

CÔNG NGHỆ XỬ LÝ BỤI/BÙN LÒ THÉP THU HỒI KẼM VÀ SẮT KHỬ TRÊN THẾ GIỚI VÀ Ở VIỆT NAM

Steel furnace dust/sludge treatment technology for zinc and reduced iron recovery in the world and in Vietnam

Vũ Thị Hương Ly*, Nguyễn Thúy Lan và Đỗ Văn Quảng
Viện Khoa học và Công nghệ Mỏ - Luyện kim

*Email: vuhuongly57@gmail.com; Điện thoại 0347615858

TÓM TẮT

Bụi/bùn lò thép thường chứa hàm lượng kẽm nhất định, việc tái sử dụng bụi/bùn có lượng kẽm cao sẽ gây tổn hại tới tường lò cao nên loại bụi/bùn này phải được xử lý để loại bỏ kẽm trước khi tái sử dụng. Hiện nay, có rất nhiều phương pháp xử lý bụi/bùn luyện thép để tái sử dụng và thu hồi kẽm như phương pháp thủy luyện và hỏa luyện. Trong các khu liên hợp gang thép hiện đại ngày nay, lò đáy quay (RHF) thường được sử dụng kết hợp để tái chế lượng bùn/bụi. Sản phẩm thu được là sắt khử trực tiếp (DRI) làm nguyên liệu cho nhà máy thiêu kết, lò cao và kẽm oxit làm nguyên liệu cho các ngành công nghiệp khác, làm tăng hiệu quả chế biến và giảm nguy cơ gây ô nhiễm môi trường.

ABSTRACT

Steel furnace dust/sludge typically contains a certain amount of zinc, and reusing dust/sludge with high zinc content can damage the blast furnace walls. Therefore, this type of dust/sludge must be treated to remove zinc before reuse. Currently, there are many methods for treating steelmaking dust/sludge to recover zinc, such as hydrometallurgy and pyrometallurgy. In modern steel complexes, a rotary hearth furnace (RHF) is often used to recycle the dust/sludge. The resulting product is direct reduced iron (DRI) which can be used as a raw material for sinter plants, blast furnaces, and zinc oxide serves as a raw material for other industries, which increases processing efficiency and reduces the risk of environmental pollution.

Keywords: dust/sludge steel, BOS, RHF, DRI.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quy trình phổ biến nhất để sản xuất thép hiện nay là quy trình sản xuất kết hợp giữa lò cao và lò thổi oxy (BOF) chiếm hơn một tỷ tấn thép được sản xuất trên toàn cầu (khoảng 70% tổng lượng thép trên thế giới) [1]. Một lượng bụi/bùn BOF được tạo ra, chứa hàm lượng sắt cao, được coi là nguồn cung cấp sắt thứ cấp cho nhà máy thép liên hợp. Nhưng trong bụi lò thép chứa kẽm – kim loại gây hại cho vật liệu chịu lửa trong tường lò cao. Do đó, nồng độ kẽm nạp vào lò cao được kiểm soát chặt chẽ, với mức cho phép khoảng 100–120 g/THM (THM = tấn kim loại lỏng). Với một nhà máy sản xuất 10 triệu tấn thép lỏng mỗi năm, sẽ có khoảng 1000 tấn kẽm được nạp vào lò mỗi năm nếu theo định mức trên. Do đó, việc pha loãng bụi thép mang kẽm và tái sử dụng chúng trong các quy trình sản xuất thép hiện đại là không thích hợp ở quy mô bền vững. Khối lượng kẽm quay trở lại quá trình sản xuất thép thông qua tái chế thép phế liệu mạ kẽm đơn giản là quá nhiều. Hiện nay, bụi thép được xử lý chủ

yếu bằng phương pháp hòa luyện và thủy luyện nhưng chỉ áp dụng chính cho bụi lò cao BF và lò điện hồ quang EAF còn bụi BOF chứa hàm lượng Zn thấp, không đem lại hiệu quả kinh tế.

Việc tái sử dụng bụi/bùn thép nhằm giảm thiểu tác động môi trường và đảm bảo tính kinh tế, tính bền vững của ngành. Trong bài báo này sẽ đề cập đến các phương pháp tái sử dụng bụi thép, đặc biệt tập trung vào những phương pháp khả thi cho các nhà máy thép trong việc xử lý các sản phẩm phụ chứa kẽm trên thế giới và ở Việt Nam.

