

NGHIÊN CỨU HOÀN NGUYÊN MAGIE BẰNG QUY TRÌNH TÍCH HỢP  
HAI GIAI ĐOẠN

## STUDY ON MAGNESIUM REDUCTION BY A INTEGRATED PROCESS

VŨ VIỆT QUYỀN

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: quyenvv.cndt@vimaru.edu.vn

**Tóm tắt**

Hiện nay, phương pháp chủ yếu để sản xuất magie dựa trên quy trình Pidgeon. Mặc dù quy trình này có cấu trúc đơn giản, nhưng lại kém hiệu quả do tiêu tốn nhiều năng lượng và phát thải lượng lớn khí nhà kính, cùng với tiến trình thực hiện không liên tục. Để thúc đẩy sự tiến bộ trong công nghệ sản xuất magie, bài báo này đề xuất một giải pháp tích hợp nhằm kết hợp hai giai đoạn nung dolomit và hoàn nguyên magie thành một giai đoạn duy nhất. Nghiên cứu tập trung phân tích tác động của giai đoạn chế tạo viên phối liệu và nhiệt độ nung đến hiệu suất hoàn nguyên của quy trình mới. Kết quả nghiên cứu cho thấy áp suất ép phối liệu trong phạm vi nghiên cứu có ảnh hưởng đáng kể đến phản ứng hoàn nguyên, nhưng không tác động đến hiệu suất hoàn nguyên cuối cùng. Nhiệt độ nung phối liệu tối ưu trong giai đoạn tích hợp là 1000°C. Tuy nhiên, do sự phân tách và oxy hóa của các chất phản ứng trong quá trình nung, hiệu suất hoàn nguyên giảm so với quy trình Pidgeon. Điều này đặt ra thách thức cần được khắc phục khi áp dụng quy trình tích hợp mới.

**Từ khóa:** Hoàn nguyên Mg, quy trình tích hợp, nhiệt độ nung.

**Abstract**

Nowadays, the predominant method for magnesium production relies on the Pidgeon process. While this process is structurally simple, it suffers from inefficiencies due to high energy consumption and significant greenhouse gas emissions, along with its discontinuous nature. To advance magnesium production technology, this paper proposes an integrated approach that consolidates the two stages of dolomite calcination and magnesium reduction into a single stage. The study examines the influence of pelletizing pressure and calcination temperature on the reduction efficiency of the new process. The findings indicate that while pelletizing pressure

significantly impacts the reduction reaction rate, it does not affect the final reduction efficiency. The optimal calcination temperature in the integrated stage is identified as 1000°C. However, the separation and oxidation of reactants during calcination result in a reduction efficiency lower than that of the Pidgeon process, presenting a challenge that must be addressed for the successful implementation of this new integrated method.

**Keywords:** Magnesium, integrated process, decomposition temperature.

**1. Mở đầu**

Magie (Mg) có nhiều ứng dụng công nghiệp như sử dụng làm chất hoàn nguyên trong chế tạo titan, zircon, beri và nhiều kim loại khác, ứng dụng trong pin hiệu suất cao [1]. Hợp kim của Mg cũng được sử dụng rộng rãi trong ngành hàng không, ô tô do độ bền riêng cao [2], [3]. Các phương pháp sản xuất Mg thường dùng bao gồm phương pháp điện phân nóng chảy magie clorua và phương pháp nhiệt silic. Nhiệt silic là phương pháp được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp sản xuất Mg do đơn giản và vận hành dễ dàng. Tuy nhiên, do chu kỳ sản xuất dài, mức tiêu thụ năng lượng cao và chi phí chất hoàn nguyên silic cao khiến phương pháp này đang mất dần đi lợi thế do định hướng phát triển công nghiệp xanh và bền vững của các quốc gia sản xuất Mg.

