

DOI:10.22144/ctujos.2025.056

ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC YẾU TỐ VẬN HÀNH THÁP ĐỆM ĐẾN KHẢ NĂNG HẤP THỤ KHÍ SO₂

Phạm Văn Toàn^{1*}, Lê Minh Thuận¹, Trang Thái Nguyên² và Trần Minh Viên¹

¹Khoa Môi trường và Tài nguyên Thiên nhiên, Trường Đại học Cần Thơ

²Phòng Nông nghiệp và Môi trường huyện Châu Thành, tỉnh Kiên Giang

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): pvtoan@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 30/12/2024

Sửa bài (Revised): 20/02/2025

Duyệt đăng (Accepted): 31/03/2025

Title: Evaluating the impact of operational factors on SO₂ removal efficiency by a wet scrubber

Author(s): Pham Van Toan^{1*}, Le Minh Thuan¹, Trang Thai Nguyen² and Tran Minh Vien¹

Affiliation(s): ¹College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam; ²Department of Agriculture and Environment of Chau Thanh district, Kien Giang province

TÓM TẮT

Ô nhiễm không khí do khí SO₂ từ công nghiệp đang là vấn đề được quan tâm, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe và môi trường. Nghiên cứu này được tiến hành nhằm đánh giá hiệu quả xử lý khí SO₂ bằng tháp đệm, tập trung vào ba yếu tố gồm chiều cao lớp vật liệu đệm, tỷ lệ khí - lỏng (L/G) và loại dung dịch hấp thụ. Thí nghiệm được thực hiện trong điều kiện có kiểm soát với nhiệt độ dòng khí 40 ± 1°C, áp suất 1 atm và nồng độ khí SO₂ đầu vào. Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu suất xử lý SO₂ cao nhất đạt 85,01 ± 1,19% ứng với trường hợp lớp vật liệu đệm dày 0,7 m, tỷ lệ L/G 0,009 và dung dịch NaOH 0,05M. Điều này chứng tỏ ba yếu tố trên ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả xử lý khí SO₂. Để cải thiện công nghệ xử lý khí SO₂ bằng tháp hấp thụ, việc nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố khác như loại vật liệu đệm, nhiệt độ và áp suất dòng khí được thực hiện là rất cần thiết.

Từ khóa: Dung dịch hấp thụ, hấp thụ, khí SO₂, tháp đệm, tỷ lệ L/G

ABSTRACT

Air pollution caused by SO₂ emissions from industrial activities is a major concern, significantly impacting human health and the environment. This study evaluates the efficiency of SO₂ removal using a wet scrubber, focusing on three key factors: packing layer height, the ratio of gas-liquid (L/G), and the type of absorption solution. The experiments were conducted under controlled conditions, with a gas stream temperature of 40 ± 1°C, pressure of 1 atm, and a specified inlet SO₂ concentration. The experiment results showed that the highest SO₂ removal efficiency (85.01 ± 1.19%) was achieved with a packing layer height of 0.7 m, an L/G ratio of 0.009, and a 0.05M NaOH solution. Findings indicate that these factors significantly affect SO₂ removal efficiency. To improve the technology of SO₂ removal from air pollution sources by the wet scrubber, further research conducted on other factors, such as packing material types, gas stream temperature, and pressure are necessary.

Keywords: Absorption, absorbent solution, L/G ratio, SO₂ gas, wet scrubber

1. GIỚI THIỆU

Ô nhiễm không khí đã và đang là vấn đề được quan tâm nhiều trong những thập kỷ gần đây. Khí thải từ hoạt động sản xuất công nghiệp góp tỷ lệ lớn gây ô nhiễm không khí. Thống kê cho thấy rằng, ngành công nghiệp chiếm từ 30% đến 70% tổng lượng khí thải ô nhiễm, tùy thuộc vào quy mô và loại hình sản xuất. Hasanbeigi et al. (2017) đã phân tích và dự đoán tổng lượng phát thải bụi PM và SO₂ từ ngành công nghiệp xi măng và sản xuất thép ở Trung Quốc từ năm 2010 đến năm 2050. Kết quả phân tích cho thấy phát thải SO₂ chủ yếu từ quá trình đốt than trong lò nung xi măng và quá trình luyện thép. Lượng SO₂ phát thải từ sản xuất xi măng và luyện thép lần lượt khoảng 212.000 tấn và 323.000 tấn vào năm 2050. Kết quả nghiên cứu của Lou et al. (2021) cho thấy việc giảm phát thải SO₂ trong các ngành công nghiệp công nghệ cao tại Trung Quốc và mức độ phát tán của nó trong khí quyển. Việc nghiên cứu và phát triển các ngành công nghệ cao có thể gây ra một số tác động tiêu cực nhất định đến việc giảm phát thải SO₂, do quá trình sản xuất và vận hành có thể phát sinh khí thải. Tuy nhiên, về lâu dài, công nghệ cao mang đến những tác động tích cực, góp phần hạn chế tổng lượng phát thải nhờ vào các giải pháp tiên tiến như hệ thống lọc khí hiệu quả, năng lượng sạch và quy trình sản xuất thân thiện với môi trường. Sự mở rộng các ngành công nghiệp công nghệ cao đã cải thiện đáng kể năng lực giảm phát thải SO₂ của địa phương và khu vực lân cận Lou et al. (2021). Có thể thấy các nguồn phát thải SO₂ trong sản xuất công nghiệp có tác động đến chất lượng môi trường không khí. Ô nhiễm không khí từ khí thải công nghiệp ảnh hưởng nghiêm trọng đến môi trường và sức khỏe của cộng đồng. Ô nhiễm không khí là nguyên nhân gây nhiều loại bệnh, hạn chế tầm nhìn, làm giảm sản lượng nông sản,... Theo kết quả nghiên cứu của Nguyen et al. (2022), ô nhiễm không khí là một trong những nguyên nhân gây ra số ca tử vong cao ở Thành phố Hồ Chí Minh. Zvereva et al. (2008) đã chỉ ra rằng các nhà máy sản xuất có phát thải khí SO₂ gây ra tác động tiêu cực đối với sự đa dạng thực vật, nhất là những nhà máy sản xuất nhôm, sản xuất kim loại màu. Kết quả được đưa ra từ nghiên cứu của Likus-Ciešlik and Pietrzykowski (2021) đã cho thấy tình trạng ô nhiễm lưu huỳnh và tác động môi trường của khí thải công nghiệp. Sự hiện diện của lưu huỳnh trong môi trường, dưới các dạng như lưu huỳnh dioxit (SO₂), axit sulfuric (H₂SO₄) và ion sunfat (SO₄²⁻), có thể gây ra quá trình acid hóa đất, làm thay đổi độ pH và ảnh hưởng tiêu cực đến thảm thực vật, nguồn nước ngầm cũng như nước mặt. Theo nghiên cứu của Skinder et al.