2. CÁC LOẠI BỤI/BÙN LÒ THÉP

2.1. Bụi/bùn lò cao (BF)

Bụi lò cao được thu hồi ở bộ lọc khói bụi được gọi là bụi BF (hoặc bụi sơ cấp) và phần bụi mịn được lọc ướt, được gọi là bùn BF (hoặc bụi thứ cấp) [2]. Hiện nay, do có những cải tiến trong công nghệ lò cao cùng với chất lượng các sản phẩm cốc và quặng thiêu kết tốt hơn nên bụi và bùn BF được tạo ra ít hơn. Lượng bụi BF trung bình là 11,4 kg/tấn gang lỏng đối với bụi sơ cấp và 8,9 kg/tấn gang lỏng đối với bùn thứ cấp [3].

Bảng 1: Thành phần, khối lượng bụi và bùn lò cao (% khối lượng)[3]

Phân loại	Fe (tổng)	Fe (FeO)	C	Zn	Pb
Bụi BF	40,1	19,2	31,0	0,2	-
Bùn BF	33,0	10,6	31,4	1,5	0,5

Kẽm (và chì) trong khí thải BF, có nguồn gốc từ việc tái sử dụng bụi BOF trong nhà máy thiêu kết, bụi BOF chủ yếu đến từ thép phế liệu, thành phần cụ thể được trình bày ở Bảng 1. Những yếu tố này ảnh hưởng tiêu cực đến BF vì chúng có thể phá hủy lớp lót chịu lửa.

2.2. Bụi/bùn lò thổi (BOF)

Bụi/bùn BOF được hình thành từ việc thổi oxy vào kim loại lỏng ở tốc độ siêu âm cũng như các điều kiện hỗn loạn của kim loại lỏng gây ra bởi cái gọi là “sôi carbon”, một lượng đáng kể vật liệu mịn được đẩy ra khỏi kim loại lỏng. Vật liệu mịn này được thu hồi thông qua hệ thống lọc bụi venturi ướt hoặc lọc bụi tĩnh điện khô [4] trước khi được thu hồi nhiệt lượng hoặc phát thải ra khí quyển. Bụi BOF được thu thập dưới dạng bụi ở túi lọc hoặc bánh lọc ướt (bùn).

Khối lượng bụi/bùn tạo ra từ hệ lò BOF rất khác nhau, thường được ước tính vào khoảng 15–25 kg/THM. Có nhiều yếu tố có thể ảnh hưởng đến thành phần của bụi BOF, bao gồm: chiều cao lance, áp suất phun oxy và thể tích xỉ [5; 6]. Thành phần bụi/bùn lò thổi được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2: Thành phần, khối lượng bụi và bùn lò thổi (% khối lượng)[3]

Phân loại	Fe (tổng)	Fe (kim loại)	C	Zn	Pb
Bụi BOF	73,7	44,1	0,9	0,3	0,06
Bùn BOF	60,5	12,9	1,9	1,6	0,1

2.3. Bụi/bùn lò điện hồ quang (EAF)

Bụi/bùn EAF chiếm khoảng 14,2 kg/tấn thép lỏng [3]. Lượng bụi được thu hồi chủ yếu ở hệ thống lọc bụi sơ cấp, trung bình khoảng 12,7 kg/tấn thép lỏng. Lượng bụi/bùn EAF còn lại được tập hợp từ các công đoạn thu hồi khí nhỏ hơn dưới dạng bụi sơ cấp. Thành phần hóa học của bụi EAF được thể hiện ở Bảng 3 [3]. Sắt và kẽm là thành phần chủ yếu, lượng cacbon tương đối thấp (trung bình 1,8%), tương tự lượng cacbon có trong bụi/bùn BOF. Hàm lượng Zn trong bụi EAF dao động khá lớn giữa các nhà máy thép do sự khác nhau về hàm lượng Zn của nguồn thép phế đầu vào, trong bụi có thể chứa một lượng chì và cadimi.

