

MỘT SỐ LOẠI PIN TÍCH TRỮ NĂNG LƯỢNG MỚI NỔI VÀ TIỀM NĂNG

Đoàn Thị Như Quỳnh^{1,*}, Phạm Đức Cường¹, Trần Văn Thương¹

¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

*Email: nhuquynh.dhcnqn@gmail.com

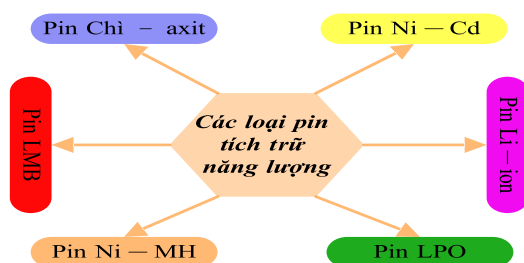
TÓM TẮT

Bài báo này tập trung vào các loại pin tích trữ năng lượng mới nổi, đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy quá trình chuyển đổi năng lượng bền vững. Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ, các loại pin như pin anode Silicon, pin thể rắn, pin Natri – lưu huỳnh và pin lượng tử đang thu hút sự quan tâm lớn nhờ khả năng cải thiện hiệu suất, độ bền và tính an toàn. Bài báo cung cấp cái nhìn tổng quan về các công nghệ pin tiên tiến, phân tích ưu điểm, thách thức và tiềm năng ứng dụng trong tương lai. Đồng thời, bài viết cũng đề cập đến các xu hướng nghiên cứu và phát triển nhằm tối ưu hóa hiệu quả của các loại pin này, góp phần vào việc giảm thiểu tác động môi trường và đáp ứng nhu cầu năng lượng ngày càng tăng.

Từ khóa: Hệ thống tích trữ năng lượng (ESS), xe điện (EV), pin tích trữ năng lượng, công nghệ mới nổi, Pin Li-ion (LIB).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống tích trữ năng lượng (ESS) đóng vai trò quan trọng trong việc cân bằng giữa sản xuất và tiêu thụ năng lượng, mang lại lợi ích cho cả lưới điện và người dùng cá nhân [1]. Ngày càng nhiều ngành công nghiệp ứng dụng ESS vào các lĩnh vực như xe điện (EV), lưu trữ năng lượng tái tạo, và triển khai lưới điện vi mô/thông minh. Các thế hệ xe điện mới nhất đang dần thay thế động cơ đốt trong (ICE) truyền thống nhờ tính hiệu quả và thân thiện với môi trường. Hiện nay, các loại pin tích trữ năng lượng dùng trong xe EV phổ biến bao gồm pin lithium-ion (Li-ion), pin Chì-axít, pin niken-cadmium (Ni-Cd), pin Ni-MH, pin Li – kim loại (LMB) và pin lithium-polyme (LPO) (Hình 1).



Hình 1. Các loại pin tích trữ năng lượng [2]

Pin lithium ngày càng trở nên quan trọng trong ngành công nghiệp tích trữ năng lượng điện nhờ mật độ năng lượng và năng lượng riêng cao. Các tài liệu nghiên cứu cung cấp một

bản tổng quan toàn diện về những tiến bộ chính và các hạn chế của pin Li-ion, cùng với kiến thức hiện có về thành phần hóa học của chúng. Pin Li-ion được phân loại là một biến thể của pin lithium, sử dụng vật liệu điện cực chứa hợp chất lithium xen kẽ.

Tuy nhiên, để khắc phục những nhược điểm của pin tích trữ năng lượng, các nhà nghiên cứu đang nghiên cứu một số pin mới có tiềm năng sử dụng trong tương lai như pin lithium-sulfur, pin thể rắn, và pin flow đang thu hút sự quan tâm lớn nhờ khả năng cải thiện hiệu suất, độ bền và tính an toàn.

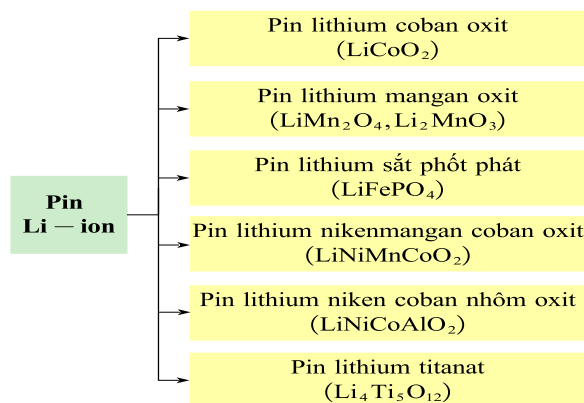
Một số đóng góp chính của bài báo này bao gồm:

- Phân tích đánh giá về một số loại pin Li-ion phổ biến dùng trong xe điện hiện nay;
- Đưa ra một số loại pin tích trữ năng lượng mới nổi và so sánh các thông số với nhau.

Các phần tiếp theo của bài báo được chia thành 5 mục. Trong đó, Mục 2 cung cấp cái nhìn tổng quan về các loại pin Li-ion, đồng thời so sánh các thông số giữa chúng. Mục 3 giới thiệu một số loại pin tích trữ năng lượng mới nổi hiện nay. Xu hướng phát triển trên thế giới của pin tích trữ năng lượng sẽ được trình bày trong Mục 4. Cuối cùng, Mục 5 đưa ra kết luận và dự đoán các xu hướng trong tương lai.

2. TỔNG QUAN VỀ PIN LI - ION

Pin lithium-ion (Li-ion) được xem là một trong những công nghệ pin hàng đầu được sử dụng trong các phương tiện xe EV. Mật độ năng lượng cao, hiệu suất lớn hơn, chu kỳ tuổi thọ dài hơn và hiệu suất tốt hơn ở nhiệt độ cao là những đặc điểm nổi bật của pin Li-ion. Lithium duy trì tiềm năng oxi hóa khử thấp nhất, khoảng (-3,05 V), và độ tương đương điện hóa lớn nhất là (3,86 Ah/g) [3].



Hình 2. Các loại pin Li-ion

Lithium tiếp tục được đánh giá là nguyên liệu lý tưởng cho các phương tiện chạy điện nhờ khả năng duy trì tiềm năng tế bào cao nhất, một phần do đặc tính giảm tiềm năng thấp nhất so với các nguyên tố khác. Một ưu điểm nổi bật của loại pin này là khả năng tái chế các thành phần cấu tạo, góp phần vào tính bền vững. Tuy nhiên, hạn chế lớn nằm ở việc thiếu hụt nguồn nguyên liệu và chi phí sản xuất cao, lên tới 135 USD/kWh [4].