Một số nghiên cứu đã hướng đến phát triển các quy trình nhiệt nhôm và nhiệt cacbon để khắc phục một số nhược điểm kể trên. Quy trình nhiệt nhôm có ưu điểm là nhiệt độ phản ứng thấp, tốc độ phản ứng nhanh và thời gian phản ứng ngắn, nhưng giá bột nhôm cao làm hạn chế ứng dụng của loại chất hoàn nguyên này [4], [5]. Chất hoàn nguyên cacbon thì ngược lại có giá thấp và nguồn cung dồi dào. Tuy nhiên, hơi Mg dễ bị oxy hóa bởi khí CO được tạo ra đồng thời trong quá trình hoàn nguyên tạo ra MgO và C, làm giảm nghiêm trọng việc thu hồi Mg và tăng tạp chất trong sản phẩm [6]. Công ty Mintek của Nam Phi đã đưa ra quy trình MTMP có thể sản xuất liên tục,

nhưng nhiệt độ vận hành của quy trình cao từ 1700°C-1750°C cùng với đòi hỏi nghiêm ngặt về thành phần phối liệu, tuổi thọ của lò hoàn nguyên và chi phí đầu tư cao [7].

Quy trình Pidgeon điển hình của phương pháp nhiệt silic với việc sản xuất gián đoạn theo từng mẻ, giai đoạn nung dolomit và giai đoạn hoàn nguyên diễn ra trong các lò riêng biệt. Sau khi hoàn thành giai đoạn nung, dolomit được làm nguội để nghiền, dẫn đến giải phóng nhiệt đáng kể vào môi trường xung quanh, gây lãng phí năng lượng. Giải pháp tích hợp hai giai đoạn này để tận dụng nguồn nhiệt lãng phí ở giai đoạn nung chuyển vào giai đoạn hoàn nguyên sẽ giúp tiết kiệm được một lượng nhiệt đáng kể. Ngoài ra quy trình sản xuất sẽ liên tục không bị gián đoạn. Công trình nghiên cứu hoàn nguyên Mg từ dolomit Thanh Hóa đã đưa ra quy trình tích hợp này [8]. Tuy nhiên, bước nung trong quy trình tích hợp này được thực hiện ở hai nhiệt độ nung trong môi trường chân không, nhiệt độ thứ nhất để phân hủy  $MgCO_3$ , nhiệt độ thứ hai để phân hủy  $CaCO_3$ . Bước này tương đối phức tạp và nung trong môi trường chân không có thể khiến quá trình phân hủy dolomit diễn ra quá nhanh làm phân tách và oxi hóa các chất phản ứng trong phối liệu ảnh hưởng đến tốc độ phản ứng trong bước hoàn nguyên.

Nghiên cứu này đề xuất quy trình tích hợp với bước nung được thực hiện trong môi trường áp suất khí quyển với duy nhất một nhiệt độ nung. Các thí nghiệm được thực hiện để xác nhận tính khả thi của quy trình. Ảnh hưởng của áp suất ép phối liệu và nhiệt độ nung đến hiệu suất hoàn nguyên được nghiên cứu.

## 2. Nguyên liệu và thí nghiệm

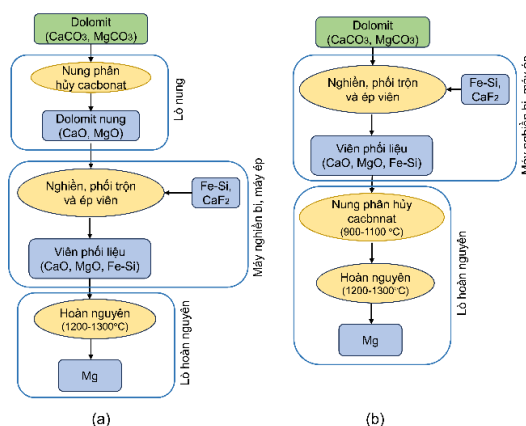
Nguyên liệu sử dụng trong thí nghiệm là dolomit khai thác tại Thanh Hóa, ferrosilic 75% và canxi florua ( $CaF_2$ ) 98% của Xilong - Trung Quốc làm chất xúc tác. Thành phần hóa học của dolomit và ferrosilic được phân tích bằng phương pháp XRF thể hiện trong Bảng 1.

**Bảng 1. Thành phần hóa học của dolomit và ferrosilic**

Dolomit (% khối lượng)						
MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tạp chất	L.O.I
20.85	30.5	0.32	0.43	0.22	0.25	47.43
Ferrosilic (% khối lượng)						
Si	C	Al	P	S	Fe	
74.1	0.12	1.34	0.04	0.03	22.8	

L.O.I: thành phần bay hơi do nung

Quy trình thí nghiệm thực hiện với hai bước chính được so sánh với quy trình truyền thống thể hiện trong sơ đồ Hình 1.



