

Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Sáng chế đề cập đến việc khử quặng sắt để sản xuất sắt.

Tình trạng kỹ thuật của sáng chế

Quy trình khử trực tiếp sắt (direct reduced iron - DRI) là tuyến đường tạo ra sắt thay thế cho quy trình lò cao. Trong quy trình DRI, khoáng oxit sắt như hematit, goetit và magnetit được khử ở trạng thái rắn của chúng tại nhiệt độ dưới điểm nóng chảy của sắt, không giống như quy trình lò cao trong đó sắt lỏng được tạo thành.

Quy trình DRI thông thường diễn ra trong khoảng từ 800°C đến 1050°C bằng phản ứng với chất khử, thường là H₂ và CO. Các khí khử này có nguồn gốc từ khí thiên nhiên hoặc than đá, với khả năng hơn 80% nhà máy DRI toàn cầu sử dụng khí thiên nhiên (ví dụ nhà máy MIDREX và HYL). Do cần lượng chất đi qua và nhiệt độ khí cao, nhà máy DRI cần kỹ thuật thiết bị phản ứng nén quy mô lớn, thông thường là thiết bị phản ứng kiểu trực, thiết bị phản ứng kiểu tầng sôi hoặc lò sấy kiểu xoay.

Yêu cầu nguyên liệu thô đối với nhiều quy trình DRI hiện tại khan hiếm, với hệ thống thông thường cần nguyên liệu nạp ở dạng hạt, hoặc cục cứng tự nhiên tùy thuộc vào tính khả dụng và sự thích hợp của quặng, có nghĩa là cần xử lý nguyên liệu đáng kể trước quy trình khử. Lượng phát thải, chiều cao và độ phức tạp nhà máy lớn dẫn đến vốn đầu tư cơ bản cao và phí tổn vận hành và bảo trì đáng kể, có sự tiêu thụ năng lượng cho quy trình trên cơ sở khí thiên nhiên thường nằm trong khoảng từ 10 đến 11 GJ với mỗi tấn DRI.

Công nghiệp sắt và thép là một trong các ngành sử dụng năng lượng lớn nhất, tiêu thụ khoảng 7% tổng năng lượng trên thế giới. Nhu cầu trên toàn cầu đối với thép dự kiến tăng 50% cho đến năm 2050, trong khi lượng phát xạ khí nhà kính phải giảm để đạt được mục tiêu thay đổi hoàn cảnh khó khăn.

Trong lúc không có phương pháp hiệu quả cao để bắt và lưu giữ CO₂ phát xạ, đối với nền công nghiệp việc giảm sử dụng năng lượng, tăng tính bền vững, và cải thiện tính linh hoạt và khả năng mở rộng hoạt động là rất quan trọng.

Thảo luận nêu trên không được thừa nhận là hiểu biết chung ở Úc hoặc các nơi khác.

Bản chất kỹ thuật của sáng chế

Sáng chế đề cập đến quy trình để khử trực tiếp quặng sắt ở trạng thái rắn dưới điều kiện không có oxy với sinh khối làm chất khử và với năng lượng điện từ làm nguồn năng lượng.

Sáng chế dựa trên cơ sở nhận thức rằng việc sử dụng sinh khối làm chất khử và năng lượng điện từ làm nguồn năng lượng đề xuất cơ hội để tạo ra hiệu quả và hiệu quả cao sắt kim loại.

Lợi ích của quy trình theo sáng chế dựa trên khả năng năng lượng điện từ gia nhiệt nguyên liệu về mặt thể tích. Ví dụ, oxit sắt như hematit và goetit, và năng lượng điện từ hấp thụ mạnh sinh khối ở dạng năng lượng vi sóng trên trong khoảng 400-600°C. Các tác giả sáng chế nhận ra rằng nhiệt có thể được tạo ra trực tiếp trong quặng và trong sinh khối là kết quả của sự hấp thụ năng lượng làm cho nó có thể khử quặng sắt đến mức độ kim loại hóa cao. Các tác giả sáng chế nhận ra rằng cơ hội này đặc biệt áp dụng khi quặng và sinh khối tiếp xúc gần, ví dụ khi pha trộn hoặc kết tụ với nhau dưới dạng bánh. Theo sáng chế, hạn chế truyền nhiệt của quy trình thông thường có thể được giảm thiểu, dẫn đến tốc độ gia nhiệt tăng đáng kể. Thời gian gia nhiệt giảm đáng kể dẫn đến thời gian phản ứng nhanh hơn và làm cho nó có thể giảm đáng kể kích thước lò so với kích thước lò theo quy trình DRI thông thường như Midrex (có thể cao hơn 130m), và cho phép xây dựng lò ngang, trong khi loại bỏ sự cần thiết gia nhiệt thể tích khí lớn. Khả năng tạo nhiệt trực tiếp trong quặng và sinh khối là kết quả của sự hấp thụ năng lượng điện từ đến mức độ cho phép khử quặng sắt đến mức độ kim loại hóa cao có nghĩa là không cần thiết phải tạo nhiệt từ quá trình đốt cháy khí thiên nhiên. Điều này đề xuất cơ hội loại bỏ sự cần thiết phải tạo viên đến mức cần của quy trình DRI, và tăng việc kiểm soát quy trình. Các yếu tố này cùng nhau đề xuất cơ hội để giảm CAPEX trong khi cải thiện khả năng hoạt động và bảo trì.

Ngoài các lợi ích nêu trên, và lợi ích tiềm năng đáng kể nhất theo sáng chế, là việc thay thế khí thiên nhiên và than đá bằng sinh khối làm chất khử cũng đề xuất cơ hội để giảm lượng phát xạ CO₂ cho hoạt động tạo ra thép, cũng như cắt việc tin cậy nhiên liệu hóa thạch.

Quy trình có thể bao gồm việc cho quặng sắt và sinh khối tiếp xúc với năng lượng điện từ tiếp xúc với quặng sắt và sinh khối trong điều kiện không có oxy và năng lượng điện từ tạo ra nhiệt trong quặng sắt và có sinh khối làm chất khử và khử quặng sắt ở trạng thái rắn.

Quy trình có thể bao gồm năng lượng điện từ tạo ra nhiệt trong quặng sắt và trong sinh khối.

Quy trình có thể bao gồm việc kiểm soát điều kiện vận hành sao cho quặng sắt được gia nhiệt đến nhiệt độ nằm trong khoảng mà ở đó kim loại hóa quặng sắt.

Đối với hematit, quy trình có thể bao gồm việc kiểm soát điều kiện vận hành sao cho quặng sắt được gia nhiệt đến nhiệt độ nằm trong khoảng 800-1200°C để kim loại hóa hematit.

Quặng sắt có thể được gia nhiệt đến nhiệt độ ít nhất là 800°C, thông thường ít nhất là 900°C.

Quặng sắt có thể được gia nhiệt đến nhiệt độ thấp hơn 1200°C, thông thường thấp hơn 1100°C.

Tốt hơn là quặng sắt được gia nhiệt đến nhiệt độ nằm trong khoảng 850-950°C.

Quy trình có thể bao gồm việc kiểm soát điều kiện vận hành sao cho quặng sắt được khử đến mức độ kim loại hóa cần thiết và tạo ra sản phẩm sắt kim loại trạng thái rắn.

Mức độ kim loại hóa cần thiết sẽ phụ thuộc vào khoảng yếu tố, như (các) áp dụng sử dụng cuối của sản phẩm sắt.

Thông thường, sự kim loại hóa 100% sẽ đạt được. Tuy nhiên, sáng chế không bị hạn chế ở quy trình vận hành để đạt được sự kim loại hóa 100%.

Ví dụ, quy trình có thể bao gồm việc kiểm soát điều kiện vận hành sao cho có ít nhất là 80%, thông thường ít nhất là 90%, sự kim loại hóa của quặng sắt.

Quy trình có thể là quy trình liên tục mà bao gồm việc vận chuyển quặng sắt và sinh khối qua buồng gia nhiệt/khử có môi trường không có oxy và cho quặng sắt và sinh khối tiếp xúc với năng lượng điện từ khi quặng sắt và sinh khối di chuyển qua buồng.

Thời gian cư trú trong buồng có thể là một tùy chọn điều khiển quy trình.

Quy trình có thể bao gồm việc tạo ra môi trường không có oxy bằng cách cung cấp khí trơ vào buồng.

Khí trơ có thể là khí trơ thích hợp bất kỳ, như nitơ.

Quy trình có thể bao gồm việc gia nhiệt sơ bộ quặng sắt và sinh khối.

Quy trình có thể bao gồm việc gia nhiệt sơ bộ quặng sắt và sinh khối đến nhiệt độ thấp hơn 900°C, thông thường là thấp hơn 800°C.

Quy trình có thể bao gồm việc gia nhiệt sơ bộ quặng sắt và sinh khối đến nhiệt độ ít nhất là 400°C, thông thường ít nhất là 500°C.

Quy trình có thể bao gồm việc gia nhiệt sơ bộ quặng sắt và sinh khối đến nhiệt độ nằm trong khoảng 400-900°C.

Quy trình có thể bao gồm việc vận chuyển quặng sắt và sinh khối qua buồng gia nhiệt sơ bộ và gia nhiệt sơ bộ quặng sắt và sinh khối khi quặng sắt và sinh khối di chuyển qua buồng đến buồng gia nhiệt/khử; vận chuyển quặng sắt và sinh khối qua buồng gia nhiệt/khử mà có môi trường không có oxy và cho quặng sắt và sinh khối tiếp xúc với năng lượng điện từ khi quặng sắt và sinh khối di chuyển qua buồng.

Quy trình có thể là quy trình theo mẻ.

Quy trình có thể bao gồm tùy chọn thích hợp bất kỳ để mang quặng sắt và sinh khối tiếp xúc kín. Các tùy chọn này bao gồm, ví dụ, tạo ra hỗn hợp của quặng sắt và sinh khối hoặc kết tụ quặng sắt và sinh khối cùng nhau.

Quy trình có thể bao gồm việc cho hỗn hợp của mảnh quặng sắt và sinh khối tiếp xúc với năng lượng điện từ dưới điều kiện không có oxy và tạo ra nhiệt trong mảnh quặng sắt mà gây ra sự khử quặng sắt ở trạng thái rắn trong mảnh, với sinh khối tạo ra nguồn của chất khử.

Quy trình có thể bao gồm việc cho bánh của mảnh quặng sắt, thông thường ở dạng hạt mịn, và sinh khối tiếp xúc với năng lượng điện từ dưới điều kiện không có oxy và tạo ra nhiệt trong bánh mà gây ra việc khử quặng sắt ở trạng thái rắn trong bánh, với sinh khối tạo ra nguồn của chất khử.

Bánh của mảnh quặng sắt và sinh khối là tùy chọn thuận tiện để cho quặng sắt và sinh khối tiếp xúc.

Thuật ngữ “bánh” được sử dụng trong bản mô tả là thuật ngữ chung để mô tả khối kết tụ của nhiều mảnh quặng sắt. Thuật ngữ này được dự định bao gồm khối kết tụ mà có thể được mô tả dưới dạng hạt. Thuật ngữ này không bị hạn chế bởi phương pháp tạo ra khối kết tụ cụ thể bất kỳ.

Thuật ngữ “mảnh” được hiểu trong bản mô tả là chỉ mẫu quặng sắt kích thước thích hợp bất kỳ. Thuật ngữ “mảnh” như được sử dụng trong bản mô tả có thể được hiểu bởi người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực kỹ thuật được mô tả tốt hơn là “hạt” hoặc “hạt mịn”. Mục đích là sử dụng thuật ngữ dưới dạng đồng nghĩa.

Bánh có thể có kích thước và hình dạng thích hợp bất kỳ.

Ví dụ, bánh có thể có kích thước lớn nhất là 1-10cm, thông thường là 2-10cm, thông thường hơn là 2-6cm và thông thường hơn là 2-4cm.

Ví dụ, bánh có thể thường là hình hộp, tức là dạng hình hộp có sáu mặt và tất cả các góc giữa các mặt là góc vuông.

