

EVALUATION OF THE ABILITY TO SEPARATE COPPER FROM MOBILE PHONE WASTE BY PYROMETALLURGICAL PROCESS COMBINED WITH HYDROMETALLURGICAL PROCESS

Nguyen Thi Hong Hoa^{1*}, Nguyen Thi Hue², Bui Minh Quy¹, Nguyen Thi Ngoc Linh¹

¹TNU - University of Sciences, ²Vocational Education – Continuing Education Center Tien Du, Bac Ninh

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 14/4/2022	The recovery of metals in mobile phone waste is a matter of concern due to environmental issues and the increasingly depleted metal resources. There are many methods to separate metal from mobile phone waste such as: pyrometallurgical method, hydrometallurgical method, electrometallurgical method.... Promoting the advantages of pyrometallurgical method and hydrometallurgical method, the article presents a copper separation process that minimizes the release of harmful gases to the environment, but effectively recovers copper, which is a combination of pyrometallurgical method and hydrometallurgical method. Pyrometallurgical stage: mobile phone waste is chopped and calcined at 750 °C in a closed furnace that can recover the released gas in 2 hours. Hydrometallurgical stage: the solid is dissolved in a solution of sulfuric acid (H ₂ SO ₄) in the presence of hydrogen peroxide (H ₂ O ₂). The factors affecting the copper separation process were studied such as H ₂ SO ₄ concentration, H ₂ O ₂ concentration, solid/liquid ratio and temperature showing that H ₂ SO ₄ 4M, H ₂ O ₂ 15%, solid-liquid ratio 0.025 and the temperature 40 °C, the copper (II) sulfate (CuSO ₄) solution obtained has a high concentration with separation efficiency of 71.64% after 1 hour.
Revised: 14/7/2022	
Published: 14/7/2022	
KEYWORDS	
Mobile phone waste	
Pyrometallurgical process	
Hydrometallurgical process	
Copper	
Separation process	

ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG TÁCH ĐỒNG KHỎI RÁC THẢI ĐIỆN THOẠI DI ĐỘNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP HÓA LUYỆN KẾT HỢP THỦY LUYỆN

Nguyễn Thị Hồng Hoa^{1*}, Nguyễn Thị Huệ², Bùi Minh Quý¹, Nguyễn Thị Ngọc Linh¹

¹Trường Đại học Khoa học – ĐH Thái Nguyên,

²Trung tâm Giáo dục nghề nghiệp – Giáo dục thường xuyên Tiên Du, Bắc Ninh

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 14/4/2022	Việc thu hồi các kim loại trong rác thải điện thoại di động là vấn đề đang được quan tâm do liên quan đến vấn đề môi trường và nguồn tài nguyên kim loại ngày càng cạn kiệt. Có nhiều phương pháp để tách kim loại ra khỏi rác thải điện thoại di động như: phương pháp hóa luyện, phương pháp thủy luyện, phương pháp điện luyện.... Phát huy ưu điểm của các phương pháp hóa luyện và thủy luyện, bài báo đưa ra quy trình tách đồng giảm thiểu sự thoát khí độc hại ra môi trường, mà hiệu quả thu hồi đồng hiệu quả, đó là kết hợp phương pháp hóa luyện và phương pháp thủy luyện. Giai đoạn hóa luyện: phế liệu điện tử được cắt nhỏ và nung ở 750 °C trong lò kín có thể thu hồi khí thoát ra trong 2 giờ. Giai đoạn thủy luyện: chất rắn được hòa tan trong dung dịch axit sunfuric (H ₂ SO ₄) có mặt của hidro peroxit (H ₂ O ₂). Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hòa tách đồng được nghiên cứu như nồng độ H ₂ SO ₄ , nồng độ H ₂ O ₂ , tỷ lệ rắn/ lỏng và nhiệt độ cho thấy nồng độ H ₂ SO ₄ 4M, H ₂ O ₂ 15%, tỷ lệ rắn - lỏng là 0,025 và nhiệt độ 40 °C thì dung dịch đồng (II) sunfat (CuSO ₄) thu được có nồng độ cao với hiệu suất tách đạt 71,64% sau 1 giờ.
Ngày hoàn thiện: 14/7/2022	
Ngày đăng: 14/7/2022	
TỪ KHÓA	
Rác thải điện thoại di động	
Quá trình hóa luyện	
Quá trình thủy luyện	
Đồng	
Quá trình tách	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5851>