**Hình 1. Sơ đồ quy trình thực hiện, (a) quy trình truyền thống và (b) quy trình tích hợp**

Bước đầu tiên, đá dolomit thu thập có kích thước từ 7cm-8cm được nghiền thành các viên nhỏ hơn có kích thước 0,5cm-1cm bằng máy nghiền búa, tiếp đến được nghiền thành bột bằng máy nghiền bi hành tinh NQM-4 - Trung Quốc. Sau đó bột đá dolomit được trộn với 11,5% ferrosilic và 1,5%  $CaF_2$ . Hỗn hợp tiếp tục được nghiền, trộn bằng máy nghiền bi hành tinh và sàng qua lưới lọc 200mesh. Cuối cùng, hỗn hợp được ép thành các viên hình trụ có đường kính 10mm bằng máy ép thủy lực với áp suất ép tương đương khi thực hiện quy trình Pidgeon truyền thống, lần lượt 50Mpa, 100Mpa, 150Mpa, 200Mpa [8]. Khối lượng các viên phối liệu là 20g/viên. Trước khi tiến hành bước 2, các viên phối liệu sẽ được đưa vào lò sấy tại 300°C trong 3 giờ để loại bỏ hoàn toàn hơi nước còn tồn tại trong nguyên liệu nhằm đảm bảo độ chính xác trong việc xác định hiệu suất phân hủy và hiệu suất hoàn nguyên.

Bước thứ hai, mỗi thí nghiệm sử dụng 3 viên phối liệu được đưa vào ống hoàn nguyên và gia nhiệt bằng lò nung sử dụng thanh SiC. Theo dữ liệu nhiệt động học trong nghiên cứu của M.Wen cho thấy, trong môi trường khí quyển,  $MgCO_3$  bắt đầu phân hủy ở nhiệt độ hơn 500°C còn  $CaCO_3$  là hơn 800°C [9]. Do vậy ở giai đoạn nung trong nghiên cứu này, lò được nâng nhiệt độ lên các khoảng nhiệt độ từ 800°C đến 1200°C trong khoảng thời gian từ 10 phút - 60 phút để phân hủy cacbonat. Trong giai đoạn này, khí Ar được thổi vào ống hoàn nguyên 5 phút/lần để đẩy khí  $CO_2$  sản sinh trong quá trình phân hủy ra ngoài. Kết thúc giai đoạn nung, lò được nâng lên nhiệt độ hoàn nguyên 1250°C, hệ thống bơm chân không được kết nối với

ống hoàn nguyên. Hệ thống này bao gồm bơm hút chân không ULVAC PX-202, đồng hồ đo áp suất chân không SMC-ZSE30, đảm bảo áp suất chân không trong ống hoàn nguyên được duy trì ở mức 100Pa. Kết thúc giai đoạn hoàn nguyên, Mg sản phẩm và bã xỉ được thu thập để phân tích. Do giai đoạn nung phần lớn chỉ có khí CO<sub>2</sub> thoát ra do phân hủy cacbonat nên hiệu suất phản ứng phân hủy cacbonat (H<sub>ph</sub>) được xác định theo công thức:

$$H_{ph} = (m_o - m_n) / m_{L.O.I} \times 100\%$$

Trong đó,  $m_o$  là khối lượng viên phối liệu ban đầu,  $m_n$  là khối lượng viên phối liệu sau giai đoạn nung,  $m_{L.O.I}$  là khối lượng mất mát do nung tính theo tỷ lệ phần trăm trong phối liệu.

Trong giai đoạn hoàn nguyên chỉ có Mg sinh ra ở dạng hơi nên hiệu suất hoàn nguyên (H<sub>hn</sub>) được xác định theo công thức:

$$H_{hn} = (m_n - m_h) / m_{Mg} \times 100\%$$

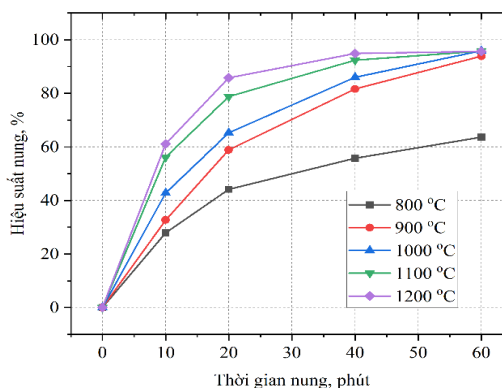
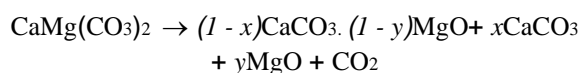
Trong đó  $m_h$  là khối lượng viên phối liệu sau hoàn nguyên,  $m_{Mg}$  là khối lượng Mg có trong phối liệu ban đầu.