Hiệu suất của pin Li-ion chịu ảnh hưởng lớn từ đặc tính của các vật liệu cấu thành, trong đó việc lựa chọn vật liệu điện cực dương đóng vai trò then chốt. Các yếu tố như công suất, độ an toàn, chi phí và tuổi thọ pin đều phụ thuộc vào quyết định này [3]. Các loại vật liệu cực âm phổ biến hiện nay bao gồm lithium coban oxit (LCO), lithium mangan oxit (LMO), lithium sắt photphat (LFP), lithium niken mangan coban oxit (LNMC), lithium niken coban nhôm oxit (LNCA) và lithium titanat (LTO) [2] (Hình 2).

2.1. Pin LCO

Nhà nghiên cứu John Goodenough từ Đại học Texas đã khám phá ra sự tồn tại của các oxit kim loại chuyển tiếp vào năm 1980 [5], mở

đường cho việc sử dụng chúng làm điện cực dương phổ biến trong công nghệ pin. Đến năm 1991, Sony đã giới thiệu pin LCO (Lithium Coban Oxit), sử dụng coban oxit làm cực âm, trở thành vật liệu tiêu chuẩn trong pin Li-ion. Với dung lượng lý thuyết khoảng 274 mAh/g và mật độ khối cao 1363 mAh/cm³, pin LCO sở hữu mật độ năng lượng lớn, tuổi thọ trung bình và độ an toàn đáng kể, phù hợp cho các thiết bị điện tử như máy ảnh, máy tính xách tay và máy tính bảng.

Tuy nhiên, pin LCO có nhược điểm là hoạt động kém ổn định trong điều kiện dòng điện sạc-xả cao, đòi hỏi các biện pháp bảo vệ để tránh quá nhiệt. Ngoài ra, chi phí cao của coban cũng là một hạn chế, khiến việc tìm kiếm vật liệu thay thế trở nên cần thiết để cải thiện tính phù hợp của LCO trong các phương tiện EV [6].

2.2. Pin LMO

LMO là vật liệu cực âm phổ biến trong công nghệ pin Li-ion nhờ nguyên liệu dễ tiếp cận và chi phí thấp [7]. Được phát triển bởi Phòng thí nghiệm Bellcore năm 1994, cấu trúc spinel 3D của LMO giúp giảm điện trở và tăng khả năng sạc/xả. Vật liệu này có công suất và mật độ năng lượng tốt, lưu trữ nhiều hơn 50% năng lượng so với pin dùng niken, với dung lượng lý thuyết khoảng 148 mAh/g và duy trì đến 95% dung lượng, vượt trội hơn LCO [8].

Tuy nhiên, LMO có nhược điểm như ảnh hưởng tiêu cực đến chu kỳ sạc, tuổi thọ và hiệu suất. Mangan trong LMO dễ phân hủy ở nhiệt độ cao, gây mất dung lượng đáng kể. So với pin dùng coban, dung lượng LMO thấp hơn khoảng 33% [9]. Hiện nay, LMO được ứng dụng trong xe điện, điển hình là Nissan Leaf [10].

2.3. Pin LFP

Năm 1996, Đại học Texas phát hiện photphat có thể dùng làm cực dương cho pin lithium. Vật liệu này ổn định khi sạc quá mức, chịu được nhiệt độ cao mà không phân hủy, an toàn và đáng tin cậy hơn so với LCO hay LMO. Photphat có dải nhiệt độ hoạt động từ -30°C đến 60°C, giúp giảm thoát nhiệt và ngăn cháy nổ [11]. Pin LFP làm từ photphat kích thước nano, có điện trở thấp, tuổi thọ dài, khả năng xử lý tải

cao, độ an toàn và ổn định nhiệt tốt, chi phí thấp và không độc hại. Dù năng lượng riêng thấp hơn LMO, pin LFP ít bị ảnh hưởng bởi sạc quá mức hoặc không đầy. Tuy nhiên, hiệu suất và tuổi thọ bị hạn chế do nhiệt độ. Pin LFP có năng lượng riêng khoảng 160 mAh/g và điện áp danh định 3,40 V, giúp dễ nâng cấp hiệu suất pin.

2.4. Pin LNMC

Các công ty sản xuất pin hiện đang tập trung nghiên cứu hỗn hợp cực dương từ niken-mangan-coban (LNMC), nhằm đạt năng lượng riêng cao hoặc mật độ công suất lớn. Trong khi cực âm dựa trên silic thường phải đánh đổi giữa dung lượng và chu kỳ sạc, sự kết hợp giữa niken và mangan mang lại hiệu suất tổng thể tốt, tận dụng năng lượng riêng cao của niken và điện trở nội thấp của mangan, dù niken kém ổn định và mangan có năng lượng riêng thấp [12].

Pin LNMC với tỷ lệ 33% niken, 33% mangan và 34% coban đang được ưa chuộng trong xe điện nhờ năng lượng riêng cao, tỷ lệ tự sinh nhiệt thấp và chi phí nguyên liệu giảm do hàm lượng coban thấp hơn.

2.5. Pin LNCA

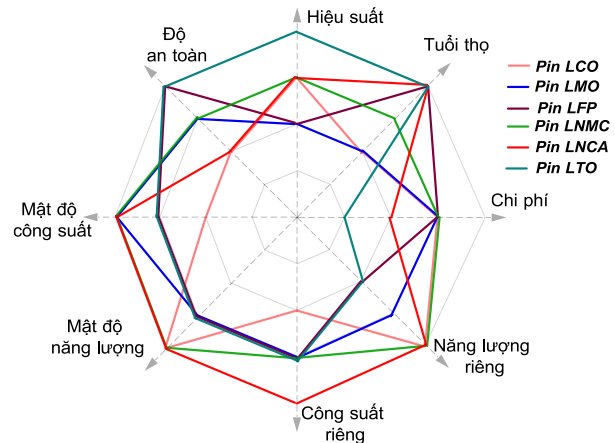
Pin LNCA được giới thiệu vào năm 1999 và hiện chiếm một phần nhỏ trong thị trường pin toàn cầu. Với việc sử dụng niken làm vật liệu cathode, pin này giảm sự phụ thuộc vào coban so với lithium coban oxit [13]. Ngành công nghiệp ô tô đang tập trung sản xuất pin NCA nhờ những ưu điểm như năng lượng riêng cao, mật độ công suất lớn, tuổi thọ dài, cùng với cân nhắc về chi phí và độ an toàn. Tesla, một trong những công ty hàng đầu trong lĩnh vực xe điện, hiện đang ứng dụng công nghệ pin LNCA để phát triển các dòng xe của mình.