Bảng 3: Thành phần, khối lượng của bụi EAF (% khối lượng)[3]

Phân loại	Fe (tổng)	Fe (kim loại)	C	Zn	Pb
Bụi EAF	35,1	3,5	1,8	14,6	3,1

Các tính chất vật lý của bụi EAF phụ thuộc vào loại thép và quá trình nấu chảy. Kích thước hạt từ 0,1 μm đến $> 200 \mu\text{m}$. Do đó, bụi EAF có thể ở trong không khí, điều này làm cho việc phân tách bụi bằng phương pháp vật lý khá khó khăn. Zn tồn tại trong bụi EAF thường dưới 2 dạng hợp chất là ZnO và ZnFe_2O_4 .

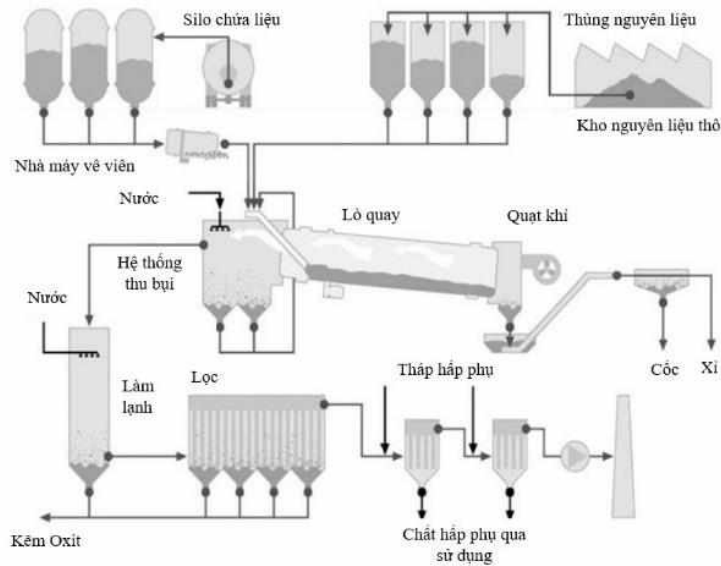
3. CÔNG NGHỆ XỬ LÝ, TÁI CHẾ BỤI/BÙN LÒ THÉP TRÊN THẾ GIỚI

3.1. Xử lý bằng phương pháp hòa luyện

Phương pháp hòa luyện nhằm xử lý bụi/bùn lò thép được phát triển dựa trên các mô hình nhiệt động lực học. Phương pháp hòa luyện dùng để loại bỏ Zn khỏi bụi thép có khả năng mở rộng tốt và có năng suất xử lý cao. Tuy nhiên, phương pháp hòa luyện đòi hỏi vốn đầu tư ban đầu lớn, tiêu thụ năng lượng cao. Nhược điểm rõ ràng của phương pháp hòa luyện là tạo ra CO_2 , gây hiệu ứng nhà kính và cũng tạo ra một lượng lớn bụi, tiếng ồn, điều này phải được xem xét khi đánh giá tính khả thi của phương pháp.

Có hai phương pháp chính xử lý bụi thép bằng phương pháp hòa luyện là sử dụng lò nung Waelz và lò đáy quay. Trong đó, công nghệ lò đáy quay có nhiều biến thể như: Fastmet, Inmetco, Dryiron, Midrex.... Phương pháp xử lý lâu đời nhất đối với bụi có chứa kẽm là quy trình lò nung Waelz, bụi thép trộn đều với nhiên liệu carbon và tạo thành viên, sau đó được nung $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ trong lò quay và đốt bằng đầu đốt ở cuối lối ra của lò (Hình 1). Thông thường, lò Waelz dài khoảng 50–70 m với đường kính 4–5 m. Các hợp chất chứa kẽm bị khử, bay hơi và tái oxy hóa trong dòng khí, do đó, tách kẽm khỏi vật liệu sắt.