* Corresponding author. Email: hoanth@mus.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, sự bùng nổ của công nghệ đã làm cho cuộc sống của con người trở nên tiện lợi hơn. Trong đó, các thiết bị điện thoại di động ngày càng trở nên phổ biến và là thiết bị thiết yếu của mỗi người [1]. Tuy nhiên, đi cùng với sự phát triển nhanh của các thế hệ thiết bị điện thoại thì lượng rác thải điện tử phát thải ra môi trường ngày càng lớn. Trong rác thải điện thoại có nhiều thành phần khác nhau như các kim loại quý, kim loại nặng, chất dẻo... Theo ước tính trong 1 tấn bảng mạch điện thoại di động chứa khoảng 130 kg Cu, 3,5 kg Ag, 340 g Au và 140 g Pd và một số các kim loại khác [2]. Đây sẽ là nguồn nguyên liệu quan trọng cung cấp cho các ngành luyện kim nếu rác thải được tái chế đúng cách. Hơn nữa, việc tái chế rác thải điện tử sẽ giảm thiểu được sự ô nhiễm môi trường từ các kim loại nặng [3].

Để thu hồi kim loại từ rác thải điện tử có nhiều phương pháp khác nhau như: phương pháp vật lý (tách trọng lực, tách từ), phương pháp hóa học (phân hủy nhiệt, hòa tan trong axit, chiết...) và phương pháp sinh học [4] – [10]. Trong đó, phương pháp hóa học được ứng dụng rộng rãi hơn cả do hiệu suất cao, khả năng thu hồi đa dạng, thời gian thu hồi nhanh. Tuy nhiên, phương pháp này cũng có những nhược điểm như tiêu tốn hóa chất, phát sinh chất thải thứ cấp có thể gây ô nhiễm môi trường. Do đó việc nghiên cứu các điều kiện phù hợp cho quá trình thu hồi là rất cần thiết nhằm giảm thiểu các nhược điểm của phương pháp này. Để thu hồi Cu thì phương pháp phổ biến là thủy luyện dựa trên quá trình hòa tách rác thải điện tử trong các dung dịch axit như H_2SO_4 , HNO_3 , HCl kết hợp với các chất oxy hóa như H_2O_2 , $FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$... [5], [11], [12]. Tuy nhiên nếu chỉ sử dụng phương pháp hòa tách thì lượng hóa chất tiêu tốn khá lớn, giảm hiệu quả kinh tế. Đối với phương pháp hóa luyện, việc thu hồi các kim loại khá đơn giản do các chất dẻo đã bị đốt cháy hết. Mặc dù vậy, phương pháp này sẽ phát sinh ra lượng khí lớn và nung ở nhiệt độ cao nên một số kim loại sẽ bay hơi. Do đó khí thải của phương pháp này sẽ ảnh hưởng đến môi trường. Việc kết hợp giữa phương pháp hòa luyện và thủy luyện một cách thích hợp sẽ làm tăng hiệu quả của quá trình thu hồi. Trong đó giai đoạn hòa luyện sẽ đóng vai trò quá trình sơ cấp nhằm làm giàu kim loại và quá trình thủy luyện sẽ hòa tách hoàn toàn các kim loại.

Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá khả năng kết hợp giữa phương pháp hòa luyện và thủy luyện trong việc thu hồi Cu từ bảng mạch điện thoại di động. Bảng mạch được xử lý sơ bộ ở $750\text{ }^\circ\text{C}$, sau đó được nghiền nhỏ và hòa tách trong dung dịch H_2SO_4 với sự có mặt của H_2O_2 . Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hòa tách như nồng độ H_2SO_4 , nồng độ H_2O_2 , nhiệt độ và tỉ lệ rắn lỏng được nghiên cứu chi tiết.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu và hóa chất

Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng các bảng mạch điện thoại di động (hình 1) được mua từ các quán sửa chữa điện thoại. Sau đó, các bảng mạch được cắt nhỏ với kích thước khoảng 2 cm x 2 cm, rồi rửa sạch với nước cất và sấy khô. Các hóa chất được sử dụng bao gồm H_2SO_4 (98%, Xilong, Trung Quốc), H_2O_2 (30%, Xilong, Trung Quốc).