2.6. Pin LTO

Pin LTO được tạo nên từ sự kết hợp giữa LMO, LNCA làm cực dương và titanat làm cực âm, tạo thành cấu trúc spinel. Công nghệ này nổi bật với khả năng hoạt động ổn định, tuổi thọ dài và hiệu suất an toàn ngay cả trong điều kiện nhiệt độ đóng băng [14].

Hình 3 so sánh hiệu suất các loại pin Li-ion dựa trên năng lượng riêng, công suất, mật độ năng lượng, độ an toàn, hiệu suất nhiệt độ, tuổi

thọ và chi phí (thang điểm 1-4). Pin LNCA có năng lượng riêng cao, tuổi thọ dài và mật độ công suất lớn, nhưng độ an toàn và hiệu suất ở mức trung bình, cùng chi phí cao. Pin LTO nổi bật với tuổi thọ, hiệu suất và độ an toàn cao, nhưng năng lượng riêng thấp và chi phí lớn. Pin LCO và LMO có đặc tính trung bình.



Hình 3. So sánh các thông số kỹ thuật và chỉ số kinh tế của các loại pin Li-ion [10].

Khi ứng dụng trong xe điện, chu kỳ sống và độ an toàn cần được ưu tiên hơn dung lượng. Việc lựa chọn vật liệu, đặc biệt là cực dương, đóng vai trò quyết định đến công suất, độ an toàn, chi phí và tuổi thọ của pin.

Bảng 1 so sánh cho thấy các loại pin dùng cho xe EV có những ưu nhược điểm rõ rệt. Pin LMO, LFP và LCO có ưu thế về mật độ công suất cao (1850 W/kg), thời gian sạc nhanh (<1 giờ) và tuổi thọ chu kỳ tốt (500-2000 lần), phù hợp với nhu cầu hiệu suất và độ bền của EV hiện đại. Tuy nhiên, điểm yếu lớn của chúng là khả năng chịu quá tải rất thấp, đòi hỏi hệ thống quản lý pin chính xác để tránh quá nhiệt hoặc hư hỏng. Trong khi đó, pin chì-axit và Ni-MH có khả năng chịu quá tải tốt hơn nhưng lại kém hơn về mật độ năng lượng, trọng lượng nặng và thời gian sạc lâu, khiến chúng ít phù hợp với EV nhưng có thể ứng dụng trong xe hybrid hoặc hệ thống phụ trợ. Pin Ni-Cd tuy có tuổi thọ chu kỳ cao (1000 lần) nhưng không thân thiện môi trường và có mật độ năng lượng thấp. Nhìn chung, pin LFP nổi bật nhờ cân bằng giữa hiệu suất, tuổi thọ và tính an toàn, trở thành lựa chọn tối ưu cho EV, trong khi các loại pin khác phù hợp với nhu cầu cụ thể tùy theo thiết kế hệ thống.

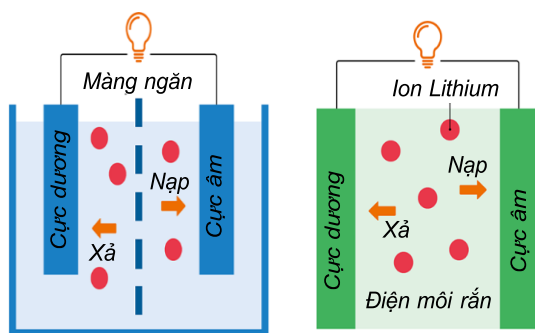
Bảng 1. So sánh các pin khác nhau cho các ứng dụng xe EV.

Thông số	Pin LMO	Pin chì-axit	Pin LFP	Pin Ni - MH	Pin LCO	Pin Ni-cd
Điện áp định mức (V)	3,8	2,0	3,5	1,5	3,6	1,25
Mật độ công suất (W/kg)	1850	180	1850	150	1850	250-1000
Quá trình tự xả	<10%	<5%	<10%	>30%	<10%	>30%
Dòng điện tải đỉnh	>30C	5C	>30C	5C	>3C	20C
Khối lượng	Nhẹ	Nặng	Nhẹ	Trung bình	Nhẹ	Nặng
Điện áp ngắt khi xả (V)	2,5-3,0	1,75	2,4-3,0	1,0	2,8	1,0
Mật độ năng lượng riêng (Wh/kg)	100-145	35-55	95-125	65-125	145-185	50-85
Tuổi thọ chu kỳ (xả 80%)	500-1000	250-350	1000-2000	200-300	500-1000	1000
Thời gian nạp (giờ)	<1	8-16	<1	2-4	2-4	1
Điện áp cắt khi nạp (V)	3,6	2,4	4,2	3,6	4,2	3,6
Khả năng chịu quá tải	Rất thấp	Cao	Rất thấp	Bình thường	Rất thấp	Thấp
Thân thiện với môi trường	Có	Không	Có	Có	Có	Không

3. MỘT SỐ LOẠI PIN TÍCH TRỮ NĂNG LƯỢNG MỚI NỔI HIỆN NAY

3.1. Pin thể rắn

Những loại pin này phát triển dựa trên pin Li-ion. Pin thể rắn (SSB) sử dụng chất điện phân rắn thay vì chất điện phân lỏng hoặc gel, mang lại độ an toàn cao hơn, mật độ năng lượng cao hơn và tuổi thọ chu kỳ dài hơn [15]. Pin có dung lượng cao hơn có thể được đặt trong cùng một thể tích trong xe điện. Ngoài ra, do sự hình thành sợi nhánh (dendrite) bị ức chế trong các loại pin này nên nguy cơ cháy nổ cực kỳ thấp, vì vậy chúng không cần thêm các thành phần để đảm bảo an toàn. Pin SSB có tỷ lệ tự xả rất thấp và cung cấp tuổi thọ dài hơn do ít bị suy giảm. Mặc dù có những ưu điểm này, việc chuyển ion trong chất điện phân rắn rất khó khăn. Điện trở của pin tăng lên khi nhiệt độ tăng và pin không thể hoạt động hiệu quả. Những loại pin SSB, được coi là ứng cử viên cho việc sử dụng rộng rãi hơn trong xe điện, vẫn đang trong quá trình nghiên cứu. Hình 4 cho thấy nguyên lý hoạt động của Li-ion và pin SSB.

