

BỘ GIÁO DỤC

VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Nguyễn Thị Phương Thảo

TÊN ĐỀ TÀI

**NGHIÊN CỨU XỬ LÝ MỘT SỐ THÀNH PHẦN KHÍ THẢI BẰNG
THIẾT BỊ LY TÂM TIẾP XÚC**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT HÓA HỌC, VẬT LIỆU,
LUYỆN KIM VÀ MÔI TRƯỜNG**

Hà Nội - 2026

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Nguyễn Thị Phương Thảo

**TÊN ĐỀ TÀI LUẬN VĂN
NGHIÊN CỨU XỬ LÝ MỘT SỐ THÀNH PHẦN KHÍ THẢI BẰNG
THIẾT BỊ LÝ TÂM TIẾP XÚC**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT HÓA HỌC, VẬT LIỆU,
LUYỆN KIM VÀ MÔI TRƯỜNG**

Ngành: Kỹ thuật môi trường

Mã số: 8 52 03 20

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to GS.TS. Trịnh Văn Tuyên.

GS.TS. Trịnh Văn Tuyên

Hà Nội - Năm 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề tài nghiên cứu trong luận văn này là công trình nghiên cứu của tôi dựa trên những tài liệu, số liệu do chính tôi tự tìm hiểu và nghiên cứu. Chính vì vậy, các kết quả nghiên cứu đảm bảo trung thực và khách quan nhất. Đồng thời, kết quả này chưa từng xuất hiện trong bất cứ một nghiên cứu nào. Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực nếu sai tôi hoàn chịu trách nhiệm trước pháp luật.

Hà Nội, ngày 26 tháng 6 năm 2026

Học viên



Nguyễn Thị Phương Thảo

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành luận văn ***“Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc”*** bên cạnh những nỗ lực của bản thân, em xin gửi lời cảm ơn chân thành nhất đến Quý thầy cô giáo trong khoa Công nghệ môi trường, Ban lãnh đạo Học viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Đặc biệt, em xin gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất đến GS.TS. Trịnh Văn Tuyên đã tận tình chỉ bảo, hướng dẫn và giúp đỡ em rất nhiều trong quá trình làm luận văn Thạc sĩ.

Tiếp theo, em xin chân thành cảm ơn Ban lãnh đạo các phòng ban của Viện Khoa học công nghệ Năng lượng và Môi trường đã tạo điều kiện tốt nhất để em tìm hiểu và nắm rõ các vấn đề liên quan đến quá trình làm luận văn tại Quý Cơ quan.

Em cũng xin gửi lời cảm ơn đến các anh (chị), bạn bè đồng nghiệp làm việc tại Phòng Công nghệ xử lý chất thải rắn và khí thải đã nhiệt tình giúp đỡ cũng như tạo điều kiện về cơ sở vật chất và hướng dẫn em hoàn thành chương trình học tập và thực hiện luận văn.

Trong quá trình làm bài luận văn thạc sĩ, em cảm thấy rằng mình đã học tập và trải nghiệm được nhiều điều vô cùng hữu ích mà có lẽ nếu không tự mình trải qua thì sẽ không bao giờ có thể biết được. Từ đó để em học hỏi và rút kinh nghiệm cho những bài luận sau và xa hơn là trong quá trình làm việc sau này của mình.

Nghiên cứu này được thực hiện dưới sự hỗ trợ của đề tài hỗ trợ hoạt động nghiên cứu khoa học cho nghiên cứu viên cao cấp ***“Nghiên cứu xử lý và thu hồi một số thành phần khí thải công nghiệp bằng quá trình ly tâm tiếp xúc hướng tới phát thải ròng bằng không”***, do GS.TS. Trịnh Văn Tuyên làm chủ nhiệm, mã số đề tài NCVCC31.03/24-25.

Bài luận văn của em tất nhiên sẽ không thể tránh được những hạn chế, thiếu sót. Em rất mong nhận được những ý kiến đóng góp và nhận xét chân thành từ Quý thầy cô và mọi người.

Em xin chân thành cảm ơn!

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

TT	Từ viết tắt	Ý nghĩa tiếng Anh	Ý nghĩa tiếng Việt
1	CEPI	Confederation of European Paper Industries	Liên đoàn công nghệ giấy Châu Âu
2	CFCs	Chlorofluorocarbon	Nhóm các hợp chất hữu cơ nhân tạo chứa Clo, Flo và Cacbon
3	CO ₂ /CO ₂ eq	Carbon Dioxide Equivalent	Cacbon dioxit quy đổi tương đương
4	CPTPP	Comprehensive and Progressive Agreement for Trans-Pacific Partnership	Hiệp định Đối tác Toàn diện và Tiến bộ xuyên Thái Bình Dương
5	EVFTA	EU-Vietnam Free Trade Agreement	Hiệp định thương mại tự do Việt Nam - EU
6	GDP	Gross Domestic Product	Tổng sản phẩm quốc nội
7	GHG	Greenhouse Gas	Khí nhà kính
8	HGRPB	High-Gravity Rotating Packed Bed	Thiết bị ly tâm tiếp xúc tốc độ cao
9	HiGee	High Gravity	Trọng lực cao (Công nghệ siêu trọng lực)
10	LWC	Light Weight Coated	Giấy tráng nhẹ
11	PPI	Pulp and Paper Industry	Ngành công nghiệp bột giấy và giấy
12	RPB	Rotating Packed Bed	Thiết bị tiếp xúc ly tâm
13	rpm	Revolutions per minute	Số vòng quay mỗi nhịp
14	TPM	Total Particulate Matter	Tổng lượng bụi
15	UCAR	University Corporation for Atomspheric Research	Trung tâm Khoa học Giáo dục (Mỹ)
16	VOCS	Volatile Organic Compounds	Các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi
17	VPPA	Vietnam Pulp and Paper Association	Hiệp hội Giấy và Bột giấy Việt Nam

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN.....	5
1.1. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH PHÁT SINH KHÍ THẢI NGÀNH SẢN XUẤT GIẤY	5
1.1.1. Hiện trạng phát sinh khí thải ngành sản xuất giấy trên thế giới	5
1.1.2. Hiện trạng phát sinh khí thải ngành sản xuất giấy tại Việt Nam	8
1.2. TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG PHÁP XỬ LÝ KHÍ THẢI BẰNG PHƯƠNG PHÁP HẤP THỤ	11
1.2.1. Kỹ thuật hấp thụ trong xử lý khí thải công nghiệp	11
1.2.2. Tháp hấp thụ truyền thống trong xử lý khí thải	14
1.3. Tổng quan quá trình ly tâm tiếp xúc trong xử lý khí thải	16
1.3.1. Cấu tạo và cơ chế vận hành của thiết bị ly tâm tiếp xúc	16
1.3.2. Tình hình nghiên cứu về thiết bị ly tâm tiếp xúc trong xử lý khí thải	18
1.4. Sự cần thiết phải triển khai nghiên cứu.....	21
CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	23
2.1. ĐỐI TƯỢNG, MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU	23
2.1.1. Khí thải.....	23
2.1.2. Hệ thống xử lý khí thải quy mô phòng thí nghiệm	23
2.1.3. Hóa chất, thiết bị	25
2.2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	25
2.2.1. Nguyên lý thực nghiệm.....	25
2.2.2. Phương pháp thực nghiệm	26
2.2.3. Phương pháp phân tích.....	27
2.2.4. Phương pháp tính toán	28
2.2.5. Phương pháp xử lý số liệu.....	28
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN	29
3.1. SO SÁNH HIỆU QUẢ XỬ LÝ KHÍ THẢI GIỮA THÁP HẤP THỤ VÀ THIẾT BỊ HP2R	29

3.1.1. Xử lý SO_2	29
3.1.2. Xử lý CO_2	31
3.2. KHẢO SÁT YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG VÀ THÔNG SỐ VẬN HÀNH CỦA HỆ THỐNG PC-HP2R TRONG XỬ LÝ ĐỒNG THỜI KHÍ THẢI	34
3.2.1. Ảnh hưởng của tốc độ quay thiết bị HP2R	34
3.2.2. Ảnh hưởng của lưu lượng khí	37
3.2.3. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ	40
3.2.4. Xử lý đồng thời và tiếp diễn khí thải bằng hệ thiết bị PC-HP2R và đánh giá chất lượng dung dịch hấp thụ sau xử lý	44
3.3. TÍNH TOÁN HIỆU QUẢ KINH TẾ	48
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	49
TÀI LIỆU THAM KHẢO	50
PHỤ LỤC	57

DANH MỤC BẢNG

Bảng 2. 1. Thông số kỹ thuật chính hệ thiết bị xử lý khí thải PC-HP2R.....	24
Bảng 3. 1. Thành phần dung dịch hấp thụ sau bão hòa.....	47
Bảng 3. 2. Tổng hợp chi phí và lợi ích của mô hình xử lý khí thải kết hợp thu hồi carbon quy mô 1000 m ³ /h	48
Phụ lục 1. Ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu quả xử lý SO ₂ tại tháp hấp thụ.	58
Phụ lục 2. Ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu quả xử lý SO ₂ tại thiết bị HP2R	58
Phụ lục 3. Ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu quả xử lý CO ₂ tại tháp hấp thụ	59
Phụ lục 4. Ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu quả xử lý CO ₂ tại thiết bị HP2R	59
Phụ lục 5. Ảnh hưởng của tốc độ quay tới hiệu quả xử lý CO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	60
Phụ lục 7. Ảnh hưởng của lưu lượng khí tới hiệu quả xử lý CO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	61
Phụ lục 8. Ảnh hưởng của lưu lượng khí tới hiệu quả xử lý SO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	61
Phụ lục 9. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại tháp PC (Q _{L1}) tới hiệu quả xử lý CO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	62
Phụ lục 10. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại tháp PC (Q _{L1}) tới hiệu quả xử lý SO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R.....	62
Phụ lục 11. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại thiết bị HP2R (Q _{L2}) tới hiệu quả xử lý CO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	63
Phụ lục 12. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại thiết bị HP2R (Q _{L2}) tới hiệu quả xử lý CO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	63
Phụ lục 13. Diễn biến hiệu quả xử lý CO ₂ và SO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	64

DANH MỤC HÌNH

Hình 1. 1. Tỷ trọng phát thải CO ₂ công nghiệp và tỷ trọng tiêu thụ năng lượng cuối cùng theo phân ngành.....	6
Hình 1. 2. Sản lượng bột giấy và giấy theo từng quốc gia [16]	7
Hình 1. 4. Phát thải khí nhà kính từ các yếu tố đầu vào khác nhau trong vòng đời sản phẩm giấy (a) thùng carton, (b) giấy viết, (c) giấy tissue [26].....	9
Hình 1. 5. Phát thải GHG của các sản phẩm giấy từ nguyên liệu nguyên sinh và từ nguyên liệu tái chế	10
Hình 1. 1. Cấu tạo của tháp hấp thụ (packed column) [39]	15
Hình 1. 6. Cơ chế hoạt động của thiết bị RPB	17
Hình 1. 7. Ba loại cấu hình dòng chảy chất lỏng trong thiết bị RPB [52]	18
Hình 2. 1. Thiết bị HP2R	24
Hình 2. 2. Thiết kế của tháp hấp thụ và thiết bị HP2R sử dụng trong nghiên cứu ...	24
Hình 2. 3. Sơ đồ quy trình thực nghiệm xử lý đồng thời khí thải bằng hệ thiết bị PC-HP2R	26
Hình 3. 1. Ảnh hưởng của lưu lượng khí tới hiệu quả hấp thụ SO ₂ bằng PC và thiết bị HP2R	29
Hình 3. 2. Ảnh hưởng của lưu lượng khí tới hiệu quả hấp thụ CO ₂ bằng PC và thiết bị HP2R	31
Hình 3. 3. Ảnh hưởng của tốc độ quay tới hiệu quả xử lý CO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	34
Hình 3. 4. Ảnh hưởng của tốc độ quay tới hiệu quả xử lý SO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	36
Hình 3. 5. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q _G /Q _L tới hiệu quả xử lý CO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	38
Hình 3. 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q _G /Q _L tới hiệu quả xử lý CO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	39
Hình 3. 7. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q _{L1} tới hiệu quả xử lý CO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	40
Hình 3. 8. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q _{L1} tới hiệu quả xử lý SO ₂ của hệ thiết bị PC-HP2R	41

Hình 3. 9. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q_{L2} tới hiệu quả xử lý CO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R	42
Hình 3. 10. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q_{L2} tới hiệu quả xử lý SO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R	43
Hình 3. 11. Diễn biến hiệu quả xử lý CO_2 và SO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R tại $Q_G = 25$ L/min, $Q_{L1} = Q_{L2} = 0.35$ L/min, $\omega = 500$ rpm, chế độ tiếp diễn ($n = 1$)	45
Phụ lục 6. Ảnh hưởng của tốc độ quay tới hiệu quả xử lý SO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R	60

MỞ ĐẦU

Ngành công nghiệp sản xuất giấy tại Việt Nam đang trên đà phát triển mạnh mẽ, đóng góp tích cực vào tăng trưởng kinh tế. Tuy nhiên, đây cũng là một trong những ngành phát sinh khí thải lớn, đặc biệt là quá trình đốt nhiên liệu từ lò hơi, đặc biệt là SO_2 và CO_2 . Sự tích tụ và gia tăng nồng độ của các khí này không chỉ là nguyên nhân chính gây ra các vấn đề môi trường nghiêm trọng như mưa axit và hiệu ứng nhà kính, mà còn đặt ra áp lực tuân thủ các quy chuẩn môi trường ngày càng khắt khe đối với các nhà máy.

Hiện nay, để kiểm soát dòng khí thải có lưu lượng lớn và nồng độ SO_2 , CO_2 cao, các nhà máy giấy vẫn chủ yếu phụ thuộc vào các hệ thống tháp hấp thụ hoặc tháp rửa khí truyền thống. Mặc dù là giải pháp phổ biến, công nghệ này bộc lộ rõ những giới hạn về mặt kỹ thuật và kinh tế: để đảm bảo hiệu suất xử lý, đòi hỏi kích thước thiết bị phải lớn hoặc phải vận hành kết hợp nhiều tháp nối tiếp. Điều này dẫn đến việc chiếm dụng diện tích mặt bằng lớn, chi phí đầu tư ban đầu và chi phí tiêu hao hóa chất vận hành cao, gây khó khăn cho các doanh nghiệp trong việc tối ưu hóa chi phí sản xuất.

Để khắc phục những nhược điểm của công nghệ truyền thống, thiết bị ly tâm tiếp xúc (Rotating Packed Bed – RPB) ứng dụng công nghệ ly tâm đang được coi là một giải pháp thay thế tiên bộ. Các nghiên cứu tại nhiều quốc gia phát triển đã chứng minh RPB mang lại những ưu điểm đáng kể như: gia tăng diện tích tiếp xúc pha giúp giảm đáng kể tiết diện thiết bị, rút ngắn thời gian lưu, giảm chi phí đầu tư và nâng cao giới hạn công suất xử lý so với thiết bị truyền thống.

Mặc dù những ưu điểm của quá trình ly tâm tiếp xúc đã được chứng minh qua nhiều nghiên cứu ở các quốc gia phát triển, việc ứng dụng công nghệ này vào việc giải quyết các bài toán khí thải đặc thù của ngành giấy tại Việt Nam vẫn còn thiếu hụt. Xuất phát từ nhu cầu cấp thiết trong việc tìm kiếm một công nghệ xử lý nhỏ gọn, hiệu năng cao và tiết kiệm chi phí cho các nhà máy giấy, cũng như định hướng thu hồi CO_2 hướng tới mục tiêu kinh tế tuần hoàn, tác giả thực hiện đề tài “***Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc***”. Đề tài thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm không chỉ là tiền đề làm chủ công nghệ RPB mà còn hữu hạn mang đến một giải pháp bền vững, hướng tới mục tiêu phát thải ròng bằng không cho ngành công nghiệp sản xuất giấy trong tương lai.

Mục đích nghiên cứu:

Nghiên cứu và đánh giá khả năng ứng dụng công nghệ ly tâm tiếp xúc trong việc xử lý khí đồng thời khí SO₂ và CO₂ phát sinh từ quá trình sản xuất giấy, nhằm góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường không khí và đáp ứng yêu cầu phát triển bền vững của ngành giấy.

Nội dung nghiên cứu:

- **Nội dung 1:** So sánh hiệu quả xử lý khí thải giữa thiết bị tháp hấp thụ và thiết bị ly tâm tiếp xúc

+ **Nội dung 1.1:** Nghiên cứu hiệu quả xử lý khí SO₂ bằng tháp hấp thụ và thiết bị ly tâm tiếp xúc

+ **Nội dung 1.2:** Nghiên cứu hiệu quả xử lý khí CO₂ bằng tháp hấp thụ và thiết bị ly tâm tiếp xúc

- **Nội dung 2:** Khảo sát yếu tố ảnh hưởng và thông số vận hành của hệ thống tháp hấp thụ - thiết bị ly tâm tiếp xúc trong xử lý đồng thời khí thải.

+ **Nội dung 2.1:** Khảo sát ảnh hưởng của tốc độ quay ly tâm đến hiệu quả xử lý khí thải.

+ **Nội dung 2.2:** Khảo sát ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu quả xử lý khí thải.

+ **Nội dung 2.3:** Khảo sát ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ đến hiệu quả xử lý khí thải.

+ **Nội dung 2.4:** Khảo sát xử lý đồng thời và tiếp diễn khí thải bằng hệ thiết bị nối tiếp hấp thụ - ly tâm.

- **Nội dung 3:** Đánh giá hệ thống tích hợp (PC-HP2R) trong chế độ hoạt động liên tục và chất lượng dung dịch sau hấp thụ

Sản phẩm của đề tài nghiên cứu:

01 bài báo đăng trên tạp chí khoa học thuộc danh mục Scopus: *Trinh, V. M., T. T. P. Nguyen, H. T. Duong, et al. 2026. "Simultaneous Removal of CO₂, SO₂, and NO_x Using a Packed Column and High-Performance Rotating Reactor Integrated Absorption System." Environmental Quality Management 35, no. 3: e70297. <https://doi.org/10.1002/tqem.70297>.*

Cơ sở khoa học:

Đề tài được xây dựng dựa trên nền tảng lý thuyết về quá trình chuyển khối thông qua việc ứng dụng công nghệ gia tốc trọng trường (HiGee).

Hiệu suất chuyển khối khí – lỏng phụ thuộc chủ yếu vào hệ số truyền khối và diện tích tiếp xúc pha. Trong tháp hấp thụ truyền thống, pha lỏng thường tạo lớp màng dày, dễ xảy ra nguy cơ tích tụ khi tải lượng lớn, làm giảm hiệu quả tiếp xúc.

Ngược lại, công nghệ RPB sử dụng lực ly tâm lớn để phân tán dung dịch thành màng mỏng và vi giọt, qua đó làm tăng diện tích tiếp xúc và giảm trở kháng khuếch tán. Nhờ vậy, quá trình hấp thụ các khí axit như SO_2 và CO_2 diễn ra nhanh và hiệu quả trong thời gian lưu ngắn.

Tính thực tiễn:

Tính thực tiễn của đề tài xuất phát từ sự bám sát các "điểm nghẽn" về công nghệ và môi trường mà ngành công nghiệp giấy Việt Nam đang trực tiếp đối mặt:

- Giải quyết bài toán không gian và chi phí đầu tư: Phần lớn các nhà máy sản xuất giấy hiện nay đã được xây dựng từ lâu, quỹ đất dành cho việc mở rộng hoặc cải tạo hệ thống xử lý môi trường rất hạn hẹp. Nhờ những ưu điểm của thiết bị, thể tích chỉ bằng 1/5 đến 1/10 so với tháp truyền thống có cùng công suất, giúp doanh nghiệp dễ dàng lắp đặt, tích hợp vào các không gian giới hạn mà không tốn kém chi phí đập phá, mở rộng mặt bằng.

- Tối ưu hóa chi phí vận hành: Động lực khuếch tán lớn trong môi trường ly tâm giúp nâng cao hiệu quả sử dụng hóa chất (NaOH , dung dịch kiềm), giảm thiểu lượng hóa chất dư thừa và hạn chế tần suất thay mới dung dịch, từ đó cắt giảm trực tiếp chi phí vận hành hàng ngày của nhà máy.

- Đáp ứng tiêu chuẩn khắt khe và xu hướng toàn cầu: Việc kiểm soát đồng thời các khí axit cường độ cao (SO_2) và khí thải nhà kính (CO_2) giúp các doanh nghiệp ngành giấy không chỉ tuân thủ Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về môi trường hiện hành (QCVN) mà còn sẵn sàng cho xu thế thu giữ, tận dụng và Lưu trữ Carbon (CCUS), đáp ứng lộ trình giảm phát thải ròng bằng không (Net-Zero) của Chính phủ vào năm 2050.

Tính mới:

Đề tài triển khai một hướng tiếp cận mới bằng cách ứng dụng nguyên lý tăng cường truyền khối bằng lực ly tâm cường độ cao để thay thế cho cơ chế tiếp xúc trọng lực truyền thống. Nghiên cứu làm rõ động học quá trình phân tách pha khí - lỏng ở vận tốc cao, phá vỡ giới hạn giới hạn ngập lụt của các tháp hấp thụ thông thường.

Những đóng góp của luận văn:

Luận văn mang lại những giá trị đóng góp thiết thực trên các phương diện: lý luận học thuật và ứng dụng thực tiễn.

- *Đóng góp về mặt học thuật:*

+ Xây dựng bộ cơ sở dữ liệu động học tin cậy: Đề tài cung cấp các dữ liệu thực nghiệm toàn diện về cơ chế hấp thụ và phân bố chuyển khối khi xử lý đồng thời hỗn hợp khí đa cấu tử (SO_2 và CO_2) bên trong thiết bị RPB.

+ Làm rõ quy luật ảnh hưởng của các thông số vận hành bao gồm: tốc độ quay ly tâm (ω), tỷ lệ lưu lượng lỏng/khí (Q_L/Q_G), nồng độ chất hấp thụ đến hiệu quả xử lý cấu tử khí.

- *Đóng góp về mặt thực tiễn:*

+ Khẳng định tính khả thi và hiệu quả của thiết bị RPB trong xử lý khí thải ngành giấy; đồng thời cung cấp bộ thông số vận hành tối ưu, làm cơ sở cho thiết kế và mở rộng quy mô từ phòng thí nghiệm lên pilot và công nghiệp.

+ Đề xuất khả năng tái tuần hoàn dung dịch và tích hợp hệ thống (kết hợp tháp đệm cố định và thiết bị ly tâm tiếp xúc), giúp tối ưu hiệu quả xử lý đồng thời kiểm soát chi phí vận hành.

+ Góp phần phát triển giải pháp công nghệ tiên tiến, hỗ trợ chuyển đổi xanh, kinh tế tuần hoàn và giảm phát thải trong ngành công nghiệp giấy.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH PHÁT SINH KHÍ THẢI NGÀNH SẢN XUẤT GIẤY

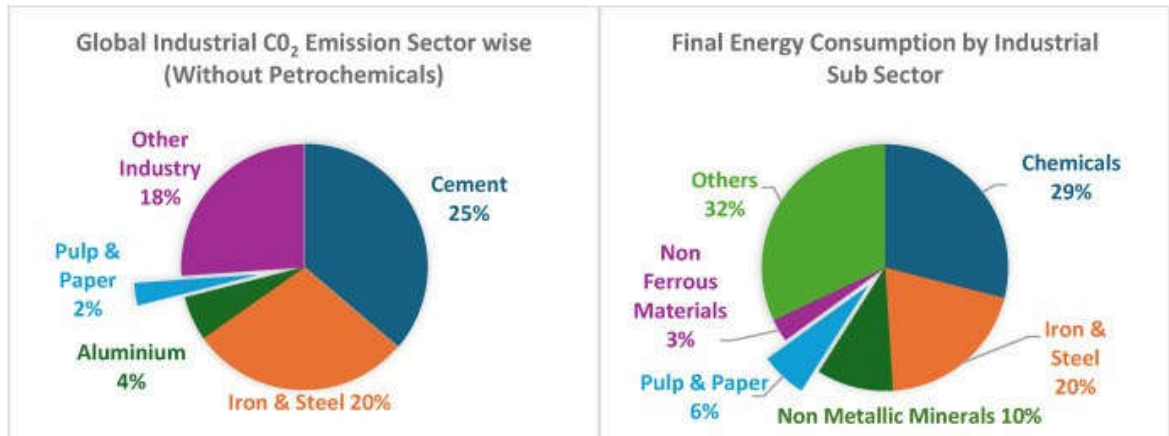
1.1.1. Hiện trạng phát sinh khí thải ngành sản xuất giấy trên thế giới

Hiện nay, lượng phát thải khí nhà kính tăng dần lên từng ngày đang gây nên nhiều hiệu ứng tiêu cực tới hệ sinh thái trái đất. Trong 150 năm trở lại đây, các hoạt động sản xuất và sinh hoạt của con người là nguyên nhân chính dẫn đến sự gia tăng trong phát thải khí nhà kính vào khí quyển [1]. Các khí nhà kính chủ yếu bao gồm: hơi nước, CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 , và các khí CFC, có khả năng hấp thụ các bức xạ sóng dài (hồng ngoại), được phản xạ từ bề mặt trái đất khi được chiếu sáng bằng ánh sáng mặt trời, sau đó phân tán lại nhiệt cho trái đất, gây nên hiệu ứng nhà kính. Theo dự báo của Trung tâm Khoa học Giáo dục (Center for Science Education – UCAR), nhiệt độ trung bình của trái đất có thể tăng lên 4°C vào cuối thế kỷ 21 nếu lượng khí nhà kính tiếp tục tăng theo tình hình hiện tại [2]. Hệ quả sau đó gồm có thay đổi về lượng mưa, băng tuyết tan, nước biển dâng, thay đổi dòng biển, xuất hiện nhiều hơn các hiện tượng thời tiết cực đoan (bão nhiệt đới, giông lốc, vòi rồng, ...).

Hiện nay, môi quan tâm đối với quá trình khử cacbon trong lĩnh vực công nghiệp đang ngày càng gia tăng, với mục tiêu giảm sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch, hạn chế các tác động tiêu cực đến môi trường và tìm kiếm các nguồn năng lượng thay thế nhằm đạt mục tiêu trung hòa khí hậu vào năm 2050 theo Hiệp định Paris [3]. Các ngành công nghiệp sử dụng nhiều năng lượng như sắt, thép, xi măng, bột giấy và giấy, hóa chất đóng vai trò quan trọng trong nền kinh tế, đồng thời cũng là những lĩnh vực tiêu thụ phần lớn năng lượng, tài nguyên và phát thải lượng lớn khí nhà kính [4]. Trên phạm vi toàn cầu, các ngành công nghiệp này đóng góp khoảng 30% tổng lượng phát thải khí nhà kính (GHG) [5]. Nhiều nghiên cứu cho thấy, việc nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, áp dụng các công nghệ tốt nhất hiện có và chuyển đổi sang các nguồn năng lượng tái tạo là những hướng đi hiệu quả nhằm giảm nhu cầu năng lượng và cắt giảm phát thải trong công nghiệp. Bên cạnh đó, thúc đẩy tính tuần hoàn thông qua tái chế cũng được xem là một giải pháp quan trọng trong quá trình khử cacbon với các ngành công nghiệp sử dụng nhiều năng lượng.

Ngành sản xuất giấy chiếm 6% tổng tiêu thụ năng lượng công nghiệp toàn cầu và chiếm 2% lượng phát thải CO_2 trực tiếp từ hoạt động công nghiệp (Hình 1.1) [6]. Nhu cầu tiêu thụ và sản lượng bột giấy và giấy trên toàn cầu được dự báo sẽ tăng mạnh vào năm 2050 [7], kéo theo sự gia tăng về mức tiêu dùng năng lượng và phát thải khí nhà kính tương ứng. Các công đoạn tiêu thụ năng lượng chủ yếu trong công

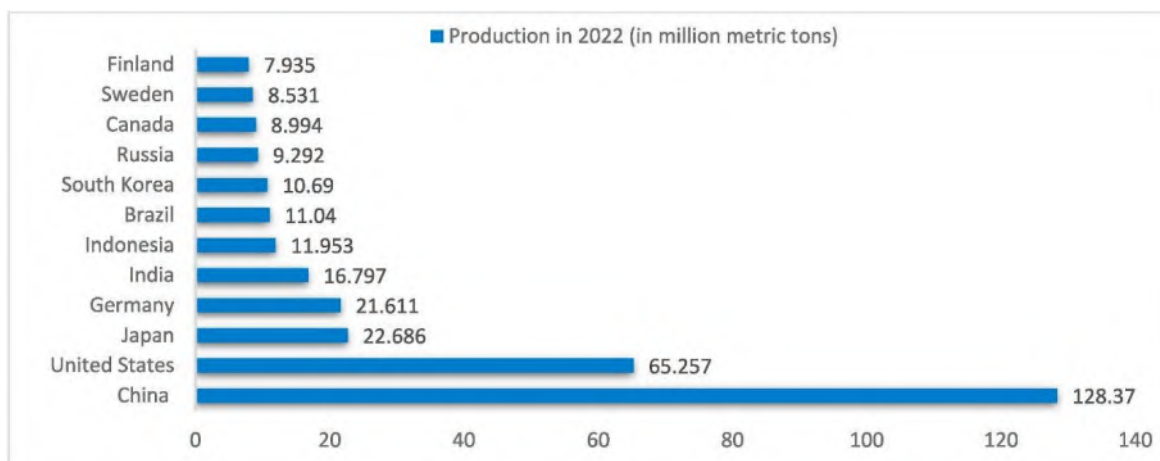
ngành bột giấy và giấy bao gồm quá trình cô đặc dịch đen, sản xuất bột giấy hóa học và sấy khô giấy [8].



Hình 1. 1. Tỷ trọng phát thải CO₂ công nghiệp và tỷ trọng tiêu thụ năng lượng cuối cùng theo phân ngành

Ngành công nghiệp toàn cầu đã thải ra 43,5 tỷ tấn khí nhà kính, quy đổi tương đương CO₂ (CO₂e) chiếm khoảng 4,2% tổng lượng phát thải GHG toàn cầu phát sinh từ các hoạt động của con người trong giai đoạn từ năm 1961 đến năm 2019 [9]. Ngành công nghiệp bột giấy và giấy (PPI) là ngành tiêu thụ năng lượng công nghiệp lớn thứ tư và tạo ra 1,3% lượng phát thải GHG toàn cầu (chiếm gần 2% lượng phát thải công nghiệp tính trên toàn bộ vòng đời) [10]. Mức tiêu thụ toàn cầu đối với các sản phẩm giấy, bao gồm giấy in, giấy viết, giấy bao bì và giấy vệ sinh, đã đạt 417 triệu tấn vào năm 2021 [11]. Các quy trình sản xuất của ngành này thâm dụng năng lượng và đòi hỏi một nguồn năng lượng khổng lồ, bao gồm điện, khí đốt và hơi nước. Trên quy mô toàn cầu, PPI đã tiêu thụ tổng cộng khoảng 1.361 PJ (Petajoule) năng lượng trong năm 2021 [12]. Việc sản xuất hơi nước trong PPI được thực hiện thông qua việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch và nhiên liệu sinh học, trong khi nhu cầu điện năng được đáp ứng bằng cách mua từ lưới điện và tự phát điện tại chỗ sử dụng nhiên liệu sinh học (phế phẩm gỗ và dịch đen).

Nghiên cứu của Griffin và cộng sự [13] đã xác định rằng lượng phát thải GHG của PPI chiếm 6% tổng lượng phát thải của khu vực công nghiệp tại Vương quốc Anh. PPI phân bố rộng khắp trên toàn cầu, nhưng sản lượng chủ yếu tập trung tại một số ít quốc gia, như được minh họa tại Hình 1.2. Canada là một trong những quốc gia sản xuất bột giấy và giấy hàng đầu thế giới, với ngành PPI xếp thứ 2 về tiêu thụ năng lượng và thứ 7 về phát thải GHG, nếu không tính lĩnh vực dầu khí [14]. Trong khi đó, ngành PPI của Trung Quốc đứng đầu thế giới về sản lượng, chiếm khoảng 25% tổng sản lượng toàn cầu và nằm trong top 10 về phát thải GHG trong khu vực công nghiệp của quốc gia này [15].



Hình 1. 2. Sản lượng bột giấy và giấy theo từng quốc gia [16]

Theo tác giả Sagues [17], các nhà máy bột giấy và giấy tại Hoa Kỳ xả thải 150 triệu tấn CO₂ (MtCO₂) mỗi năm, trong đó 77% có nguồn gốc sinh học (từ sinh khối). Ngành PPI của Ấn Độ đã phát thải khoảng 30,5 MtCO₂ vào năm 2019 với cường độ phát thải trung bình là 1,58 tấn CO_{2e} trên mỗi tấn giấy [18]. Lượng phát thải CO₂ của ngành công nghiệp sản xuất giấy Trung Quốc vào năm 2020 là 111,98 MtCO₂ [19], và ngành PPI của Đức ghi nhận mức phát thải 13,2 MtCO₂ vào năm 2021, đóng góp khoảng 2,5% tổng lượng phát thải GHG liên quan đến năng lượng của quốc gia này [20]. Ngành PPI của Nhật Bản chịu trách nhiệm cho khoảng 5,5% lượng phát thải CO₂ công nghiệp toàn quốc, ở mức xấp xỉ 21 MtCO₂ vào năm 2019 [21]. Đối với các quốc gia thuộc Liên đoàn Công nghiệp Giấy Châu Âu (CEPI), lượng phát thải CO₂ trực tiếp trong năm 2022 là 27,03 MtCO₂ [22].

Thụy Điển phát thải 21 MtCO₂ hàng năm từ ngành công nghiệp giấy của mình, với 97% trong số đó có nguồn gốc sinh học. Ngành giấy của Phần Lan chiếm 23–24% tổng nhu cầu năng lượng và trước đây đã từng tiêu thụ hơn 25% tổng lượng điện năng toàn quốc. Vương quốc Anh xả thải 2,4 MtCO₂ hàng năm từ việc sử dụng nhiên liệu hóa thạch và 0,9 MtCO₂ từ việc tiêu thụ điện năng trong ngành công nghiệp giấy. Hà Lan phát thải 1,054 MtCO₂ mỗi năm từ các sản phẩm giấy và bìa, cộng thêm các lượng phát thải bổ sung từ những hoạt động đặc thù của nhà máy. Ngành giấy của Áo chiếm 7% lượng phát thải CO₂ công nghiệp của nước này [23]. Những số liệu trên làm nổi bật bức tranh phát thải CO₂ của ngành công nghiệp giấy tại nhiều quốc gia khác nhau, qua đó nhấn mạnh sự cần thiết phải không ngừng nỗ lực hướng tới sự phát triển bền vững và giảm thiểu xả thải.

Nghiên cứu của Giacosa và cộng sự đã so sánh lượng phát thải không khí hàng năm của cacbon monoxide (CO), các oxit nitơ (NO_x), bụi tổng (TPM), PM_{2.5}, PM₁₀, lưu huỳnh dioxide (SO₂) và các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (VOCs) từ 9 nhà máy bột

giấy/giấy khác nhau tại vùng Atlantic, Canada thuộc ba tỉnh (Nova Scotia, New Brunswick, và Newfoundland & Labrador) trong giai đoạn từ năm 2002 đến năm 2019 [24]. Kết quả cho thấy lượng phát thải hàng năm cao hơn một số lần so với ngưỡng báo cáo liên bang do Bộ Môi trường và Biến đổi khí hậu Canada đề xuất. Các nhà máy sản xuất bột giấy phát thải tải lượng chất ô nhiễm cao hơn so với các nhà máy sản xuất giấy. Trường hợp vượt ngưỡng báo cáo cao nhất là đối với bụi $PM_{2.5}$ tại nhà máy Northern Pulp ở Nova Scotia. Lượng phát thải $PM_{2.5}$ (trong giai đoạn 17 năm) cao hơn khoảng 1.000 lần so với ngưỡng báo cáo quy định là 0,3 tấn/năm.

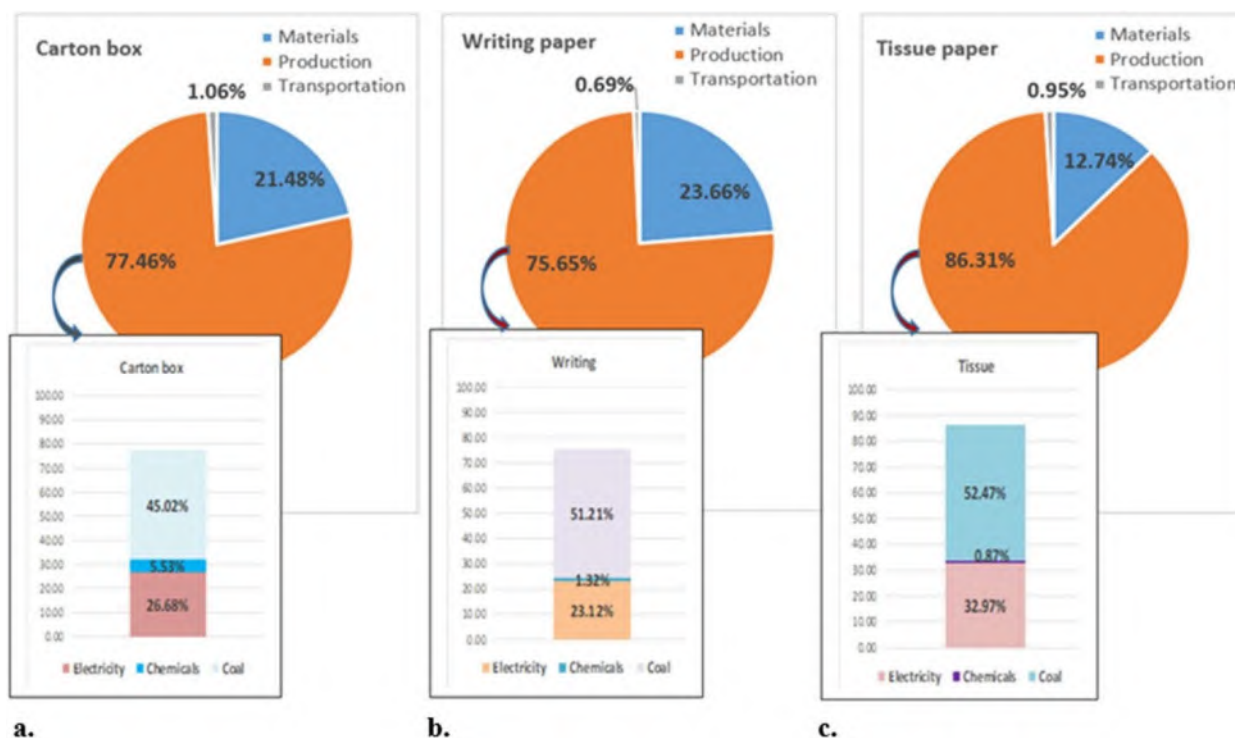
Nghiên cứu của Giacosa cho thấy tình trạng vi phạm diễn ra khá rõ, nhà máy NP vi phạm cực kì nghiêm trọng, mức xả thực tế tới 1.115 tấn/năm (gấp 2 lần mức cho phép). Có ít nhất 3 nhà máy vượt ngưỡng cho phép đối với thông số SO_2 là IP (phát thải 1.618,8 so với giới hạn 1.340), ED (phát thải 1.488,2 so với 1.480) và UT (401,7 so với giới hạn 278). Bên cạnh đó, tác giả cũng chỉ ra rằng nhà máy sản xuất bột giấy gây ô nhiễm lớn hơn so với các nhà máy sản xuất giấy trong chuỗi ngành công nghiệp này.

1.1.2. Hiện trạng phát sinh khí thải ngành sản xuất giấy tại Việt Nam

Ngành công nghiệp bột giấy và giấy là một trong những ngành quan trọng trong chiến lược phát triển kinh tế – xã hội của nhiều quốc gia. Tại Việt Nam, ngành này cũng đóng góp đáng kể vào sự phát triển kinh tế và được xem là một trong những ngành then chốt góp phần giảm nghèo, chuyển dịch cơ cấu kinh tế và thúc đẩy phát triển tại các khu vực vùng sâu, vùng xa. Trong những năm gần đây, ngành giấy Việt Nam duy trì tốc độ tăng trưởng trung bình khoảng 10–12%/năm; giá trị sản xuất đóng góp khoảng 1,5% GDP và kim ngạch xuất khẩu đạt trên 1 tỷ USD [25]. Tuy nhiên, bên cạnh những đóng góp tích cực, ngành bột giấy và giấy cũng có đặc trưng tiêu thụ nhiều năng lượng, nhiên liệu và hóa chất, đồng thời phát sinh nhiều chất thải độc hại, trở thành một trong những ngành công nghiệp gây ô nhiễm môi trường đáng kể. Các tác động môi trường bao gồm ô nhiễm không khí (như khí clo trong công đoạn tẩy trắng, khí thải từ quá trình đốt nhiên liệu cho lò hơi, khí H_2S ,...), ô nhiễm nước thải (từ quá trình sản xuất với thành phần chứa hỗn hợp các chất chiết xuất thực vật như nhựa, axit béo, lignin,...) và ô nhiễm chất thải rắn (bao bì, các loại giấy phế, bùn từ bể tự hoại, tạp chất trong giấy tái chế, xỉ than từ lò hơi, lò đốt,...). Những vấn đề này gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến môi trường và sức khỏe con người; chất lượng môi trường tại nhiều khu vực tiếp tục suy giảm, hình thành các điểm nóng môi trường tác động tiêu cực đến khu dân cư.

