

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Nguyễn Văn Quảng

NGHIÊN CỨU CHUYÊN HOÁ NƯỚC THẢI
THÀNH DINH DƯỠNG CHO CÂY TRỒNG TRÊN CƠ SỞ PHƯƠNG PHÁP
HẤP PHỤ VÀ GIẢI HẤP SỬ DỤNG THAN SINH HỌC CHẾ TẠO
TỪ PHÉ PHẨM NÔNG NGHIỆP

Chuyên ngành: Khoa học Môi trường

Mã số: 9440301.01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC MÔI TRƯỜNG

Hà Nội – 2026

Công trình được hoàn thành tại:

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học:

Hướng dẫn 1: GS.TS. Nguyễn Mạnh Khải

Hướng dẫn 2: TS. Trần Thị Minh Hằng

Phản biện: GS.TS. Trịnh Văn Tuyên

Phản biện: GS.TS. Trần Thị Việt Nga

Phản biện: PGS.TS. Hoàng Thị Thu Hương

Luận án đã được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án vào
hồi 9 giờ 00 phút, ngày 03 tháng 04 năm 2026 tại Trường Đại học
Khoa học Tự nhiên, ĐHQGHN

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Trung tâm Thư viện và Tri thức số, Đại học Quốc gia Hà Nội.

I. MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Nước thải sinh hoạt gia tăng nhanh chóng trên toàn cầu, đặc biệt nước thải xám thường xả thẳng ra môi trường, chứa hợp chất hữu cơ, nitrate, ammonium, phosphate, kim loại nặng và kháng sinh, gây nguy cơ phú dưỡng, suy thoái hệ sinh thái và ảnh hưởng sức khỏe cộng đồng (Bischel và c.s., 2015; Marcińczyk và c.s., 2022; Özel Duygan và c.s., 2021; Xu và c.s., 2023). Hậu quả như mùi hôi, vi sinh vật gây bệnh càng nhấn mạnh tính cấp bách của việc xử lý hiệu quả (Al-Mawla và c.s., 2023). Nước tiểu người và nước sau bể tự hoại là hai nguồn nước thải giàu hợp chất hữu cơ, nitrate, ammonium và phosphate, với tiềm năng tái sử dụng nhằm cung cấp dinh dưỡng cho cây trồng. Chúng chứa hàm lượng N, P, K cao, có thể thay thế phân bón hóa học, tuy nhiên, việc sử dụng trực tiếp nước thải này tiềm ẩn nhiều rủi ro môi trường và sức khỏe. Trong nước tiểu có thể tồn tại vi sinh vật gây bệnh, dư lượng thuốc, kháng sinh, hormone, và hàm lượng muối cùng ammonium cao, dẫn đến cháy lá, ngộ độc rễ, và phát sinh mùi hôi, đồng thời gia tăng nguy cơ ô nhiễm nguồn nước (Kim và c.s., 2021). Do đó, việc tái sử dụng cần có quy trình xử lý hoặc pha loãng nhằm đảm bảo an toàn môi trường và sức khỏe cộng đồng. Trong bối cảnh phân bón ngày càng khan hiếm, trong khi sản xuất phân hóa học vừa gây thoái hóa đất vừa tác động tiêu cực đến môi trường (Karmin và Siow, 2018; Osorio-Tejada và c.s., 2022). Việc thu hồi dinh dưỡng từ nước thải trở nên cần thiết. Giải pháp này không chỉ giảm áp lực cho hệ thống xử lý nước thải mà còn tạo ra nguồn dinh dưỡng thay thế bền vững, góp phần phục vụ nông nghiệp lâu dài.

Gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc thu hồi và tái sử dụng dinh dưỡng từ nước thải. Các công nghệ hiện đại như trao đổi ion hay nitrate hóa tuy hiệu quả nhưng chi phí cao, trong khi phương pháp kết tủa struvite lại cần xử lý trung gian phức tạp và vẫn tốn kém (Yetilmezsoy và c.s., 2017). Hơn nữa, tính chọn lọc quá cao khiến các biện pháp này khó áp dụng cho nước thải sau bể tự hoại vốn có thành phần phức tạp. Trong bối cảnh đó, phương pháp hấp

