

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

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

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



TRỊNH MINH VIỆT

**NGHIÊN CỨU XỬ LÝ AMONI NỒNG ĐỘ CAO TRONG NƯỚC
THẢI BẰNG THIẾT BỊ LI TÂM HIỆU NĂNG CAO HP2R
(HIGH-PERFORMANCE ROTATING REACTOR)**

Chuyên ngành: **Kỹ thuật môi trường**

Mã số: **9 52 03 20**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT MÔI TRƯỜNG

Hà Nội – 2025

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ -
Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS. Đỗ Văn Mạnh

Người hướng dẫn khoa học 2: TS. Ngô Thanh Long

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ, họp tại
Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công
nghệ Việt Nam vào hồi ... giờ ..', ngày ... tháng ... năm 202....

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Amoni là chất ô nhiễm phổ biến và khó xử lý trong nước thải từ công nghiệp, nông nghiệp và xử lý chất thải rắn, đặc biệt ở nước thải chăn nuôi và nước rỉ rác bãi chôn lấp. Nhiều công nghệ đã được nghiên cứu và áp dụng như sinh học, keo tụ hóa học, hấp phụ, trao đổi ion, màng lọc và stripping. Tuy nhiên, đa số chỉ hiệu quả khi nồng độ amoni < 200 mg/L. Ở nồng độ cao, hiệu suất xử lý, khả năng vận hành và tính kinh tế đều giảm mạnh. Quá trình sinh học bị ảnh hưởng do mất cân bằng C/N, gây ức chế vi sinh vật. Hấp phụ và trao đổi ion đòi hỏi thay vật liệu thường xuyên, làm tăng chi phí. Keo tụ hóa học tiêu tốn nhiều hóa chất, phát sinh bùn thứ cấp. Màng lọc yêu cầu hệ module lớn, chi phí cao và gặp khó khăn xử lý dòng cô đặc. Stripping, dựa trên việc tách NH_3 bằng điều chỉnh pH và nhiệt độ, phù hợp hơn với nước thải giàu amoni. Tuy nhiên, để đạt hiệu suất cao ở công suất lớn, thiết bị truyền thống cần kích thước lớn hoặc nhiều tháp song song, làm tăng chi phí và chiếm diện tích.

Nguyên lý lực ly tâm cường độ cao (HiGee) đã được ứng dụng để tăng tốc độ truyền khối, giảm thể tích thiết bị, rút ngắn thời gian lưu và nâng cao hiệu quả xử lý. Thiết bị HiGee là giải pháp thay thế tiềm năng cho tháp stripping truyền thống, khắc phục hạn chế về kích thước, chi phí và hiệu suất. Nghiên cứu này đánh giá quá trình stripping amoni bằng thiết bị phản ứng hiệu năng cao dạng quay (High Performance Rotating Reactor – HP2R), ứng dụng nguyên lý HiGee, đối với ba loại nước thải: mô phỏng, chăn nuôi và nước rỉ rác. Các thí nghiệm tập trung khảo sát ảnh hưởng của tốc độ ly tâm, lưu lượng khí (Q_G), lưu lượng nước (Q_L), pH và nhiệt độ, đồng thời tính toán hệ số

truyền khối (K_{La}) và hiệu suất stripping (η) để xây dựng mô hình dự đoán. Nghiên cứu cũng đánh giá khả năng thu hồi NH_3-N sau stripping, hướng tới phát triển quy trình xử lý – thu hồi theo định hướng kinh tế tuần hoàn và bền vững.

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

- Khảo sát và đánh giá một số yếu tố ảnh hưởng tới quá trình stripping và thu hồi NH_3-N nồng độ cao từ nước thải sử dụng thiết bị HP2R.
- Chuẩn hóa được điều kiện vận hành thiết bị HP2R trong xử lý và thu hồi amoni nồng độ cao từ nước thải. Đề xuất hệ thống công nghệ đề ứng dụng trong xử lý nước thải và thu hồi vật chất theo hướng kinh tế tuần hoàn.

3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án

- Khảo sát các yếu tố ảnh hưởng của quá trình stripping amoni bằng thiết bị HP2R từ nước thải mô phỏng, nước thải chăn nuôi và nước rỉ rác.
- Tính toán hiệu suất stripping, hệ số chuyển khối tổng quát pha lỏng và tính toán mô hình dự đoán hiệu quả stripping amoni bằng thiết bị HP2R.
- Thử nghiệm xử lý kết hợp thu hồi amoni từ nước thải mô phỏng và nước rỉ rác bằng thiết bị HP2R.
- Tính toán hiệu suất stripping, hiệu suất thu hồi amoni và mô hình động học của quá trình xử lý kết hợp thu hồi amoni từ nước thải mô phỏng và nước rỉ rác bằng thiết bị HP2R
- Tính toán sơ bộ hiệu quả kinh tế - kỹ thuật và đề xuất mô hình ứng dụng của nguyên lý tiếp xúc ly tâm trong xử lý và thu hồi amoni trong nước thải ở quy mô thực tế

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1. Tổng quan về amoni trong nước thải

1.1.1. Tổng quan về amoni/amoniac

Tổng quan về amoni/amoniac ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$), vai trò và đặc tính hóa – lý, cũng như sự phân bố trong chu trình sinh địa hóa nitơ. Nội dung cũng trình bày các yếu tố ảnh hưởng đến cân bằng $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$, tác động của chúng đến môi trường và sức khỏe.

1.1.2. Amoni trong nước thải

Khái quát đặc tính, vai trò và cơ chế cân bằng $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ trong môi trường nước; các yếu tố ảnh hưởng và tác động tới sinh thái, sức khỏe. Đồng thời, trình bày tính chất ô nhiễm amoni trong nước thải từ nông nghiệp và bãi chôn lấp.

1.1.3. Tác hại của amoni trong môi trường nước

NH_4^+ gây tác động tiêu cực tới hệ thủy sinh, sức khỏe con người và chất lượng nguồn nước thông qua độc tính trực tiếp, hiện tượng phú dưỡng và nguy cơ hình thành nitrosamine gây ung thư.

1.2. Các công nghệ xử lý amoni trong nước thải

1.2.1. Xử lý sinh học

Ưu điểm của các phương pháp sinh học là chi phí xử lý thấp do chủ yếu dựa vào khả năng phân huỷ của các vi sinh vật. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp này là thời gian nuôi cấy dài, thời gian lưu đáng kể, và nhạy cảm với sự thay đổi của nhiệt độ, nồng độ chất thải đầu vào và tỉ lệ C/N trong nước thải.

1.2.2. Kết tủa hoá học

Kết tủa struvite có hiệu suất xử lý NH_4^+ cao, diễn ra nhanh, ổn định và cho phép thu hồi N, P dưới dạng phân bón nhả chậm. Phương pháp hoạt động tốt ở pH trung tính–kiềm nhẹ, ít bị ảnh hưởng bởi MgO dư nhưng phụ thuộc nhiều vào tỉ lệ mol N:P và nồng độ PO_4^{3-} trong nước thải. Sự hiện diện của Ca^{2+} hoặc thiếu P làm giảm đáng kể hiệu quả.