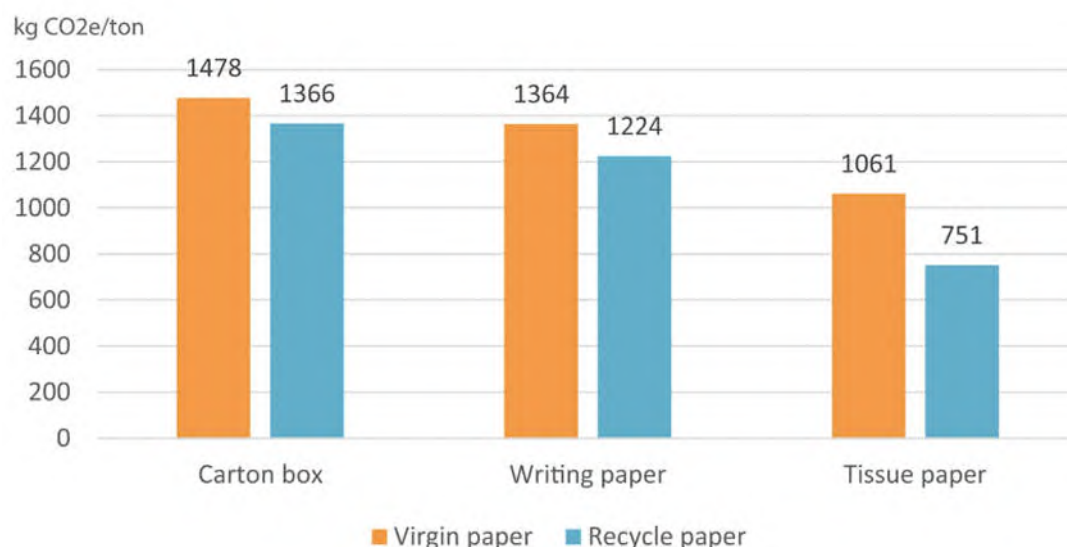
Nhận thức được những tác động này, Bộ Công Thương (2014) đã phê duyệt “Quy hoạch phát triển ngành công nghiệp giấy Việt Nam đến năm 2020, tầm nhìn

đến năm 2025” với định hướng phát triển bền vững gắn với bảo vệ môi trường. Tuy nhiên, trên thực tế, nhiều doanh nghiệp sản xuất giấy và bao bì vẫn chưa chú trọng đúng mức đến công tác bảo vệ môi trường. Do đó, các loại chất thải phát sinh trong quá trình sản xuất như nước thải, khí thải và chất thải rắn tiếp tục gây ảnh hưởng tiêu cực đến đời sống, sức khỏe con người, môi trường và hệ sinh thái. Vì vậy, vấn đề này đang nhận được sự quan tâm đặc biệt từ các cơ quan quản lý.



Hình 1. 3. Phát thải khí nhà kính từ các yếu tố đầu vào khác nhau trong vòng đời sản phẩm giấy (a) thùng carton, (b) giấy viết, (c) giấy tissue [26]

Từ Hình 1.4, các hình nằm ở góc dưới bên trái thể hiện tỷ lệ đóng góp phát thải GHG từ các yếu tố đầu vào khác nhau trong vòng đời sản phẩm giấy tại Việt Nam. Kết quả cho thấy, phát thải từ việc sử dụng điện chiếm khoảng 23,12% đến 32,97% tổng lượng phát thải GHG, tương đương với các quốc gia khác [27, 28]. Theo nghiên cứu của tác giả Tạ Thị Yến và cộng sự, các sản phẩm giấy từ nguyên liệu nguyên sinh thường có mức phát thải GHG cao hơn so với sản phẩm từ giấy tái chế [26] (Hình 1.5). Theo đó, hệ số phát thải GHG theo vòng đời của giấy viết, giấy tissue và thùng carton lần lượt là 1.224; 751 và 1.366 kg CO₂eq/tấn sản phẩm.



Hình 1. 4. Phát thải GHG của các sản phẩm giấy từ nguyên liệu nguyên sinh và từ nguyên liệu tái chế

Theo nghiên cứu “Numerical model for estimating greenhouse gas emissions from pulp and paper industrial wastewater treatment systems in Vietnam” do Đại học Bách khoa Hà Nội phối hợp với Bộ Tài nguyên và Môi trường (nay là Bộ Nông nghiệp và Môi trường) thực hiện, việc tính toán phát thải GHG từ hệ thống xử lý nước thải tại hai nhà máy giấy Bãi Bằng và Tân Mai cho thấy: nhà máy Bãi Bằng (lưu lượng nước thải khoảng 8.000 m³/ngày) phát thải tổng cộng khoảng 3.070,3 kg CO₂-eq/ngày, tương đương 0,38 kg CO₂-eq/m³ nước thải; nhà máy Tân Mai (lưu lượng nước thải khoảng 10.000 m³/ngày) phát thải khoảng 7.413,6 kg CO₂-eq/ngày, tương đương 0,74 kg CO₂-eq/m³ nước thải [29].

Xét về tiêu thụ năng lượng, ngành bột giấy và giấy tại Việt Nam chiếm khoảng 5% tổng mức tiêu thụ năng lượng của toàn bộ các ngành công nghiệp [29]. Theo số liệu tổng hợp của Hiệp hội Giấy và Bột giấy Việt Nam (VPPA) [30], tổng sản lượng năm 2025 đạt 6,34 triệu tấn; tổng tiêu thụ giấy ước đạt 7,77 triệu tấn, tăng 10,8% so với năm 2024. Trong đó, giấy bao bì và giấy đóng gói chiếm tỷ trọng lớn nhất với mức tiêu thụ đạt 6,19 triệu tấn, tăng 12,6% so với cùng kỳ, nhờ sự phát triển của thương mại điện tử, gia tăng nhu cầu logistics và xu hướng tiêu dùng ưu tiên bao bì thân thiện môi trường thay thế nhựa. Tiếp theo là giấy tissue với mức tiêu thụ tăng 8,7% lên 423.000 tấn, phục vụ cả nhu cầu hộ gia đình và doanh nghiệp. Dự báo đến năm 2030, tổng công suất giấy và bìa giấy của Việt Nam sẽ đạt khoảng 10,9 triệu tấn, trong đó riêng giấy bao bì dự kiến tăng từ 6,34 lên 9,7 triệu tấn, chiếm gần 90% phần công suất tăng thêm. Điều này cho thấy tăng trưởng công suất của ngành giấy Việt

Nam chủ yếu được thúc đẩy bởi phân khúc giấy bao bì và phụ thuộc lớn vào khả năng đảm bảo nguồn cung nguyên liệu.

Với xu thế tăng trưởng nhanh và mở rộng sản xuất, ngành sản xuất giấy và bột giấy tại Việt Nam đang gia tăng đáng kể lượng phát thải GHG do phụ thuộc lớn vào năng lượng, nguyên liệu và công nghệ sản xuất hiện tại. Trong bối cảnh áp lực chuyển đổi xanh ngày càng gia tăng và các yêu cầu môi trường ngày càng khắt khe từ thị trường quốc tế, việc kiểm soát, giảm thiểu phát thải và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên trở thành yêu cầu cấp thiết để đảm bảo sự phát triển bền vững của ngành.

1.2. TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG PHÁP XỬ LÝ KHÍ THẢI BẰNG PHƯƠNG PHÁP HẤP THỤ

1.2.1. Kỹ thuật hấp thụ trong xử lý khí thải công nghiệp

Hấp thụ là kỹ thuật phổ biến nhất đối với khí thải sau đốt để loại bỏ CO₂ tại các nhà máy điện và các hoạt động công nghiệp. Quá trình này được thực hiện dựa trên nhiều phương pháp, ví dụ như hấp thụ hóa học và hấp thụ vật lý. Kỹ thuật hấp thụ hóa học để thu hồi CO₂ được ứng dụng rộng rãi hơn do thích hợp hơn với hiện trạng của các nhà máy điện hiện nay và có chi phí rẻ hơn so với các kỹ thuật hấp thụ khác [3]. Trong quá trình này, phản ứng hóa học sẽ xảy ra giữa CO₂ và dung dịch hấp thụ. Khí thải chứa CO₂ đi vào từ bên dưới tháp hấp thụ, sau đó bay lên và tiếp xúc ngược dòng với dung dịch hấp thụ được phun từ phía trên tháp. Dòng khí sau khi được tách CO₂ sẽ được đưa ra ngoài môi trường [31]. Sau đó dung dịch chứa CO₂ sau hấp thụ sẽ được stripping ở nhiệt độ cao (trên 100°C) để tái sinh dung dịch hấp thụ cho quá trình hấp thụ tiếp theo [32]. Khí CO₂ sau khi stripping sẽ được nén tới điều kiện siêu tới hạn và gửi đi lưu trữ [16]. Tương tự như vậy, trong quá trình hấp thụ vật lý, cả quá trình sẽ xảy ra mà không có phản ứng hóa học nào giữa dung dịch hấp thụ và CO₂. Hiệu quả của quá trình hấp thụ và giải hấp sẽ phụ thuộc vào sự thay đổi của nhiệt độ và áp suất tùy vào loại dung dịch hấp thụ sử dụng [31]. Các dung dịch hấp thụ amine thường có hiệu suất hấp thụ cao, ví dụ như diethanolamine (DEA), monoethanolamine (MEA), và K₂CO₃ [12]. Các nghiên cứu của Aaron và Tsouris (2005) và Knudsen và cộng sự (2009) cho thấy dung môi MEA có hiệu suất xử lý CO₂ tương đối tốt ở mức 90% [33]. Cơ chế hấp thụ CO₂ bằng MEA được mô tả dưới đây:

- Ion hóa nước:



- Phân ly cacbon dioxide:



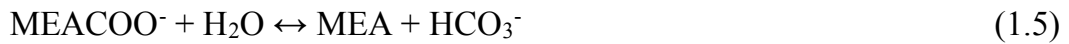
- Phân ly bicarbonat:



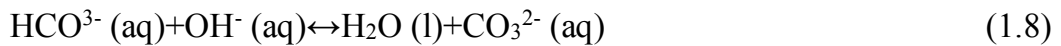
- Phân lý của amin bị proton hóa:



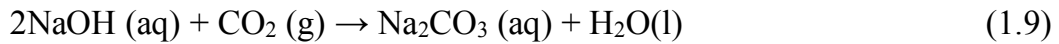
- Chuyển hóa carbamate thành bicarbonate:



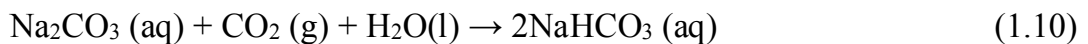
Tuy nhiên, nhược điểm của MEA nói riêng và dung môi nói chung là thường xuyên phải bổ sung do bị bay hơi và phân hủy trong quá trình sử dụng [22]. Theo Stolaroff và cộng sự (2008), CO_2 cũng có thể được xử lý bằng cách hấp thụ trong dung dịch NaOH [16]. Thậm chí, hiệu suất hấp thụ CO_2 của NaOH còn vượt trội hơn MEA. Theo lý thuyết, để hấp thụ 1 tấn CO_2 cần 1.39 tấn MEA, nhưng chỉ cần 0.9 tấn NaOH [34]. Cơ chế hấp thụ của CO_2 vào dung dịch NaOH được mô tả qua những phản ứng sau:



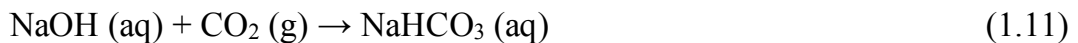
Đầu tiên, Na^+ và OH^- sẽ ion hóa gần như hoàn toàn trong nước vì NaOH là chất kiềm mạnh. Tiếp theo đó, khi khí CO_2 tiếp xúc với NaOH, CO_2 sẽ được hấp thụ vật lý vào dung dịch thành dạng lỏng như phương trình (1.1) [12]. CO_2 lỏng sẽ phản ứng với ion OH^- để tạo ra HCO_3^- và CO_3^{2-} như phương trình (1.2) và (1.3). Mặc dù phương trình (1.2) là phản ứng bậc hai, nó cũng có thể coi là giả bậc một vì nồng độ CO_2 là không đổi. Phương trình (1.2) và (1.3) là phương trình phản ứng hai chiều và có tốc độ phản ứng nhanh ở dải pH cao [32]. Phản ứng (3) xảy ra ngay lập tức sau phản ứng (1.2) [35]. CO_2 lỏng không tồn tại trong dung dịch trong toàn bộ quá trình phản ứng bởi sau khi thành dạng lỏng đã phản ứng ngay lập tức với ion OH^- . Ngay khi CO_2 lỏng được hấp thụ vào dung dịch, nó sẽ bị phản ứng ngay lập tức qua phương trình (1.2) và (1.3) [32]. Phương trình (3) chiếm ưu thế trong giai đoạn đầu của quá trình khi dung dịch hấp thụ giữ được độ kiềm cao, làm nâng nồng độ ion CO_3^{2-} cao hơn so với HCO_3^- [32]. Hơn nữa, ion OH^- sẽ giảm đi nhanh chóng sau phản ứng (1.2) và (1.3). Do đó, khi pH giảm đi nhanh chóng trong giai đoạn đầu của phản ứng, nồng độ CO_3^{2-} sẽ tăng. Dựa trên những hiện tượng này, phương trình phản ứng tổng quát trong giai đoạn đầu của hấp thụ CO_2 trong NaOH được thể hiện dưới đây:



Mặc dù Na_2CO_3 được tạo thành trong giai đoạn này, nó tiếp tục được ion hóa thành dạng Na^+ và CO_3^{2-} trong dung dịch hấp thụ. Khi CO_2 tiếp tục tiếp xúc với dung dịch NaOH , CO_2 tiếp tục được hấp thụ vật lý và phản ứng, dẫn đến sự giảm sút ion OH^- và tạo thành nhiều hơn ion CO_3^{2-} qua phương trình (1.2) và (1.3). Tuy nhiên, sự dư thừa ion CO_3^{2-} sẽ gây ra phản ứng đảo chiều ở phương trình (3), giúp ưu tiên hơn và tăng tốc độ phản ứng thuận số (1.2). Phương trình phản ứng tổng quát của giai đoạn này được thể hiện dưới đây:



Sau khi phản ứng (1.5) đạt cân bằng, một lượng nhỏ CO_2 có thể tiếp tục được hấp thụ vật lý thêm để bù vào sự hao hụt CO_2 lỏng trong dung dịch sau quá trình phản ứng. Cuối cùng, khi lượng NaOH phản ứng có giới hạn, quá trình hấp thụ CO_2 trong NaOH được viết tóm gọn lại trong phương trình (6), đại diện cho hai phản ứng xảy ra tại phương trình (1.4) và (1.5).



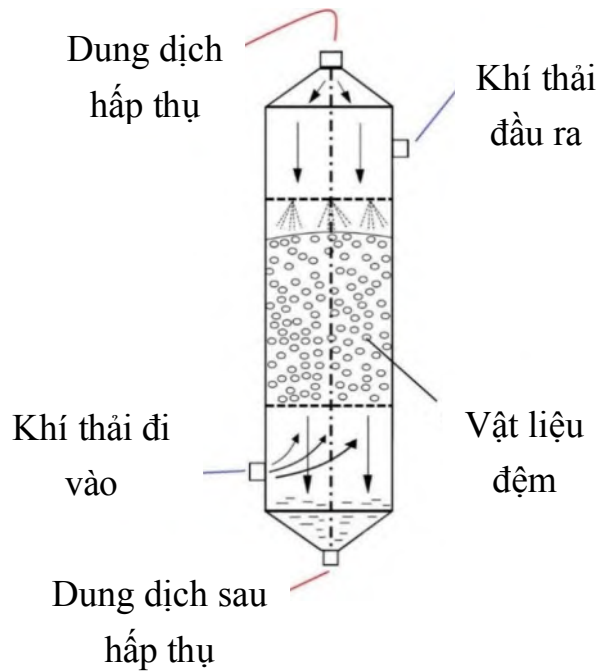
Bên cạnh CO_2 , trong thành phần khí thải, NO_x và SO_x cũng là hai thành phần ô nhiễm được lưu ý trong kiểm soát và xử lý. Khi phát thải ra môi trường, các khí axit NO_x (NO_2 , NO , N_2O) và SO_x (SO_2 , SO_3) sẽ ảnh hưởng đến hệ sinh thái tự nhiên. Đối với SO_x , SO_2 chiếm 90% thành phần, và được coi là thành phần độc và có hại khi thải ra môi trường [33]. Các phương pháp nhằm loại bỏ đồng thời khí CO_2 , NO_x và SO_x đã trở thành đề tài được chú ý trong thời gian gần đây bởi hiệu quả xử lý tương đối tốt cùng với sự bền vững và hiệu quả trong kinh tế. Các phương pháp này chủ yếu được áp dụng với các đối tượng khí thải từ các lò hơi, lò đốt và khí thải từ hoạt động công nghiệp [31]. Trong nghiên cứu của Vullari và Kawatra, ba khí thải CO_2 , NO và SO_2 đã được xử lý thử nghiệm bằng phương pháp hấp thụ qua cột trong dung dịch Na_2CO_3 có xúc tác H_2O_2 và NaOCl [36]. Trong hấp thụ CO_2 , Na_2CO_3 có chi phí tiết kiệm hơn NaOH , ít độc tính và không bị hao hụt hay bị phân hủy nhiệt như các dung môi amine [34]. Tuy nhiên, hiệu quả hấp thụ với Na_2CO_3 lại bị giới hạn trong nhiệt độ thông thường và có tốc độ phản ứng chậm hơn so với các hấp thụ khác. Do đó, việc sử dụng các xúc tác hỗ trợ như H_2O_2 hay NaOCl là rất cần thiết. Kết quả cho thấy hiệu quả hấp thụ CO_2 được cải thiện đáng kể từ 36.9% lên 82.0% khi sử dụng các chất oxi hóa xúc tác (H_2O_2 hoặc NaOCl).

Việc kết hợp xử lý đồng thời các thành phần khí axit (CO_2 , SO_2 , NO_x) bằng một dung dịch hấp thụ mang lại nhiều lợi ích trong việc giảm thiểu ô nhiễm không khí. Tuy nhiên, các khí này có thể cạnh tranh với nhau trong quá trình hấp thụ bởi NaOH ,

Điều này có thể dẫn đến việc giảm hiệu quả của quá trình hấp thụ nếu các khí này có mặt đồng thời ở nồng độ cao. Thông thường, trong thành phần khí thải công nghiệp, nồng độ CO_2 chiếm hàm lượng lớn trong thành phần khí thải (nồng độ 15%), SO_2 và NO_x có giá trị thấp hơn (khoảng 800 – 1000 ppm). Các dung dịch hấp thụ kiềm có xu hướng hấp thụ SO_2 và CO_2 trước, do NO không dễ dàng phản ứng với NaOH, trong khi NO là thành phần chính trong hỗn hợp NO_x . Để xử lý đồng thời 3 loại khí này cần lượng lớn dung dịch hấp thụ, đặc biệt khi nồng độ CO_2 , SO_2 , NO_x trong khí thải cao. Bên cạnh đó, hiệu quả hấp thụ cũng phụ thuộc vào nhiệt độ và áp suất của hệ thống. Ở nhiệt độ cao, CO_2 ít bị hấp thụ hơn, trong khi SO_2 và NO_2 có xu hướng hấp thụ hiệu quả hơn ở nhiệt độ khác, điều này tạo ra sự khó khăn trong việc tối ưu hóa quá trình xử lý đồng thời. Hơn nữa, các sản phẩm phụ tạo ra như sodium cacbonat, sodium sulfat và các muối khác dễ gây bít tắc đệm trong quá trình vận hành tháp hấp thụ.

1.2.2. Tháp hấp thụ truyền thống trong xử lý khí thải

Thiết bị phổ biến được áp dụng hiện nay phải kể đến tháp hấp thụ (tháp dập ướt – wet scrubber, hay cột nhồi – packed column). Cấu tạo của tháp hấp thụ có cấu tạo là một cột lớn rỗng, bên trong có các lớp vật liệu đệm nhồi (bù nhùi thép, đệm sứ rỗng, ...) được cố định bằng các ngăn giá đỡ. Tiếp xúc pha giữa dòng khí thải đi lên và dung dịch hấp phụ chảy xuống sẽ xảy ra cực đại ở khu vực có các lớp vật liệu nhồi do thời gian tiếp xúc pha và diện tích tiếp xúc pha được cải thiện nhiều nhất ở khu vực này. Đã có nhiều nghiên cứu ứng dụng thiết bị cột hấp thụ này trong xử lý các thành phần ô nhiễm như NO_x , CO_2 , SO_2 , và VOCs trong khí thải. Valluri và Kawatra đã thử nghiệm xử lý đồng thời CO_2 , NO_x và SO_x trong một tháp hấp thụ [37]. Kết quả cho thấy hiệu quả xử lý của CO_2 và SO_x rất tốt, lần lượt đạt 99% và 95%. Mặt khác, hiệu suất hấp thụ đối với NO chỉ đạt 30%. Khác với CO_2 , SO_2 , hay NH_3 , NO_x rất khó hấp thụ vào dung dịch do có độ hòa tan trong nước khá thấp. Ở nghiên cứu của Yasuda và cộng sự, hiệu suất xử lý NO_x được cải thiện nhiều hơn (97.6%) do sử dụng lớp đệm sợi thủy tinh có diện tích bề mặt lớn, đồng thời có sự bổ sung ozone vào dung dịch hấp thụ [38].



Hình 1. 5. Cấu tạo của tháp hấp thụ (packed column) [39]

Để có thể xây dựng và vận hành hiệu quả một hệ thống tháp hấp thụ khí thải, bên cạnh việc lựa chọn dung dịch hấp phụ, các thông số thiết kế và vận hành tháp hấp thụ là những yếu tố then chốt quyết định hiệu quả của việc đưa nguyên lý công nghệ này trong quy mô công nghiệp thực tế. Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã được công bố tập trung vào việc nghiên cứu các thông số thiết kế và vận hành của tháp hấp thụ trong việc xử lý khí [33, 40-42]. Khi đánh giá ảnh hưởng của các thông số này, giá trị hệ số truyền khối toàn quá trình sẽ được tính toán thay vì hiệu suất hấp thụ đối với thông số khí thải. Năm 2001, Aroonwilas và cộng sự đã nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của các thông số gồm có: lưu lượng chất lỏng, lưu lượng khí CO_2 , nhiệt độ chất lỏng, cách sắp xếp ngăn nhồi và phân phối của chất lỏng trong tháp tới hệ số truyền khối trong tháp hấp thụ CO_2 sử dụng NaOH và MEA [31]. Kết quả của Aroonwilas chỉ ra rằng lưu lượng của hai pha có ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu quả hấp phụ của CO_2 . Cụ thể, hệ số truyền khối toàn quá trình (KGa) tăng lên hai lần khi lưu lượng dung dịch hấp phụ tăng từ 3.8 lên 22.9 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Ngược lại, khi tải lượng CO_2 tăng lên hai lần (0.25 tới 0.50 mol/mol chất hấp phụ) làm giảm hệ số truyền khối tới 90%. Nhiệt độ của dung dịch hấp phụ cũng có tác động tới hiệu quả hấp phụ CO_2 khi vừa cải thiện hằng số động học bậc 2 (k_2) nhưng đồng thời cũng có thể dịch chuyển ngưỡng cân bằng trạng thái giữa pha khí và pha lỏng của CO_2 trong quá trình truyền khối (hằng số Henry của CO_2 tăng). Mặt khác, ảnh hưởng của cách sắp xếp vật liệu nhồi và phân phối dung dịch hấp phụ trong cột là không đáng kể tới hiệu quả truyền khối của quá trình. Afkhamipour và Mofarahi cũng đã xếp loại mức độ ảnh

hưởng của các thông số vận hành từ thấp tới cao gồm có: tỉ lệ mol $\text{CO}_2/\text{mol amine}$ > nhiệt độ amine > lưu lượng amine > nhiệt độ khí thải chứa CO_2 > loại vật liệu nhồi tới hiệu quả truyền khối hấp thụ CO_2 trong dung dịch hấp phụ DEEA + MEA [43]. Cụ thể, hiệu suất hấp phụ tăng lên khi tăng lưu lượng amine, nhiệt độ amine và ngược lại khi tăng tỉ lệ mol $\text{CO}_2/\text{mol amine}$ và nhiệt độ khí thải.

Đối với chiều cao và đường kính cột tiếp xúc, các thông số này ít được xét tới do yếu tố này tùy thuộc vào quy mô lưu lượng khí thải thực tế. Như các nghiên cứu ở trên đã chỉ ra rằng, lưu lượng của khí thải và lưu lượng của dung dịch hấp thụ đóng vai trò quan trọng trong quyết định hiệu quả của quá trình truyền khối. Tuy nhiên, trong vận hành thực tế với tháp hấp thụ, khi lưu lượng dung dịch hấp thụ tăng sẽ khiến gia tăng áp suất dòng chảy, tăng thời gian lưu nước sẽ khiến hệ thống chạm ngưỡng tắc nghẽn [16]. Do đó, việc lựa chọn kích thước thiết bị sẽ hoàn toàn phụ thuộc vào hiện trạng phát thải thực tế tại từng đối tượng. Dẫn tới nhược điểm của thiết bị này là kích thước thực tế rất lớn, dẫn đến tăng chi phí đầu tư, lắp đặt và khó khăn trong bảo trì.

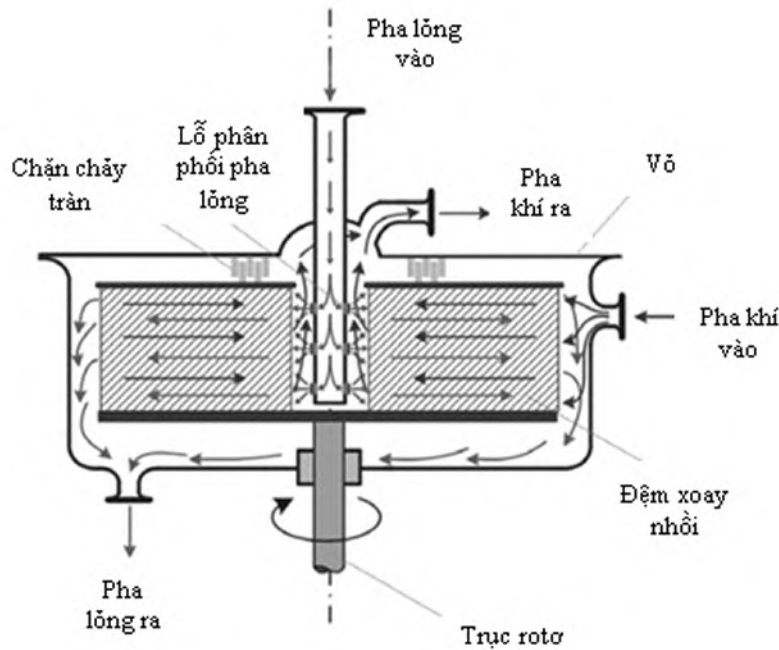
Các nghiên cứu căn bản nói trên đã thể hiện được ưu điểm của quá trình hấp thụ xử lý khí thải. Tuy nhiên ở quy mô thực tế có một vài giới hạn về cấu tạo và chế độ làm việc của thiết bị. Hiệu quả của quá trình truyền khối tiếp xúc pha phụ thuộc vào thể tích chứa vật liệu nhồi và tỉ lệ lưu lượng dung dịch hấp thụ trên lưu lượng khí (Q_L/Q_G). Ở quy mô thực tế, thiết bị thường được chế tạo và lắp đặt với kích thước rất lớn dẫn đến chi phí cao trong đầu tư. Mặt khác, khi lưu lượng khí quá lớn sẽ gây ra hiện tượng dung dịch hấp thụ bị ngưng đọng lại trên bề mặt đệm gây hiện tượng tắc nghẽn cột gây ảnh hưởng hiệu suất xử lý, khó khăn trong bước vận hành và bảo trì. Tùy thuộc vào lưu lượng khí thải càng lớn thì kích thước thiết bị lại càng phải lớn hơn để đảm bảo vận hành hiệu quả và ổn định.

1.3. Tổng quan quá trình ly tâm tiếp xúc trong xử lý khí thải

1.3.1. Cấu tạo và cơ chế vận hành của thiết bị ly tâm tiếp xúc

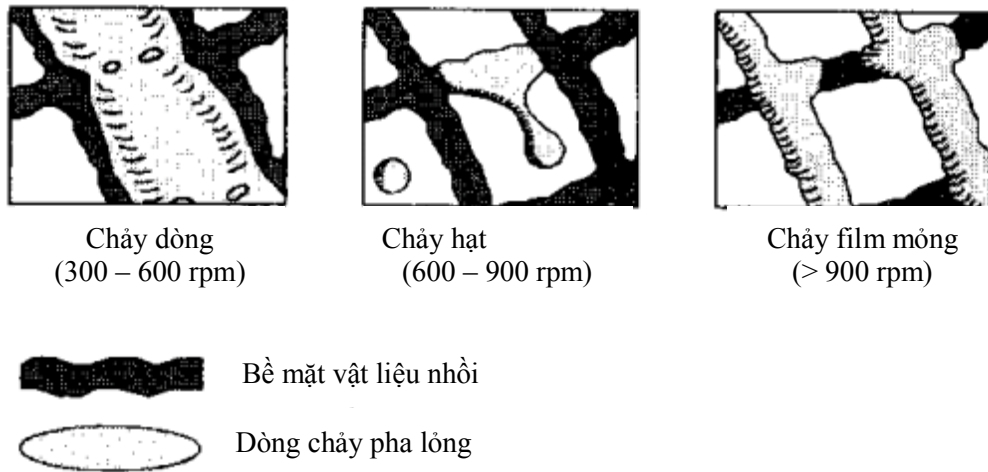
Thiết bị tiếp xúc quay li tâm (RPB) hay còn gọi là thiết bị tiếp xúc khí-lỏng trọng lực cao (HiGee) đã trở nên nổi tiếng kể từ khi được Ramshaw và Mallinson voafnawm phát minh vào năm 1981 [44]. Điểm mấu chốt của công nghệ Higees là dựa vào môi trường có trọng lực cao mô phỏng được tạo ra bởi lực ly tâm của RPB. Lực ly tâm được tạo ra bởi chuyển động quay tốc độ cao của roto được sử dụng để tạo ra siêu trọng lực, có chức năng tăng cường trộn vi mô và truyền khối [33]. Thiết bị tiếp xúc quay li tâm (Rotating packed bed - RPB) có thể gia tốc li tâm cho dòng chất lỏng

lớn gấp nhiều lần gia tốc trọng lực để thay thế và khắc phục tồn tại của thiết bị cột nhồi truyền thống. Cơ chế vận hành của thiết bị RPB được mô tả trong Hình 1.6.



Hình 1. 6. Cơ chế hoạt động của thiết bị RPB

Cấu tạo chính của thiết bị RPB gồm có phần đệm xoay hình trụ và phần vỏ. Phần đệm xoay được nhồi vật liệu tương tự ở cột nhồi như vòng raschig. Pha khí sẽ được đưa qua van khí vào trong phần vỏ rồi xuyên qua phần đệm xoay, tại đây sẽ tiếp xúc ngược dòng với pha lỏng và thoát ở van khí ra. Pha lỏng sẽ được đưa vào thiết bị qua van phía trên thiết bị và được phân phối đều vào bên trong phần đệm qua các lỗ nhỏ ở cuối ống. Phần đệm xoay sẽ được nối với một trục rôto, khi vận hành sẽ quay ở tốc độ từ 300 - 1800 rpm (vòng/phút) tạo ra một gia tốc li tâm bên trong đệm lớn gấp 100 - 1000 lần gia tốc trọng lực [45]. Với điều kiện lực li tâm lớn, hiệu quả truyền khối được gia tăng đáng kể mà không cần tới kích thước thiết bị lớn nhờ khả năng hoạt động ở tỉ lệ Q_G/Q_L mà không gặp rủi ro tắc nghẽn dòng chất lỏng. Bên cạnh đó, việc truyền khối hiệu quả ở Higee cho phép thể tích lò phản ứng nhỏ hơn nhiều và chi phí vận hành thấp hơn nên đã được áp dụng cho nhiều quy trình và trường hợp đòi hỏi tăng cường chuyển khối đa pha như hấp thụ [35, 46], chưng cất [47, 48], lọc khí, xử lý nước thải [49-51].



Hình 1. 7. Ba loại cấu hình dòng chảy chất lỏng trong thiết bị RPB [52]

1.3.2. Tình hình nghiên cứu về thiết bị ly tâm tiếp xúc trong xử lý khí thải

Tình hình nghiên cứu ngoài nước

Thiết bị này đã được nghiên cứu để thay thế các cột nhồi hấp phụ thông thường nhờ khả năng khắc phục các nhược điểm của cột nhồi truyền thống như: kích thước lớn, tắc nghẽn, chi phí đầu tư và diện tích lắp đặt, hiệu suất thấp. Trong xử lý khí thải, các nghiên cứu hấp thụ CO_2 , NO_x và VOC cũng đã được thử nghiệm trong các nghiên cứu của Lin et al. (2011) và Chen et al. (2002) [53, 54]. Các tác giả đã chỉ ra rằng tốc độ quay của đệm xoay tạo ra lực li tâm lớn giúp cải thiện đáng kể hiệu quả truyền khối và diện tích giao thoa giữa hai pha rắn lỏng trong hấp thụ CO_2 [54]. Việc đó đồng nghĩa với hệ số truyền khối được tăng lên nhiều lần so với thể tích đệm cùng kích thước ở các thiết bị tháp hấp thụ thông thường. Trong nghiên cứu năm 2011 của Lin và cộng sự, kết quả hệ số truyền khối toàn quá trình trong hấp thụ CO_2 bằng thiết bị hấp thụ li tâm ($1,42 \text{ s}^{-1}$) lớn hơn đáng kể so với giá trị của tháp hấp thụ ($0,91 \text{ s}^{-1}$) mặc dù kích thước của thiết bị hấp thụ li tâm nhỏ gọn hơn rất nhiều [53].



Năm 2022, Liu và cộng sự đã nghiên cứu khả năng loại bỏ NO_x khỏi hỗn hợp khí bằng công nghệ ly tâm tiếp xúc với quá trình tiền oxy hóa với NaClO_2 cho thấy hiệu suất loại bỏ NO_x đạt tới 84% so với các thiết bị lọc khí thông thường [55]. Ngoài ra, nghiên cứu của Guang-Wen Chu và cộng sự (2013) đã chỉ ra rằng hiệu quả truyền khối cao trong việc loại bỏ SO_2 khỏi khí thải bằng dung dịch Na_2SO_3 khi sử dụng công nghệ ly tâm tốc độ cao RPB với kích thước thiết bị nhỏ cho thấy hiệu quả khử lưu huỳnh trong nghiên cứu cao hơn 97% [48]. Trong nghiên cứu hấp thụ thu hồi hơi

dung môi isopropyl alcohol của Lin và cộng sự, hệ số truyền khối được ghi nhận ở mức 165 s^{-1} với 95% hiệu quả hấp thụ với lưu lượng quy mô cận thực tế 150 – 300 m^3/h khi sử dụng thiết bị RPB [56].

Tồn lưu chất lỏng cũng là yếu tố quan trọng cần phải xét đến trong các thiết bị tiếp xúc có sử dụng lớp đệm nhồi do nó có ảnh hưởng trực tiếp đến khoảng giới hạn vận hành của lưu lượng khí và lưu lượng chất lỏng. Độ lưu (liquid-holdup) là tỉ lệ thể tích chất lỏng lưu trong phần đệm nhồi trên thể tích phần đệm nhồi trong một điều kiện vận hành nhất định [57]. Ở thiết bị cột nhồi truyền thống, tỉ lệ tồn lưu chất lỏng sẽ tăng lên khi lượng dung dịch cấp vào thiết bị tăng lên. Tỉ lệ này càng cao (gần tới 1) sẽ là dấu hiệu của nguy cơ tắc nghẽn dòng chất lỏng của thiết bị. Ở thiết bị hấp thụ li tâm, ngoài phụ thuộc vào lưu lượng chất lỏng, tỉ lệ này còn phụ thuộc vào tốc độ vòng quay (lực li tâm) của đệm nhồi. Trong thí nghiệm của Burns và cộng sự năm 2001, ở dải vận tốc dòng chất lỏng từ 0,6 – 5,2 cm/s , độ tồn lưu chất lỏng (ε_L) đã giảm đi đáng kể khi gia tốc li tâm được tăng lên [58]. Chen và cộng sự năm 2004 cũng đã chứng minh hiện tượng tương tự khi nhận thấy độ tồn lưu chất lỏng giảm đi đáng kể khi tăng tốc độ vòng quay [59].

Thời gian lưu chất lỏng ngắn cũng là một tính chất đặc biệt của thiết bị hấp thụ li tâm do thông số này chịu ảnh hưởng tương đối lớn bởi tốc độ vòng quay của đệm xoay. Năm 2002, Guo và cộng sự cũng đã khảo sát thông số này bằng cách đo độ dẫn điện của dung dịch NaCl giữa hai đầu đo ở cạnh trong và ngoài của đệm xoay [60]. Tương tự với độ tồn lưu chất lỏng, thời gian lưu của chất lỏng cũng phụ thuộc vào lượng chất lỏng cấp vào thiết bị và tốc độ của đệm xoay. Cụ thể, thời gian lưu của chất lỏng giảm đáng kể từ 0,7s xuống 0,2s khi tốc độ vòng quay tăng từ 400 đến 800 rpm. Đây là hệ quả gia tốc li tâm tạo ra từ tốc độ quay cao dẫn đến vận tốc của chất lỏng được đẩy lên đáng kể bên trong đệm xoay.

Từ các yếu tố đề cập trên cho thấy, đối với tháp hấp thụ, hiện tượng tắc nghẽn xảy ra khi chất lỏng lấp đầy hết các khoảng trống trong bề mặt nhồi mà không thể chảy xuống dưới đáy cột do áp suất dòng quá lớn bên trong cột tạo ra bởi lưu lượng chất lỏng và lưu lượng khí ngược chiều ở mức quá lớn. Tại thiết bị hấp thụ li tâm, khi lưu lượng hai dòng chất này đạt quá giới hạn, thay vì xảy ra hiện tượng tắc nghẽn, dòng khí sẽ bị thổi ngược ra một phần ở ống thoát khí đầu ra theo dạng giọt bắn [61]. Theo nghiên cứu của Munjal và cộng sự, hiện tượng này có thể khắc phục bằng cách tăng tốc độ vòng quay của đệm xoay, làm giảm áp suất dòng đồng thời tạo gia tốc li tâm lớn cho dòng nước thoát ra khỏi dòng khí lưu lượng lớn ngược chiều. Do đó, thiết bị hấp thụ li tâm có thể hoạt động ở điều kiện lưu lượng khí và dung dịch lớn hơn rất nhiều so với tháp hấp thụ mà không cần gia tăng kích thước thiết bị [62].

Thiết bị này đã được nghiên cứu để thay thế các cột nhồi hấp phụ thông thường nhờ khả năng khắc phục các nhược điểm của cột nhồi truyền thống như: kích thước lớn, tắc nghẽn, chi phí đầu tư và diện tích lắp đặt, hiệu suất thấp. Trong xử lý khí thải, các nghiên cứu hấp thụ CO_2 , NO_x và VOC cũng đã được thử nghiệm trong các nghiên cứu của Lin và cộng sự (2011) và Chen và cộng sự (2002) [53, 54]. Các tác giả đã chỉ ra rằng tốc độ quay của đệm xoay tạo ra lực li tâm lớn giúp cải thiện đáng kể hiệu quả truyền khối và diện tích giao thoa giữa hai pha rắn lỏng trong hấp thụ CO_2 [54]. Việc đó đồng nghĩa với hệ số truyền khối được tăng lên nhiều lần so với thể tích đệm cùng kích thước ở các thiết bị tháp hấp thụ thông thường. Trong nghiên cứu của Lin và cộng sự, kết quả hệ số truyền khối toàn quá trình trong hấp thụ CO_2 bằng thiết bị hấp thụ li tâm ($1,42 \text{ s}^{-1}$) lớn hơn đáng kể so với giá trị của tháp hấp thụ ($0,91 \text{ l/s}$) mặc dù kích thước của thiết bị hấp thụ li tâm nhỏ gọn hơn rất nhiều [53]. Trong nghiên cứu hấp thụ thu hồi hơi dung môi isopropyl alcohol của Lin và cộng sự, hệ số truyền khối được ghi nhận ở mức 165 s^{-1} với 95% hiệu quả hấp thụ với lưu lượng quy mô cận thực tế $150 - 300 \text{ m}^3/\text{h}$ khi sử dụng thiết bị hấp thụ li tâm [56]. Năm 1999, một thiết bị hấp thụ ly tâm đa tầng có công suất $3.000 \text{ m}^3/\text{h}$ được lắp đặt tại nhà máy axit sunfuric Zibo (tỉnh Sơn Đông, Trung Quốc) song song với hệ thống tháp hấp thụ hiện có để làm sạch khí đuôi SO_2 [63]. Trong quá trình hấp thụ trong thử nghiệm, nồng độ SO_2 trong khí thải dưới 300 ppm (hoặc thậm chí thấp tới 50 ppm) [64] đã đạt được, trong khi vốn đầu tư, khối lượng và mức tiêu thụ năng lượng giảm đáng kể so với hệ thống tháp hấp thụ truyền thống.

