưu huỳnh cũng đang ở giai đoạn chứng minh khái niệm (TRL 3) với mục tiêu khám phá các vật liệu và cấu trúc đột phá nhằm giải quyết các rào cản về độ ổn định chu kỳ và mật độ năng lượng. Thành công ở giai đoạn này là yếu tố sống còn, quyết định liệu một ý tưởng có tiềm năng trở thành công nghệ khả thi trong tương lai hay không.

Động lực cho nghiên cứu, phát triển và ứng dụng công nghệ pin điện

Động lực toàn cầu thúc đẩy sự tiến bộ của công nghệ pin được tạo nên bởi sự hội tụ của các yếu tố mạnh mẽ về kỹ thuật, kinh tế và chính sách. Nhóm nghiên cứu tổng hợp lại thành 5 động lực cơ bản để thúc đẩy nghiên cứu, phát triển và ứng dụng công nghệ pin điện, cụ thể như sau:

Thứ nhất, động lực chính cho việc triển khai các hệ thống lưu trữ tĩnh quy mô lớn là yêu cầu cấp thiết phải quản lý tính biến đổi của năng lượng tái tạo theo thời gian thực. Pin có thể cung cấp một bộ đầy đủ các dịch vụ phụ trợ bao gồm điều tần, hỗ trợ điện áp và dự phòng quay, những vai trò mà trước đây thường do các nhà máy điện sử dụng nhiên liệu hóa thạch đảm nhiệm. Bằng cách lưu trữ lượng điện tái tạo dư thừa để phát lại sau, pin giúp “gیا cố” một cách hiệu quả các nguồn năng lượng gián đoạn này, giảm thiểu việc cắt giảm công suất phát và nâng cao độ tin cậy chung của lưới điện [1, 2].

Thứ hai, quá trình chuyển đổi sang xe điện đang diễn ra là một trụ cột quan trọng trong các chiến lược khử cacbon toàn cầu. Nhu cầu của người tiêu dùng về quãng đường di chuyển xa hơn, khả năng sạc nhanh hơn và chi phí xe điện thấp hơn đóng vai trò như một động lực mạnh mẽ cho hoạt động R&D về các loại pin có mật độ năng lượng cao như NMC và gần đây hơn là cho các đổi mới đột phá trong các lĩnh vực như cực dương silicon và công nghệ pin thể rắn [4].

Thứ ba, sự sụt giảm liên tục trong chi phí pin đã mở ra nhiều mô hình kinh doanh và nguồn doanh thu mới. Các nhà phát triển dự án hiện có thể tham gia vào hoạt động kinh doanh chênh lệch giá năng lượng. Hơn nữa, khi các thị trường điện ngày càng được cải cách để đề cao tính linh hoạt, pin có thể tham gia vào các thị trường công suất và dịch vụ phụ trợ. Điều này cho phép “*cộng gộp giá trị*”, mô hình mà nhiều nguồn doanh thu được kết hợp để củng cố luận cứ kinh doanh cho việc đầu tư [1, 9]. Khả năng triển khai pin một cách chiến lược để quản lý tình trạng nghẽn mạng lưới điện và qua đó trì hoãn các nâng cấp tốn kém cho cơ sở hạ tầng truyền tải và phân phối cũng là một động lực kinh tế quan trọng khác.

Thứ tư, sự biến động địa chính trị của thị trường nhiên liệu hóa thạch toàn cầu đã làm tăng cường độ lực chiến lược hướng tới sự độc lập về năng lượng lớn hơn. Năng lượng tái tạo được sản xuất tại chỗ khi kết hợp với công suất lưu trữ mạnh mẽ sẽ làm giảm sự phụ thuộc của một quốc gia vào nhiên liệu nhập khẩu qua đó đảm bảo an ninh năng lượng quốc gia. Ở cấp độ mang tính cục bộ, pin có thể cung cấp nguồn điện dự phòng quan trọng trong các sự cố mất điện lưới, cải thiện khả năng phục hồi của các cơ sở hạ tầng thiết yếu như bệnh viện, cũng như cho các khách hàng dân dụng và thương mại.

