

## Nghiên cứu thành phần hóa học và khả năng làm việc của pin nhiệt hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub>

Vũ Trí Thiện\*, Nguyễn Trần Hùng, Phạm Trung Kiên, Lê Hữu Thành, Lý Quốc Vương

Viện Hóa học-Vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, Số 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

\*Email: thienkqh140309@gmail.com

Nhận bài: 04/12/2023; Hoàn thiện: 19/2/2024; Chấp nhận đăng: 27/02/2024; Xuất bản: 22/04/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.94.2024.86-93>

### TÓM TẮT

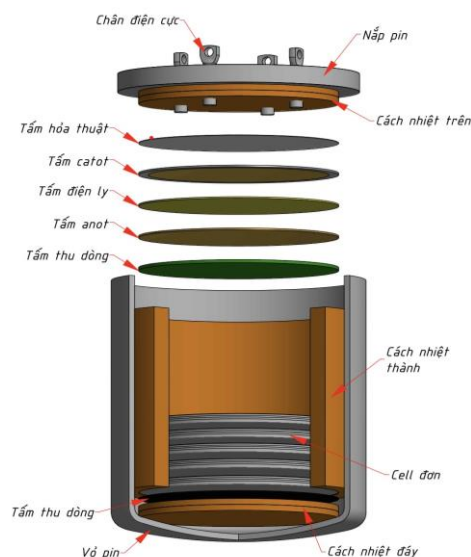
Pin nhiệt là pin dự trữ dùng một lần, sử dụng chất điện ly là các muối vô cơ nóng chảy ở trong dải nhiệt độ 400 ÷ 550 °C. Cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ, pin nhiệt không ngừng được nghiên cứu nhằm nâng cao tính năng kỹ thuật, như giảm thời gian hoạt hóa, giảm khối lượng, tăng dung lượng, mật độ năng lượng, thời gian làm việc, thời gian bảo quản, chịu được điều kiện làm việc khắc nghiệt. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày các kết quả nghiên cứu phân tích thành phần hóa học của pin nhiệt hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub> và khả năng làm việc của pin nhiệt và các hợp phần pin đơn. Kết quả phân tích cho thấy pin nhiệt hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub> sử dụng công nghệ ép viên, với vật liệu cực dương là FeS<sub>2</sub>, vật liệu cực âm là hợp kim Li-Si, chất điện ly hệ LiCl:KCl và hóa thuật hệ Fe:KClO<sub>4</sub>; điện áp pin đơn khoảng 1,8 V và pin nhiệt khoảng 22 V ở dòng xả 1,5 A.

**Từ khóa:** Pin nhiệt; Hợp kim Li-Si; Hóa thuật Fe-KClO<sub>4</sub>.

### 1. MỞ ĐẦU

Pin nhiệt hay còn được gọi là pin nhiệt hóa là một dạng pin đặc biệt dùng một lần sử dụng các chất điện ly ở trạng thái rắn khi lưu trữ và trạng thái lỏng khi làm việc, do đó, có thể ngăn ngừa hiện tượng tự phóng điện cho phép lưu trữ pin trong thời gian dài trên 10 năm [1]. Pin nhiệt được kích hoạt bởi năng lượng nhiệt cung cấp từ các tấm hóa thuật sau khi cháy, do đó, thời gian hoạt hóa nhanh (thường nhỏ hơn 1giây), cung cấp dòng điện tin cậy, mật độ công suất cao, do đó, pin nhiệt thường được lựa chọn để cung cấp năng lượng cho các loại vũ khí đường không, hàng không vũ trụ và phương tiện dưới nước [2].

Giống như các nguồn điện hóa thông thường pin nhiệt có cấu tạo gồm cực dương (cathode), cực âm (anode), hệ điện ly (electrolyte) ngoài ra trong thành phần có thêm tấm hóa thuật. Thành phần chính của cực dương được gọi là hoạt chất cực dương, về bản chất là những chất oxy hóa. Trong pin nhiệt người ta thường sử dụng các oxit kim loại chuyển tiếp như WO<sub>3</sub>, MoO<sub>3</sub>, oxit sắt và các muối cromat như CaCrO<sub>4</sub>, PbCrO<sub>4</sub>, PbCl<sub>2</sub>, FeS<sub>2</sub>, CoS<sub>2</sub>... để làm hoạt chất cực dương [3-5]. Cực âm của pin nhiệt thường là các lá kim loại hoạt động như: kim loại kiềm, kiềm thổ hoặc hợp kim của chúng: Li, Ca, Mg, hợp kim Li-Si, Li-Al. Chất hoá thuật có tác dụng cung cấp nhiệt khi cháy, làm nóng chảy hệ muối điện ly, đưa pin nhiệt từ trạng thái bảo quản sang trạng thái làm việc. Các hỗn hợp thường được sử dụng, như Zr/BaCrO<sub>4</sub>, Fe/KClO<sub>4</sub>, được ép dưới dạng tấm mỏng, đặt xen kẽ các pin đơn theo thiết kế để đảm bảo tối ưu cho hoạt động của pin khi kích hoạt: thời gian kích hoạt nhanh nhất và đồng nhất nhiệt độ toàn bộ khối pin. Hệ điện ly là các muối vô cơ, thường là hỗn hợp