(2014), Veseli et al. (2015) và Arunkumar et al. (2015), khí thải từ lò gạch, hoạt động công nghiệp và khu vực đô thị là những yếu tố góp phần gây ô nhiễm không khí, với SO₂ là thành phần phổ biến nhất. Đã có những đánh giá về tác động của các biện pháp can thiệp y tế cộng đồng đối với khí thải công nghiệp ở nhiều nơi, chẳng hạn như Cartagena, Tây Ban Nha (Cirera et al., 2009). Có thể thấy, khí thải công nghiệp chứa SO₂ có tác động trực tiếp đến môi trường và sức khỏe con người. Do đó, để giảm thiểu tác động tiêu cực của khí thải công nghiệp đối với con người và môi trường, các hoạt động cần thiết bao gồm xử lý khí thải tại nguồn, giám sát và đánh giá chất lượng không khí, dự báo về rủi ro sức khỏe để thực hiện các biện pháp can thiệp hiệu quả.

Công nghệ xử lý tại nguồn được áp dụng là một trong những biện pháp quan trọng để giảm nồng độ khí SO₂ gây ô nhiễm môi trường. Chmielewski et al. (2010) đã nghiên cứu công nghệ xử lý khí thải bằng chùm tia điện từ (Electron Beam Flue Gas Treatment_EBFGT). Kết quả nghiên cứu cho thấy công nghệ này có khả năng loại bỏ SO₂ và các chất ô nhiễm khác khỏi khí thải phát ra từ việc đốt dầu nhiên liệu nặng. Sun et al. (2018) đã phát triển công nghệ tích hợp quá trình khử lưu huỳnh sinh học với quá trình khử lưu huỳnh, khử nitrat bằng xúc tác đồng thời để xử lý khí thải và thu hồi lưu huỳnh.

Việc xử lý khí SO₂ bằng phương pháp lọc ướt cũng đã được nghiên cứu áp dụng trong những năm gần đây. Krzyzyska and Hutson (2012) đã nghiên cứu loại bỏ SO₂, NO_x và Hg từ khí thải mô phỏng bằng cách phun chất oxy hóa vào một bộ lọc đá vôi ẩm. Kết quả cho thấy pH của dung dịch ảnh hưởng đến phản ứng hóa học trong bộ lọc và việc loại bỏ các chất ô nhiễm. Park et al. (2015) đã nghiên cứu xử lý đồng thời NO và SO₂ bằng dung dịch NaClO₂ trong một tháp lọc ướt kết hợp với một bộ lọc điện tĩnh plasma. Nghiên cứu của Jayadi et al. (2021) tập trung vào thiết kế thiết bị bắt hạt, khí bằng cách phun nước vào bộ lọc. Trong các công nghệ xử lý khí thải bằng tháp hấp thụ, công nghệ hấp thụ có lớp đệm dùng để xử lý khí thải từ các hoạt động sản xuất công nghiệp khi nồng độ khí thải cao là công nghệ có tính khả thi cao. Hiệu quả xử lý của của tháp phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Các yếu tố này có thể được chia làm ba nhóm gồm: thông số vận hành, thông số thiết bị và các điều kiện khác (Zhao et al., 2021). Nhóm yếu tố vận hành được quan tâm nhiều nhất, gồm nhiều yếu tố như loại dung dịch hấp thụ, nồng độ dung dịch, tỷ lệ lỏng - khí, vận tốc dòng khí,... Trong nghiên cứu này, ba yếu tố (loại dung dịch hấp thụ, tỷ lệ lỏng - khí và nồng độ SO₂ trong khí đầu vào) được đánh giá ảnh hưởng đến hiệu suất xử lý

khí SO_2 của mô hình tháp đệm để tìm thông số vận hành phù hợp cho thiết bị.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và hóa chất

Trong nghiên cứu, khí SO_2 được sử dụng có độ tinh khiết 99,9% và được chứa trong bình thép có dung tích 60 Lit, được sản xuất tại Việt Nam.

Vật liệu được sử dụng làm vật liệu đệm bố trí trong tháp hấp thụ là các khối Raschig D20 sử hình trụ với kích thước $20 \times 20 \times 5$ mm (đường kính $\times$ chiều cao $\times$ độ dày), diện tích bề mặt $190 \text{ (m}^2/\text{m}^3\text{)}$, khối lượng riêng 620 kg/m^3 .

Dung dịch hấp thụ được sử dụng trong nghiên cứu gồm: nước thủy cục, dung dịch NaOH (độ tinh khiết 96,0%) được pha ở nồng độ 0,05M và dung dịch CaCO_3 (độ tinh khiết 99%) được pha ở nồng độ 0,05M.

2.2. Mô hình thí nghiệm

Nghiên cứu được thực hiện trên mô hình quy mô phòng thí nghiệm có sẵn với sơ đồ công nghệ như Hình 1. Mô hình gồm các bộ phận chính:

– Một tháp hấp thụ (4) bằng thép không gỉ dày 2 mm, có đường kính 200 mm, chiều cao 1.200 mm. Một bình thép chứa khí SO_2 được nối với ống dẫn khí ra có đường kính 42 mm. Bên trong ống thoát

phía trên tháp hấp thụ có bố trí lớp than hoạt tính để tách ẩm. Ngay phía dưới lớp tách ẩm có bố trí một vòi phun hoa sen đường kính 100 mm, lỗ phun 1 mm. Bên dưới vòi phun là vật liệu đệm Raschig được đổ đồng tự do trên lưới đỡ, lớp vật liệu này có thể thay đổi được chiều dày.

– Một bể bằng thép không gỉ (6) dạng hình hộp kích thước $500 \times 500 \times 500$ mm (dài $\times$ rộng $\times$ cao) được đặt bên dưới tháp hấp thụ. Tháp chứa dung dịch hấp thụ để bơm tưới lớp vật liệu đệm từ vòi phun và thu gom dung dịch hấp thụ sau khi chảy qua lớp vật liệu đệm để tuần hoàn lại.