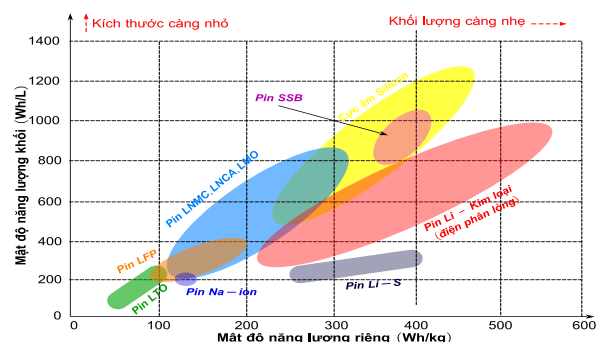


(a) Nguyên lý hoạt động của pin Li-ion

(b) Nguyên lý hoạt động của pin SSB

Hình 4. Nguyên lý hoạt động của pin Li-ion và pin SSB.

Khả năng lưu trữ của pin SSB (Wh/kg), là một trong những lợi thế hứa hẹn nhất so với pin lithium-ion truyền thống. Việc sử dụng cực âm lithium kim loại trong SSB là yếu tố chính góp phần vào hiệu suất vượt trội này. Lithium kim loại có khả năng lưu trữ lý thuyết cao hơn nhiều so với cực âm graphite được sử dụng trong pin lithium-ion thông thường. Ngoài ra, việc loại bỏ chất điện phân lỏng, vốn có thể chiếm nhiều không gian và hạn chế tính gọn nhẹ của thiết kế pin, cho phép lưu trữ năng lượng hiệu quả và tối ưu hơn, dẫn đến mật độ năng lượng cao hơn đáng kể.



Hình 5. Các loại pin Lithium ứng với mật độ năng lượng khối và năng lượng riêng khác nhau.

Mật độ năng lượng của SSB có thể đạt từ 500-700 Wh/kg, gấp 2-3 lần so với pin lithium-ion truyền thống (150-250 Wh/kg). Điều này làm cho chúng trở nên hấp dẫn cho các ứng dụng năng lượng cao như xe điện, hàng không vũ trụ và thiết bị điện tử di động, nơi dung lượng cao hơn đồng nghĩa với tuổi thọ pin dài hơn và ít lần sạc hơn. Hình 5 so sánh mật độ năng lượng của các công nghệ pin khác nhau, cho thấy cách các hệ thống SSB và lithium kim loại mới nổi vượt trội so với pin lithium-ion truyền thống (LFP,

LNMC).

3.2. Pin màng mỏng

Pin màng mỏng (FLIB) là loại pin thể rắn (SSB) sử dụng chất điện phân rắn và các điện cực được lắng đọng thành lớp mỏng, thường dưới 15 μm . Chúng được thiết kế cho các ứng dụng đòi hỏi nguồn điện nhẹ, nhỏ gọn và linh hoạt, như thiết bị y tế, thẻ RFID và thiết bị điện tử đeo được. Quá trình chế tạo sử dụng các kỹ thuật như phún xạ magnetron tần số vô tuyến, lắng đọng laser xung và bay hơi nhiệt, cho phép kiểm soát chính xác độ dày, thành phần và vi cấu trúc của từng lớp, tối ưu hóa hiệu suất pin.

Khác với pin Li-ion truyền thống sử dụng chất điện phân lỏng, pin FLIB sử dụng chất điện phân rắn, như lithium phosphorus oxynitride (LiPON), giúp giảm rủi ro rò rỉ và tăng độ ổn định nhiệt. Chúng mang lại mật độ năng lượng cao, hiệu suất ổn định qua nhiều chu kỳ sạc-xả, và tốc độ sạc-xả nhanh nhờ cấu trúc màng mỏng. Tính nhẹ và linh hoạt của chúng phù hợp cho các thiết bị điện tử đòi hỏi uốn cong hoặc hình dạng không đều. Với sự phát triển công nghệ, thị trường pin FLIB dự kiến sẽ tăng trưởng, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao về lưu trữ năng lượng tiên tiến [16].

Pin FLIB thường có dung lượng thấp hơn so với pin lithium-ion (LIB) truyền thống, dao động từ 40 đến 70 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$, tùy thuộc vào vật liệu và độ dày các lớp hoạt động. Ví dụ, pin sử dụng lithium cobalt oxide (LiCoO_2) làm cực dương có thể đạt khoảng 60 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$ ở tốc độ xả phù hợp cho ứng dụng công suất thấp. Dung lượng bị ảnh hưởng bởi độ dày cực dương, thành phần chất điện phân rắn và hướng tinh thể vật liệu. Các lớp màng dày hơn có thể tăng dung lượng nhưng cũng làm tăng điện trở, ảnh hưởng đến tốc độ sạc-xả. Nghiên cứu hiện tập trung vào tối ưu hóa sự cân bằng giữa dung lượng, khả năng xả nhanh và độ ổn định chu kỳ, đồng thời điều chỉnh vi cấu trúc để tăng dung lượng mà vẫn duy trì tính linh hoạt và nhẹ, phù hợp cho các ứng dụng di động.

3.3. Pin giấy

Pin giấy (PAB) là một trong các loại pin tích trữ năng lượng mới nổi, kết hợp tính linh hoạt,

chi phí thấp và thân thiện với môi trường. Sử dụng giấy làm chất nền và được kích hoạt bằng chất lỏng sinh học hoặc nước, pin PAB phù hợp cho các ứng dụng như chip sinh học dùng một lần, bộ dụng cụ xét nghiệm y tế và hệ thống lab-on-a-chip. Việc sử dụng giấy giúp giảm trọng lượng và kích thước, đồng thời cho phép tích hợp dễ dàng với các hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) và thiết bị bioMEM. Pin PAB có thể được chế tạo bằng phương pháp đơn giản như ép nhựa, phù hợp cho ứng dụng giá rẻ. Pin này có tiềm năng lớn trong việc cung cấp năng lượng cho hệ thống sinh học, đặc biệt trong môi trường hạn chế tài nguyên, với khả năng kích hoạt bằng chất lỏng như nước tiểu hoặc nước bọt. Pin PAB có thể cung cấp điện áp tối đa 1,56 V và hoạt động trong tối đa 2 giờ, phù hợp để vận hành các thiết bị nhỏ như đèn LED, cảm biến và hệ thống hiển thị [17].