phụ nổi lên như một hướng đi triển vọng nhờ cơ chế đơn giản, chi phí thấp và khả năng sử dụng vật liệu có diện tích bề mặt lớn, thể tích lỗ xốp cao để thu hồi N, P, K (Leng và c.s., 2021). Đặc biệt, vật liệu hấp phụ có thể được chế tạo từ phụ phẩm nông nghiệp như vỏ trấu, xơ dừa, lõi ngô và vỏ sắn... giúp vừa thu hồi dinh dưỡng, vừa xử lý rác thải nông nghiệp. Hiệu quả thu hồi dinh dưỡng của các loại than sinh học biochar từ phụ phẩm này đã được chứng minh đáng kể (Collivignarelli và c.s., 2022). Như vậy, hướng nghiên cứu sử dụng phụ phẩm nông nghiệp làm vật liệu hấp phụ không chỉ góp phần giảm áp lực ô nhiễm nước thải mà còn mang lại lợi ích kép trong quản lý chất thải nông nghiệp.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu khai thác phụ phẩm nông nghiệp phổ biến như vỏ trấu, vỏ sắn đến các vật liệu đặc thù vùng miền như vỏ sấu riêng để chế tạo chất hấp phụ thu hồi dinh dưỡng từ nước thải, cũng như thử nghiệm tái sử dụng biochar sau hấp phụ để bón đất cho cây trồng (Masrura và Khan, 2022; Nguyễn Phan Việt, 2023; Saliu và Oladoja, 2021). song vẫn tồn tại khoảng trống lớn. Các nghiên cứu chủ yếu dừng ở việc chứng minh khả năng hấp phụ mà chưa làm rõ tính ứng dụng thực tế của dinh dưỡng đã thu hồi. Việc đưa trực tiếp biochar vào đất dựa vào cơ chế nhà chậm khiến liều lượng hấp thu của cây không được kiểm soát, đồng thời tiềm ẩn nguy cơ mất vệ sinh và ô nhiễm do vi sinh vật gây bệnh (Kuppusamy và c.s., 2016; Masrura và c.s., 2022). Vì vậy, cần có nghiên cứu toàn diện hơn, bao quát từ chế tạo vật liệu hấp phụ, kiểm soát quá trình thu hồi – giải phóng dinh dưỡng, đến tái sử dụng vật liệu và thử nghiệm trên nhiều loại cây trồng khác nhau, nhằm khắc phục những hạn chế hiện hữu và hướng tới ứng dụng thực tiễn.

Với tính cấp thiết trên ***“Nghiên cứu chuyển hoá nước thải thành dinh dưỡng cho cây trồng trên cơ sở phương pháp hấp phụ và giải hấp sử dụng than sinh học chế tạo từ phế phẩm nông nghiệp”*** Nghiên cứu này được thực hiện nhằm giải quyết ba tồn tại chính: (i) chưa kiểm soát hiệu quả liều lượng dinh dưỡng được giải phóng, (ii) nguy cơ ô nhiễm môi trường và lây nhiễm vi sinh vật gây bệnh, và (iii) thiếu bằng chứng thực nghiệm về hiệu quả ứng dụng

trên nhiều loại cây trồng. Do đó, hướng tiếp cận toàn diện của nghiên cứu tập trung đồng thời vào ba khía cạnh chính: phát triển vật liệu hấp phụ phù hợp, xây dựng quy trình thu hồi và giải phóng dinh dưỡng có kiểm soát, và đánh giá hiệu quả ứng dụng trên cây trồng trong điều kiện thực nghiệm.

2. Mục tiêu nghiên cứu

2.1. Mục tiêu chung

Nghiên cứu đánh giá khả năng hấp phụ, lưu giữ và giải hấp các chất dinh dưỡng dạng khoáng của vật liệu biochar từ một số dòng nước thải sinh hoạt giàu dinh dưỡng, bao gồm nước thải nhân tạo, nước tiểu người và nước sau bể tự hoại; từ đó đề xuất khả năng thu hồi dinh dưỡng và tái sử dụng dung dịch sau giải hấp làm nguồn dinh dưỡng phục vụ canh tác nông nghiệp theo định hướng kinh tế tuần hoàn và nông nghiệp bền vững.

2.2. Mục tiêu cụ thể

- Đánh giá đặc tính cơ bản của vật liệu biochar và các nguồn nước thải sinh hoạt được sử dụng trong nghiên cứu, tập trung vào các thông số liên quan đến khả năng thu hồi dinh dưỡng như $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, K^+ , và một số chỉ tiêu đặc trưng khác.