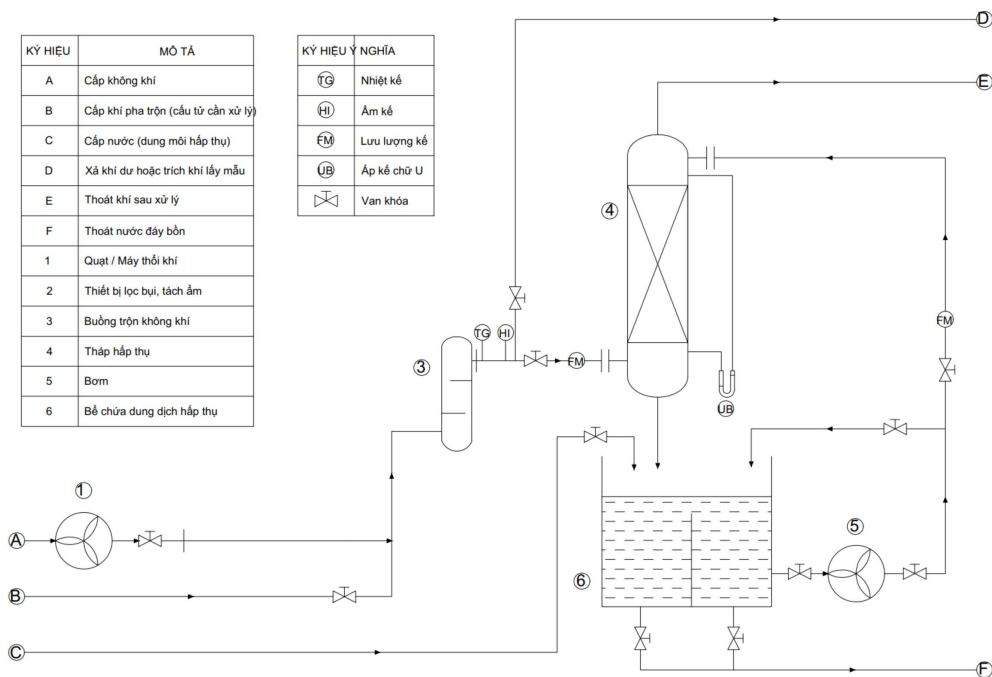
– Một bơm dung dịch (5) có lưu lượng tối đa $0,430 \text{ m}^3/\text{h}$ qua vòi phun bằng ống dẫn nhựa PVC đường kính 20 mm và một lưu lượng kế có thể điều chỉnh lưu lượng phun đến $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$.

– Một bình chứa cầu từ khí cần xử lý (khí SO_2) có van điều chỉnh lưu lượng (B).

– Một máy thổi khí (1) có thể điều chỉnh lưu lượng khí từ $40 \text{ m}^3/\text{h}$ đến $130 \text{ m}^3/\text{h}$.

– Một buồng trộn (3) có chức năng tạo hỗn hợp khí và gia nhiệt cho dòng khí.

Các bộ phận phụ trợ gồm: bộ gia nhiệt, bộ cảm biến nhiệt kế và ẩm độ, bộ đo chênh lệch áp suất dòng khí để điều chỉnh, theo dõi các thông số vận hành hệ thống.



Hình 1. Sơ đồ công nghệ hệ thống xử lý khí SO_2

Khi vận hành, dòng khí SO₂ tinh khiết từ bình chứa được dẫn qua ống dẫn vào buồng trộn với không khí và gia nhiệt với cảm biến nhiệt độ được lắp đặt trên đường ống để theo dõi nhiệt độ dòng khí, rồi đi vào tháp hấp thụ từ phía dưới và sau đó di chuyển theo hướng từ dưới lên. Dung dịch hấp thụ được phun từ vòi sen theo hướng từ trên xuống, tưới ướt lớp vật liệu đệm. Quá trình hấp thụ xảy ra khi dòng khí SO₂ đi qua và tiếp xúc với vật liệu đệm được tưới ướt và khi tiếp xúc trực tiếp với các hạt dung dịch. Dung dịch sau khi tiếp xúc và hấp thụ SO₂ chảy xuống đáy tháp đệm, được chứa trong bể chứa, sau đó được bơm hoàn lưu. Khí sạch sau qua tháp đệm được thải qua ống thải.

2.3. Bố trí thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm được thực hiện ứng với điều kiện cố định về nhiệt độ (40 ± 1°C), áp suất (1 atm) và nồng độ của khí SO₂ đầu vào. Để đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hấp thụ SO₂ của tháp đệm, các thí nghiệm tương ứng với các yếu tố được thực hiện gồm: chiều cao vật liệu đệm, tỷ lệ lỏng/khí và loại dung dịch hấp thụ.

2.3.1. Thí nghiệm 1: Ảnh hưởng của chiều cao vật liệu

Thí nghiệm được thực hiện với 3 nghiệm thức tương ứng với 3 chiều cao lớp vật liệu đệm. Các yếu tố còn lại được giữ cố định trong các thí nghiệm. Cụ thể:

- Chiều cao lớp vật liệu: 0,7 m; 0,5 m; và 0,3 m.
- Tỷ lệ L/G: 0,005.

Mỗi nghiệm thức được lặp lại 3 lần đối với từng loại dung dịch hấp thụ: H₂O, NaOH 0,05M và CaCO₃ 0,05M.

2.3.2. Thí nghiệm 2: Ảnh hưởng của tỷ lệ L/G

Thí nghiệm được thực hiện với 5 nghiệm thức ứng với 5 mức tỷ lệ L/G. Các yếu tố còn lại được giữ cố định trong các thí nghiệm. Cụ thể:

- Chiều cao vật liệu: được chọn từ thí nghiệm 1.
- Tỷ lệ L/G: 0,002; 0,003; 0,005; 0,007; 0,009.

Mỗi nghiệm thức được lặp lại 3 lần đối với từng loại dung dịch hấp thụ: H₂O, NaOH 0,05M và CaCO₃ 0,05M.

2.3.3. Thí nghiệm 3: Ảnh hưởng của loại dung dịch hấp thụ

Thí nghiệm được thực hiện với 3 nghiệm thức tương ứng với 3 loại dung dịch hấp thụ. Mỗi nghiệm

thức được lặp lại 3 lần. Các yếu tố còn lại được giữ cố định trong các thí nghiệm. Cụ thể:

- Chiều cao vật liệu: được chọn từ thí nghiệm 1.
- Tỷ lệ L/G: được chọn từ thí nghiệm 2.
- Loại dung dịch hấp thụ: H₂O, NaOH 0,05M và CaCO₃ 0,05M.