Thứ năm, chính phủ các nước trên thế giới đang thực hiện các tham vọng chính sách để đẩy nhanh quá trình chuyển dịch năng lượng. Các mục tiêu phát thải ròng bằng không có tính ràng buộc pháp lý được thiết lập ở Vương quốc Anh và EU đòi hỏi sự mở rộng quy mô lớn của năng lượng tái tạo và theo đó là lưu trữ năng lượng. Các sáng kiến chính sách lớn như gói «Fit for 55» của EU, Kế hoạch 5 năm lần thứ 14 của Trung Quốc, và Đạo luật Giảm lạm phát của Hoa Kỳ bao gồm các mục tiêu, quy định bắt buộc và ưu đãi tài

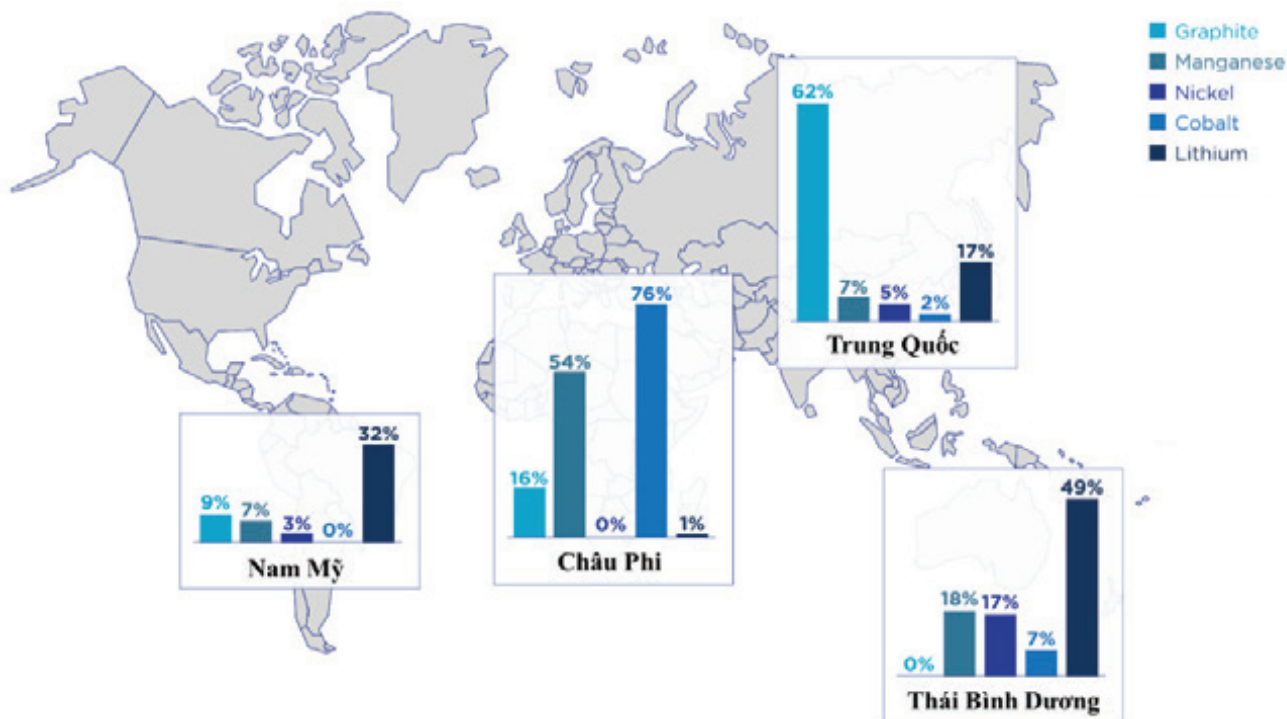
chính cụ thể cho cả việc triển khai và sản xuất pin. Các khuôn khổ pháp lý toàn diện này cung cấp sự chắc chắn cho thị trường để thu hút đầu tư tư nhân trên toàn bộ chuỗi giá trị pin.

Những tiến bộ công nghệ và thách thức đối với pin điện

Những tiến bộ công nghệ

Công nghệ pin Lithium-ion tiếp tục phát triển thông qua một số đổi mới quan trọng. Một xu hướng chủ đạo là chuyển dịch sang các loại cực dương có hàm lượng niken cao hơn để tăng mật độ năng lượng đồng thời giảm sự phụ thuộc vào cobalt, một vật liệu đắt đỏ và gây tranh cãi về mặt đạo đức. Việc tích hợp silicon làm chất phụ gia vào cực âm than chì (graphite) truyền thống là một tiến bộ đáng kể, giúp tăng mật độ năng lượng và cho phép khả năng sạc nhanh hơn. Mục tiêu dài hạn trong lĩnh vực này là chuyển đổi sang cực âm silicon có pha tạp thêm hoặc silicon nguyên chất hứa hẹn một sự cải thiện vượt bậc về hiệu suất, mặc dù những thách thức đáng kể liên quan đến sự giãn nở vật liệu và tuổi thọ chu kỳ vẫn còn tồn tại [5]. Các đổi mới về cấu trúc trong thiết kế bộ pin, chẳng hạn như thiết kế từ Tế bào đến Khối pin (CTP) đang giúp tinh giản hóa quy trình sản xuất bằng cách loại bỏ cấp mô-đun trung gian. Điều này làm tăng mật độ năng lượng thể tích của bộ pin cuối cùng và giảm tổng chi phí sản xuất.