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ nung đến tốc độ phân hủy và hiệu suất hoàn nguyên.

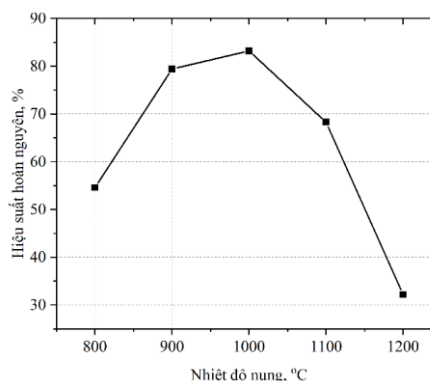
Theo một số nghiên cứu về quá trình nung dolomit trong quy trình Pidgeon truyền thống, nhiệt độ nung sẽ ảnh hưởng đến khả năng hydrat hóa và chất lượng của dolomit nung. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng không đáng kể, mức độ hydrat hóa của dolomit nung trong sản xuất thực tế trong phạm vi 18%-33%. Tác giả C.Zhang và các cộng sự cho rằng mức hydrat hóa tối thiểu 5% là đủ để đảm bảo chất lượng dolomit nung cho quá trình hoàn nguyên [10]. Trong quy trình tích hợp mới này, giai đoạn nung được tích hợp liên tiếp với giai đoạn hoàn nguyên trong cùng một ống hoàn nguyên chứ không phân tách thành hai giai đoạn riêng biệt như quy trình Pidgeon. Do đó, giai đoạn nung sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến giai đoạn hoàn nguyên. Kết quả phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ nung đến tốc độ phản ứng phân hủy trong môi trường áp suất khí quyển được thể hiện trong Hình 2. Kết quả cho thấy khi tăng nhiệt độ nung thì tốc độ phản ứng phân hủy tăng theo nhiệt độ nung. Tốc độ phản ứng phân hủy tăng nhanh ở giai đoạn ban đầu và có dấu hiệu chậm dần theo thời gian. Kết quả này thể hiện yếu tố nhiệt độ có ảnh hưởng đáng kể đến quá trình phân hủy cacbonat trong các viên phối liệu, nhiệt độ nung cao hơn sẽ làm tăng đáng kể tốc độ phản ứng và rút ngắn thời gian nung. Điều này dễ nhận thấy nhất ở nhiệt độ nung 800°C, quá trình phân hủy cacbonat chỉ đạt 66%

sau một giờ, trong khi chỉ cần một nửa thời gian đó để hoàn tất quá trình phân hủy tại nhiệt độ 1200°C. Tại nhiệt độ nung thấp, quá trình phân hủy cacbonat chỉ diễn ra một phần theo phản ứng sau:



Hình 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ nung đến tốc độ phản ứng phân hủy

Nhiệt độ nung cao hơn sẽ tốt hơn cho tốc độ phản ứng phân hủy và giảm thời gian nung của các viên phối liệu nhưng không có nghĩa sẽ tốt cho giai đoạn hoàn nguyên diễn ra tiếp theo. Hình 3 thể hiện kết quả hiệu suất hoàn nguyên trong 3 giờ theo nhiệt độ nung. Với nhiệt độ nung từ 800°C đến 1000°C, hiệu suất hoàn nguyên tăng rõ rệt từ 54% đến hơn 80%.

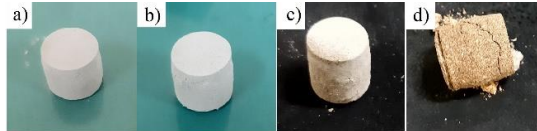


Hình 3. Ảnh hưởng của nhiệt độ nung đến hiệu suất hoàn nguyên

Kết quả này phù hợp với hiệu suất phân hủy cacbonat của giai đoạn nung. Khi nung ở 800°C, thời gian 1 giờ không đủ để phân hủy hoàn toàn dolomit có trong phối liệu, do đó khi chuyển sang giai đoạn hoàn nguyên, tốc độ phản ứng sẽ chậm hơn so với trường hợp dolomit đã phân hủy hoàn toàn. Như vậy, trong khoảng nhiệt độ này tăng nhiệt độ nung sẽ giúp ích quá trình nung diễn ra nhanh hơn, tiết kiệm thời gian và

nâng cao được hiệu suất hoàn nguyên cuối cùng.