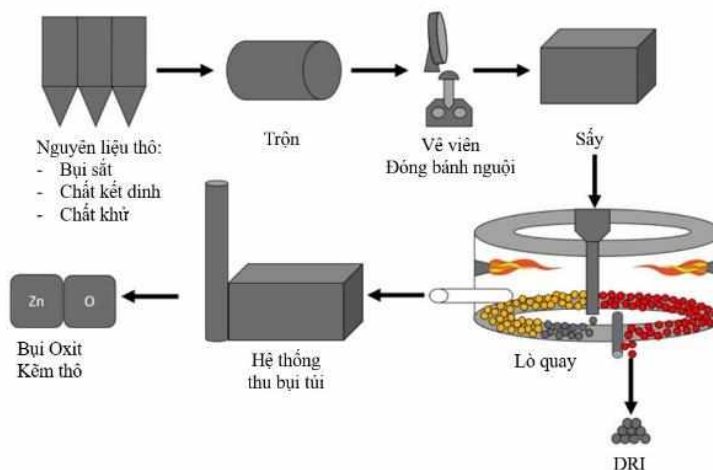
Quy trình này có một số nhược điểm, như thời gian lưu giữ lâu lên đến 8 giờ dẫn đến năng suất rất thấp. Thông thường, các lò nung Waelz được sử dụng trong việc thu hồi kẽm từ bụi EAF. Tuy nhiên, lò Waelz không thể xử lý kinh tế vật liệu có hàm lượng kẽm thấp hơn 10% trọng lượng, do giá trị tương đối thấp của sản phẩm chứa sắt và tính kém hiệu quả về nhiệt của quy trình.



Hình 1: Sơ đồ của quy trình lò Waelz [7]

Lò đáy quay được cấp bằng sáng chế vào những năm 1960, quy trình lò quay tận dụng tốc độ phản ứng cao có được thông qua việc nung các viên hỗn hợp tự khử của oxit sắt và cacbon. Lò đáy quay (RHF) bao gồm một bàn xoay tròn quay bên trong một đường hầm có lót vật liệu chịu lửa (Hình 2). Nhiệt được cung cấp bởi khí đốt tự nhiên hoặc bột than, nhưng phần lớn nhiệt của quá trình đến từ quá trình đốt cháy nguồn cacbon trong liệu đầu vào. Dòng khí ngược dòng với dòng nguyên liệu nên có thể làm nóng trước các viên mới nạp, dẫn đến trao đổi nhiệt tốt và hiệu quả nhiệt cao.

Có nhiều quy trình thương mại hóa khác nhau để khử trực tiếp bằng RHF như FASTMET®, DRyIron® và INMETCO® nhưng tất cả đều tuân theo các nguyên tắc quy trình rất giống nhau. Nguồn cacbon trong các viên bắt đầu khí hóa để tạo thành môi trường khử cục bộ bên trong lò. Sau đó CO khử các oxit sắt từng bước thành sắt kim loại, cũng như làm bay hơi bất kỳ Zn và Pb nào có mặt. Sự khử trạng thái rắn cũng xảy ra giữa C và FeO nhưng điều này diễn ra chậm và ít hơn nhiều. Quá trình đốt cháy CO thành CO₂ tỏa nhiệt và cung cấp nhiều năng lượng nhiệt hơn cho quá trình để thúc đẩy các phản ứng khí hóa thu nhiệt và phản ứng khử.



Hình 2: Sơ đồ quy trình FASTMET [8]

Một ưu điểm chính của RHF so với lò Waelz là tăng chất lượng của sản phẩm ZnO do bị nhiễm ít sắt mịn hơn, do các viên lớn không mài mòn lẫn nhau để tạo ra các hạt sắt dư thừa. Việc ô nhiễm sắt quá mức là không mong muốn đối với mục đích tái chế, thu hồi kẽm. Sự bổ sung các chất trợ dung thường cũng không cần thiết cho mục đích tăng năng suất lò và sản phẩm DRI có giá trị cao hơn.