- Xác định khả năng hấp phụ các chất dinh dưỡng dạng khoáng của biochar đối với nước thải nhân tạo, nước tiểu người và nước sau bể tự hoại; làm rõ ảnh hưởng của một số yếu tố vận hành như nồng độ đầu vào, thời gian tiếp xúc, liều lượng biochar và điều kiện pH đến hiệu quả hấp phụ.

- Đánh giá khả năng giải hấp và thu hồi các chất dinh dưỡng đã được lưu giữ trên biochar, nhằm xác định hiệu suất giải phóng dinh dưỡng, đặc tính của dung dịch sau giải hấp và tiềm năng sử dụng dung dịch này như một nguồn dinh dưỡng khoáng.

- Nghiên cứu khả năng ứng dụng dung dịch dinh dưỡng dạng khoáng thu được sau quá trình giải hấp trong canh tác nông nghiệp, thông qua đánh giá ảnh hưởng của dung dịch đến sinh trưởng cây trồng, hiệu quả sử dụng dinh dưỡng và các rủi ro môi trường liên quan.

- Đề xuất định hướng kỹ thuật cho mô hình thu hồi dinh dưỡng từ nước thải sinh hoạt bằng biochar và tái sử dụng dung dịch sau giải hấp trong sản xuất nông nghiệp theo hướng tuần hoàn tài nguyên.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

- Mẫu nước thải nhân tạo, nước tiểu người, nước sau bể tự hoại
- Phụ phẩm nông nghiệp (lõi ngô, vỏ trấu) được chế tạo thành biochar

3.2. Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện ở quy mô phòng thí nghiệm, tập trung đánh giá khả năng thu hồi và chuyển hóa đạm tổng số, lân hữu hiệu và kali hữu hiệu từ nước tiểu người và nước thải sau bể tự hoại thành dạng dinh dưỡng khoáng có thể sử dụng cho cây trồng thông qua quy trình hấp phụ – giải hấp, sử dụng biochar được chế tạo từ phụ phẩm nông nghiệp.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

4.1. Ý nghĩa khoa học

Nghiên cứu góp phần làm rõ khả năng hấp phụ – giải hấp và thu hồi các chất dinh dưỡng N, P, K của biochar chế tạo từ phụ phẩm nông nghiệp đối với các dòng nước thải sinh hoạt giàu dinh dưỡng như nước tiểu người và nước sau bể tự hoại. Điểm mới của nghiên cứu là chuyển trọng tâm từ xử lý ô nhiễm đơn thuần sang thu hồi tài nguyên dinh dưỡng, thông qua đánh giá đồng thời hiệu quả, cơ chế lưu giữ và khả năng giải phóng dinh dưỡng của biochar trong điều kiện nước thải thực tế. Kết quả nghiên cứu bổ sung cơ sở khoa học cho việc sử dụng biochar như một vật liệu trung gian trong thu hồi dinh dưỡng và tái sử dụng nguồn dinh dưỡng khoáng phục vụ canh tác nông nghiệp theo định hướng kinh tế tuần hoàn và phát triển bền vững.

4.2. Ý nghĩa thực tiễn.

Nghiên cứu cung cấp cơ sở thực nghiệm cho việc sử dụng biochar chế tạo từ phụ phẩm nông nghiệp để thu hồi một phần dinh

dưỡng khoáng từ nước tiểu người và nước sau bể tự hoại. Thông qua quá trình hấp phụ – giải hấp, các chất dinh dưỡng như N, P, K có thể được chuyển vào dung dịch sau chiết xuất và xem xét sử dụng cho cây trồng trong điều kiện phù hợp.

Kết quả nghiên cứu có thể hỗ trợ đề xuất giải pháp xử lý và tái sử dụng nước thải sinh hoạt giàu dinh dưỡng ở quy mô nhỏ hoặc quy mô hộ gia đình, trang trại, khu dân cư. Cách tiếp cận này góp phần giảm tải lượng chất dinh dưỡng thải ra môi trường, tận dụng phụ phẩm nông nghiệp để tạo vật liệu xử lý, đồng thời cung cấp thêm lựa chọn về nguồn dinh dưỡng tái sử dụng cho canh tác nông nghiệp. Đây là hướng ứng dụng có tính khả thi trong quản lý nước thải sinh hoạt và sử dụng tài nguyên theo hướng tuần hoàn.