1.2.3. Trao đổi ion

Trao đổi ion có thể xử lý hiệu quả nhiều mức nồng độ amoni nhưng chi phí vận hành cao do cần tái sinh vật liệu và dễ xảy ra giải hấp khi nồng độ đầu vào giảm. Công nghệ này phù hợp khi dùng vật liệu giá rẻ cho xử lý bậc 3, nhằm ổn định hiệu quả và hạn chế ảnh hưởng của cation cạnh tranh.

1.2.4. Hấp phụ

Hấp có chi phí thấp, vận hành đơn giản, không tạo ô nhiễm thứ cấp và có thể sử dụng nhiều loại vật liệu như than hoạt tính, zeolit hay vật liệu nano để đạt hiệu quả cao. Tuy nhiên, hiệu suất có thể giảm do ion cạnh tranh, chất hữu cơ, đồng thời việc tái sinh gây tốn kém và tạo dòng thải thứ cấp.

1.2.5. Màng lọc

Màng lọc cho phép loại bỏ $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ với hiệu suất rất cao, thời gian xử lý ngắn, không tạo ô nhiễm thứ cấp, vận hành ở áp suất thấp và xử lý được dải nồng độ rộng. Tuy nhiên, nhược điểm chính là chi phí đầu tư và bảo trì cao, tuổi thọ không ổn định và dễ bị tắc nghẽn.

1.2.6. Stripping

Phương pháp stripping có ưu điểm nổi bật là hiệu suất loại bỏ $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ cao (lên tới 98%), vận hành ổn định, dễ kiểm soát và không phụ thuộc nhiều vào quá trình sinh học. Tuy nhiên, quá trình này yêu cầu pH cao, nhiệt độ thích hợp và tỉ lệ Q_G/Q_L tối ưu, dẫn đến tiêu tốn năng lượng và nguy cơ tắc nghẽn cột khi lưu lượng khí lớn.

1.2.7. So sánh các phương pháp xử lý amoni trong nước thải

Ở nồng độ cao, các công nghệ sinh học, hấp phụ, trao đổi ion, keo tụ và màng lọc đều gặp hạn chế về hiệu quả, chi phí và vận hành. Ngược lại, stripping không phụ thuộc nồng độ amoni đầu vào mà phụ thuộc vào điều kiện thủy động lực và vật lý, nên thường được dùng để tiền xử lý amoni cao trước khi áp dụng các công nghệ khác.

1.3. Xu hướng xử lý nước thải kết hợp thu hồi tài nguyên

1.3.1. Xu hướng thu hồi amoni từ nước thải

Nhu cầu amoniac toàn cầu tăng mạnh do sản xuất phân bón phục vụ an ninh lương thực, chủ yếu dựa vào quy trình Haber–Bosch, nhưng quy trình này tiêu tốn 1–2% năng lượng toàn cầu và phát thải nhiều khí nhà kính, gây mất cân bằng chu trình nitơ. Trong nước thải, amoni từ phân bón và chất thải sinh hoạt gây phú dưỡng và làm tăng chi phí xử lý sinh học. Xu hướng hiện nay chuyển từ “loại bỏ” sang “thu hồi” dinh dưỡng, tận dụng amoni và các hợp chất nitơ trong nước thải để tái sản xuất phân bón theo hướng kinh tế tuần hoàn và bền vững.

1.3.2. Khả năng thu hồi amoni từ nước thải bằng phương pháp stripping

Kỹ thuật stripping – hấp thụ có thể thu hồi trên 90% amoni từ nước thải nồng độ cao (>1000 mg/L) bằng cách chuyển NH_4^+ sang NH_3 ở pH kiềm và hấp thụ thành muối amoni sunphat, vừa xử lý vừa tạo sản phẩm phân bón có giá trị kinh tế..

1.3.3. Nhược điểm của sử dụng tháp stripping truyền thống

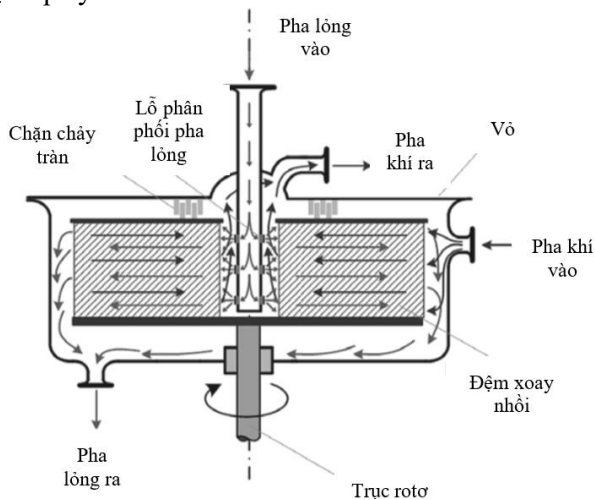
Tháp stripping có lớp đệm lớn để tăng diện tích và thời gian tiếp xúc pha khí – lỏng, giúp nâng cao hiệu quả tách NH_3 nhưng đòi hỏi kích thước thiết bị lớn và chi phí đầu tư cao. Do đó, cần tìm giải pháp cải tiến hoặc thay thế thiết bị nhằm khắc phục hạn chế này trong xử lý và thu hồi amoni nồng độ cao.

1.4. Tổng quan về kỹ thuật tiếp xúc ly tâm và các ứng dụng để tăng cường truyền khối trong thực tiễn

1.4.1. Lịch sử hình thành và nguyên lý của kỹ thuật tiếp xúc ly tâm

Động lực thúc đẩy khắc phục nhược điểm của tháp hấp thụ hay tháp stripping truyền thống đã dẫn tới những nghiên cứu tiếp cận khai thác trường trọng lực cao để tăng cường quá trình truyền khối khí – lỏng. Sự khả thi của nguyên lý tiếp xúc ly tâm được chứng minh khi

Ramshaw và Mallinson lần đầu đăng ký sáng chế cho hệ thiết bị tiếp xúc có đệm quay vào năm 1981.



Hình 1.1. Cơ chế hoạt động của thiết bị RPB

1.4.2. Đặc tính thủy lực của quá trình chuyển khối tiếp xúc ly tâm

Một số đặc tính thủy lực của quá trình chuyển khối trong thiết bị HiGee cần xét tới gồm có: Tổn thất áp suất, Cấu hình chảy của chất lỏng, Độ lưu chất lỏng, Thời gian lưu thủy lực, Điểm ngập.

1.4.3. Một số ứng dụng của thiết bị tiếp xúc ly tâm

a, *Ứng dụng trong nghiên cứu:* stripping amoni, VOCs, ethanol và ClO_2 ; hấp thụ CO_2 và VOCs từ khí thải.

b, *Ứng dụng trong công nghiệp:* Khử khí trong nước biển, Stripping phản ứng axit hypochlorous, Xử lý SO_2 , Hấp thụ chọn lọc H_2S , Khử khí trong nước trong sản xuất nước giải khát đóng chai, Tách hỗn hợp trong chưng cất.