Các nghiên cứu trên thế giới khi sử dụng công nghệ ly tâm tiếp xúc hấp thụ xử lý khí thải công nghiệp đều cho thấy hiệu quả hấp thụ và hệ số truyền khối toàn quá trình tương đối tốt với kích thước nhỏ gọn hơn, đồng thời loại bỏ được nhược điểm tắc nghẽn so với tháp hấp thụ.

Tình hình nghiên cứu trong nước

Tại Việt Nam, hiện nay phương pháp hấp thụ hay còn được gọi là tháp hấp thụ đang là phương pháp chủ yếu để xử lý khí thải trong công nghiệp với đặc trưng là sử dụng một số dung môi – hợp chất hay nước để loại bỏ các thành phần chất ô nhiễm có trong khí thải.

Trong nước đã có nhiều nghiên cứu nhắm tới việc xử lý các chỉ tiêu khí thải bị ô nhiễm bằng nhiều phương pháp, kỹ thuật xử lý khác nhau. Tác giả Nguyễn Văn Đông và cộng sự (2022) đã tiến hành nghiên cứu khả năng hấp phụ khí CO_2 từ than sinh học từ vỏ hạt mắc-ca nhiệt phân ở nhiệt độ 600°C có độ rỗng xốp tương đối lớn kết quả cho thấy vật liệu có khả năng hấp phụ khí CO_2 lên đến $1,1 \text{ mmol/g}$ dựa trên

cơ chế thu giữ vật lý các phân tử khí [65]. Một nghiên cứu khác đã tiến hành chế tạo thành công vật liệu MIL-100(Fe) bằng phương pháp thủy nhiệt ở nhiệt độ 150°C trong 10 giờ cho thấy khả năng hấp phụ lên tới 53% NO_x và 84% acetone [66]. Ngoài ra, nghiên cứu giảm thiểu oxit lưu huỳnh trong khí xả động cơ diesel tàu thủy bằng tháp lọc ướt hệ thống kín được thiết kế xử lý đến 95% lượng phát thải SO_x, có khả năng loại 70% hàm lượng cặn rắn [67]. Tác giả Nguyễn Thị Thanh Minh và Nguyễn Tuấn Minh (2022) [68] đã sáng chế thành công thiết bị làm sạch khí biogas, khi thiết bị quay ly tâm tốc độ cao thì dung dịch hấp thụ sẽ văng tỏa ra hai bên thành và tiếp xúc với dòng khí sinh học đi vào nhiều hơn gia tăng khả năng xử lý khí thu hồi hoàn toàn lượng khí H₂S, CO, CO₂. Một nghiên cứu khác của Bùi Sỹ Lý và cs (2018) đã tiến hành nghiên cứu khả năng kết hợp thiết bị hấp thụ khí độc hại, thiết bị lọc bụi ướt để xử lý khí thải (thiết bị hấp thụ loại tháp rồng, thiết bị hấp thụ loại tháp có lớp vật đệm) ứng dụng tại một số cơ sở sản xuất đã chỉ ra rằng khi lắp đặt kết hợp giữa các thiết bị lọc bụi ướt với thiết bị hấp thụ khí với nhau trong một hệ thống xử lý khí thải, ngoài chức năng lọc bụi, xử lý khí độc hại, các thiết bị trên còn làm giảm nhiệt độ khói thải [32]. Bên cạnh đó, tác giả Đỗ Văn Mạnh và cộng sự [69, 70] đã nghiên cứu xử lý làm sạch khí biogas bằng thiết bị làm sạch khí ly tâm tốc độ cao (HGRPB) nhằm loại bỏ thành phần khí H₂S, CO₂ và CO để thu được khí CH₄ sạch phục vụ cho việc phát điện. Ngoài ra, nghiên cứu đã thiết lập thông số vận hành đối với thiết bị HGRPB: nồng độ KOH 0,01M; tốc độ quay $\omega = 1200$ rpm; tốc độ dòng khí $Q_G = 2,5$ lít/phút; tỷ lệ lưu lượng khí vào và lưu lượng dung dịch hấp thụ $Q_G/Q_L = 29$ [69, 70].

1.4. Sự cần thiết phải triển khai nghiên cứu

Ngành giấy và bột giấy đóng vai trò không thể thiếu trong nền kinh tế toàn cầu, phục vụ nhu cầu từ sản xuất bao bì, in ấn, đến các sản phẩm tiêu dùng hàng ngày. Trong bối cảnh nhu cầu về sản phẩm thân thiện với môi trường và tiêu chuẩn xuất khẩu xanh ngày càng cao, ngành giấy và bột giấy Việt Nam đang nổi lên như lĩnh vực giàu tiềm năng nhưng cũng nhiều thách thức về mặt môi trường. Ở bình diện quốc tế, việc kiểm soát và giảm thiểu phát thải từ ngành giấy là hành động trực tiếp thực thi các thỏa thuận toàn cầu mà Việt Nam đã ký kết, nổi bật là cam kết lịch sử đạt mức phát thải ròng bằng "0" (Net Zero) vào năm 2050 tại hội nghị COP26. Đồng thời, việc tuân thủ này cũng nhằm đáp ứng các chương về phát triển bền vững và tiêu chuẩn môi trường khắt khe được quy định trong các Hiệp định thương mại tự do thế hệ mới (như EVFTA, CPTPP). Do đó, đầu tư vào công nghệ xử lý khí thải và các giải pháp sản xuất sạch hơn là điều kiện tiên quyết để các doanh nghiệp sản xuất giấy tuân thủ pháp luật, tránh rủi ro về môi trường và đủ điều kiện hội nhập vào chuỗi cung ứng xanh toàn cầu.

Như đã nói ở trên, các nghiên cứu ở trong và ngoài nước đối với quá trình ly tâm tiếp xúc đã chứng minh những ưu thế vượt trội về hiệu năng loại bỏ các thành phần ô nhiễm trong dòng khí thải cũng như những hiệu quả về mặt kích thước và chi phí xây dựng so với các bể/tháp hấp thụ truyền thống. Để hướng đến xử lý khép kín và mục tiêu kinh tế tuần hoàn, việc nghiên cứu xử lý và thu hồi một số thành phần khí thải lò hơi sau công đoạn xử lý nhằm giảm thiểu ô nhiễm không khí và thu hồi sản phẩm sẽ là một bước nghiên cứu cần thiết.

Chính vì vậy, dựa trên nguyên lý và ưu điểm của quá trình ly tâm tiếp xúc, tác giả thực hiện đề tài: “***Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc***” quy mô phòng thí nghiệm mô phỏng khí thải ngành sản xuất giấy.

CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. ĐỐI TƯỢNG, MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU

2.1.1. Khí thải

Khí thải mô phỏng bao gồm $11 \pm 1\%$ thể tích CO_2 ; 600 ± 100 ppm SO_2 phần còn lại là N_2 . Các nồng độ này được lựa chọn nhằm đại diện cho khí thải sau cyclone/lọc túi vải với giả định rằng lượng bụi còn lại là không đáng kể.

2.1.2. Hệ thống xử lý khí thải quy mô phòng thí nghiệm

Hệ thống tích hợp PC-HP2R được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm một tháp đệm quy mô bán thí điểm (PC) kết hợp với một thiết bị ly tâm tiếp xúc HP2R (High-Performance Rotating Reactor).

- Tháp hấp thụ:

+ Tháp đệm được chế tạo bằng vỏ PVC

+ Kích thước phần đệm: 1000 mm chiều cao, 140mm đường kính, thể tích đệm $0,015 \text{ m}^3$.

+ Vật liệu đệm: Sợi thép xếp đan chất liệu SUS304, kích thước đường kính sợi: 0,1 mm.

Vật liệu đệm được làm từ thép không gỉ SUS 304 có khả năng kháng ăn mòn tốt trong môi trường khí quyển, nước bẩn và các hóa chất hữu cơ hoặc axit hữu cơ nhẹ. Đường kính sợi nhỏ (0,1mm) cho phép tốc độ ăn mòn tương đối thấp.

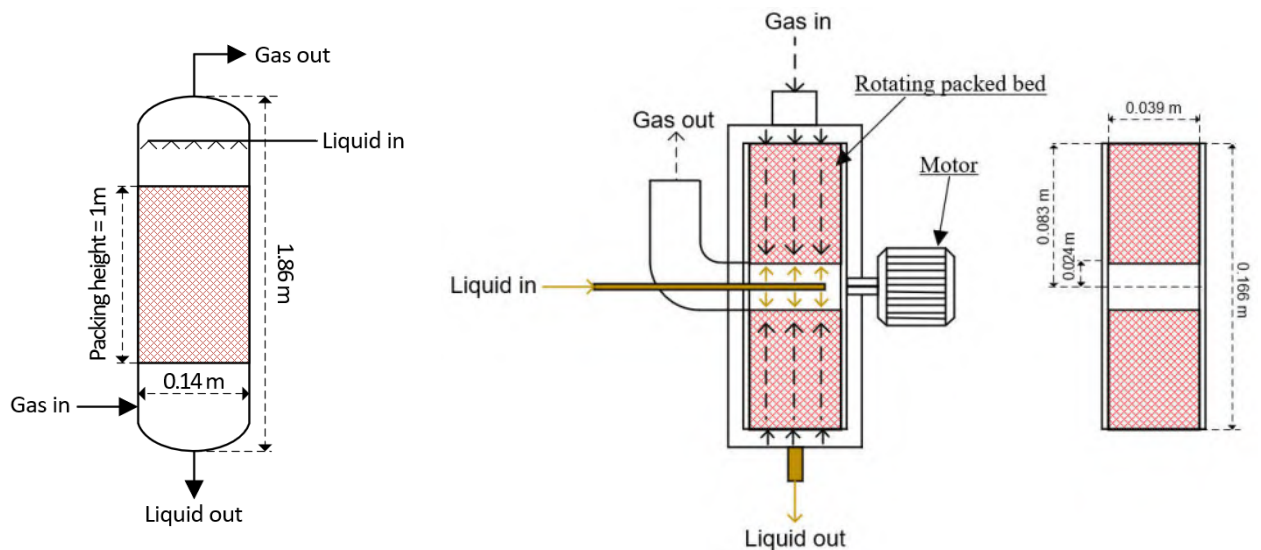
Với các khí CO_2 , SO_2 sử dụng trong nghiên cứu là các khí axit, sử dụng dung dịch kiềm để hấp thụ (NaOH). Ở môi trường này, SUS 304 trở hóa tốt, sợi thép 0,1mm giữ được độ bền cơ học, không bị rỉ sét. Tuổi thọ của vật liệu đệm trong trường hợp này có thể đạt từ 3-5 năm.

- Thiết bị ly tâm tiếp xúc ly tâm HP2R (High-Performance Rotating Reactor). Thiết bị HP2R đã áp dụng thiết kế đệm quay thẳng đứng với lợi ích là ổn định tốt hơn ở tốc độ quay cao, chống tắc nghẽn và chống tràn chất lỏng mà không làm dốc đáy vỏ. Thiết bị này bao gồm một bộ phân phối chất lỏng, vỏ bọc tĩnh, đệm quay và vật liệu nhồi bằng thép sợi búi, tất cả đều làm được làm từ thép không gỉ SUS304. Thể tích phần đệm (V_B) là $7,74 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, với chiều cao đệm nhồi (Z_B), bán kính trong thiết bị (r_i), bán kính ngoài thiết bị (r_o) lần lượt là 0,039m; 0,024 và 0,083 m (Hình 2.1). Đối với dung dịch hấp thụ, bơm định lượng cấp chất lỏng ổn định cho hệ thống. Một máy thổi khí được điều khiển bằng biến tần dùng để pha loãng khí thải đến nồng độ mong muốn. Vận tốc khí trong ống thoát được theo dõi bằng máy đo gió.



Hình 2. 1. Thiết bị HP2R

Hình 2.2 thể hiện cấu hình của các đơn vị PC và HP2R, Bảng 2.1 tóm tắt các đặc tính thiết kế chính của hệ thiết bị:



Hình 2. 2. Thiết kế của tháp hấp thụ và thiết bị HP2R sử dụng trong nghiên cứu

Bảng 2. 1. Thông số kỹ thuật chính hệ thiết bị xử lý khí thải PC-HP2R

Thông số	Đơn vị	Giá trị	
		PC	HP2R

Thông số đệm			
Chiều cao đệm (z_B)	m	1	0.039
Đường kính đệm (d)	m	0.14	0.166
Bán kính trong (r_i)	m	-	0.024
Bán kính ngoài (r_o)	m	-	0.083
Thể tích ngoài (V_B)	m ³	0.015	0.0007
Diện tích bề mặt riêng (a_p)	m ² /m ³	-	893
Vật liệu đệm	-	Thép SUS304 dạng lưới xếp đồng tâm	

2.1.3. Hóa chất, thiết bị

a. Hóa chất

- Khí CO₂ 99,99% (Việt Nam): khí thành phần trong khí thải mô phỏng;
- Khí SO₂ 5% trộn N₂ (Trung Quốc): khí thành phần trong khí thải mô phỏng;
- Khí N₂ 99,99% (Việt Nam): khí thành phần trong khí thải mô phỏng;
- NaOH (Xilong, Trung Quốc) dạng rắn, độ tinh khiết >99%, pha dung dịch hấp thụ.

b. Thiết bị

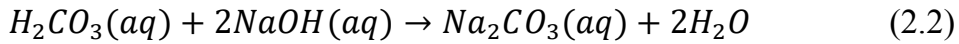
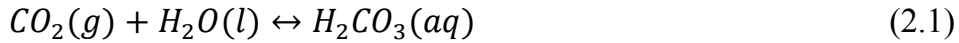
- Bơm định lượng (EHN-CV36VH4R, Iwaki, Nhật bản);
- Bơm định lượng (KS-52, Chonse, Hàn Quốc);
- Cảm biến pH (HI-1131B, Hanna) và máy phân tích đa thông số (HI-5222, Hanna);
- Thiết bị đo khí thải đa chỉ tiêu cầm tay (OC-1000, Henan Oceanus).

2.2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

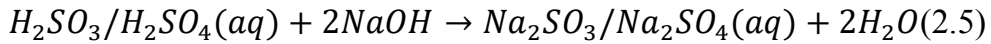
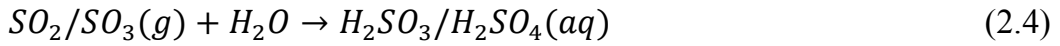
2.2.1. Nguyên lý thực nghiệm

Dung dịch NaOH được sử dụng làm chất hấp thụ trong cả hai bồn chứa. Nồng độ kiềm của NaOH được lựa chọn là 1M nhằm đại diện cho nồng độ chất hấp thụ kiềm điển hình thường được sử dụng trong các nghiên cứu trước đây và trong các ứng dụng thực tế gần đây [71-73]. Cơ chế loại bỏ đồng thời CO₂, SO₂ bằng NaOH 1M trong hệ PC-HP2R được trình bày từ Phương trình (2.1) đến (2.5). CO₂ trong dòng khí được kỳ vọng sẽ được hấp thụ vật lý vào pha lỏng dưới dạng axit cacbonic (H₂CO₃) (Phương trình 2.1), sau đó phản ứng với NaOH tạo natri cacbonat (Na₂CO₃) (Phương trình 2.2). SO₂ bị oxy hóa một phần bởi O₂ trong pha khí để tạo thành SO₃ (Phương trình 2.3). Hỗn hợp SO₂/SO₃ sau đó được hấp thụ vào pha lỏng (Phương trình 2.4) và phản ứng với NaOH để tạo thành các muối sunfat và sunfit (Phương trình 2.5).

Hấp thụ CO_2 :

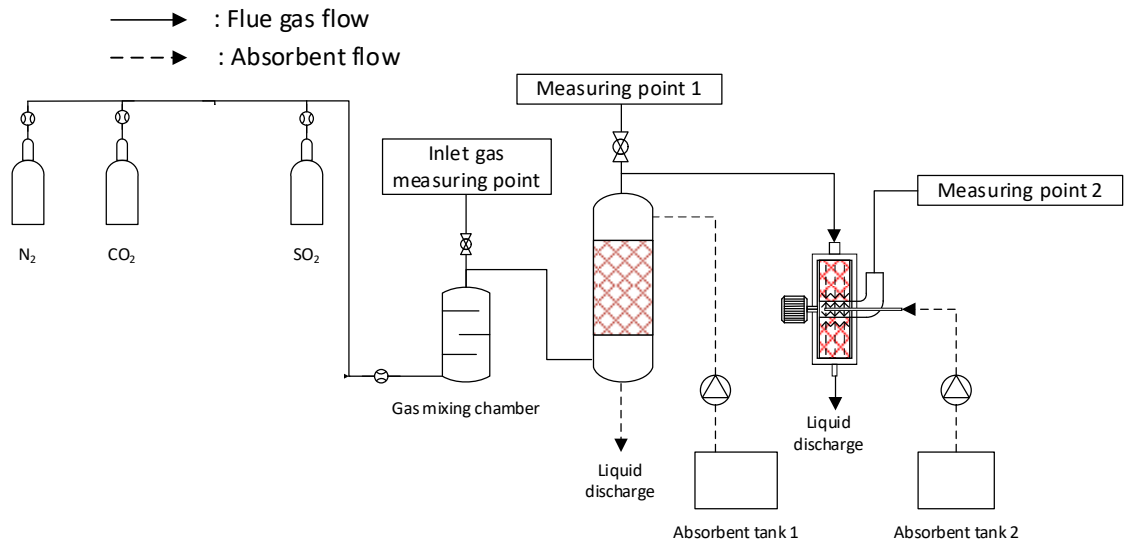


Hấp thụ SO_2 :



2.2.2. Phương pháp thực nghiệm

Sơ đồ thí nghiệm hấp thụ khí thải bằng hệ thống tích hợp PC-HP2R được thể hiện trong Hình 2.3. Khí thải mô phỏng được tạo ra bằng cách trộn khí CO_2 và SO_2 trong khí mang N_2 nhằm mô phỏng khí thải thực tế; hỗn hợp khí này được cấp từ các bình khí và được trộn đều trong buồng trộn trước khi đi vào hệ thống PC-HP2R. Dòng khí đi vào tháp đệm thông qua cửa nạp khí ở phần dưới, sau đó đi ngược lên qua lớp đệm đến cửa thoát khí ở phía trên.



Hình 2. 3. Sơ đồ quy trình thực nghiệm xử lý đồng thời khí thải bằng hệ thiết bị PC-HP2R

Dung dịch hấp thụ được bơm định lượng đưa vào hệ thiết bị và phân phối đều theo chiều từ trên xuống thông qua các vòi phun để tạo tiếp xúc ngược dòng với dòng khí. Dòng khí sau khi rời khỏi tháp đệm sẽ đi vào thiết bị HP2R. Trong thiết bị HP2R, dòng khí tiếp tục được tiếp xúc ngược dòng với dung dịch hấp thụ bên trong lớp đệm, rồi thoát ra qua cửa khí ra của HP2R. Hai vị trí lấy mẫu đều có van điều chỉnh, được lắp đặt tại cửa ra của PC và HP2R nhằm phục vụ việc đo khí thải. Khí thải mô phỏng bao gồm $11 \pm 1\%$ thể tích CO_2 và 600 ± 100 ppm SO_2 , phần còn lại là N_2 . Các nồng

độ này được lựa chọn nhằm đại diện cho khí thải công nghiệp (hệ thống lò hơi sử dụng nhiên liệu hóa thạch hoạt động tại các nhà máy giấy) sau cyclone/lọc túi vải với giả định rằng lượng bụi còn lại là không đáng kể.

Trong phạm vi nghiên cứu này, tiến hành các khảo sát bao gồm: ảnh hưởng của tốc độ quay của thiết bị HP2R (ω), lưu lượng khí thải (Q_G), lưu lượng dung dịch hấp thụ trong tháp PC (Q_{L1}) và trong thiết bị HP2R (Q_{L2}) đến hiệu suất loại bỏ CO_2 và SO_2 .

Điều kiện thí nghiệm:

- Tốc độ quay của thiết bị HP2R, ω dao động từ khoảng 100 – 700 rpm.
- Lưu lượng khí (Q_G) dao động từ 25 – 150 lít/phút.
- Lưu lượng dung dịch hấp thụ trong tháp PC (Q_{L1}) và trong HP2R (Q_{L2}) được điều khiển bằng hai bơm định lượng (KS-52, Chonseis), trong khoảng từ 0,05 L/phút đến 0,35 L/phút.

Mỗi điều kiện thí nghiệm được thực hiện lặp lại ba lần ($n = 3$). Đối với thí nghiệm vận hành liên tục, hệ thống được vận hành ở điều kiện tối ưu với dung dịch hấp thụ tuần hoàn nhằm đánh giá độ ổn định của hiệu suất xử lý và sự biến thiên pH của dung dịch theo thời gian. Tất cả các thí nghiệm được tiến hành trong điều kiện phòng thí nghiệm với nhiệt độ khoảng 30 ± 1 °C ($303,15 \pm 1$ K) và áp suất môi trường xấp xỉ 101 kPa.

2.2.3. Phương pháp phân tích

Giá trị pH của dung dịch hấp thụ được đo bằng các cảm biến pH (HI-1131B, Hanna) và máy phân tích đa thông số (HI-5222, Hanna). Đối với thí nghiệm vận hành liên tục, hai đầu dò pH riêng biệt được sử dụng cho hai bồn dung dịch hấp thụ thông qua khả năng đo hai kênh của thiết bị HI-5222, bảo đảm các phép đo độc lập và đáng tin cậy.

Nồng độ khí được đo bằng máy phân tích khí cầm tay (OC-1000, Henan Oceanus). Nồng độ CO_2 và SO_2 đầu vào và đầu ra được đo trực tiếp tại vị trí đo đầu vào và hai vị trí lấy mẫu đầu ra của hệ thống (Hình 2.3). Giữa các lần đo, thiết bị phân tích được xả khí trong khoảng một phút bằng cách vận hành bơm hút tích hợp trong khi ống hút khí được để hở trong không khí phòng thí nghiệm cho đến khi các chỉ số trở về mức nền môi trường. Sau khi kết thúc mỗi mẻ thí nghiệm, thiết bị đo cũng được vận hành cho đến khi ổn định ở nồng độ khí nền ($CO_2 < 0,03\%$, $SO_2 = 0$ ppm) trước khi chuyển sang mẻ tiếp theo hoặc tắt máy. Quy trình này bảo đảm rằng lượng khí dư từ lần đo trước được loại bỏ hoàn toàn trước lần đo kế tiếp, từ đó duy trì cân

bằng khối pha khí cho các chất ô nhiễm mục tiêu trong giới hạn độ chính xác của phương pháp phân tích.

2.2.4. Phương pháp tính toán

Hiệu suất loại bỏ CO₂, SO₂ và NO_x của tháp PC, thiết bị HP2R và toàn bộ hệ thống được tính toán trong nghiên cứu này. Hiệu suất loại bỏ (η) sau mỗi giai đoạn đối với từng chất ô nhiễm khí được xác định dựa trên nồng độ đầu vào (C_{Gi}) và nồng độ đầu ra (C_{Go}) đo được, theo công thức sau:

$$(\%) = \frac{C_{Gi} - C_{Go}}{C_{Gi}} \times 100\% \quad (2.6)$$

2.2.5. Phương pháp xử lý số liệu

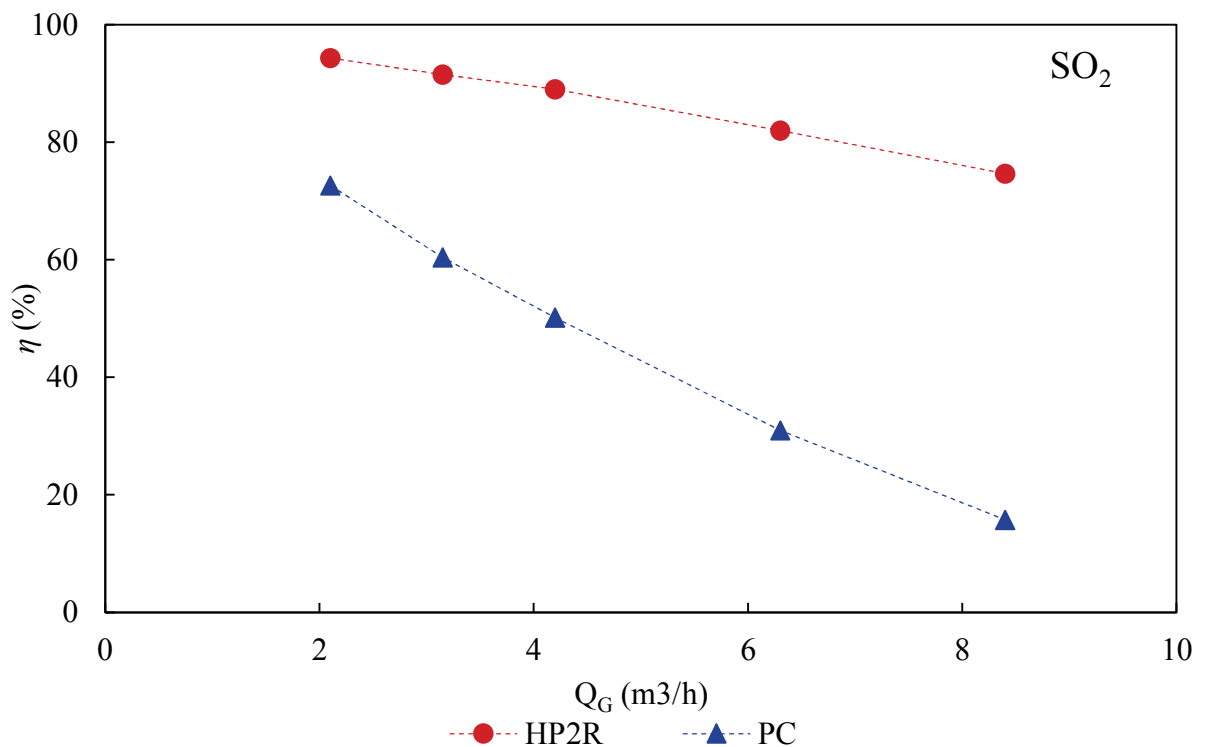
Toàn bộ kết quả của quá trình thực nghiệm đều được lấy giá trị trung bình và có độ lặp lại 3 lần. Tất cả số liệu thu được trong quá trình thực hiện nghiên cứu này đều được xử lý bằng các hàm trong phần mềm Microsoft Excel.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. SO SÁNH HIỆU QUẢ XỬ LÝ KHÍ THẢI GIỮA THÁP HẤP THỤ VÀ THIẾT BỊ HP2R

3.1.1. Xử lý SO_2

Kết quả ảnh hưởng của lưu lượng khí (Q_G) tới hiệu quả hấp thụ SO_2 (η) bằng tháp hấp thụ (PC) và thiết bị HP2R được thể hiện tại Hình 3.1. Nghiên cứu này được thực hiện dưới điều kiện $Q_L = 0,35 \text{ L/h}$, $C_{\text{SO}_2} = 600 \text{ ppm}$, độ pH dung dịch hấp thụ = 9, tốc độ vòng quay HP2R $\omega = 500 \text{ rpm}$



Hình 3. 1. Ảnh hưởng của lưu lượng khí tới hiệu quả hấp thụ SO_2 bằng PC và thiết bị HP2R

Đồ thị Hình 3.1 cho thấy khi tăng lưu lượng khí SO_2 hiệu quả xử lý của quá trình hấp thụ có xu hướng giảm. Cụ thể, ở hệ thiết bị tháp hấp thụ, hiệu quả xử lý SO_2 giảm từ 72,7% xuống dưới 20% khi lưu lượng khí thải tăng 4 lần từ 2,1 m^3/h lên 8,4 m^3/h . Sự suy giảm đột ngột này được chi phối bởi hai yếu tố cơ bản về thủy động lực học và quá trình chuyển khối bên trong thiết bị [74]:

Thứ nhất, sự thiếu hụt về thời gian phản ứng: Khi một khối lượng khí lớn hơn đi qua cùng một tiết diện đệm cố định, vận tốc di chuyển của dòng khí bắt buộc phải gia tăng. Vận tốc dòng chảy lớn sẽ làm rút ngắn đáng kể thời gian lưu của khí thải bên trong màng đệm. Hệ quả là pha khí di chuyển quá nhanh, không có đủ thời gian

để tiếp xúc với pha lỏng, khiến cho quá trình khuếch tán và hấp thụ hóa học SO_2 vào dung dịch bị gián đoạn và suy giảm mạnh mẽ [8].

Thứ hai, sự mất cân đối trong tỷ lệ chuyển khối: Việc liên tục tăng lưu lượng dòng khí trong khi vẫn giữ nguyên lưu lượng dung dịch hấp thụ đã làm gia tăng tỷ lệ Q_G/Q_L . Sự chênh lệch này dẫn đến hệ quả là lượng dung dịch hóa chất được phân bổ để xử lý trên mỗi đơn vị thể tích khí thải trở nên quá mỏng và ít. Tình trạng thiếu hụt dung dịch làm thay đổi tải lượng hấp thụ tối đa của hệ thống, khiến lớp màng chất lỏng nhanh chóng rơi vào trạng thái bão hòa hóa học trong khi lượng SO_2 dư thừa vẫn đi vào thiết bị [8].

Tương tự như quy luật đã quan sát thấy ở tháp truyền thống, thiết bị HP2R cũng chịu tác động của việc gia tăng lưu lượng khí (Q_G). Dữ liệu thực nghiệm chỉ ra rằng, khi lưu lượng khí Q_G tăng gấp 4 lần (từ 2,1 m^3/h lên 8,4 m^3/h), hiệu suất xử lý SO_2 của hệ thống đã ghi nhận giảm từ mức 94,3% xuống mức 74,6%. Mặc dù sở hữu thể tích đệm nhỏ hơn đáng kể, thiết bị HP2R vẫn thể hiện hiệu năng hoạt động vượt trội so với tháp hấp thụ truyền thống, đặc biệt ở tải lượng khí lớn. Cụ thể, tại mức lưu lượng $Q_G = 8,4 \text{ m}^3/\text{h}$, hiệu suất hấp thụ của tháp truyền thống suy giảm mạnh, chỉ đạt 15,4%. Ngược lại, thiết bị HP2R vẫn duy trì được hiệu suất ổn định ở mức tương đối cao là 74,6%. Xu hướng duy trì hiệu suất xử lý này cũng thể hiện sự tương đồng với các kết quả được ghi nhận trong nghiên cứu của Zhang và cộng sự (2018) [75]. Theo tài liệu này, trong điều kiện vận hành tối ưu với nồng độ SO_2 đầu vào là $900 \text{ mg}/\text{m}^3$, thiết bị ly tâm tiếp xúc có thể đạt hiệu suất loại bỏ SO_2 lên đến khoảng 88% đối với vật liệu đệm kim loại và 82% đối với vật liệu đệm nhựa.

Bên cạnh cấu trúc đệm tĩnh, việc tăng cường quá trình khử lưu huỳnh bằng công nghệ trọng lực cao cũng đã được đề xuất dựa trên các đặc tính của phản ứng. Theo đó, một mô hình tính toán bám sát động học phản ứng đã được phát triển nhằm mô tả quá trình truyền khối và phản ứng giữa SO_2 – DES (các dung môi sâu) bên trong thiết bị phản ứng và thiết bị RPB. Để kiểm chứng mô hình này, hiệu suất khử lưu huỳnh và hệ số truyền khối đã được tiến hành đo đạc dưới nhiều điều kiện vận hành khác nhau. Kết quả thu được đã chứng minh hiệu suất loại bỏ SO_2 có thể đạt trên 99% trong các điều kiện tối ưu, thực hiện thành công việc thu hồi SO_2 một cách triệt để và hiệu quả. Tính đúng đắn của mô hình đề xuất cũng đã được xác nhận thông qua việc hầu hết các hệ số truyền khối dự báo đều khớp rất tốt với kết quả thực nghiệm, với biên độ sai số chỉ dao động trong khoảng $\pm 15\%$ [76].

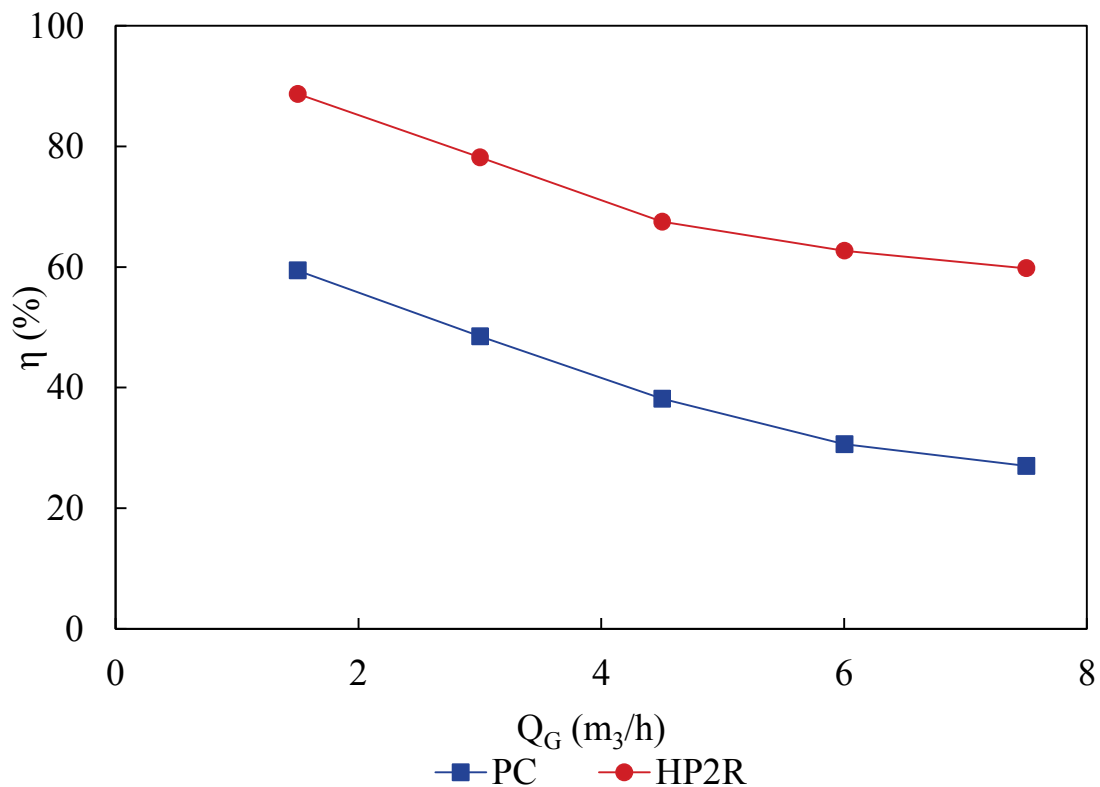
Nhìn chung, những kết quả thực nghiệm trên cho thấy việc ứng dụng công nghệ phản ứng tiên tiến như thiết bị HP2R trong xử lý khí thải đã khắc phục được những

giới hạn của tháp hấp thụ truyền thống, qua đó, tối ưu hóa toàn diện hiệu suất xử lý và thu hồi SO_2 .

Để lý giải cho khả năng duy trì hiệu quả xử lý ngay cả khi tăng lưu lượng khí, cần đi sâu vào phân tích quá trình truyền khối bên trong hệ thống. Theo đó, sự chênh lệch này có thể được giải thích dựa trên đặc tính thủy động lực học của thiết bị HP2R. Dưới tác dụng của lực ly tâm sinh ra tại tốc độ quay 500 vòng/phút, dung dịch hấp thụ được phân phối cường bức và đồng đều xuyên suốt lớp đệm. Lực ly tâm không chỉ giúp màng chất lỏng duy trì sự ổn định trước lực cắt của dòng khí đi ngược chiều có vận tốc lớn, mà còn thúc đẩy quá trình phân tán pha lỏng thành các hạt vi mô. Quá trình này làm gia tăng đáng kể diện tích bề mặt tiếp xúc pha, qua đó bù đắp hiệu quả cho sự suy giảm thời gian lưu của dòng khí. Kết quả là động lực của quá trình chuyển khối được duy trì, thúc đẩy sự hấp thụ SO_2 diễn ra với hiệu suất cao [77].

3.1.2. Xử lý CO_2

Hiệu quả xử lý khí CO_2 bằng tháp hấp thụ (PC) và thiết bị HP2R được thực hiện với lưu lượng khí thải được điều chỉnh trong khoảng từ 2,5 đến 12,5 L/phút. Trong khi các thông số khác được giữ cố định, bao gồm: $Q_L = 0,35$ L/phút; $C_{\text{CO}_2} = 10 \pm 1\%$; $C_{\text{NaOH}} = 0,2$ M, tốc độ vòng quay HP2R $\omega = 800$ rpm.



Hình 3. 2. Ảnh hưởng của lưu lượng khí tới hiệu quả hấp thụ CO_2 bằng PC và thiết bị HP2R

Kết quả thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu suất hấp thụ CO_2 bằng tháp hấp thụ và thiết bị HP2R được trình bày trong Hình 3.2. Kết quả cho thấy, khi lưu lượng khí tăng, hiệu quả xử lý CO_2 giảm đáng kể ở cả hai hệ thống. Cụ thể, với tháp hấp thụ, hiệu suất xử lý CO_2 giảm từ 59,4% xuống còn 27% khi lưu lượng khí tăng từ 2,5 đến 12,5 L/phút. Hiện tượng này suy giảm hiệu suất này có thể dựa trên sự chi phối đồng thời của hai cơ chế, bao gồm: động lực học truyền khối và giới hạn cân bằng phản ứng.

Thứ nhất, về mặt vật lý, khi tốc độ dòng khí được đẩy lên cao, dòng khí sẽ di chuyển qua màng đệm với vận tốc lớn hơn. Mặc dù vận tốc cao có thể tạo ra độ nhiễu loạn dòng chảy, nhưng điều đó làm rút ngắn đáng kể thời gian lưu của khí bên trong thiết bị. Quá trình hấp thụ khí – lỏng đòi hỏi một khoảng thời gian hữu hạn để các phân tử CO_2 có thể khuếch tán từ vùng lõi pha khí qua màng bề mặt và đi vào pha lỏng. Hệ quả trực tiếp là khoảng thời gian để pha khí và pha lỏng tiếp xúc và tương tác với nhau bị hạn chế. Khí thải thoát ra ngoài quá nhanh khi quá trình khuếch tán vào pha lỏng chưa kịp diễn ra trọn vẹn.

Thứ hai, về mặt hóa học, việc tăng lưu lượng khí sẽ làm thay đổi tỷ lệ cân đối giữa thể tích chất lỏng và thể tích khí. Hệ quả là lượng dung dịch hấp thụ được phân bổ tương ứng cho mỗi đơn vị thể tích khí đi qua sẽ trở nên mỏng đi và ít hơn. Điều này khiến cho lớp màng chất lỏng tham gia phản ứng nhanh chóng rơi vào trạng thái bão hòa do không đủ lượng hóa chất để phản ứng với lượng CO_2 đi vào liên tục. Điều này đồng nghĩa với việc động lực khuếch tán suy giảm đáng kể do sự thiếu hụt lượng hóa chất tự do cần thiết để phản ứng kịp thời với dòng CO_2 đi vào với cường độ lớn.

Tương tự như cơ chế hoạt động của các tháp hấp thụ truyền thống, hiệu suất xử lý CO_2 của thiết bị HP2R cũng chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi lưu lượng khí đầu vào. Cụ thể, khi lưu lượng khí càng tăng thì hiệu quả hấp thụ có xu hướng giảm dần. Minh chứng rõ nét cho quy luật này thể hiện ở điều kiện nồng độ dung dịch hấp thụ $\text{NaOH} = 0,2 \text{ M}$: khi Q_G tăng gấp 5 lần (từ 2,5 L/phút lên 12,5 L/phút), hiệu suất hấp thụ CO_2 của thiết bị đã ghi nhận mức giảm đáng kể từ 88,7% xuống còn 59,8%. Xu hướng suy giảm hiệu suất do ảnh hưởng của thời gian lưu và tỷ lệ lỏng/khí nêu trên có tính tương đồng với thực nghiệm được ghi nhận rộng rãi trong các nghiên cứu trước đây về công nghệ hấp thụ khí. Cụ thể, trong báo cáo của Sheng về hệ thống hấp thụ CO_2 bằng dung môi amin [78] và Joel (2014) [79] sử dụng MEA hay Lin (2007) [80] sử dụng dung dịch NaOH trên thiết bị ly tâm tiếp xúc đều chỉ ra rằng khi tăng lưu lượng khí, điểm hạn chế chi phối quá trình không còn nằm ở diện tích bề mặt tiếp xúc, mà chuyển sang kiểm soát bởi sự bão hòa nhanh chóng của màng dung môi (do tỷ lệ

lỏng/khí giảm) cùng với thời gian tiếp xúc giữa hai pha trở nên quá ngắn. Điều này làm nổi bật tầm quan trọng của việc tối ưu hóa tỷ lệ L/G trong vận hành thực tế.