2.4. Phương pháp xác định nồng độ khí SO₂

Ở mỗi thí nghiệm, khí mô hình được vận hành ổn định sau 2 phút. Nồng độ khí được xác định bằng thiết bị đo khí thải công nghiệp KANE 9106 có tích hợp cảm biến đo khí SO₂. Nồng độ khí được đo trực tiếp lần lượt tại đầu vào và đầu ra mô hình như mô tả ở Hình 1. Kết quả đo được ghi nhận từ màn hình LCD của thiết bị với đơn vị của nồng độ là mg/m³.

2.5. Phương pháp đánh giá và xử lý số liệu

2.5.1. Đánh giá hiệu suất xử lý

Hiệu suất xử lý khí SO₂ của tháp đệm ứng với các điều kiện vận hành khác nhau được đánh giá qua nồng độ khí đo được ở đầu vào và đầu ra của mô hình hệ thống. Hiệu suất được tính theo công thức:

$$H(\%) = \frac{C_{\text{vào}} - C_{\text{ra}}}{C_{\text{vào}}} \times 100 \quad (1)$$

Trong đó:

$C_{\text{vào}}$: là nồng độ khí SO₂ đầu vào mô hình hệ thống xử lý (mg/m³),

C_{ra} : là nồng độ khí SO₂ sau khi qua hệ thống xử lý, thoát ra môi trường (mg/m³).

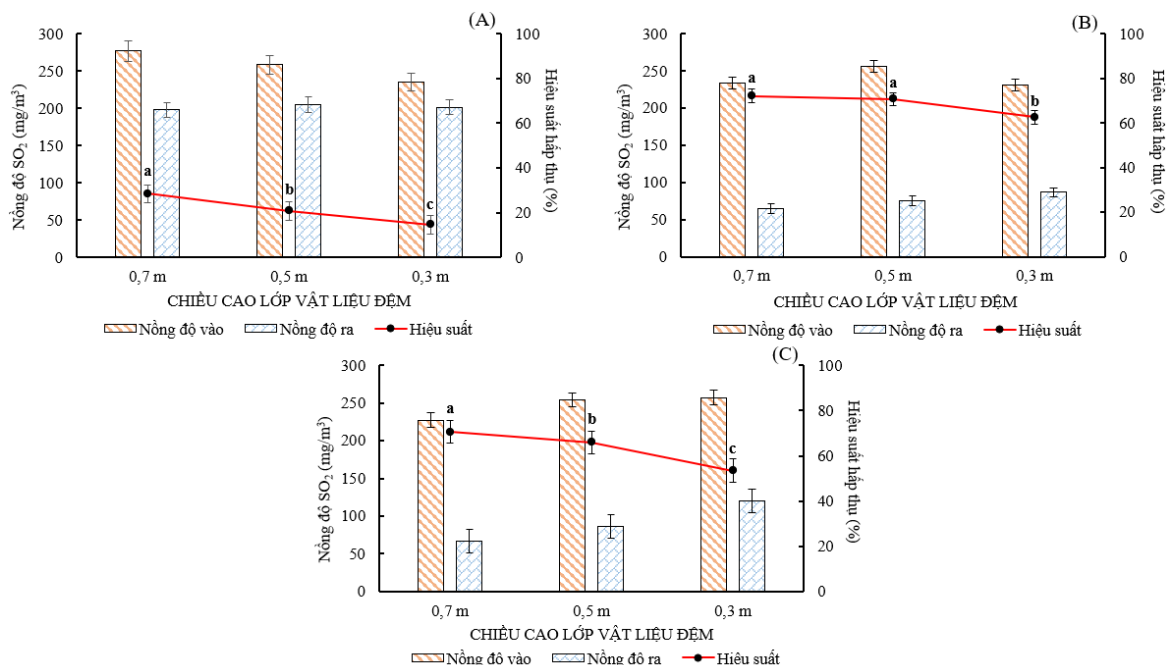
2.5.2. Xử lý số liệu

Phần mềm IBM SPSS phiên bản 20.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) được sử dụng để thống kê mô tả hiệu suất xử lý khí SO₂ của mô hình thí nghiệm, phép phân tích phương sai và hậu phương sai (kiểm định Duncan) được áp dụng để so sánh ảnh hưởng của các yếu tố đến hiệu suất xử lý SO₂ của mô hình.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của chiều cao vật liệu đến khả năng hấp thụ SO₂

Kết quả thí nghiệm ảnh hưởng của chiều cao vật liệu đến hiệu suất hấp thụ khí SO₂ của tháp đệm ứng với từng loại dung dịch hấp thụ H₂O, NaOH và CaCO₃ được trình bày ở Hình 2.



Hình 2. Nồng độ và hiệu suất hấp thụ khí SO_2 ứng với các chiều cao lớp vật liệu trong tháp hấp phụ với dung dịch hấp thụ là H_2O (A), NaOH (B) và CaCO_3 (C)

Ghi chú: Nồng độ SO_2 được trình bày dưới dạng trị trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn ($n = 3$). Các ký tự (a, b, c) khác nhau cho biết sự khác biệt có ý nghĩa giữa các nghiệm thức

Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng chiều cao của lớp vật liệu đệm ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất hấp thụ khí SO_2 , với xu hướng giảm hiệu suất khi chiều cao lớp vật liệu giảm. Khi dung dịch H_2O được sử dụng ở chiều cao 0,7 m, hiệu suất hấp thụ cao nhất đạt 28,51%, nhưng khi giảm chiều cao xuống 0,5 m và 0,3 m, hiệu suất lần lượt giảm còn 20,76% và 14,57%. Dung dịch NaOH có khả năng hấp thụ SO_2 vượt trội hơn H_2O , với hiệu suất cao nhất là 72,18% tại chiều cao 0,7 m, giảm nhẹ xuống 70,74% ở 0,5 m và 62,58% ở 0,3 m. Tương tự, dung dịch CaCO_3 cũng thể hiện khả năng hấp thụ tốt với hiệu suất cao nhất đạt 70,62% ở chiều cao 0,7 m, giảm xuống 65,87% và 53,35% khi chiều cao giảm còn 0,5 m và 0,3 m tương ứng. Điều này chỉ ra rằng chiều cao của lớp vật liệu đệm càng lớn thì thời gian tiếp xúc giữa khí SO_2 và dung dịch càng tăng, dẫn đến hiệu quả hấp thụ tốt hơn. Xu hướng tăng hiệu suất khi chiều cao lớp vật liệu đệm tăng cũng đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước đây của Phạm (2007).