Bánh có thể bao gồm lượng tương ứng thích hợp bất kỳ của quặng sắt và sinh khối.

Bánh có thể bao gồm 20-45% theo khối lượng, thông thường 30-45% theo khối lượng, sinh khối.

Trong tình huống đưa ra bất kỳ, tỷ lệ được ưu tiên của quặng sắt và sinh khối sẽ phụ thuộc vào khoảng yếu tố, bao gồm nhưng không giới hạn ở loại (ví dụ hematit, goetit hoặc magnetit) và đặc điểm (như kích thước mảnh và khoáng vật học) của sắt, loại và đặc điểm của sinh khối, hạn chế quy trình vận hành, và cân nhắc xử lý nguyên liệu.

Bánh có thể bao gồm các hợp phần khác.

Một hợp phần bổ sung có thể là chất gắn kết để tạo điều kiện giữ bánh cùng với nhau, ví dụ sao cho bánh có đặc tính cấu trúc cần thiết cho yêu cầu xử lý nguyên liệu cho quy trình.

Quặng sắt có thể là nguyên liệu thô được nghiền nát và tách theo kích thước sau khi nguyên liệu được khai thác.

Ví dụ, quặng sắt có thể ở dạng hạt mịn.

Thuật ngữ “hạt mịn” được hiểu trong bản mô tả là mảnh nhỏ hơn 8mm.

Thuật ngữ “không có oxy” được hiểu trong bản mô tả là rất thiếu hoặc hoàn toàn cạn kiệt oxy.

Thuật ngữ “sinh khối” được hiểu trong bản mô tả là chỉ chất hữu cơ sống hoặc gần đây là sống. Sản phẩm sinh khối cụ thể bao gồm, ví dụ, sản phẩm lâm nghiệp (bao gồm tàn dư từ nhà máy), sản phẩm nông nghiệp, sinh khối được tạo ra trong môi trường nước chẳng hạn như tảo, tàn dư nông nghiệp như rơm, hổ ô liu và vỏ hạt, chất thải động vật, tàn dư từ thành phố và công nghiệp.

Sinh khối có thể là sinh khối thích hợp bất kỳ ở dạng thích hợp bất kỳ.

Một sinh khối cụ thể được các tác giả sáng chế quan tâm là các họ dương xỉ thủy sinh bao gồm chi *Azolla* bao gồm *Azolla pinnata*, với tên chung là Red *Azolla* và Ferny *Azolla*. *Azolla* là loài dương xỉ nhỏ, bản địa, nổi - một trong sáu loài dương xỉ nổi tự do. Nó phát triển rộng từ 1cm đến 2,5cm và màu xanh tươi. Màu của nó thay đổi thành màu đỏ đậm khi tiếp xúc với ánh nắng mặt trời, do đó, tên Red *Azolla*. *Azolla* phát triển trong các dòng nước trong các mảng dày đặc, có thể trông giống như thảm xanh hoặc đỏ. Từ khoảng cách nó có thể bị nhầm lẫn với *Salvinia*, cỏ dại độc hại, hoặc cạnh bã của tảo xanh. *Azolla* là dương xỉ nước ngọt chi phí thấp có thể tạo ra tỷ lệ sinh khối khô cao, tăng gấp đôi tỷ lệ của các cây trồng nhiên liệu sinh học khác như *miscanthus*. Nó cần bốn phần nitơ ít hơn nhiều cây trồng thông thường và hệ thống nuôi trồng thủy sản có thể được xây dựng trên đất cận biên, không sử dụng cho nông nghiệp. *Azolla* cũng cải thiện chất lượng nước, trong khi đồng thời giảm thiểu ô nhiễm qua tích lũy sinh học kim loại nặng.

Sinh khối khác được quan tâm bao gồm nhưng không giới hạn ở cây trồng năng lượng như các loại lúa miến, cỏ khô và *Miscanthus Giganteus* cũng như bã mía. Mùn cưa là sinh khối được quan tâm. Sinh khối có thể được sử dụng làm nguồn duy nhất của chất khử hoặc có thể được trộn.

Sáng chế không bị hạn chế bởi loại năng lượng điện từ cụ thể bất kỳ.

Tập trung gần đây của các tác giả sáng chế là vào dải năng lượng vi sóng của phổ năng lượng điện từ.

Tuy nhiên, năng lượng tần số radio và năng lượng tia x là hai tùy chọn khác trong số khoảng tùy chọn trong phổ năng lượng điện từ được các tác giả sáng chế quan tâm.

Năng lượng điện từ có thể liên tục hoặc xung động.

Năng lượng vi sóng có thể có tần số vi sóng thích hợp bất kỳ, như tần số nằm trong khoảng 300MHz – 300GHz, 300MHz – 30GHz, 300MHz – 3GHz, 400-5800MHz, 900-3500MHz, 915-2450MHz. Tần số vi sóng cụ thể là tần số trong công nghiệp gần đây bằng 2450MHz hoặc 915MHz.

Năng lượng tần số radio có thể có tần số thích hợp bất kỳ, như tần số nằm trong khoảng 1MHz – 10GHz.

Quặng sắt có thể là loại thích hợp bất kỳ, như hematit, goetit và magnetit.

Quy trình có thể bao gồm việc xử lý dòng xuống sản phẩm kim loại trạng thái rắn để tạo thành sản phẩm sử dụng cuối cùng, như sản phẩm thép.

Sáng chế cũng đề xuất thiết bị để khử trực tiếp quặng sắt mà bao gồm buồng tiếp xúc để cho quặng sắt và sinh khối tiếp xúc với năng lượng điện từ dưới điều kiện không có oxy.

Quặng sắt và sinh khối có thể ở dạng bánh, hạt, hoặc các hình dạng sản phẩm thích hợp khác mà chứa hỗn hợp quặng sắt và sinh khối.

Thiết bị có thể bao gồm lò gia nhiệt sơ bộ để gia nhiệt sơ bộ quặng sắt và sinh khối. Thông thường lò này thực hiện gia nhiệt quặng sắt và sinh khối đến nhiệt độ nằm trong khoảng 400-900°C với thời gian định trước và thời gian định trước.

Thiết bị có thể bao gồm hệ thống khử để xử lý quặng sắt tinh và sinh khối và, cụ thể là, gia nhiệt và khử quặng sắt tinh để tạo thành sản phẩm kim loại hóa.

Hệ thống có thể bao gồm buồng phản ứng trong đó quặng sắt tinh được gia nhiệt và khử, nguồn năng lượng điện từ ở dạng năng lượng vi sóng (hoặc năng lượng điện từ thích hợp khác bất kỳ), ống dẫn sóng để chuyển năng lượng vi sóng đến buồng, nguồn khí trơ, như nitơ, hệ thống đường ống thích hợp cung cấp khí trơ cho buồng để

duy trì buồng dưới điều kiện không có oxy trong quá trình xử lý quặng sắt tinh và sinh khối trong buồng, và lối thoát để xả thải và hạt giữ lại bất kỳ được tạo ra trong quá trình xử lý trong buồng.

Khí thải từ buồng gia nhiệt/khử có thể chứa năng lượng hóa học và nhiệt. Năng lượng hóa học có thể chủ yếu ở dạng cacbon monoxit. Năng lượng khí thải có thể có ích khi được:

- (a) đốt cháy trong nhà máy năng lượng để cung cấp điện;
- (b) tách khỏi phần còn lại của khí thải và tái chế qua buồng gia nhiệt/khử để cải thiện hiệu quả quy trình và giảm yêu cầu sinh khối; hoặc
- (c) cung cấp cơ sở có thể chuyển đổi năng lượng thành nhiên liệu sinh học như etanol (ví dụ quy trình LanzaTech™).

Nếu cacbon dioxit được tách khỏi khí thải buồng gia nhiệt/khử, nó có thể được lưu giữ về mặt địa chất vĩnh cửu (còn được biết là bắt và lưu giữ cacbon) mà có thể dẫn đến lượng phát xạ cacbon âm kiểu mạng cho quy trình.

Mô tả văn tắt hình vẽ

Sáng chế còn được mô tả ví dụ chỉ bằng cách tham khảo:

(a) Fig. 1 đến Fig. 13 mà đề cập đến nghiên cứu khả thi liên quan đến sáng chế được mô tả dưới đây và

(b) Fig. 14 là sơ đồ khối theo một phương án của sáng chế, trong đó:

Cụ thể hơn là:

Fig. 1 là đồ thị của đặc tính điện môi nằm trong khoảng nguyên liệu kỹ thuật và chất khoáng ở tần số 2450 MHz ở nhiệt độ 20°C, cùng với nước tại nhiệt độ khác nhau;

Fig. 2 là sơ đồ minh họa phương pháp nhiễu loạn khoang cộng hưởng dùng để đo đặc tính điện môi của nguyên liệu ở nhiệt độ từ 20-1000°C trong nghiên cứu khả thi;

Fig. 3 và Fig. 4 là đồ thị cho bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối ở 2450MHz và 915MHz, ở nhiệt độ nằm trong khoảng từ 20-1000°C thử nghiệm trong nghiên cứu khả thi;

Fig. 5 là đồ thị độ sâu thấm của bánh PBF/sinh khối trộn dưới dạng hàm của phép đo nhiệt độ được thử nghiệm trong nghiên cứu khả thi;

Fig. 6 là đồ thị của đường cong nhiệt độ DSC-dòng nhiệt cho quặng sắt và bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối, trong nitơ, trong khoảng từ 20-1000°C được thử nghiệm trong nghiên cứu khả thi;

Fig. 7 là đồ thị của đường cong dòng nhiệt DSC cho bánh PBF/sinh khối trộn cùng với đường cong TGA tương ứng, thể hiện thay đổi về khối lượng với nhiệt độ trong khoảng từ 20-1200°C, được thử nghiệm trong nghiên cứu khả thi;

Fig. 8 là hình vẽ của hệ thống xử lý vi sóng hoàn toàn được sử dụng trong nghiên cứu khả thi;

Fig. 9 là đồ thị của đường cong khối lượng-nhiệt độ của bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối được xác định sử dụng TGA trong nitơ trong khoảng từ 20-1200°C, được thử nghiệm trong nghiên cứu khả thi;

Fig. 10 là đồ thị của phổ XRD cho mười lần xử lý vi sóng;

Fig. 11 là biểu đồ tỷ lệ của các đỉnh XRD dưới dạng hàm của đầu vào năng lượng vi sóng được thử nghiệm trong nghiên cứu khả thi;

Fig. 12 thể hiện phổ XRD cho hỗn hợp PBF / đường so với hỗn hợp PBF / azolla và mảnh vụn quặng không được xử lý được thử nghiệm trong nghiên cứu khả thi;

Fig. 13 thể hiện phổ XRD cho ba mẫu xử lý đường so với mảnh vụn quặng không được xử lý được thử nghiệm trong nghiên cứu khả thi; và

Fig. 14 là sơ đồ theo một phương án của quy trình và thiết bị để khử trực tiếp quặng sắt ở trạng thái rắn theo sáng chế.

Mô tả chi tiết sáng chế

Theo nghĩa rộng, quy trình theo sáng chế bao gồm việc cho quặng sắt và sinh khối tiếp xúc với năng lượng điện từ với quặng sắt và sinh khối tiếp xúc dưới điều kiện không có oxy, với năng lượng điện từ tạo ra nhiệt trong quặng sắt, và với sinh khối làm chất khử và khử quặng sắt ở rắn trạng thái.

Nghiên cứu khả thi

Nghiên cứu khả thi nêu trên được thực hiện để xác định tính khả thi về mặt kỹ thuật để đạt được quá trình kim loại hóa quặng sắt (dưới dạng sản phẩm quặng sắt tinh trộn Pilbara (PBF) của công ty liên quan của các tác giả sáng chế) trộn với sinh khối azolla sử dụng năng lượng vi sóng làm nguồn gia nhiệt quặng sắt và sinh khối.