5. Những đóng góp mới của luận án

Luận án đã đề xuất và kiểm chứng quy trình hấp phụ – giải hấp ở quy mô phòng thí nghiệm sử dụng biochar từ phụ phẩm nông nghiệp để thu hồi đạm tổng số, lân hữu hiệu và kali hữu hiệu từ nước tiểu người và nước sau bể tự hoại. Kết quả nghiên cứu xác định mô hình hấp phụ tĩnh trong 5 ngày với nước thải thực ở nồng độ 100% là điều kiện phù hợp, cho hiệu quả thu hồi ổn định, đặc biệt đối với đạm tổng số. Luận án chỉ ra biochar lõi ngô có khả năng hấp phụ dinh dưỡng tốt hơn biochar vỏ trấu trong cùng điều kiện thí nghiệm. Dung dịch sau giải hấp chứa các chất dinh dưỡng khoáng có tiềm năng sử dụng cho cây trồng, bước đầu định hướng ứng dụng trong thủy canh và góp phần đề xuất mô hình thu hồi, tái sử dụng dinh dưỡng từ nước thải sinh hoạt theo hướng nông nghiệp tuần hoàn.

6. Cấu trúc của luận án

1. Mở đầu
2. Chương 1. Tổng quan
3. Chương 2. Đối tượng, nội dung, phương pháp nghiên cứu
4. Chương 3: Kết quả và thảo luận
5. Kết luận

Chương 1. TỔNG QUAN

1.1. Nước thải sinh hoạt và tiềm năng tái sử dụng

1.1.1. Phân loại nước thải sinh hoạt

1.1.1.1. Giới thiệu về nước thải sinh hoạt

1.1.1.2. Phân loại nước thải sinh hoạt

1.1.2. Các công nghệ xử lý nước thải sinh hoạt

1.1.3. Tiềm năng thu hồi dưỡng chất từ nước thải sinh hoạt

1.2. Tổng quan về phụ phẩm nông nghiệp

1.2.1. Khái niệm phụ phẩm nông nghiệp

1.2.2. Vật liệu hấp phụ được chế tạo từ phụ phẩm nông nghiệp

1.2.2.1. Vật liệu hấp phụ

1.2.2.2. Vật liệu hấp phụ được chế tạo từ phụ phẩm nông nghiệp

1.2.2.3. Biochar

1.2.2.4. Đặc tính của biochar

1.2.3. Nguyên lý, cơ chế của phương pháp hấp phụ trong xử lý nước thải

1.3. Nghiên cứu sử dụng phương pháp hấp phụ trên nước thải giàu nitơ, photpho, kali

1.3.1. Nghiên cứu sử dụng phương pháp hấp phụ trên nước thải giàu nitơ, photpho, kali trên Thế Giới

1.3.2. Nghiên cứu sử dụng phương pháp hấp phụ trên nước thải giàu nitơ, photpho, kali tại Việt Nam

1.4. Nghiên cứu sử dụng dung dịch dinh dưỡng thu hồi từ nước thải sinh hoạt giàu nitơ, kali, photpho phục vụ hoạt động canh tác nông nghiệp.

1.4.1. Nghiên cứu sử dụng dung dịch dinh dưỡng thu hồi từ nước thải sinh hoạt giàu nitơ, kali, photpho phục vụ hoạt động canh tác nông nghiệp trên Thế Giới.

1.4.2. Nghiên cứu sử dụng dung dịch dinh dưỡng thu hồi từ nước thải sinh hoạt giàu nitơ, kali, photpho phục vụ hoạt động canh tác nông nghiệp tại Việt Nam