Trong điều kiện các giới hạn về động học truyền khối và tỷ lệ L/G chi phối ở mức cao, sự khác biệt về cấu trúc không gian của vật liệu đệm đóng vai trò quan trọng đối với hiệu quả của quá trình xử lý. Mặc dù có sự sụt giảm nói trên, nhưng so sánh với tháp hấp thụ thông thường vận hành trong cùng điều kiện, thiết bị HP2R vẫn thể hiện được hiệu năng vượt trội. Điển hình như tại mức lưu lượng khí cao (12,5 L/phút), trong khi thiết bị HP2R vẫn duy trì được khả năng xử lý CO₂ ở mức 59,8%, thì tháp hấp thụ truyền thống – dù sở hữu thể tích đệm lớn hơn nhiều – lại chỉ đạt được 27,0%. Sự chênh lệch này cho thấy khả năng chống chịu tốt hơn của HP2R trước áp lực từ lưu lượng khí lớn.

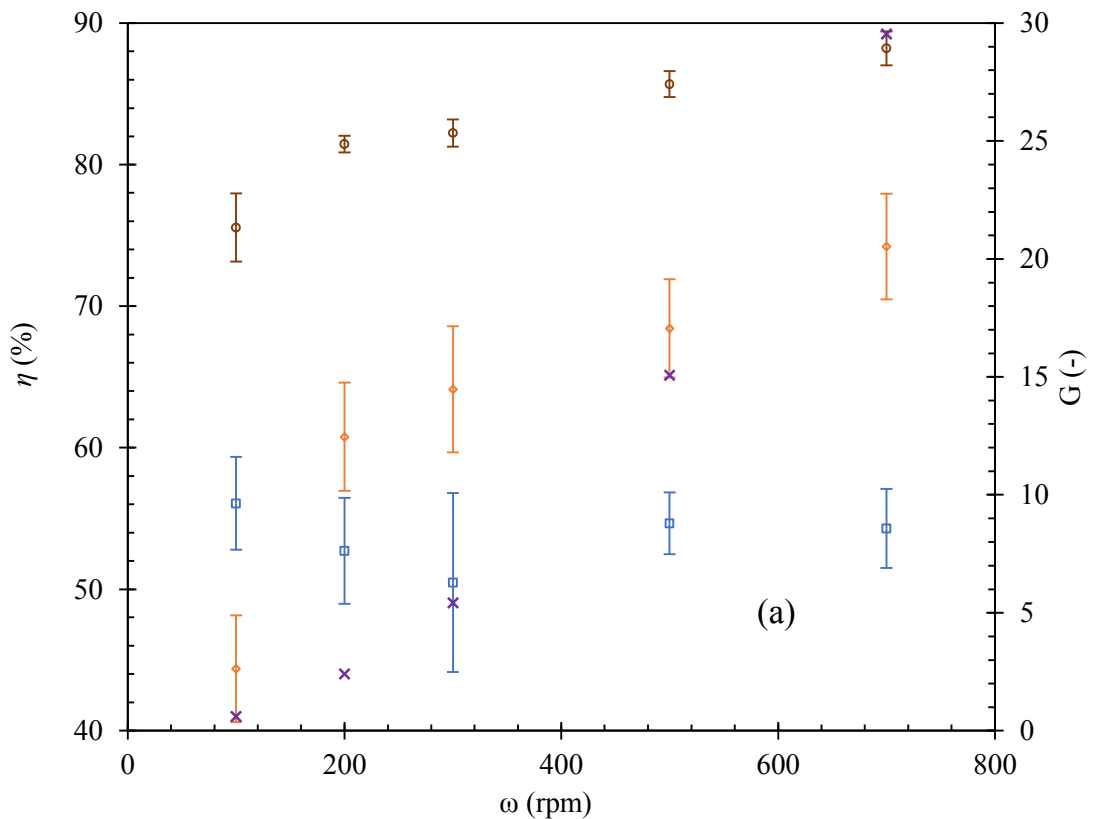
Thêm vào đó, sự sụt giảm hiệu suất do tăng lưu lượng khí hoàn toàn có thể được kiểm soát và hạn chế bằng cách tăng nồng độ chất hấp thụ. Dữ liệu thực nghiệm chỉ ra rằng, khi nâng nồng độ dung dịch NaOH lên mức 1M, hệ thống hoạt động ổn định hơn. Cụ thể, trong cùng một kích bản tăng lưu lượng khí Q_G từ 2,5 lên 12,5 L/phút, hiệu suất hấp thụ lúc này chỉ bị giảm nhẹ một biên độ hẹp từ 96,7% xuống 84,1%. Sự cải thiện hiệu suất đáng kể này được lý giải bởi sự gia tăng nồng độ ion OH⁻ tự do trong pha lỏng, qua đó làm tăng tốc độ phản ứng với CO₂ và thúc đẩy quá trình hấp thụ tiến gần đến vùng động học giả bậc một. Nguồn động lực hóa học này góp phần bù đắp hiệu quả sự thiếu hụt về thời gian tiếp xúc pha do lưu lượng khí lớn gây ra. Xu hướng này phù hợp với các kết quả được báo cáo bởi Lin và Liu (2007) [80] cũng như Cheng (2009) [36] trên các thiết bị ly tâm tiếp xúc. Trong đó, tác giả kết luận rằng việc duy trì nồng độ dung dịch hấp thụ tại bề mặt phân cách pha là yếu tố quyết định để duy trì hiệu suất thu hồi CO₂ ở tải lượng cao.

Sở dĩ thiết bị HP2R có thể đạt được những kết quả khả quan như vậy – ngay cả khi thiết kế thể tích đệm nhỏ hơn nhiều lần so với tháp truyền thống – là nhờ vào sự can thiệp của lực ly tâm. Với tốc độ quay được duy trì ở mức 800 vòng/phút, thiết bị tạo ra một lực ly tâm mạnh mẽ bên trong buồng xử lý. Lực này đóng vai trò then chốt trong việc xé nhỏ các giọt chất lỏng, từ đó cải thiện tối đa diện tích và khả năng tiếp xúc bề mặt giữa pha khí (CO₂) và pha lỏng (dung dịch NaOH). Quá trình tiếp xúc được tối ưu hóa này đã thúc đẩy mạnh mẽ quá trình chuyển khối và hấp thụ vật lý, giúp thiết bị bù đắp lại hạn chế về mặt thể tích và gia tăng đáng kể hiệu quả xử lý CO₂ tổng thể. Cơ chế tối ưu quá trình truyền khối của thiết bị ly tâm tiếp xúc cũng đã được minh chứng một cách hệ thống trong các nghiên cứu nền tảng của Ramshaw (1983) [44] và Chen (2009) [36], khẳng định tính khả thi của việc giảm thể tích thiết bị mà không làm giảm hiệu suất xử lý.

3.2. KHẢO SÁT YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG VÀ THÔNG SỐ VẬN HÀNH CỦA HỆ THỐNG PC-HP2R TRONG XỬ LÝ ĐỒNG THỜI KHÍ THẢI

3.2.1. Ảnh hưởng của tốc độ quay thiết bị HP2R

Ảnh hưởng của tốc độ quay của thiết bị HP2R được tiến hành trong điều kiện $Q_G = 25$ L/phút, $Q_L = 0,35$ L/phút, tốc độ quay ω được khảo sát trong khoảng từ 100 đến 700 vòng/phút (tương ứng với hệ số gia tốc trọng trường G từ 0,6 – 29,5). Hiệu quả loại bỏ đồng thời (η) của CO_2 và SO_2 tại tháp PC, thiết bị HP2R và toàn bộ hệ thống được thể hiện trong Hình 3.3 và Hình 3.4.



Hình 3. 3. Ảnh hưởng của tốc độ quay tới hiệu quả xử lý CO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

Ký hiệu: $\square$: η tại PC, $\diamond$: η tại HP2R, $\circ$: tổng η , $\times$: độ ly tâm (G)

Đồ thị Hình 3.4 cho thấy sự phân hóa rõ rệt về mức độ ảnh hưởng của tốc độ quay lên hai hệ thiết bị. Trong khi ω gần như không thể hiện tác động đáng kể đến hiệu suất hoạt động của tháp PC (do tháp đệm truyền thống vận hành chủ yếu dựa trên thế năng trọng trường và sự phân bố chất lỏng thụ động), thông số này lại đóng vai trò động lực học then chốt đối với thiết bị HP2R. Cụ thể, việc gia tăng ω tỷ lệ thuận với sự gia tăng mạnh mẽ hiệu suất hấp thụ của các cấu tử khí sau khi đi qua thiết bị HP2R, qua đó trực tiếp tối ưu hóa hiệu năng làm sạch của toàn bộ hệ thống.

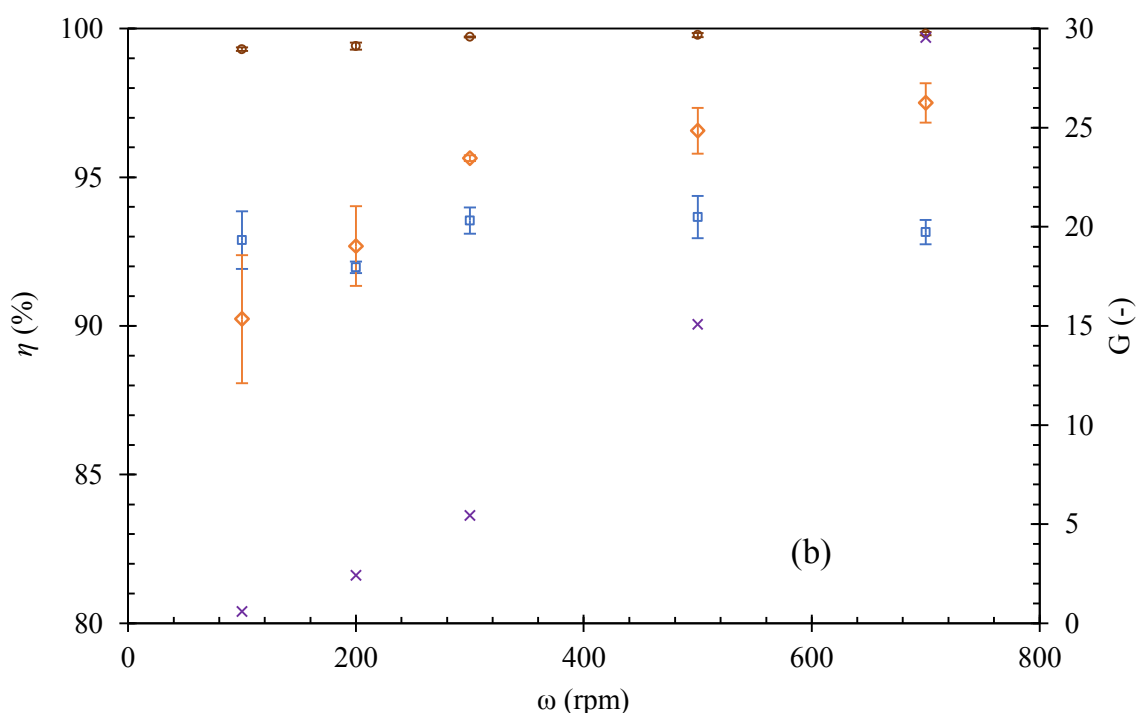
Dữ liệu định lượng đối với quá trình xử lý CO₂ (được biểu diễn tại Hình 3.4) đã minh chứng cho xu hướng động học này. Khi tiến hành tăng tốc độ quay ω từ 100 lên 300 vòng/phút, hiệu quả loại bỏ CO₂ của thiết bị HP2R tăng từ $44,4 \pm 3,8\%$ lên $64,1 \pm 4,5\%$. Hiệu quả của toàn bộ hệ thống được $75,6 \pm 2,4\%$ lên mức $88,2 \pm 1,2\%$. Sự gia tăng đáng kể này cho thấy việc bổ sung năng lượng cơ học đã góp phần vượt qua các giới hạn truyền khối thông thường.

Sự cải thiện hiệu suất nêu trên có thể được giải thích dựa trên cơ chế tăng cường quá trình truyền khối. Bên trong không gian lớp đệm của HP2R, sự gia tăng tốc độ quay đã sinh ra một trường lực ly tâm cường độ cao. Trường lực này vượt trội hơn nhiều lần so với lực hấp dẫn thông thường, thể hiện qua hệ số gia tốc trọng trường (G) đạt giá trị từ 2,4 đến 29,5. Dưới tác động cơ học này, dung dịch hấp thụ bị xé nhỏ và phân tán đồng đều thành các vi hạt và lớp màng siêu mỏng. Trạng thái thủy động lực học này không chỉ tối ưu hóa diện tích bề mặt tiếp xúc pha hữu hiệu, mà còn làm mỏng đáng kể lớp màng chất lỏng bám trên vật liệu đệm. Vì CO₂ là khí có độ hòa tan thấp, lực cản truyền khối chủ yếu nằm ở màng pha lỏng. Việc làm mỏng màng lỏng kết hợp với tốc độ làm mới bề mặt diễn ra liên tục dưới tác động của lực ly tâm đã kéo giảm mạnh mẽ lực cản này, bù đắp thời gian lưu và thúc đẩy mãnh liệt quá trình khuếch tán vật lý.

Tuy nhiên, biểu đồ cũng cho thấy tồn tại một giới hạn trong động học truyền khối khi tốc độ tăng hiệu suất không còn tuyến tính. Cụ thể, hiệu suất tăng mạnh trong cùng tốc độ quay thấp (100 – 300 rpm), nhưng xu hướng dần chậm lại và tiến tới bão hòa ở dải tốc độ quay cao hơn (500 – 700 rpm). Hiện tượng này minh chứng cho việc khi tốc độ quay quá lớn, thời gian lưu của dòng khí đi qua lớp đệm bị rút ngắn đáng kể, khiến việc tiếp tục mở rộng diện tích tiếp xúc không còn mang lại sự thay đổi rõ rệt về hiệu suất. Mặc dù vậy, nhờ vào động lực truyền khối của thiết bị HP2R, tổng hiệu suất thu hồi CO₂ của toàn bộ hệ thống vẫn trong xu hướng tăng, xuất phát từ 75% và chạm ngưỡng tối ưu xấp xỉ 90% tại $\omega = 700$ rpm.

Khả năng ứng dụng hiệu ứng của chế độ vận hành trong môi trường trọng lực cao nhằm gia tăng hiệu suất hấp thụ CO₂ đối với các hệ thống công nghệ HiGee tương tự cũng đã được xác nhận và công bố trong các nghiên cứu gần đây của Li và cộng sự (2024) [81], khẳng định tính nhất quán và độ tin cậy của mô hình thực nghiệm. Bên cạnh đó, xu hướng động lực học này cũng nhất quán với các kết luận của Chen (2006) [82] và Zhang (2020) [83]. Các tác giả này đã chứng minh rằng hệ số truyền khối thể tích tổng quả (K_{Ga}) trong thiết bị ly tâm tiếp xúc tăng tuyến tính với tốc độ quay ở giai đoạn đầu, nhờ sự gia tăng của diện tích tiếp xúc pha. Tuy nhiên, các nghiên cứu này cũng chỉ ra một giới hạn rằng khi ω tiếp tục tăng vượt ngưỡng nhất

định, hiệu suất xử lý có xu hướng bão hòa do thời gian lưu của chất lỏng bị rút ngắn đến mức tối đa, không đủ để phản ứng hóa học diễn ra trọn vẹn.



Hình 3. 4. Ảnh hưởng của tốc độ quay tới hiệu quả xử lý SO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

Ký hiệu: $\square$: η tại PC, $\diamond$: η tại HP2R, $\circ$: tổng η , $\times$: độ ly tâm (G)

Ảnh hưởng của tốc độ quay lên hiệu quả hấp thụ SO_2 không được rõ rệt như đối với cấu tử CO_2 (Hình 3.5). Dữ liệu thực nghiệm tại Hình 3.5 cho thấy, khi tăng ω từ 100 đến 700 vòng/phút, hiệu quả loại bỏ SO_2 tại thiết bị HP2R ghi nhận biên độ tăng trưởng vừa phải, từ $90,2 \pm 2,5\%$ lên $97,5 \pm 0,7\%$. Hệ quả là, hiệu suất xử lý SO_2 tổng thể của toàn hệ thống không có sự biến động lớn mà luôn được duy trì ổn định ở ngưỡng gần như tuyệt đối, dao động trong một khoảng rất hẹp từ $99,3 \pm 0,1\%$ đến $99,8 \pm 0,1\%$.

Sự khác biệt về mức độ đáp ứng với biến số ω này có thể được lý giải thông qua bản chất hóa lý nội tại của cấu tử khí, SO_2 là một phân tử có độ phân cực cao [84], mang tính axit mạnh và có động học phản ứng cực kỳ nhạy bén với chất hấp thụ kiềm (NaOH) [31]. Nhờ ái lực hóa học lớn và độ hòa tan tốt, quá trình hấp thụ SO_2 được chi phối chủ yếu bởi trở lực truyền khối ở pha khí. Điều này trái ngược với CO_2 – một khí ít hòa tan và bị kiểm soát bởi sức cản pha lỏng. Do phản ứng của SO_2 diễn ran gay tại bề mặt phân cách pha với tốc độ nhanh, quá trình này ít bị phụ thuộc vào mức độ xáo trộn hay tốc độ làm mới bề mặt của màng chất lỏng. Vì vậy, việc áp dụng thiết bị HP2R chủ yếu làm tăng hệ số truyền khối pha lỏng (k_L), quá đó cải thiện đáng

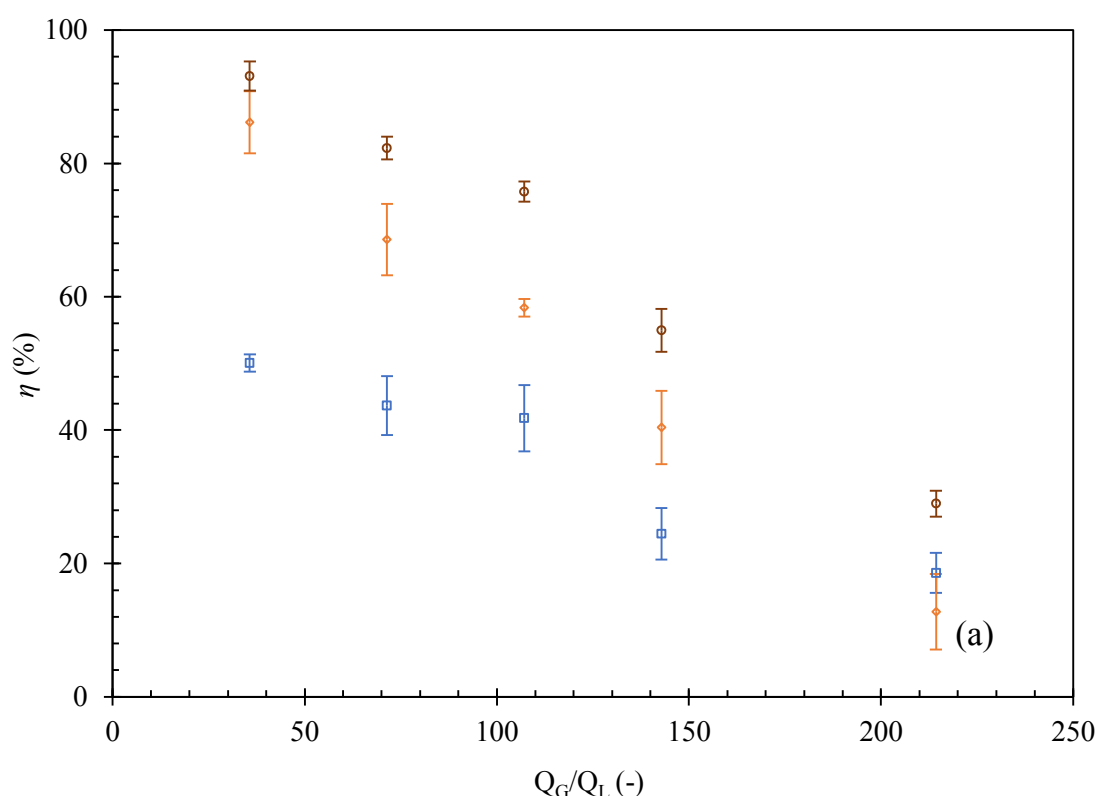
kể hiệu quả hấp thụ CO_2 nhưng ít động đến SO_2 do quá trình này bị chi phối bởi trở lực ở pha khí. Điều này tương đồng với thực nghiệm của Lin (2004), trong đó tác giả nhận định hiệu suất hấp thụ $\text{SO}_2 - \text{NaOH}$ trong thiết bị ly tâm tiếp xúc ít nhạy cảm với tốc độ quay mà phụ thuộc chủ yếu vào lưu lượng khí đầu vào và nồng độ dung dịch kiềm.

Kết quả nghiên cứu không chỉ đánh giá năng lực của từng thiết bị đơn lẻ mà còn làm nổi bật tính ưu việt của việc tích hợp giữa tháp (PC) và thiết bị HP2R. Đánh giá độc lập cho thấy, tại mức tốc độ quay thấp $\omega = 100$ vòng/phút, tương ứng với hệ số gia tốc trọng trường $G = 0,6$, hiệu suất xử lý của thiết bị HP2R đối với cả 2 cấu tử đều khiêm tốn hơn so với tháp PC do những hạn chế về thể tích vùng đệm. Tuy nhiên, khi hệ số G được tăng lên dải giá trị từ $5,4 - 29,5$ (tương ứng $\omega = 300 - 700$ vòng/phút), hiệu suất xử lý đã thay đổi. Trong cùng điều kiện làm việc, thiết bị HP2R đã thể hiện năng lực hấp thụ tốt hơn, cho thấy khả năng vận hành với hiệu suất cao dù cấu tạo nhỏ gọn. Số liệu thực nghiệm tại Hình 3.4 minh chứng rõ nét cho điều này: trong dải ω từ 500 đến 700 vòng/phút ($G = 15,1 - 29,5$), hiệu suất hấp thụ CO_2 của thiết bị HP2R đã vượt trội hơn tháp PC với biên độ chênh lệch lên tới $15 - 20\%$. Sự thay đổi tương quan này cho thấy công nghệ tiếp xúc ly tâm đã làm giảm đáng kể ảnh kích thước thiết bị, cường độ truyền khối cao trong thiết bị HP2R mang lại ưu thế về cho diện tích quỹ đất trong trường hợp ứng dụng thực tế cho tương lai.

Đặc biệt, việc tích hợp PC-HP2R tạo ra cơ chế cộng hưởng trong quá trình vận hành. Tháp PC đặt trước có vai trò như một bước xử lý thô cung cấp thời gian lưu dài để xử lý phần lớn lượng khí ở nồng độ cao mà không tiêu tốn nhiều năng lượng cơ học. Tiếp theo, thiết bị HP2R đóng vai trò như một cấp bước xử lý tiên tiến, sử dụng lực ly tâm để tạo ra hệ số truyền khối lớn, làm sạch tối ưu các lượng khí còn lại ở mà bước xử lý thô chưa làm được cho hạn chế về tiết diện hấp thụ.

3.2.2. Ảnh hưởng của lưu lượng khí

Nghiên cứu ảnh hưởng của lưu lượng khí được tiến hành tại điều kiện: tốc độ quay $\omega = 500$ vòng/phút, lưu lượng lỏng $Q_L = 0,35$ L/phút, lưu lượng khí Q_G thay đổi từ 25 đến 150 L/phút hoặc tỷ lệ lưu lượng khí-lỏng (Q_G/Q_L) từ 36 đến 214. Hiệu quả loại bỏ CO_2 và SO_2 tại PC và HP2R được thể hiện tại Hình 3.5 và 3.6.



Hình 3. 5. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q_G/Q_L tới hiệu quả xử lý CO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

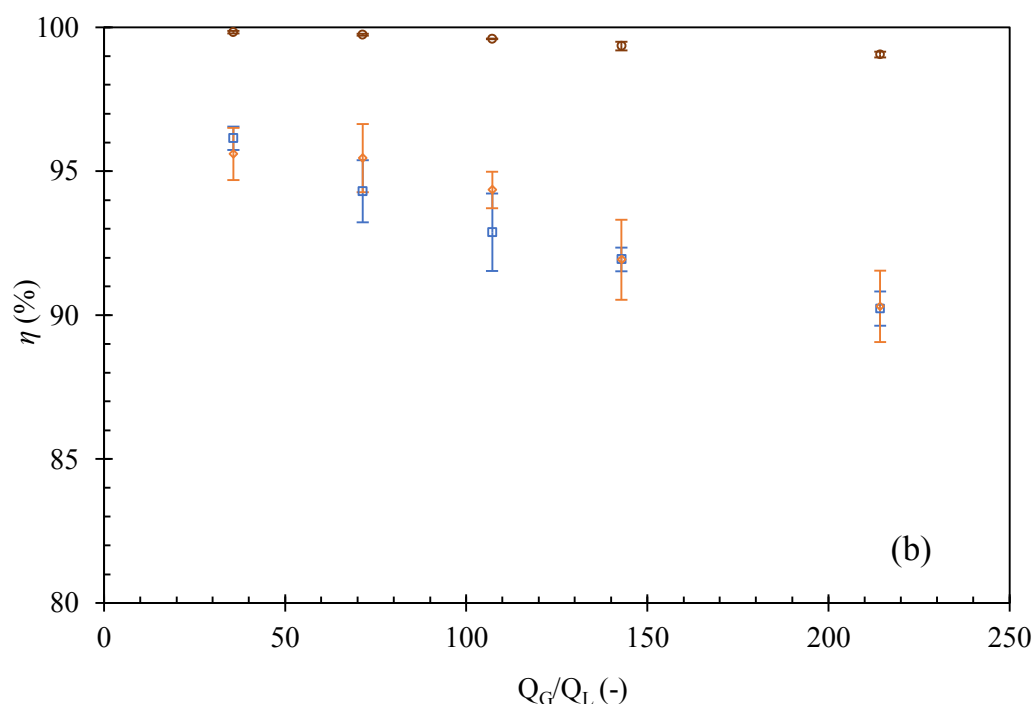
Ký hiệu: □: η tại PC, ◇: η tại HP2R, ○: tổng η

Đồ thị đánh giá thực nghiệm cho thấy quy luật động học nhất quán: sự gia tăng tải lượng dòng khí thải đầu vào có tác động tỷ lệ nghịch đối với hiệu suất xử lý của cả hai cấu tử khí trên cả hai thiết bị hấp thụ. Hình 3.5 cho thấy, khi tỷ lệ Q_G/Q_L được tăng từ 36 lên 214, hiệu suất loại bỏ CO_2 giảm đáng kể, từ $50,1 \pm 1,3\%$ xuống $18,6 \pm 3,0\%$ tại PC, và giảm sâu từ $86,2 \pm 4,7\%$ xuống mức $12,8 \pm 5,7\%$ tại thiết bị HP2R.

Sự suy giảm hiệu suất chung của cả hai hệ thống được nhận định bắt nguồn từ việc tăng tỷ lệ khí – lỏng (Q_G/Q_L), dẫn đến tình trạng lượng dung môi không đủ tại bề mặt phân cách pha. Khi lưu lượng khí quá lớn, lớp màng chất lỏng tham gia phản ứng nhanh chóng bị bão hòa, làm suy giảm động lực khuếch tán nồng độ.

Ở thiết bị HP2R, thể tích lớp đệm nhỏ hơn đáng kể so với tháp PC đã cho thấy độ nhạy cao hơn và dễ bị ảnh hưởng bởi biến động của lưu lượng pha khí. Trong thiết bị phản ứng HP2R, thời gian lưu của dòng khí qua vùng đệm ngắn, khi tải lượng khí tăng lên mức cao ($Q_G = 150$ L/phút), vận tốc khí tuyến tính đi qua các khe hở của lớp đệm tăng lên, điều này làm hệ thống vượt qua giới hạn động học truyền khối. Dòng khí di chuyển quá nhanh khiến các phân tử CO_2 không có đủ thời gian để khuếch tán qua màng khí và thực hiện phản ứng hóa học với dung dịch kiềm.

Điều này dẫn đến hệ quả là tại mức lưu lượng khí lớn, hiệu quả xử lý CO_2 của thiết bị HP2R ($12,8 \pm 5,7\%$) đã thấp hơn so với tháp PC ($18,6 \pm 3,0\%$). Mặc dù tháp PC không tối ưu về hệ số truyền khối như thiết bị HP2R, nhưng thể tích lớp đệm lớn đóng vai trò tốt trong việc mang lại thời gian tiếp xúc pha dài hơn.



Hình 3. 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q_G/Q_L tới hiệu quả xử lý CO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

Ký hiệu: □: η tại PC, ◇: η tại HP2R, ○: tổng η

Đối với cấu tử khí SO_2 , động học hấp thụ lại thể hiện tính bền vững trong mọi điều kiện vận hành. Đồ thị Hình 3.6 cho thấy hiệu suất loại bỏ SO_2 luôn được duy trì ở ngưỡng trên 90% ở cả thiết bị PC (từ $90,2 \pm 0,6\%$ đến $96,1 \pm 0,4\%$) và HP2R (từ $90,3 \pm 1,2\%$ đến $95,6 \pm 0,9\%$), xuyên suốt dải khảo sát Q_G từ 25 đến 150 L/phút.

Việc duy trì hiệu quả xử lý đối với cấu tử SO_2 cho thấy quá trình được chi phối bởi trở lực truyền khối ở pha khí. Do phản ứng giữa SO_2 và NaOH diễn ra nhanh tại bề mặt phân cách pha, sự gia tăng lưu lượng dòng khí tuy làm giảm thời gian lưu nhưng đồng thời lại tạo ra độ nhiễu loạn lớn hơn ở pha khí. Hiệu ứng đối lập này giúp động lực truyền khối và hiệu suất hấp thụ nội tại được bảo toàn. Hiện tượng này thể hiện sự tương đồng và tính chuẩn xác cao khi đối chiếu với nghiên cứu của Chen và cộng sự (2020) [73], trong đó, nhóm tác giả chỉ ra rằng mức hiệu suất xử lý SO_2 luôn ổn định ở ngưỡng 96 – 98% khi vận hành thiết bị phản ứng ngay cả khi lưu lượng khí thay đổi.

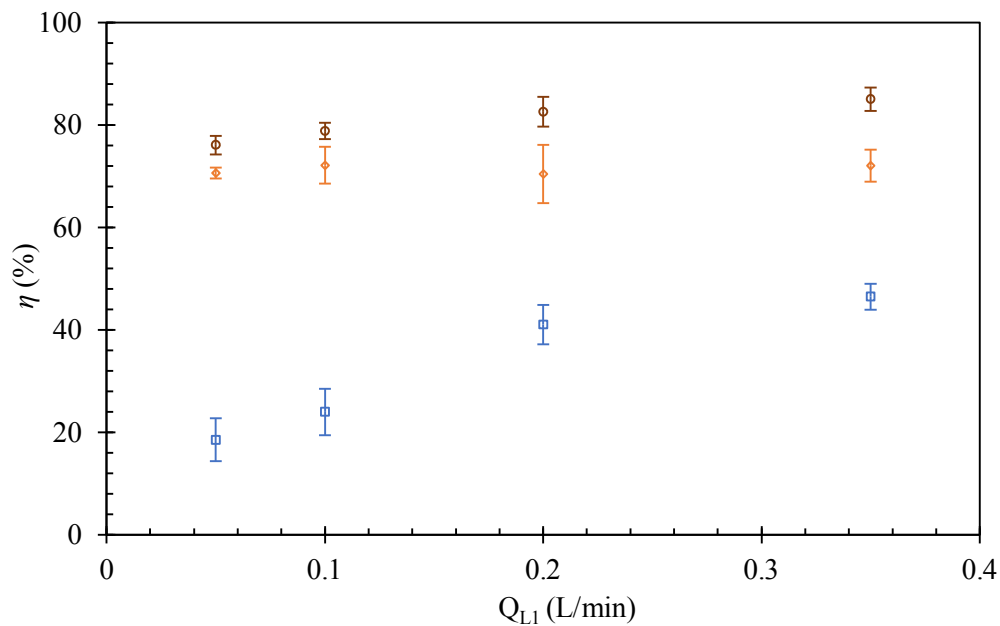
Hơn nữa, việc ứng dụng mô hình hấp thụ nối tiếp PC-HP2R đã tạo ra một hệ thống xử lý đa tầng mang tính hỗ trợ cao. Nhờ cấu hình này, hiệu quả xử lý SO_2 tổng thể của toàn hệ thống đã đạt được độ tin cậy lớn, luôn duy trì trên ngưỡng 99% ngay cả khi lưu lượng khí đầu vào tăng từ 25 đến 150 L/phút, điều này có thể đáp ứng tiêu chuẩn xả thải công nghiệp khắt khe trong bối cảnh hiện nay.

3.2.3. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ

Trong nghiên cứu này, lưu lượng dung dịch hấp thụ tại các thiết bị PC và HP2R được khảo sát riêng biệt nhằm xác định khoảng vận hành tối ưu cho hiệu quả loại bỏ chất ô nhiễm.

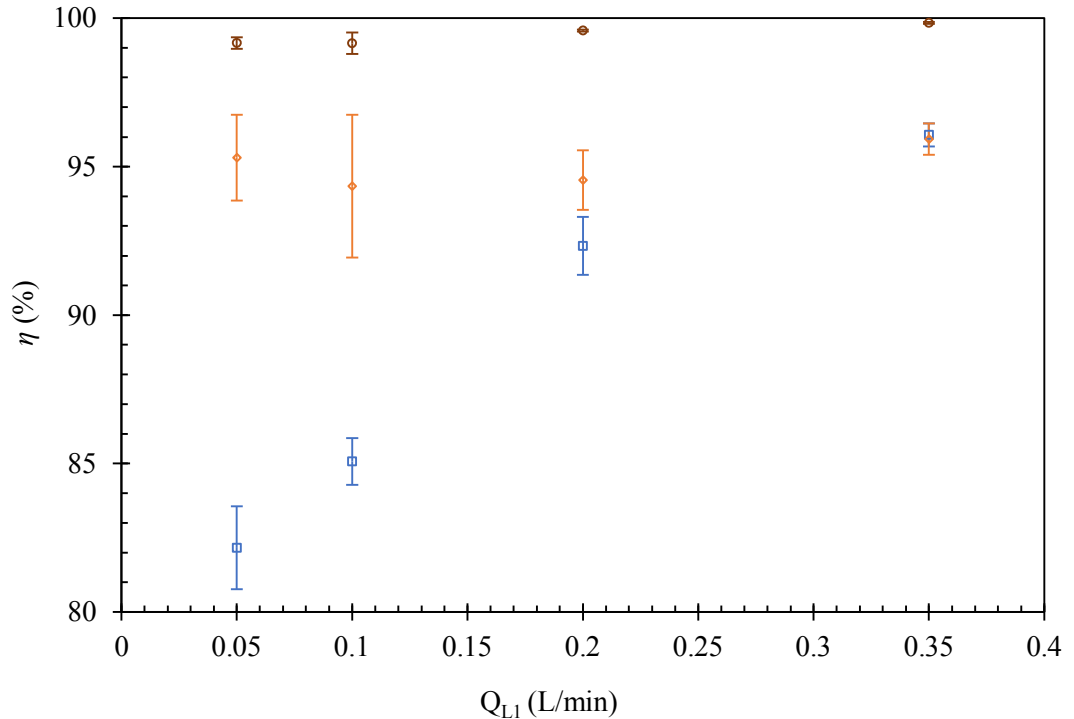
- *Tháp hấp thụ:*

Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại PC (Q_{L1}) lên hiệu suất (η) loại bỏ CO_2 và SO_2 được đánh giá trong điều kiện $Q_G = 25$ L/phút, $Q_{L2} = 0,35$ L/phút và $\omega = 500$ vòng/phút, như thể hiện trong Hình 3.7 và Hình 3.8.



Hình 3. 7. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q_{L1} tới hiệu quả xử lý CO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

Ký hiệu: $\square$: η tại PC, $\diamond$: η tại HP2R, $\circ$: tổng η



Hình 3. 8. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q_{L1} tới hiệu quả xử lý SO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

Ký hiệu: $\square$: η tại PC, $\diamond$: η tại HP2R, $\circ$: tổng η

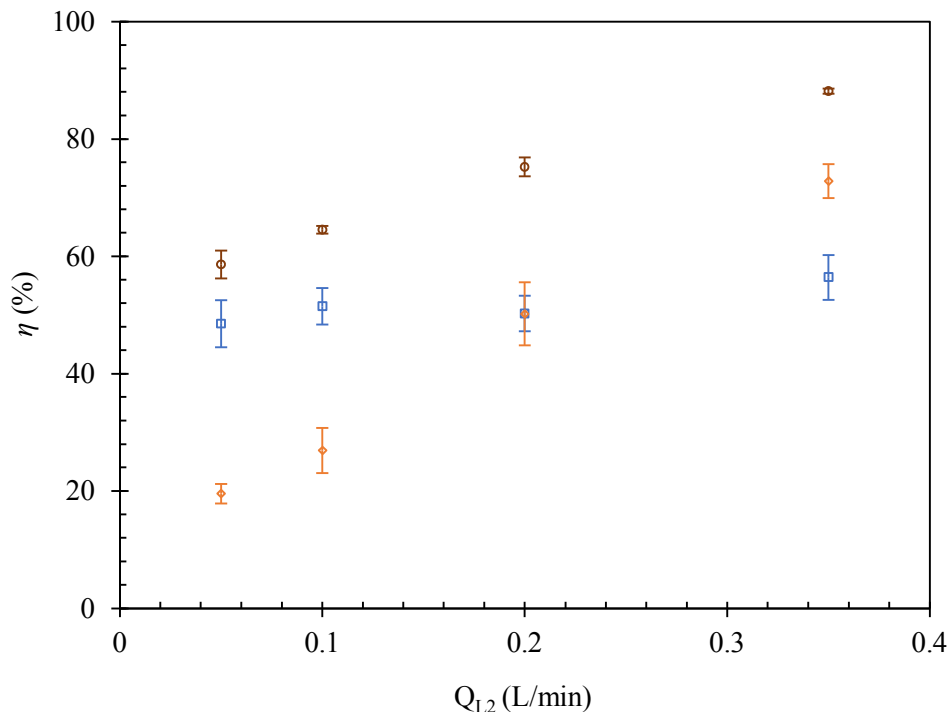
Kết quả khảo sát thực nghiệm cho thấy vai trò động lực học quan trọng của lưu lượng dung dịch hấp thụ đầu vào (Q_{L1}) đối với hiệu suất xử lý của hệ thống. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ cho thấy một xu hướng tỷ lệ thuận rõ rệt: khi tăng Q_{L1} hiệu suất xử lý (η) tăng đồng loạt trên cả hai cấu tử khí. Cụ thể, hiệu suất loại bỏ CO_2 tăng từ $18,6 \pm 4,2\%$ lên $46,5 \pm 2,5\%$. Đồng thời, hiệu suất xử lý SO_2 cũng được cải thiện, tăng từ $82,2 \pm 1,4\%$ và chạm ngưỡng bão hòa tối ưu ở mức $96,1 \pm 0,4$.

Bản chất hóa lý và cơ sở nhiệt động học chi phối sự gia tăng hiệu suất này thể hiện trong việc hệ thống đã tối ưu hóa thành công động lực của quá trình chuyển khối khí – lỏng. Cụ thể, khi lưu lượng dòng khí thải được duy trì ở mức ổn định, việc gia tăng lưu lượng pha lỏng đồng nghĩa với việc nâng tỷ lệ L/G. Việc này cung cấp một lưu lượng dung dịch hấp thụ chưa bão hòa vào không gian phản ứng của vật liệu đệm. Sự bổ sung liên tục hóa chất hoạt tính này đóng vai trò then chốt trong việc duy trì độ dốc chênh lệch nồng độ ở mức cao giữa mặt phân cách pha khí và pha lỏng dọc theo toàn bộ chiều cao thiết bị. Lập luận này có sự tương đồng trong nghiên cứu của Zhang (2020) [83], trong đó tác giả đã chỉ ra rằng khi tỷ lệ L/G tăng, màng chất lỏng bao phủ trên vật liệu đệm trở nên đồng nhất hơn, góp phần vào sự gia tăng hệ số truyền khối thể tích ($K_G a$).

Về phương diện truyền khối, việc lưu lượng dung dịch hấp thụ tăng giúp bổ sung lượng dung dịch chưa bão hòa một cách liên tục và cung cấp mật độ lớn các ion OH^- tự do vào bề mặt phân cách pha. Đối với CO_2 – một khí có độ hòa tan thấp và bị giới hạn bởi sức cản pha lỏng – sự dư thừa nồng độ kiềm đã đẩy nhanh tốc độ chuyển hóa, làm cho cơ chế hấp thụ tiền gần đến chế độ phản ứng giả bậc một. Lực cản hóa học lúc này được triệt tiêu đáng kể. Trong khi đó, đối với cấu tử phản ứng tức thời như SO_2 , lượng kiềm cung cấp liên tục với tuần suất tái tạo màng chất lỏng cao đã liên tục loại bỏ lớp sản phẩm trên bề mặt pha lỏng. Cơ chế này giúp duy trì liên tục bề mặt pha lỏng chưa bão hòa, qua đó đảm bảo gradient nồng độ lớn dọc theo chiều cao tháp, tạo động lực truyền khối cho quá trình khuếch tán. Hiện tượng động học này cũng đã được ghi nhận bởi Chen [73] khi nghiên cứu về quá trình hấp thụ cấu tử khí, tác giả chỉ ra rằng việc tăng tỷ lệ L/G là một trong số điều kiện tiên quyết để ngăn sự giảm động lực truyền khối khi xử lý dòng khí có tải lượng ô nhiễm biến động.