Đặc tính điện môi và nhiệt của quặng sắt, sinh khối và bánh hỗn hợp của quặng sắt/sinh khối được phân tích và đánh giá.

Mục tiêu của nghiên cứu như sau:

- Đo đặc tính điện môi của PBF, sinh khối và bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối để định lượng mối quan hệ giữa nhiệt độ (20-1000°C) và hằng số điện môi phức (đặc tính hấp thụ vi sóng) ở tần số dùng trong công nghiệp nằm trong khoảng từ 2450MHz đến 915MHz.

- Đo nhiệt lượng quét vi sai của PBF và bánh trộn trong khoảng từ 20-1000°C để xác định việc chuyển tiếp nguyên liệu chính trong quy trình khử trong nito, xác định mối quan hệ giữa nhiệt độ và việc kim loại hóa và xác định nhiệt độ dự kiến cần để kim loại hóa bánh trộn sử dụng năng lượng vi sóng.

- Phân tích nhiệt lượng của PBF và bánh trộn trong khoảng từ 20-1000°C trong nito để xác định mối quan hệ giữa nhiệt độ và việc giảm khối lượng trong quy trình khử, và xác định khối lượng còn lại dự kiến của bánh trộn được kim loại hóa sử dụng năng lượng vi sóng.

- Thử nghiệm gia nhiệt vi sóng bánh trộn dưới điều kiện không có oxy tại 2,45 GHz để xác định ảnh hưởng của mật độ năng lượng vi sóng (công suất 1 hoặc 2kW), tổng năng lượng áp dụng (lên đến 75 GJ/t sản phẩm) và thời gian xử lý (trong khoảng từ 1 đến 16 phút) đối với việc luyện kim.

- Phân tích XRD bán định lượng của PBF, bánh trộn và tất cả mẫu được xử lý vi sóng để xác định tất cả pha chứa sắt và xác định mối quan hệ giữa điều kiện xử lý vi sóng và mức độ kim loại hóa đạt được.

- Xử lý vi sóng PBF trộn với 35%, 50% và 65% sucroza (theo khối lượng) để xác định ảnh hưởng của loại sinh khối và hàm lượng sinh khối với mức độ luyện kim.

- Đo nhiệt độ bên ngoài của hàng rào xử lý gạch chịu lửa sau xử lý ở năng lượng lớn nhất và đánh giá tổn thất nhiệt từ mẫu đến hàng rào, để xác định độ cân bằng năng

lượng xử lý vi sóng và hiệu suất tiềm năng cho quy trình công nghiệp tối ưu trong đó tổn thất nhiệt được giảm thiểu.

1. *Phân tích nguyên liệu (chương trình làm việc 1)*

Đoạn này trình bày lý thuyết, phương pháp luận và kết quả của sự phân tích của PBF, sinh khối azolla và bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối, được tạo ra để hiểu phản ứng chính của chúng với năng lượng vi sóng trước khi bắt đầu ma trận thử nghiệm trong chương trình làm việc 2.

1.1 *Phân tích điện môi*

1.1.1 *Lý thuyết điện môi*

Khả năng của nguyên liệu hấp thụ và sau đó gia nhiệt do lĩnh vực điện từ áp dụng phụ thuộc vào đặc tính điện và từ tính của nguyên liệu, cụ thể là hằng số điện môi (ϵ), tính thấm (μ), và độ dẫn điện (σ). Với phần lớn các nguyên liệu, phản ứng chiếm ưu thế là với điện trường; đặc tính điện môi là thước đo của phản ứng này. Đặc tính điện môi của nguyên liệu đồng nhất được mô tả bởi hằng số điện môi phức như thể hiện trong phương trình 1:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad \text{Phương trình 1}$$

Trong đó ϵ^* = hằng số điện môi phức; ϵ' = hằng số điện môi; ϵ'' = hệ số hao tán điện môi; $j = \sqrt{-1}$.

Hằng số điện môi (phần thực của hằng số điện môi), ϵ' , đo khả năng nguyên liệu được phân cực bằng điện trường bên ngoài; tức là khả năng nạp điện và lưỡng cực được phân cực. Hệ số hao tán điện môi (phần ảo của hằng số điện môi), ϵ'' , đo khả năng nguyên liệu tiêu tán năng lượng lưu giữ như nhiệt. Đặc tính điện môi của nguyên liệu có thể thay đổi theo chế phẩm, hàm lượng nước, nhiệt độ, tần số và tỷ trọng. Fig. 1 vẽ đồ thị đặc tính điện môi ở 2450 MHz, cho khoảng nguyên liệu kỹ thuật và chất khoáng ở 20°C, cùng với nước ở các nhiệt độ khác nhau.

1.1.2 *Đo hằng số điện môi phức*

Phép đo đặc tính điện môi được thực hiện trên các hợp phần PBF và sinh khối azolla và cả bánh trộn. Quan hệ của chúng với nhiệt độ lên đến 1000°C được định lượng. Hiểu biết này đề xuất việc hiểu cơ chế của quy trình và cũng thông báo có tính

quyết định cả phương pháp luận thử nghiệm cho WP2 và thảo luận khoảng tiềm năng để phát triển hệ thống quy mô công nghiệp. Các phép đo này được thực hiện ở tần số vi sóng sử dụng trong công nghiệp bằng 2450 và 915 MHz.

Phương pháp nhiễu loạn hốc cộng hưởng (xem Fig. 2) được sử dụng để đo đặc tính điện môi của nguyên liệu từ 20-1000°C. Hốc cộng hưởng bao gồm hốc đồng hình trụ nối với thiết bị phân tích mạng vectơ, đo nhịp tần số và thay đổi về hệ số chất lượng tương ứng với hốc gây cộng hưởng rộng khi mẫu được đưa vào. Mẫu nghiền mịn (<100µm) được nạp vào ống thạch anh, (len gồm dưới mẫu và mở ở trên cùng để giảm thiểu không khí xâm nhập) và được diễn ra trong lò gia nhiệt quy ước trên hốc cho đến khi đạt được điểm thiết đặt nhiệt độ. Ống sau đó được chuyển vào hốc, và đặc tính được xác định ở tần số vi sóng sử dụng trong công nghiệp bằng 2450MHz và 915MHz. Cần lưu ý rằng vì không thể tiến hành an toàn phân tích điện môi ở điều kiện không có oxy (tức là trong nitơ) khi hốc và lò đều mở cho phòng thí nghiệm.

Kết quả của phép đo đặc tính điện môi của PBF, sinh khối azolla và bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối ở 2450MHz và 915MHz, trong khoảng từ 20-1000°C, được vẽ đồ thị. Fig. 3 và Fig. 4 là biểu đồ cho bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối ở 2450MHz và 915MHz, trong khoảng từ 20-1000°C. Trong mỗi biểu đồ, nhiệt độ được vẽ đồ thị trên trục hoành, hằng số điện môi trên trục dọc bên trái (đường màu xanh) và hao tán điện môi trên trục dọc bên phải (đường màu đỏ). Phép đo ở 2450 MHz đề cập đến tần số thường được sử dụng cho thử nghiệm quy mô phòng thí nghiệm, trong khi phép đo ở 915 MHz đề cập đến tần số gần đây được sử dụng cho phần lớn các hệ thống xử lý trong công nghiệp ở mức năng lượng hơn 50kW.

PBF được phát hiện có đặc tính điện môi phù hợp tương ứng trong khoảng từ 20-600°C. Điểm uốn nhẹ ở khoảng 100°C và 300-400°C do việc loại bỏ nước tự do và nhóm goetit hydroxyl tương ứng. Trên 600°C, PBF tăng đặc tính điện môi, quy cho thay đổi pha oxit sắt phụ thuộc nhiệt độ.

Sinh khối azolla được phát hiện hấp thụ mạnh năng lượng vi sóng dưới khoảng 150°C và trên 500°C. Đặc tính điện môi giảm trong khoảng từ 100-200°C do loại bỏ nước tự do. Tăng trên 500°C do nhiệt phân sinh khối, giải phóng các chất bay hơi để lại than và tro (do dấu vết không hoàn hảo trên ống không chắc là điều kiện không có oxy hoàn toàn sẽ đạt được).

Không đáng ngạc nhiên đưa ra kết quả nêu trên cho PBF và sinh khối riêng biệt, kết quả đo cho bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối biểu hiện đặc điểm của cả quặng sắt và sinh khối. Điểm uốn trong khoảng từ 100-200°C và trong khoảng từ 300-400°C do loại bỏ nước tự do khỏi cả quặng sắt và sinh khối, và loại bỏ khỏi các nhóm goetit hydroxyl. Tăng trong khoảng từ 500-700°C do sự đốt cháy của sinh khối, vì một lần nữa, ống mở không cho phép không khí khử đầy đủ. Giảm trên 700°C do sự khử oxit sắt tăng dần lên.

Nhìn chung, cả PBF và sinh khối azolla, và bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối hấp thụ mạnh năng lượng vi sóng qua toàn bộ khoảng nhiệt độ đo, ở cả 2450 MHz và 915 MHz, cụ thể là dưới 200°C và trên 700°C.

1.1.3 Độ sâu thấm

Khi sóng năng lượng điện từ lan truyền trong nguyên liệu điện môi, biên độ của nó giảm do sự hấp thụ năng lượng trong nguyên liệu. Cường độ trường và công suất giảm theo hàm mũ với độ sâu từ bề mặt nguyên liệu. Dp, độ sâu thấm của năng lượng điện từ vào nguyên liệu, được định nghĩa là độ sâu mà ở đó thông lượng công suất giảm xuống $1/e$ (0,368) giá trị bề mặt của nó,

Độ sâu thấm ở nguyên liệu là chỉ báo tốt của tiềm năng đạt được sự gia nhiệt đồng nhất trong nguyên liệu. Độ sâu thấm tỷ lệ với bước sóng; ở tần số cao hơn việc gia nhiệt bề mặt có nhiều khả năng, trong khi ở tần số thấp gia nhiệt thể tích dễ dàng đạt được hơn. Độ sâu thấm quan trọng khi cần gia nhiệt thể tích nguyên liệu. Cần lưu ý rằng một số quá trình gia nhiệt xảy ra ngoài độ sâu thấm xác định, vì điện trường không đạt đến 0 cho đến một thời điểm sau độ sâu thấm. Việc lựa chọn tần số phù hợp quan trọng để đảm bảo rằng kích thước của nguyên liệu không lớn hơn độ sâu thấm nhiều; do đó, nó là thông số thiết kế chính khi xem xét thiết kế và tăng quy mô quy trình.

Độ sâu thấm của bánh PBF/sinh khối trộn được tính toán và được vẽ đồ thị trên Fig. 5 dưới dạng hàm của nhiệt độ đo. Bánh than trộn tăng độ sâu thấm trong khoảng từ 100 đến 200°C, do loại bỏ nước tự do. Độ sâu thấm sau đó giảm khoảng 300°C, có uốn nhẹ khoảng 350°C do loại bỏ các nhóm hydroxyl. Trên 500°C, độ sâu thấm còn lại hằng số tương ứng. Độ sâu thấm cao ở 915 MHz so với 2450 MHz (khoảng 5cm và 2cm tương ứng, trên 500°C). Nhìn chung, độ sâu thấm tương tự ở quy mô với kích

thước của bánh trộn. Điều này cho thấy rằng từ quan điểm gia nhiệt vi sóng, sẽ có thể đạt được việc gia nhiệt thể tích lượng nạp liên tục dày 5-10cm tại 915 MHz.

1.2 Phân tích nhiệt

Phân tích nhiệt lượng (TGA) và đo nhiệt lượng quét vi sai (DSC) được thực hiện trên cả PBF và bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối trong điều kiện không có oxy (trong nitơ) và quan hệ của chúng với nhiệt độ lên đến 1000°C được định lượng.

DSC cho phép ánh xạ đặc tính nhiệt và xác định ‘sự kiện nhiệt’ trong quy trình gia nhiệt.