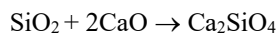
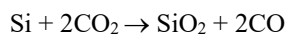
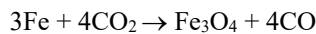
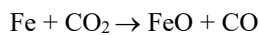
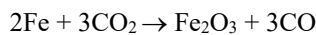
Tuy nhiên, kết quả khi nung ở 1100°C đến 1200°C lại trái ngược, hiệu suất hoàn nguyên giảm mạnh xuống 32,4% mặc dù hiệu suất phân hủy dolomit đạt được cao nhất. Nguyên nhân của hiện tượng này được chỉ ra khi nghiên cứu các viên phối liệu sau giai đoạn nung trong Hình 4.



**Hình 4. Các viên phối liệu sau giai đoạn nung ở:**  
 (a) 900°C, (b) 1000°C, (c) 1100°C, (d) 1200°C

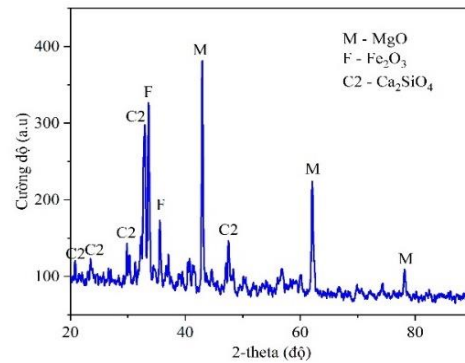
Kết quả sau khi nung ở 900°C và 1000°C, viên phối liệu có màu trắng và hình dạng không có sự biến dạng. Nhưng khi nung ở nhiệt độ cao hơn thì phối liệu bắt đầu có sự chuyển màu sang vàng và nâu, kết hợp với sự xuất hiện nhiều vết nứt trên bề mặt. Đặc biệt nung ở 1200°C, viên gần như mất khả năng liên kết phối liệu, dễ dàng vỡ vụn. Khả năng tiếp xúc giữa các chất phản ứng trong phối liệu ảnh hưởng lớn đến hiệu suất trong phản ứng hoàn nguyên Mg, vì phản ứng này được cho xảy ra ở trạng thái rắn - rắn [11].

Ngoài ra, một nguyên nhân khác dẫn đến sự sụt giảm hiệu suất hoàn nguyên là hiện tượng oxi hóa ferosilic trong môi trường khí CO<sub>2</sub> [8]. Khí CO<sub>2</sub> được tạo ra ở giai đoạn phân hủy dolomit sẽ khuếch tán qua các lỗ rỗng của viên phối liệu và phản ứng với các nguyên tố kim loại chính Si và Fe trong ferosilic. Quá trình oxi hóa này có thể tạo ra các oxit Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> và SiO<sub>2</sub> theo các phản ứng sau:



Phân tích XRD mẫu phối liệu sau nung ở 1200°C thể hiện trong Hình 5 cho thấy các pha chính gồm MgO là sản phẩm phân hủy của dolomit, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> là sản phẩm của quá trình oxi hóa ferosilic trong môi trường CO<sub>2</sub>, còn lại là Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Với số lượng nhiễu xạ có cường độ cao của Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> và Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> cho thấy có số lượng lớn chất hoàn nguyên ferosilic đã bị oxi hóa ở giai đoạn nung và không được sử dụng cho giai đoạn hoàn nguyên.

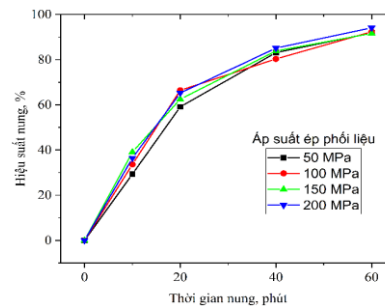
Ngoài ra các sản phẩm hình thành là oxit sắt và canxi silicat sẽ làm cản trở khả năng khuếch tán của lượng Si còn lại tới dolomit sau nung, ảnh hưởng đến hiệu suất hoàn nguyên.