1.5. Tổng quan về sự cần thiết của nghiên cứu ứng dụng công nghệ ly tâm trong xử lý nước thải giàu amoni tại Việt Nam

1.5.1. Tình hình nghiên cứu và ứng dụng công nghệ trong xử lý amoni tại Việt Nam

Tại Việt Nam, xử lý amoni nồng độ cao trong nước thải (như nước rỉ rác, nước thải chăn nuôi) thường ưu stripping do các phương pháp sinh học hay hấp phụ kém hiệu quả ở điều kiện này. Stripping được áp dụng rộng rãi để tiền xử lý amoni nhờ hiệu quả cao và ít dùng hóa chất, song quy mô thiết bị lớn, chi phí đầu tư cao và nguy cơ phát thải NH_3 ra môi trường vẫn còn là thách thức.

1.5.2. Tình hình nghiên cứu trong nước về kỹ thuật tiếp xúc ly tâm

Công nghệ tiếp xúc ly tâm hiện vẫn còn là chủ đề mới, hầu như chưa có nghiên cứu nào tiếp cận tới công nghệ này. Viện Khoa học công nghệ Năng lượng và Môi trường) đã bước đầu tiếp cận công nghệ này và đã có kinh nghiệm ứng dụng nhất định vào tăng cường quá trình, cụ thể là kỹ thuật tiếp xúc ly tâm trong các công đoạn làm sạch khí biogas và xử lý amoni trong nước thải.

1.5.3. Sự cần thiết phải triển khai nghiên cứu

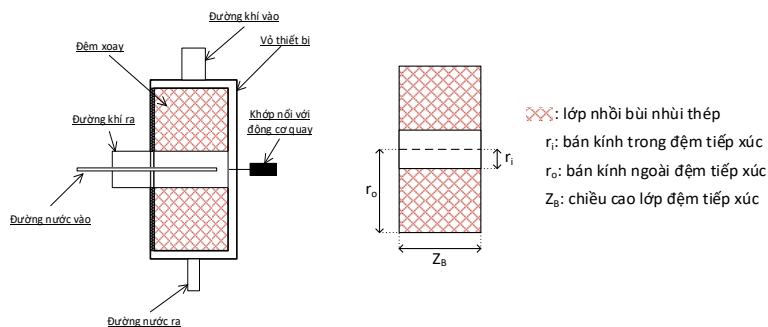
Từ những ưu điểm trong ứng dụng xử lý nước thải của nguyên lý HiGee thông qua nghiên cứu ở các quốc gia phát triển, cũng như các khó khăn và tồn tại trong việc xử lý amoni nồng độ cao trong nước thải rỉ rác tại nước ta, việc thử nghiệm ứng dụng thiết bị HP2R cho quá trình stripping amoni thay thế cho thiết bị cột nhồi truyền thống không những giúp khắc phục các nhược điểm khi sử dụng tháp stripping như giảm tải, thu nhỏ kích thước thiết bị, rút gọn thời gian lưu, tăng công suất xử lý, giảm chi phí đầu tư thiết bị, mà còn là nghiên cứu tiền đề cho việc nghiên cứu ứng dụng thiết bị HP2R nói chung và để xử lý amoni và các chất thải hoá hơi khác trong nước thải.

CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

2.1.1. Thiết bị HP2R

Đối tượng chính của nghiên cứu này là thiết bị tiếp xúc ly tâm hiệu năng cao HP2R (High-performance rotating reactor) của Viện Khoa học công nghệ Năng lượng và Môi trường



Hình 2.1. Cấu tạo của thiết bị HP2R

2.1.2. Nước thải

a, Nước thải giả lập: Nước thải chứa amoni được mô phỏng từ NH_4Cl và nước cất khử ion để đạt nồng độ cố định $1000 \pm 50 \text{ mg/L}$.

b, Nước thải chăn nuôi lợn: Nước thải chăn nuôi được thu thập từ một trang trại lợn hộ gia đình tại xã Vĩnh Tường, tỉnh Vĩnh Phúc.

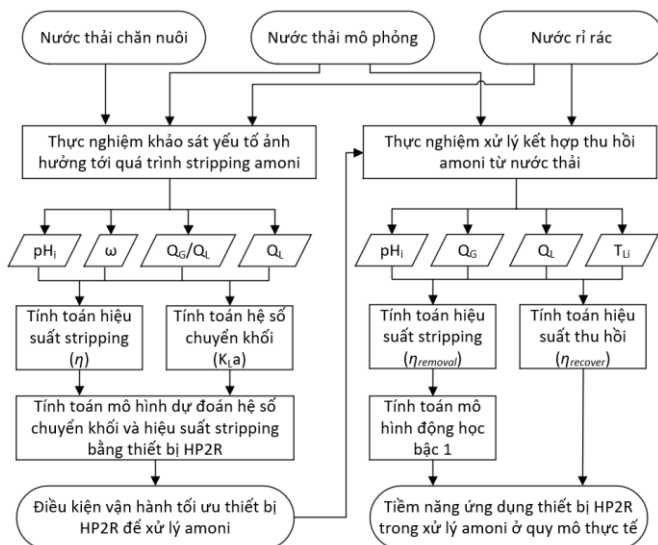
c, Nước thải rỉ rác: Nước rỉ rác tại Bãi chôn lấp rác Nam Sơn

2.1.3. Hóa chất, thiết bị: Các hóa chất, thiết bị, máy móc phù hợp cho nghiên cứu tại phòng thí nghiệm của Viện Khoa học công nghệ Năng lượng và Môi trường.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp thực nghiệm

Sơ đồ thể hiện chi tiết các bước thực hiện trong nghiên cứu này được mô tả trong Hình 2.2.



Hình 2.2. Sơ đồ khối trình tự nghiên cứu xử lý amoni nồng độ cao bằng thiết bị HP2R

2.2.2. Phương pháp phân tích

• **Nồng độ $\text{NH}_3\text{-N}$:** phương pháp điện cực ion chọn lọc amoniac (TCVN 7872:2008)

• **Độ pH:** đo bằng điện cực HI1131B (Hanna, USA)

• **Nhiệt độ:** đo bằng đầu dò nhiệt độ HI 7662-T (Hanna, USA)

2.2.3. Phương pháp tính toán

Các phương pháp tính toán phù hợp để xác định: Hiệu suất stripping (η), Hệ số chuyển khối tổng quát pha lỏng ($K_L a$), hiệu suất thu hồi amoni (η_{recover}),...