TGA đề xuất việc hiểu cơ chế của khối lượng bánh nên thay đổi như thế nào trong quy trình xử lý vi sóng. Kết hợp dữ liệu đặc tính nhiệt cho phép dự đoán ‘khoảng kim loại hóa’ trên cơ sở hao hụt khối lượng của mẫu đã xử lý vi sóng, như được đo sau xử lý.

Fig. 6 vẽ đồ thị đường cong nhiệt độ DSC-dòng nhiệt cho cả quặng sắt và bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối, trong nitơ, trong khoảng từ 20-1000°C. Từ các đường cong này, ba sự kiện nhiệt có thể được xác định xảy ra trong việc khử trực tiếp quặng sắt với sự có mặt của sinh khối dưới điều kiện DSC. Đầu tiên là loại bỏ nước tự do vừa trên 100°C khối phần sinh khối của bánh. Sự kiện nhiệt thứ hai là loại bỏ nhóm goetit hydroxyl và chuyển đổi sang hematit; đỉnh này được thay đổi nhẹ trong mẫu bánh. Điều này có thể là do sản phẩm nhiệt phân từ sinh khối cho phép việc chuyển đổi goetit sang hematit xảy ra ở mức nhiệt độ thấp hơn. Sự kiện nhiệt cuối cùng được xác định là sự khởi đầu của kim loại hóa tại khoảng 850°C trong mẫu bánh.

Trên Fig. 7, đường cong dòng nhiệt DSC cho bánh PBF/sinh khối trộn được vẽ đồ thị cùng với đường cong TGA tương ứng, thể hiện thay đổi về khối lượng với nhiệt độ trong khoảng từ 20-1200°C (khoảng đo nhiệt độ cho bánh được mở rộng từ 1000°C để xác định điểm cuối kim loại hóa). Dữ liệu cho thấy điểm bắt đầu kim loại hóa khoảng 850°C và điểm cuối ở khoảng 950°C, trong điều kiện DSC.

Tại điểm cuối kim loại hóa, sự thay đổi khối lượng với nhiệt độ của bánh bắt đầu bình ổn. Khối lượng còn lại của mẫu DSC-TGA ở nhiệt độ này bằng 57%. Điều này cho thấy rằng nếu điều kiện xử lý vi sóng giống như điều kiện cho phân tích, mẫu đã xử

lý cân nặng dưới 57% khối lượng ban đầu của chúng nên được kim loại hóa, với ít hoặc không có sắt oxit có mặt.

1.3 Tóm tắt gói công việc 1

- Đặc tính điện môi của PBF, sinh khối và bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối được đo sử dụng phương pháp nhiễu loạn hốc, trong khoảng từ 20-1000°C ở tần số sử dụng trong công nghiệp bằng 2450MHz và 915MHz. Kết quả chỉ ra rằng tất cả nguyên liệu biểu hiện đặc tính hấp thụ vi sóng mạnh qua toàn bộ khoảng được đo. Trên 500°C, độ sâu thấm là hằng số tương ứng (~2cm ở 2450MHz và ~5cm ở 915MHz). Điều này chỉ ra rằng ở 915 MHz, sẽ có thể đạt được việc gia nhiệt thể tích lượng nạp liên tục dày 5-10cm, mặc dù một số quá trình gia nhiệt xảy ra ngoài độ sâu thấm được xác định. Kết quả này cho thấy rằng tất cả nguyên liệu nên hấp thụ năng lượng vi sóng mạnh trong tất cả các thí nghiệm kim loại hóa được đề xuất trong gói công việc 2.

- Đo nhiệt lượng quét vi sai của PBF và bánh hỗn hợp của PBF/sinh khối trong khoảng từ 20-1000°C được sử dụng để xác định chuyển tiếp nguyên liệu chính trong quy trình khử trong nitơ, xác định quan hệ giữa nhiệt độ và kim loại hóa và xác định nhiệt độ dự kiến cần để kim loại hóa bánh trộn sử dụng năng lượng vi sóng. Khu vực quan trọng cho kim loại hóa bánh được xác định là trong khoảng từ 850-950°C.

- Phân tích nhiệt lượng của PBF và bánh trộn trong khoảng từ 20-1000°C trong nitơ được tiến hành để xác định quan hệ giữa nhiệt độ và hao tổn khối lượng trong quy trình khử, và xác định khối lượng còn lại dự kiến của bánh trộn được kim loại hóa sử dụng năng lượng vi sóng. Khối lượng đề xuất của mẫu kim loại hóa ở 950°C bằng ~57% khối lượng của nó trước khi khử. Điều này cho thấy rằng nếu DSC-TGA và xử lý vi sóng cung cấp môi trường khử tương đương, mẫu được xử lý trong chương trình làm việc 2 có khối lượng ~57% nên biểu hiện kim loại hóa.

2. Thử nghiệm bằng chứng khái niệm vi sóng (chương trình làm việc 2)

Đoạn này trình bày phương pháp luận thử nghiệm và kết quả của thử nghiệm gia nhiệt vi sóng để xác định tính khả thi kỹ thuật để đạt được sự kim loại hóa hoàn toàn qua gia nhiệt bánh trộn PBF/azolla sử dụng năng lượng vi sóng trong môi trường không có oxy.

Các thí nghiệm được tiến hành định lượng quan hệ giữa năng lượng đầu vào, mật độ năng lượng, thời gian xử lý và mức độ kim loại hóa sản phẩm. Kết quả của mỗi xử lý vi sóng khác nhau được đánh giá qua nhiễu xạ tia X (XRD) bán định lượng để xác định mức độ kim loại hóa mà đạt được tương ứng với bánh chưa xử lý.

2.1 Phương pháp luận thử nghiệm và hệ thống xử lý

Phạm vi phòng thí nghiệm và hệ thống vi sóng đặt làm riêng có thể cho bằng chứng của khái niệm xử lý vi sóng. Phép đo đặc tính điện môi được tiến hành trong chương trình làm việc 1 cho thấy hỗn hợp quặng sắt/sinh khối có đặc tính hấp thụ vi sóng mạnh.

Hệ thống đa chế độ quy mô phòng thí nghiệm (vùng điện trường cao và thấp qua hốc) được chọn, với kích thước 540x425x425mm. Việc xử lý vi sóng được tiến hành tại tần số phân bố bằng 2450 MHz phù hợp nhất với thử nghiệm ở phòng thí nghiệm quy mô nhỏ.

Đối với mỗi xử lý được thực hiện, mẫu khoảng 27g (~4 bánh) nguyên liệu được cân và đặt vào hàng rào gạch chịu lửa mulit bên trong hốc đa chế độ. Nguyên liệu này về cơ bản là trong suốt với năng lượng vi sóng so với bánh và do đó, được giả định rằng tất cả năng lượng áp dụng được hấp thụ bởi mẫu mặc dù trong thực tế sẽ có tiêu tan năng lượng vào pha này cả qua gia nhiệt vi sóng yếu và truyền nhiệt từ bánh. Hàng rào này được sử dụng để giảm tổn thất nhiệt từ bề mặt mẫu trong khi xử lý.

Hệ thống ngược với nitơ ở tốc độ chảy bằng 25 lít/phút trước và trong khi xử lý vi sóng để tạo ra điều kiện không có oxy.

Mẫu sau đó được xử lý ở công suất và thời gian xử lý được chọn.

Sự chiết không khí được sử dụng trong khi xử lý vi sóng để loại bỏ khí bất kỳ và hạt được tạo ra trong khi nhiệt phân phân đoạn sinh khối của bánh.

Trong khi xử lý, năng lượng được hấp thụ bởi lượng nạp được theo dõi và điều khiển sử dụng bộ chỉnh tự động và PC.

Hình vẽ của toàn bộ hệ thống xử lý vi sóng được thể hiện trên Fig. 8.

Đối với liều lượng vi sóng lớn nhất, nhiệt độ mặt ngoài của gạch chịu lửa được đo ngay sau khi xử lý vi sóng sử dụng súng hồng ngoại, cho phép sự tiêu tán nhiệt vào gạch chịu lửa và vì vậy độ cân bằng năng lượng được đánh giá.

Khi nguyên liệu nguội, nó được tái sinh từ hàng rào gạch chịu lửa và được cân lại để xác định tổn hao khối lượng trong khi xử lý, sau đó được nghiền thành bột mịn để phân tích XRD.

2.2 Kết quả xử lý vi sóng

Để xác định ảnh hưởng của năng lượng đầu vào và mật độ năng lượng/thời gian xử lý với mức độ kim loại hóa, ma trận của 11 quá trình xử lý được hoàn thành, như được thể hiện ở bảng 1 dưới đây.

Bảng 1 Ma trận kiểm tra nghiên cứu khả thi

Công suất áp dụng (kW)	Thời gian xử lý (phút)	Liều thực (kWh/t bánh)	Năng lượng toàn phần GJ/t sản phẩm
2	1	1081	5
2	2	2132	11
2	4	4568	30
2	6	6164	48
2	8	8373	74
2	10	11296	*
1	2	1319	6
1	4	2365	12
1	8	5345	33
1	12	6643	48
1	16	9531	73

**Mẫu này được nóng chảy và thấm hàng rào gạch chịu lửa mulit, với các xử lý lại sản sinh kết quả tương tự. Do đó không thể thu hồi mẫu sạch cho phân tích XRD so sánh và đánh giá độ cân bằng năng lượng với các quá trình xử lý khác.*

Công suất áp dụng được thiết đặt ở 1kW hoặc 2kW, và thời gian xử lý trong khoảng từ 1 đến 16 phút được sử dụng. Dụng cụ chỉnh tự động được sử dụng để giảm thiểu năng lượng phản xạ và đảm bảo > 95% công suất áp dụng được hấp thụ. Các quá

trình xử lý này thu được đầu vào năng lượng vi sóng trong khoảng từ 1000-11300 kWh/t bánh, tương đương với trong khoảng từ 5 đến 74 GJ/t sản phẩm (trên cơ sở khối lượng nguyên liệu đã xử lý được tái sinh).

Việc kiểm tra hình ảnh mẫu bánh chưa xử lý và đã xử lý vi sóng sau khi nghiền cho thấy sự thay đổi màu tăng dần lên rõ ràng với tăng đầu vào năng lượng, do mức độ khử chất khoáng sắt từ hematit đỏ qua sắt kim loại xám.

Fig. 9 vẽ đồ thị đường cong khối lượng-nhiệt độ của bánh PBF/sinh khối trộn như được xác định sử dụng TGA trong nitơ trong khoảng từ 20-1200°C.

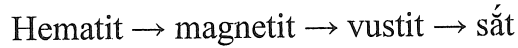
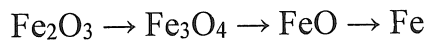
Từ phân tích DSC của bánh than trộn được tiến hành trong gói làm việc 1, điểm cuối dự kiến của quy trình khử (dưới điều kiện DSC) bằng khoảng 950°C. Tại nhiệt độ này, TGA có khối lượng mẫu dư bằng 57%. Bằng cách vẽ khối lượng dư cho mẫu đã xử lý vi sóng đối với đầu vào năng lượng vi sóng trên Fig. 9, và điều chỉnh đường cong xử lý cho công suất áp dụng 1kW và 2kW, có thể xác định khoảng kim loại hóa dự đoán, trên cơ sở khối lượng dư. Dự đoán này cho rằng tất cả khối lượng dư từ mẫu đã xử lý vi sóng được tái sinh và điều kiện khử cho DSC-TGA và xử lý vi sóng tương tự.

Trên cơ sở này, bốn mẫu đã xử lý vi sóng (nổi bật trong khu vực màu vàng của Fig. 9) cho thấy sự kim loại hóa đáng kể hoặc hoàn toàn. Đường cong cũng đề nghị rằng liều lượng năng lượng vi sóng bằng ~38 GJ/t của sản phẩm trong hệ thống không được tối ưu hóa sử dụng sẽ đủ để đạt được sự kim loại hóa trên cơ sở khối lượng dư bằng 57%.