**Hình 1.** Thiết kế pin nhiệt sử dụng công nghệ ép viên.

muối halogen của của kim loại kiềm (KCl-LiCl, KBr, LiBr,...), tồn tại trạng thái rắn, không dẫn điện ở nhiệt độ thường và trở nên dẫn điện ở trạng thái nóng chảy sau khi được kích hoạt [6].

Lịch sử phát triển pin nhiệt có thể được chia thành ba giai đoạn, pin nhiệt thế hệ đầu tiên là pin nhiệt hệ Ca/CaCrO<sub>4</sub>, Mg/WO<sub>3</sub>, Ca hoặc Mg/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ca/PbCl<sub>2</sub> có mật độ năng lượng thấp, cơ chế phản ứng phức tạp, được thiết kế ở dạng cốc với nhiều chi tiết, quá trình lắp đặt phức tạp, do đó làm tăng khối lượng pin. Thế hệ thứ 2 được ứng dụng rộng rãi hiện nay là hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub> có công suất và thời gian phóng điện tốt hơn, sử dụng công nghệ ép viên đơn giản trong thiết kế và chế tạo sản phẩm, giúp tăng dung lượng pin trên một đơn vị khối lượng. Với các ưu điểm như trên pin nhiệt hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub> được sử dụng phổ biến nhất hiện nay và dần thay thế toàn bộ các thiết kế thế hệ đầu tiên. Thế hệ thứ ba của pin nhiệt là hệ Li-Si/CoS<sub>2</sub>, Li/NiS<sub>2</sub>,... vật liệu CoS<sub>2</sub> có độ bền nhiệt tới 650 °C cao hơn so với FeS<sub>2</sub> 550 °C do đó phù hợp cho những pin nhiệt có thời gian hoạt động dài, công suất cao. Tuy nhiên, hiện nay, chúng chưa được ứng dụng rộng rãi vì CoS<sub>2</sub> có giá thành cao hơn rất nhiều so với FeS<sub>2</sub>, chỉ phù hợp với một số ứng dụng có tính đặc thù cao [7].

**Bảng 1.** Các hệ điện hóa sử dụng trong pin nhiệt [8].

Hệ điện hóa (anode/electrolyte/cathode)	Điện áp làm việc (V)	Đặc điểm
Ca/LiCl-KCl/K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	2,8 ÷ 3,3	Thời gian hoạt hóa ngắn, thời gian làm việc ngắn, sử dụng trong các ứng dụng dạng xung.
Ca/LiCl-KCl/WO <sub>3</sub>	2,4 ÷ 2,6	Thời gian làm việc trung bình, ít nhiễu, không dùng trong các môi trường làm việc có thay đổi thông số vật lý lớn.
Ca/LiCl-KCl/CaCrO <sub>4</sub>	2,2 ÷ 2,6	Thời gian làm việc tương đối ngắn, chịu được tác động cơ học mạnh.
Mg/LiCl-KCl/V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,2 ÷ 2,7	Thời gian làm việc tương đối ngắn, dùng trong môi trường có sự thay đổi thông số vật lý lớn.
Ca /LiCl-KCl/PbCrO <sub>4</sub>	2,0 ÷ 2,7	Thời gian hoạt hóa ngắn, thời gian làm việc ngắn
Ca/LiBr-KBr/K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	2,0 ÷ 2,5	Thời gian làm việc ngắn, dùng trong các ứng dụng cần điện áp cao, dòng thấp.
Li-M/LiCl-LiBr-LiF/FeS <sub>2</sub>	1.6 ÷ 2.1	Thời gian làm việc tương đối ngắn, mật độ dòng lớn, dùng trong môi trường có thay đổi thông số vật lý lớn.
Li-M/LiCl-KCl/FeS <sub>2</sub>	1,6 ÷ 2,2	Thời gian làm việc dài, mật độ dòng lớn, dung trong môi trường có thay đổi thông số vật lý lớn.
Li-M/LiCl-LiBr-LiF/CoS <sub>2</sub>	1,6 ÷ 2,1	Thời gian làm việc dài, mật độ dòng lớn, dùng trong môi trường có thay đổi thông số vật lý lớn.