2.2.4. Phương pháp xử lý số liệu

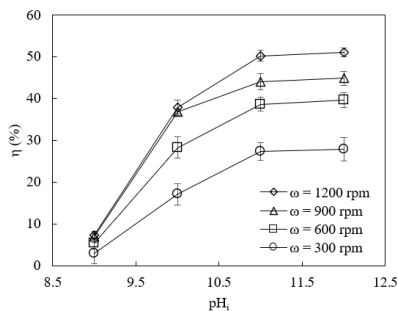
Các kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu được thực hiện lặp lại 03 lần ($n = 3$). Số liệu thực nghiệm được xử lý bằng các hàm trong phần mềm Microsoft Excel.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

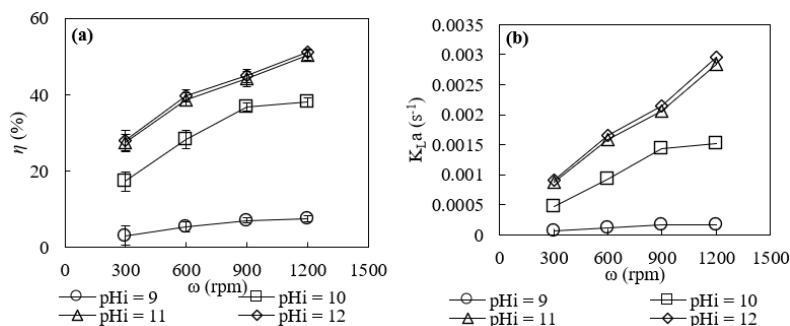
3.1. Kết quả khảo sát các yếu tố ảnh hưởng tới quá trình stripping amoni bằng thiết bị HP2R từ nước thải

3.1.1. Kết quả khảo sát stripping amoni bằng thiết bị HP2R với nước thải mô phỏng

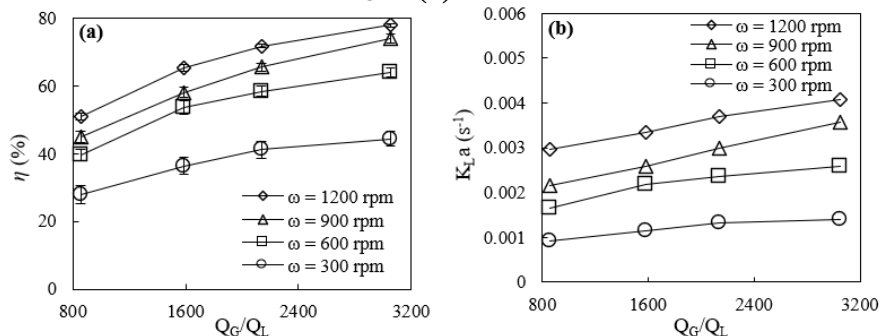
Kết quả thí nghiệm đã thể hiện hiệu quả stripping $\text{NH}_3\text{-N}$ từ nước thải mô phỏng. Kết quả cho thấy pH trên 10 giúp tăng đáng kể hiệu suất loại bỏ amoni. Tăng tốc độ quay ($\omega = 900 - 1200$) và tỷ lệ lưu lượng khí/lỏng tăng đều làm cải thiện hiệu suất, trong đó tốc độ quay cao còn nâng mạnh hệ số chuyển khối thể tích tổng (K_{La}) và giảm chiều cao đơn vị truyền khối (HTU_{OL}). Thí nghiệm theo chu kỳ cho thấy thêm một chu kỳ stripping giúp nâng tổng hiệu suất lên 83,0–92,69% (tương ứng giảm nồng độ $\text{NH}_3\text{-N}$ từ 1000 ppm xuống 162–73,1 ppm) khi pH_i từ 10–12. Kết quả chứng minh HP2R là giải pháp tiềm năng cho xử lý hóa lý sơ cấp trước công đoạn xử lý sinh học. Trong thí nghiệm tiếp theo với nước thải chăn nuôi, tốc độ Q_G/Q_L sẽ được lựa chọn ở dải cao hơn, độ pH lược bỏ mức $\text{pH}_i = 9$, giữ nguyên dải ω từ 300 – 1200 và bổ sung khảo sát ảnh hưởng của lưu lượng nước thải.



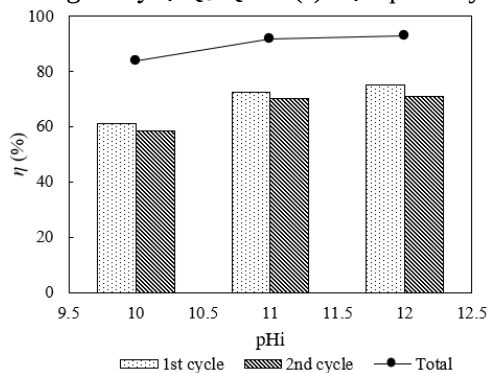
Hình 3.1. Ảnh hưởng của pH đến hiệu quả xử lý NH_3 tại $Q_G/Q_L = 855$



Hình 3.2. Ảnh hưởng của tốc độ vòng quay đến (a) hiệu quả xử lý NH_3 và (b) K_{La}



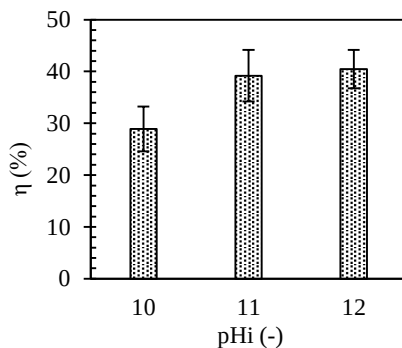
Hình 3.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ Q_G/Q_L tới (a) hiệu quả xử lý NH_3 và (b) K_{La}



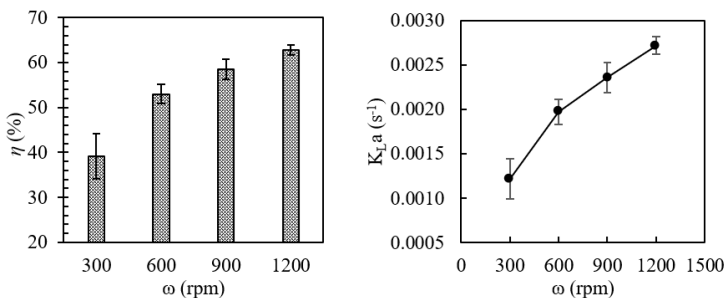
Hình 3.4. Kết quả stripping amoni theo chu kỳ $Q_G/Q_L = 3054$, $\omega = 900$ rpm, và $C_{Li} = 1000$ mg/L

3.1.2. Kết quả khảo sát stripping amoni bằng thiết bị HP2R với nước thải chăn nuôi

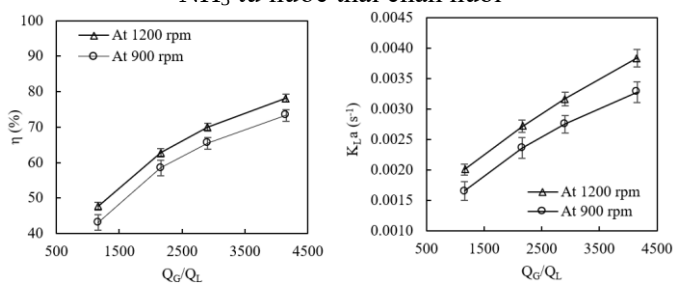
Kết quả thí nghiệm trên đã thể hiện hiệu quả stripping $\text{NH}_3\text{-N}$ từ nước thải mô phỏng. Kết quả cho thấy pH trên 10 giúp tăng đáng kể hiệu suất loại bỏ amoni. Tăng tốc độ quay ($\omega = 900 - 1200$) và tỷ lệ lưu lượng khí/lỏng tăng đều làm cải thiện hiệu suất, trong đó tốc độ quay cao còn nâng mạnh hệ số chuyển khối thể tích tổng (K_{La}) và giảm chiều cao đơn vị truyền khối (HTU_{OL}). Thí nghiệm theo chu kỳ cho thấy thêm một chu kỳ stripping giúp nâng tổng hiệu suất lên 83,0–92,69% (tương ứng giảm nồng độ $\text{NH}_3\text{-N}$ từ 1000 ppm xuống 162–73,1 ppm) khi pH_i từ 10–12. Kết quả chứng minh HP2R là giải pháp tiềm năng cho xử lý hóa lý sơ cấp trước công đoạn xử lý sinh học. Trong thí nghiệm tiếp theo với nước thải chăn nuôi, tốc độ Q_G/Q_L sẽ được lựa chọn ở dải cao hơn, độ pH lược bỏ mức $\text{pH}_i = 9$, giữ nguyên dải ω từ 300 – 1200 và bổ sung khảo sát ảnh hưởng của lưu lượng nước thải