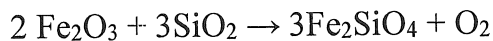
Fig. 10 vẽ đồ thị phổ XRD cho mười quá trình xử lý vi sóng mà khối lượng mẫu dư thu hồi được, cùng với phổ XRD cho bánh chưa xử lý. Nhãn biểu diễn đỉnh lớn nhất cho mỗi chất khoáng sắt có mặt trong mẫu (một số đỉnh con không được nhận dạng bằng phần mềm nhận dạng khoáng)

Kết quả XRD thể hiện sự tăng rõ ràng về mức độ biến đổi từ hematit sang sắt kim loại với việc tăng đầu vào năng lượng vi sóng/thời gian xử lý. Trong số bốn mẫu được nhận dạng trên Fig. 10 khả năng có mức độ kim loại hóa cao, ba mẫu có đỉnh đáng kể cho sắt kim loại, cụ thể là 1kW12 phút, 1kW 16 phút và 2kW 8 phút.

Phổ cho năng lượng xử lý chất trung gian cũng tiết lộ sự hiện diện của hai sản phẩm khử oxit sắt khác, magnetit và vustit. Sự hiện diện của chất trung gian này gợi ý con đường kim loại hóa sau dưới điều kiện không có oxy:



Phổ XRD cho mẫu với mức độ kim loại hóa cao cũng tiết lộ phản ứng phụ, xảy ra giữa thạch anh và magnetit ở nhiệt độ cao, tạo ra fayalit (olivin) và oxy bổ sung:



Từ thí nghiệm tiến hành trong nghiên cứu khả thi này, không thể xác định liệu việc tạo ra chất trung gian và sản phẩm phụ được thúc đẩy bằng đầu vào năng lượng/thời gian xử lý hoặc bằng mức độ oxy có mặt trong khi xử lý vi sóng hay không.

Do hàm lượng vô định hình của mẫu thu được từ hàm lượng sinh khối cao, không thể đề xuất kết quả định lượng đối với lượng sắt và oxit sắt có mặt trong mỗi mẫu. Mặc dù phản ứng khử tiến hành từ hematit qua sắt, có thể ước tính mức độ kim loại hóa. Đối với mỗi mẫu, khu vực dưới đỉnh sắt chính ($44,2 < 2\theta < 45,0$) và đỉnh chính hematit ($32,3 < 2\theta < 33,7$) được xác định. Fig. 11 vẽ đồ thị tỷ lệ của đỉnh này dưới dạng hàm của đầu vào năng lượng vi sóng.

Tại năng lượng xử lý dưới 12 GJ/t sản phẩm (tương đương với khoảng 2400 kWh/t bánh trộn) sự tăng mật độ năng lượng làm tăng mức độ kim loại hóa. Fig. 11 thể hiện hao tổn khối lượng cao hơn ở đầu vào năng lượng tương đương ở 2kW so với công suất áp dụng 1kW. Điều này có thể được quy cho tốc độ gia nhiệt nhanh hơn, đáng kể hơn ở thời gian xử lý ngắn hơn. Hiệu quả này được xác thực bằng phổ XRD trên Fig. 10, thể hiện sự hiện diện của goetit trong mẫu 1kW 4 phút, nhưng không phải trong mẫu 2kW 4 phút, gợi ý rằng nhiệt độ dihydroxyl hóa goetit (trong khoảng từ 300 đến 400°C) không được vượt quá ở mức năng lượng thấp hơn, mặc dù năng lượng xử lý giống nhau.

2.4 Kết quả xử lý đường bổ sung

Quá trình xử lý bổ sung được thực hiện, thay thế sinh khối bằng đường cát dạng hạt trắng, tức là sucroza, C₁₂H₂₂O₁₁.

12 gam sucroza được trộn với 18 gam PBF, cùng với 5ml nước, tạo ra bột nhão dày. Mẫu được xử lý sử dụng cùng phương pháp với bánh, ở 2kW trong 8 phút.

Fig. 12 thể hiện phổ XRD cho hỗn hợp PBF-đường so với hỗn hợp PBF/azolla và mảnh vụn quặng không được xử lý. Mẫu đường biểu hiện mức độ kim loại hóa thấp hơn so với azolla ở đầu vào năng lượng vi sóng tương đương. XRD cũng thể hiện rằng tỷ lệ cao hơn của oxit sắt trung gian, magnetit và vustit, được tạo thành khi sử dụng đường. Việc này không được nghĩ là do hao tán đường vào gạch chịu lửa vì nhựa gắn nhiệt độ cao được sử dụng để giảm tính thấm của hàng rào xử lý.

Quan sát chính ở đây là làm thay đổi loại sinh khối được sử dụng trong quy trình khử trực tiếp đề xuất cơ hội kiểm soát tỷ lệ của oxit trung gian được tạo thành.

Hai quá trình xử lý bổ sung sử dụng đường cũng được tiến hành, ở hàm lượng đường 50% và 70% theo khối lượng.

Fig. 13 thể hiện phổ XRD cho ba quá trình xử lý đường so với mảnh vụn quặng không được xử lý. Mẫu hàm lượng đường cao hơn biểu hiện mức độ kim loại hóa cao hơn với mức độ oxit sắt trung gian thấp hơn còn lại. Điều này cho thấy rằng tỷ lệ khí khử có mặt cao hơn dẫn đến kim loại hóa tốt hơn.

2.5 Độ cân bằng năng lượng

Ước lượng đầu vào năng lượng vi sóng nhận biết được cho thấy rằng việc kim loại hóa quặng sắt trộn với sinh khối có thể đạt được ở đầu vào năng lượng vi sóng thấp hơn đáng kể tổng đầu vào được nêu và tiềm năng cùng thứ tự với năng lượng DRI nhận biết được được sử dụng trong quy trình DRI thương mại thực hiện tốt nhất (~ 2 GJ/tấn cho hệ thống trên cơ sở khí), ngay cả ở quy mô phòng thí nghiệm trong hệ thống không được tối ưu hóa.

Cụ thể hơn là, độ cân bằng năng lượng với ước lượng cơ bản về tổn hao nhiệt trong khi xử lý vi sóng chỉ báo rằng việc khử trực tiếp quặng sắt sử dụng gia nhiệt vi sóng ở quy mô theo mẻ nhỏ đạt được ở đầu vào năng lượng bằng 1,6 GJ/t sản phẩm. Không đánh giá tổn hao nhiệt điều này tương đương với khoảng 32 GJ/t lượng nạp bánh trộn, hoặc 74 GJ/t sản phẩm.

Nên có thể giảm giá trị này đáng kể trong hệ thống trong công nghiệp tối ưu trong đó giảm thiểu tổn hao nhiệt.

Kinh nghiệm về tăng quy mô chỉ ra rằng đầu vào năng lượng càng cao hơn đáng kể, thường là một số đơn đặt hàng lớn hơn, cần trong hệ thống quy mô phòng thí nghiệm theo mẻ chưa tối ưu nhỏ so với vận hành quy trình liên tục trong công nghiệp tối ưu được thiết kế tốt.

2.6 Tóm tắt gói công việc 2

- Quá trình xử lý vi sóng quy mô phòng thí nghiệm ở 2450 MHz sử dụng hệ thống không tối ưu và phân tích XRD bán định lượng tiếp theo, chứng tỏ rằng mức độ kim loại hóa cao có thể đạt được sử dụng năng lượng vi sóng. Phân tích XRD của bánh của hàm lượng sinh khối 35% và 40% (theo khối lượng) được xử lý sử dụng lò thông thường đề nghị tối ưu hóa loại sinh khối và lượng có thể tăng cường quy trình khử bằng cách kiểm soát môi trường khử và phản ứng kèm theo của sắt trong môi trường đó.

- Xu hướng này cũng quan sát được ở phổ XRD cho PBF trộn với hàm lượng đường 35%, 50% và 70%, với lượng nạp đường cao hơn dẫn đến kim loại hóa hoàn thiện hơn và giảm tỷ lệ oxit sắt trung gian ở đầu vào năng lượng vi sóng khối tương đương.

3. Kết luận tạo ra gói công việc 1 và 2

Nghiên cứu khả thi cho thấy rằng có thể đạt được kim loại hóa quặng sắt trộn với sinh khối, sử dụng năng lượng vi sóng làm nguồn nhiệt. Đặc tính điện môi đo được thể hiện rằng sinh khối azolla PBF (quặng sắt tinh) và bánh trộn tất cả tương tác mạnh với năng lượng vi sóng ở tần số sử dụng trong công nghiệp bằng 2450 MHz và 915 MHz. Độ sâu thâm vi sóng đạt được bằng 5cm ở 915 MHz trên 500°C xác minh rằng từ phối cảnh gia nhiệt vi sóng sẽ có thể đạt được gia nhiệt thể tích của lượng nạp liên tục dày 5-10cm (mặc dù một vài quá trình gia nhiệt đã xảy ra ngoài độ sâu thâm được xác định). Không có tác dụng rõ ràng của mật độ năng lượng (trong khoảng từ 1kW đến 2kW) với mức độ kim loại hóa, ở nhiệt độ trên 500°C và 30 GJ/t sản phẩm đầu vào năng lượng vi sóng. Tuy nhiên khả năng cung cấp gia nhiệt khối cho nguyên liệu tạo ra cơ hội khắc phục hạn chế truyền nhiệt. Điều này có thể dẫn đến tốc độ gia nhiệt nhanh hơn và thời gian cư trú ngắn hơn, với kích cỡ nhà máy thu được thấp hơn, sử dụng trực tiếp mảnh vụn thiêu kết, CAPEX giảm và kiểm soát quy trình lớn hơn dưới dạng lợi thế có thể. Quá trình tạo ra không cố định oxit sắt trung gian, (magnetit và vustit) và sản phẩm phụ của phản ứng (fayalit) cho các lượng nạp sinh khối khác nhau chỉ báo rằng

có cơ hội để tối ưu hóa quy trình khử và kim loại hóa bằng cách thay đổi hàm lượng sinh khối và kiểm soát môi trường khử, dẫn tới kim loại hóa ở đầu vào năng lượng vi sóng thấp hơn. Cuối cùng, độ cân bằng năng lượng đánh giá tổn hao nhiệt trong thử nghiệm khả thi trong hệ thống không tối ưu gần bằng 90%. Kim loại hóa ở đầu vào năng lượng MW bằng ~ 2 GJ/t sản phẩm do đó có thể đạt được trong quy trình tối ưu trong công nghiệp giảm thiểu tổn hao nhiệt.

Fig. 14 - Sơ đồ khối theo một phương án

Bằng cách tham khảo sơ đồ khối của Fig. 14, theo một phương án theo sáng chế, bánh của hỗn hợp của tỷ lệ được chọn của quặng sắt tinh và sinh khối được cung cấp dưới dạng nguyên liệu nạp cho lò gia nhiệt sơ bộ 3 và được gia nhiệt sơ bộ đến nhiệt độ nằm trong khoảng 400-600°C trong thời gian định trước.

Lò gia nhiệt sơ bộ 3 được thiết kế để vận hành trên cơ sở theo mẻ.

Bánh được gia nhiệt sơ bộ sau đó được truyền đến hệ thống khử 5 và quặng sắt tinh được gia nhiệt và khử trong hệ thống 5.

Hệ thống 5 cũng được thiết kế để vận hành trên cơ sở theo mẻ.

Hệ thống 5 bao gồm buồng cho bánh, nguồn năng lượng vi sóng, ống dẫn sóng để chuyển năng lượng điện từ ở dạng năng lượng vi sóng ở 2450 MHz hoặc tần số thích hợp khác đến buồng, nguồn khí trơ, như nitơ, hệ thống đường ống thích hợp để cung cấp khí trơ cho buồng để duy trì buồng trong điều kiện không có oxy trong khi xử lý bánh trong buồng, và lối thoát khí xả và bất kỳ hạt còn lại mà được tạo ra trong khi xử lý trong buồng.