Kết quả thống kê cho thấy hiệu suất hấp thụ ở chiều cao 0,7 m khác biệt rất có ý nghĩa thống kê ($\alpha < 0,05$) so với hai chiều cao còn lại (0,5 m và 0,3 m) đối với hai dung dịch H_2O và CaCO_3 . Trong khi đó, với dung dịch NaOH không có sự khác biệt về hiệu

suất hấp thụ giữa chiều cao 0,7 m và 0,5 m ($\alpha > 0,05$). Do đó, chiều cao lớp vật liệu đệm phù hợp được chọn là 0,7 m.

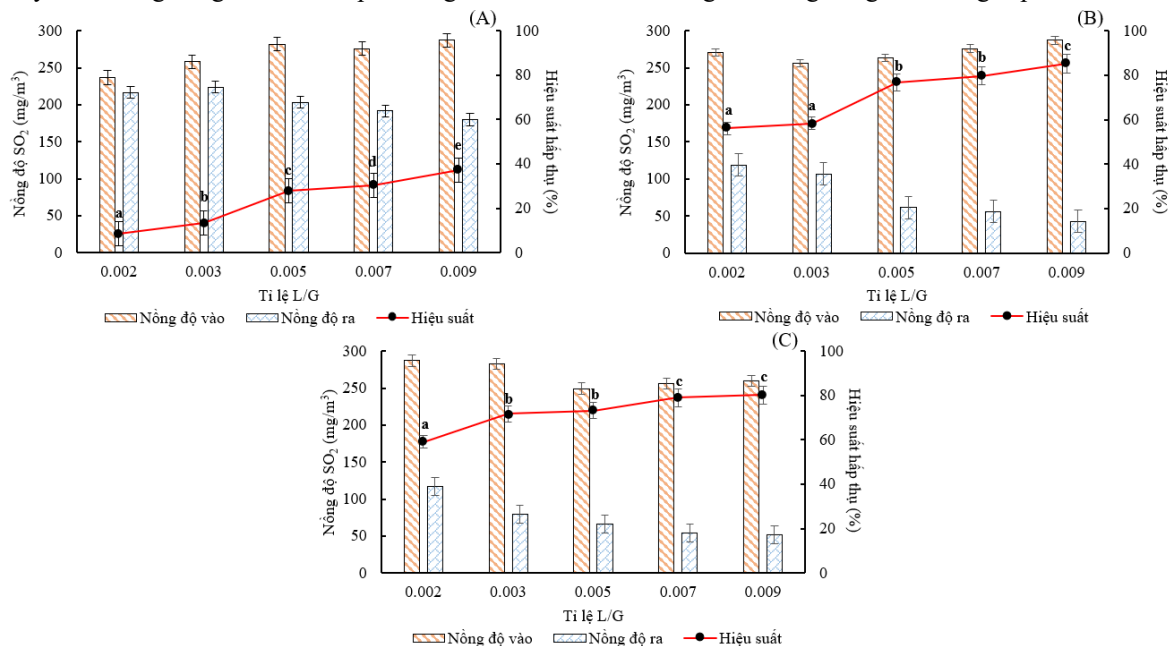
3.2. Ảnh hưởng của tỷ lệ L/G đến khả năng hấp thụ SO_2

Bên cạnh yếu tố chiều cao của lớp vật liệu đệm, tỷ lệ L/G cũng đóng vai trò quan trọng, ảnh hưởng đến hiệu suất hấp thụ của hệ thống xử lý khí thải. Kết quả được thể hiện ở Hình 3 cho thấy rõ tác động của tỷ lệ L/G lên hiệu suất hấp thụ khí SO_2 , với xu hướng tăng hiệu quả hấp thụ khi tỷ lệ L/G tăng đối với các dung dịch H_2O , NaOH và CaCO_3 .

Hiệu suất hấp thụ SO_2 của dung dịch H_2O tăng dần khi tỷ lệ L/G tăng, từ 8,44% ở tỷ lệ L/G 0,002 lên 37,29% ở tỷ lệ 0,009. Ở các tỷ lệ trung gian 0,003, 0,005 và 0,007 được ghi nhận các mức hiệu suất hấp thụ tương ứng là 13,40%, 27,81% và 30,47%. Dù có sự gia tăng rõ rệt về hiệu suất, H_2O vẫn thể hiện khả năng hấp thụ SO_2 thấp hơn so với NaOH và CaCO_3 , do phản ứng hóa học yếu giữa H_2O và SO_2 . Ngược lại, dung dịch NaOH có hiệu suất hấp thụ SO_2 cao và cũng tăng khi tỷ lệ L/G tăng (Hình 3 (B)). Tại tỷ lệ L/G 0,002, hiệu suất đạt 56,01%, và khi tăng tỷ lệ L/G lên 0,009, hiệu suất đã đạt 85,01%. Ở các tỷ lệ 0,003, 0,005 và 0,007 lần

lượng có hiệu suất 58,33%, 76,70%, và 79,68%. Điều này chỉ ra rằng dung dịch NaOH phản ứng mạnh mẽ

với SO_2 và hiệu suất hấp thụ tăng đáng kể khi tỷ lệ L/G tăng do lượng dung dịch cung cấp lớn hơn.