Pin PAB không chỉ có ứng dụng thực tế mà còn mang lại nhiều lợi ích môi trường nhờ tính thân thiện và bền vững. Các vật liệu cấu thành như magie, đồng clorua và giấy đều không độc hại và có thể phân hủy sinh học, thay thế cho các hóa chất độc hại trong pin truyền thống. Quy trình chế tạo đơn giản giúp giảm chi phí và tiêu thụ tài nguyên, đồng thời việc sử dụng giấy làm chất hỗ trợ điện cực và dẫn chất lỏng cải thiện hiệu suất và tuổi thọ pin. Với sự phát triển công nghệ, pin PAB được kỳ vọng sẽ trở thành giải pháp quan trọng cho các thiết bị điện tử công suất thấp dùng một lần, nhờ tính linh hoạt, chi phí thấp và khả năng thu năng lượng từ chất lỏng sinh học hoặc nước, phù hợp cho các ứng dụng từ giám sát môi trường đến chẩn đoán y tế [18].

3.4. Pin Graphene

Pin Li-ion dựa trên graphene sở hữu nhiều đặc điểm và thông số khác biệt so với pin Li-ion truyền thống. Graphene, với cấu trúc hai chiều độc đáo, mang lại độ dẫn điện cao. Khi được tích hợp vào pin Li-ion, nó cải thiện đáng kể tốc độ chuyển điện tích, dẫn đến khả năng sạc và xả nhanh hơn. Ví dụ, so với các cực âm pin Li-ion tiêu chuẩn, các anode dựa trên graphene có thể đạt được mật độ dòng điện cao hơn nhiều trong các chu kỳ sạc-xả [19]. Về khả năng lưu

trữ cụ thể, vật liệu dựa trên graphene có khả năng tăng lượng ion lithium có thể lưu trữ trên mỗi đơn vị khối lượng vật liệu điện cực. Một số nghiên cứu đã chỉ ra sự gia tăng khả năng lưu trữ cụ thể từ 10-30% trong các điện cực được cải tiến bằng graphene.

Những loại pin này được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực. Trong lĩnh vực điện tử tiêu dùng, khả năng sạc nhanh của chúng rất được ưa chuộng. Các thiết bị di động, máy tính xách tay và máy tính bảng có thể được sạc trong thời gian ngắn hơn nhiều so với các thiết bị sử dụng pin Li-ion thông thường. Trong ngành công nghiệp ô tô, pin lithium-ion dựa trên graphene có thể cách mạng hóa xe điện. Chúng có thể cung cấp công suất cao hơn để tăng tốc nhanh và tăng phạm vi lái xe nhờ khả năng lưu trữ năng lượng tăng lên. Ngoài ra, trong các ứng dụng hàng không vũ trụ, nơi trọng lượng và hiệu quả năng lượng là yếu tố quan trọng, tính nhẹ và mật độ năng lượng cao của các loại pin này làm cho chúng trở thành một lựa chọn hấp dẫn để cung cấp năng lượng cho các hệ thống điện tử hàng không và các hệ thống điện khác.

3.5. Pin anode Silicon

Pin anode silicon nổi bật nhờ khả năng lưu trữ cụ thể lý thuyết cao (khoảng 4200 mAh/g), gấp hơn 10 lần so với anode graphite truyền thống (372 mAh/g). Điều này cho phép pin có mật độ năng lượng cao hơn, lưu trữ nhiều ion lithium hơn trên mỗi đơn vị khối lượng. Vật liệu dựa trên silicon có tiềm năng lớn để làm anode cho pin Li-ion nhờ mật độ năng lượng cao, chi phí thấp và điện áp hoạt động phù hợp. Tuy nhiên, hai trở ngại chính cản trở ứng dụng rộng rãi của pin này là sự thay đổi thể tích lớn do quá trình lithiation và sự hình thành lớp điện phân rắn không ổn định [20]. Để khắc phục, các giải pháp như silicon cấu trúc nano, composite silicon-carbon và thiết kế màng mỏng đã được phát triển, giúp cải thiện tuổi thọ chu kỳ và duy trì tính toàn vẹn của điện cực.

Ứng dụng của pin anode silicon rất đa dạng. Trong thiết bị điện tử dân dụng, pin giúp kéo dài thời lượng pin cho điện thoại, máy tính bảng và thiết bị đeo tay. Trong xe điện, anode silicon giúp tăng phạm vi lái xe nhờ mật độ năng lượng

cao, giảm nhu cầu sạc thường xuyên.

3.6. Pin lượng tử

Pin lượng tử (QB) [21] sở hữu những đặc điểm nổi bật nhờ tận dụng hiện tượng vướng víu lượng tử (quantum entanglement), cho phép sạc cực nhanh bằng cách sạc đồng thời nhiều trạng thái lượng tử. Thiết kế dựa trên các trạng thái lượng tử cũng giúp tăng mật độ năng lượng, vượt trội so với pin truyền thống. Tuy nhiên, độ ổn định của pin QB vẫn là thách thức lớn do các trạng thái lượng tử dễ bị ảnh hưởng bởi yếu tố bên ngoài. Hiện tại, các nguyên mẫu pin lượng tử có khả năng lưu trữ năng lượng lý thuyết cao nhưng giá trị thực tế còn hạn chế, và nghiên cứu đang tập trung vào cải thiện hiệu suất sạc-xả cũng như tuổi thọ chu kỳ.

Ứng dụng của pin QB rất đa dạng. Trong lĩnh vực xe điện, khả năng sạc nhanh có thể giảm thời gian sạc từ hàng giờ xuống vài phút, thúc đẩy sự phổ biến của xe điện. Trong điện tử tiêu dùng, pin lượng tử giúp kéo dài thời lượng pin và sạc nhanh cho các thiết bị như điện thoại và máy tính xách tay. Ngoài ra, trong lưu trữ năng lượng quy mô lưới điện, pin QB có thể giúp cân bằng nguồn điện từ năng lượng tái tạo, góp phần tạo ra hệ thống năng lượng ổn định và bền vững hơn.