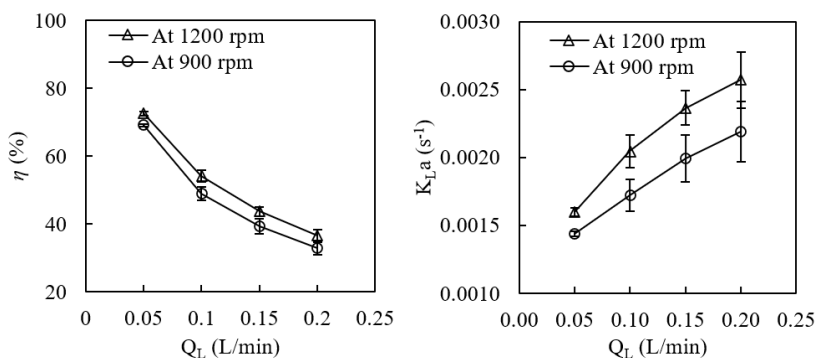
Hình 3.5. Ảnh hưởng của pH_i đến hiệu quả stripping amoni từ nước thải chăn nuôi



Hình 3.6. Ảnh hưởng của ω đến η và $K_{L,a}$ của quá trình stripping NH_3 từ nước thải chăn nuôi



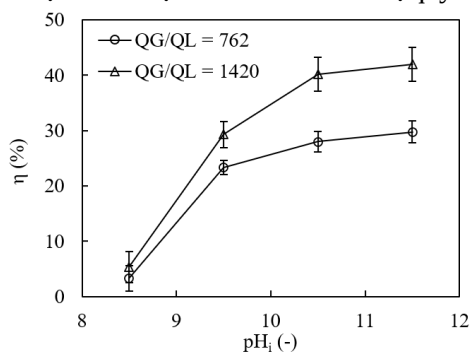
Hình 3.7. Ảnh hưởng của Q_G/Q_L đến η và $K_{L,a}$ của quá trình stripping NH_3 từ nước thải chăn nuôi



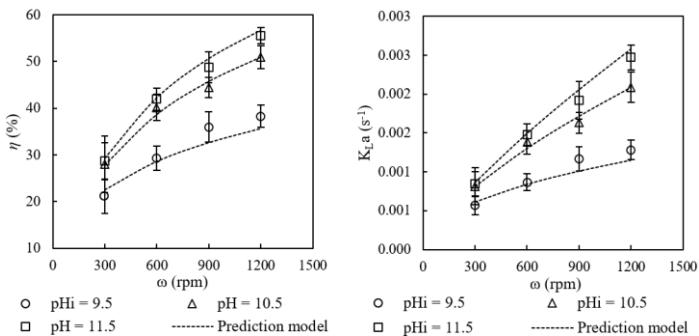
Hình 3.8. Ảnh hưởng của Q_L đến η và $K_{L,a}$ của quá trình stripping NH_3 từ nước thải chăn nuôi

3.1.3. Kết quả khảo sát stripping amoni bằng thiết bị HP2R với nước rỉ rác

Kết quả thí nghiệm trên đã thể hiện khả năng loại bỏ amoni từ nước rỉ rác bãi chôn lấp bằng thiết bị HP2R. Hiệu suất xử lý cao hơn đáng kể so với tháp stripping, nhưng thấp hơn so với một số nghiên cứu trước trên nước thải mô phỏng do sự xuất hiện của tạp chất rắn trong quá trình stripping. Với các điều kiện vận hành pH_i 9,5–11,5; Q_G 76–272 L/phút; Q_L 0,05–0,20 L/phút; ω 300–1200 rpm ở 30 °C, hiệu suất η đạt 17,1–71,8% và K_{La} 0,0005–0,0039 s^{-1} . HP2R có ưu điểm duy trì hiệu quả loại bỏ với ít hóa chất kiềm hơn nhờ bù bằng tốc độ quay hoặc lưu lượng khí cao. Nhiều chu kỳ stripping có thể nâng tổng η lên 94,6% sau 5 chu kỳ (100 phút) tại pH_i 11,5. Hiện tượng rung lắc thiết bị mạnh ở $\omega > 1200$ rpm sẽ cần phải được khắc phục khi thiết kế thiết bị quy mô lớn.

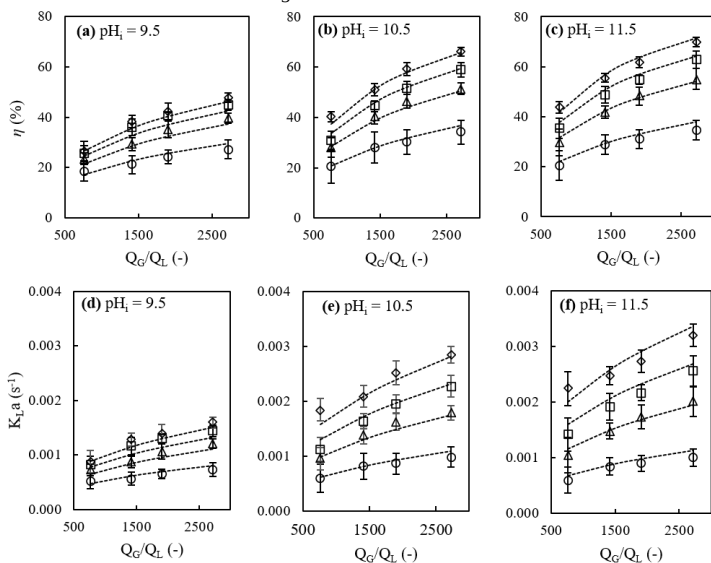


Hình 3.9. Ảnh hưởng của pH_i đến hiệu quả stripping $\text{NH}_3\text{-N}$ từ nước rỉ rác