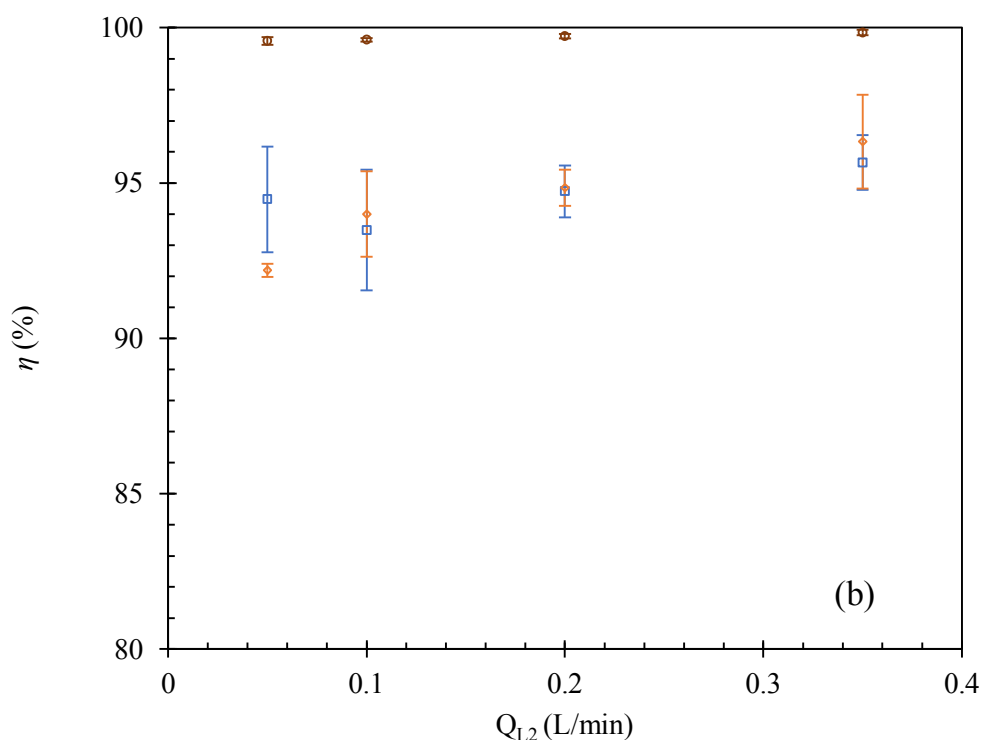
- *Thiết bị HP2R:*

Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại thiết bị HP2R (Q_{L2}) lên hiệu quả loại bỏ (η) của CO_2 và SO_2 được thực hiện trong điều kiện $Q_G = 25$ L/phút, $Q_{L1} = 0,35$ L/phút và $\omega = 500$ vòng/phút, như thể hiện trong Hình 3.9 và 3.10.



Hình 3. 9. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q_{L2} tới hiệu quả xử lý CO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

Ký hiệu: $\square$: η tại PC, $\diamond$: η tại HP2R, $\circ$: tổng η



Hình 3. 10. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q_{L2} tới hiệu quả xử lý SO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

Ký hiệu: □: η tại PC, ◇: η tại HP2R, ○: tổng η

Đồ thị Hình 3.9 và 3.10 cho thấy xu hướng động học ghi nhận tại thông số Q_{L2} tương đồng với Q_{L1} , việc gia tăng lưu lượng dung dịch hấp thụ ở giai đoạn hai tiếp tục cải thiện đáng kể hiệu quả xử lý CO_2 của thiết bị HP2R. Kết quả định lượng cho thấy hiệu suất xử lý của CO_2 tăng từ $19,5 \pm 1,7\%$ lên $72,8 \pm 2,9\%$ (Hình 3.9).

So sánh với tháp PC cho thấy thiết bị HP2R có độ nhạy và hiệu quả chuyển khối cao hơn rõ rệt khi cùng tăng lưu lượng pha lỏng. Trong khoảng lưu lượng từ 0,05 đến 0,35 L/phút, mức cải thiện hiệu suất đối với CO_2 tại thiết bị HP2R đạt 53,3%, cao hơn đáng kể so với các giá trị tương ứng tại PC (27,9%). Sự khác biệt này chủ yếu xuất phát từ đặc trưng thủy động lực học của lớp đệm quay. Tháp đệm truyền thống có xu hướng xảy ra hiện tượng tràn khi tải lượng lỏng tăng cao. Khi lưu lượng lỏng tăng cao, khối lượng chất lỏng ứ đọng và bít kín các khe hở của vật liệu đệm, làm suy giảm diện tích tiếp xúc hữu hiệu và gia tăng sức cản dòng khí.

Ngược lại, thiết bị HP2R vận hành với một lợi thế cơ học đặc biệt. Tốc độ quay lớn sinh ra trường lực ly tâm cực mạnh, ép chất lỏng văng ra khỏi lớp đệm, qua đó đẩy lùi hoàn toàn ranh giới ứ đọng. Lực cắt từ môi trường siêu trọng trường (HiGee) còn liên tục phân tán pha lỏng thành các vi giọt và màng phim cực mỏng [73]. Cơ chế này không chỉ tối ưu hóa diện tích bề mặt tiếp xúc pha mà còn duy trì tốc độ làm

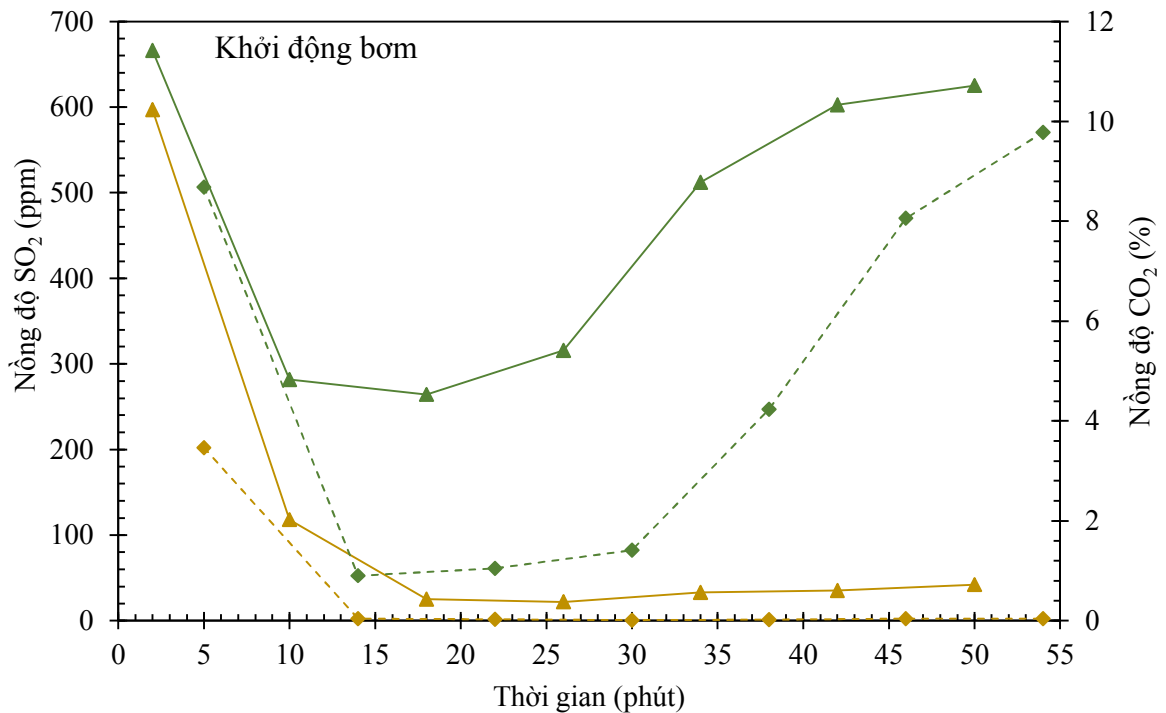
mới màng lỏng giúp thiết bị HP2R duy trì cường độ chuyển khối tuyến tính ngay cả ở tải lượng lỏng lớn. Ưu thế này hoàn toàn phù hợp với các mô hình thủy động lực học được công bố bởi [83] khẳng định khả năng hấp thụ cường độ cao và chống ứ đọng của công nghệ tiếp xúc ly tâm.

Nhờ hiệu quả của giai đoạn hấp thụ ly tâm, hiệu suất tổng thể của hệ thống tích hợp được cải thiện rõ rệt. Thiết bị HP2R đóng vai trò như một bước xử lý tiên tiến. Hệ quả là, hiệu suất tổng tăng từ $58,6 \pm 2,4\%$ lên $88,1 \pm 0,4\%$ đối với CO_2 .

Bên cạnh đó, quá trình hấp thụ SO_2 cho thấy mức độ phụ thuộc thấp vào lưu lượng pha lỏng. Đồ thị Hình 3.10 cho thấy hiệu suất loại bỏ SO_2 luôn duy trì trên 90% trong toàn bộ dải khảo sát Q_{L2} , đối với cả thiết bị HP2R và hệ thống tích hợp. Sự duy trì hiệu suất này bắt nguồn từ bản chất hóa lý đặc thù của cấu tử khí SO_2 – một khí axit có độ phân cực cao, ái lực hóa học lớn và động học phản ứng gần như tức thời với tác nhân kiềm. Do đó, quá trình này bị giới hạn hoàn toàn bởi pha khí. Điều này được hiểu là chỉ cần một lượng mỏng dung dịch tối thiểu để làm ướt bề mặt đệm, phản ứng đã có thể đạt được tốc độ cực đại. Việc tiếp tục bổ sung chất lỏng hãy tăng chuyển khối cơ học từ lực ly tâm chưa rõ ràng mang lại hiệu quả như đối với CO_2 . Quan điểm này tương đồng với kết luận từ nghiên cứu của [85] khi tác giả chứng minh rằng năng lực hấp thụ các khí axit mạnh trong thiết bị ly tâm tiếp xúc gần như không đổi khi tải lượng lỏng vượt qua ngưỡng hấp thụ tối thiểu.

3.2.4. Xử lý đồng thời và tiếp diễn khí thải bằng hệ thiết bị PC-HP2R và đánh giá chất lượng dung dịch hấp thụ sau xử lý

Nhằm đánh giá toàn diện tính ổn định động học và khả năng vận hành bền vững lâu dài của hệ thống tích hợp PC-HP2R, một thí nghiệm hấp thụ liên tục đã được thực hiện với dung dịch hấp thụ NaOH 1 M tuần hoàn. Trong mô hình này, hỗn hợp khí thải tiêu chuẩn – bao gồm 11,5% (v/v) CO_2 và 602 ppm SO_2 được cấp liên tục vào hệ thống và duy trì nghiêm ngặt tại các thông số vận hành tối ưu đã được xác định ở các khảo sát trước đó ($Q_G = 25$ L/phút, $Q_{L1} = Q_{L2} = 0,35$ L/phút, $\omega = 500$ vòng/phút). Nồng độ đầu ra của từng thành phần khí được theo dõi theo thời gian nhằm đánh giá hiệu suất loại bỏ trong suốt quá trình vận hành kéo dài.



Hình 3. 11. Diễn biến hiệu quả xử lý CO₂ và SO₂ của hệ thiết bị PC-HP2R tại $Q_G = 25$ L/min, $Q_{L1} = Q_{L2} = 0.35$ L/min, $\omega = 500$ rpm, chế độ tiếp diễn ($n = 1$)

Ký hiệu: ▲ : CO₂ sau PC ◆ : CO₂ sau HP2R, ▲ : SO₂ sau PC, ◆ : SO₂ sau HP2R

Kết quả thí nghiệm loại bỏ khí thải liên tục được trình bày trong Hình 3.11. Các phép đo khí tại các đơn vị PC và HP2R được thực hiện tại các thời điểm khác nhau do hệ thống chỉ có một thiết bị phân tích khí. Tuy nhiên, quy luật động học chung cho thấy ngay khi các bơm định lượng dung dịch hấp thụ được khởi động tại cả PC và HP2R, nồng độ của tất cả các thành phần khí giảm gần như tức thời. Điều này minh chứng cho tốc độ phản ứng nhanh của các phản ứng hóa học. Sau 18 phút vận hành, tháp PC đã thể hiện tốt vai trò xử lý thô khi nồng độ khí CO₂ giảm từ 11,5% xuống 4,53% và SO₂ từ 597 ppm xuống 25,0 ppm. Khi tiếp tục thực hiện trên thiết bị HP2R, hiệu suất tổng thể của hệ thống được cải thiện đáng kể. Tại phút thứ 22, nồng độ đầu ra của CO₂ và SO₂ của hệ tích hợp tương ứng còn 1,15% thể tích và 1,7 ppm

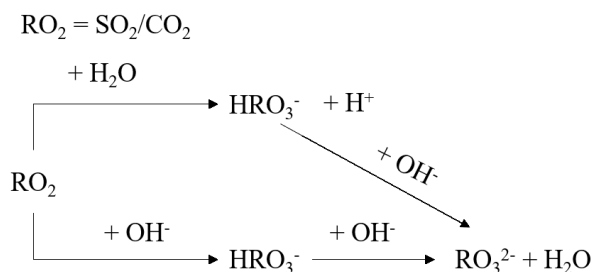
Quá trình vận hành liên tục cho thấy sự phân hóa về tính bền vững động học giữa hai cấu tử khí khi dung môi bắt đầu có dấu hiệu giảm khả năng hấp thụ. Cụ thể, quá trình loại bỏ SO₂ thể hiện sự ổn định xuyên suốt trong thời gian thí nghiệm. Biến động nồng độ SO₂ đầu ra luôn được kiểm soát chặt chẽ, dao động trong khoảng 22 – 42 ppm tại PC và duy trì ở mức 0,7 – 2,5 ppm tại đầu ra hệ PC-HP2R.

Ngược lại, quá trình hấp thụ CO₂ cho thấy sự thay đổi với độ kiềm (pH) của dung dịch. Theo thời gian, việc vận hành hấp thụ một lượng lớn khí axit đã làm tiêu hao các ion OH⁻, dẫn đến sự sụt giảm giá trị pH của dung dịch NaOH – từ mức kiềm mạnh ban

đầu là 14,02 xuống 9,56 (tại PC) và 10,11 (tại HP2R), với độ dốc suy giảm lớn diễn ra trong giai đoạn 30 – 40 phút. Kéo theo đó, hệ thống ghi nhận sự giảm mạnh về hiệu năng thu hồi CO₂. Tại tháp PC, nồng độ CO₂ đầu ra tăng từ 4,53% lên 10,72% khi pH giảm từ 13,45 xuống 9,56 (trong khoảng 18 – 50). tương tự cũng được quan sát tại HP2R, nơi nồng độ CO₂ tăng mạnh từ 1,41% lên 9,78% trong khoảng 30–54 phút. Lu và cộng sự (2024) đã chỉ ra rằng cần duy trì pH đủ cao để quá trình hấp thụ CO₂ diễn ra hiệu quả, yêu cầu ít nhất 2% khối lượng Ca(OH)₂ để giữ hiệu suất chuyển hóa CO₂ ở mức 90% trong 30 phút [86]. Xu hướng tương tự cũng được quan sát tại HP2R, nơi nồng độ CO₂ tăng mạnh từ 1,41% lên 9,78% trong khoảng 30–54 phút. Chen và cộng sự (2020) cũng nhấn mạnh tầm quan trọng của việc duy trì pH ban đầu gần 13 để đạt hiệu suất hấp thụ CO₂ tối ưu khi dùng hệ lớp đệm quay với chất hấp thụ kiềm rắn [73].

Hiện tượng khác biệt về mức duy trì hiệu suất khi pH giảm giữa SO₂ và CO₂ bắt nguồn từ cơ chế hấp thụ cạnh tranh. SO₂ là một khí axit mạnh với khả năng phân ly và ái lực hóa học vượt trội. Trong điều kiện độ kiềm giảm, SO₂ luôn giành được ưu thế tuyệt đối trong việc phản ứng với các ion OH⁻ còn sót lại, giúp hiệu suất hấp thụ với cấu tử khí này hầu như không bị ảnh hưởng. Ngược lại, CO₂ là khí axit yếu hơn, quá trình hấp thụ bị kiểm soát bởi rào cản pha lỏng và phụ thuộc sống còn vào sự dư thừa nồng độ OH⁻ để duy trì động lực khuếch tán. Khi pH hạ xuống dưới ngưỡng tối ưu, lực cản truyền khối pha lỏng đối với CO₂ tăng, làm đứt gãy hoàn toàn động lực phản ứng hóa học.

Nghiên cứu truyền khối được thực hiện thông qua việc đồng hấp thụ SO₂ và CO₂ vào dung dịch NaOH – một loại hấp thụ công nghiệp điển hình, được sử dụng phổ biến. Quá trình này đi kèm với một chuỗi các phản ứng hóa học phụ, được mô tả ngắn gọn bằng các phương trình tổng quát tương ứng [87]. Cơ chế hóa học của quá trình đồng hấp thụ SO₂, CO₂ bằng dung dịch NaOH như sau:



Phương trình tổng hợp:



Bên cạnh đó, quy luật hấp thụ cạnh tranh và tính bền vững của SO_2 cũng đã minh chứng một cách hệ thống trong nghiên cứu của Chen (2020) [73] cho rằng trong hệ thống đồng hấp thụ đa cấu tử khí, sự suy giảm pH của dung dịch kiềm làm suy giảm khả năng hấp thụ CO_2 , trong khi ảnh hưởng đến động học hấp thụ SO_2 là không đáng kể.

Mặc dù dung dịch đã bão hòa không còn khả năng hấp thụ mạnh như ban đầu, nhưng vẫn có thể sử dụng hiệu quả trong việc xử lý sơ cấp dòng khí thải có nồng độ CO_2 , SO_2 thấp ($<3\%$), hoặc dùng như lớp hấp thụ phụ trong hệ thống nhiều tầng. Điều này giúp tiết kiệm đáng kể lượng hóa chất NaOH sử dụng mới và kéo dài tuổi thọ của vật liệu. Hệ thống có thể được vận hành luân phiên giữa các lớp dung dịch mới và tái sử dụng, tối ưu hóa chi phí vận hành. Một số nhà máy chế biến thức ăn chăn nuôi tại Hàn Quốc đã thiết kế hệ thống hấp thụ hai tầng, trong đó tầng đầu sử dụng dung dịch tái chế để giảm tải trước khi đưa vào tháp hấp thụ chính có NaOH mới.

Dung dịch hấp thụ được thu hồi sau phút 55 để phân tích và đánh giá thành phần. Kết quả được thể hiện trong Bảng 3.1 dưới đây.

Bảng 3. 1. Thành phần dung dịch hấp thụ sau bão hòa

STT	Thành phần	Nồng độ
1	pH (-)	$9,97 \pm 0,13$
2	CO_3^{2-} (mg/L)	24.523 ± 962
3	SO_3^{2-} (mg/L)	$195,2 \pm 12,1$

Dựa trên tính chất của dung dịch hấp thụ sau bão hòa, việc tái sử dụng dung dịch này trong các ứng dụng khác nhau rất có giá trị trong bối cảnh thúc đẩy kinh tế tuần hoàn và phát triển bền vững. Dung dịch sau hấp thụ CO_2 và SO_2 chứa các ion CO_3^{2-} và SO_3^{2-} đây đều là các hợp chất có giá trị dinh dưỡng trong nông nghiệp. CO_3^{2-} có thể giúp cải thiện độ pH của đất chua và SO_3^{2-} cung cấp lưu huỳnh cần thiết cho quá trình tổng hợp protein và enzyme của cây trồng. Dung dịch có thể được pha loãng và sử dụng như phân bón lá vi lượng, hoặc phối trộn với phân hữu cơ để tạo thành chế phẩm phân bón sinh học giá rẻ. Nông trại hữu cơ ở Nhật Bản sử dụng dịch thải giàu nitrat và bicarbonate từ hệ thống lọc khí CO_2 để bón rau ăn lá, giúp giảm chi phí phân bón đến 30%. Ở Việt Nam, mô hình trồng rau thủy canh trong nhà màng có thể tận dụng dung dịch tái sử dụng này để bổ sung dinh dưỡng cho cây.

Với độ pH quanh ngưỡng 10 và chứa ion carbonate, sulfite, dung dịch sau hấp thụ khí thải có thể được tận dụng như tác nhân kiềm để trung hòa nước thải có tính

axit, hoặc hỗ trợ quá trình kết tủa kim loại nặng như sắt, đồng, chì... Dung dịch còn có thể dùng để điều chỉnh pH tại bể sinh học nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho vi sinh vật hoạt động. Tại một số khu công nghiệp ở Bắc Ninh, dịch hoàn nguyên từ tháp hấp thụ khí NH_3 và CO_2 được tận dụng đưa vào hệ thống xử lý nước thải có độ pH thấp từ xương xi mạ, giúp giảm đáng kể lượng vôi và NaOH sử dụng trong quá trình trung hòa.

Trong dung dịch sau bão hòa có thể thu hồi được các loại muối như Na_2CO_3 (soda ash), Na_2SO_3 , thông qua quy trình cô đặc, kết tinh hoặc bay hơi. Các muối này có giá trị trong sản xuất thủy tinh, dệt nhuộm, chất tẩy rửa hoặc làm chất bảo quản. Đây là hướng tiềm năng để chuyển đổi dòng thải thành nguyên liệu đầu vào cho ngành công nghiệp khác. Một doanh nghiệp tại Trung Quốc đã xây dựng hệ thống tận thu soda ash từ dòng thải hấp thụ CO_2 trong lò hơi, sản lượng thu được lên tới 100 kg/ngày dùng cho sản xuất xà phòng công nghiệp, giúp tiết kiệm hàng chục ngàn USD mỗi năm.

3.3. TÍNH TOÁN HIỆU QUẢ KINH TẾ

Kết quả tính toán hiệu quả kinh tế của mô hình ở quy mô thực tế 1000 m^3/h với mô hình trên được tổng hợp trong bảng 3.2 dưới đây:

Bảng 3. 2. Tổng hợp chi phí và lợi ích của mô hình xử lý khí thải kết hợp thu hồi carbon quy mô 1000 m^3/h

Hạng mục	Chi phí (triệu VND/năm)
Điện năng tiêu thụ	950
Hóa chất NaOH (sau tái sinh)	300
Dung môi MEA (sau tái sinh)	9
Tổng chi phí vận hành	1259
Doanh thu phụ phẩm + carbon	~300
Chi phí ròng	≈ 959
Chi phí ròng / t CO_2 thu hồi	959 / 1,702.83 t CO_2 = 0.56/t CO_2 (23 USD/t CO_2)

Kết quả tính toán cho thấy mô hình xử lý và thu hồi khí thải theo chuỗi tháp hấp thụ – HP2R-1 – HP2R-2 đạt được sự cân bằng tương đối giữa hiệu quả kỹ thuật và chi phí vận hành. Với tổng chi phí ròng khoảng 19–23 USD cho mỗi tấn CO_2 được xử lý và cố định, mô hình này nằm trong nhóm các công nghệ có chi phí thấp đến trung bình khi so sánh với các hệ thống thu hồi carbon hiện nay trên thế giới. Theo các nghiên cứu quốc tế, chi phí xử lý và thu hồi CO_2 bằng dung dịch amine dao động trong khoảng 40–120 USD/t CO_2 đối với quy mô công nghiệp (IEA, 2023; Global CCS Institute, 2024), trong khi các công nghệ hấp thụ bằng kiềm hoặc dung môi hỗn hợp thường đạt mức 25–60 USD/t CO_2 .

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận:

Đề tài “*Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc*” đã hoàn thành đầy đủ các nội dung theo mục tiêu đặt ra. Trên cơ sở nghiên cứu tổng quan, thực nghiệm riêng rẽ và đồng thời xử lý hai cấu tử khí thải CO₂ và SO₂ bằng hệ thiết bị PC-HP2R. Các kết luận chính của đề tài được rút ra như sau:

- Ở điều kiện vận hành tối ưu ($Q_G = 25$ L/phút; $Q_{L1} = Q_{L2} = 0,35$ L/phút; $\omega = 500$ vòng/phút), hệ thống đạt hiệu quả xử lý cao: CO₂ giảm từ ~11,5% xuống 4,53% ($\approx 60\%$), SO₂ giảm từ 597 ppm xuống 25 ppm ($> 95\%$), đồng thời duy trì ổn định trong chế độ vận hành liên tục.

- Việc bổ sung thiết bị ly tâm tiếp xúc HP2R sau tháp PC giúp tăng cường đáng kể truyền khối khí-lỏng, đặc biệt đối với các cấu tử khó hấp thụ như NO_x, qua đó nâng cao hiệu suất xử lý tổng thể của hệ thống.

- Phương pháp ly tâm tiếp xúc thể hiện ưu thế vượt trội so với tháp hấp thụ truyền thống nhờ tạo trường lực ly tâm cao, tăng diện tích tiếp xúc pha, đạt hiệu suất cao với thể tích đệm rất nhỏ, đồng thời giảm nguy cơ tích tụ pha lỏng và tắc nghẽn khi vận hành ở lưu lượng lớn.

- Quá trình xử lý bằng hệ PC-HP2R không chỉ góp phần giảm phát thải khí ô nhiễm và khí nhà kính, mà còn tạo điều kiện thu hồi các sản phẩm muối sau hấp thụ, phù hợp với định hướng kinh tế tuần hoàn và mục tiêu phát thải ròng bằng không.

Kiến nghị:

Trong thời gian tới nếu có điều kiện, học viên đề xuất cần tiếp tục triển khai thử nghiệm hệ tích hợp PC-HP2R ở quy mô pilot và thực địa để xác nhận hiệu quả xử lý trong điều kiện khí thải công nghiệp biến động và có tải lượng lớn. Việc đánh giá tác động của bụi mịn trong khí thải thực tế là cần thiết, đồng thời xem xét sử dụng các hệ tiên xử lý có hiệu suất cao hơn hoặc tối ưu hóa vật liệu đệm để hạn chế hiện tượng bám lắng và tắc nghẽn trong tháp hấp thụ. Các nghiên cứu tiếp theo thực hiện với phân tích thành phần dung dịch sau hấp thụ để xây dựng cân bằng vật chất đầy đủ cho hệ thống. Bên cạnh đó, cần nghiên cứu các dung môi hấp thụ mới, đặc biệt là amine, nhằm nâng cao khả năng tái sinh và thu hồi CO₂ trong ứng dụng thực tế. Cuối cùng, việc đánh giá đặc tính thủy động học và tiêu hao năng lượng ở quy mô lớn sẽ giúp tối ưu hóa thiết kế và đảm bảo khả năng vận hành ổn định, tạo cơ sở tin cậy cho việc mở rộng và ứng dụng công nghệ trong công nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. US-EPA. *Source of Greenhouse Gas Emissions*. [cited 2022 05/05]; Available from: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#:~:text=Emissions%20and%20Trends,11%25%20compared%20to%202019%20levels>.
2. UCAR. *Predictions of Future Global Climate*. [cited 2022 05/05]; Available from: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/climate-change-impacts/predictions-future-global-climate#:~:text=Climate%20models%20predict%20that%20Earth's,gas%20levels%20continue%20to%20rise>.
3. Bataille, C., et al., *Net-zero deep decarbonization pathways in Latin America: Challenges and opportunities*. Energy Strategy Reviews, 2020. **30**: p. 100510.
4. Wesseling, J.H., et al., *The transition of energy intensive processing industries towards deep decarbonization: Characteristics and implications for future research*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **79**: p. 1303-1313.
5. IEA, *Energy Technology Perspectives 2023 - Analysis*. 2023.
6. Joyo, F.H., B. Nastasi, and D. Astiaso Garcia, *Decarbonization pathways for the pulp and paper industry: A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025. **223**: p. 116070.
7. Szabó, L., et al., *A world model of the pulp and paper industry: Demand, energy consumption and emission scenarios to 2030*. Environmental Science & Policy, 2009. **12**(3): p. 257-269.
8. Lin, H.-C., et al., *Status of energy conservation in Taiwan's pulp and paper industry*. Energy, 2014. **73**: p. 680-685.
9. World Bank Group. “World Bank Open Data,” world bank open data. [cited 2026 1 April]; Available from: <https://data.worldbank.org/>.
10. van Ewijk, S., J.A. Stegemann, and P. Ekins, *Limited climate benefits of global recycling of pulp and paper*. Nature Sustainability, 2021. **4**(2): p. 180-187.
11. Hämäläinen, E. and O.-P. Hilmola, *Energy efficiency at the paper mill—dilemma of improvement*. Energy Efficiency, 2017. **10**(4): p. 809-821.
12. *Final energy consumption in industry - detailed statistics - statistics explained*. [cited 2026 01 April]; Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_industry_-_detailed_statistics#Paper.2C_pulp_and_printing_industry.
13. Griffin, P.W., G.P. Hammond, and J.B. Norman, *Industrial energy use and carbon emissions reduction in the chemicals sector: A UK perspective*. Applied Energy, 2018. **227**: p. 587-602.
14. Natural Resources Canada Government of Canada. *Comprehensive energy use database*. [cited 2026 01 April]; Available from:

https://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/menus/trends/comprehensive_tables/list.cfm.

15. Man, Y., et al., *Energy transition for the low-carbon pulp and paper industry in China*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. **131**: p. 109998.
16. “Paper production by country 2022,” *statista*. [cited 2026 01 April]; Available from: <https://www.statista.com/statistics/240598/production-of-paper-and-cardboard-in-selected-countries/>.
17. Sagues, W.J., et al., *Prospects for bioenergy with carbon capture & storage (BECCS) in the United States pulp and paper industry*. Energy & Environmental Science, 2020. **13**(8): p. 2243-2261.
18. P V Kiran Ananth, Dinesh Ghai, and Vaibhav Girdhar, *Decarbonization in the INDIAN pulp & paper industry*. Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association, 2023. **35**: p. 62-65.
19. Zaifeng Zhou and Fuxiang Wei, *Research on Carbon Peak and Carbon Neutrality Technological Pathways in the Chinese Papermaking Industry*. Paper and Biomaterials, 2023. **8**.
20. *O2 emissions from paper and cardboard Germany*. [cited 2026 01 April]; Available from: <https://www.statista.com/statistics/1385904/co2-emissions-paper-and-cardboard-manufacturing-germany/>.
21. Ministry of Economy, T.a.I. *Technology Roadmap for “Transition Finance” in the Pulp and Paper Sector*. [cited 2026 01 April]; Available from: https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition/transition_finance_technology_roadmap_paper_eng.pdf.
22. CEPI. *KEY STATISTICS 2022 european pulp & paper industry*. 2022 [cited 2026 01 April]; Available from: <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2023/07/2022-Key-Statistics-FINAL.pdf>.
23. Furszyfer Del Rio, D.D., et al., *Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022. **167**: p. 112706.
24. Giacosa, G., et al., *Characterization of Annual Air Emissions Reported by Pulp and Paper Mills in Atlantic Canada*. Pollutants, 2022. **2**: p. 135–155.
25. Thu Hòa. *Công nghiệp Giấy Việt Nam – Triển vọng và Thách thức*. 2020 [cited 2026 01 April]; Available from: <http://consosukien.vn/cong-nghiep-p-gia-y-vie-t-nam-trie-n-vo-ng-va-tha-ch-thu-c.htm>.
26. Thi, Y.T. and T.N.T. Anh, *Determination of life cycle GHG emission factor for paper products of Vietnam*. 2020. **9**(1): p. 586-594.
27. Sun, M., et al., *Uncovering energy use, carbon emissions and environmental burdens of pulp and paper industry: A systematic review and meta-analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **92**: p. 823-833.
28. Gemechu, E., et al., *A comparison of the GHG emissions caused by manufacturing tissue paper from virgin pulp or recycled waste paper*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013. **18**.

29. Dang, X., et al., *Numerical model for estimating greenhouse gas emissions from pulp and paper industrial wastewater treatment systems in Vietnam*. Journal of Vietnamese Environment, 2018. **9**: p. 162-168.
30. Hiệp hội Giấy và Bột giấy Việt Nam. *Áp lực xanh hóa và cơ hội tăng trưởng ngành giấy*. 2026 [cited 2026 04 April]; Available from: <https://vppa.vn/ap-luc-xanh-hoa-va-co-hoi-tang-truong-nganh-giay/>.
31. Beyad, Y., et al., *An SO₂ tolerant process for CO₂ capture*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014. **31**: p. 205-213.
32. Bùi Sỹ Lý and Nguyễn Văn Hùng, *Nghiên cứu khả năng kết hợp thiết bị hấp thụ khí độc hại, thiết bị lọc bụi ướt để xử lý khí thải*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng -ĐHXDHN, 2018. **12**(4): p. 97-105.
33. Abro, M., et al., *Experimental investigation of hydrodynamic parameters and bubble characteristics in CO₂ absorption column using pure ionic liquid and binary mixtures: Effect of porous sparger and operating conditions*. Chemical Engineering Science, 2021. **229**: p. 116041.
34. *Energy efficiency and GHG emissions: prospective scenarios for the pulp and paper industry*. [cited 2026 01 April]; Available from: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133872025>.
35. B. Sun, *Preparation of basic magnesium carbonate by simultaneous absorption of NH₃ and CO₂ into MgCl₂ solution in an RPB*. Powder Technology, 2015. **284**: p. 57-62.
36. Cheng, H.-H. and C.-S. Tan, *Carbon Dioxide Capture by Blended Alkanolamines in Rotating Packed Bed*. Energy Procedia, 2009. **1**: p. 925-932.
37. Valluri, S. and S.K. Kawatra, *Simultaneous removal of CO₂, NO_x and SO_x using single stage absorption column*. Journal of Environmental Sciences, 2021. **103**: p. 279-287.
38. Yasuda, M., et al., *High-Efficiency NO_x Absorption in Water Using Equipment Packed with a Glass Fiber Filter*. Environmental Science & Technology, 2011. **45**(5): p. 1840-1846.
39. Oršula, I., M. Lehotský, and P. Steltenpohl, *Simulation of calcium acetylide and acetylene production*. Acta Chimica Slovaca, 2015. **8**.
40. Aroonwilas, A., P. Tontiwachwuthikul, and A. Chakma, *Effects of operating and design parameters on CO₂ absorption in columns with structured packings*. Separation and Purification Technology, 2001. **24**(3): p. 403-411.
41. Afkhamipour, M. and M. Mofarahi, *Effects of operating parameters of packed columns on the KGav for CO₂ absorption by amine solutions using optimization–simulation framework*. Separation and Purification Technology, 2018. **202**: p. 86-102.
42. Wibowo, H., et al., *Study on the effect of operating parameters towards CO₂ absorption behavior of choline chloride – Monoethanolamine deep eutectic solvent and its aqueous solutions*. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2020. **157**: p. 108142.

43. Chu, G.-W., et al., *Absorption of SO₂ with Ammonia-Based Solution in a Cocurrent Rotating Packed Bed*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014. **53**: p. 15731-15737.
44. Colin Ramshaw and Roger H. Mallinson, *Mass Transfer Process*. U.S. Patent, 1981.
45. Cortes Garcia, G.E., J. van der Schaaf, and A.A. Kiss, *A review on process intensification in HiGee distillation*. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2017. **92**(6): p. 1136-1156.
46. Fei Yi, et al., *Modeling and experimental studies on absorption of CO₂ by Benfield solution in rotating packed bed*. Chemical Engineering Journal, 2009. **145**(3): p. 377-384.
47. D. Sudhoff, et al., *Modelling, design and flexibility analysis of rotating packed beds for distillation*. Chemical Engineering Research and Design, 2015. **94**: p. 72-89.
48. Guang-Wen Chu, et al., *Distillation studies in a two-stage counter-current rotating packed bed*. Separation and Purification Technology, 2013. **102**: p. 62-66.
49. Deming Ge, et al., *Degradation of methyl orange by ozone in the presence of ferrous and persulfate ions in a rotating packed bed*. Chemosphere, 2016. **146**: p. 413-418.
50. Taoran Liu, et al., *Rotating packed bed as a novel disinfection contactor for the inactivation of E. coli by ozone*. Chemosphere, 2019. **214**: p. 695-701.
51. Zequan Zeng, et al., *Degradation of phenol by ozone in the presence of Fenton reagent in a rotating packed bed*. Chemical Engineering Journal, 2013. **229**: p. 404-411.
52. Burns JR, Jamil JN, and Ramshaw C, *Process intensification: operating characteristics of rotating packed beds - determination of liquid hold-up for a high-voidage structured packing*. Chem Eng Sci 2000, 2000. **55**: p. 2401-2415.
53. Lin, C.-C. and B.-C. Chen, *Carbon dioxide absorption in a cross-flow rotating packed bed*. Chemical Engineering Research and Design, 2011. **89**(9): p. 1722-1729.
54. Chen, Y.-S. and H.-S. Liu, *Absorption of VOCs in a Rotating Packed Bed*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2002. **41**(6): p. 1583-1588.
55. Zhi-Hao Liu, et al., *Nox removal from gas mixture intensified by rotating packed bed with NaClO₂ preoxidation*. Chemical Engineering Journal, 2022. **430**: p. 132671.
56. Lin, C.-C., et al., *Performance of a pilot-scale cross-flow rotating packed bed in removing VOCs from waste gas streams*. Separation and Purification Technology, 2006. **52**(2): p. 274-279.
57. Gorak, A. and H. Schoenmakers, *Distillation: Operation and applications*. 2014: Academic Press.

58. Burns, J.R., J.N. Jamil, and C. Ramshaw, *Process intensification: operating characteristics of rotating packed beds — determination of liquid hold-up for a high-voidage structured packing*. Chemical Engineering Science, 2000. **55**(13): p. 2401-2415.
59. Chen, Y.H., et al., *Modeling Ozone Contacting Process in a Rotating Packed Bed*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004. **43**(1): p. 228-236.
60. Guo, K., et al., *Synchronous visual and RTD study on liquid flow in rotating packed-bed contactor*. Chemical Engineering Science, 2000. **55**(9): p. 1699-1706.
61. Hendry, J.R., J.G.M. Lee, and P.S. Attidekou, *Pressure drop and flooding in rotating packed beds*. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2020. **151**: p. 107908.
62. Munjal, S., M.P. Duduković, and P. Ramachandran, *Mass-transfer in rotating packed beds—II. Experimental results and comparison with theory and gravity flow*. Chemical Engineering Science, 1989. **44**(10): p. 2257-2268.
63. Reay, D., C. Ramshaw, and A. Harvey, *Chapter 9 - Application Areas – Offshore Processing*, in *Process Intensification (Second Edition)*, D. Reay, C. Ramshaw, and A. Harvey, Editors. 2013, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 323-348.
64. Zhao, H., L. Shao, and J.-F. Chen, *High-gravity process intensification technology and application*. Chemical Engineering Journal, 2010. **156**(3): p. 588-593.
65. Nguyễn Hồng Nam, Trần Văn Bầy, and Nguyễn Văn Đông, *Hấp phụ khí CO₂ từ than sinh học vỏ hạt mắc-ca = CO₂ capture by biochar from macadamia nut shell*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, 2022. **58**(4).
66. Lê Thanh Bắc, Nguyễn Thị Hoài Phương, and La Đức Dương, *Study on the adsorption capacity of NO_x gas and acetone vapor of MIL-100 (Fe) synthesized by hydrothermal method*. Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption, 2022. **11**(2): p. 56-61.
67. Phạm Xuân Dương and Trần Thế Nam, *NGHIÊN CỨU GIẢM THIỂU Ô XÍT LƯU HUỖNH (SO_x) TRONG KHÍ XẢ ĐỘNG CƠ DIESEL TÀU THỦY BẰNG THÁP LỌC ƯỚT HỆ THỐNG KÍN*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, 2021(10): p. 24-28.
68. Nguyễn Thị Thanh Minh and Nguyễn Tuấn Minh, *Sáng chế thành công thiết bị làm sạch khí biogas = Successful invention of biogas cleaning device*. Tạp chí Khoa học - Công nghệ và Đổi mới sáng tạo, 2022. **11**: p. 39-40.
69. Đỗ Văn Mạnh, et al., *Số sánh hiệu quả làm sạch khí biogas bằng kỹ thuật ly tâm tốc độ cao, sử dụng dung dịch hấp thụ khác nhau*. Tạp chí phân tích Hóa, Lý và Sinh học, 2020. **25**: p. 163-169.
70. Đỗ Văn Mạnh, et al., *Nghiên cứu đánh giá khả năng loại bỏ Hydro Sulfua và Cacbon Dioxid trong biogas bằng dung dịch hấp thụ Bari hydroxit*. Tạp chí phân tích Hóa, Lý và Sinh học, 2019. **24**: p. 139-144

71. Sun, B., et al., *Simultaneous Absorption of NO_x and SO₂ into Na₂SO₃ Solution in a Rotating Packed Bed with Preoxidation by Ozone*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019. **58**(19): p. 8332-8341.
72. Chen, T.-L., et al., *Enhancing NO_x removal in a high-gravity rotating packed bed with gaseous ClO₂ oxidation-absorption: Kinetic, mass transfer, and cost analysis*. Chemical Engineering Journal, 2023. **469**: p. 144072.
73. Chen, T.-L., Y.-H. Chen, and P.-C. Chiang, *Enhanced performance on simultaneous removal of NO_x-SO₂-CO₂ using a high-gravity rotating packed bed and alkaline wastes towards green process intensification*. Chemical Engineering Journal, 2020. **393**: p. 124678.
74. Pérez, A., et al., *Design of a packed bed column for sulfur dioxide absorption considering three packing types*. Revista ION, 2025. **38**: p. 53-71.
75. Zhang, L.-L., et al., *Absorption of SO₂ with Calcium-Based Solution in a Rotating Packed Bed*. Separation and Purification Technology, 2018. **214**.
76. Dong, Y.-N., et al., *Kinetic study of SO₂ with sodium lactate based deep eutectic solvents and modelling of desulfurization intensification in rotating packed bed reactor*. Chemical Engineering Science, 2022. **248**: p. 117197.
77. Chu, G.-W., et al., *Absorption of SO₂ with Ammonia-Based Solution in a Cocurrent Rotating Packed Bed*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014. **53**(40): p. 15731-15737.
78. Sheng, M., et al., *Mass-Transfer Characteristics of the CO₂ Absorption Process in a Rotating Packed Bed*. Energy & Fuels, 2016. **30**(5): p. 4215-4220.
79. Joel, A.S., et al., *Process analysis of intensified absorber for post-combustion CO₂ capture through modelling and simulation*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014. **21**: p. 91-100.
80. Lin, C.-C. and C.-R. Chu, *Mass transfer performance of rotating packed beds with blade packings in carbon dioxide absorption into sodium hydroxide solution*. Separation and Purification Technology, 2015. **150**: p. 196-203.
81. Li, W.-L., et al., *CFD simulation and experimental study of CO₂ absorption in a rotating packed bed*. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2024. **200**: p. 109794.
82. Chen, Y.-S., et al., *Packing Characteristics for Mass Transfer in a Rotating Packed Bed*. Industrial & Engineering Chemistry Research - IND ENG CHEM RES, 2006. **45**.
83. Zhang, W., et al., *Hydrodynamic characteristics and mass transfer performance of rotating packed bed for CO₂ removal by chemical absorption: A review*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020. **79**: p. 103373.
84. Taylor, S.F.R., et al., *Understanding the Competitive Gas Absorption of CO₂ and SO₂ in Superbase Ionic Liquids*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018. **57**(50): p. 17033-17042.