3.2. Xử lý bằng phương pháp thủy luyện

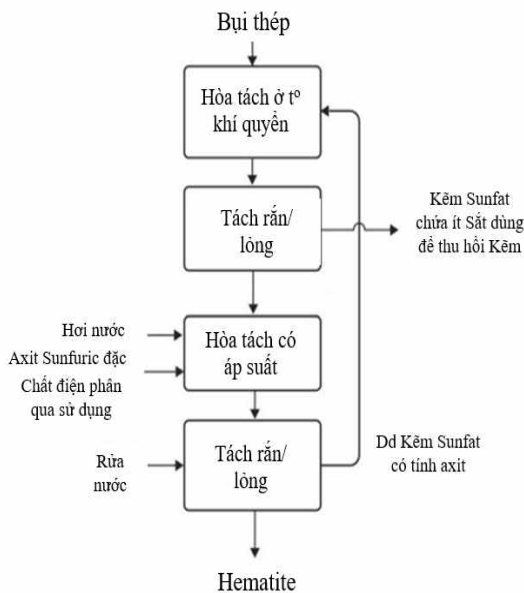
Quá trình xử lý bụi thép bằng phương pháp thủy luyện đang được quan tâm và nghiên cứu nhiều hơn vì quá trình này chi phí ít hơn, phù hợp với các mô hình nhỏ và chúng chọn lọc được nhiều kim loại hơn. Nhưng hầu hết các nghiên cứu xử lý bụi thép bằng phương pháp thủy luyện tập trung vào bụi lò điện hồ quang (EAF) vì chúng giàu kẽm hơn – được coi là nguồn nguyên liệu kẽm thứ cấp.

Tuy nhiên, trong bụi EAF có chứa muối clorua. Tạp chất clorua làm ăn mòn điện cực, nên cần loại bỏ các muối clorua trước khi đưa bụi đi hòa tách. Muối clorua trong bụi EAF chủ yếu là NaCl và KCl được loại bỏ 99% bằng cách rửa nước máy ở nhiệt độ phòng trong 60 phút ở pH tự nhiên của bụi EAF (pH 12). Muối clorua trong bụi EAF ở dạng hydroxyl clorua chì ($PbOHCl$) và chì clorua cacbonat ($Pb_2Cl_2CO_3$) không tan trong nước. Để có thể rửa được những tạp này thì bụi EAF trước khi rửa cần được nung ở nhiệt độ $< 600\text{ }^{\circ}C$ để tránh sự bay hơi của kẽm và chì. Sau khi hòa tách được các muối clorua thì bụi sẽ được đưa đi hòa tách bằng axit như axit sunfuric, axit clohydric, axit nitric và axit axetic, axit versatic, amoni clorua, amoni – amoni cacbonat.

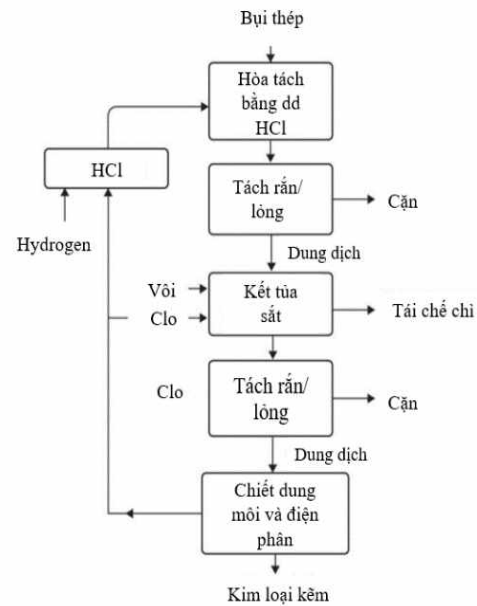
Axit sunfuric (H_2SO_4) là axit phổ biến nhất để xử lý bụi EAF bằng phương pháp thủy luyện. Axit sunfuric rẻ tiền, dễ mua và kẽm oxit hòa tan rất nhanh trong dung dịch axit sunfuric mà không phụ thuộc vào nồng độ và nhiệt độ. Sự hòa tan của $ZnFeSO_4$ diễn ra chậm hơn và phụ thuộc vào nhiệt độ. Để có sự hòa tách chọn lọc giữa kẽm và sắt thì nên sử dụng axit sunfuric 0,5M (hoặc thấp hơn) và thời gian hòa tách là 15 phút vì ở nồng độ axit thấp, các kim loại dễ tan trong axit sẽ được hòa tan trước và không đủ axit tự do để hòa tan sắt, chì sẽ tạo ra muối $PbSO_4$ kém tan. Hiện nay quy trình hòa tách hai giai đoạn để thu hồi kẽm từ bụi nhà máy thép được phát triển bởi công ty AMAX là phổ biến nhất được thể hiện ở Hình 3. Giai đoạn đầu tiên là hòa tách ở áp suất khí quyển. Trong giai đoạn thứ hai, hòa tách ở áp suất cao và ở nhiệt độ 225-300 $^{\circ}C$. Hai giai đoạn được kết nối theo kiểu ngược dòng, với hai bước tách lỏng/rắn. Sắt hầu hết chuyển về dạng hematit kết tủa để tách khỏi dung dịch và được đưa về tái chế ở các lò luyện thép.