Hình 3. Nồng độ và hiệu suất hấp thụ khí SO_2 ứng với các tỷ lệ L/G với dung dịch hấp thụ là H_2O (A), NaOH (B) và CaCO_3 (C)

Ghi chú: Nồng độ SO_2 được trình bày dưới dạng trị trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn ($n = 3$). Các ký tự (a, b, c) khác nhau cho biết sự khác biệt có ý nghĩa giữa các nghiệm thức

Đối với dung dịch CaCO_3 , hiệu suất hấp thụ SO_2 cũng tăng theo tỷ lệ L/G (Hình 3 (C)), nhưng mức tăng ít biến động hơn so với NaOH. Ở tỷ lệ L/G 0,002, hiệu suất đạt được là 59,13% và khi tăng lên 0,009, hiệu suất đạt 80,24%. Các tỷ lệ còn lại 0,003, 0,005 và 0,007 cho kết quả lần lượt là 71,68%, 73,22% và 78,93%. Điều này cho thấy dung dịch CaCO_3 cần tỷ lệ L/G lớn hơn để đạt hiệu suất tối ưu. Nhưng tốc độ tăng hiệu quả giảm dần khi tỷ lệ L/G vượt quá 0,007, có thể do hiện tượng bão hòa trong quá trình hấp thụ, dung dịch không còn khả năng hấp thụ SO_2 hiệu quả hơn ngay cả khi tỷ lệ dung dịch tiếp tục tăng. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Zhao et al. (2021), điều này cho thấy sự thay đổi tỷ lệ lỏng/khí có thể cải thiện hiệu suất loại bỏ SO_2 . Tuy nhiên, tỷ lệ L/G không nên vượt quá giới hạn thiết kế của thiết bị, vì khi tỷ lệ L/G quá cao có thể gây ngập trong tháp hấp thụ, làm gián đoạn sự lưu thông khí và thậm chí có thể dẫn đến tình trạng dòng khí đảo chiều nếu hệ thống bị hở. Nhìn chung, khi tỷ lệ L/G tăng, lượng dung dịch hấp thụ nhiều hơn, giúp tăng cường quá trình tiếp xúc và tối ưu hóa hiệu quả hấp thụ khí SO_2 .

Kết quả phân tích thống kê cho thấy hiệu suất hấp thụ SO_2 ở tỷ lệ L/G 0,009 có sự khác biệt có ý

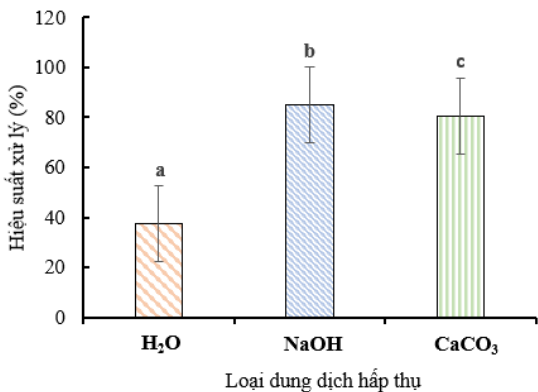
nghĩa thống kê ($\alpha < 0,05$) so với các tỷ lệ khác đối với dung dịch H_2O và NaOH. Đối với CaCO_3 , không có sự khác biệt về hiệu suất giữa tỷ lệ 0,007 và 0,009 ($\alpha > 0,05$), nhưng khác biệt so với các tỷ lệ còn lại. Do đó, tỷ lệ L/G 0,009 được chọn cho các thí nghiệm sau trong nghiên cứu này.

3.3. Ảnh hưởng loại dung dịch hấp thụ đến khả năng hấp thụ SO_2

Để đánh giá tác động của loại dung dịch đến hiệu suất hấp thụ SO_2 , thí nghiệm được thực hiện lần lượt với ba dung dịch hấp thụ gồm H_2O , NaOH và CaCO_3 trong các điều kiện vận hành giống nhau, với chiều cao vật liệu đệm là 0,7 m và tỷ lệ L/G phù hợp là 0,009. Kết quả thí nghiệm được thể hiện ở Hình 4 cho thấy loại dung dịch hấp thụ có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất hấp thụ khí SO_2 , với sự khác biệt rõ rệt giữa dung dịch H_2O , NaOH và CaCO_3 .

Kết quả thể hiện ở Hình 4 cho thấy dung dịch H_2O có hiệu suất hấp thụ SO_2 thấp nhất, chỉ đạt 37,29%. Điều này phản ánh rõ ràng khả năng hấp thụ kém của H_2O đối với SO_2 . Mặc dù SO_2 có thể bị giữ một phần trong H_2O qua quá trình hòa tan, nhưng vì không có phản ứng hóa học đáng kể để giữ SO_2 lại dưới dạng hợp chất bền vững nên hiệu suất

hấp thụ tổng thể thấp. Trong khi đó, dung dịch NaOH có hiệu suất hấp thụ SO_2 cao nhất (85,01%). Hiệu suất này cho thấy dung dịch NaOH phản ứng hóa học mạnh với SO_2 , tạo thành các sản phẩm như natri sunfit (Na_2SO_3) và natri sunfat (Na_2SO_4), giúp loại bỏ hiệu quả khí SO_2 khỏi dòng khí. Dung dịch CaCO_3 cũng cho thấy khả năng hấp thụ SO_2 tốt với hiệu suất đạt 80,24%, chỉ thấp hơn so với dung dịch NaOH. Dung dịch CaCO_3 phản ứng với SO_2 tạo ra canxi sunfit (CaSO_3) và canxi sunfat (CaSO_4), giúp loại bỏ khí SO_2 khỏi dòng khí thải. Dựa vào hiệu suất hấp thụ có thể kết luận NaOH là dung dịch có hiệu quả hấp thụ cao nhất, vượt trội so với H_2O và CaCO_3 .



Hình 4. Ảnh hưởng dung dịch hấp thụ đến hiệu suất hấp thụ khí SO_2

Bảng 1. Các loại dung dịch sử dụng trong nghiên cứu

Loại dung dịch	H_2O	NaOH	CaCO_3
Hiệu suất ^a	Thấp (37,29%)	Cao (85,01%)	Cao (80,24%)
Phổ biến ^b	Rất phổ biến	Phổ biến	Rất phổ biến
Chi phí ^c	3.500 – 18.000 VNĐ/m ³ *	96.000 VNĐ/kg	20.000 VNĐ/kg
Vận hành ^d	Đễ	Đễ	Đễ

Ghi chú: a: Được lấy từ kết quả của nghiên cứu, b: Được đánh giá từ mức độ dễ tìm kiếm, mua nguyên liệu, c: Được đánh giá từ giá thị trường, d: Được đánh giá dựa vào mức độ dễ vận hành của hệ thống xử lý như: bảo trì, nạp liệu, *: Giá nước sinh hoạt cho đô thị.

Trong thực tế hoạt động công nghiệp, việc lựa chọn dung dịch hấp thụ không chỉ dựa trên hiệu suất xử lý mà còn phụ thuộc vào các yếu tố khác như chi phí, tính sẵn có của nguyên liệu và yêu cầu cụ thể của quá trình xử lý.