2.2. Quá trình hòa luyện

Để xử lý sơ bộ, 500 g vật liệu được đưa vào lò và nung ở $750\text{ }^\circ\text{C}$ trong 2 giờ. Sau khi nung, phần khung thép sẽ được lấy ra khỏi hỗn hợp và phần bột còn lại sẽ được nghiền nhỏ trên máy nghiền bi (MM 200) trong thời gian 20 phút. Chất rắn sau khi nghiền là bột mịn, dùng để nghiên cứu tiếp theo.

2.3. Quá trình thủy luyện

Bảng mạch điện thoại di động sau khi nghiền lấy theo tỷ lệ rắn/lỏng (0,025 – 0,100) cho vào dung dịch gồm 10 mL dung dịch H_2SO_4 (0,5M – 4M) và 10 mL dung dịch H_2O_2 (7,5% - 30%), khuấy đều ở nhiệt độ nghiên cứu trong thời gian 60 phút. Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến khả

năng tách đồng như nồng độ H_2SO_4 , lượng H_2O_2 thêm vào, tỷ lệ rắn - lỏng và nhiệt độ. Như vậy, đánh giá khả năng tách đồng khỏi rác thải điện thoại di động thông qua việc khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hòa tách đồng gồm: nồng độ H_2SO_4 [12], nồng độ H_2O_2 , tỷ lệ rắn/lỏng và nhiệt độ. Bảng 1 thể hiện các giá trị nồng độ H_2SO_4 , nồng độ H_2O_2 , tỷ lệ rắn/ lỏng và nhiệt độ thực hiện trong quá trình hòa tách đồng.



Hình 1. Hình ảnh của bảng mạch điện thoại di động làm nghiên cứu

Bảng 1. Giá trị các thông số khảo sát thực nghiệm hòa tách đồng

STT	Nồng độ H_2SO_4 (M)	Nồng độ H_2O_2 (%)	Tỷ lệ rắn/ lỏng ⁽¹⁾	Nhiệt độ (°C)
1	0,5	30	0,025	25
2	1	30	0,025	25
3	2	30	0,025	25
4	4	30	0,025	25
5	4	7,5	0,025	25
6	4	15	0,025	25
7	4	30	0,025	25
8	4	15	0,010	25
9	4	15	0,025	25
10	4	15	0,050	25
11	4	15	0,100	25
12	4	15	0,025	25
13	4	15	0,025	40
14	4	15	0,025	60
15	4	15	0,025	80

⁽¹⁾ số gam bột nghiền/số mL dung dịch H_2SO_4 và H_2O_2

Tiến hành xác định độ hấp thụ nguyên tử đồng của các dung dịch trên máy hấp thụ nguyên tử Hitachi Z-2000 để xác định nồng độ của đồng.

Hiệu suất hòa tách đồng được tính theo công thức:

$$H = \frac{m_{Cu \text{ bị tách}}}{m_{Cu \text{ ban đầu}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Trong đó, H là hiệu suất hòa tách đồng (%); $m_{Cu \text{ bị tách}}$ là khối lượng đồng được tách ra khỏi bột nghiền (g); $m_{Cu \text{ ban đầu}}$ là khối lượng đồng ban đầu trong bột nghiền (g).

2.4. Đặc trưng mẫu

Thành phần vật liệu sau khi nghiền được xác định bằng phương pháp phổ EDX trên thiết bị đo phổ tán xạ năng lượng tia X (phổ EDX) EMSA/MAS Spectral Data File (Nhật Bản) – Viện Khoa học vật liệu – Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

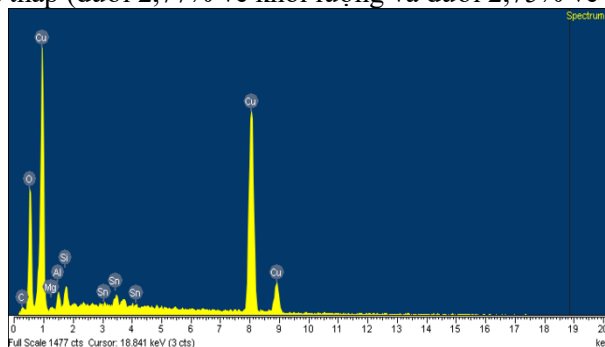
Xác định độ hấp thụ nguyên tử đồng của các dung dịch trên máy hấp thụ nguyên tử Hitachi Z-2000 tại Phòng thí nghiệm Khoa Hóa học - trường Đại học Khoa học - Đại học Thái Nguyên.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Quá trình hỏa luyện

Kết quả phân tích hàm lượng các nguyên tố có trong bảng mạch điện thoại di động sau khi hỏa luyện được xác định bằng phương pháp phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) và được thể hiện ở hình 2 và bảng 2.