Công ty AMAX cũng đã phát triển quy trình hòa tách bằng HCl đối với bụi EAF [65]. Quy trình được thể hiện trong Hình 4. Đầu tiên, bụi EAF được hòa tách bằng HCl, sau khi phân chia lỏng rắn, dung dịch được oxi hóa bởi khí clo và đồng thời thêm vôi vào để kết tủa sắt. Phần cặn giàu Fe không chứa lưu huỳnh có thể được tái chế trong lò luyện thép. Phần dung dịch không chứa sắt được tách ra và có thể được tinh chế thêm bằng cách chiết dung môi với D2EHPA hoặc Cyanex 272. Dung dịch được đưa đi điện phân, kẽm sinh ra ở catot và khí clo thoát ra sẽ được tái sử dụng. Quá trình này có thể sử dụng để xử lý nhiều nguồn nguyên liệu khác nhau chứa

thành phần kẽm khác nhau. Nồng độ của axit HCl ảnh hưởng đến quá trình hòa tách và khả năng chọn lọc của axit. Với nồng độ HCl 75 g/L thì 88% kẽm và 48% sắt bị hòa tan. Ở nồng độ cao hơn thì lượng sắt bị hòa tan nhiều hơn, ở nồng độ 200 g/L, 100% kẽm và 93% sắt bị hòa tan.

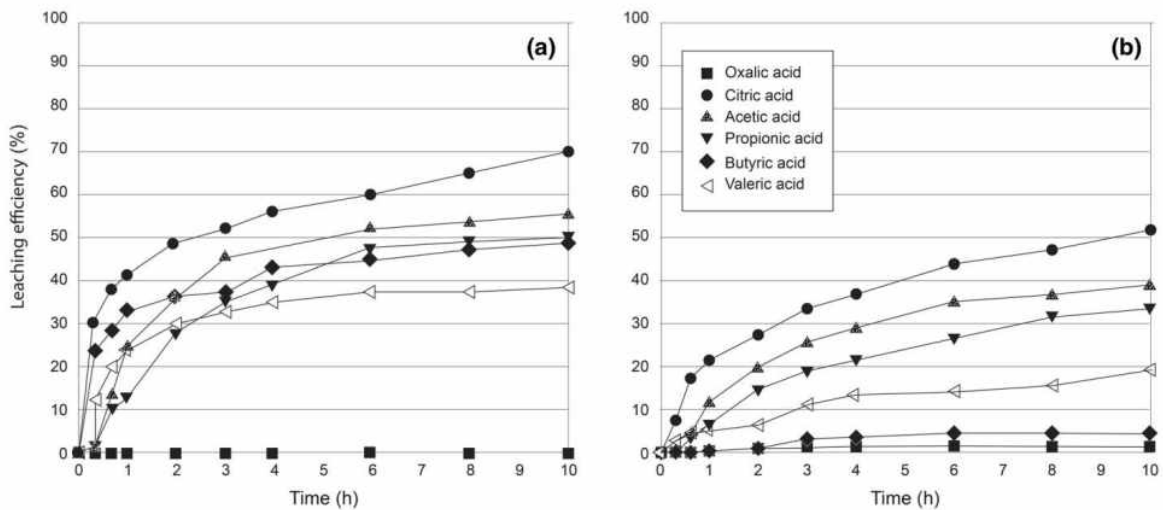


Hình 3: Quy trình xử lý bụi EAF hai giai đoạn bằng axit sunfuric được phát triển bởi AMAX [9].