3.4. Ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố đến khả năng hấp thụ SO_2

3.4.1. Ảnh hưởng tương tác của dung dịch hấp thụ và chiều cao vật liệu đệm

Sự tương tác giữa loại dung dịch và chiều cao của lớp vật liệu đệm chỉ ra rằng dung dịch khác nhau

Ghi chú: Hiệu suất xử lý được trình bày dưới dạng trị trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn ($n=3$). Các ký tự (a, b, c) khác nhau cho biết sự khác biệt có ý nghĩa giữa các nghiệm thử ở mức ý nghĩa 5%.

Natri hydroxit (NaOH) là một chất hấp thụ phổ biến trong công nghiệp, đặc biệt để loại bỏ khí axit như SO_2 từ khí thải. Điển hình như theo quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 22:2009/BTNMT về khí thải công nghiệp nhiệt điện với nhiên liệu sử dụng là khí hóa lỏng, khi nhà máy có hệ số công suất $P \leq 300$ MW thì nồng độ tối đa của SO_2 là 300 mg/m^3 . Theo phản ứng hóa học thì 1 mol NaOH tác dụng với 32 g SO_2 . Khi đó 1 mol NaOH có thể hấp phụ được SO_2 có trong $106,7 \text{ m}^3$ khí thải ở nồng độ tối đa theo quy chuẩn này. Điều này cho thấy NaOH là một dung dịch khả thi và hiệu quả trong việc hấp thụ khí thải, ngay cả khi nồng độ SO_2 tăng cao hơn mức quy chuẩn cho phép. Việc NaOH được sử dụng giúp loại bỏ khí SO_2 một cách đáng kể, cải thiện chất lượng không khí và đáp ứng các yêu cầu về môi trường. Mặt khác, các nghiên cứu trước đây có sự khác biệt về điều kiện thí nghiệm và thiết bị xử lý, nhưng đều cho thấy rằng các thông số vận hành, thiết kế, và loại thiết bị đều có ảnh hưởng khác nhau đến hiệu quả loại bỏ khí độc. Vì vậy, để đánh giá và lựa chọn dung dịch hấp thụ phù hợp, có thể xem xét các tiêu chí sau: hiệu suất hấp thụ, tính phổ biến, chi phí thấp và dễ vận hành. Dưới đây là bảng (Bảng 1) tóm tắt về 03 loại dung dịch đã được nghiên cứu:

kết hợp với các chiều cao khác nhau có sự khác biệt đáng kể ở mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$. Khi dung dịch H_2O và chiều cao vật liệu đệm 0,3 m được phối hợp sử dụng, hiệu suất hấp thụ thấp nhất được ghi nhận là $14,57 \pm 0,37\%$. Còn trong trường hợp dung dịch NaOH và lớp vật liệu đệm với chiều cao 0,7 m thì hiệu suất hấp thụ cao nhất đạt $72,18 \pm 1,10\%$. Như vậy, khi chiều cao lớp vật liệu đệm được tăng (tăng diện tích bề mặt tiếp xúc) thì làm tăng khả năng tiếp xúc giữa pha khí và pha lỏng. Khi diện tích tiếp xúc giữa hai pha tăng và kết hợp với loại dung dịch hấp thụ có tính hấp thụ cao thì hiệu suất xử lý SO_2 càng cao. Sự gia tăng hiệu suất loại bỏ SO_2 khi

tăng chiều cao lớp vật liệu đệm cũng đã xác nhận trong nghiên cứu Ghosh et al. (2024) và của Zhu et al. (2015).

Kết quả ở một số nghiên cứu trước đây cũng cho thấy rằng sự kết hợp giữa chiều cao vật liệu đệm và dung dịch hấp thụ như NaOH hoặc CaCO_3 cải thiện đáng kể hiệu suất hấp thụ SO_2 (Zhao et al., 2021, Wang et al., 2015). Trong nghiên cứu này, hai dung dịch NaOH và CaCO_3 đã cho thấy có hiệu suất xử lý khí SO_2 cao hơn so với nước. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy rằng, ở chiều cao lớp vật liệu đệm 0,7 m và dung dịch hấp thụ NaOH đã tăng hiệu suất xử lý lên gấp 5 lần so với trường hợp chiều cao thấp (0,3 m) kết hợp với H_2O . Tóm lại, sự kết hợp giữa chiều cao và dung dịch hấp thụ đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện hiệu quả xử lý khí SO_2 .

3.4.2. Ảnh hưởng tương hỗ của dung dịch hấp thụ và tỷ lệ L/G

Kết quả phân tích phương sai hai yếu tố (dung dịch hấp thụ và tỷ lệ L/G) cho thấy có sự khác biệt về khả năng hấp thụ khí SO_2 khi phối hợp dung dịch hấp thụ và tỷ lệ L/G. Cụ thể, dung dịch hấp thụ H_2O với tỷ lệ L/G 0,002 cho hiệu suất hấp thụ thấp nhất là $8,44 \pm 1,38\%$. Trong khi đó, sự kết hợp giữa dung dịch NaOH và tỷ lệ L/G 0,009 mang lại hiệu suất hấp thụ cao nhất đạt $85,01 \pm 1,19\%$.

Kết quả thí nghiệm đã cho thấy rằng hiệu suất của quá trình hấp thụ phụ thuộc rất nhiều vào việc lựa chọn dung dịch hấp thụ và tỷ lệ L/G. Khi hai yếu tố này được phối hợp thích hợp thì hiệu suất hấp thụ tăng lên đáng kể. Khi dung dịch NaOH được sử dụng với tỷ lệ L/G 0,009 thì hiệu suất hấp thụ cao hơn khoảng 10 lần so với trường hợp khi dùng nước với tỷ lệ L/G 0,002. Việc sử dụng dung dịch hấp thụ

với tỷ lệ L/G phù hợp giúp cải thiện đáng kể hiệu quả hấp thụ.

Kết quả nghiên cứu của Ghosh et al. (2024) cho thấy rằng khi tỷ lệ L/G tăng lên thì chiều cao của tháp hấp thụ có xu hướng giảm, do diện tích tiếp xúc giữa pha lỏng và pha khí tăng cùng với mật độ phun. Kết quả từ nghiên cứu của Pham & Nguyen (2013) cũng chỉ ra rằng hiệu suất hấp thụ tăng tỷ lệ thuận với tỷ lệ L/G, mặc dù không phải lúc nào sự gia tăng này cũng lớn. Kết quả thực nghiệm của nghiên cứu hiện tại cũng có phát hiện tương tự là tỷ lệ L/G có cùng xu hướng với hiệu suất hấp thụ khí SO_2 trong tháp đệm.