**Hình 5. Phân tích XRD mẫu phối liệu nung ở 1200°C**

### 3.2. Ảnh hưởng của áp suất ép phối liệu đến tốc độ phân hủy và hiệu suất hoàn nguyên

Nghiên cứu sử dụng các mẫu thí nghiệm với nhiệt độ nung tại 1000°C trong 1 giờ và hoàn nguyên tại 1250°C trong 3 giờ để đánh giá mức độ ảnh hưởng của áp suất ép phối liệu. Kết quả được thể hiện trong Hình 6 cho thấy trong 20 phút đầu, hiệu suất của phản ứng phân hủy với phối liệu được ép ở áp suất 150MPa đạt được tốt nhất. Tuy nhiên sự chênh lệch hiệu suất giữa các áp suất ép là không nhiều, chỉ khoảng 6%.

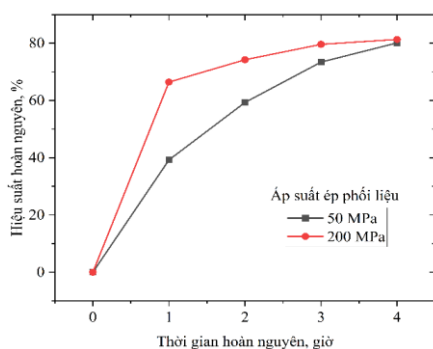


**Hình 6. Ảnh hưởng áp suất ép phối liệu đến tốc độ phản ứng phân hủy**

Tuy nhiên, khi thời gian tăng lên đến 1 giờ thì các hiệu suất tương đương nhau. Do đó, áp suất ép phối liệu ảnh hưởng không đáng kể đến tốc độ phản ứng phân hủy của viên liệu. Vì áp suất tạo viên sẽ ảnh hưởng đến các tính chất vật lý và hóa học của viên liệu như độ dẫn nhiệt, độ xốp,... Điều này có thể sẽ ảnh hưởng thêm đến quá trình hoàn nguyên tiếp theo.

Hình 7 thể hiện kết quả của áp suất ép 50MPa và 200MPa đến hiệu suất hoàn nguyên. Từ kết quả có thể nhận thấy mặc dù trong giai đoạn đầu của quá trình hoàn nguyên, hiệu suất của viên phối liệu được ép ở 200MPa đạt được cao hơn nhưng khi kết thúc 4 giờ thì hiệu suất của cả 2 trường hợp gần tương đương

nhau. Điều này là do khi ép với áp suất cao hơn thì khả năng tiếp xúc của các chất phản ứng trong viên liệu tốt dẫn đến tốc độ phản ứng nhanh hơn do phản ứng ở trạng thái rắn - rắn xảy ra chủ yếu là do các chất phản ứng khuếch tán.

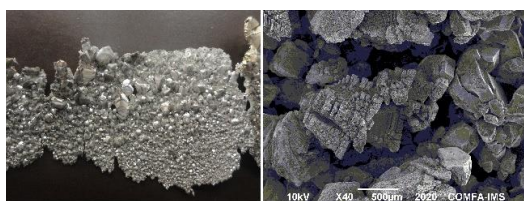


Hình 7. Ảnh hưởng áp suất ép phối liệu đến hiệu suất hoàn nguyên

Khi thời gian tăng, tốc độ phản ứng hoàn nguyên chậm dần và đạt đến trạng thái bán cân bằng. Việc tăng thêm thời gian sẽ không làm hiệu suất tăng thêm nhiều mà còn làm kéo dài thời gian và tiêu hao nhiều năng lượng. Kết quả này khẳng định áp suất ép phối liệu chỉ ảnh hưởng nhiều đến tốc độ của phản ứng mà không làm thay đổi hiệu suất cuối cùng hay trạng thái bán cân bằng của phản ứng. Do vậy, lựa chọn hợp lý áp suất ép sẽ giúp rút ngắn được thời gian của quá trình.

### 3.3. Sản phẩm Mg hoàn nguyên

Sản phẩm thu được sau hoàn nguyên tại vị trí kết tinh trong ống hoàn nguyên được thể hiện trong Hình 8. Mg sản phẩm có dạng tinh thể màu sáng ánh kim. Trên bề mặt của Mg xuất hiện một số tạp chất nhỏ.