Các công nghệ pin mới nổi chẳng hạn như Pin Natri-ion với các đặc tính hiệu suất đang bắt đầu tiệm cận với pin LFP nhưng không phụ thuộc vào lithium hay cobalt. Công nghệ Na-ion được định vị để trở thành một nhân tố chính, đặc biệt cho các ứng dụng lưu trữ tĩnh và các mẫu xe điện chú trọng về giá. Đối với Pin dòng chảy, việc phát triển các công nghệ mới sử dụng vật liệu dồi dào và chi phí thấp chẳng hạn như sắt đang được tiến hành. Những đổi mới này nhằm mục đích giảm chi phí của pin dòng chảy, giúp chúng cạnh tranh hơn về mặt kinh tế cho các ứng dụng lưu trữ dài hạn. Việc phát triển các chất điện giải rắn khả thi cho Pin thể rắn bao gồm polyme, sunfua và oxit là một trọng tâm chính của nghiên cứu pin thế hệ tiếp theo. Một đột phá trong công nghệ SSB có khả năng cách mạng hóa ngành công nghiệp bằng cách từng bước mang lại sự thay đổi về cả độ an toàn và mật độ năng lượng.



Hình 1. Các rủi ro trong chuỗi cung ứng: Phân bố nguồn tài nguyên với rủi ro chính trị ở mức độ cao. Nguồn: Cơ quan Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ Roland Berger.

Những thách thức

Mặc dù có những tiến bộ vượt bậc, ngành công nghiệp pin vẫn phải đối mặt với nhiều rào cản cần được giải quyết để đáp ứng các yêu cầu trong tương lai về hiệu suất, chi phí và tính bền vững. Mặc dù chi phí đã giảm đáng kể trong thập kỷ qua, chi phí vốn đầu tư ban đầu cao cho các hệ thống BESS vẫn là một rào cản lớn. Sự biến động gần đây về giá của các nguyên liệu thô chính, đặc biệt là lithium đã cho thấy rằng quỹ đạo giảm chi phí trong lịch sử không phải là điều được đảm bảo. Đối với các công nghệ lưu trữ dài hạn như pin dòng chảy, việc đạt được khả năng cạnh tranh về chi phí với các nền tảng Li-ion đã được thiết lập vẫn là một trở ngại lớn [5].

Đối với chuỗi cung ứng và các vật liệu trọng yếu, Trung Quốc hiện đang chi phối việc chế biến gần như toàn bộ các khoáng sản pin trọng yếu bao gồm lithium, cobalt, niken và than chì cũng như việc sản xuất tế bào pin (cell) và các thành phần linh kiện [4]. Sự tập trung này tạo ra những rủi ro đáng kể về địa chính trị và chuỗi cung ứng. Hơn nữa, việc khai thác các vật liệu này làm dấy lên những lo ngại nghiêm trọng về môi

trường và xã hội bao gồm ô nhiễm đất và nước cùng các vấn đề về quyền con người liên quan đến hoạt động khai thác cobalt ở các khu vực như Cộng hòa Dân chủ Congo. Thiết lập một nguồn cung nguyên liệu thô an toàn, bền vững và có đạo đức là một thách thức tối quan trọng đối với ngành công nghiệp (Hình 1).

Nguy cơ quá nhiệt, một chuỗi phản ứng tự duy trì có thể dẫn đến hỏa hoạn và có khả năng gây nổ là một mối lo ngại an toàn nghiêm trọng đối với pin Li-ion. Nguy cơ này đã được chứng thực bởi một số sự cố cháy hệ thống BESS. Việc giảm thiểu hiệu quả đòi hỏi một cách tiếp cận đa tầng, bao gồm các hệ thống quản lý pin tiên tiến (BMS), các giải pháp quản lý nhiệt tinh vi và việc áp dụng các vật liệu chế tạo pin vốn đã an toàn hơn như LFP và sau cùng là SSB. Các quy trình chặt chẽ về thiết kế, lắp đặt và vận hành là điều cần thiết, đặc biệt khi quy mô và mật độ của các dự án BESS tiếp tục tăng lên [2].

Đối với hiệu suất và độ bền, Pin Li-ion hiện tại được tối ưu hóa về mặt kỹ thuật và kinh tế cho việc lưu trữ ngắn hạn, thường trong khoảng 2-4 giờ. Việc cung cấp giải pháp lưu trữ hiệu quả về chi phí cho các khoảng

thời gian kéo dài từ 8 giờ đến nhiều ngày hoặc thậm chí theo mùa là một khoảng trống công nghệ lớn. Đây là lĩnh vực mà các công nghệ thế hệ tiếp theo như pin dòng chảy, hydro xanh và pin kim loại-không khí hướng đến để lấp đầy. Mặt khác, dung lượng lưu trữ năng lượng của pin suy giảm sau mỗi chu kỳ nạp-xả. Tốc độ suy giảm này bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, bao gồm độ sâu xả, C-rate (tốc độ nạp/xả), và nhiệt độ vận hành. Việc đảm bảo một tuổi thọ vận hành dài và có thể dự đoán được vào khoảng 15-20 năm là yếu tố cực kỳ quan trọng đối với tính khả thi tài chính của các dự án lưu trữ quy mô lớn.