Từ hình 2 và bảng 2 cho thấy, các mẫu bảng mạch điện thoại di động được sử dụng cho thí nghiệm sau khi nung, thành phần các kim loại chính gồm đồng, nhôm, magiê, thiếc... Trong đó, thành phần chủ yếu là đồng chiếm 49,83% về khối lượng và chiếm 21,10% về số nguyên tử; còn các kim loại khác là khá thấp (dưới 2,77% về khối lượng và dưới 2,75% về số nguyên tử).



Hình 2. Phổ EDX của mẫu sau của bảng mạch điện thoại di động sau khi hỏa luyện

Bảng 2. Hàm lượng các nguyên tố trong bảng mạch điện thoại di động sau khi hỏa luyện

Nguyên tố	Trung bình	
	% Khối lượng	% Nguyên tử
C	5,69	12,75
O	35,00	58,81
Mg	0,62	0,70
Al	2,76	2,74
Si	2,96	2,83
P	0,21	0,18
Ca	0,22	0,14
Ni	0,64	0,29
Cu	49,83	21,10
Sn	2,06	0,47

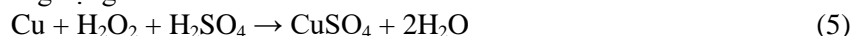
3.2. Quá trình thủy luyện

Do hàm lượng các kim loại khác ít nên sử dụng hệ thống tách bằng H_2SO_4 là phù hợp với các mẫu bảng mạch điện thoại di động được sử dụng trong nghiên cứu này để thu được CuSO_4 . Chất oxy hóa H_2O_2 có thể kiểm soát dễ dàng và quá trình tách hiệu quả hơn so với chất oxy hóa khác [12]. Do đó, trong bài báo này sử dụng H_2SO_4 và H_2O_2 để tách đồng trong bảng mạch điện thoại di động.

Trong quá trình tách đồng bằng H_2SO_4 và H_2O_2 , các phản ứng xảy ra trong quá trình tách tan đồng có thể được biểu thị bằng các phương trình hóa học sau:



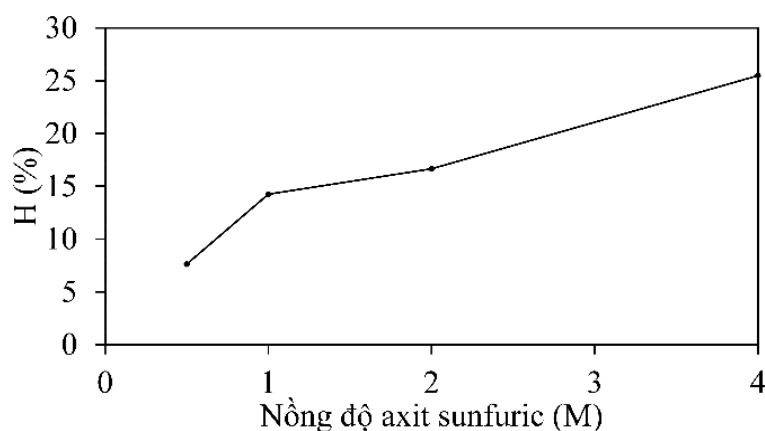
Phương trình hóa học tổng cộng:



Theo phân tích EDX, thành phần phần trăm khối lượng đồng trong mẫu bột nghiền là 49,83%. Do đó, 0,500 gam mẫu bột nghiền chứa khoảng 0,2492 gam đồng kim loại. Về mặt lý thuyết, theo phương trình (2), (3), (4), (5), đồng cần 0,3894 gam H_2SO_4 đặc và 0,4413 gam H_2O_2 (30% khối lượng) để hòa tan hoàn toàn thành dung dịch.