Trong lúc sử dụng, trong khi buồng được duy trì trong điều kiện không có oxy, năng lượng vi sóng gia nhiệt quặng sắt tinh và sinh khối và tạo ra nhiệt trong cả hai thành phần của bánh, với kết quả khử quặng sắt tinh ở trạng thái rắn qua sinh khối trong bánh để tạo thành sản phẩm kim loại hóa trạng thái rắn.

Quy trình bao gồm hệ thống điều khiển để kiểm soát điều kiện vận hành sao cho quặng sắt được gia nhiệt đến nhiệt độ được chọn trong thời gian cư trú được chọn tại nhiệt độ. Trong trường hợp hematit, quy trình bao gồm việc kiểm soát điều kiện vận hành sao cho hematit được gia nhiệt đến nhiệt độ nằm trong khoảng 800-1100°C để kim loại hóa hematit.

Sản phẩm kim loại hóa trạng thái rắn có thể được lưu giữ và vận chuyển đến các nhà máy khác để được xử lý khi cần để tạo ra thép sử dụng cuối hoặc các sản phẩm khác.

Khi phương án được mô tả liên quan đến Fig. 14 được mô tả là quy trình theo mẻ, có thể dễ dàng được đánh giá cao rằng sáng chế không bị giới hạn quá và có thể được vận hành dưới dạng quy trình liên tục ở cả hai bước gia nhiệt sơ bộ và khử.

Ngoài ra, khi phương án được mô tả liên quan đến Fig. 14 được mô tả là vận hành với năng lượng vi sóng, có thể dễ dàng được đánh giá cao rằng sáng chế không bị giới hạn quá và có thể được vận hành với năng lượng điện từ thích hợp bất kỳ.

Yêu cầu bảo hộ

1. Quy trình khử trực tiếp liên tục quặng sắt ở trạng thái rắn bao gồm: vận chuyển bánh của mảnh quặng sắt và sinh khối qua buồng gia nhiệt sơ bộ và gia nhiệt sơ bộ quặng sắt và sinh khối đến nhiệt độ ít nhất là 400°C khi quặng sắt và sinh khối di chuyển qua buồng này; và vận chuyển bánh được gia nhiệt sơ bộ qua buồng gia nhiệt mà có môi trường không có oxy và cho quặng sắt và sinh khối trong bánh tiếp xúc với năng lượng điện từ ở dạng năng lượng vi sóng trong điều kiện không có oxy và tạo ra nhiệt trong quặng sắt, và sinh khối làm chất khử và khử quặng sắt ở trạng thái rắn, khi bánh di chuyển qua buồng này.
2. Quy trình theo điểm 1, trong đó quy trình bao gồm năng lượng vi sóng tạo ra nhiệt trong sinh khối.
3. Quy trình theo điểm 1 hoặc 2, trong đó quy trình bao gồm việc kiểm soát điều kiện vận hành quy trình sao cho quặng sắt được gia nhiệt đến nhiệt độ nằm trong khoảng mà ở đó kim loại hóa quặng sắt.
4. Quy trình theo điểm 3, trong đó quy trình bao gồm, đối với hematit, việc kiểm soát điều kiện vận hành quy trình sao cho quặng sắt được gia nhiệt đến nhiệt độ nằm trong khoảng 800-950°C để kim loại hóa hematit.
5. Quy trình theo điểm 3, trong đó quy trình bao gồm việc kiểm soát điều kiện vận hành quy trình sao cho quặng sắt được khử đến mức độ cần kim loại hóa và tạo ra sản phẩm sắt kim loại trạng thái rắn.
6. Quy trình theo điểm 1, trong đó quy trình bao gồm việc gia nhiệt sơ bộ quặng sắt và sinh khối đến nhiệt độ nằm trong khoảng 400-900°C.
7. Quy trình theo điểm 1, trong đó bánh có kích thước lớn nhất là 1-10cm.
8. Quy trình theo điểm 7, trong đó kích thước lớn nhất là 2-10cm.
9. Quy trình theo điểm 7, trong đó kích thước lớn nhất là 2-6cm.
10. Quy trình theo điểm 1, trong đó bánh thường là hình hộp.
11. Quy trình theo điểm 1, trong đó quặng sắt bao gồm hematit hoặc goetit.
12. Thiết bị khử trực tiếp quặng sắt ở trạng thái rắn, thiết bị này bao gồm: lò gia nhiệt sơ bộ để gia nhiệt sơ bộ mảnh quặng sắt và sinh khối trong bánh của các nguyên

liệu này đến nhiệt độ nằm trong khoảng là 400-900°C; và hệ thống khử bánh từ lò gia nhiệt sơ bộ này, hệ thống khử này bao gồm buồng phản ứng, nguồn năng lượng điện từ ở dạng năng lượng vi sóng, ống dẫn sóng để chuyển năng lượng vi sóng đến buồng để gia nhiệt và khử quặng sắt trong bánh từ lò gia nhiệt sơ bộ, với sinh khối làm chất khử, nguồn khí tro, hệ thống đường ống để cung cấp khí tro này cho buồng để duy trì buồng này trong điều kiện không có oxy, và đầu ra để xả khí thải và bất kỳ hạt nào được giữ lại được tạo ra trong buồng.

ĐẶC TÍNH ĐIỆN MÔI CỦA CHẤT KHOÁNG VÀ
VẬT LIỆU KỸ THUẬT, 20°C, 2450MHz (10,11)