Về tái chế và quản lý cuối vòng đời, khi thế hệ pin xe điện và BESS đầu tiên bắt đầu đi đến cuối vòng đời hoạt động, một khối lượng rác thải điện tử khổng lồ sẽ được tạo ra. Do đó, việc thiết lập một cơ sở hạ tầng tái chế hiệu quả, kinh tế và thân thiện với môi trường là một thách thức cấp bách. Các quy trình tái chế hiện tại thường tiêu tốn nhiều năng lượng và tỷ lệ thu hồi vật liệu, đặc biệt đối với các nguyên tố chính như lithium còn thấp. Việc phát triển một nền kinh tế tuần hoàn mạnh mẽ cho pin bao gồm các ứng dụng vòng đời thứ hai (chẳng hạn như sử dụng pin xe điện đã qua sử dụng cho mục đích lưu trữ tĩnh) và các quy trình thu hồi vật liệu hiệu suất cao là điều cần thiết cho sự bền vững lâu dài của ngành công nghiệp [4].

*
* *

Hoạt động R&D công nghệ pin điện đã đạt đến một giai đoạn cực kỳ quan trọng, được thúc đẩy bởi yêu cầu cấp thiết về một hệ thống năng lượng toàn cầu

sạch hơn, an toàn hơn và linh hoạt hơn. Tuy nhiên, con đường phía trước không phải không có những trở ngại đáng kể. Một nỗ lực chung từ các nhà nghiên cứu, các nhà lãnh đạo ngành công nghiệp và các nhà hoạch định chính sách là cần thiết để vượt qua những thách thức ở phía trước. Sự phụ thuộc nặng nề của ngành công nghiệp vào một chuỗi cung ứng tập trung và mong manh cho các nguyên liệu thô trọng yếu đặt ra một mối đe dọa đáng kể đối với tốc độ và an ninh của quá trình chuyển dịch năng lượng. Hơn nữa, các vấn đề về an toàn, hiệu suất lưu trữ dài hạn với chi phí hợp lý và việc thiết lập một nền kinh tế tuần hoàn mạnh mẽ cho pin vẫn là những lĩnh vực then chốt cần sự đổi mới tập trung một cách khẩn cấp.

Tương lai của ngành lưu trữ năng lượng sẽ không phải là một khối đơn nhất; thay vào đó, nó sẽ được đặc trưng bởi một danh mục đa dạng các công nghệ. Mặc dù công nghệ Li-ion có thể sẽ tiếp tục thống trị thị trường trong tương lai gần, một loạt các giải pháp sẽ được yêu cầu để đáp ứng các nhu cầu đa dạng của một lưới điện đã được khử cacbon. Pin Natri-ion cung cấp một giải pháp thay thế chi phí thấp và đầy hứa hẹn cho nhiều ứng dụng, trong khi pin dòng chảy và các công nghệ lưu trữ dài hạn khác sẽ là không thể thiếu để đảm bảo đủ năng lượng trong nhiều ngày và theo mùa. Cuối cùng, sự thành công của cuộc cách mạng công nghệ này sẽ phụ thuộc vào khả năng chung của chúng ta trong việc điều hướng những thách thức phức tạp này, thúc đẩy sự đổi mới không chỉ mang lại hiệu suất cao mà còn cả tính bền vững, an toàn và khả năng phục hồi cần thiết cho các hệ thống năng lượng của tương lai ✍

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Baker McKenzie (2022), *Battery Storage - a global enabler of the Energy Transition*, <https://www.globalcompliancenews.com/2022/02/10/battery-storage250122/>, truy cập ngày 20/11/2025.
- [2] CRO Forum (2022), *Energy Storage Systems: An Emerging Risk Perspective*.
- [3] H.A. Behabtu, M. Messagie, T. Coosemans, et al. (2020), "A review of energy storage technologies application potentials in renewable energy sources grid integration", *Sustainability*, **12**(24).
- [4] F. Wang, O. Borodin, T. Gao, et al. (2018), "Highly reversible zinc metal anode for aqueous batteries", *Nature Materials*, **17**(6), pp.543-549.
- [5] S.K. Das, S. Mahapatra, H. Lahan, (2016), "Aluminium-ion batteries: developments and challenges", *Journal of Materials Chemistry A*, **26**(4), pp.9967-9983.
- [6] J. Janek, W.G. Zeier, (2016), A solid future for battery development, *Nature Energy*, **9**(1), pp.1-4.