Đối với các thiết bị quân sự của Việt Nam hiện nay chủ yếu đang sử dụng pin nhiệt thế hệ đầu tiên, các nghiên cứu trước đây cũng chủ yếu vào phân tích hệ pin nhiệt này [9], do đó, việc nghiên cứu pin nhiệt hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub> giúp hiểu được rõ được bản chất của thành phần vật liệu sử dụng để chế tạo vật liệu điện cực, chất điện ly và tấm hòa thuật. Đánh giá được công nghệ chế tạo, khả năng làm việc của pin nhiệt cũng như các hợp phần pin đơn, tiến tới có thể chế tạo được pin nhiệt hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub> trong nước thay thế cho thế hệ pin cũ trong các loại thiết bị quân sự hiện nay.

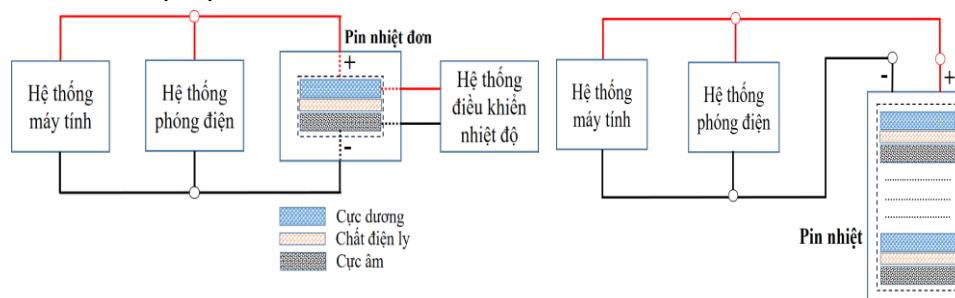
Trong nghiên cứu này trình bày kết quả nghiên cứu phân tích thành phần vật liệu cực âm, cực dương, chất điện ly, tấm hòa thuật, khả năng làm việc của pin nhiệt cũng như hợp phần pin đơn, đưa ra những nhận định ban đầu về công nghệ chế tạo của pin nhiệt hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub>.

## 2. THỰC NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Thực nghiệm

Pin nhiệt trước khi tháo rời được phân tích bằng phương pháp X-ray 3D để xác định cấu trúc sơ bộ bên trong, từ đó xác định các điểm hàn kín của vỏ pin để cắt. Vỏ ngoài của pin nhiệt được tháo rời bằng phương pháp tiện cơ khí hai đầu, sau đó, toàn bộ quá trình tháo rời được thực hiện toàn bộ trong tủ khí trơ (glove box) với hàm lượng oxi và hơi nước nhỏ hơn 1 ppm. Pin đơn sau khi được tháo rời ra khỏi pin nhiệt được phân tách cực âm, cực dương, chất điện ly, chất hòa thuật và tấm góp điện phân tích thành phần vật liệu và thử khả năng làm việc.

Kiểm tra khả năng phóng điện của pin nhiệt và hợp phần pin đơn được thực hiện như hình 2. Trong đó, pin đơn được đặt giữa 2 tấm mica cách điện trong bộ khuôn được gia nhiệt bằng hệ thống điều khiển nhiệt độ.



Hình 2. Sơ đồ thử nghiệm pin nhiệt và hợp phần pin đơn.

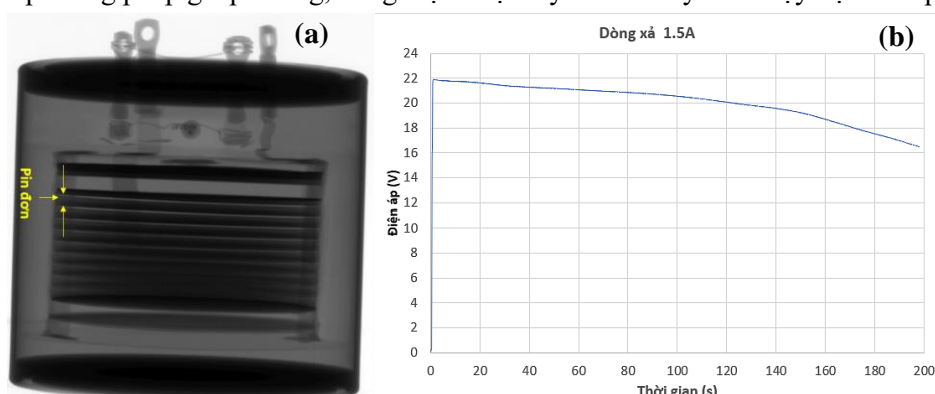
## 2.2. Phương pháp phân tích cấu trúc và hệ vật liệu

Cấu trúc bên trong pin nhiệt được phân tích bằng phương pháp X-quang 3D trên thiết bị Xray S240 Vtomex. Đặc tính phóng điện của pin nhiệt và hợp phần pin đơn được xác định trên thiết bị điện hóa PGS-HH10. Hình thái học và thành phần hóa học của vật liệu được xác định bằng SEM kết hợp EDX được đo trên thiết bị HITACHI S-4800 tại Viện Khoa học Vật liệu (Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam). Nồng độ kim loại Liti được phân tích bằng phương pháp quang phổ nguồn plasma cảm ứng cao tần kết nối khối phổ ICP-MS (ICAPRQ02904, Thermofisher Scientific). Thiết bị đo nhiệt cháy Parr 6200 tại Học viện Kỹ thuật Quân sự.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Xác định cấu trúc, đặc tính phóng điện của pin nhiệt và hợp phần pin đơn