3.2.1. Ảnh hưởng của nồng độ H_2SO_4

Để nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ H_2SO_4 , bốn thí nghiệm được tiến hành ở các nồng độ H_2SO_4 khác nhau: 0,5; 1,0; 2,0 và 4,0M trong khi các điều kiện khác giống nhau (H_2O_2 15%, tỷ lệ rắn/lỏng 0,025, nhiệt độ 25 °C). Đó là các thí nghiệm có số thứ tự 1, 2, 3, 4 (Bảng 1). Hình 3 cho biết ảnh hưởng của nồng độ H_2SO_4 đến khả năng tách đồng.



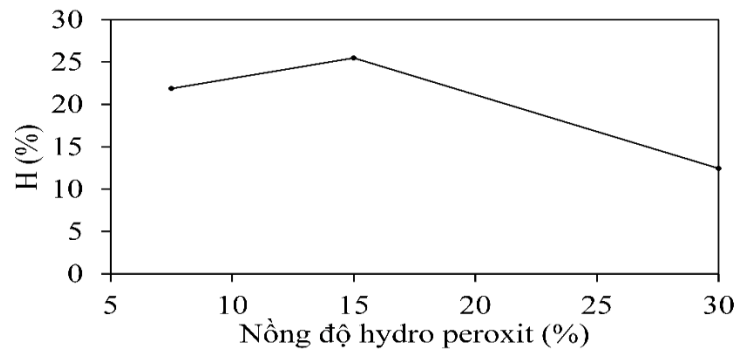
Hình 3. Đồ thị ảnh hưởng của nồng độ H_2SO_4 đến khả năng tách đồng (H_2O_2 15%, tỷ lệ rắn/lỏng 0,025, nhiệt độ 25 °C)

Hình 3 cho thấy, khi nồng độ H_2SO_4 tăng thì hiệu suất tách đồng tăng. Cụ thể khi nồng độ H_2SO_4 bằng 0,5M, 1M, 2M và 4M thì hiệu suất tách đồng lần lượt bằng 7,63%; 14,25%; 16,66% và 25,49%. Kết quả này có thể giải thích bởi: khi nồng độ H_2SO_4 tăng thì khả năng tương tác giữa H_2SO_4 và các chất tham gia phản ứng tăng. Mặt khác, trong quá trình tách đồng bằng H_2SO_4 và H_2O_2 , oxy được tạo ra từ sự phân hủy của H_2O_2 phản ứng với đồng kim loại để tạo thành CuO , sau đó CuO phản ứng với axit sunfuric để tạo thành CuSO_4 theo phương trình hóa học (2), (3), (4), (5). Trong khi đó, độ hòa tan của oxy trong dung dịch H_2SO_4 giảm khi nồng độ H_2SO_4 giảm [13]. Do vậy, để quá trình xảy ra nhanh hơn, cần tăng nồng độ của H_2SO_4 . Từ kết quả trên, nồng độ H_2SO_4 4,0 M được lựa chọn để nghiên cứu các yếu tố tiếp theo.

3.2.2. Ảnh hưởng của nồng độ H_2O_2

Để nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ H_2O_2 , ba thí nghiệm được tiến hành ở các nồng độ H_2O_2 khác nhau: 7,5; 15 và 30% trong khi các điều kiện khác giống nhau (H_2SO_4 4,0M, tỷ lệ rắn/lỏng 0,025, nhiệt độ 25 °C). Đó là các thí nghiệm có số thứ tự 5, 6, 7 (Bảng 1). Hình 4 cho biết ảnh hưởng của nồng độ H_2O_2 đến khả năng tách đồng.