1.4.3. Hạn chế trong những nghiên cứu ứng dụng dinh dưỡng thu hồi từ nước thải.

1.5. Đặc điểm của các đối tượng nghiên cứu trong luận án

1.5.1. Đặc điểm một số loại rau

1.5.2. Đặc điểm của một số biochar được chế tạo từ phế phụ phẩm nông nghiệp

1.5.3. Đặc điểm một số loại chất thải hữu cơ

1.6. Giả thuyết nghiên cứu của luận án

CHƯƠNG 2

ĐỐI TƯỢNG, NỘI DUNG PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

2.1.1. Nước thải

2.1.1.1. Nước thải giả lập

2.1.1.2. Nước thải thực tế

2.1.2. Vật liệu phụ phẩm nông nghiệp

2.1.3. Giống cây trồng

2.2. Nội dung nghiên cứu

2.2.1. Nghiên cứu khả năng hấp phụ của biochar trên nước thải giả định

- Nghiên cứu ảnh hưởng của mô hình hấp phụ và thời gian hấp phụ đến hiệu quả hấp phụ của biochar
- Nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ ban đầu đến khả năng hấp phụ của biochar
- Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ biochar (tỷ lệ vật liệu/dung dịch) đến hiệu quả thu hồi các chất hữu cơ

2.2.2. Nghiên cứu khả năng hấp phụ và giải hấp của biochar từ lõi ngô và vỏ trấu đối với nước tiểu người và nước thải sau bể tự hoại

- Nghiên cứu hình thái, vật lý, và hóa học của hai loại biochar lõi ngô (TSH-LN) và biochar vỏ trấu (TSH-VT)
- Nghiên cứu khả năng hấp phụ và giải hấp của biochar lõi ngô (TSH-LN) và biochar vỏ trấu (TSH-VT) trên nước thải thực tế

2.2.3. Nghiên cứu thử nghiệm đánh giá chất lượng dinh dưỡng trên cây trồng

- Nghiên cứu thử nghiệm trên cây rau cải mè
- Nghiên cứu thử nghiệm trên cây húng quế

2.3. Phương pháp nghiên cứu

2.3.1 Phương pháp nghiên cứu nội dung 1: Nghiên cứu khả năng hấp phụ của than sinh học (biochar) trên nước thải giả định

2.3.1.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của mô hình và thời gian hấp phụ của than sinh học (biochar) (lõi ngô, vỏ trấu)

2.3.1.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ vật liệu đến khả năng thu hồi các chất hữu cơ của than sinh học (biochar) (lõi ngô, vỏ trấu)

2.3.2. Phương pháp nghiên cứu nội dung 2: Nghiên cứu khả năng hấp phụ và giải hấp của than sinh học (biochar) (lõi ngô, vỏ trấu) trên nước tiểu người và nước sau bể tự hoại.

2.3.2.1. Nghiên cứu hình thái, vật lý, và hóa học của hai loại than sinh học (biochar) lõi ngô (TSH-LN) và than sinh học (biochar) vỏ trấu (TSH-VT)

2.4.2.2. Nghiên cứu khả năng hấp phụ và giải hấp của than sinh học lõi ngô (TSH-LN) và than sinh học vỏ trấu (TSH-VT) trên nước thải thực tế

2.3.3. Phương pháp nghiên cứu nội dung 3: Nghiên cứu thử nghiệm đánh giá chất lượng dinh dưỡng trên cây trồng

2.3.3.1. Nghiên cứu thử nghiệm trên cây rau cải mè

2.2.3.2. Nghiên cứu thử nghiệm trên cây húng quế

2.5. Phương pháp xử lý số liệu

CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá khả năng hấp phụ của biochar trên nước thải giả định

3.1.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của mô hình hấp phụ và thời gian hấp phụ đến hiệu quả hấp phụ của biochar

3.1.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ ban đầu đến khả năng hấp phụ của biochar

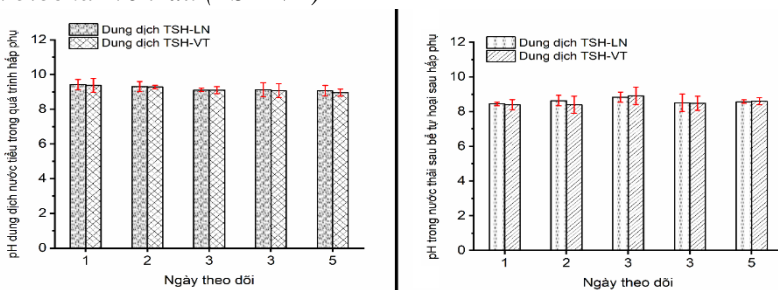
3.1.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ biochar (tỷ lệ vật liệu/dung dịch) đến hiệu quả thu hồi các chất hữu cơ

3.2. Kết quả nghiên cứu khả năng hấp phụ và giải hấp của biochar từ lõi ngô và vỏ trấu đối với nước tiểu người và nước thải sau bể tự hoại.