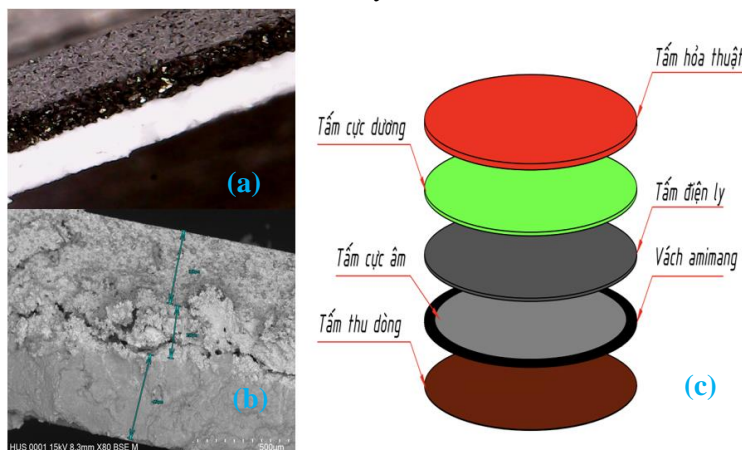
Kết quả phân tích cấu trúc bên trong của pin nhiệt bằng phương pháp X-Quang 3D được thể hiện trong hình 3a. Cấu trúc bên trong của pin nhiệt bao gồm 12 pin đơn được ghép nối tiếp với nhau theo phương pháp ghép chồng, dòng điện được lấy ra từ 2 dây dẫn chạy dọc thân pin.



Hình 3. Cấu trúc bên trong của pin nhiệt (a), khả năng làm việc của pin nhiệt ở dòng phóng 1,5A (b).

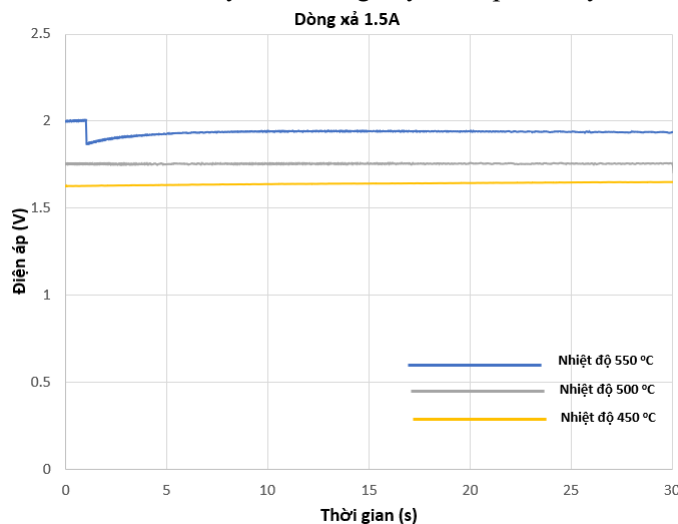
Pin nhiệt được kích hoạt bằng dòng điện 1 A, với tải tiêu thụ  $14,7 \Omega$  tương ứng với dòng xả 1,5 A có thời gian kích hoạt 0,67 giây, điện áp duy trì từ 20÷22 V trong khoảng thời gian 120 giây

(hình 3b). Cấu trúc của pin đơn được thể hiện trong hình 4, hình 4a chụp mặt cắt ngang của pin đơn bao gồm tấm hóa thuật, cực dương, chất điện ly, tấm amiang, cực âm và tấm thu dòng với thứ tự lắp đặt như hình 4c. Các tấm hóa thuật, cực dương và chất điện ly được ép chặt với nhau, do đó, chiều dày của chúng được xác định thông qua phương pháp ảnh SEM (hình 4b), chiều dày tấm hóa thuật, cực dương chất điện ly lần lượt là 0,42 mm, 0,25 mm, và 0,35 mm. Tấm điện cực âm và tấm thu dòng được tháo rời và xác định với chiều dày là 0,20 mm và 0,05 mm.



**Hình 4.** Cấu trúc của pin đơn.

Điện áp pin nhiệt phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ, do đó, hợp phần pin đơn được tiến hành khảo sát khả năng làm việc ở các nhiệt độ khác nhau (hình 5). Kết quả cho thấy ở nhiệt độ 550 °C, điện áp của pin nhiệt nằm trong khoảng giá trị trung bình 1,95 V, tuy nhiên, giai đoạn đầu của quá trình phóng điện có sự sụt áp xuống 1,88 V là do ở nhiệt độ 550 °C cực dương (FeS<sub>2</sub>) của pin nhiệt bắt đầu bị phân hủy tạo thành lưu huỳnh gây ra sự sụt áp trong pin [5]. Ở nhiệt độ 500 °C pin nhiệt làm việc khá ổn định với điện áp trung bình 1,79 V, ở nhiệt độ 450 °C điện áp làm việc của pin trung bình 1,65 V, ở cả hai nhiệt độ này đều không xảy ra sự phân hủy cực dương của pin nhiệt.