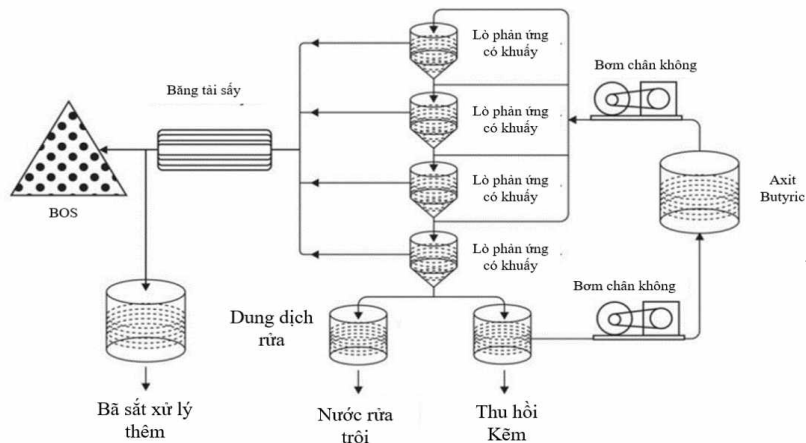


Hình 4: Quy trình xử lý bụi thép bằng axit HCl được phát triển bởi AMAX [9]

Với bụi lò BOS người ta thường xử lý bằng axit butyric. Axit xitric có khả năng chọn lọc kẽm vì hòa tan nhiều sắt và kẽm nhất với 49,7% kẽm bị loại bỏ và 2,5% sắt bị hòa tách. Vậy nên axit butyric được lựa chọn để phát triển nghiên cứu hòa tách bụi BOS.



Hình 5: Hiệu suất hòa tách kẽm (5a) và sắt (5b) bằng các axit, thời gian khác nhau



Hình 6: Quy trình hòa tách ngược dòng bụi BOS bằng axit butyric

4. TÁI CHẾ BỤI/BÙN LÒ THÉP Ở VIỆT NAM

Ở Việt Nam có rất nhiều công ty, dự án sản xuất thép đang được xây dựng và vận hành nên nhu cầu xử lý bụi thép là rất lớn. Dù tiêu tốn nhiều năng lượng hơn nhưng với ưu điểm năng suất xử lý cao và ít ô nhiễm môi trường hơn nên ở nước ta đang sử dụng công nghệ hòa luyện theo mô hình Waelz, dùng lò ống quay để tái chế bụi lò EAF nhằm thu hồi kẽm ở các công ty môi trường như: Công ty Cổ phần môi trường Tân Thiên Nhiên, Công ty cổ phần Zinc Oxide Việt Nam.... Bụi BOS hiện tại chưa có phương án tái chế cụ thể.

Công nghệ luyện thép BOS ở Việt Nam đang phát triển mạnh. Theo hiệp hội thép Việt Nam (VSA), năm 2021 Việt Nam sản xuất được khoảng 27 triệu tấn thép thô trong đó sản xuất thép bằng công nghệ BOS đạt 16,74 triệu tấn (chiếm khoảng 62%). Lượng bụi/bùn BOS thải ra tính riêng năm 2021 là khoảng 703.080 tấn, bao gồm cả bụi/bùn lò thổi và lò cao (Bảng 4).

Các nhà máy sản xuất thép bằng công nghệ BOS lớn nhất hiện nay có thể kể đến như Formosa có công suất 7,5 triệu tấn với 2 lò cao dung tích 4350 m³ và 3 lò thổi công suất 300 tấn/mẻ. Lượng bụi/bùn BOS của Formosa mỗi năm thải ra ước tính khoảng 318.000 tấn, trong đó là 86.250 tấn bụi và 66.750 tấn bùn lò cao và 165.000 tấn bụi/bùn lò thổi. Trong khi đó, ở công ty Thép Hòa Phát Dung Quất, với công suất 4 triệu tấn/năm, sử dụng 4 lò cao dung tích 1080 m³ và 4 lò thổi công suất 120 tấn/mẻ. Lượng bụi/bùn BOS của Hòa Phát mỗi năm thải ra ước tính khoảng 169.600 tấn bao gồm 46.000 tấn bụi và 35.600 tấn bùn lò cao và 88.000 tấn bụi/bùn lò thổi. Khối lượng bụi lò phát sinh từ công đoạn xử lý khí thải lò điện hồ quang (thu hồi bằng thiết bị lọc bụi túi vải) của Nhà máy luyện thép Lưu Xá trung bình khoảng 3.600 tấn/năm.