85. Chu, G.-W., et al., *Removal of SO₂ with Sodium Sulfite Solution in a Rotating Packed Bed*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018. **57**: p. 2329-2335.
86. Lu, P., et al., *Performance and mechanism of CO₂ absorption during the simultaneous removal of SO₂ and NO_x by wet scrubbing process*. Journal of Environmental Sciences, 2024. **135**: p. 534-545.
87. Qi, G., et al., *Mass transfer and kinetics study on combined CO₂ and SO₂ absorption using aqueous ammonia*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015. **41**: p. 60-67.

PHỤ LỤC

1. Sản phẩm của đề tài:

- 01 bài báo đăng trên tạp chí khoa học thuộc danh mục Scopus: *Trinh, V. M., T. T. P. Nguyen, H. T. Duong, et al. 2026. "Simultaneous Removal of CO₂, SO₂, and NO_x Using a Packed Column and High-Performance Rotating Reactor Integrated Absorption System." Environmental Quality Management 35, no. 3: e70297. <https://doi.org/10.1002/tqem.70297>.*

2. Kết quả thí nghiệm.

Phụ lục 1. Ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu quả xử lý SO₂ tại tháp hấp thụ.

STT	Thiết bị	Q _L (L/min)	Q _G (m ³ /h)	Q _G (L/min)	Q _G /Q _L	Tốc độ quay ω (rpm)	Dung dịch hấp thụ	pH _{NaOH}	Nồng độ SO ₂ đầu vào (ppm)	Nồng độ SO ₂ đầu ra (ppm)	Hiệu quả xử lý (%)
1	PC	0,35	1,5	25	71	0	NaOH	9	1200	328	72,7
2	PC	0,35	3	50	143	0	NaOH	9	1200	475	60,42
3	PC	0,35	4,5	75	214	0	NaOH	9	1200	598	50,17
4	PC	0,35	6	100	286	0	NaOH	9	1200	828	31
5	PC	0,35	7,5	125	357	0	NaOH	9	1200	1011	15,75

Phụ lục 2. Ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu quả xử lý SO₂ tại thiết bị HP2R

STT	Thiết bị	Q _L (L/min)	Q _G (m ³ /h)	Q _G (L/min)	Q _G /Q _L	Tốc độ quay ω (rpm)	Dung dịch hấp thụ	pH _{NaOH}	Nồng độ SO ₂ đầu vào (ppm)	Nồng độ SO ₂ đầu ra (ppm)	Hiệu quả xử lý (%)
1	RPB	0,35	1,5	25	71,42	500	NaOH	9	1200	68	94,3
2	RPB	0,35	3	50	142,8	500	NaOH	9	1200	102	91,5
3	RPB	0,35	4,5	75	214,28	500	NaOH	9	1200	132	89
4	RPB	0,35	6	100	285,71	500	NaOH	9	1200	216	82
5	RPB	0,35	7,5	125	357,1429	500	NaOH	9	1200	304	74,6

Phụ lục 3. Ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu quả xử lý CO₂ tại tháp hấp thụ

STT	Thiết bị	Q _L (L/min)	Q _G (m ³ /h)	Q _G (L/min)	QG/QL	Tốc độ quay ω (rpm)	Dung dịch hấp thụ	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ CO ₂ đầu vào (%)	Nồng độ CO ₂ đầu ra (%)	Hiệu quả xử lý (%)
1	PC	0,35	1,5	25	71,4	0	NaOH	0,2	10,55	4,28	59,4
2	PC	0,35	3	50	142,9	0	NaOH	0,2	10,92	5,62	48,5
3	PC	0,35	4,5	75	214,3	0	NaOH	0,2	11,69	7,23	38,2
4	PC	0,35	6	100	285,7	0	NaOH	0,2	10,55	7,32	30,6
5	PC	0,35	7,5	125	357,1	0	NaOH	0,2	11,62	8,48	27,0

Phụ lục 4. Ảnh hưởng của lưu lượng khí đến hiệu quả xử lý CO₂ tại thiết bị HP2R

STT	Thiết bị	Q _L (L/min)	Q _G (m ³ /h)	Q _G (L/min)	Q _G /Q _L	Tốc độ quay ω (rpm)	Dung dịch hấp thụ	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ CO ₂ đầu vào (%)	Nồng độ CO ₂ đầu ra (%)	Hiệu quả xử lý (%)
1	RPB	0,35	1,5	25	71,4	800	NaOH	0,2	10	1,13	88,7
2	RPB	0,35	3	50	142,9	800	NaOH	0,2	10	2,18	78,2
3	RPB	0,35	4,5	75	214,3	800	NaOH	0,2	10	3,25	67,5
4	RPB	0,35	6	100	285,7	800	NaOH	0,2	10	3,73	62,7
5	RPB	0,35	7,5	125	357,1	800	NaOH	0,2	10	4,02	59,8

Phụ lục 5. Ảnh hưởng của tốc độ quay tới hiệu quả xử lý CO₂ của hệ thiết bị PC-HP2R

T	T _{L1} (L/min)	Q _{L2} (L/min)	Q _G (L/min)	Q _G /Q _L	Q _G /Q _{L2}	Tốc độ quay ω (rpm)	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ CO ₂ đầu vào (%)	C _{CO2} đầu ra sau hệ PC (%)	Hiệu quả xử lý CO ₂ sau hệ PC (%)	C _{CO2} đầu ra sau hệ HP2R (%)	Hiệu quả xử lý CO ₂ sau hệ HP2R (%)	Tổng hiệu quả xử lý của hệ PC-HP2R
1	0,35	0,35	25	36	71	100	1	11,75	5,16	56,07	2,87	44,4	75,57
2	0,35	0,35	25	36	71	200	1	10,89	5,15	52,71	2,02	60,8	81,45
3	0,35	0,35	25	36	71	300	1	10,36	5,13	50,47	1,84	64,1	82,23
4	0,35	0,35	25	36	71	500	1	11,25	5,1	54,65	1,61	68,4	85,68
5	0,35	0,35	25	36	71	700	1	11,20	5,12	54,29	1,32	74,2	88,22

Phụ lục 6. Ảnh hưởng của tốc độ quay tới hiệu quả xử lý SO₂ của hệ thiết bị PC-HP2R

T	T _{L1} (L/min)	Q _{L2} (L/min)	Q _G (L/min)	Q _G /Q _L	Q _G /Q _{L2}	Tốc độ quay ω (rpm)	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ SO ₂ đầu vào (ppm)	C _{SO2} đầu ra sau hệ PC (ppm)	Hiệu quả xử lý SO ₂ sau hệ PC (%)	C _{SO2} ra sau hệ HP2R (ppm)	Hiệu quả xử lý SO ₂ sau hệ HP2R (%)	Tổng hiệu quả xử lý của hệ PC-HP2R
1	0,35	0,35	25	36	71	100	1	619	44	92,9	4,3	90,23	99,3
2	0,35	0,35	25	36	71	200	1	510	41	92,0	3,0	92,68	99,4
3	0,35	0,35	25	36	71	300	1	604	39	93,5	1,7	95,64	99,7
4	0,35	0,35	25	36	71	500	1	505	32	93,7	1,1	96,56	99,8
5	0,35	0,35	25	36	71	700	1	643	44	93,2	1,1	97,50	99,8

Phụ lục 7. Ảnh hưởng của lưu lượng khí tới hiệu quả xử lý CO₂ của hệ thiết bị PC-HP2R

T	Q _{L1} (L/min)	Q _{L2} (L/min)	Q _G (L/min)	Q _G /Q _L	Q _G /Q _{L2}	Tốc độ quay ω (rpm)	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ CO ₂ đầu vào (%)	C _{CO2} đầu ra sau hệ PC (%)	Hiệu quả xử lý CO ₂ sau hệ PC (%)	C _{CO2} đầu ra sau hệ HP2R (%)	Hiệu quả xử lý CO ₂ sau hệ HP2R (%)	Tổng hiệu quả xử lý của hệ PC-HP2R
1	0,35	0,35	25	36	71	500	1	10,57	5,28	50,06	0,73	86,2	93,10
2	0,35	0,35	50	71	143	500	1	10,51	5,92	43,67	1,86	68,6	82,30
3	0,35	0,35	75	107	214	500	1	11,22	6,53	41,80	2,72	58,3	75,76
4	0,35	0,35	100	143	286	500	1	10,48	7,92	24,45	4,72	40,4	54,97
5	0,35	0,35	150	214	429	500	1	11,65	9,48	18,59	8,27	12,8	28,98

Phụ lục 8. Ảnh hưởng của lưu lượng khí tới hiệu quả xử lý SO₂ của hệ thiết bị PC-HP2R

T	Q _{L1} (L/min)	Q _{L2} (L/min)	Q _G (L/min)	Q _G /Q _L	Q _G /Q _{L2}	Tốc độ quay ω (rpm)	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ SO ₂ đầu vào (ppm)	C _{SO2} đầu ra sau hệ PC (ppm)	Hiệu quả xử lý SO ₂ sau hệ PC (%)	C _{SO2} đầu ra sau hệ HP2R (ppm)	Hiệu quả xử lý SO ₂ sau hệ HP2R (%)	Tổng hiệu quả xử lý của hệ PC-HP2R
1	0,35	0,35	25	36	71	500	1	648	25	92,9	1,1	95,60	99,8
2	0,35	0,35	50	71	143	500	1	579	33	92,0	1,5	95,45	99,7
3	0,35	0,35	75	107	214	500	1	646	46	93,5	2,6	94,35	99,6
4	0,35	0,35	100	143	286	500	1	645	52	93,7	4,2	91,92	99,3
5	0,35	0,35	150	214	429	500	1	675	66	93,2	6,4	90,30	99,1

Phụ lục 9. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại tháp PC (Q_{L1}) tới hiệu quả xử lý CO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

T	Q_{L1} (L/min)	Q_{L2} (L/min)	Q_G (L/min)	Q_G/Q_L	Q_G/Q_{L2}	Tốc độ quay ω (rpm)	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ CO_2 đầu vào (%)	C_{CO_2} đầu ra sau hệ PC (%)	Hiệu quả xử lý CO_2 sau hệ PC (%)	C_{CO_2} đầu ra sau hệ HP2R (%)	Hiệu quả xử lý CO_2 sau hệ HP2R (%)	Tổng hiệu quả xử lý của hệ PC-HP2R
1	0,05	0,35	25	63	71	500	1	10,12	8,24	18,55	2,42	70,6	76,08
2	0,1	0,35	25	56	71	500	1	10,06	7,65	23,97	2,13	72,2	78,83
3	0,2	0,35	25	45	71	500	1	10,73	6,33	41,02	1,87	70,5	82,58
4	0,35	0,35	25	36	71	500	1	10,17	5,44	46,50	1,52	72,1	85,05

Phụ lục 10. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại tháp PC (Q_{L1}) tới hiệu quả xử lý SO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

T	Q_{L1} (L/min)	Q_{L2} (L/min)	Q_G (L/min)	Q_G/Q_L	Q_G/Q_{L2}	Tốc độ quay ω (rpm)	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ SO_2 đầu vào (ppm)	C_{SO_2} đầu ra sau hệ PC (ppm)	Hiệu quả xử lý SO_2 sau hệ PC (%)	C_{SO_2} đầu ra sau hệ HP2R (ppm)	Hiệu quả xử lý SO_2 sau hệ HP2R (%)	Tổng hiệu quả xử lý của hệ PC-HP2R
1	0,05	0,35	25	63	71	500	1	656	117	82,2	5,5	95,30	99,2
2	0,1	0,35	25	56	71	500	1	509	76	85,1	4,3	94,34	99,2
3	0,2	0,35	25	45	71	500	1	574	44	92,3	2,4	94,55	99,6
4	0,35	0,35	25	36	71	500	1	686	27	96,1	1,1	95,93	99,8

Phụ lục 11. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại thiết bị HP2R (Q_{L2}) tới hiệu quả xử lý CO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

T	Q_{L1} (L/min)	Q_{L2} (L/min)	Q_G (L/min)	Q_G/Q_L	Q_G/Q_{L2}	Tốc độ quay ω (rpm)	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ CO_2 đầu vào (%)	C_{CO_2} đầu ra sau hệ PC (%)	Hiệu quả xử lý CO_2 sau hệ PC (%)	C_{CO_2} đầu ra sau hệ HP2R (%)	Hiệu quả xử lý CO_2 sau hệ HP2R (%)	Tổng hiệu quả xử lý của hệ PC-HP2R
1	0,35	0,05	25	63	500	500	1	10,33	5,32	48,51	4,28	19,5	58,57
2	0,35	0,1	25	56	250	500	1	10,88	5,28	51,46	3,86	26,9	64,52
3	0,35	0,2	25	45	125	500	1	10,61	5,28	50,25	2,63	50,2	75,22
4	0,35	0,35	25	36	71	500	1	11,98	5,22	56,41	1,42	72,8	88,14

Phụ lục 12. Ảnh hưởng của lưu lượng dung dịch hấp thụ tại thiết bị HP2R (Q_{L2}) tới hiệu quả xử lý CO_2 của hệ thiết bị PC-HP2R

T	Q_{L1} (L/min)	Q_{L2} (L/min)	Q_G (L/min)	Q_G/Q_L	Q_G/Q_{L2}	Tốc độ quay ω (rpm)	Nồng độ NaOH (M)	Nồng độ SO_2 đầu vào (ppm)	C_{SO_2} đầu ra sau hệ PC (ppm)	Hiệu quả xử lý SO_2 sau hệ PC (%)	C_{SO_2} đầu ra sau hệ HP2R (ppm)	Hiệu quả xử lý SO_2 sau hệ HP2R (%)	Tổng hiệu quả xử lý của hệ PC-HP2R
1	0,35	0,05	25	63	500	500	1	579	32	94,5	2,5	92,19	99,6
2	0,35	0,1	25	56	250	500	1	537	35	93,5	2,1	94,00	99,6
3	0,35	0,2	25	45	125	500	1	626	33	94,7	1,7	94,85	99,7
4	0,35	0,35	25	36	71	500	1	691	30	95,7	1,1	96,33	99,8

Phụ lục 13. Diễn biến hiệu quả xử lý CO₂ và SO₂ của hệ thiết bị PC-HP2R

t	PC					t	HP2R				
	pH ₁	Nồng độ CO ₂ (%)	Hiệu quả xử lý CO ₂ (%)	Nồng độ SO ₂ (ppm)	Hiệu quả xử lý SO ₂ (%)		pH ₂	Nồng độ CO ₂ (%)	Hiệu quả xử lý CO ₂ (%)	Nồng độ SO ₂ (ppm)	Hiệu quả xử lý SO ₂ (%)
1	14,03	11,46	0,00	602	0,00	1	14,09	11,02	3,84	599	0,50
2	14,02	11,42	0,35	597	0,83	2	14,08	11,03	3,42	595	0,34
5	14	9,65	15,79	324	46,18	5	13,98	8,68	10,05	202	37,65
8	13,84	5,2	54,62	231	61,63	8	13,87	2,09	59,81	55	76,19
10	13,78	4,83	57,85	118	80,40	10	13,8	0,9	81,37	12	89,83
12	13,72	5,3	53,75	52	91,36	12	13,72	0,89	83,21	3,2	93,85
14	13,68	5,05	55,93	34	94,35	14	13,62	0,9	82,18	2,5	92,65
16	13,64	4,63	59,60	32	94,68	16	13,6	0,84	81,86	1,8	94,38
18	13,45	4,53	60,47	25	95,85	18	13,52	1,04	77,04	1,5	94,00
20	13,42	4,48	60,91	33	94,52	20	13,5	0,92	79,46	1,8	94,55
22	13,33	4,98	56,54	29	95,18	22	13,49	1,05	78,92	1,7	94,14
24	13,01	5,01	56,28	29	95,18	24	13,44	1,32	73,65	2,1	92,76
26	12,79	5,41	52,79	22	96,35	26	13,32	1,26	76,71	1,7	92,27
28	12,13	6,43	43,89	21	96,51	28	13,24	1,17	81,80	1,1	94,76
30	11,35	7,33	36,04	25	95,85	30	13,18	1,41	80,76	0,7	97,20
32	11,24	9,3	18,85	22	96,35	32	13,09	1,82	80,43	0,8	96,36
34	10,82	8,78	23,39	33	94,52	34	12,89	2,16	75,40	1,1	96,67
36	10,23	9,85	14,05	26	95,68	36	12,56	3,54	64,06	1,3	95,00
38	10,01	10,15	11,43	34	94,35	38	12,12	4,23	58,33	1,2	96,47
40	9,87	10,27	10,38	33	94,52	40	11,78	6,29	38,75	1,5	95,45
42	9,8	10,33	9,86	35	94,19	42	11,21	6,96	32,62	2,1	94,00
44	9,78	10,43	8,99	42	93,02	44	10,87	7,45	28,57	2,2	94,76
46	9,6	10,52	8,20	43	92,86	46	10,42	8,06	23,38	2,5	94,19
50	9,56	10,72	6,46	42	93,02	54	10,11	9,78	8,77	2,5	94,05

RESEARCH ARTICLE

Simultaneous Removal of CO₂, SO₂, and NO_x Using a Packed Column and High-Performance Rotating Reactor Integrated Absorption System

Viet M. Trinh¹ | Thao Thi Phuong Nguyen² | Hanh Thi Duong¹ | Minh Tuan Nguyen¹ | Manh Van Do¹ | Thi Xuan Quynh Nguyen³ | Tung Thanh Nguyen⁴ | Tuyen Van Trinh²

¹Institute of Science and Technology for Energy and Environmental, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam | ²Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam | ³Ho Chi Minh City University of Natural Resources and Environment, Ho Chi Minh City, Vietnam | ⁴Environment Department, Ministry of Agriculture and Environment of Vietnam, Hanoi, Vietnam

Correspondence: Tuyen Van Trinh (trvtuyen@gmail.com)

Received: 9 October 2025 | **Revised:** 17 November 2025 | **Accepted:** 13 January 2026

Keywords: high-performance rotating reactor | integrated absorption system | packed column | simultaneous air pollutants control

ABSTRACT

In Vietnam, a developing country with rapidly growing industrial activity, small- to medium-scale boilers and waste incinerators are widely used. Absorption systems such as columns or scrubbers are commonly applied for NO_x and SO₂ removal. A hybrid system that combines existing packed columns with a HiGee contactor is a promising solution for retrofitting existing plants in improving pollution control and practicing carbon capture. This study aims to provide insights into the proposed concept by investigating the flue gas treatment performance of an integrated system comprising a pilot-scaled packed column (PC) and a lab-scaled high-performance rotating reactor. The effect of rotating speed of the HP2R ($\omega = 100\text{--}700$ rpm), flue gas flow rate ($Q_G = 25\text{--}150$ L/min), absorbent flow rate in the PC ($Q_{L1} = 0.05\text{--}0.35$ L/min) and in the HP2R ($Q_{L2} = 0.05\text{--}0.35$ L/min) on the removal efficiency of CO₂, SO₂, and NO_x from simulated flue gas were evaluated in a laboratory-scale setup. The results indicated the enhancement of CO₂ and NO_x removal efficiencies by approximately 30–50% compared with the standalone PC unit at $\omega = 500\text{--}700$ rpm. Continuous operation further confirmed the system's stability in multi-pollutant removal, particularly for SO₂ and NO_x, although CO₂ capture performance was found to be sensitive to absorbent pH, emphasizing the need for effective absorbent regeneration to sustain long-term operation.

1 | Introduction

Nowadays, tackling climate change by cutting down greenhouse gases (GHGs) emissions has become a global environmental priority. According to the Climate Change 2022 report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), carbon dioxide (CO₂) from fossil fuels and industry remained the largest component in global GHG emissions (Bashmakov et al. 2022). Methods to reduce CO₂ emissions include increasing renewable energy production, implementing carbon emission taxes,

planting trees, conserving forests and green areas, and capturing CO₂ from emission sources (Nunez 2023). Regarding industrial sectors, reducing CO₂ from flue gas streams of combustion processes (boilers, power generators, waste incinerators, etc.) has received significant attention from both academic researchers and industry experts. As a result, carbon capture and storage (CCS) has developed into a reliable solution for mitigating CO₂ emissions from flue gases (Yadav and Mondal 2019). Based on various stages of combustion processes where CO₂ can be effectively separated, CCS technologies are generally listed as

precombustion, post-combustion, and oxy-fuel combustion methods (Yadav and Mondal 2022). Precombustion carbon capture is a process where fuel is converted into a mixture of hydrogen and CO₂ before combustion, allowing the CO₂ to be separated and captured prior to burning the fuel (Jansen et al. 2015). Regarding oxy-fuel combustion carbon capture, the burning air for the combustion process is pure oxygen, producing a flue gas mainly composed of CO₂ and water vapor, from which CO₂ can be easily separated after condensing the water (Yadav and Mondal 2022). In other words, precombustion capture and oxy-fuel combustion capture are regarded as advanced technologies, where CO₂ mitigation is integrated into the design prior to the combustion stage, thereby enabling a simpler and more efficient CO₂ separation process afterward. However, the requirement of major plant modification (gasification unit, air separation units, etc.) limits the existing facilities from coping with such advanced approaches. Post-combustion carbon capture, where a CO₂ capture unit (by either or both chemical absorption and physical adsorption) can be integrated into the current combustion system without major redesigns, is much more feasible for the existing plants.

In addition to CO₂, nitrogen oxides (NO_x) and sulphur oxides (SO_x) are also common pollutants to be considered in emission control. The acidic gases NO_x and SO_x can adversely affect natural ecosystems. From combustion processes, nitric oxide (NO) makes up a vast portion of NO_x and is subsequently oxidized into nitrogen dioxide (NO₂) in the atmosphere, contributing to acid rain and smog (Miller and Bowman 1989). Regarding SO_x, sulphur dioxide (SO₂) accounts for about 90% of the composition and is considered toxic and harmful when emitted into the environment (Basuki et al. 2021). Therefore, a method for simultaneously removing CO₂, NO_x, and SO_x is both a technical and economical approach for small to mid-scale power generators and waste incinerators in emission control (Ben-Mansour et al. 2016). Valluri and Kawatra (2021) conducted experiments on the simultaneous removal of CO₂, NO_x, and SO₂ in an absorption tower. The results showed very high removal efficiencies for CO₂ and SO_x, reaching 99% and 95%, respectively, yet the absorption efficiency for NO_x was only 30%. Nitric oxide (NO), however, has very low solubility in water. Therefore, advanced oxidation was suggested to oxidize the majority of NO to a readily soluble nitrogen dioxide (NO₂) before absorption for higher NO_x removal efficiency (Yuan et al. 2020). The early study of Yasuda et al. (2011) suggested that the glass-fiber-packed column attained 97.6% of NO_x absorption into ozone-saturated water with ozonation added to the gas stream. The presence of pollutants may alter the required dosage of oxidizing agents for effective NO_x removal. Kang et al. (2020) reported that, with the co-presence of SO₂ from 0 to 1000 ppm, in order to achieve maximum NO absorption efficiency using NaOH in a wet scrubbing, the O₃ injection rate should be increased from 60 to 90% of the NO concentration. In a simultaneous removal of three pollutants (CO₂, NO_x, and SO₂) from the flue gas of a marine ship engine, the system proposed by Long et al. (2025) was estimated to achieve 87.4%, 97.0% and 92.2% of CO₂, NO_x, and SO₂ removal efficiency, respectively. It is worth mentioning that the proposed system should consist of two absorption units: a square scrubber (for absorption of NO_x and SO₂) followed by a spray scrubber (for CO₂ capture), suggesting the enhancement of a multi-unit system compared to a single-unit.

Regarding absorption units, scrubbers or packed columns are the common forms of equipment. For the effective design and operation of an industrial-scale absorption tower, not only the choice of absorbent but also key design and operating parameters are critical to system performance. These parameters, which are gas flow rate, liquid flow rate, packing type, and so forth, have been evaluated by numerous studies (Afkhamipour and Mofarahi 2018; Wibowo et al. 2020; Abro et al. 2021). The overall performance of packed absorption columns strongly depends on the liquid-to-gas flow ratio (Q_L/Q_G). However, at high gas and liquid flow rates, flooding and clogging may occur within the packing, reducing efficiency and complicating operation (Chen et al. 2019). Moreover, their large size at an industrial scale results in high investment, installation, and maintenance costs, which represent the major drawbacks of this technology. Hence, this poses a significant challenge for existing plants to incorporate an additional absorption unit for post-combustion carbon capture.

“Unlike conventional wet scrubbers or packed towers, the HiGee-based rotating packed bed (RPB) provides enhanced mass transfer and micro-mixing, allowing the required efficiency to be achieved with a drastically smaller equipment size.”

The HiGee-based equipment was proven to be an innovative substitution for the packed column in many gas-liquid separation processes (Cortes Garcia et al. 2017). Unlike conventional wet scrubbers or packed towers, the HiGee-based rotating packed bed (RPB) provides enhanced mass transfer and micro-mixing, allowing the required efficiency to be achieved with a drastically smaller equipment size (Guo et al. 2019). Lin and Chen (2011) and Chen et al. (2002) demonstrated that the high rotational speed of rotating packed beds (RPBs) generates a strong centrifugal force, greatly enhancing mass transfer and gas-liquid contact area compared to conventional absorption towers. As a result, the overall mass transfer coefficient in CO₂ absorption with an RPB was significantly higher than that of a conventional tower, despite the much smaller size (Lin and Chen 2011). In another study, Lin et al. (2006) achieved 95% absorption efficiency for isopropyl alcohol vapor at near-industrial flow rates (150–300 m³/h) using an RPB. The feasibility of HiGee-based equipment in specifically simultaneous flue gas treatment was also investigated in a recent study of Chen et al. (2020). The removal efficiency of NO_x, SO₂, and CO₂ was 90%, 99%, and 96%, respectively, using alkaline waste solution (pH = 13) at a gas-to-liquid ratio of 69.5, illustrating the potential green process intensification for flue gas removal and carbon capture.

In Vietnam, a developing country with rapidly growing industrial activity, small- to medium-scale boilers and waste incinerators are widely used (Nguyen et al. 2021). From burning coal, biomass, and municipal solid waste, the flue gas from such facilities contains particulate matter (PM), sulfur oxides (SO_x), nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO), hydrogen chloride (HCl), heavy metals, and persistent organic pollutants like dioxins and furans (Van 2021; Trinh et al. 2024). These facilities primarily employ simple, cost-effective treatment processes for flue gas treatment, such as rapid heat exchangers (to avoid reformation of dioxins and furans), cyclone/bag filter (for dust and ashes), wet scrubbing (for gaseous pollutants like SO_x, NO_x, and HCl; Van 2021).

Absorption systems, such as columns or scrubbers, are commonly applied for NO_x and SO₂ removal after cooling and cyclone units; however, CO₂ emissions are not yet regulated under any industrial emission threshold in Vietnam (Hoa et al. 2023). At the 26th Conference of the Parties (COP26) to the United Nations Framework Convention on Climate Change, the Prime Minister of Vietnam committed to achieving net-zero emissions by 2050, underscoring the government's determination to contribute to the global effort in reducing greenhouse gases (Pham and Phung 2023). Regulations on carbon emission thresholds for various sectors, including industrial flue gas, are expected to be enacted soon. Consequently, stakeholders are urgently seeking feasible adaptation measures. The integration of an additional post-combustion carbon capture unit could not only improve flue gas treatment but also significantly enhance overall CO₂ removal. In this context, evaluating the efficiency of a hybrid system that combines existing packed columns with a HiGee contactor is crucial, as it presents a promising solution for retrofitting existing plants. Therefore, this study aims to provide insights into the proposed concept by investigating the flue gas treatment performance of an integrated system comprising a packed column (PC) and a high-performance rotating reactor. The effect of rotating speed of the HP2R (ω), flue gas flow rate (Q_G), absorbent flow rate in the PC (Q_{L1}) and in the HP2R (Q_{L2}) on the removal efficiency of CO₂, SO₂ and NO_x were evaluated in a laboratory-scale setup. Additionally, the continuous operation of the integrated system was assessed through the variation of removal efficiencies over time under absorbent recirculation. The findings highlight the potential of incorporating HiGee-based equipment into existing plants to complement conventional packed columns, thereby enhancing overall flue gas treatment and carbon capture efficiency.

2 | Materials and Methods

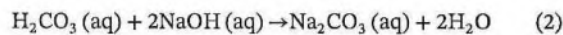
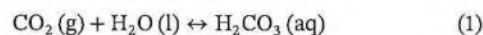
2.1 | PC-HP2R Integrated System

The PC-HP2R integrated system used in this study comprised a semi-pilot scale packed column (PC) followed by a HiGee-based High-Performance Rotating Reactor (HP2R). The packed column was made of polyvinyl chloride housing and SUS304-wire-mesh packing. The packing height was exactly 1 m in a diameter of 0.14 m, forming 0.015 m³ of packing volume. Spraying nozzles were equipped at the top of the packing layer to facilitate even liquid distribution throughout the packing of the PC. The HP2R equipment used in this study was successfully employed in previous studies about ammonia stripping, where the same HP2R configuration exhibited significantly higher mass-transfer coefficients compared with a conventional packed column (Trinh et al. 2023). The lab-scaled HiGee-based reactor made of 304 SUS housing and SUS304-wire-mesh packing. The inner, outer radius, and height (r_i , r_o , and Z_B) of the packing were 0.024, 0.083, and 0.039 m, respectively, forming a much smaller packed volume ($V_B = 0.0007$ m³) than the pilot-scaled PC unit. The rotating speed of the packed bed was generated by an induction motor (AEGV, Teco, Taiwan). **Exhibit 1** presents the configurations of the PC and HP2R units, while **Exhibit 2** provides a summary of their principal design characteristics.

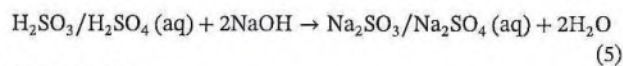
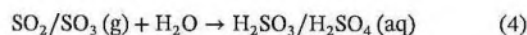
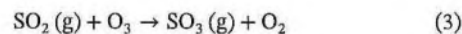
2.2 | Experimental Design, Analysis, and Calculation

NaOH solution was used as the absorbent in both storage tanks. The alkalinity of NaOH was selected at 1 M to represent a typical alkaline absorbent concentration commonly used in both earlier research and recent practical applications (Chen et al. 2020, 2023; Sun et al. 2019). The mechanism of simultaneous removal of CO₂, SO₂, and NO_x on NaOH 1-M using the PC-HP2R system is presented in Equation 1 to Equation 9. CO₂ in the gas stream was expected to be physically absorbed into the liquid phase as carbonic acid (H₂CO₃) (Equation 1) and subsequently react with NaOH to form sodium carbonate (Na₂CO₃) (Equation 2). SO₂ was partially oxidized by O₂ in the gas phase to form SO₃ (Equation 3). The SO₂/SO₃ mixture was then absorbed into the liquid phase (Equation 4) and reacted with NaOH to produce sulfate and sulfite salts (Equation 5). Meanwhile, NO exhibited a higher reactivity toward O₃ compared to SO₂. Under the given O₃ dosage ($^{10}O_3/^{10}NO < 1$), the primary product of NO oxidation in the gas phase was expected to be NO₂ (Equation 6) (Sun et al. 2019). In addition, NO₂ could also be slowly formed through the reaction between excess NO and O₂ at low temperatures (Equation 7). The resulting NO₂ was subsequently absorbed into the aqueous phase, where it hydrolyzed to produce a mixture of nitrous and nitric acids (HNO₂/HNO₃) (Equation 8). These acids were then neutralized by NaOH, forming sodium nitrite.

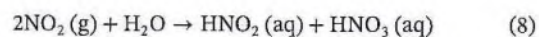
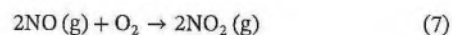
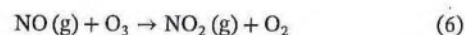
CO₂ absorption:



SO₂ absorption:



NO absorption:



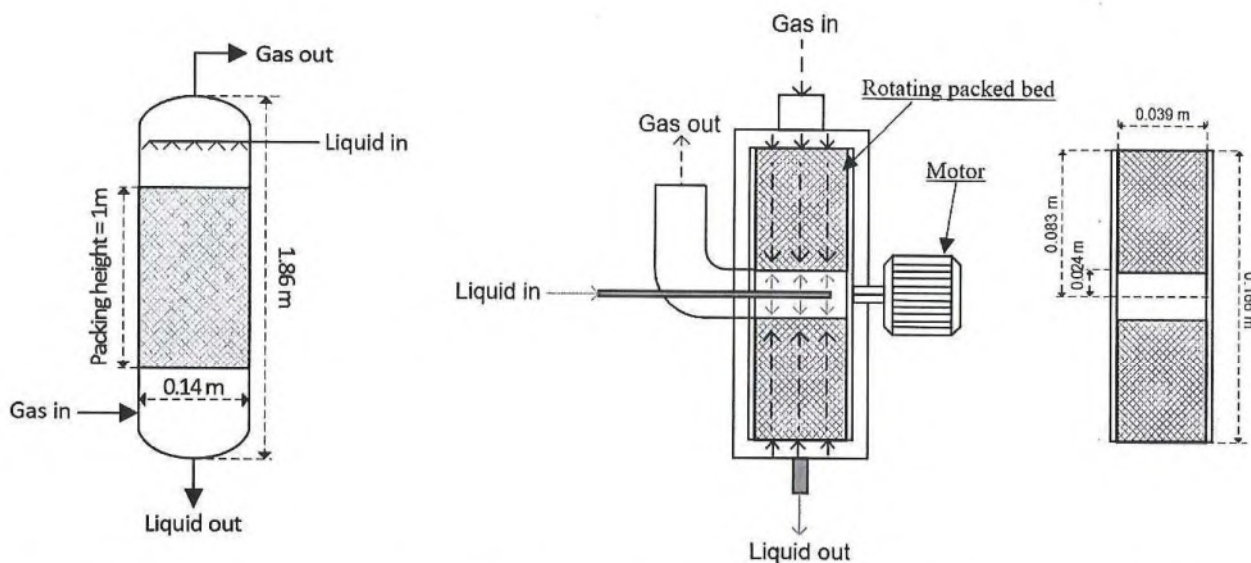
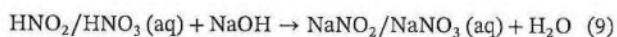


EXHIBIT 1 | The schematic of the packed column PC (left) and the HP2R (right). [Color figures can be viewed at wileyonlinelibrary.com.]

EXHIBIT 2 | The characteristics of the PC and the HP2R in this study.

Parameter	Unit	Value	
		PC	HP2R
Packing parameter	—		
Packing height (z_R)	m	1	0.039
Packing diameter (d)	m	0.14	0.166
Inner packing radius (r_i)	m	—	0.024
Outer packing radius (r_o)	m	—	0.083
Packed volume (V_B)	m ³	0.015	0.0007
Specific area of packing per unit volume (a_p)	m ² /m ³	—	893
Packing material	—	Stainless steel wire mesh	



The schematic of the flue gas absorption experiment using the PC-HP2R integrated system is shown in **Exhibit 3**. The simulated flue gas was created by the mixture of CO₂, NO, and SO₂ gases in N₂ carrier gas to simulate practical flue gas delivered from gas cylinders and well mixed in the gas mixing chamber before entering the PC-HP2R system. The gas stream entered the packed column through the gas inlet at its lower part, then flowed upward through the packing to the top gas outlet. Liquid absorbent was delivered by a peristaltic pump, distributed evenly downward through the packing through spraying nozzles for countercurrent phases contact with the gas stream. The gas stream exiting the column unit then entered the HP2R unit. In the HP2R, the gas stream was also contacted counter currently with the liquid absorbent inside the rotating packed bed, then exited through the gas outlet of the HP2R. Two sampling points with switching valves were also equipped at the outlet of the PC and HP2R units

for flue gas measurement. The simulated flue gas consisted of 11 ± 1 vol.% CO₂, 600 ± 100 ppm SO₂, and 400 ± 50 ppm NO, with the balance being N₂. These concentrations were selected to represent post-cyclone/bag-filter flue gas under the assumption that the remaining particulate matter (PM) was negligible. An O₂ cylinder and O₃ generator (Next Plus 10, Nextozone, Vietnam) facilitate 0.2 L/min of 0.03 g/min of O₃ for NO oxidation.

In the scope of this study, the effect of rotating speed of the HP2R (ω), flue gas flow rate (Q_G), absorbent flow rate in the PC (Q_{L1}), and in the HP2R (Q_{L2}) on the removal efficiency of CO₂, SO₂, and NO_x was evaluated. The rotational speed of the HP2R (ω) was varied from 100 to 700 rpm, as the gravity factor (G) of 0.6 to 29.5, respectively, obtained by the following equation (Chen et al. 2020):

$$G = \frac{\left(\frac{2\pi\omega}{60}\right)^2 \times \left(\frac{r_i + r_o}{2}\right)}{g} \quad (9)$$

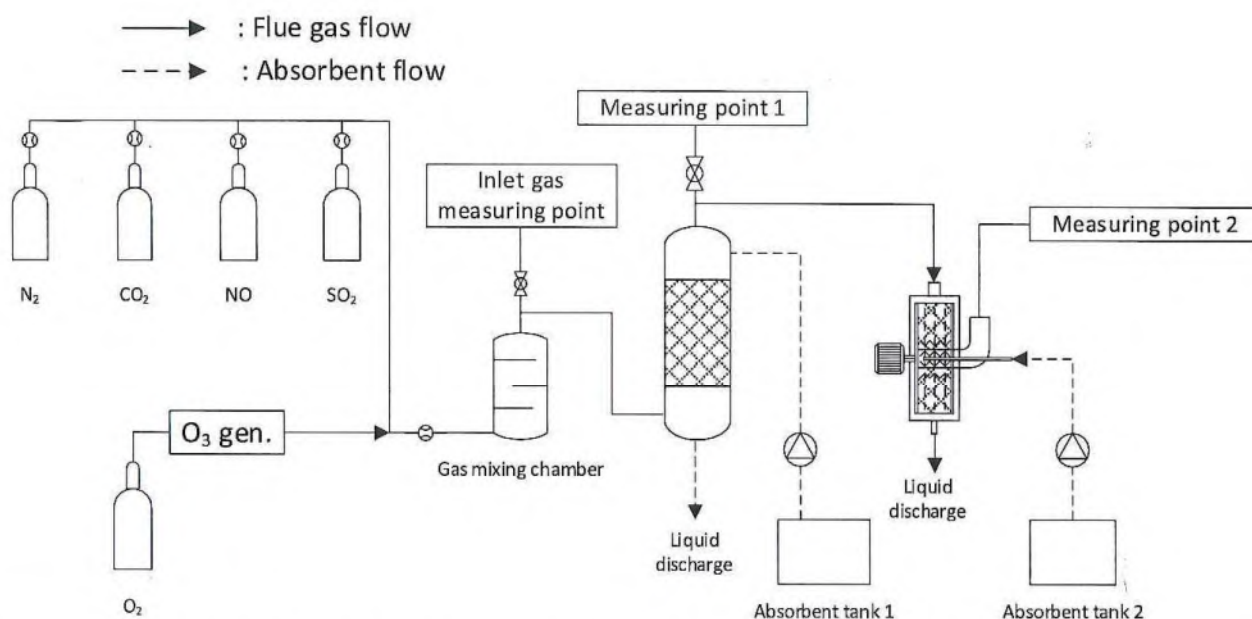


EXHIBIT 3 | Schematic of flue gas absorption experiment using PC-HP2R integrated system. [Color figures can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](https://onlinelibrary.wiley.com).]

where ω is the rotating speed (rpm), r_i and r_o are the inner and outer radius of the rotating packed bed (m), and $g = 9.81$ (m^2/s^2) is the gravitational acceleration. The gas flow rate (Q_G) through the PC-HP2R system varied between 25 L/min and 150 L/min. Absorbent flow rates in the PC (Q_{L1}) and HP2R (Q_{L2}) were controlled by two dosing pumps (KS-52, Chonsei), ranging from 0.05 L/min to 0.35 L/min. Each experimental condition was performed in triplicate ($n = 3$). For the continuous operation experiment, the system was operated under optimal conditions with recirculated absorbent to evaluate the stability of removal efficiency and the variation of absorbent pH over time. All experiments were performed under controlled laboratory conditions at $30 \pm 1^\circ\text{C}$ (303.15 ± 1 K) and an ambient pressure of approximately 101 kPa.