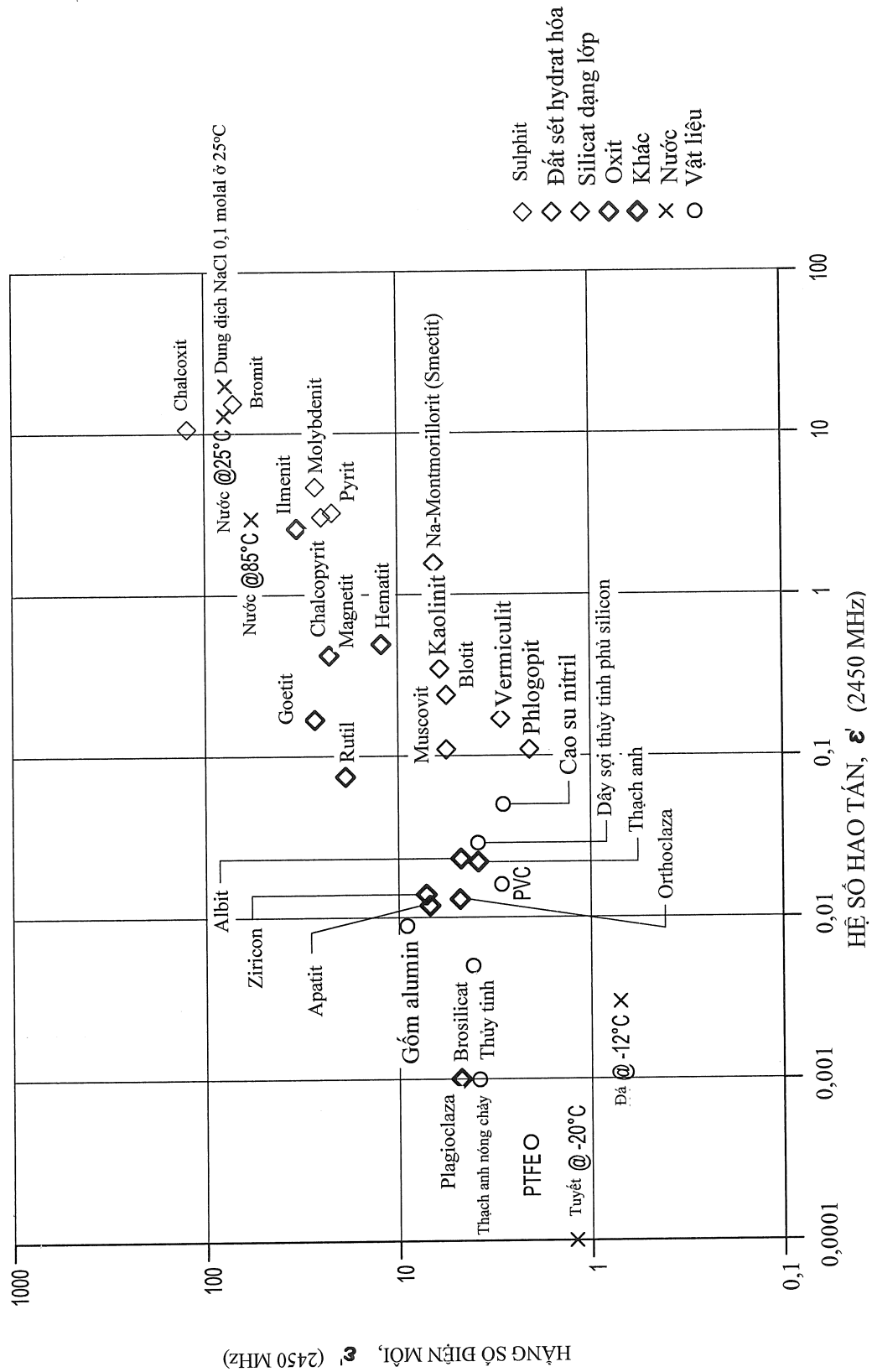


Fig.1

HÌNH VẼ CỦA HỆ THỐNG ĐO NHIỀU LOẠI KHOANG TRỞ LẠI ĐỂ XÁC ĐỊNH
HẸNG SỐ ĐIỆN MÔI PHỨC Ở NHIỆT ĐỘ CAO

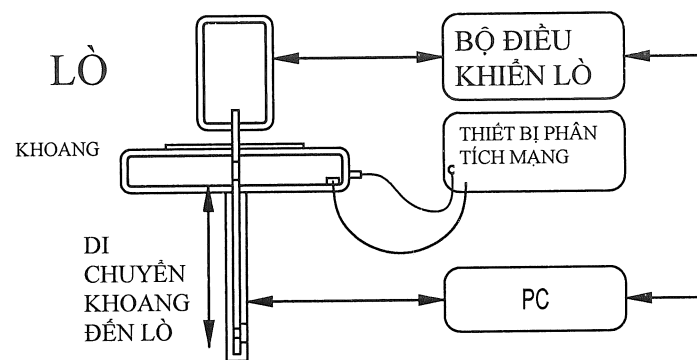


Fig.2

3/8

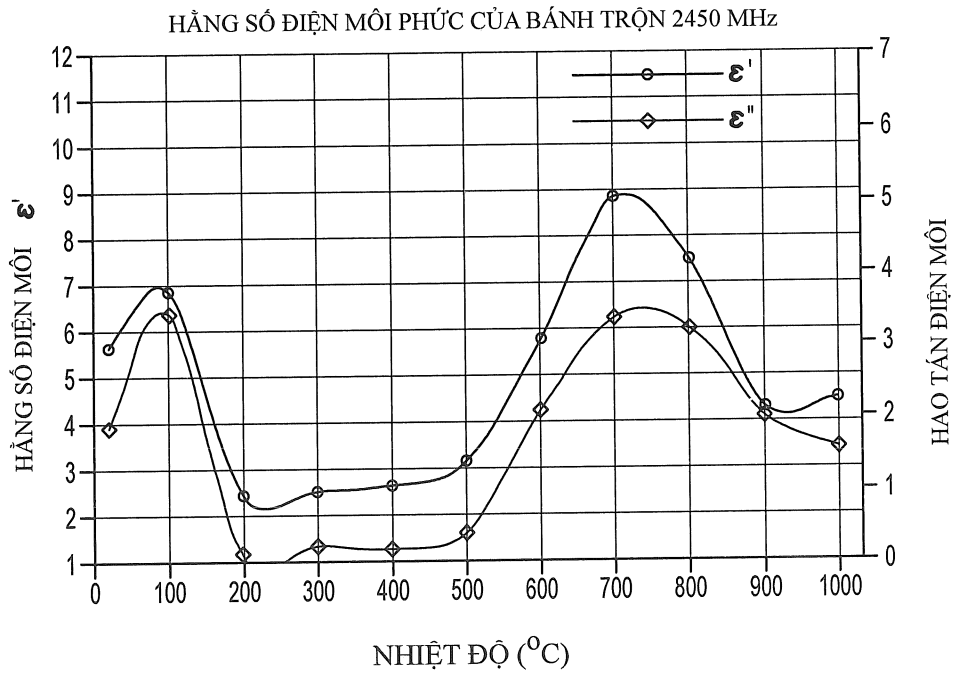


Fig.3

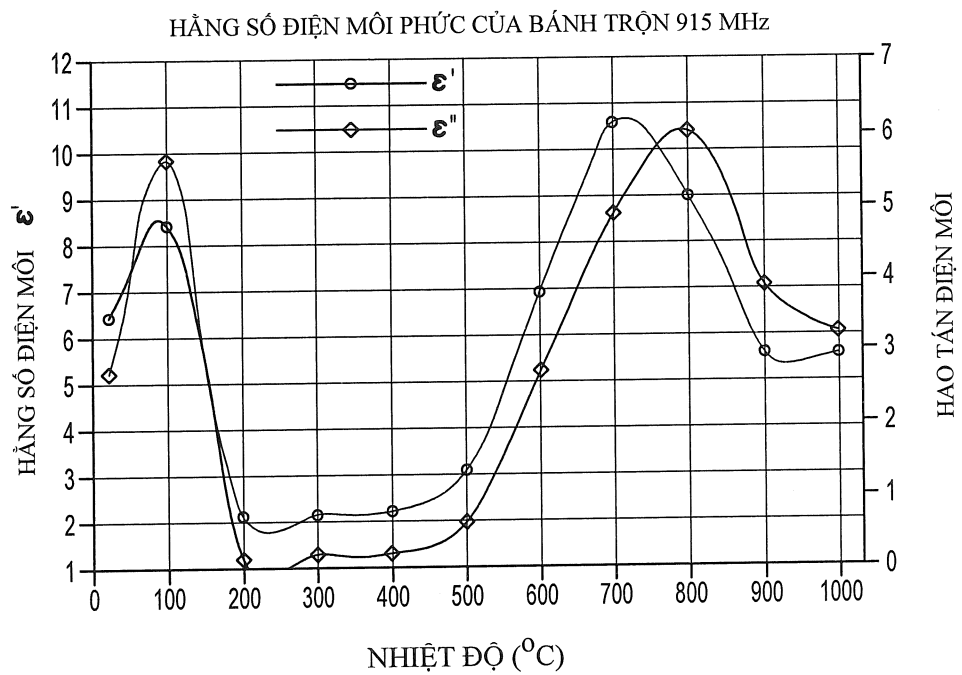
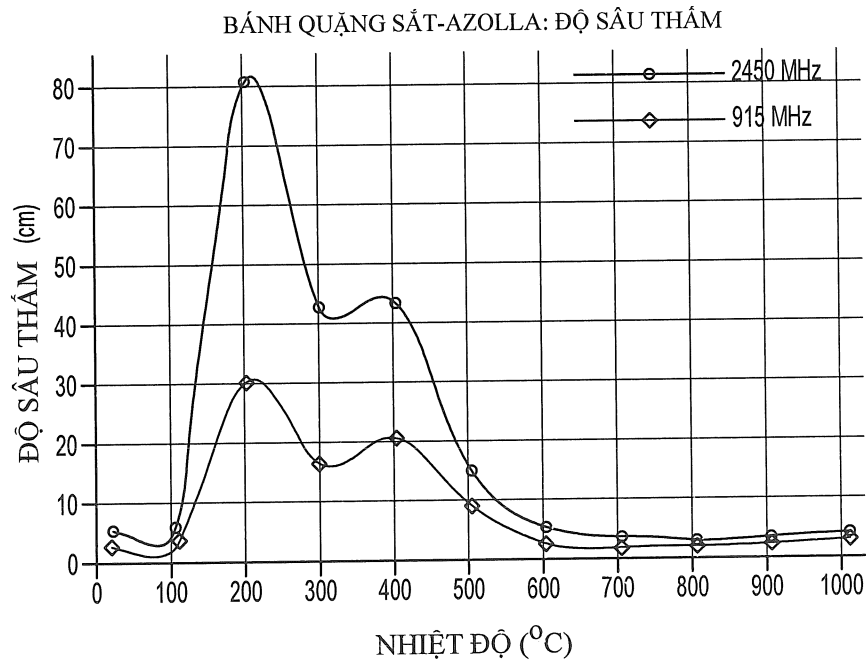


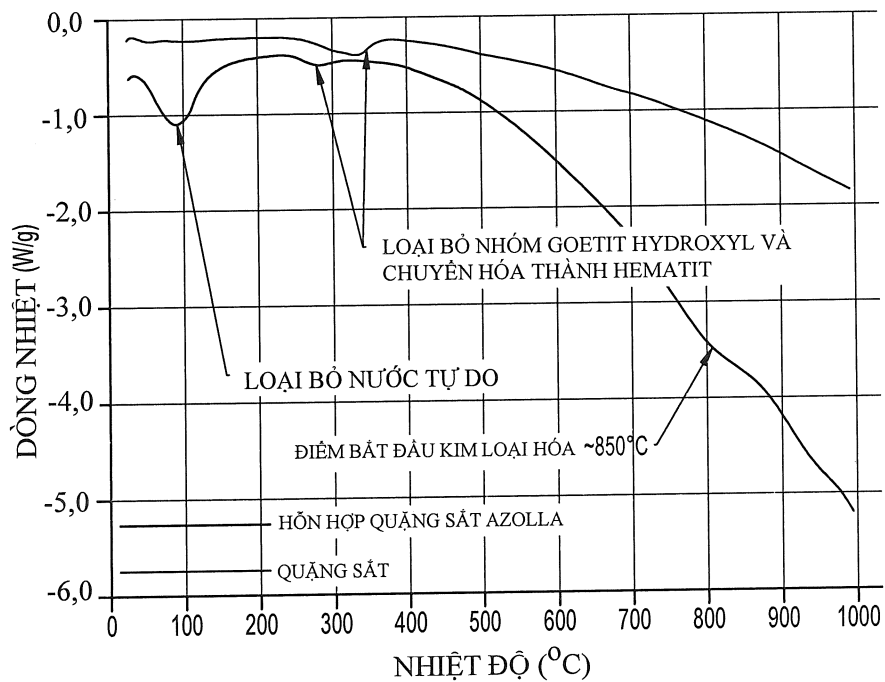
Fig.4

4/8



ĐỘ SÂU THẤM CỦA BÁNH TRỘN, 2450 MHz VÀ 915 MHz

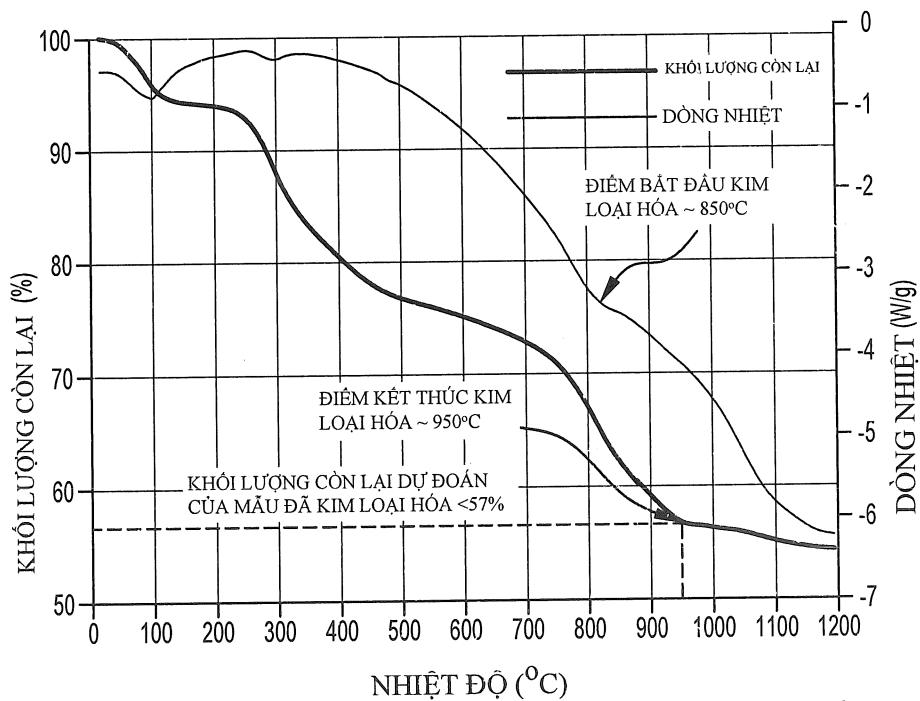
Fig.5



XÁC ĐỊNH DSC SỰ KIẾN NHIỆT TRONG QUY TRÌNH GIA
NHIỆT BÁNH TRỘN VÀ QUẶNG SẮT TRONG NITƠ

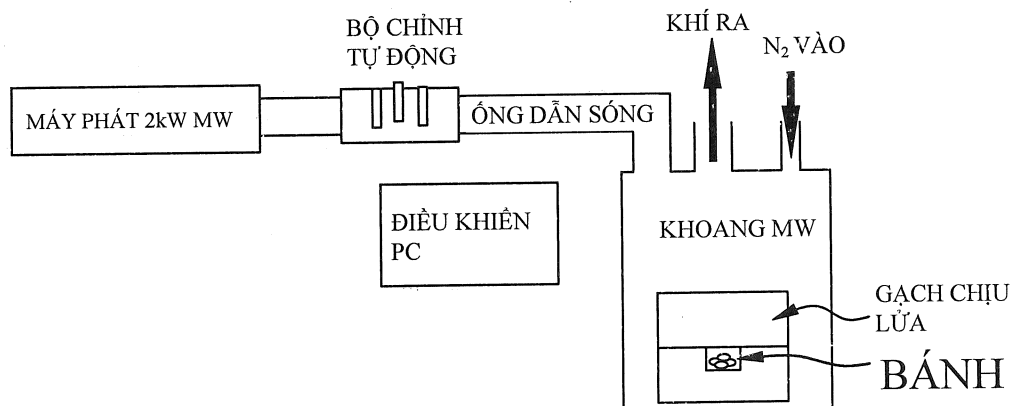
Fig.6

5/8



ĐIỂM KẾT THÚC KIM LOẠI HÓA DSC-TGA TRÊN CƠ SỞ KHỐI LƯỢNG CÒN LẠI CỦA BÁNH TRỘN

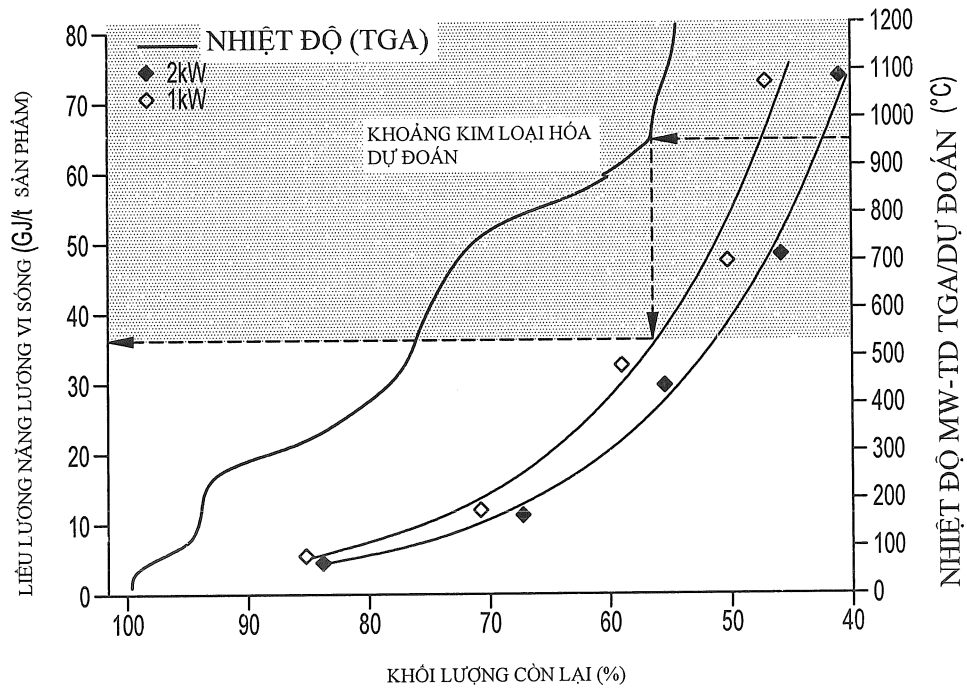
Fig.7



ĐIỂM KẾT THÚC KIM LOẠI HÓA DSC-TGA TRÊN CƠ SỞ KHỐI LƯỢNG CÒN LẠI CỦA BÁNH TRỘN

Fig.8

6/8



DỰ ĐOÁN KIM LOẠI HÓA MW TRÊN CƠ SỞ TGA CỦA BÁNH TRỘN VÀ TỶ LỆ TỶ HẠO KHỐI LƯỢNG ĐO ĐƯỢC QUA THỬ NGHIỆM CỦA MẪU XỬ LÝ VI SÓNG