**Hình 5.** Ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện áp của pin đơn.

Điện áp của pin nhiệt:  $U_{\text{pin nhiệt}} = U_{\text{pin đơn}} \times N$  (trong đó, N là số lượng pin đơn).

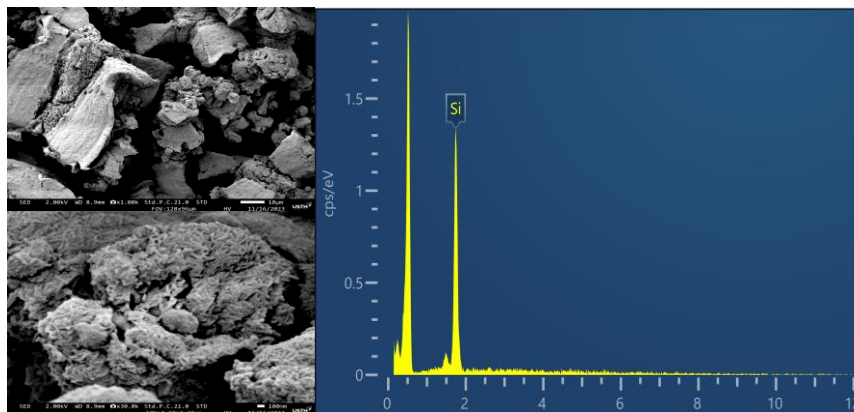
$$U_{\text{pin đơn}} = 22/12 = 1,83 \text{ V}$$

Kết quả này tương ứng với điện áp pin đơn ở nhiệt độ làm việc 500 °C. Do đó, có thể kết luận rằng pin nhiệt làm việc ở trong khoảng nhiệt độ 500 °C.

### 3.2. Phân tích thành phần vật liệu pin nhiệt

#### Phân tích cực âm

Hình thái bề mặt và thành phần hóa học của cực âm được quan sát bằng ảnh SEM và đo phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) hình 6. Kết quả thấy rằng, mẫu vật liệu cực âm chứa Liti kim loại rất nhạy với oxi và hơi nước trong không khí, bề mặt của cực âm có hiện tượng tạo lớp oxit và hydroxit. Thành phần hóa học của cực âm trong phổ EDX chỉ xuất hiện đỉnh peak 1,94 eV của nguyên tố Si và đỉnh peak của oxi là do Liti phản ứng với oxi và hơi nước ngoài không khí, còn nguyên tố Liti là nguyên tố nhẹ không phát hiện được bằng phương pháp tán xạ năng lượng tia X (EDX).

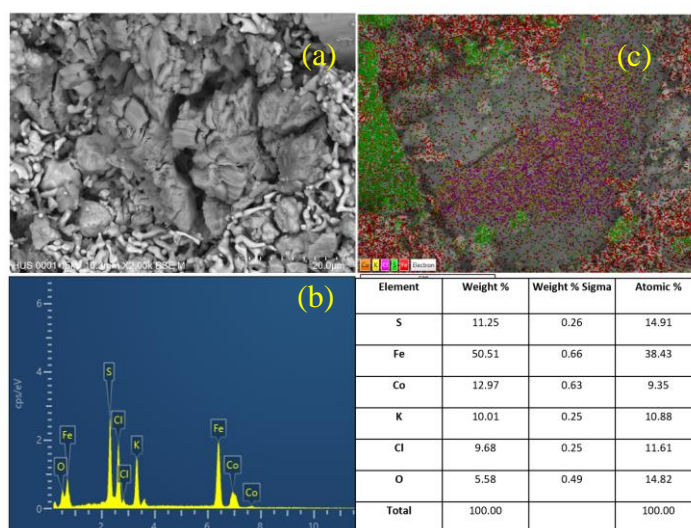


Hình 6. Ảnh SEM (a) và thành phần hóa học EDX (b) của cực âm pin nhiệt.

Để xác định sự có mặt của Liti kim loại và phân tích được tỷ lệ Liti trong cực âm sử dụng phương pháp quang phổ nguồn plasma cảm ứng cao tần kết nối khối phổ ICP-MS. Mẫu cực âm được chuẩn bị và xác định khối lượng trong tủ khí trơ để tránh ảnh hưởng oxi và hơi nước ngoài không khí. Kết quả phân tích cho thấy, hàm lượng Liti kim loại chiếm khoảng 43,28% còn lại nguyên tố silic chiếm khoảng 56,72%. Do đó, có thể kết luận rằng cực âm được chế tạo từ hợp kim Li-Si với tỷ lệ về khối lượng 44:56 [10].