The pH of the absorbent was measured by pH sensors (HI-1131B, Hanna) and a multi-parameter analyzer (HI-5222, Hanna). Regarding the continuous operation experiment, two separate pH probes were used for the two absorbent tanks through the dual-channel capability of the HI-5222 meter, ensuring independent and reliable readings. Gas concentrations were measured using a portable gas analyzer (OC-1000, Henan Oceanus). The inlet and outlet concentrations of CO_2 , SO_2 , and NO_x were directly measured at the inlet measuring point and two output sampling points of the system (Exhibit 3) and were used to calculate the removal efficiencies reported in this study. Between measurements, the analyzer was purged for approximately one minute by operating the built-in suction pump while the inlet tubing was exposed to the laboratory air until the readings of all components returned to near-ambient levels. At the end of each experimental batch, the detector was also left running until it stabilized at ambient concentrations ($\text{CO}_2 < 0.03\%$, $\text{SO}_2 = 0$ ppm, and $\text{NO}_x < 0.05$ ppm) before proceeding to the next batch or shutting down the instrument. This procedure ensured that residual gas from the previous sampling was removed before the next measurement, thereby maintaining gas-phase mass balance

closure for the target pollutants within the accuracy of the analytical method.

The removal efficiency of a CO_2 , SO_2 , and NO_x concentration of the PC, HP2R, and the whole system was calculated and discussed in this study. The removal efficiency (η) after each stage of each gas pollutant was calculated based on the measured input (C_{Gi}) and the output (C_{Go}) concentration of gas pollutants as follows:

$$\eta (\%) = \frac{C_{Gi} - C_{Go}}{C_{Gi}} \times 100\% \quad (10)$$

3 | Results and Discussion

3.1 | Effect of the HP2R Rotating Speed

The effect of the HP2R's rotating speed (ω) from 100 to 700 rpm (as the gravity factor G from 0.6 to 29.5) on the simultaneous removal efficiency (η) of CO_2 , SO_2 , and NO_x in the PC, HP2R, and the integrated system is illustrated in Exhibit 4. While ω had a negligible impact on the performance of the PC unit, increasing the HP2R's rotation speed markedly enhanced the η of all three gas components after the HP2R stage and thus improved the overall system performance. For example, CO_2 removal efficiency increased significantly from $44.4\% \pm 3.8\%$ to $64.1\% \pm 4.5\%$ in the HP2R as ω rose from 100 to 300 rpm, boosting the total η from $75.6\% \pm 2.4\%$ to $88.2\% \pm 1.2\%$ (Exhibit 4a). This improvement can be attributed to enhanced mass transfer resulting from better liquid dispersion inside the packed bed under high centrifugal force compared to gravitational force ($G = 2.4$ –29.5) within the HP2R packing. Such effects of high-gravity operation on CO_2 absorption using HiGee systems were also reported by Li et al. (2024). For NO_x removal, the benefit of higher centrifugal fields was even more evident, with over a 50% ($23.6\% \pm 4.3\%$ to $82.4\% \pm 3.2\%$) increase in η observed after the HP2R unit as ω increased

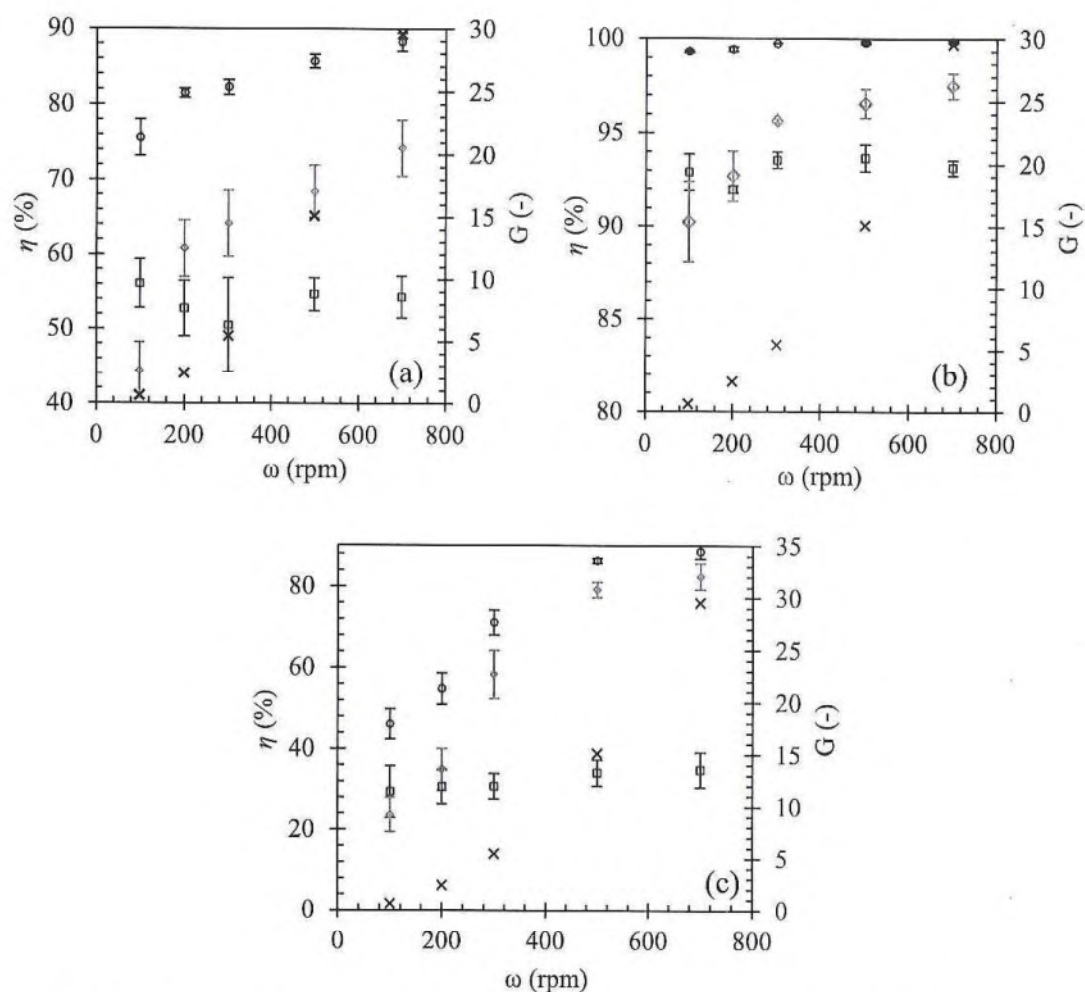


EXHIBIT 4 | The effect of HP2R's ω on the CO₂ (a), SO₂ (b), and NO_x (c) removal efficiency of the PC-HP2R system ($Q_G = 25$ L/min, $Q_{L1} = Q_{L2} = 0.35$ L/min, $n = 3$). Symbols: $\square$: η of PC, $\diamond$: η of HP2R, $^\circ$: total η , $\times$: gravity factor (G). [Color figures can be viewed at wileyonlinelibrary.com.]

from 100 to 500 rpm (Exhibit 4c). Accordingly, the total η of NO_x removal in the system was significantly improved from $46.0\% \pm 3.7\%$ to $88.6\% \pm 1.7\%$ (Exhibit 4c). However, Chen et al. (2023) noted that excessively high gravity factors could hinder NO₂ absorption due to shortened gas and liquid residence times, which may explain the stagnation in NO_x removal efficiency beyond 500 rpm. In contrast, the influence of ω on SO₂ removal was less pronounced, with η increasing moderately from $90.2\% \pm 2.5\%$ to $97.5\% \pm 0.7\%$ in the HP2R as ω varied from 100 to 700 rpm (Exhibit 4b). Consequently, the total η of SO₂ removal remained high, varying narrowly from $99.3\% \pm 0.1\%$ to $99.8\% \pm 0.1\%$ (Exhibit 4b). Given SO₂'s higher polarity (Taylor et al. 2018), stronger acidity, and greater reactivity toward NaOH (Beyad et al. 2014), it is inherently more hydrophilic, which may overshadow the benefits of enhanced mass transfer under high-gravity conditions.

This study also highlighted the superiority of the rotating packed bed—stationary packed column combination. At low ω of 100 rpm, where the gravity factor G was only 0.6 in a much smaller packed volume of HP2R compared to PC, the η values of the HP2R unit were lower than those of the PC unit for all three gases. However, as G increased from 5.4 to 29.5 ($\omega = 300$ –

700 rpm), the HP2R outperformed the PC in flue gas absorption, demonstrating its capability for high-efficiency operation in a compact design. For instance, at $\omega = 500$ to 700 rpm, as $G = 15.1$ to 29.5, the η of the HP2R was 15%–20% higher for CO₂ removal compared to the PC unit (Exhibit 4a). Moreover, in the integrated PC-HP2R configuration, the flue gas experienced longer overall residence time than in a conventional single-unit absorber (e.g., a packed column or packed bed). This extended residence time was expected to be particularly beneficial under low O₃/NO conditions. As the gas flows through the mixing chamber and the PC unit, the additional residence time might allow the slower NO oxidation pathway by O₂ (Equation 7) to proceed further (Sun et al. 2019), generating a slightly higher fraction of NO₂ before entering the HP2R. The increased availability of NO₂ enhanced its subsequent absorption in the HP2R, where the system benefited from high centrifugal effect.

3.2 | Effect of Flue Gas Flow Rate

Exhibit 5 illustrates the influence of gas flow rate (Q_G) from 25 to 150 L/min or gas-to-liquid flow rate ratio (Q_G/Q_L) from 36 to 214 under constant $Q_{L1} = Q_{L2} = 0.35$ L/min and $\omega =$

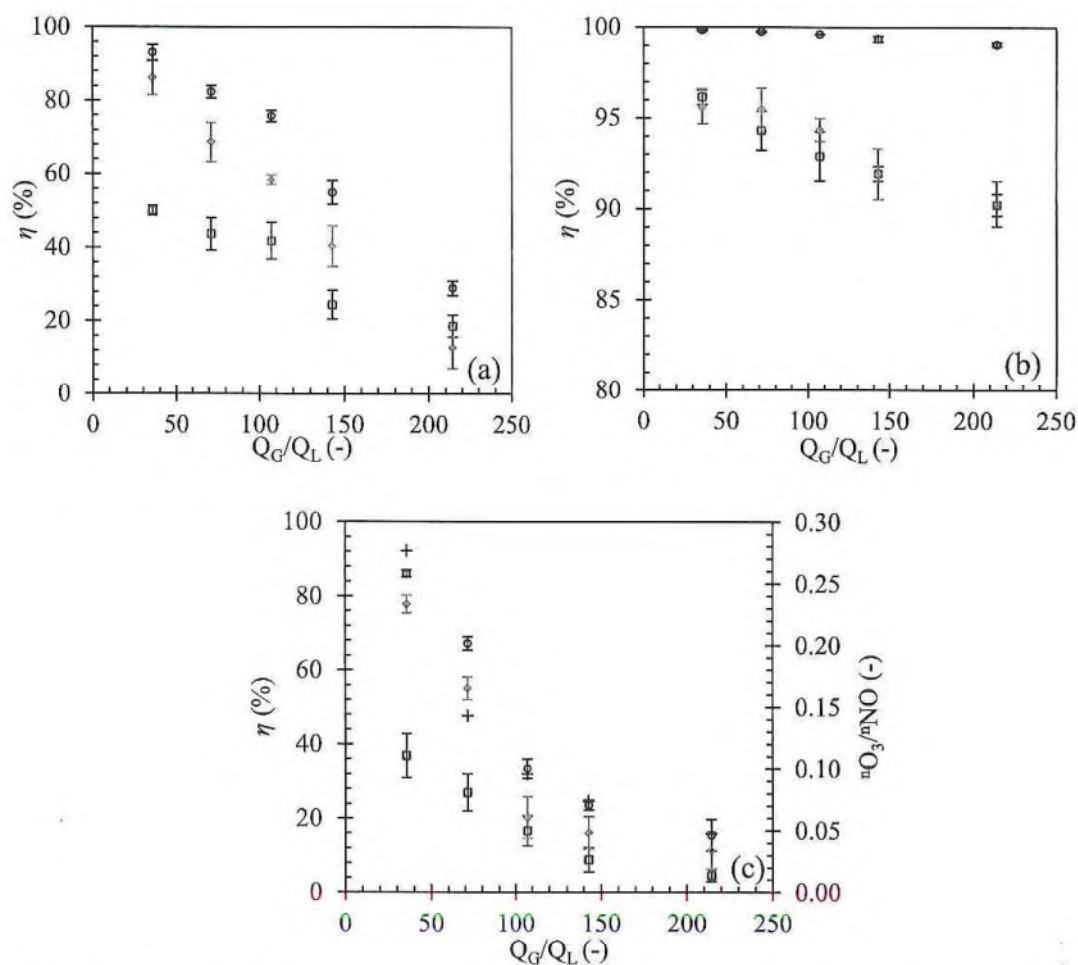


EXHIBIT 5 | The effect of Q_G/Q_L on the CO_2 (a), SO_2 (b), and NO_x (c) removal efficiency of the PC-HP2R system ($\omega = 500$ rpm, $Q_{L1} = Q_{L2} = 0.35$ L/min, $n = 3$). Symbols: $\square$: η of PC, $\diamond$: η of HP2R, $\circ$: total η , $+$: O_3/NO ratio. [Color figures can be viewed at wileyonlinelibrary.com.]

500 rpm on the simultaneous removal efficiency (η) of CO_2 , SO_2 , and NO_x in the PC, HP2R, and the integrated system. As shown, increasing flue gas loading led to a general decline in η for all three gas components across both absorption units. Specifically, as Q_G/Q_L increased from 36 to 214, CO_2 removal efficiency decreased sharply from $50.1\% \pm 1.3\%$ to $18.6\% \pm 3.0\%$ in the PC and from $86.2\% \pm 4.7\%$ to $12.8\% \pm 5.7\%$ in the HP2R (Exhibit 5a). The more rapid decline in the HP2R indicated that its smaller packed volume was more sensitive to variations in gas flow rate. At the highest Q_G (150 L/min), the CO_2 removal efficiency of the HP2R ($12.8\% \pm 5.7\%$) even fell below that of the PC ($18.6\% \pm 3.0\%$). A similar but more pronounced trend was observed for NO_x . As Q_G increased, η decreased from $36.9\% \pm 6\%$ to $4.5\% \pm 1.6\%$ in the PC, from $77.8\% \pm 2.4\%$ to $11.4\% \pm 4.9\%$ in the HP2R, and from $86.0\% \pm 0.9\%$ to $15.4\% \pm 4.2\%$ for the overall system (Exhibit 5c). This reduction can be attributed to the combined effects of increased flue gas throughput at constant absorbent flow, shortened gas residence time, and a substantial decrease in the O_3/NO molar ratio (from 0.28 to 0.05), which limited NO oxidation and subsequent absorption (Wang et al. 2020). In contrast, SO_2 removal remained highly efficient across all operating conditions. The η of SO_2 was consistently above 90% in both the PC ($90.2\% \pm 0.6\%$ to $96.1\% \pm 0.4\%$) and HP2R ($90.3\% \pm 1.2\%$ to $95.6\% \pm 0.9\%$) units at Q_G ranging from 25

to 150 L/min (Exhibit 5b). These findings aligned with Chen et al. (2020), who reported stable SO_2 removal (96%–98%) in a single rotating packed bed. Benefiting from the dual absorption configuration, the overall SO_2 removal efficiency of the PC-HP2R system remained consistently above 99%, regardless of gas flow rate from 25 to 150 L/min.

3.3 | Effect of Liquid Flow Rate

In this study, the liquid flow rates in the PC and HP2R units were investigated separately to determine the optimal operating range for effective pollutant removal. The effect of the absorbent flow rate in the PC unit (Q_{L1}) on the simultaneous removal efficiency (η) of CO_2 , SO_2 , and NO_x was evaluated under constant conditions of $Q_G = 25$ L/min, $Q_{L2} = 0.35$ L/min, and $\omega = 500$ rpm, as illustrated in Exhibit 6. The η values of CO_2 , SO_2 , and NO_x in the PC increased noticeably from $18.6\% \pm 4.2\%$ to $46.5\% \pm 2.5\%$, $82.2\% \pm 1.4\%$ to $96.1\% \pm 0.4\%$, and $2.3\% \pm 0.5\%$ to $35.0\% \pm 2.8\%$, respectively (Exhibit 6a–c). The improvement in removal efficiency with increasing Q_{L1} can be attributed to enhanced supply of fresh absorbent with constant flue gas flow rate to the column (Kartohardjono et al. 2017).

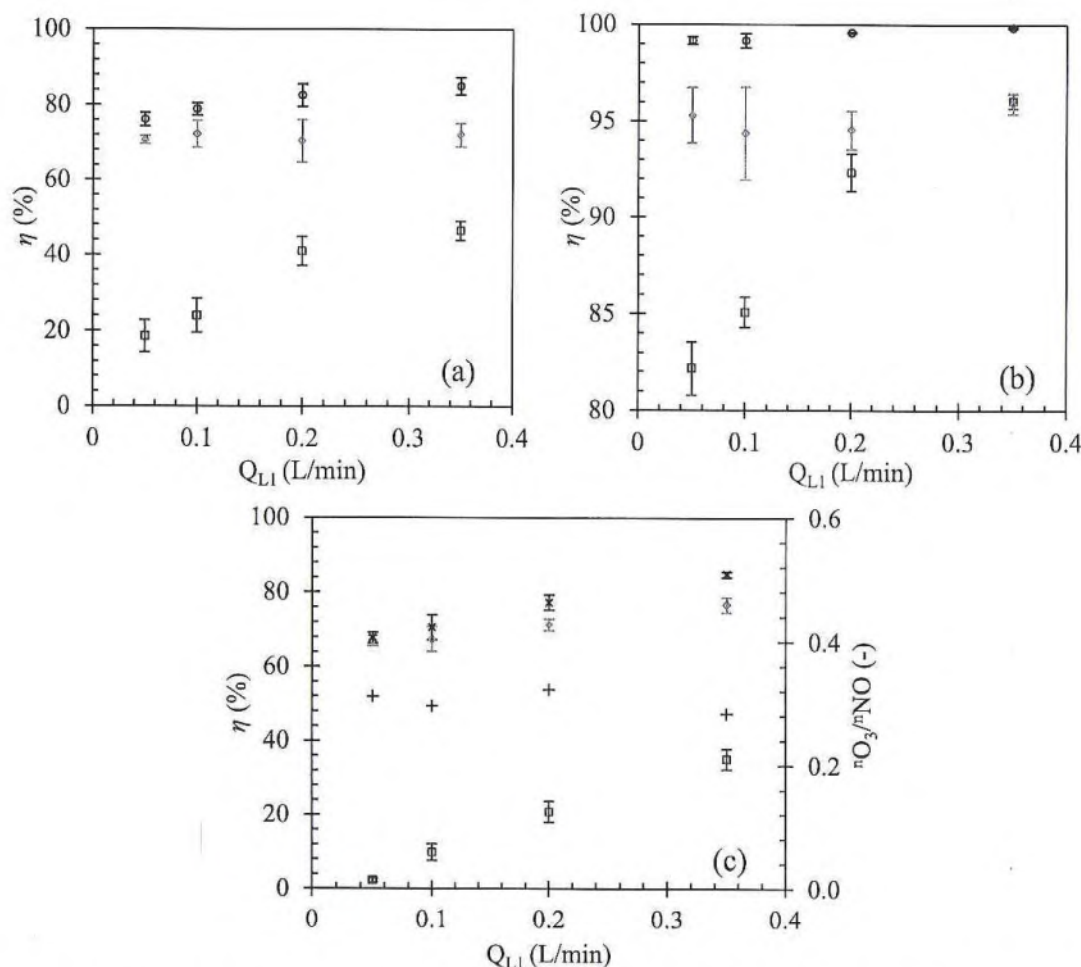


EXHIBIT 6 | The effect of Q_{L1} on the CO_2 (a), SO_2 (b), and NO_x (c) removal efficiency of the PC-HP2R system ($\omega = 500$ rpm, $Q_G = 25$ L/min, $Q_{L2} = 0.35$ L/min). Symbols: $\square$: η of PC, $\diamond$: η of HP2R, $\circ$: total η , $+$: $n\text{O}_3/n\text{NO}$ ratio. [Color figures can be viewed at wileyonlinelibrary.com.]

The effect of absorbent flow rate in the HP2R unit (Q_{L2}) on the simultaneous removal efficiency (η) of CO_2 , SO_2 , and NO_x was evaluated under constant conditions of $Q_G = 25$ L/min, $Q_{L1} = 0.35$ L/min, and $\omega = 500$ rpm, as shown in **Exhibit 7**. Similar to the trend observed with Q_{L1} , increasing Q_{L2} significantly enhanced the CO_2 and NO_x absorption performance of the HP2R unit. The η of CO_2 and NO_x removal increased remarkably from $19.5\% \pm 1.7\%$ to $72.8\% \pm 2.9\%$ (**Exhibit 7a**) and from $19.1\% \pm 2.2\%$ to $78.2\% \pm 2.0\%$ (**Exhibit 7c**), respectively. Compared to the PC unit, a higher absorbent flow rate in the HP2R resulted in a more substantial improvement in both CO_2 and NO_x removal efficiencies. For a similar increase in absorbent flow rate (0.05–0.35 L/min), the η of CO_2 and NO_x removal improved by 53.3% and 59.1%, respectively, significantly higher than the corresponding increments of 27.9% and 32.7% observed in the PC unit. Unlike conventional packed columns, HiGee-based contactors operating at sufficient rotational speeds allow higher liquid loading with minimal flooding risk, while providing more uniform liquid dispersion and enhanced gas–liquid mass transfer (Wojtasik et al. 2019). Consequently, the overall η of CO_2 and NO_x removal for the integrated system was substantially improved, from $58.6\% \pm 2.4\%$ to $88.1\% \pm 0.4\%$ and from $37.4\% \pm 4.4\%$ to $85.1\% \pm 0.5\%$, respectively. In contrast, SO_2 removal remained consistently high ($>90\%$) in both the HP2R unit and the integrated system,

regardless of Q_{L2} variation, due to its inherently strong affinity for absorption (**Exhibit 7b**).

3.4 | Continuous Simultaneous Flue Gas Removal Performance

To further evaluate the long-term stability and sustainability of the integrated PC-HP2R system, a continuous absorption experiment was conducted using a recirculated 1-M NaOH absorbent. The simulated flue gas containing 11.5 vol.% CO_2 , 602 ppm SO_2 , and 408 ppm NO_x was continuously introduced into the system under the previously optimized operating conditions ($Q_G = 25$ L/min, $Q_{L1} = Q_{L2} = 0.35$ L/min, $\omega = 500$ rpm, and $n\text{O}_3/n\text{NO}$ ratio = 0.3). The outlet concentrations of each gas component were monitored over time to assess the removal efficiency during extended operation. Concurrently, the pH variation of the absorbent in the PC and HP2R unit was recorded to examine its correlation with absorption capacity and chemical consumption. This experiment aimed to simulate the practical operation of the system in a practical plant, where absorbent regeneration and long-term performance are critical for sustainable flue gas treatment and carbon capture.

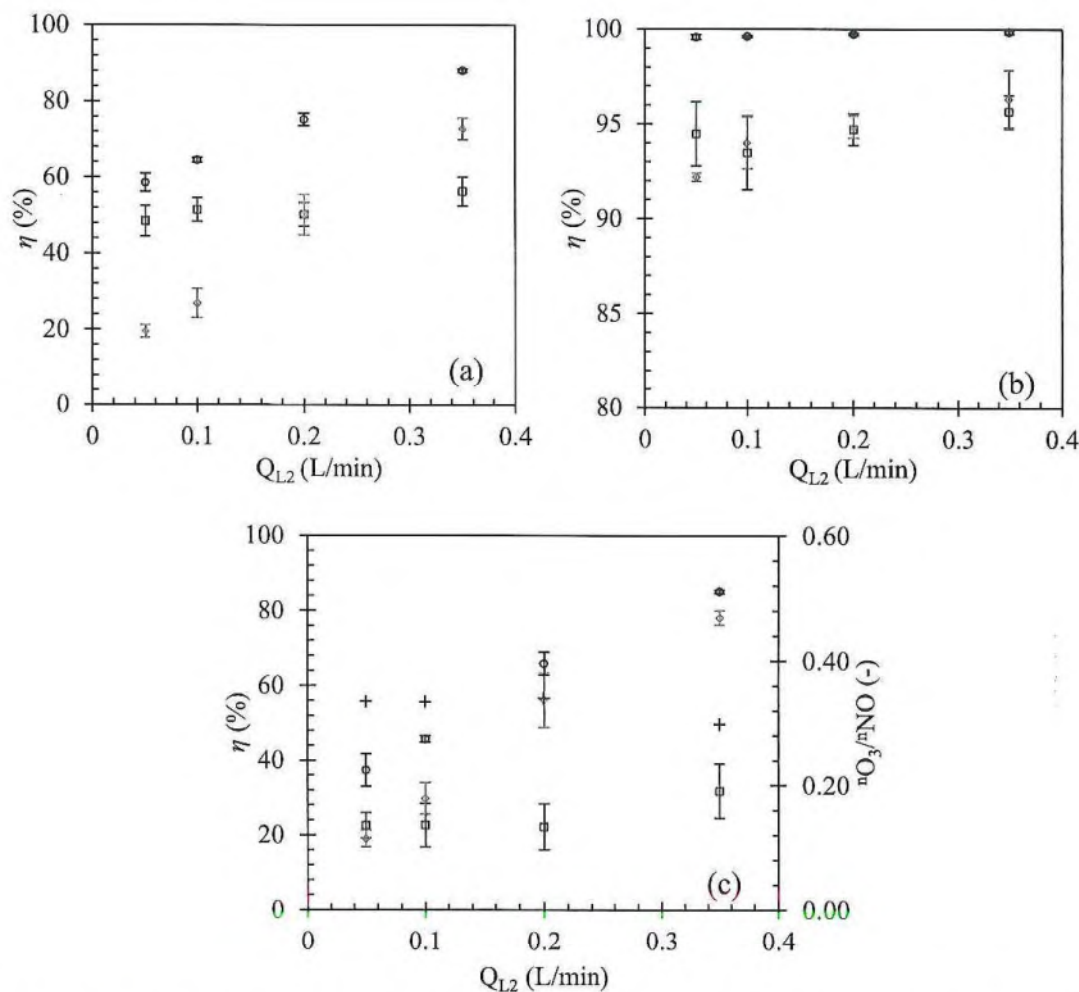


EXHIBIT 7 | The effect of Q_{L2} on the CO_2 (a), SO_2 (b), and NO_x (c) removal efficiency of the PC-HP2R system $\omega = 500$ rpm, $Q_G = 25$ L/min, $Q_{L1} = 0.35$ L/min. Symbols: $\square$: η of PC, $\diamond$: η of HP2R, $\circ$: total η , $+$: O_3/NO ratio. [Color figures can be viewed at wileyonlinelibrary.com.]

The results of the continuous flue gas removal experiment are presented in **Exhibit 8**. It should be noted that gas measurements for the PC and HP2R units were performed at different time intervals due to the availability of only one gas analyzer. Once the absorbent dosing pumps were initiated in both the PC and HP2R units, the concentrations of all gas components dropped almost immediately. After 18 min of operation, the outlet concentrations from the PC unit decreased sharply from 11.5% to 4.53% for CO_2 , from 597 ppm to 25.0 ppm for SO_2 , and from 402 ppm to 241 ppm for NO_x (Exhibit 8). With the addition of the HP2R unit, the overall system performance improved substantially. At 22 min, the outlet concentrations of CO_2 , SO_2 , and NO_x from the integrated system were only 1.15 vol.%, 1.7 ppm, and 31.2 ppm, respectively. The removal of SO_2 and NO_x remained effective throughout the experiment, with outlet concentrations maintained at low levels. SO_2 concentrations at the PC outlet and system outlet ranged between 22–42 ppm and 0.7–2.5 ppm, respectively. For NO_x , a slight increasing trend was observed, from 256 ppm to 304 ppm at the PC outlet and from 41.0 ppm to 66.2 ppm at the system outlet, from 18 min onward. This gradual increase can be attributed to the decline in absorbent pH over time, as the alkalinity of the solution strongly influences the absorption of SO_2 and NO_2 (Krzyzyska and Hutson 2012).

The NaOH solution's pH decreased from approximately 14.02 (1-M NaOH) to 9.56 in the PC unit and 10.11 in the HP2R unit, with a sharp drop occurring between 30 and 40 min. Compared to SO_2 and NO_x , CO_2 absorption was more sensitive to the pH decline of the NaOH absorbent. In the PC unit, CO_2 concentration increased from 4.53 vol.% to 10.72 vol.% as the absorbent pH fell from 13.45 to 9.56 between 18 and 50 min. Lu et al. (2024) reported that maintaining a sufficiently high pH is essential for CO_2 absorption, requiring at least 2 wt.% $Ca(OH)_2$ to sustain 90% CO_2 conversion over 30 min. A similar trend was observed in the HP2R unit, where the CO_2 concentration rose sharply from 1.41 vol.% to 9.78 vol.% between 30 and 54 min. Chen et al. (2020) also emphasized the need for maintaining an initial pH near 13 to achieve optimal CO_2 absorption performance in rotating packed bed systems using solid alkaline waste.

The results demonstrate the strong potential of the integrated PC-HP2R system for simultaneous CO_2 , SO_2 , and NO_x removal from flue gas. The system achieved rapid and stable gas reduction within minutes, with particularly high and sustained efficiencies for SO_2 and NO_x , confirming its suitability for multi-pollutant control. The combination of a conventional packed column with a high-gravity contactor significantly enhanced process perfor-

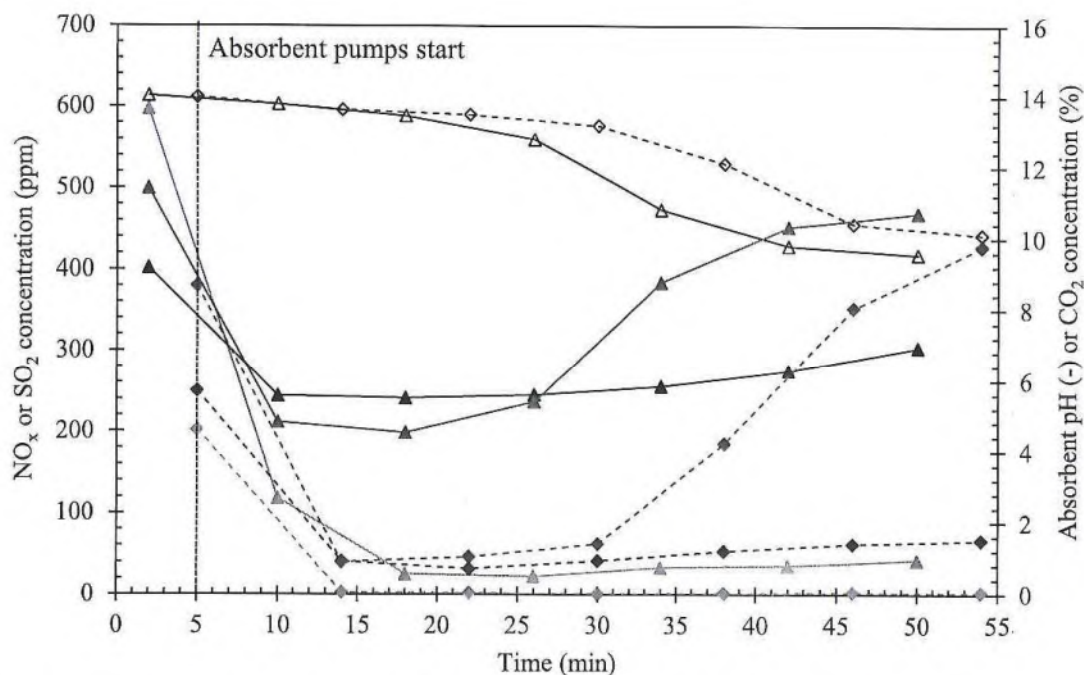


EXHIBIT 8 | Continuous removal of CO₂, SO₂, and NO_x using the PC-HP2R system at $Q_G = 25$ L/min, $Q_{L1} = Q_{L2} = 0.35$ L/min, $\omega = 500$ rpm, $^{18}\text{O}_3/^{18}\text{NO}$ ratio = 0.3 ($n = 1$). Symbols: Δ : pH of PC's absorbent, $\diamond$: pH of HP2R's absorbent, $\blacktriangle$: CO₂ after PC $\blacklozenge$: CO₂ after HP2R, $\blacktriangle$: SO₂ after PC, $\blacklozenge$: SO₂ after HP2R, $\blacktriangle$: NO_x after PC, $\blacklozenge$: NO_x after HP2R. [Color figures can be viewed at wileyonlinelibrary.com.]

mance while maintaining compact system design, representing a major advantage for retrofitting existing industrial facilities with limited space. However, the experiment also revealed critical limitations associated with absorbent depletion and pH decline over extended operation. The absorption of CO₂, in particular, was highly sensitive to the alkalinity of the solution, resulting in a noticeable drop in efficiency as the absorbent became neutralized. This indicates that continuous operation of the system would require an effective absorbent regeneration or replenishment strategy to maintain long-term stability and efficiency of CO₂ capture.

3.5 | Comparative Performance, Limitations, and Implications for Scale up

The performance of the integrated PC-HP2R system was compared with recent studies using single packed columns and rotating packed beds (RPBs). In conventional packed columns, limited interfacial area and uneven liquid distribution restrict mass transfer, resulting in low NO_x removal (<30%) despite effective efficiency toward CO₂ and SO₂ (Lu et al. 2024). RPB systems offer intensified gas-liquid contact and higher CO₂ absorption efficiency (Lin and Chen 2011); however, their simultaneous multi-pollutant removal often requires high rotational speeds to achieve >90% NO_x removal (Chen et al. 2020), increasing operational cost and absorbent degradation. In contrast, the integrated PC-HP2R configuration combines the advantages of both systems: the packed column facilitates initial oxidation and absorption, while the HP2R enhances final mass transfer under moderate operating conditions ($\omega = 500$ rpm). This sequential setup extended total gas residence as two absorption units combined, enabling additional NO oxidation even at low $^{18}\text{O}_3/^{18}\text{NO}$

(<1). As a result, the integrated system achieved around 99% SO₂, 85% NO_x, and 90% CO₂ removal efficiencies using 1 M NaOH, comparable to or exceeding single RPB performance, but at lower energy demands.

After the operation, the spent NaOH absorbent was expected to contain carbonate/bicarbonate, sulfate, and nitrite/nitrate species formed through the absorption of CO₂, SO₂, and NO_x, respectively. The carbonate species could be a stable form of captured CO₂, which can be considered a temporary storage route to prevent the re-emission. However, for enhanced CO₂ capture and long-term utilization in practical application, amine-based absorbents could be more suitable for the HP2R unit, as they facilitate easier CO₂ desorption, regeneration by thermal process, and transport compared with carbonate solution (Ameri et al. 2025).

Overall, while the integrated PC-HP2R system demonstrated strong performance in simultaneous CO₂, SO₂, and NO_x removal under laboratory conditions, further validation at the pilot or field scale is essential. In the field scale, a bag filter before the PC-HP2R system can effectively ensure that PMs entering the absorption system are negligible (Liu et al. 2019). However, when only a cyclone is employed, residual PM₁₀ and PM_{2.5} may still enter the system and should be considered in the field-scale scenarios (Gutierrez et al. 2024). The presence of these fine particles might lead to clogging within the packing material, resulting in a reduced gas-liquid interfacial area and flow maldistribution over time in the PC unit (Mussatti and Hemmer 2002). Nevertheless, significant solid accumulation is expected to be unlikely to occur in the subsequent HP2R unit due to its operational configuration and position downstream of the PC. Either optimized packing designs or adjusted operating conditions to minimize PM depo-

sition should be considered, along with the option of employing improved pretreatment units such as higher-efficiency cyclones or bag filters. Pilot-scale trials using actual industrial flue gas would help determine whether improved packing designs, self-cleaning features, or enhanced pretreatment systems should be prioritized to ensure stable long-term operation. Future work should include separate measurements of NO and NO₂ to directly quantify the extent of gas-phase oxidation and validate the O₃-NO reaction mechanism, together with detailed analysis of the spent absorbent to quantify carbonate/bicarbonate, sulfate, and nitrite/nitrate species for complete C-N-S mass-balance validation. In addition, hydrodynamic characterization, such as Reynolds number evaluation, flow-regime identification, and flooding or pressure-drop assessment, should be carried out under pilot-scale operation using actual industrial flue gas to better understand system behavior and ensure reliable scale-up of the integrated PC-HP2R system.

4 | Conclusion

This study effectively demonstrated the capability of the integrated PC-HP2R system for simultaneous removal of CO₂, SO₂, and NO_x from flue gas. The influence of key operating parameters was systematically examined, revealing that variations in gas and liquid flow rates notably affected removal efficiencies by altering gas-liquid interfacial behavior in both the PC and HP2R units. Under higher rotational speeds ($\omega = 500\text{--}700$ rpm), integration with the HP2R unit substantially enhanced CO₂ and NO_x removal efficiencies by approximately 30%–50% compared with the standalone PC unit, owing to a higher gravity factor within the compact configuration. Continuous operation further confirmed the system's stability in multi-pollutant removal, particularly for SO₂ and NO_x, although CO₂ capture performance was found to be sensitive to absorbent pH, emphasizing the need for effective absorbent regeneration to sustain long-term operation. Future work should evaluate the integrated PC-HP2R system under real flue gas to verify its robustness and scalability. Pilot-scale hydrodynamic characterization will be important to support system scale-up. The use of multiple gas analyzers is also recommended to enable real-time monitoring and separate NO/NO₂ measurements for validating the O₃-NO oxidation mechanism. Additionally, a detailed analysis of the spent absorbent should be conducted to quantify carbonate/bicarbonate, sulfate, and nitrite/nitrate species and complete the C–N–S mass balance.

Acknowledgments

This research was supported by Vietnam Academy of Science and Technology (VAST) through the funding of the 2024 - 2025 Senior Researcher Program (Grant number: NVCC31.03/24-25).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

Data Availability Statement

Data will be made available on request.