Bảng 4: Thống kê sản xuất thép thô trong 5 năm gần nhất của Việt Nam

Năm	2017	2018	2019	2020	2021
Sản xuất thép thô (1.000 tấn)	11.473	15.471	17.469	19.547	27
Sản xuất bằng BOS	4.016	8.200	9.746	12.201	16,74

Tổng lượng bụi/bùn	170,278	347,680	413,230	517,322	703,08
--------------------	---------	---------	---------	---------	--------

Biện pháp xử lý tạm thời của Formosa và Thép Hòa Phát là pha loãng với liệu đầu vào để tái sử dụng bụi/bùn BOS, với lượng sử dụng khoảng 5 – 10% khối lượng, số còn lại lưu kho và chôn lấp một phần. Về lâu dài Thép Hòa Phát Dung Quất cũng đã xác định phải xử lý bụi/bùn BOS trước khi quay lại tái sử dụng làm liệu đầu vào cho lò cao. Còn Formosa cũng đã lên kế hoạch đầu tư khu xử lý bụi/bùn BOS cho nhà máy với quy mô công suất 400.000 tấn/năm. Sử dụng công nghệ hòa luyện theo mô hình lò đáy quay RHF. Nhà máy luyện thép Lưu Xá tự xử lý bụi lò bằng cách pha loãng với liệu đầu vào, làm nguyên liệu cho ngành xi măng. Tuy nhiên, từ tháng 1/2021, nhà máy tạm dừng việc tự xử lý và đã đang có kế hoạch chuyển giao cho đơn vị có chức năng xử lý, điều chỉnh đăng ký nguồn thải.

5. KẾT LUẬN

Bụi thép tồn tại như một vấn đề chính về hiệu quả vật liệu và môi trường đối với các nhà sản xuất thép. Bụi BOS nói riêng đặt ra một thách thức vì hàm lượng kẽm thấp nên không hiệu quả khi sử dụng biện pháp “pha loãng” để tái sử dụng trực tiếp trong BF/BOF. Công nghệ RHF có thể tái chế bụi/bùn BF một cách hiệu quả mà không phải chôn lấp, tạo ra sản phẩm có giá trị cao là sắt khử trực tiếp và kẽm oxit. Thu hồi kẽm từ bụi EAF bằng phương pháp thủy luyện chỉ phù hợp với việc thu hồi Zn và ở quy mô nhỏ vì bụi chứa sắt rất thấp và quá trình xử lý tạo ra lượng nước thải lớn. Việc lựa chọn mô hình RHF để tái chế bụi thép ở nước ta là hoàn toàn phù hợp, đáp ứng được tính thời đại và hiệu quả kinh tế. Giải quyết triệt để nguồn thải bụi thép trong các khu sản xuất thép liên hợp cũng như các nhà máy thép sử dụng lò điện hồ quang – EAF.

TÀI LIỆU TRÍCH DẪN

1. World Steel Association, 2017a. World Steel in Figures 2017.
2. Andersson A, Ahmed H, Rosenkranz J et al (2017) Characterization and upgrading of a low zinc-containing and fine blast furnace sludge - a multi-objective analysis. *ISIJ Int* 57:262–271.
3. Worldsteel (2010) Steel industry by-products: project group report 2007–2009. World Steel Association, Brussels.
4. Henschen, H.C., 1968. Wet vs dry gas cleaning in the steel industry. *J. Air Pollut. Control Assoc.* 18 (5), 338–342.
5. Okhotskii, V.B., 2007. Formation of iron oxide dust in steel smelting. *Steel Transl.* 37 (12), 979–981.
6. Gritzan, X.X., Neuschütz, D., 2001. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking. *Steel Res.* 72 (9), 324–330.
7. Porter, F., 1991. Zinc Handbook: Properties, Processing, and Use in Design. International Lead Zinc Research Organization ISBN, 0824783409.
8. Chatterjee, A., 2012. Sponge Iron Production by Direct Reduction of Iron Oxide, 2nd ed. PHI Private Learning Limited, Delhi, India ASIN:B00K7BMK1Y.

9. Duyvesteyn W, Jha M (1986) Two-stage leaching process for steel plant dusts. US Patent 4610721.

Nguồn: Tuyển tập báo cáo “Hội nghị Khoa học Công nghệ Tuyển khoáng toàn quốc lần thứ VI”.