Hình 8. Ảnh chụp và SEM của Mg kim loại thu được sau hoàn nguyên

Phân tích mẫu sản phẩm thu được bằng phương pháp phân tích thể tích, hàm lượng Mg trong sản phẩm từ đạt 98,3%. Kết quả này tương đương với sản phẩm thu được bằng phương pháp Pidgeon truyền thống [8].

## 4. Kết luận

Nghiên cứu đã đánh giá được tính khả thi của quy trình tích hợp hai giai đoạn trong đó giai đoạn nung

được thực hiện một bước trong môi trường áp suất khí quyển. Kết quả nhiệt độ giai đoạn nung tốt nhất cho quy trình này là 1000°C, cao hơn so với quy trình nung hai bước. Tuy nhiên kỹ thuật thực hiện đơn giản hơn. Áp suất ép phối liệu được chỉ ra ảnh hưởng đáng kể đến tốc độ phản ứng hoàn nguyên nhưng không ảnh hưởng nhiều đến hiệu suất phân hủy cacbonat và hiệu suất hoàn nguyên cuối cùng. Lựa chọn áp suất ép thích hợp sẽ giúp giảm thời gian thực hiện chu trình.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.43.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Sezer, Z. Evis, S. M. Kayhan, A. Tahmasebifar, and M. Koç (2018), *Review of magnesium-based biomaterials and their applications*, Journal of Magnesium and Alloys, Vol.6, No.1, pp.23-43. doi: 10.1016/j.jma.2018.02.003.
- [2] A. Kumar, S. Kumar, and N. K. Mukhopadhyay (2018), *Introduction to magnesium alloy processing technology and development of low-cost stir casting process for magnesium alloy and its composites*, Journal of Magnesium and Alloys, Vol.6, No.3, pp.245-254. doi: 10.1016/j.jma.2018.05.006.
- [3] T. Xu, Y. Yang, X. Peng, J. Song, and F. Pan (2019), *Overview of advancement and development trend on magnesium alloy*, Journal of Magnesium and Alloys, Vol.7, No.3, pp.536-544. doi: 10.1016/j.jma.2019.08.001.
- [4] Y. Wang, J. You, J. Peng, and Y. Di (2016), *Production of Magnesium by Vacuum Aluminothermic Reduction with Magnesium Aluminate Spinel as a By-Product*, JOM, Vol.68, No. 6. doi: 10.1007/s11837-016-1865-6.
- [5] Aghion, E., Golub, G. (2006). *Production Technologies of Magnesium*. In: Magnesium Technology. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-30812-1\\_2](https://doi.org/10.1007/3-540-30812-1_2).
- [6] Y. Tian et al. (2015), *Magnesium production by carbothermic reduction in vacuum*, Journal of Magnesium and Alloys, Vol. 3, No.2, pp.149-154, doi: 10.1016/j.jma.2015.04.001.
- [7] M. Abdellatif (2011), *Review of the development work on the Mintek Thermal Magnesium Process (MTMP)*.

- [8] Vũ Viết Quyền (2022), *Nghiên cứu tổng hợp Mg kim loại từ nguyên liệu dolomit Thanh Hóa*, Luận án Tiến sĩ, Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội.
- [9] M. Wen, T. Zhang, Z. Dou, Y. Guan, and R. Zhang (2014), *Two-stage calcination of dolomite pellets for mg-extraction by silicothermic reduction in vacuum*, *Zhenkong Kexue yu Jishu Xuebao/Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol.34, No.11, pp.1242-1245.  
doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2014.11.19.
- [10] C. Zhang, C. Wang, S. Zhang, and L. Guo (2015), *The effects of hydration activity of calcined dolomite (HCD) on the silicothermic reduction process*, *Int J Miner Process*, Vol.142.  
doi: 10.1016/j.minpro.2015.01.008.
- [11] I. M. Morsi, K. A. El Barawy, M. B. Morsi, and S. R. Abdel-Gawad (2002), *Silicothermic Reduction of Dolomite Ore Under Inert Atmosphere*, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol.41, No.1, pp.15-28.  
doi: 10.1179/cm.2002.41.1.15.

Ngày nhận bài:	19/11/2024
Ngày nhận bản sửa:	04/12/2024
Ngày duyệt đăng:	24/12/2024