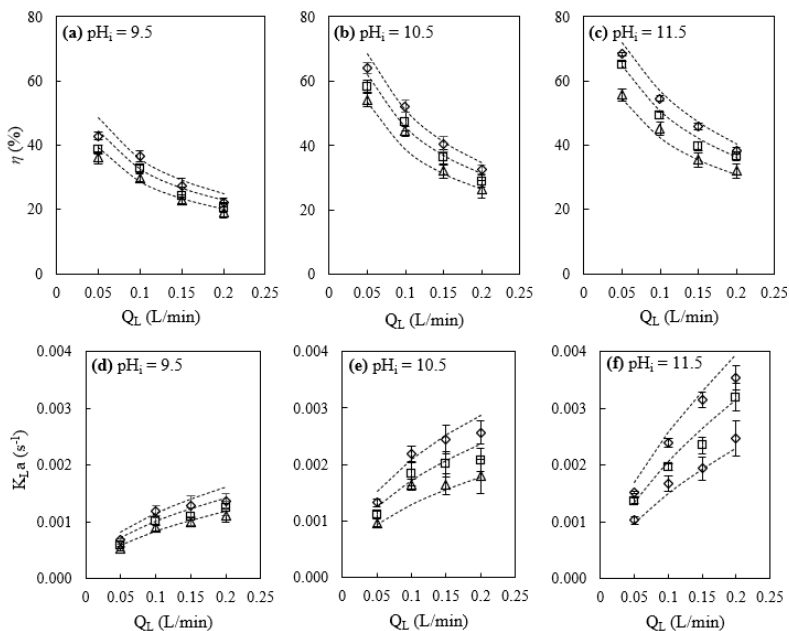


Hình 3.10. Ảnh hưởng của ω đến η và K_{La} của quá trình stripping

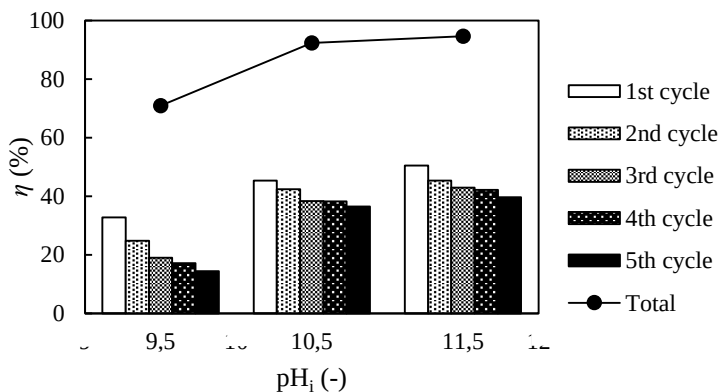
NH₃-N từ nước rỉ rác



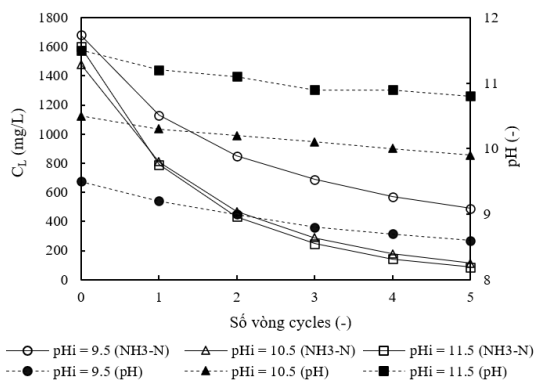
Hình 3.11. Ảnh hưởng của tỉ lệ Q_G/Q_L đến η and K_{La} của quá trình stripping NH₃-N từ nước rỉ rác



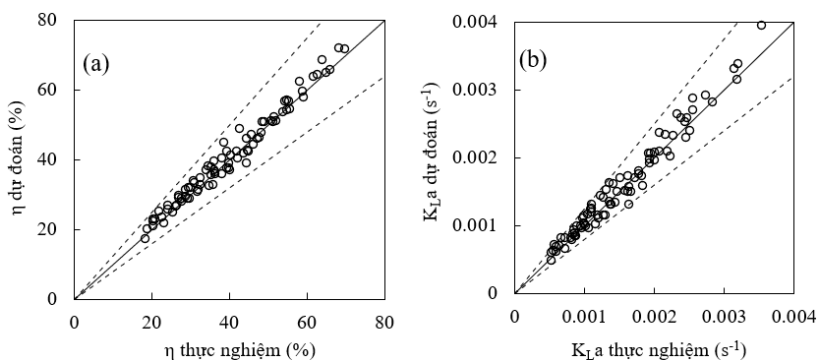
Hình 3.12. Ảnh hưởng của Q_L đến η và $K_{L,a}$ của quá trình stripping $\text{NH}_3\text{-N}$ từ nước rỉ rác



Hình 3.13. Kết quả thí nghiệm stripping $\text{NH}_3\text{-N}$ từ nước rỉ rác ở chế độ tuần hoàn



Hình 3.14. Sự thay đổi của nồng độ NH₃-N và pH trong quá trình thí nghiệm stripping NH₃-N tuần hoàn từ nước rỉ rác

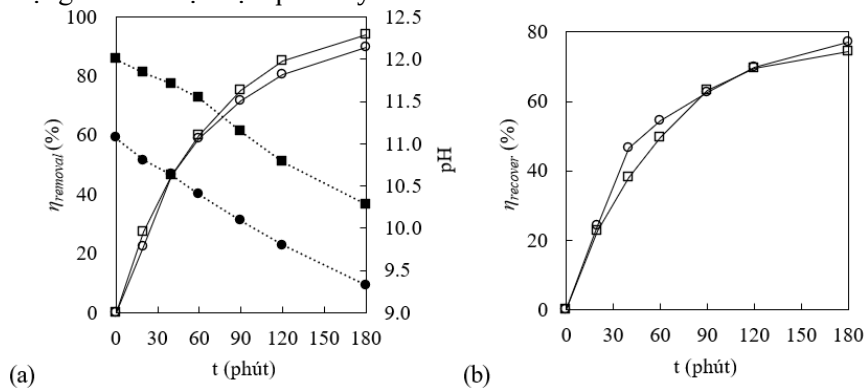


Hình 3.15. So sánh giữa giá trị thực nghiệm và dự đoán của η (a) và K_{La} (b) của quá trình stripping NH₃-N từ nước rỉ rác.

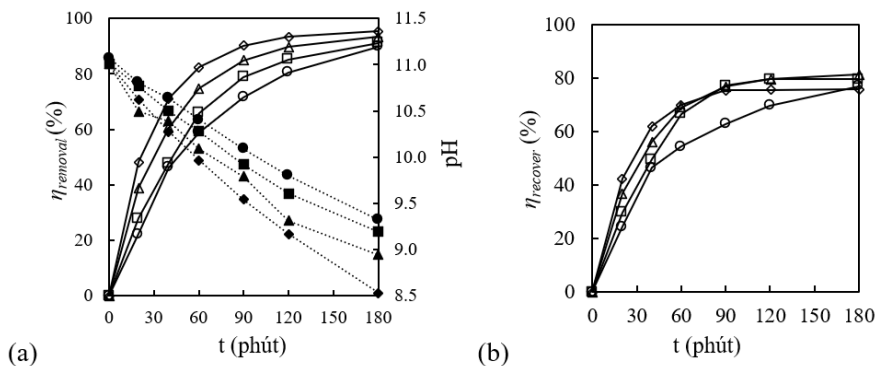
3.2. Kết quả thực nghiệm xử lý kết hợp thu hồi amoni bằng thiết bị HP2R từ nước thải