Pin QB là thiết bị lưu trữ năng lượng sử dụng cơ học lượng tử để nâng cao hiệu suất hoặc chức năng. Mặc dù vẫn đang trong giai đoạn sơ khai, với chỉ một số minh chứng nguyên lý được thực hiện, các nguyên tắc thiết kế đột phá của chúng mang lại tiềm năng giải quyết các thách thức năng lượng trong tương lai.

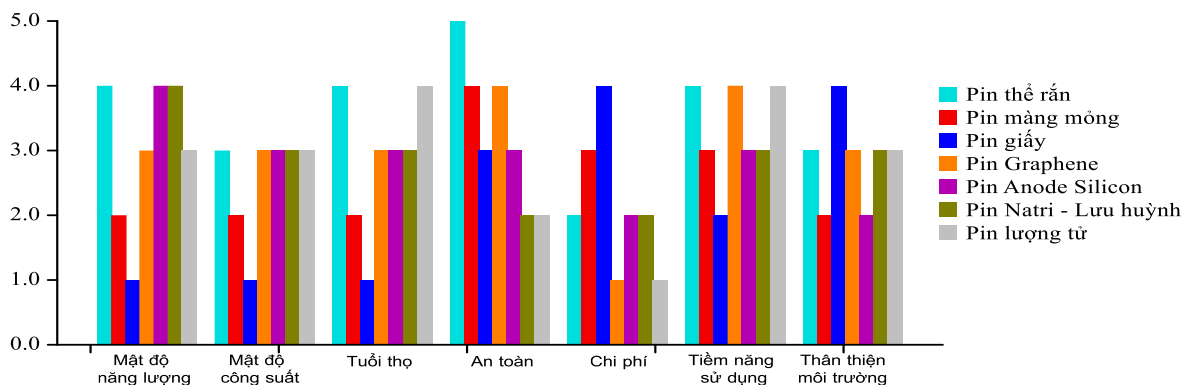
3.7. Pin Natri-Lưu huỳnh

Pin natri-lưu huỳnh (Na-S) [22] là một trong những lựa chọn tiềm năng cho hệ thống lưu trữ năng lượng (ESS) nhờ chi phí thấp và mật độ năng lượng cao. Với mật độ năng lượng lý thuyết lên đến 1274 Wh/kg, pin Na-S tồn tại dưới hai dạng chính: pin Na-S nhiệt độ cao (HT-Na/S) và pin Na-S nhiệt độ phòng (RT-Na/S). HT-Na/S hoạt động ở khoảng 300°C với mật độ năng lượng lý thuyết 760 Wh/kg, nhưng yêu cầu bảo trì cao và tiềm ẩn nguy cơ rò rỉ natri lỏng. Trong khi đó, RT-Na/S hứa hẹn hiệu suất cao

hơn nhờ phản ứng hai electron của lưu huỳnh với natri, giảm thiểu rủi ro an toàn và chi phí vận hành. Tuy nhiên, pin RT-Na/S vẫn đối mặt với các thách thức lớn như độ dẫn điện thấp của lưu huỳnh (10^{-30} S/cm), sự giãn nở thể tích lên đến 171% khi hấp thụ natri, hiện tượng hòa tan polysulfide gây suy giảm dung lượng, và sự tạo lớp natri không đồng đều có thể dẫn đến chập mạch và quá nhiệt.

Để khắc phục các hạn chế trên, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc tối ưu hóa thiết kế vật liệu cathode, anode, chất điện phân, màng ngăn và chất kết dính. Các giải pháp bao gồm sử dụng vật liệu chứa lưu huỳnh giúp kiểm soát sự hòa tan polysulfide và tăng độ dẫn điện, thiết kế

cathode có hàm lượng lưu huỳnh cao nhưng giảm thiểu hiệu ứng shuttling, cũng như cải tiến chất điện phân bằng cách thêm chất lỏng ion và phụ gia SiO_2 nhằm tăng liên kết với lưu huỳnh. Ngoài ra, việc áp dụng lớp composite cầu carbon rỗng (HCS)/ MoS_2 giữa cathode và màng ngăn giúp nâng cao độ dẫn điện và hoạt động như một bể chứa polysulfide, cải thiện độ ổn định chu kỳ của pin. Nhìn chung, pin RT-Na/S là một công nghệ đầy hứa hẹn cho lưu trữ năng lượng tĩnh với hiệu suất-giá thành tốt, nhưng vẫn cần nhiều nghiên cứu sâu hơn để giải quyết các vấn đề về động học phản ứng, độ bền vật liệu và hiệu suất tổng thể.



Hình 6. So sánh các thông số kỹ thuật và chỉ số kinh tế của các loại pin mới nổi.

4. XU THẾ TRÊN THẾ GIỚI

Xu hướng phát triển của pin trên thế giới đang tập trung vào việc nâng cao hiệu suất, độ an toàn và tính bền vững nhằm đáp ứng nhu cầu ngày càng cao của các ngành công nghiệp như xe điện, năng lượng tái tạo và thiết bị điện tử. Các nhà khoa học đang nghiên cứu vật liệu tiên tiến, đặc biệt là chất điện phân rắn, để cải thiện mật độ năng lượng, tăng tuổi thọ và giảm nguy cơ cháy nổ. Bên cạnh đó, hệ thống quản lý pin thông minh (BMS) tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) và Internet vạn vật (IoT) giúp tối ưu hóa quá trình sạc, xả và bảo trì, nâng cao hiệu quả sử dụng. Tái chế pin và phát triển mô hình kinh tế tuần hoàn cũng trở thành trọng tâm nhằm giảm thiểu tác động môi trường, với các phương pháp tái chế khép kín giúp thu hồi và tái sử dụng vật liệu hiệu quả hơn. Ngoài ra, các công nghệ pin thế hệ mới trên đang được thử nghiệm để tìm ra giải pháp thay thế pin lithium-ion truyền thống, khắc phục những hạn chế về chi phí và tài