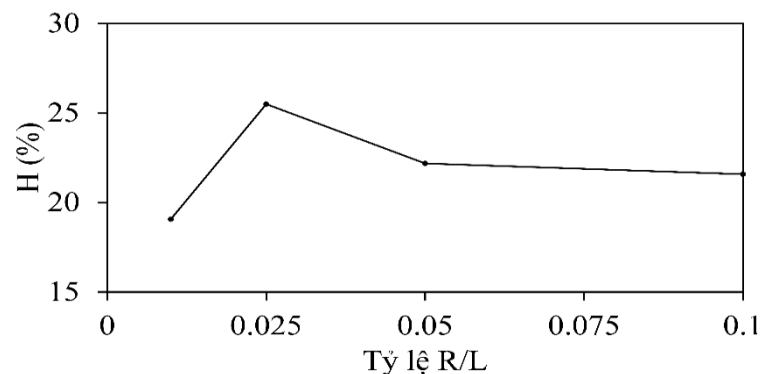
H_2O_2 và H_2SO_4 đều là chất tham gia vào quá trình hòa tách đồng. Phản ứng hòa tách đồng xảy ra theo phương trình (2), (3), (4), (5). H_2O_2 phân hủy sinh ra oxy, oxy phản ứng với đồng tạo thành CuO , chất này tiếp tục phản ứng với H_2SO_4 để tạo thành CuSO_4 [12]. Từ hình 4 cho thấy, khi nồng độ H_2O_2 tăng từ 7,5% đến 15% thì khả năng tách đồng tăng từ 21,87% đến 25,49%, còn khi nồng độ H_2O_2 tăng từ 15% đến 30% thì khả năng tách đồng lại giảm từ 25,49% xuống còn 12,44%. Do đó, nồng độ H_2O_2 15% sẽ được dùng để nghiên cứu các yếu tố khác.



Hình 4. Đồ thị ảnh hưởng của nồng độ H_2O_2 đến khả năng tách đồng (H_2SO_4 4,0M, tỷ lệ rắn/lỏng 0,025, nhiệt độ $25^\circ C$).

3.2.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ rắn/lỏng

Để nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ rắn/lỏng, bốn thí nghiệm được tiến hành ở các tỷ lệ khác nhau: 0,01; 0,025; 0,05 và 0,1 trong khi các điều kiện khác giống nhau (H_2SO_4 4,0M, H_2O_2 15%, nhiệt độ $25^\circ C$). Đó là các thí nghiệm có số thứ tự 8, 9, 10, 11 (Bảng 1). Hình 5 cho biết ảnh hưởng của tỷ lệ rắn/lỏng đến khả năng tách đồng.

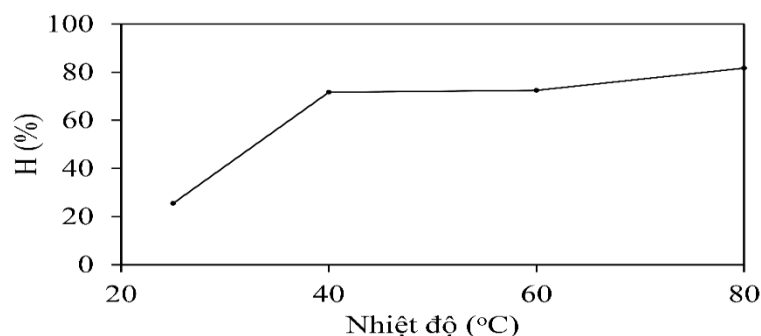


Hình 5. Đồ thị ảnh hưởng của tỷ lệ rắn/lỏng đến khả năng tách đồng (H_2SO_4 4,0M, H_2O_2 15%, nhiệt độ $25^\circ C$)

Hình 5 cho thấy, khi tỷ lệ rắn/lỏng tăng từ 0,01 đến 0,025 thì khả năng tách đồng tăng từ 19,06% đến 25,49%, còn khi lượng rắn/lỏng tăng từ 0,025 đến 0,1 thì khả năng tách đồng lại giảm từ 25,49% xuống 21,57%. Do đó, tỷ lệ rắn/lỏng bằng 0,025 sẽ được dùng để nghiên cứu các yếu tố khác.

3.2.4. Ảnh hưởng của nhiệt độ

Để nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ đến khả năng tách đồng, các thí nghiệm được thực hiện ở các nhiệt độ khác nhau: $25^\circ C$, $40^\circ C$, $60^\circ C$ và $80^\circ C$ trong khi các điều kiện khác giống nhau (H_2SO_4 4,0M, H_2O_2 15%, tỷ lệ rắn/lỏng 0,025). Đó là các thí nghiệm có số thứ tự 12, 13, 14, 15 (Bảng 1). Hình 6 cho biết ảnh hưởng của nhiệt độ đến khả năng tách đồng. Từ hình 6, nhận thấy khi nhiệt độ tăng thì khả năng tách đồng tăng, tốc độ tách đồng từ $25^\circ C$ đến $40^\circ C$ tăng nhanh (từ 25,48% đến 71,64%) và tăng nhanh hơn khoảng nhiệt độ từ $40^\circ C$ đến $80^\circ C$ (từ 71,74% đến 81,68%). Khi nhiệt độ tăng thì tốc độ phản ứng phản ứng (2), (3), (4), (5) tăng, dẫn đến tốc độ quá trình tách đồng tăng [12]. Tuy nhiên, trong khoảng nhiệt độ từ $25^\circ C$ đến $40^\circ C$ hiệu suất hòa tách đồng tăng nhanh. Do vậy, cần thực hiện phản ứng ở $40^\circ C$ để tốc độ tách đồng cao, tốn ít năng lượng và hạn chế sự phân hủy của H_2O_2 .