3.2.1. Kết quả phân tích hình thái, vật lý, và hóa học của hai loại biochar lõi ngô (TSH-LN) và biochar vỏ trấu (TSH-VT)

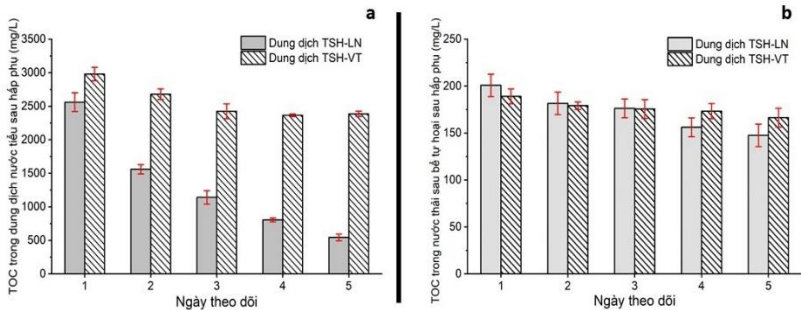
3.2.2. Đánh giá khả năng hấp phụ và giải hấp của biochar lõi ngô (TSH-LN) và biochar vỏ trấu (TSH-VT) trên nước thải thực tế

3.2.2.1. Đánh giá hiệu quả hấp phụ và giải hấp trên nước thải thực tế (nước tiểu người, nước sau bể tự hoại) của biochar lõi ngô (TSH-LN) và biochar vỏ trấu (TSH-VT)



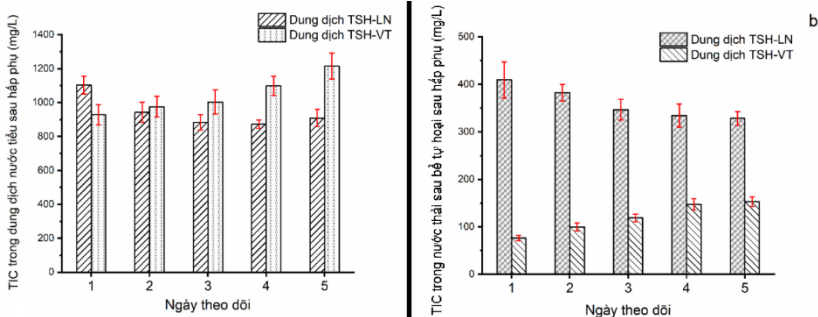
Hình 3.13. pH của dung dịch nước tiểu người và nước thải sau bể tự hoại trong quá trình hấp phụ

* Kết quả thu hồi carbon hữu cơ (TOC)



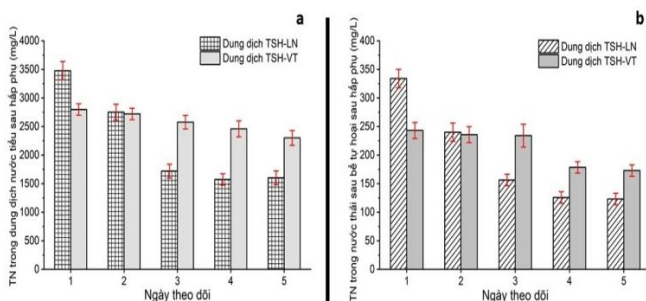
Hình 3.15. Hàm lượng carbon hữu cơ sau hấp phụ của (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại.

* *Kết quả thu hồi carbon vô cơ (TIC)*



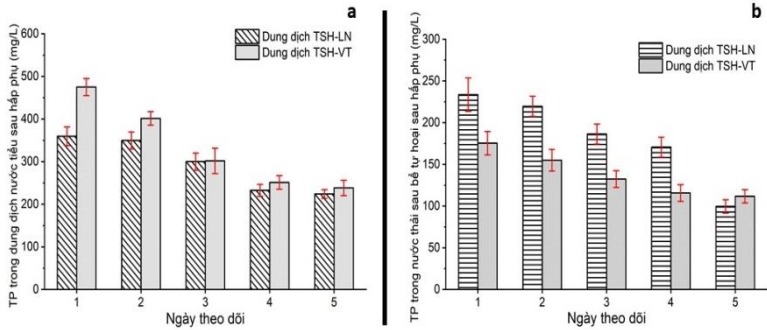
Hình 3.16. Hàm lượng carbon vô cơ sau hấp phụ của (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại.