3.2.1. Kết quả xử lý kết hợp thu hồi amoni bằng thiết bị HP2R từ nước thải mô phỏng

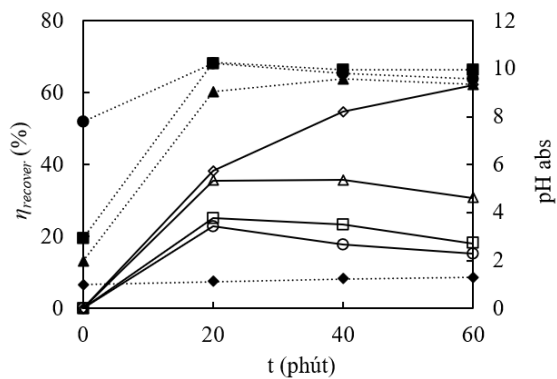
Kết quả xử lý kết hợp thu hồi amoni từ nước thải mô phỏng sử dụng thiết bị HP2R cho thấy pH ban đầu = 12 đạt hiệu suất xử lý cao (pH 12: 94,0%; pH 11: 89,7%) nhưng pH = 11 cho hiệu suất thu hồi tốt hơn (77,1% so với 74,3%). Tăng lưu lượng khí giúp pha loãng NH_3 , cải thiện phản ứng với H_2SO_4 , nhưng quá lớn ($Q_G = 300$ L/phút) làm giảm thời gian tiếp xúc, hạn chế hấp thụ. Tăng lưu lượng nước từ 0,05 lên 0,20 L/phút nâng hiệu suất xử lý từ 75% lên 89,8%, nhưng hiệu suất thu hồi giảm dần (74,6% → 69,2%). Kết quả cho thấy cần tối ưu đồng thời pH, lưu lượng khí và lưu lượng nước để đạt hiệu quả xử lý – thu hồi amoni cao nhất.



Hình 3.16. Diễn biến hiệu quả xử lý (a) và thu hồi amoni (b) trong nước thải qua quá trình stripping



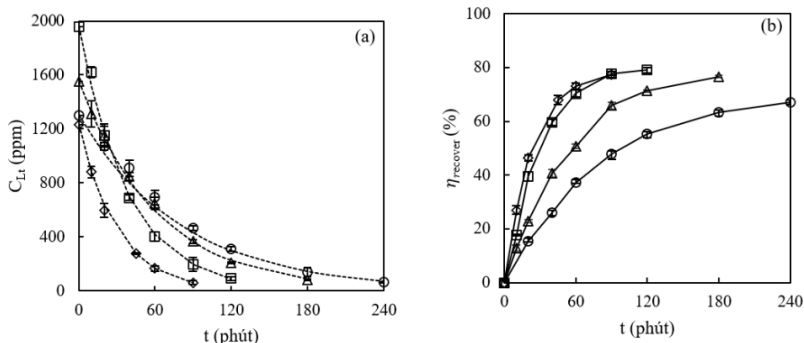
Hình 3.17. Diễn biến hiệu quả xử lý (a) và thu hồi amoni (b) trong nước thải qua quá trình stripping



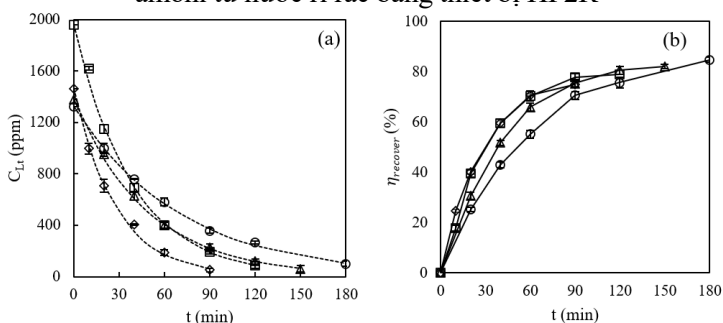
Hình 3.18. Ảnh hưởng của pH dung dịch hấp thụ đến hiệu quả thu hồi amoni

3.2.2. Kết quả xử lý kết hợp thu hồi amoni từ nước rỉ rác

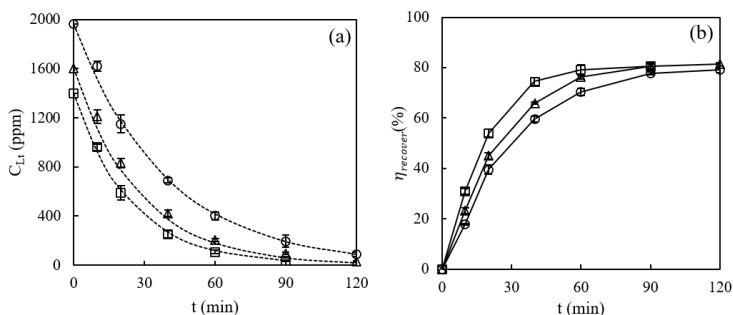
Thời gian tuần hoàn cần thiết để đạt hiệu suất loại bỏ 95% dao động từ 1,5–4 giờ, tương ứng với K_{La} từ 0,74 đến 2,48 h^{-1} . Hiệu suất thu hồi amoni bằng thiết bị hấp thụ đơn dao động từ 67,1–84,8% và chịu ảnh hưởng chính bởi nồng độ amoni trong pha khí, vốn phụ thuộc vào Q_G và Q_L . Điều kiện vận hành tối ưu để đạt 95% hiệu suất loại bỏ và 80% hiệu suất thu hồi là: $Q_G = 200$ L/phút, $Q_L = 0,2$ L/phút, tốc độ quay 900 vòng/phút, T_{Li} từ 30–40 °C. Dung dịch thu hồi đạt nồng độ amoni cao (1930–3360 mg/L).



Hình 3.19. Ảnh hưởng của Q_G tới hiệu quả xử lý (a) và thu hồi (b) amoni từ nước rỉ rác bằng thiết bị HP2R



Hình 3.20. Ảnh hưởng của lưu lượng nước thải tới hiệu quả xử lý (a) và thu hồi (b) amoni từ nước rỉ rác sử dụng thiết bị HP2R



Hình 3.21. Ảnh hưởng của nhiệt độ nước thải tới hiệu quả xử lý (a) và thu hồi (b) amoni từ nước rỉ rác sử dụng thiết bị HP2R

3.3. Đề xuất mô hình tiềm năng ứng dụng của nguyên lý tiếp xúc ly tâm trong xử lý và thu hồi amoni ở quy mô thực tế

3.3.1. Sơ bộ hiệu quả kinh tế - kỹ thuật xử lý kết hợp thu hồi amoni bằng thiết bị HP2R quy mô 150 m³/ngày.đêm

Chi phí xử lý amoni đối với 1m³ nước thải nồng độ 1000 mg/L amoni là: 21.000 ~ 22.000 VND/m³.