Hình 6. Đồ thị ảnh hưởng của nhiệt độ đến khả năng tách đồng (H_2SO_4 4,0M, H_2O_2 15%, tỷ lệ rắn/lỏng 0,025)

4. Kết luận

Đã đánh giá quá trình hòa tách kim loại đồng từ bảng mạch điện thoại di động bằng phương pháp luyện kết hợp thủy luyện cho thấy: bảng mạch điện thoại di động sau khi xử lý sơ bộ ở 750 °C trong lò kín trong 2 giờ. Quá trình tách đồng đạt hiệu quả cao ở nồng độ H_2SO_4 4M, H_2O_2 15%, tỷ lệ rắn - lỏng là 0,025 và nhiệt độ 40 °C với hiệu suất tách đồng đạt 71,64% sau 1 giờ.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài Khoa học và công nghệ cấp Đại học với mã số: ĐH2020-TN06-05.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] E. Kim, M. Kim, J. Lee, and B. D. Pandey, "Selective recovery of gold from waste mobile phone PCBs by hydrometallurgical process," *J. Hazard. Mater.*, vol. 198, pp. 206-215, 2011.
- [2] J. Cui and L. Zhang, "Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 158, pp. 228-256, 2008.
- [3] I. Dalrymple, N. Wright, R. Kellner, N. Bains, K. Geraghty, M. Goosey, and L. Lightfoot "An integrated approach to electronic waste (WEEE) recycling," *Circuit world*, vol. 33, pp. 52-58, 2007.
- [4] Y. Ding, S. Zhang, B. Liu, H. Zheng, C. Chang, and C. Ekberg, "Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review," *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 141, pp. 284-298, 2019.
- [5] A. Mecucci and K. Scott, "Leaching and electrochemical recovery of copper, lead and tin from scrap printed circuit boards," *J. Chem. Technol. Biotechnol. Int. Res. Process. Environ. Clean Technol.*, vol. 77, no. 4, pp. 449-457, 2002.
- [6] E. Y. L. Sum, "The recovery of metals from electronic scrap," *JOM*, vol. 43, no. 4, pp. 53-61, 1991.
- [7] S. A. Shuey and P. Taylor, "Review of pyrometallurgical treatment of electronic scrap," *Min. Eng.*, vol. 57, no. 4, pp. 67-70, 2005.
- [8] L. E. Macaskie, N. J. Creamer, A. M. M. Essa, and N. L. Brown, "A new approach for the recovery of precious metals from solution and from leachates derived from electronic scrap," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 96, no. 4, pp. 631-639, 2007.
- [9] T. Ogata and Y. Nakano, "Mechanisms of gold recovery from aqueous solutions using a novel tannin gel adsorbent synthesized from natural condensed tannin," *Water Res.*, vol. 39, no. 18, pp. 4281-4286, 2005.
- [10] H. Li, J. Eksteen and E. Oraby, "Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives-A review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 139, pp. 122-139, 2018.
- [11] I. Birloaga, V. Coman, B. Kopacek, and F. Vegliò, "An advanced study on the hydrometallurgical processing of waste computer printed circuit boards to extract their valuable content of metals," *Waste Management*, vol. 34, pp. 2581-2586, 2014.
- [12] H. Yang, J. Liu, and J. Yang, "Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards," *J. Hazard. Mater.*, vol. 187, pp. 393-400, 2011.
- [13] K. E. Gubbins and R. D. Walker Jr, "The solubility and diffusivity of oxygen in electrolytic solutions," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 112, 1965, doi: 10.1149/1.2423575.