Fig.9

PHỔ XRD, BÁNH CHƯA XỬ LÝ VÀ ĐÃ XỬ LÝ MW

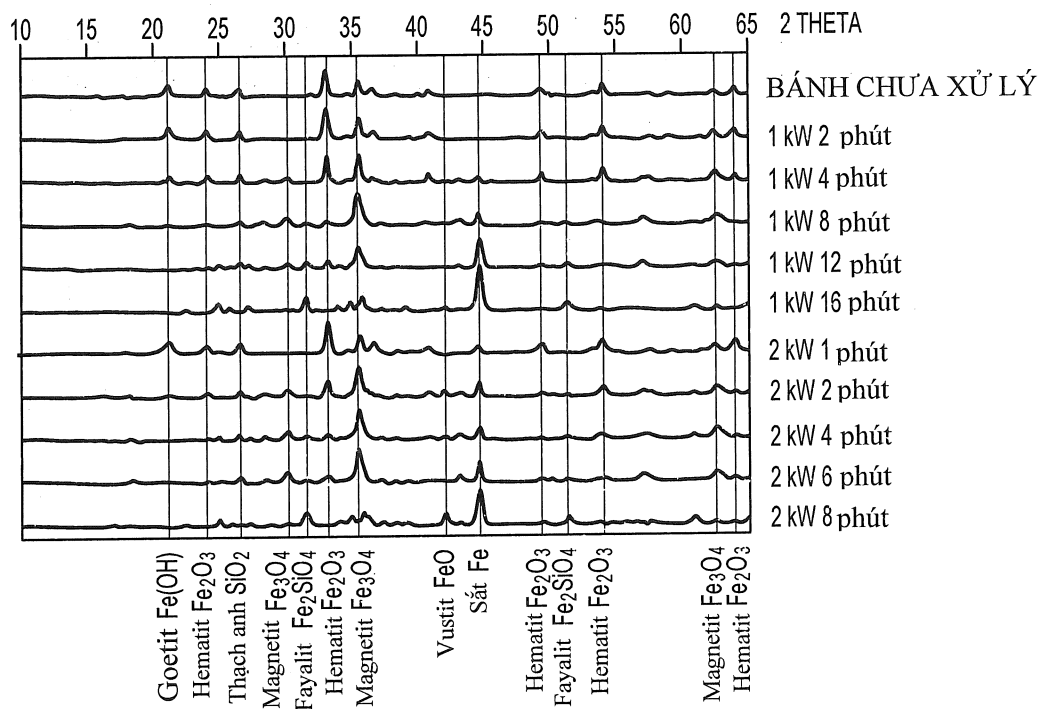


Fig.10

7/8

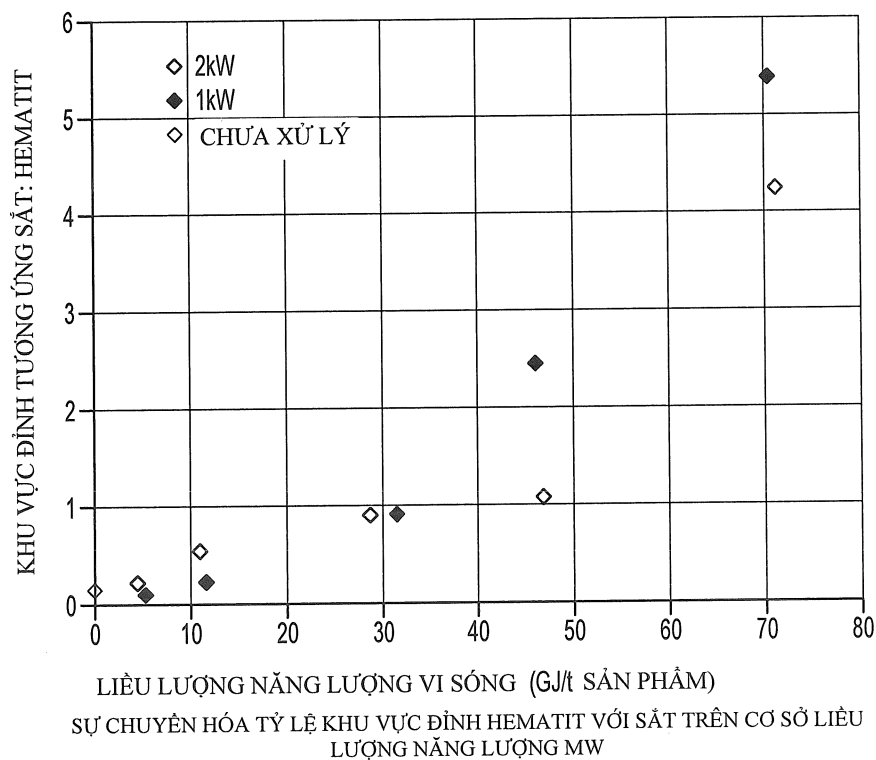


Fig.11

SO SÁNH PHỔ XRD, 2kW 8 PHÚT, ĐƯỜNG với SINH KHỐI

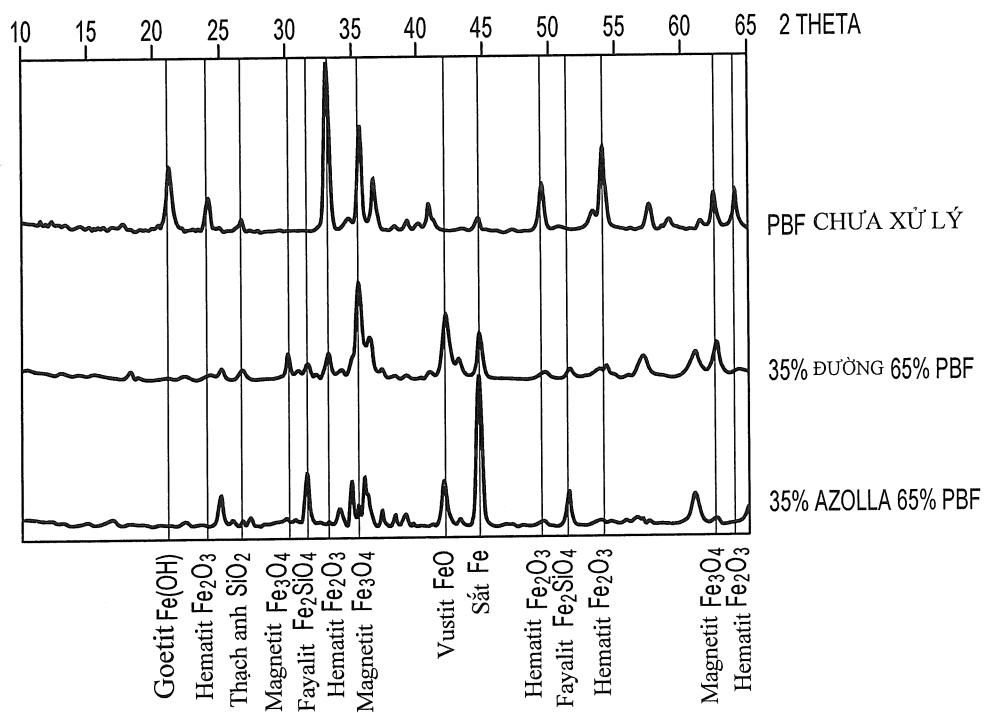


Fig.12

8/8

SO SÁNH PHỔ XRD, 2kW 8 PHÚT, HÀM LƯỢNG ĐƯỜNG THAY ĐỔI

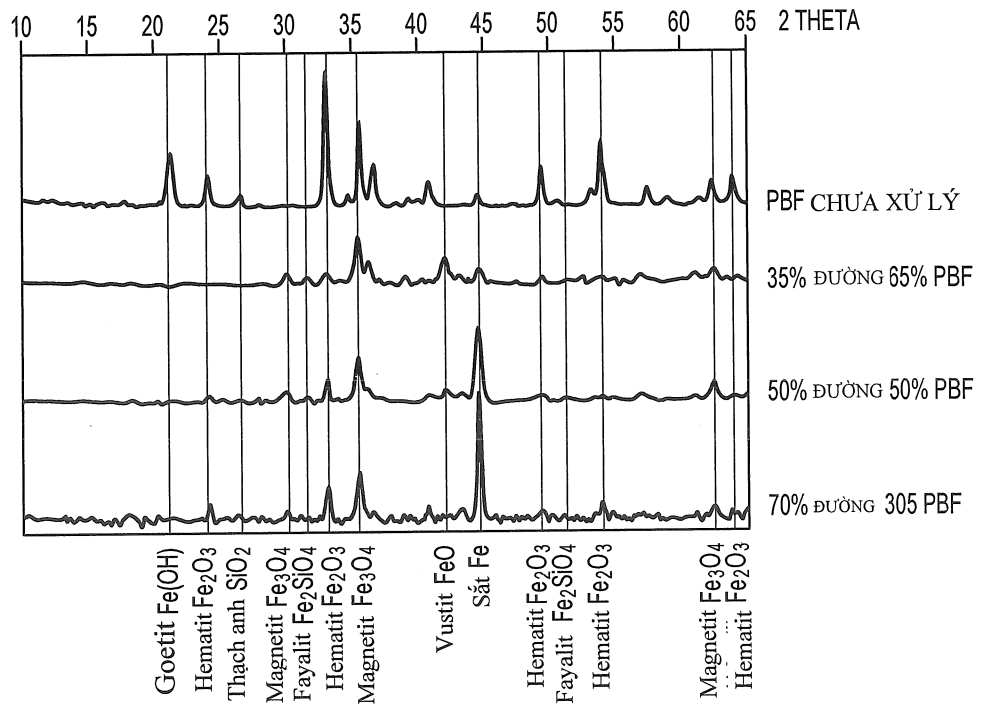


Fig.13

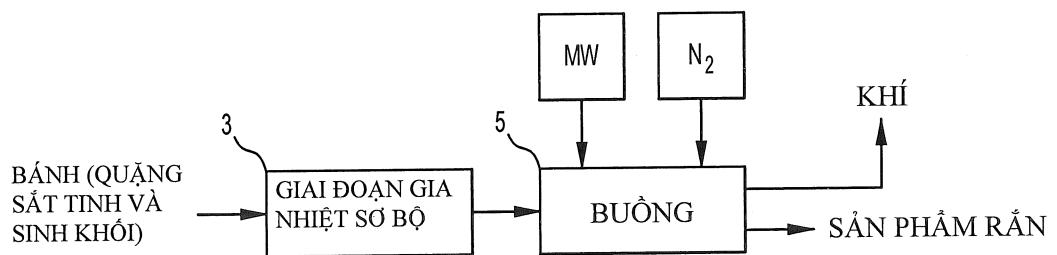


Fig.14