#### Phân tích cực dương

Hình 7 chỉ ra kết quả quan sát hình thái bề mặt và thành phần hóa học của cực dương.

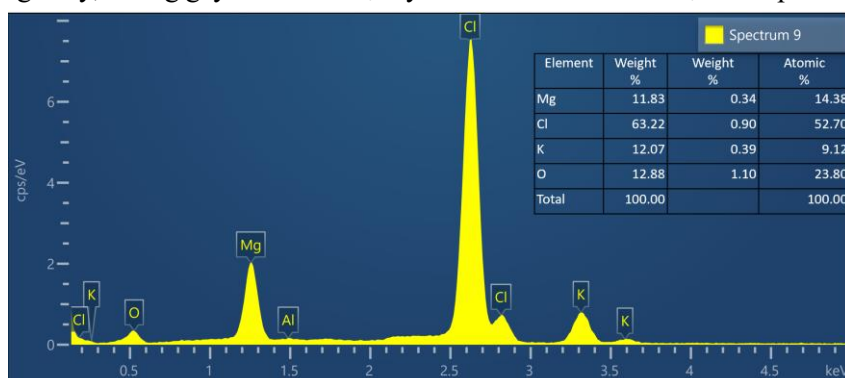


Hình 7. Hình thái bề mặt cực dương (a), kết quả Edx (b), Edx-mapping (c) và thành phần hóa học các nguyên tố.

Quan sát ảnh SEM bề mặt và EDX-mapping của cực dương có thể thấy rằng, cực dương sau khi được ép phân bố đồng đều các nguyên tố. Cực dương ngoài thành phần chính là FeS<sub>2</sub> chiếm khoảng 60-65%, còn có sự xuất hiện của nguyên tố Co nằm trong thành phần của CoS<sub>2</sub>, với hàm lượng 8-10% về khối lượng, điều này giúp tăng dung lượng pin. Ngoài ra, trong thành phần của cực dương trước khi ép còn thêm chất điện ly với khối lượng từ 20-25%, điều này giúp giảm nội trở, tăng độ dẫn, giảm thời gian kích hoạt của pin [11].

**Phân tích chất điện ly**

Chất điện ly trong pin nhiệt thường sử dụng là hỗn hợp eutectic của các muối halogen kim loại kiềm. Kết quả phân tích thành phần chất điện ly trong pin nhiệt được chỉ ra trong hình 8, với sự xuất hiện của các đỉnh peak của bốn nguyên tố K, Cl, Mg, O là của muối KCl và chất kết dính vô cơ MgO. Chất kết dính MgO được sử dụng trong chất điện ly làm tăng sức căng bề mặt của chất điện ly ở trạng thái nóng chảy, không gây tràn chất điện ly có thể dẫn đến đoản mạch khi pin làm việc [12].

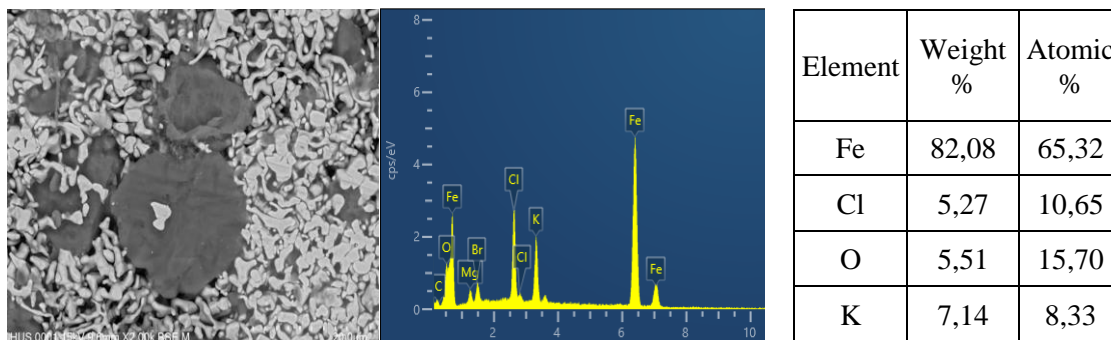


**Hình 8. Phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) của chất điện ly.**

Hầu hết các chất điện ly trong pin nhiệt hiện nay đang sử dụng hỗn hợp eutectic của LiCl:KCl theo tỷ lệ 45:55 với nhiệt độ nóng chảy 352 °C, hỗn hợp muối này sau đó được trộn với chất kết dính MgO theo tỷ lệ 65:35 về khối lượng. Kết quả phân tích ICP-MS cho thấy hàm lượng Liti chiếm 6% về khối lượng tương ứng với hàm lượng Liti có trong hỗn hợp eutectic LiCl:KCl với tỷ lệ 45:55. Do vậy, chất điện ly được dùng trong pin nhiệt là hỗn hợp eutectic LiCl:KCl theo tỷ lệ 45:55 về khối lượng sử dụng chất kết dính vô cơ MgO [13].