nguyên. Đặc biệt, sự gia tăng nhu cầu sử dụng pin trong các hệ thống lưu trữ năng lượng tái tạo đang thúc đẩy việc xây dựng khung pháp lý và tiêu chuẩn hóa để đảm bảo an toàn và hiệu suất trong tương lai.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã làm nổi bật vai trò then chốt của các loại pin tích trữ năng lượng mới nổi trong hành trình chuyển đổi sang nền năng lượng bền vững. Các công nghệ tiên tiến như pin anode Silicon, pin thể rắn, pin Natri – lưu huỳnh và pin lượng tử đang dẫn đầu xu hướng nhờ những cải tiến vượt bậc về hiệu suất, độ bền và tính an toàn. Tuy nhiên, để những công nghệ này trở nên phổ biến và hiệu quả hơn, vẫn cần giải quyết nhiều thách thức về mặt kỹ thuật, chi phí và khả năng mở rộng quy mô. Trong tương lai, xu hướng nghiên cứu và phát triển pin tích trữ năng lượng sẽ tiếp tục hướng đến việc tối ưu hóa hiệu suất, giảm thiểu tác động môi trường và hạ giá thành sản xuất. Đồng thời, sự kết hợp

giữa các công nghệ mới nổi và nguồn năng lượng tái tạo sẽ mở ra những cơ hội đột phá, góp phần định hình lại hệ thống năng lượng toàn cầu. Những tiến bộ trong lĩnh vực này

không chỉ đáp ứng nhu cầu năng lượng ngày càng tăng mà còn thúc đẩy một tương lai bền vững, nơi năng lượng sạch và hiệu quả trở thành trụ cột chính của xã hội.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Lưu Bình (2024). Nghiên cứu và phân tích một số công nghệ lưu trữ năng lượng tái tạo sử dụng hiện nay trên thế giới. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh*, Tập 2, số 1, 77-89. E.ISSN 2185-6145.
2. Lipu, M. S. H., Mamun, A. A., Ansari, S., Miah, M. S., Hasan, K., Meraj, S. T., ... & Tan, N. M. (2022). Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals. *Batteries*, 8(9), 119.
3. Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*, 18(5), 252-264.
4. Hanifah, R. A., Toha, S. F., & Ahmad, S. (2015). Electric vehicle battery modelling and performance comparison in relation to range anxiety. *Procedia Computer Science*, 76, 250-256.
5. Maiyalagan, T., & Elumalai, P. (Eds.). (2021). *Rechargeable lithium-ion batteries: trends and progress in electric vehicles*. Boca Raton: CRC Press.
6. Wang, K., Wan, J., Xiang, Y., Zhu, J., Leng, Q., Wang, M., ... & Yang, Y. (2020). Recent advances and historical developments of high voltage lithium cobalt oxide materials for rechargeable Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 460, 228062.
7. Liu, H., Li, M., Xiang, M., Guo, J., Bai, H., Bai, W., & Liu, X. (2021). Effects of crystal structure and plane orientation on lithium and nickel co-doped spinel lithium manganese oxide for long cycle life lithium-ion batteries. *Journal of Colloid and Interface Science*, 585, 729-739.
8. Marincas, A. H., & Ilea, P. *Enhancing Lithium Manganese Oxide Electrochemical Behavior by Doping and Surface Modifications, Coatings*. 11 (2021) 456.
9. Chen, Q., Luo, L., Wang, L., Xie, T., Dai, S., Yang, Y., ... & Yuan, M. (2018). Enhanced electrochemical properties of Y₂O₃-coated-(lithium-manganese)-rich layered oxides as cathode materials for use in lithium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 1778-1786.
10. Hannan, M. A., Hoque, M. M., Hussain, A., Yusof, Y., & Ker, P. J. (2018). State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *Ieee Access*, 6, 19362-19378.
11. Zhao, C., Yin, H., & Ma, C. (2015). Quantitative evaluation of LiFePO₄ battery cycle life improvement using ultracapacitors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 3989-3993.
12. Omar, N., Verbrugge, B., Mulder, G., Van den Bossche, P., Van Mierlo, J., Daowd, M., ... & Pauwels, S. (2010, September). Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application. In *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1-6). IEEE.
13. Makimura, Y., Sasaki, T., Nonaka, T., Nishimura, Y. F., Uyama, T., Okuda, C., ... & Takeuchi, Y. (2016). Factors affecting cycling life of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ for lithium-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(21), 8350-8358.
14. Asekomeh, A., Gershon, O., & Azubuike, S. I. (2021). Optimally clocking the low carbon energy mile to achieve the Sustainable Development Goals: Evidence from Dundee's Electric Vehicle Strategy. *Energies*, 14(4), 842.
15. Rawat, S., Thakur, J., Phogat, P., Jha, R., & Singh, S. (2025). Advancements in Specialty Batteries: Innovations, Challenges, and Future Directions. *Journal of Alloys and Compounds*, 179387.
16. Wu, B., Chen, C., Danilov, D. L., Eichel, R. A., & Notten, P. H. (2023). All-solid-state thin film Li-ion

- batteries: New challenges, new materials, and new designs. *Batteries*, 9(3), 186.
- 17.Zanata, C. R., Zapata, M. J., Wender, H., & Martins, C. A. (2024). Perspectives on Photocatalytic Paper-Based Batteries Fueled by Alcohol. *Electroanalysis*, 36(12), e202400214.
- 18.Nguyen, T. H., Fraiwan, A., & Choi, S. (2014). based batteries: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 54, 640-649.
- 19.Chen, X., & Tian, Y. (2021). Review of graphene in cathode materials for lithium-ion batteries. *Energy & Fuels*, 35(5), 3572-3580.
- 20.Zhao, H., Li, J., Zhao, Q., Huang, X., Jia, S., Ma, J., & Ren, Y. (2024). Si-based anodes: advances and challenges in Li-ion batteries for enhanced stability. *Electrochemical Energy Reviews*, 7(1), 11.
- 21.Quach, J. Q., Cerullo, G., & Virgili, T. (2023). Quantum batteries: The future of energy storage?. *Joule*, 7(10), 2195-2200.
- 22.Yan, Z., Zhao, L., Wang, Y., Zhu, Z., & Chou, S. L. (2022). The Future for Room-Temperature Sodium–Sulfur Batteries: From Persisting Issues to Promising Solutions and Practical Applications. *Advanced Functional Materials*, 32(36), 2205622.