4. KẾT LUẬN

Khả năng hấp thụ khí SO_2 của tháp đệm phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Kết quả nghiên cứu này đã cho thấy khi vận hành mô hình tháp đệm ứng với sự thay đổi của chiều cao lớp vật liệu đệm, tỷ lệ lỏng - khí và loại dung dịch hấp thụ thì hiệu suất hấp thụ khí SO_2 thay đổi theo. Với chiều cao lớp vật liệu đệm 0,7 m, tỷ lệ L/G 0,009 và dung dịch hấp thụ NaOH 0,05 thì hiệu suất loại bỏ SO_2 cao nhất. Do vậy, để thiết bị hấp thụ xử lý khí thải được vận hành hiệu quả thì cần quan tâm kết hợp các yếu tố này một cách phù hợp. Ngoài ra, các yếu tố khác như thông số thiết bị và các điều kiện khác như nhiệt độ dòng khí, nhiệt độ và pH của dung dịch hấp thụ cần được nghiên cứu thêm.

LỜI CẢM ƠN

Đề tài nghiên cứu được hỗ trợ trang thiết bị thuộc dự án ODA ở Phòng thí nghiệm Kiểm soát Ô nhiễm không khí – Trường Đại học Cần Thơ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Arunkumar, R., & Shyamala, K. (2015). Analysis of air pollutant levels using artificial neural network in Chennai city. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 1(4), 361-367.
- Chmielewski, A. G., Ostapczuk, A., & Licki, J. (2010). Electron beam technology for multipollutant emissions control from heavy fuel oil-fired boiler. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(8), 932-938. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.8.932>
- Cirera, L., Rodríguez, M., Giménez, J., Jiménez, E., Saez, M., Guillén, J. J., & Navarro, C. (2009). Effects of public health interventions on industrial emissions and ambient air in Cartagena, Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 16, 152-161. <https://doi.org/10.1007/s11356-008-0091-3>
- Ghosh, D., Biswas, D., & Datta, A. (2024). Absorption height in spray tower for wet-limestone process in flue gas desulphurization. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.02.001>
- Hasanbeigi, A., Khanna, N., & Price, L. (2017). Air pollutant emissions projections for the cement and steel industry in China and the impact of emissions control technologies. *Energy Analysis and Environmental Impacts Division. Lawrence Berkeley National Laboratory. China Energy Group*. 47 pp. <https://doi.org/10.2172/1372903>
- Jayadi, H., Hendrarinata, F., Suyanto, B., & Sunaryo, S. (2021). Chimney filter model wet scrubber to

- reduce air pollutant emissions on the incinerator. *Health Notions*, 5(2), 41-45.
<https://doi.org/10.33846/hn50201>
- Krzyzynska, R., & Hutson, N. D. (2012). Effect of solution pH on SO₂, NO_x, and Hg removal from simulated coal combustion flue gas in an oxidant-enhanced wet scrubber. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(2), 212-220.
<https://doi.org/10.1080/10473289.2011.642951>
- Likus-Cieřlik, J., & Pietrzykowski, M. (2021). Sulfur Contamination and Environmental Effects: A Case Study of Current SO Industrial Emission by Biomonitoring and Regional Post-mining hot-spots. *The Open Biotechnology Journal*, 15(1), 82-96.
<https://doi.org/10.2174/1874070702115010082>
- Lou, L., Li, J., & Zhong, S. (2021). Sulfur dioxide (SO₂) emission reduction and its spatial spillover effect in high-tech industries: Based on panel data from 30 provinces in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 31340-31357.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-12755-7>
- Nguyen V. P., Ho, Q. B., Vu, H. N. K., Nguyen, T. T., Le, Q., Rakholia, R., & Carbajo, R. S. (2022). Impacts of air pollution on public health in Ho Chi Minh city and develop mitigation measures. *Vietnam Journal online: Environmental Magazine*, 01/2022, 44-50 (in Vietnamese).
- Park, H.W., Choi, S., & Park, D.W. (2015). Simultaneous treatment of NO and SO₂ with aqueous NaClO₂ solution in a wet scrubber combined with a plasma electrostatic precipitator. *Journal of hazardous materials*, 285, 117-126.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.11.040>
- Pham, D. T. (2007). Filtering smoke from the FO oil furnace using a limestone cushion tower. *Labor Protection Journal*, 6/2007, 15-18 (in Vietnamese).
- Pham, T. T. H., & Nguyen, B. (2013). Optimizing the treatment process for SO₂ in the waste gas from incinerators by experimental planning method. *Journal of Science and Technology and Technical Universities*, 92, 152-156 (in Vietnamese).
- Skinder, B. M., Sheikh, A. Q., Pandit, A. K., & Ganai, B. A. (2014). Brick kiln emissions and its environmental impact: A Review. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 6(1), 1-11.
<https://doi.org/10.5897/JENE2013.0423>
- Sun, J., Li, L., Zhou, G., Wang, X., Zhang, L., Liu, Y., & Jiang, F. (2018). Biological sulfur reduction to generate H₂S as a reducing agent to achieve simultaneous catalytic removal of SO₂ and NO and sulfur recovery from flue gas. *Environmental Science & Technology*, 52(8), 4754-4762.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06551>
- Veseli, B., & Kristo, I. (2015). Air Pollution in Urban and Suburban Areas in Kosovo. Anglisticum. *Journal of the Association-Institute for English Language and American Studies*, 4(4), 87-89.
- Zhao, M., Xue, P., Liu, J., Liao, J., & Guo, J. (2021). A review of removing SO₂ and NO_x by wet scrubbing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101451.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101451>
- Zhu, J., Ye, S. C., Bai, J., Wu, Z. Y., Liu, Z. H., & Yang, Y. F. (2015). A concise algorithm for calculating absorption height in spray tower for wet limestone-gypsum flue gas desulfurization. *Fuel processing technology*, 129, 15-23.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.002>
- Zvereva, E. L., Toivonen, E., & Kozlov, M. V. (2008). Changes in species richness of vascular plants under the impact of air pollution: a global perspective. *Global Ecology and Biogeography*, 17(3), 305-319.
<https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00366.x>
- Wang, Z., Peng, Y., Ren, X., Gui, S., & Zhang, G. (2015). Absorption of sulfur dioxide with sodium hydroxide solution in spray columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(35), 8670-8677.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02146>