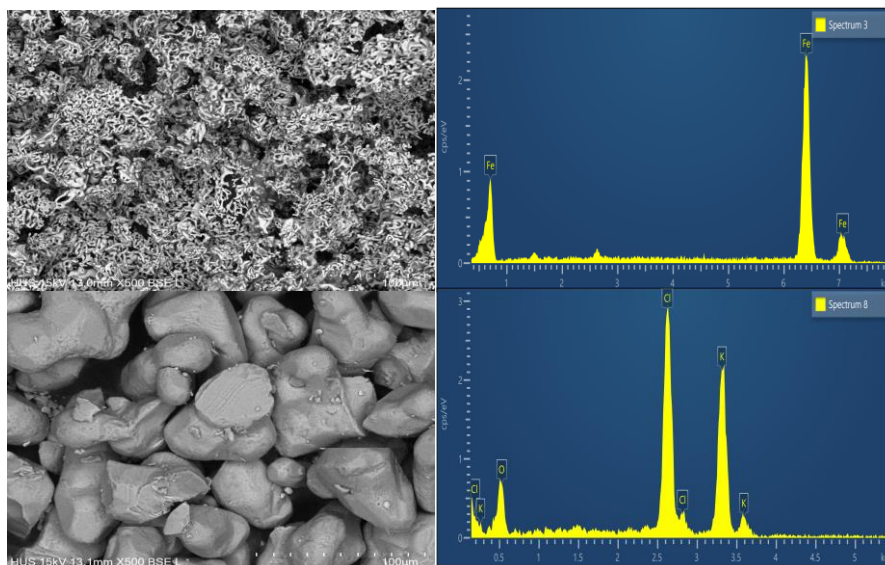
**Phân tích hỏa thuật**

Hai dạng cấu tạo chính của chất hỏa thuật được sử dụng trong pin nhiệt là giấy nhiệt và viên nhiệt. Giấy nhiệt là một hợp phần tương tự như giấy của zirconium và bột bari cromat được bổ sung trong vải từ sợi vô cơ. Viên nhiệt là viên nén bao gồm của hỗn hợp bột sắt và kali perchlorat. Hình 9 chỉ ra hình thái bề mặt và thành phần hóa học của tấm hỏa thuật sử dụng trong pin nhiệt hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub>.



**Hình 9. Hình thái bề mặt của tấm hỏa thuật và thành phần hóa học của tấm hỏa thuật.**

Phân tích mẫu hỏa thuật cho thấy, mẫu hỏa thuật chỉ bao gồm bột sắt và kali perchlorat, không sử dụng thêm phụ gia làm chất kết dính với tỷ lệ Fe:KClO<sub>4</sub> là 82:18 theo khối lượng. Sử dụng hệ hỏa thuật Fe:KClO<sub>4</sub> ngoài tác dụng cung cấp nhiệt cho pin làm việc, còn có tác dụng dẫn điện để nối tiếp các hợp phần pin đơn thành pin nhiệt, và giảm thể tích khí sinh ra trong sản phẩm cháy. Hình 10 là kết quả phân tích khi tách riêng bột sắt và muối kali perchlorat trong mẫu hỏa thuật.



**Hình 10.** Ảnh SEM của mẫu bột sắt (a) muối kali perchlorat (b) và phổ tán xạ năng lượng EDX của bột sắt (c) và muối kali perchlorat.

Kết quả đo nhiệt cháy tẩm hỏa thuật trên thiết bị đo nhiệt cháy Parr 6200 cho thấy nhiệt cháy của tẩm hỏa thuật có giá trị 298,68 cal/g, giá trị này tương ứng hệ hỏa thuật Fe:KClO<sub>4</sub> với tỷ lệ khối lượng là 82:18 [14].

Trên cơ sở những kết quả phân tích về cấu trúc và thành phần vật liệu của pin nhiệt, các hợp phần pin đơn có thể khẳng định rằng pin nhiệt được thiết kế dựa trên công nghệ ép viên, kích hoạt bằng môi lửa điện dựa trên hệ điện hóa Li-Si/FeS<sub>2</sub> với chất điện ly là hỗn hợp eutectic của LiCl:KCl, hệ hỏa thuật Fe:KClO<sub>4</sub>. Vật liệu điện cực được ép thành viên nén, sau đó được ép chồng thành pin đơn, các pin đơn được mắc nối tiếp, số lượng pin đơn phụ thuộc vào điện áp và dòng làm việc của thiết bị tiêu thụ.