Thông tin của tác giả:**ThS. Đoàn Thị Như Quỳnh**

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84). 983.998.883 - Email: nhuquynh.dhcnqn@gmail.com

ThS. Phạm Đức Cường

Phòng Hành chính Tổng hợp, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84). 934 202 421- Email: phamduccuong.qui@gmail.com

ThS. Trần Văn Thương

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84). 904 372 017 - Email: tranthuongdhqn@gmail.com

EMERGING AND POTENTIAL ENERGY STORAGE BATTERIES**Information about authors:**

Doan Thi Nhu Quynh, Master, Department of Electrical, Quang Ninh University of Industry.

Email: nhuquynh.dhcnqn@gmail.com

Pham Duc Cuong, Master, General Administration Office, Quang Ninh University of Industry.

Tran Van Thuong, Master, Department of Electrical, Quang Ninh University of Industry.

ABSTRACT

This paper focuses on emerging energy - storage batteries, which play a crucial role in facilitating the transition to sustainable energy. With rapid technological advancements, batteries such as silicon-anode batteries, solid-state batteries, sodium-sulfur batteries, and quantum batteries are gaining significant attention due to their potential to enhance performance, durability, and safety. The paper provides an in-depth overview of these advanced battery technologies, analyzing their advantages, challenges, and future application prospects. Additionally, it highlights current research and development trends aimed at optimizing battery efficiency, contributing to reduced environmental impact and meeting the growing global energy demand.

Keywords: Energy Storage Systems (ESS), electric Vehicles (EV), energy storage batteries,

emerging technology, *li-ion Batteries (LIB)*.

REFERENCES

1. Lưu, B. (2024). Research and analysis of some renewable energy storage technologies currently used in the world. *Journal of Science and Technology - Quang Ninh University of Industry*. In Vietnamese, 2(1), 77-89. E.ISSN 2185-6145.
2. Lipu, M. S. H., Mamun, A. A., Ansari, S., Miah, M. S., Hasan, K., Meraj, S. T., ... & Tan, N. M. (2022). Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals. *Batteries*, 8(9), 119.
3. Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*, 18(5), 252-264.
4. Hanifah, R. A., Toha, S. F., & Ahmad, S. (2015). Electric vehicle battery modelling and performance comparison in relation to range anxiety. *Procedia Computer Science*, 76, 250-256.
5. Maiyalagan, T., & Elumalai, P. (Eds.). (2021). *Rechargeable lithium-ion batteries: trends and progress in electric vehicles*. Boca Raton: CRC Press.
6. Wang, K., Wan, J., Xiang, Y., Zhu, J., Leng, Q., Wang, M., ... & Yang, Y. (2020). Recent advances and historical developments of high voltage lithium cobalt oxide materials for rechargeable Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 460, 228062.
7. Liu, H., Li, M., Xiang, M., Guo, J., Bai, H., Bai, W., & Liu, X. (2021). Effects of crystal structure and plane orientation on lithium and nickel co-doped spinel lithium manganese oxide for long cycle life lithium-ion batteries. *Journal of Colloid and Interface Science*, 585, 729-739.
8. Marincaş, A. H., & Ilea, P. *Enhancing Lithium Manganese Oxide Electrochemical Behavior by Doping and Surface Modifications, Coatings*. 11 (2021) 456.
9. Chen, Q., Luo, L., Wang, L., Xie, T., Dai, S., Yang, Y., ... & Yuan, M. (2018). Enhanced electrochemical properties of Y₂O₃-coated-(lithium-manganese)-rich layered oxides as cathode materials for use in lithium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 1778-1786.
10. Hannan, M. A., Hoque, M. M., Hussain, A., Yusof, Y., & Ker, P. J. (2018). State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *Ieee Access*, 6, 19362-19378.
11. Zhao, C., Yin, H., & Ma, C. (2015). Quantitative evaluation of LiFePO₄ battery cycle life improvement using ultracapacitors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 3989-3993.
12. Omar, N., Verbrugge, B., Mulder, G., Van den Bossche, P., Van Mierlo, J., Daowd, M., ... & Pauwels, S. (2010, September). Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application. In *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 1-6). IEEE.
13. Makimura, Y., Sasaki, T., Nonaka, T., Nishimura, Y. F., Uyama, T., Okuda, C., ... & Takeuchi, Y. (2016). Factors affecting cycling life of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ for lithium-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(21), 8350-8358.
14. Asekomeh, A., Gershon, O., & Azubuike, S. I. (2021). Optimally clocking the low carbon energy mile to achieve the Sustainable Development Goals: Evidence from Dundee's Electric Vehicle Strategy. *Energies*, 14(4), 842.
15. Rawat, S., Thakur, J., Phogat, P., Jha, R., & Singh, S. (2025). Advancements in Specialty Batteries: Innovations, Challenges, and Future Directions. *Journal of Alloys and Compounds*, 179387.
16. Wu, B., Chen, C., Danilov, D. L., Eichel, R. A., & Notten, P. H. (2023). All-solid-state thin film Li-ion batteries: New challenges, new materials, and new designs. *Batteries*, 9(3), 186.
17. Zanata, C. R., Zapata, M. J., Wender, H., & Martins, C. A. (2024). Perspectives on Photocatalytic Paper-Based Batteries Fueled by Alcohol. *Electroanalysis*, 36(12), e202400214.

18. Nguyen, T. H., Fraiwan, A., & Choi, S. (2014). based batteries: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 54, 640-649.
19. Chen, X., & Tian, Y. (2021). Review of graphene in cathode materials for lithium-ion batteries. *Energy & Fuels*, 35(5), 3572-3580.
20. Zhao, H., Li, J., Zhao, Q., Huang, X., Jia, S., Ma, J., & Ren, Y. (2024). Si-based anodes: advances and challenges in Li-ion batteries for enhanced stability. *Electrochemical Energy Reviews*, 7(1), 11.
21. Quach, J. Q., Cerullo, G., & Virgili, T. (2023). Quantum batteries: The future of energy storage?. *Joule*, 7(10), 2195-2200.
22. Yan, Z., Zhao, L., Wang, Y., Zhu, Z., & Chou, S. L. (2022). The Future for Room-Temperature Sodium–Sulfur Batteries: From Persisting Issues to Promising Solutions and Practical Applications. *Advanced Functional Materials*, 32(36), 2205622.

Ngày nhận bài: 19/03/2025;

Ngày gửi phản biện: 20/03/2025;

Ngày nhận phản biện: 20/03/2025;

Ngày chấp nhận đăng: 04/04/2025.