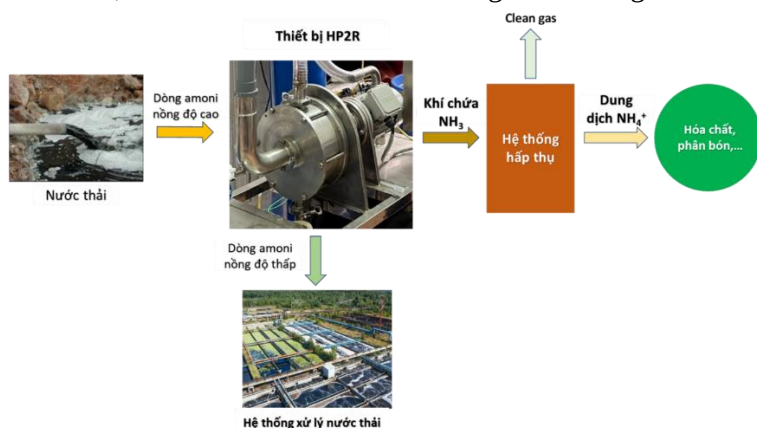
Có thể thấy, so với phương pháp stripping bằng thiết bị HP2R, chi phí điện năng cho HP2R có kèm hệ thu hồi (1,81 kWh/m³) có chi phí điện năng thấp hơn so với tháp hấp thụ thông thường (4,1 kWh). Sự tiết kiệm trong năng lượng điện tiêu tốn của hệ thiết bị HP2R đến từ ưu điểm hiệu suất truyền khối và xử lý amoni rất nhanh, dẫn đến thời gian để đạt hiệu quả xử lý mong muốn với một đơn vị thể tích là nhanh hơn rất nhiều so với hệ thống stripping thông thường.

Về chi phí ở quy mô thực tế, chi phí vận hành dưới dạng tiêu thụ điện năng cho bơm nước thải, máy thổi khí và các thiết bị hỗ trợ (ví dụ: bơm làm mát trực quay) có thể được bù đắp nếu công suất xử lý tiệm cận quy mô thực tế (ví dụ: $Q_L \geq 100$ m³/ngày) thông qua dòng sản phẩm muối NH₄⁺ thu hồi. Các nghiên cứu trong tương lai cũng cần

tập trung vào đánh giá, xác định tuổi thọ thiết bị, chu kỳ thay thế và quá trình làm giàu muối NH_4^+ thu hồi để phục vụ ứng dụng tiếp theo của sản phẩm thu hồi.

3.3.2. Đề xuất hướng áp dụng mô hình ở quy mô thực tế

Đối với các dòng thải công nghiệp có nồng độ amonia vượt quá 10.000 mg/L, các thiết bị dựa trên công nghệ HiGee vẫn là lựa chọn tiềm năng nhờ hiệu suất stripping gần như không bị ảnh hưởng bởi nồng độ ban đầu của $\text{NH}_3\text{-N}$ trong nước thải. Dự kiến trong quy mô thực tế trong xử lý nước thải tại Việt Nam, công nghệ HP2R sẽ có tiềm năng ứng dụng để xử lý và thu hồi amoni từ nước thải nồng độ cao (nước rỉ rác, nước thải chăn nuôi theo hướng mô tả trong Hình 3.23).



Hình 3. 22. Hướng ứng dụng thiết bị HP2R ở quy mô thực tế

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh tiềm năng của thiết bị tiếp xúc ly tâm hiệu năng cao (HP2R) trong công nghệ stripping để xử lý và thu hồi amoni từ nước thải mô phỏng, nước thải chăn nuôi và nước rỉ rác. Các kết quả chính gồm:

- $\text{pH} \geq 11$ giúp chuyển hóa NH_4^+ thành NH_3 dễ tách, nâng cao hiệu suất stripping;
- Tốc độ quay cao (ω) tăng mạnh hệ số truyền khối (K_{La}) và hiệu suất so với tháp truyền thống;
- Tăng tỷ lệ Q_G/Q_L cải thiện hiệu quả, nhưng ω tác động mạnh hơn;
- Tăng Q_L giảm hiệu suất mỗi chu kỳ nhưng rút ngắn thời gian xử lý trong chế độ tuần hoàn;
- Nhiệt độ cao thúc đẩy bay hơi NH_3 , cần kiểm soát tránh thất thoát nhiệt;
- HP2R đạt $\eta_{\text{removal}} \geq 95\%$, $K_{La} = 0,7\text{--}2,5 \text{ h}^{-1}$, $\eta_{\text{recover}} = 67\text{--}85\%$ trong 1,5–2 giờ cho nước thải $>1000 \text{ mg/L NH}_3\text{-N}$;
- Tính toán sơ bộ ở quy mô $150 \text{ m}^3/\text{ngày}$ cho thấy hiệu quả kinh tế, môi trường và bền vững cao.

Kiến nghị

- Nghiên cứu CFD tối ưu thiết kế rôto, vật liệu đệm; thử nghiệm pilot và thực tế tại Việt Nam với nhiều loại nước thải; tích hợp HP2R với công nghệ khác để tối ưu hiệu quả và giảm chi phí;
- Cải tiến thiết kế khắc phục quá nhiệt và rung trực ở tốc độ cao;
- Nghiên cứu giải pháp chống cặn bám, đánh giá tác động của dòng stripping VOCs để đảm bảo độ tinh khiết amoni thu hồi.

NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

- Luận án đã khảo sát toàn diện các yếu tố ảnh hưởng và điều kiện vận hành của thiết bị HP2R tới hiệu quả stripping $\text{NH}_3\text{-N}$ và hệ số chuyển khối tổng quát K_{La} của quá trình đối với ba đối tượng nước thải.
- Lần đầu tiên khi ứng dụng thiết bị HP2R đã nâng cao hiệu quả xử lý và thu hồi tối đa đạt lần lượt 95% và 85%, đặc biệt với nồng độ amoni cao trong nước thải dao động từ 2000 đến hơn 3000 mg/L.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

* Là tác giả chính:

1. **Viet M. Trinh**, Thao Phuong Nguyen, Tung Huu Pham, Hieu Minh Trinh, Minh Tuan Nguyen, Manh Van Do, Long Thanh Ngo, Tuyen Van Trinh, Intensified ammonia stripping from landfill leachate using a high-performance rotating reactor, Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 11, Issue 5, 2023, 110416, ISSN 2213-3437,

2. **Viet M. Trinh**, Thao Phuong Nguyen, Doan Thi Pham, Hanh Thi Duong, Manh Van Do, Long Thanh Ngo, Tuyen Van Trinh, Ammonia removal and recovery from landfill leachate via intensified stripping and absorption using a High-Performance Rotating Reactor, Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2025, 110348, ISSN 0255-2701;

3. **Viet M. Trinh**, Van Tuyen Trinh, Phuong Thao Nguyen, Huu Tung Pham, Tuan Minh Nguyen, Van Manh Do, Thanh Long Ngo. Ammonia removal from digested swine wastewater using a High-Performance Rotating Reactor. Vietnam Journal of Science and Technology **62** (4) (2024) 775-786;

4. **Minh Viet Trinh**, Tuan Minh Nguyen, Van Tuyen Trinh, Van Manh Do, Thanh Long Ngo, Yi-Hung Chen, Min-Hao Yuan. Evaluation of the operational factors affecting the stripping efficiency of ammonia from aqueous solution using a High-Performance Rotating Reactor (HP2R), Vietnam Journal of Science and Technology 60 (5B) (2022) 265-279.

* **Là đồng tác giả:** Đỗ Văn Mạnh (c.b.), Lê Xuân Thanh Thảo, Nguyễn Tuấn Minh, Huỳnh Đức Long, **Trịnh Minh Việt**, Trần Công Hải, Lương Hữu Thành (2023). Công nghệ xử lý và tuần hoàn bùn thải. Nhà Xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, ISBN: 978-604-357-179-0;