#### 4. KẾT LUẬN

Phân tích cấu trúc bằng X-ray 3D cho thấy pin nhiệt hệ Li-Si/FeS<sub>2</sub> được chế tạo theo công nghệ ép viên, các tấm điện cực, tẩm hỏa thuật được ép định hình, sau đó được ép chồng thành các hợp phần pin đơn, các pin đơn được ghép nối tiếp tạo thành pin nhiệt. Kết quả phân tích thành phần vật liệu cực dương sử dụng hợp kim Li-Si tỷ lệ 44:56, chất điện ly là hỗn hợp eutectic của LiCl:KCl tỷ lệ 45:55 với chất kết dính MgO, cực dương là hỗn hợp của FeS<sub>2</sub> với chất điện ly LiCl:KCl theo tỷ lệ 65:25 và 10% CoS<sub>2</sub>, hỏa thuật là hỗn hợp của Fe và KClO<sub>4</sub> theo tỷ lệ 82:18 không sử dụng chất kết dính. Điện áp làm việc của pin nhiệt và hợp phần pin đơn với dòng xả 1,5 A lần lượt là 22 V và 1,8 V.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được sự hỗ trợ kinh phí từ đề tài nghiên cứu khoa học và phát triển công nghệ số 788/2021/HĐKHCN-VHHVL.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Masset, P. J. and Guidotti, "Thermally activated ("thermal") battery technology: Part I: An overview", Journal of Power Sources 161(2):1443-1449.

- [2]. Qing Chang, Zeshunji Luo, Licai Fu, "A new cathode material of NiF<sub>2</sub> for thermal batteries with high specific power", *Electrochimica Acta*, Volume 361, 137051, (2020).
- [3]. Masset, P. J. and Guidotti, R. A. "Thermal activated ("thermal") battery technology. part II. molten salt electrolytes", *J. Power Sources*, 164 (1), 397, (2006).
- [4]. Masset, P.J. and Guidotti, R. A. "Thermal activated ("thermal") battery technology. part IIIb. sulfur- and oxide-based cathode materials" *J. Power Sources*, in press, (2007).
- [5]. Patrick J.Masset, Ronald A. Guidotti, "Thermally activated (Thermal) battery technology, part IIIa; FeS<sub>2</sub> cathode material", *Journal of Power Sources*, 177, 595-609, (2008).
- [6]. R.A. Guidotti, P.J.Masset. "Thermally activated (Thermal) battery technology, Part IV. Anode materials", *Journal of power sources*, 183, 388-398 (2008).
- [7]. Renyi Li, Wei Guo, "Recent Developments of Cathode Materials for Thermal Batteries", *Electrochemistry*, Volume 10, (2022).
- [8]. V. Klasons, C.M. Lamb, *Handbook of batteries*, Third edition, McGraw Hill, Chapter 21 (2001).
- [9]. Phạm Mạnh Thảo, Doãn Anh Tú, "Nghiên cứu giảm nhiễu điện cho pin nhiệt", *Tạp chí hóa học*, T. 52(4) 423-428.
- [10]. Ronald A. Guidotti, Patrick J. Masset, "Li (negative electrode) thermally activated and Li-alloy thermal" *Primary Batteries*, (pp.141 - 155) (2009).
- [11]. Chae-Nam Im, Chi Hun Choi, "Investigation of Li Anode/FeS<sub>2</sub> Cathode Electrochemical Properties for Optimizing High-Power Thermal Batteries", *Batteries & Supercaps*, 3, 1-13, (2020).
- [12]. Guidotti, R. A. and Reinhardt, F. W. "Characterization of MgO powders for use in thermal batteries," Sandia National Laboratories report SAND90-2104, (1996).
- [13]. Masset, P. J. and Guidotti, R. A. "Thermal activated ("thermal") battery technology. part II. molten salt electrolytes", *J. Power Sources*, 164 (1), 397, (2006).
- [14]. R. Guidotti. "Development history of Fe/KClO<sub>4</sub> heat powders at sandia and related aging issues for thermal batteries, SAND2001-2191" Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA (2001).

### **ABSTRACT**

#### **Research on the material composition and performance of Li-Si/FeS<sub>2</sub> thermal batteries**

*Thermal batteries are disposable storage batteries that use electrolytes that are molten inorganic salts in the temperature range of 400 ÷ 550 °C. Along with the development of science and technology, thermal batteries are constantly being researched to improve technical features, such as reducing activation time and mass, while increasing capacity, energy density, working duration, storage time, and ability to withstand harsh working conditions. In this article, we present the results of a study on the chemical composition of Li-Si/FeS<sub>2</sub> thermal batteries and the performance of a single cell as well as a full battery. The analysis shows that the thermal battery utilizes pellet pressing technique. The anode is made of FeS<sub>2</sub>, the cathode is made of Li-Si alloy, the electrolyte is a mixture of LiCl and KCl, and the pyrolysis agent is Fe:KClO<sub>4</sub>. A single cell's voltage is 1,8 V, and a full thermal battery's voltage is 22 V at a 1,5 A discharge current.*

**Keywords:** Thermal battery; Li-Si alloys; Fe-KClO<sub>4</sub> heat powder.