References

- Bashmakov, I. A., L. J. Nilsson, A. Acquaye, et al. 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 11.
- Nunez, C. 2023. "Carbon Dioxide Levels Are at a Record High. Here's What You Need to Know." *National geographic* 3.
- Yadav, S., and S. S. Mondal. 2019. "A Complete Review Based on Various Aspects of Pulverized Coal Combustion." *International Journal of Energy Research* 43, no. 8: 3134–3165. <https://doi.org/10.1002/er.4395>.
- Yadav, S., and S. S. Mondal. 2022. "A Review on the Progress and Prospects of Oxy-Fuel Carbon Capture and Sequestration (CCS) Technology." *Fuel* 308: 122057. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122057>.
- Jansen, D., M. Gazzani, G. Manzolini, E. v. Dijk, and M. Carbo. 2015. "Pre-Combustion CO₂ Capture." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40: 167–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.028>.
- Miller, J. A., and C. T. Bowman. 1989. "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion." *Progress in energy combustion science* 15, no. 4: 287–338.
- Basuki, B., E. Seputro, and E. Kusuma. 2021. "Efforts to Reduce SO₂ Emission in Paiton Coal-Fired Power Plant." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 012125.
- Ben-Mansour, R., M. Habib, O. Bamidele, et al. 2016. "Carbon Capture by Physical Adsorption: Materials, Experimental Investigations and Numerical Modeling and Simulations—A Review." *Applied Energy* 161: 225–255.
- Valluri, S., and S. K. Kawatra. 2021. "Simultaneous Removal of CO₂, NO_x and SO_x Using Single Stage Absorption Column." *Journal of Environmental Sciences* 103: 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.11.006>.
- Yuan, B., X. Mao, Z. Wang, R. Hao, and Y. Zhao. 2020. "Radical-Induced Oxidation Removal of Multi-Air-Pollutant: A Critical Review." *Journal of Hazardous Materials* 383: 121162. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121162>.
- Yasuda, M., N. Tsugita, K. Ito, et al. 2011. "High-Efficiency NO_x Absorption in Water Using Equipment Packed With a Glass Fiber Filter." *Environmental Science & Technology* 45, no. 5: 1840–1846. <https://doi.org/10.1021/es102214b>.
- Kang, M. S., J. Shin, T. U. Yu, and J. Hwang. 2020. "Simultaneous Removal of Gaseous NO_x and SO₂ by Gas-Phase Oxidation With Ozone and Wet Scrubbing With Sodium Hydroxide." *Chemical Engineering Journal* 381: 122601. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122601>.
- Long, N. V. D., D. Y. Lee, C. Kwag, et al. 2025. "Removal of Marine NO_x, SO_x, and CO₂ From Flue Gas: Simulation and Experiment on a Pilot Plant." *Separation and Purification Technology* 359: 130558. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130558>.
- Afkhamipour, M., and M. Mofarahi. 2018. "Effects of Operating Parameters of Packed Columns on the KGav for CO₂ Absorption by Amine Solutions Using Optimization–Simulation Framework." *Separation and Purification Technology* 202: 86–102. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.026>.
- Wibowo, H., W. Liao, X. Zhou, et al. 2020. "Study on the Effect of Operating Parameters Towards CO₂ Absorption Behavior of Choline Chloride–Monoethanolamine Deep Eutectic Solvent and Its Aqueous Solutions." *Chemical Engineering and Processing—Process Intensification* 157: 108142. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108142>.
- Abro, M., L. Yu, G. Yu, X. Chen, and A. B. Qazi. 2021. "Experimental Investigation of Hydrodynamic Parameters and Bubble Characteristics in CO₂ Absorption Column Using Pure Ionic Liquid and Binary Mixtures: Effect of Porous Sparger and Operating Conditions." *Chemical Engineering Science* 229: 116041. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116041>.
- Chen, Y., Z. Li, Y. Yang, J. Jia, C. Liu, and M. Lucquiaud. 2019. "Simulation of Flooding Phenomenon in Packed Column using Electrical Capacitance

- Tomography." 2019 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST), 1–5.
- Cortes Garcia, G. E., J. van der Schaaf, and A. A. Kiss. 2017. "A Review on Process Intensification in HiGee Distillation." *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 92, no. 6: 1136–1156. <https://doi.org/10.1002/jctb.5206>.
- Guo, J., W. Jiao, G. Qi, Z. Yuan, and Y. Liu. 2019. "Applications of High-Gravity Technologies in Gas Purifications: A Review." *Chinese Journal of Chemical Engineering* 27, no. 6: 1361–1373. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.01.011>.
- Lin, C.-C., and B.-C. Chen. 2011. "Carbon Dioxide Absorption in a Cross-Flow Rotating Packed Bed." *Chemical Engineering Research and Design* 89, no. 9: 1722–1729. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.015>.
- Chen, Y.-S., and H.-S. Liu. 2002. "Absorption of VOCs in a Rotating Packed Bed." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 41, no. 6: 1583–1588. <https://doi.org/10.1021/ie010752h>.
- Lin, C.-C., T.-Y. Wei, S.-K. Hsu, and W.-T. Liu. 2006. "Performance of a Pilot-Scale Cross-Flow Rotating Packed Bed in Removing VOCs From Waste Gas Streams." *Separation and Purification Technology* 52, no. 2: 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.05.003>.
- Chen, T.-L., Y.-H. Chen, and P.-C. Chiang. 2020. "Enhanced Performance on Simultaneous Removal of NO_x-SO₂-CO₂ Using a High-Gravity Rotating Packed Bed and Alkaline Wastes Towards Green Process Intensification." *Chemical Engineering Journal* 393: 124678. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124678>.
- Nguyen, T. D. T., K. Kawai, and T. Nakakubo. 2021. "Drivers and Constraints of Waste-to-Energy Incineration for Sustainable Municipal Solid Waste Management in Developing Countries." *Journal of Material Cycles and Waste Management* 23, no. 4: 1688–1697. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01227-2>.
- Van, T. D. S. 2021 Current Statue of Flue Gas Treatment at Municipal Solid Waste Incinerator in Vietnam (in Vietnamese), Vietnam Environmental Magazine 2021(IV).
- Trinh, L. T. P., T. T. Le, T. T. B. Pham, et al. 2024 Assessment of the Emission of Air Pollutants and Greenhouse Gases in the Flue Gas From Coal-Fired Power Plants in Vietnam, Vietnam Environmental Magazine 2024(IV).
- Hoa, N. T., K. T. hong, N. T. Mai, N. T. T. Hang, and P. T. Thuan. 2023. "Study and Evaluation of Comprehension Exhaust Gas Treatment Activities in the Pil Operation Phase of Soc Son Waste Power Plant and Proposal Solutions to Improve Efficiency." *TNU Journal of Science and Technology* 228, no. 14: 272–279. <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9021>.
- Pham, H. H., and H. T. T. Phung. 2023. "Vietnam Policy and Regulation on Greenhouse Gas Emission Reduction, Toward Low Carbon Emissions Economy," in *Contemporary Economic Issues in Asian Countries: Proceeding of CELAC 2022*, edited by A.T. Nguyen T.T. Pham J. Song Y.-L. Lin, and M.C. Dong, Volume 2, Springer Nature Singapore, , 639–659.
- Trinh, V. M., T. P. Nguyen, T. H. Pham, et al. 2023. "Intensified Ammonia Stripping From Landfill Leachate Using a High-Performance Rotating Reactor." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11, no. 5: 110416. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110416>.
- Sun, B., K. Dong, W. Zhao, et al. 2019. "Simultaneous absorption of NO_x and SO₂ Into Na₂SO₃ solution in a Rotating Packed Bed With Preoxidation by Ozone." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 58, no. 19: 8332–8341. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01162>.
- Chen, T.-L., C.-Y. Hong, Y.-H. Chen, and P.-C. Chiang. 2023. "Enhancing NO_x Removal in a High-Gravity Rotating Packed Bed With Gaseous ClO₂ Oxidation-Absorption: Kinetic, Mass Transfer, and Cost Analysis." *Chemical Engineering Journal* 469: 144072. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144072>.
- Li, W.-L., H.-W. Liang, Z.-S. Feng, et al. 2024. "CFD Simulation and Experimental Study of CO₂ Absorption in a Rotating Packed Bed." *Chemical Engineering and Processing—Process Intensification* 200: 109794. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2024.109794>.
- Taylor, S. F. R., M. McClung, C. McReynolds, et al. 2018. "Understanding the Competitive Gas Absorption of CO₂ and SO₂ in Superbase Ionic Liquids." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 57, no. 50: 17033–17042. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03623>.
- Beyad, Y., G. Puxty, S. Wei, et al. 2014. "An SO₂ Tolerant Process for CO₂ Capture." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 31: 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.10.011>.
- Wang, B., H. Su, and S. Yao. 2020. "Oxidation of NO With O₃ Under Different Conditions and the Effects of SO₂ and H₂O Vapor." *Process Safety and Environmental Protection* 133: 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.017>.
- Kartohardjono, S., A. Paramitha, A. A. Putri, and R. Andriant. 2017. "Effects of Absorbent Flow Rate on CO₂ Absorption Through a Super Hydrophobic Hollow Fiber Membrane Contactor." *International Journal of Technology* 8, no. 8: 291–319. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i8.679>.
- Wojtasik, J., K. Gładyszewski, M. Skiborowski, A. Górak, and M. Piątkowski. 2019. "Enzyme-Enhanced CO₂ Absorption Process in Rotating Packed Bed." *Chemical Papers* 73, no. 4: 861–869. <https://doi.org/10.1007/s11696-018-0647-8>.
- Krzyzyska, R., and N. D. Hutson. 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, no. 2: 212–220. <https://doi.org/10.1080/10473289.2011.642951>.
- Lu, P., X. Yan, L. Ye, et al. 2024. "Performance and Mechanism of CO₂ Absorption During the Simultaneous Removal of SO₂ and NO_x by Wet Scrubbing Process." *Journal of Environmental Sciences* 135: 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.08.028>.
- Ameri, A., A. Najarneshadmarshadi, I. A. Lawal, Z. Wu, C. Duwig, and H. Kusar. 2025. "Comparative Study of CO₂ Capture Efficiency Using Sodium Hydroxide and Monoethanolamine Solutions in a Spray Column." *Atmospheric Environment: X* 28: 100383. <https://doi.org/10.1016/j.aea.2025.100383>.
- Liu, X., H. Shen, and X. Nie. 2019. "Study on the Filtration Performance of the Baghouse Filters for Ultra-Low Emission as a Function of Filter Pore Size and Fiber Diameter." *International Journal of Environmental research and public health* 16, no. 2: 247.
- Gutierrez, J. A., J. A. Guerrero Narvaez, D. A. Campo Ceballos, and J. A. Muñoz Chaves. 2024. "Development of a Cyclone Separator for Particulate Matter Control in Figue Bag Production: A Case Study at Empaques del Cauca S.A." *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 10: 100951. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.100951>.
- Mussatti, D., and P. Hemmer. 2002. Chapter 2: Wet Scrubbers for Particulate Matter, Section 6: Particulate Matter Controls US-EPA/452/B-02-001.

Số 351 - QĐ/HVKHCN

Hà Nội, ngày 27 tháng 5 năm 2026

QUYẾT ĐỊNH
Về việc thành lập Hội đồng đánh giá luận văn thạc sĩ

-
- Căn cứ Quyết định số 175-QĐ/VHLKHCNVN ngày 28 / 4 /2026 của Chủ tịch Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam về việc ban hành Quy chế Tổ chức và hoạt động của Học viện Khoa học và Công nghệ;
 - Căn cứ Thông tư số 23/2021/TT-BGDĐT ngày 30/8/2021 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc ban hành Quy chế đào tạo trình độ thạc sĩ;
 - Căn cứ Quyết định số 1966/QĐ-HVKHCN ngày 28/12/2021 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc ban hành Quy chế đào tạo trình độ thạc sĩ;
 - Căn cứ Quyết định số 724/QĐ-HVKHCN ngày 28/06/2024 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc công nhận học viên cao học trúng tuyển đợt 1 năm 2024;
 - Căn cứ Quyết định số 954/QĐ-HVKHCN ngày 02/10/2025 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc công nhận đề tài và người hướng dẫn luận văn thạc sĩ;
 - Xét đề nghị của Trưởng khoa Công nghệ môi trường và Năng lượng, Trường phòng Đào tạo.

GIÁM ĐỐC HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
QUYẾT ĐỊNH

Điều 1. Thành lập Hội đồng đánh giá luận văn thạc sĩ cho học viên Nguyễn Thị Phương Thảo với đề tài: **“Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc”**.

Ngành: Kỹ thuật môi trường;

Mã số: 8 52 03 20

Danh sách thành viên Hội đồng đánh giá luận văn kèm theo Quyết định này.

Điều 2. Hội đồng có trách nhiệm đánh giá luận văn thạc sĩ theo đúng quy chế hiện hành của Bộ Giáo dục và Đào tạo, Học viện Khoa học và Công nghệ.

Quyết định này có hiệu lực trong thời hạn tối đa 60 ngày làm việc kể từ ngày ký và phải đảm bảo thời hạn đào tạo theo quy định của Học viện. Hội đồng tự giải thể sau khi hoàn thành nhiệm vụ.

Điều 3. Trưởng phòng Tổ chức – Hành chính, Trưởng phòng Đào tạo, Trưởng phòng Kế toán, Trưởng khoa Công nghệ môi trường và Năng lượng, các thành viên có tên trong danh sách Hội đồng và học viên cao học có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành Quyết định này. *fn*

Nơi nhận:

- Như Điều 3;
- Lưu hồ sơ học viên;
- Lưu: VT, ĐT, HK.(14).



GIÁM ĐỐC

Th
PGS.TS. Hoàng Anh Sơn



DANH SÁCH HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN VĂN THẠC SĨ

(Kèm theo Quyết định số 351- QĐ/HVKHCN ngày 27 / 5 /2026
của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ)

Chợ luận văn của học viên: Nguyễn Thị Phương Thảo

Tên đề tài: “Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc”.

Ngành: Kỹ thuật môi trường

Mã số: 8 52 03 20

Người hướng dẫn : GS.TS. Trịnh Văn Tuyên, Học viện Khoa học và Công nghệ,
Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,

TT	Họ và tên, học hàm, học vị	Chuyên ngành	Cơ quan công tác	Trách nhiệm trong Hội đồng
1.	GS.TS. Nguyễn Thị Huệ	Phân tích hóa học và môi trường	Viện Khoa học Công nghệ Năng lượng và Môi trường, Viện Hàn lâm KHCNVN	Chủ tịch
2.	PGS.TS. Lưu Thế Anh	Khoa học môi trường	Viện Tài nguyên và Môi trường, Đại học Quốc gia Hà Nội	Phản biện 1
3.	PGS.TS. Trần Mạnh Trí	Hóa môi trường	Trường ĐH Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội	Phản biện 2
4.	TS. Đặng Thị Thơm	Kỹ thuật môi trường	Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm KHCNVN	Ủy viên- Thư ký
5.	TS. Nguyễn Thị Thu Trang	Kỹ thuật môi trường	Viện Khoa học Công nghệ Năng lượng và Môi trường, Viện Hàn lâm KHCNVN	Ủy viên

Hội đồng gồm 05 thành viên./.

BIÊN BẢN HỌP HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN VĂN THẠC SĨ

Thực hiện Quyết định số: 351 -QĐ/HVKHCN ngày 27/ 5 /2026 của Giám đốc Học viện Khoa học và Công nghệ về việc thành lập Hội đồng đánh giá luận văn thạc sĩ của học viên Nguyễn Thị Phương Thảo

Tên đề tài: **“Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc”**.

Ngành: Kỹ thuật môi trường

Mã số: 8 52 03 20

Hôm nay, ngày 23 / 6 /2026 Hội đồng đã họp tại Phòng 1705 nhà A28, Học viện Khoa học và công nghệ vào lúc 9h00, Hội đồng gồm 05 thành viên:

TT	Họ và tên	Chức danh
1.	GS.TS. Nguyễn Thị Huệ	Chủ tịch Hội đồng
2.	TS. Đặng Thị Thơm	Thư ký Hội đồng
3.	PGS.TS. Lưu Thế Anh	Phản biện 1
4.	PGS.TS. Trần Mạnh Trí	Phản biện 2
5.	TS. Nguyễn Thị Thu Trang	Ủy viên Hội đồng

Thành viên vắng mặt: ..0.. (Phản biện hoặc ủy viên, đã có bản nhận xét đồng ý cho phép học viên được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận văn thạc sĩ)

NỘI DUNG LÀM VIỆC

1. Đại diện cơ sở đào tạo đọc quyết định thành lập Hội đồng đánh giá luận văn
2. Chủ tịch Hội đồng, điều khiển phiên họp
3. Thư ký HĐ, đọc lí lịch khoa học và bảng điểm của học viên
4. Học viên trình bày luận văn trước Hội đồng
5. Phản biện 1, đọc bản nhận xét luận văn, đặt câu hỏi

162. TS... Lưu. Thế. An... đọc... phải... nhân... xét... luận... văn...: "Nhân... cứu...
xử... lý... một... số... thảo... phân... khi... khai... giảng... thiết... bị... lý... tầm... tiếp... xúc...".
... với... câu... góp... ý... đặt... giá... theo... chỉ... phí... và... lợi... ích... của... công...
nghệ... và... nhà... số... đều... biết... cần... thảo... luận... thêm... về...
... thuật... tho... của... vật... liệu... và... công... nghệ... ứng... dụng...
... Nội... số... lời... chỉ... tá... và... giải... đáp... nên... ra... một... bài...
... Luận... văn... thảo... luận... giá... cao... về... chi... phí... không... phải... quên...
... công... nghệ... và... đặt... học... vị... thực... sự... về... các... chi... phí... và...

6. Phản biện 2, đọc bản nhận xét luận văn, đặt câu hỏi

Ng.S. TS. Trần Mạnh Tươi... đã... bản... nhận xét... luận văn của Học viên Nguyễn Thị Hương... theo... các... góp ý... chấp... nhận...
- Các... lỗi... chấp... nhận... và... cũng... thiết... lập... học... và... các... thuật... đơn... giản...
- Việc... tham... khảo... đúng... quy... định... Các... kết... quả... thu... được... các... luận... văn...
- Việc... đánh... giá... cao... và... có... câu... hỏi... để... trao... đổi... thảo... luận... về...
- Kết... quả... đánh... giá... các... bộ... sung... các... thông... tin... được... chấp... nhận... hợp... lý...
- Luận... văn... được... đánh... giá... cao... và... được... bảo... vệ... trước... hội... đồng...
và... được... nhận... học... vị... Thạc... sĩ... sau... khi... luận... văn... được... chấp...
nhận... với... các... góp... ý...

7. Các thành viên HĐ và những người tham dự nêu câu hỏi

- Lưu ý... để... sửa... đúng... tên... đã... tạo...
- Thảo... luận... qua... hệ... báo... cáo... báo... sung...
- Thống... nhất... nội... dung... đơn... vị... để... nâng... cấp... các... chất... hợp... lý...
- Bộ... sung... báo... cáo... đầy... đủ... và... format... các... lỗi... chấp... nhận... tạo...
liên... tham... khảo... đúng... quy... định...

8. Học viên trả lời

- Học... viên... trả... lời... đầy... đủ... các... câu... hỏi... của... hội...
đồng... báo... về... luận... văn...
- Học... viên... tiếp... thu... đầy... đủ... ý... kiến... của... hội... đồng... và...
chấp... nhận... hoặc... thiết... lập... luận... văn...

9. Hội đồng hợp kín và cho điểm

- Hội đồng bầu ban kiểm phiếu gồm 3 thành viên:

Trưởng ban: Ng.S. TS. Lưu Thế An
Ủy viên: TS. Nguyễn Thị Thu Trang
Ủy viên: TS. Đặng Thị Thơm

- Kết quả kiểm phiếu như sau:

Số phiếu phát ra: 5

Số phiếu thu về: 5

Tổng số điểm: 9,6

Điểm trung bình: Chín phẩy sáu

Điểm thưởng công trình công bố:

Tổng điểm đánh giá luận văn và thưởng công trình công bố:

- Kết luận của Hội đồng:

+ Luận văn *Đạt* (đạt/không đạt yêu cầu)

+ Luận văn không trùng lặp về nội dung và tên đề tài với các công bố trước đó

10. Chủ tịch Hội đồng, công bố kết quả, yêu cầu học viên chỉnh sửa luận văn với các nội dung sau:

... Luận văn được đánh giá cao về kết quả đạt được
... Cần chỉ định thêm các góp ý của Hội đồng
... Học viên được nhận học bổng Thạc sĩ sau khi luận văn được chấp thuận của Hội đồng
... Cần chỉ định thêm các góp ý của Hội đồng

Buổi họp đã kết thúc vào 11 giờ 30 phút ngày 23/6/2026

Hà Nội, ngày 23 tháng 6 năm 2026

THƯ KÝ HỘI ĐỒNG

[Signature]
Đặng Thị Thơm

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG

[Signature]
Nguyễn Thanh Hương

XÁC NHẬN CỦA CƠ SỞ ĐÀO TẠO

**KT. GIÁM ĐỐC
PHÓ GIÁM ĐỐC**



[Signature]
Nguyễn Thị Trung



CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT PHẢN BIỆN LUẬN VĂN THẠC SĨ

Họ và tên người phản biện: Lưu Thế Anh

Học hàm, học vị: PGS.TS.

Ngành: Địa lý Tài nguyên và Môi trường

Cơ quan công tác: Viện Tài nguyên và Môi trường, ĐHQGHN

Họ và tên học viên: Nguyễn Thị Phương Thảo

Tên đề tài: Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc

Ngành: Kỹ thuật Môi trường;

Mã số: 8.52.03.20

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cấp thiết, tính thời sự, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận văn:

Đề tài luận văn lựa chọn nghiên cứu xử lý đồng thời khí SO_2 và CO_2 bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc (Rotating Packed Bed - RPB) có tính cấp thiết, tính thời sự và phù hợp với xu thế hiện nay. Trong bối cảnh Việt Nam đã cam kết đạt phát thải ròng bằng “0” vào năm 2050, đồng thời các ngành công nghiệp phát thải lớn đang chịu áp lực ngày càng cao khi các quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về khí thải cũng như các rào cản môi trường quốc tế ngày càng được xiết chặt, việc nghiên cứu giải pháp công nghệ xử lý khí thải hiệu quả, tiết kiệm năng lượng và có khả năng tích hợp thu hồi khí nhà kính có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Ngành công nghiệp giấy là một trong những ngành tiêu thụ nhiều năng lượng và phát sinh đáng kể nước thải và các loại khí thải có nguy cơ gây ô nhiễm môi trường cao, trong đó SO_2 là khí gây ô nhiễm không khí cục bộ, CO_2 là tác nhân chính gây ra hiện tượng nóng lên toàn cầu. Việc nghiên cứu ứng dụng công nghệ RPB nhằm nâng cao hiệu quả hấp thụ và xử lý đồng thời các thành phần khí thải này có ý nghĩa khoa học trong việc làm rõ cơ chế truyền khối dưới điều kiện trọng lực cao và ý nghĩa thực tiễn trong việc phát triển công nghệ xử lý khí thải tiên tiến phục vụ chuyển đổi xanh và phát triển bền vững ngành công nghiệp giấy tại Việt Nam.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình khoa học, luận văn đã công bố ở trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo:

- Với nội dung tổng quan và hệ thống tài liệu tham khảo đã được sử dụng trong luận văn cho thấy, tác giả đã nghiên cứu, tổng hợp khá đầy đủ các công trình trong và ngoài nước liên quan đến công nghệ ly tâm tiếp xúc, công nghệ trọng lực cao (HiGee), các quá trình hấp thụ khí SO_2 , CO_2 và ứng dụng thiết bị RPB trong xử lý khí thải.

- Mặc dù trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu về thiết bị RPB trong xử lý khí ô nhiễm, song việc nghiên cứu xử lý đồng thời hỗn hợp khí SO_2 và CO_2 trong điều kiện thử nghiệm xử lý khí thải ngành giấy tại Việt Nam còn tương đối mới. Đề tài có sự kế thừa các kết quả nghiên cứu trước đây nhưng đã có hướng tiếp cận riêng thông qua việc đánh giá hiệu quả xử lý đồng thời, khảo sát các thông số vận hành và đề xuất cấu hình tích hợp giữa

tháp hấp thụ và thiết bị ly tâm tiếp xúc. Vì vậy, có thể nhận thấy đề tài không trùng lặp với các luận văn, luận án hoặc công trình nghiên cứu đã được công bố trước đó.

- Các tài liệu được tham khảo tương đối phong phú được công bố trong và ngoài nước. Các tài liệu này được trích dẫn khá đầy đủ trong nội dung luận văn, bảo đảm tính minh bạch và tuân thủ quy định về trích dẫn khoa học. Tuy nhiên, tài liệu tham khảo còn tập trung nhiều vào nghiên cứu công nghệ RPB, trong khi các nghiên cứu liên quan đến thu giữ, lưu trữ và sử dụng carbon (CCUS), Net-Zero và các công nghệ hấp thụ khí nhà kính thế hệ mới chưa được cập nhật đầy đủ.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung nghiên cứu cũng như với chuyên ngành và mã số đào tạo:

Các nội dung nghiên cứu phù hợp với tên đề tài luận văn và chuyên ngành đào tạo "Kỹ thuật môi trường", mã số: 8.52.03.20.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp nghiên cứu đã sử dụng để hoàn thành luận văn:

- Luận văn đã vận dụng kết hợp các phương pháp nghiên cứu tổng quan tài liệu, thiết kế và vận hành hệ thống thực nghiệm, phân tích khí thải, xử lý số liệu và đánh giá hiệu suất công nghệ. Các thí nghiệm được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm có kiểm soát các điều kiện vận hành, cho phép đánh giá tương đối chính xác ảnh hưởng của các thông số như tốc độ quay ly tâm, lưu lượng khí, lưu lượng dung dịch hấp thụ và cấu hình hệ thống xử lý.

- Việc sử dụng thiết bị RPB là hướng công nghệ hiện đại, đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trên thế giới trong các quá trình tăng cường truyền khối. Các số liệu thực nghiệm được lặp lại và xử lý thống kê cơ bản, góp phần nâng cao độ tin cậy của kết quả nghiên cứu.

- Tuy nhiên, nghiên cứu mới được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm, thời gian vận hành còn tương đối ngắn; chưa đánh giá đầy đủ tính ổn định lâu dài của hệ thống, hiệu quả kinh tế kỹ thuật cũng như khả năng mở rộng quy mô công nghiệp. Đây là những nội dung cần tiếp tục nghiên cứu ở bậc cao hơn hoặc các nghiên cứu tiếp theo.

5. Kết quả nghiên cứu của luận văn:

Luận văn đã hoàn thành các mục tiêu nghiên cứu đề ra và đạt được một số kết quả đáng ghi nhận, bao gồm:

- Đã tổng quan được cơ sở lý thuyết và các công trình nghiên cứu liên quan đến công nghệ RPB trong xử lý khí thải, chỉ rõ được các ưu điểm của công nghệ RPB so với các tháp hấp thụ truyền thống.

- Đã xây dựng được hệ thống thực nghiệm xử lý khí thải bằng thiết bị RPB và thực hiện thành công các thí nghiệm đánh giá khả năng xử lý khí SO₂ và CO₂.

- Đã chứng minh hiệu quả xử lý khí thải của hệ thống RPB và xác định được ảnh hưởng của các thông số vận hành quan trọng đến hiệu suất xử lý. Kết quả cho thấy, thiết bị RPB có khả năng nâng cao đáng kể hiệu quả truyền khối và hiệu suất hấp thụ so với thiết bị hấp thụ thông thường.

- Đã đề xuất được cấu hình tích hợp giữa tháp hấp thụ và thiết bị RPB, đồng thời xác định được các điều kiện vận hành phù hợp để xử lý đồng thời SO₂ và CO₂. Đây là cơ sở khoa học quan trọng cho việc nghiên cứu mở rộng quy mô trong tương lai.

- Đã tạo lập được bộ dữ liệu thực nghiệm có giá trị về quá trình hấp thụ khí đa cấu tử trong điều kiện trọng lực cao và góp phần khẳng định tính khả thi của công nghệ RPB trong xử lý khí thải ngành giấy.

6. Những hạn chế, thiếu sót của luận văn về nội dung và hình thức:

Bên cạnh những kết quả đạt được, luận văn còn một số hạn chế cần được tiếp tục rà soát để hoàn thiện:

- Phần tổng quan quốc tế cần cập nhật thêm một số nghiên cứu mới trong giai đoạn 2023-2025 về CCUS và ứng dụng công nghệ HiGee trong xử lý khí nhà kính.

- Đối tượng nghiên cứu chủ yếu là khí SO₂ và CO₂ mô phỏng, chưa đánh giá ảnh hưởng của các thành phần khí thải phức tạp khác thường có trong khí thải công nghiệp.

- Chưa thực hiện phân tích chi phí - lợi ích hoặc đánh giá hiệu quả kinh tế của công nghệ so với các giải pháp xử lý hiện hành.

- Chưa đánh giá đầy đủ khả năng tái sinh dung dịch hấp thụ, tuổi thọ vật liệu đệm và tính ổn định vận hành lâu dài của hệ thống.

- Một số bảng biểu, hình vẽ và cách trình bày kết quả còn có thể được chuẩn hóa hơn để tăng tính trực quan và khả năng so sánh.

- Quy mô nghiên cứu mới dừng ở quy mô phòng thí nghiệm, chưa có đánh giá ở quy mô pilot hoặc quy mô thực tế. Vì vậy, có thể đưa vào kiến nghị của luận văn để tiếp tục nghiên cứu trong các công trình tiếp theo hoặc ở bậc cao hơn (tiền sĩ).

7. Nếu tác giả chưa viết bài báo khoa học thì nội dung của luận văn có thể được viết thành các bài báo để gửi đăng trên tạp chí khoa học, sách chuyên ngành hoặc tuyển tập công trình hội nghị khoa học cấp quốc gia, quốc tế hay không?

Nội dung của luận văn đã công bố trong bài báo trên tạp chí quốc tế Environmental Quality Management, thuộc danh mục Scopus, Q3.

8. Kết luận chung (khẳng định mức độ đáp ứng các yêu cầu đối với một luận văn Thạc sĩ; luận văn có thể đưa ra bảo vệ để nhận học vị Thạc sĩ được hay không?):

- Luận văn là một công trình nghiên cứu nghiêm túc, có bố cục hợp lý, phương pháp nghiên cứu phù hợp và đạt được các mục tiêu đề ra. Đề tài luận văn có tính mới, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn trong xử lý khí thải công nghiệp, nhất là trong xu hướng chuyển đổi xanh và thực hiện các cam kết Net Zero của Việt Nam vào năm 2050.

- Các kết quả nghiên cứu đã góp phần bổ sung cơ sở dữ liệu khoa học về ứng dụng thiết bị RPB trong xử lý đồng thời SO₂ và CO₂, đồng thời cung cấp những luận cứ ban đầu cho việc phát triển và ứng dụng công nghệ này vào thực tiễn.

- Mặc dù vẫn còn một số hạn chế nhất định, song những hạn chế này không ảnh hưởng đến chất lượng và giá trị khoa học của luận văn. Luận văn cơ bản đáp ứng các yêu cầu đối với một luận văn Thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật môi trường.

- Đề nghị Hội đồng cho phép học viên bảo vệ luận văn để nhận học vị Thạc sĩ Kỹ thuật môi trường theo quy định hiện hành.

Hà Nội, ngày 22 tháng 06 năm 2026

Người phản biện

(Ký, ghi rõ họ tên)



Lưu Thế Anh

BẢN NHẬN XÉT PHẢN BIỆN LUẬN VĂN THẠC SĨ

Họ và tên người phản biện: **Trần Mạnh Trí**

Học hàm, học vị: PGS.TS.

Chuyên ngành: Hóa môi trường

Cơ quan công tác: Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

Họ và tên học viên: **Nguyễn Thị Phương Thảo**

Tên đề tài: ***“Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc”***

Ngành: Kỹ thuật môi trường; Mã số: 8520320

NỘI DUNG NHẬN XÉT

1. Tính cấp thiết, tính thời sự, ý nghĩa khoa học, thực tiễn của đề tài luận văn:

Trong bối cảnh công nghiệp hóa và đô thị hóa, ô nhiễm môi trường không khí phát sinh từ các hoạt động sản xuất công nghiệp đang trở thành một thách thức mang tính toàn cầu. Các hợp chất khí như carbon dioxide (CO_2 : tác nhân chính gây hiệu ứng nhà kính và biến đổi khí hậu), lưu huỳnh dioxide (SO_2), cùng các nitrogen oxide (NO_2 : nguyên nhân trực tiếp dẫn đến hiện tượng mưa acid và khói quang hóa) liên tục gia tăng về khối lượng phát thải. Thực trạng này đặt ra yêu cầu cấp bách về việc tuân thủ các quy chuẩn môi trường nghiêm ngặt, đồng thời hiện thực hóa cam kết giảm phát thải ròng bằng 0 (Net Zero).

Hiện nay, các công nghệ xử lý khí thải truyền thống như tháp đệm hay tháp phun thông thường đang bộc lộ nhiều hạn chế về mặt kỹ thuật như kích thước thiết bị cồng kềnh, chi phí đầu tư mặt bằng lớn, hiệu suất truyền khối bị giới hạn bởi vận tốc khí và dễ xảy ra hiện tượng ngập lụt tháp. Do đó, việc nghiên cứu phát triển và ứng dụng các giải pháp công nghệ tăng cường quá trình, điển hình là thiết bị ly tâm tiếp xúc khối nhằm thu nhỏ kích thước hệ thống và tối ưu hóa hiệu suất xử lý, mang tính thời sự sâu sắc và là xu thế tất yếu trong kỹ thuật môi trường hiện đại.

Việc lựa chọn thực hiện đề tài luận văn thạc sĩ “Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc” của học viên cao học Nguyễn Thị Phương Thảo mang lại nhiều ý nghĩa khoa học và thực tiễn. Đề tài đóng góp những luận cứ khoa học quan trọng trong lĩnh vực kỹ thuật hóa học và kiểm soát ô nhiễm không khí. Kết quả của luận văn thạc sĩ mang lại giải pháp công nghệ có tính ứng dụng cao và khả thi về mặt kinh tế - kỹ thuật.

2. Sự không trùng lặp của đề tài nghiên cứu so với các công trình khoa học, luận văn đã công bố trong và ngoài nước; tính trung thực, rõ ràng và đầy đủ trong trích dẫn tài liệu tham khảo:

Theo hiểu biết chủ quan của người phản biện, tên đề tài và nội dung nghiên cứu được trình bày trong luận văn thạc sĩ của học viên cao học Nguyễn Thị Phương Thảo không trùng lặp với các công trình khoa học, luận văn, luận án nào đã công bố trước đó. Luận văn đã trích dẫn 80 tài liệu tham khảo cập nhật đến năm 2026. Ngoài ra, luận văn cung cấp bổ sung các bảng giá trị thực nghiệm trong phần phụ lục.

3. Sự phù hợp giữa tên đề tài với nội dung nghiên cứu cũng như với chuyên ngành và mã số đào tạo

Nội dung nghiên cứu được trình bày trong luận văn phù hợp với tên của đề tài. Nội dung và phương pháp nghiên cứu của luận văn phù hợp với ngành kỹ thuật môi trường, mã số: 8520320.

4. Độ tin cậy và tính hiện đại của phương pháp nghiên cứu đã sử dụng để hoàn thành luận văn

Nghiên cứu đã sử dụng nhiều phương pháp hiện đại như phương pháp thống kê, phân tích, thực nghiệm, tính toán và xử lý số liệu..., vì vậy các số liệu kết quả thu được và báo cáo trong luận văn là đáng tin cậy.

5. Kết quả nghiên cứu của luận văn

1) Nghiên cứu đã khảo sát, lựa chọn điều kiện phù hợp để xử lý CO_2 và SO_2 trong khí thải bằng cách sử dụng tháp đệm quy mô bán thí điểm với một thiết bị ly tâm không tiếp xúc (PC-HP2R). Điều kiện tối ưu ($Q_G = 25$ L/phút; $Q_{L1} = Q_{L2} = 0,35$ L/phút; $\omega = 500$ vòng/phút), hệ thống đạt hiệu quả xử lý tốt và thời gian ổn định trong quá trình làm việc.

2) Nghiên cứu đã bước đầu đánh giá tiềm năng ứng dụng thiết bị HP2R trong việc xử lý một số thành phần ô nhiễm như SO_x , NO_x trong khí thải.

6. Những hạn chế, thiết sót của luận văn về nội dung và hình thức:

** Về mặt hình thức:*

- + Bản luận văn vẫn còn một số lỗi chính tả, soạn thảo văn bản và in ấn cần chỉnh sửa trước khi nộp lưu chiểu.
- + Cần thống nhất cách viết tên các hóa chất, cách dùng các thuật ngữ khoa học, chẳng hạn như sử dụng các thuật ngữ, tên các hóa chất theo tiếng Anh hay tiếng Việt.
- + Cần trích dẫn nguồn tài liệu tham khảo một số hình: Hình 1.1, Hình 1.3, Hình 1.6, Hình 2.2, Hình 2.3.
- + Cần chỉnh lại các bảng, hình cho dễ theo dõi.
- + Cần thống nhất cách viết các tài liệu tham khảo.

** Về mặt nội dung:*

- + Bổ sung giá trị đơn vị vào các bảng: Bảng 1.2, Bảng 1.3, Bảng 3.1.
- + Phần kết luận cần phải viết cô đọng, rõ ràng hơn và phù hợp với mục tiêu đề ra ban đầu của luận văn.

7. Khả năng công bố kết quả của luận văn

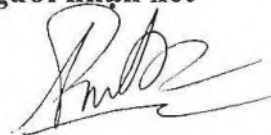
Các kết quả nghiên cứu của luận văn đã được công bố trên tạp chí Environmental Quality Management (thuộc danh mục Scopus, Q3).

8. Kết luận chung

Nội dung và hình thức trình bày của luận văn của học viên Nguyễn Thị Phương Thảo phù hợp của một luận văn thạc sĩ, ngành kỹ thuật môi trường, mã số: 8 52 03 20. Tôi đề nghị Hội đồng chấm luận văn thạc sĩ thông qua bản luận văn này với yêu cầu tác giả cần chỉnh sửa luận văn đầy đủ theo các góp ý của người phản biện và các thành viên khác trong Hội đồng. Học viên Nguyễn Thị Phương Thảo xứng đáng nhận học vị thạc sĩ khoa học.

Hà Nội, ngày 22 tháng 6 năm 2026

Người nhận xét



PGS.TS. TRẦN MẠNH TRÍ



		sử dụng dung dịch kiềm để hấp thụ (NaOH). Ở môi trường này, SUS 304 trơ hóa tốt, sợi thép 0,1mm giữ được độ bền cơ học, không bị rỉ sét. Tuổi thọ của vật liệu đệm trong trường hợp này có thể đạt từ 3-5 năm.
2	Các lỗi chính tả và công thức hóa học và các trích dẫn tài liệu tham khảo cần trình bày đúng quy định	Học viên xin tiếp thu ý kiến. Học viên đã rà soát và chỉnh sửa các lỗi chính tả, công thức hóa học và trích dẫn tài liệu tham khảo trong toàn bộ luận văn.
3	Chỉnh sửa đúng tên đề tài	Học viên xin tiếp thu ý kiến. Học viên đã chỉnh sửa và thống nhất tên đề tài <i>“Nghiên cứu xử lý một số thành phần khí thải bằng thiết bị ly tâm tiếp xúc”</i>
4	Phần tổng quan nên bố cục bổ sung	Học viên xin tiếp thu ý kiến. Học viên đã sửa lại phần tổng quan tại chương I của báo cáo (trang 5 – 21), bao gồm 3 nội dung chính: 1.1. Tổng quan tình hình phát sinh khí thải ngành sản xuất giấy 1.2. Tổng quan về phương pháp xử lý khí thải bằng phương pháp hấp thụ 1.3. Tổng quan quá trình ly tâm tiếp xúc trong xử lý khí thải
5	Thống nhất sử dụng đơn vị đo nồng độ các chất hợp lý	Học viên xin tiếp thu ý kiến. - Học viên đã thống nhất đơn vị đo đối với nồng độ khí CO ₂ là % do CO ₂ là một khí chiếm tỷ trọng tương đối lớn trong khí quyển cũng như trong các dòng khí thải công nghiệp, nếu sử dụng ppm để đo CO ₂ trong khí thải, con số hiển thị sẽ lên tới 50.000 ppm đến 150.000 ppm, do đó đơn vị % là lựa chọn tối ưu và trực quan để đo thành phần CO ₂ . - Đối với khí SO ₂ : Thực tế, trong khí thải sau xử lý hàm lượng SO ₂ không quá lớn như CO ₂ , dao động trong khoảng 10 ppm – 500 ppm. Do đó, học viên sử dụng đơn vị đo SO ₂ là ppm để đơn giản hóa việc hiển thị dữ liệu.

6	Bổ sung bài báo đầy đủ và format các lỗi chính tả, tài liệu tham khảo đúng quy định	Học viên xin tiếp thu ý kiến. Học viên đã bổ sung bài báo vào phần cuối của luận văn. Học viên đã rà soát và chỉnh sửa toàn bộ các lỗi văn bản và tài liệu tham khảo theo đúng quy định.
7	Trong các hình, bảng cần trích dẫn nguồn tài liệu tham khảo	Học viên xin tiếp thu ý kiến. Học viên đã bổ sung trích dẫn nguồn tài liệu tham khảo trong toàn bộ báo cáo.
8	Cấu trúc lại tính mới của luận văn, sửa lại mục tiêu, điều chỉnh các nội dung nghiên cứu cho phù hợp	Học viên xin tiếp thu ý kiến. Học viên đã chỉnh sửa tại Phần Mở đầu của báo cáo (trang 2 – 4).

Hà Nội, ngày 26 tháng 6 năm 2026

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG

GIẢNG VIÊN HƯỚNG DẪN

HỌC VIÊN

GS.TS. Nguyễn Thị Huệ

GS.TS. Trịnh Văn Tuyền

Nguyễn Thị Phương Thảo

XÁC NHẬN CỦA CƠ SỞ ĐÀO TẠO



KT. GIÁM ĐỐC
PHÓ GIÁM ĐỐC

Nguyễn Thị Trung