* *Kết quả thu hồi đạm tổng số (TN)*



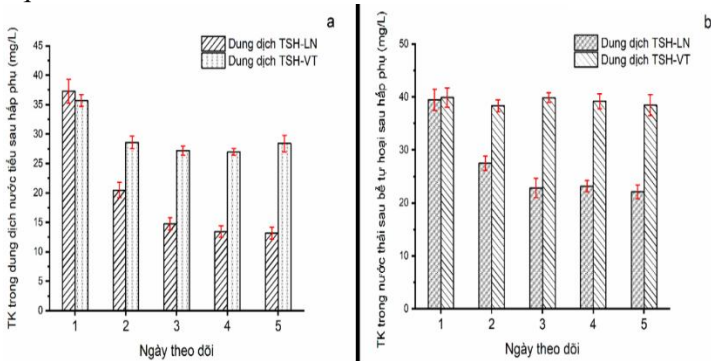
Hình 3.17. Hàm lượng đạm tổng số (TN) sau hấp phụ của (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại.

* *Kết quả thu hồi phốt pho*



Hình 3.18. Hàm lượng photpho sau hấp phụ của từ (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại.

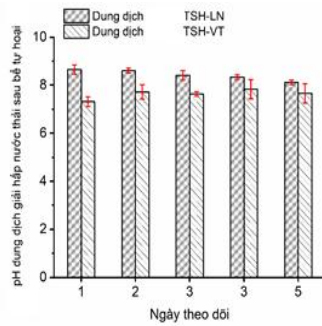
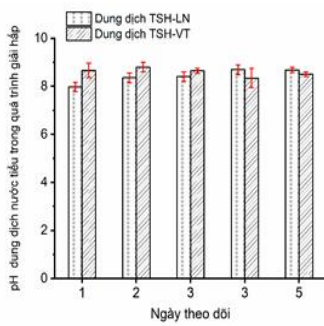
** Kết quả thu hồi kali*



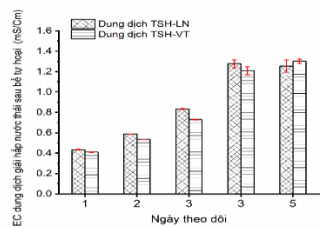
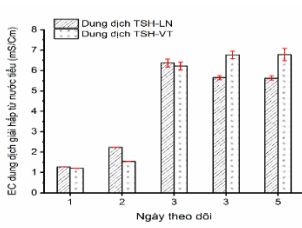
Hình 3.19. Hàm lượng kali sau hấp phụ của (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại

b. Đánh giá khả năng giải hấp của than sinh học (biochar) (TSH-LN) và (TSH-VT) gồm các chỉ số sau (pH, Ec, TOC, TIC, đạm tổng số (TN), kali hữu hiệu (TK) và lân hữu hiệu (TP)) trên nước tiểu người và nước thải sau bể tự hoại

** pH và EC của dung dịch sau giải hấp*

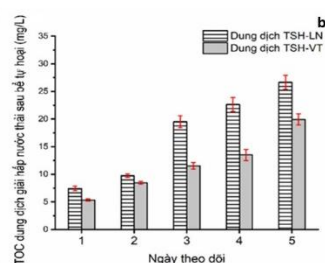


Hình 3.20. pH sau giải hấp của (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại



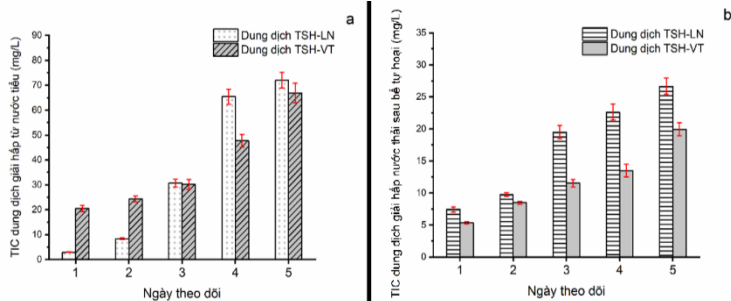
Hình 3.21. EC sau giải hấp của (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại

* Kết quả giải phóng carbon hữu cơ (TOC)



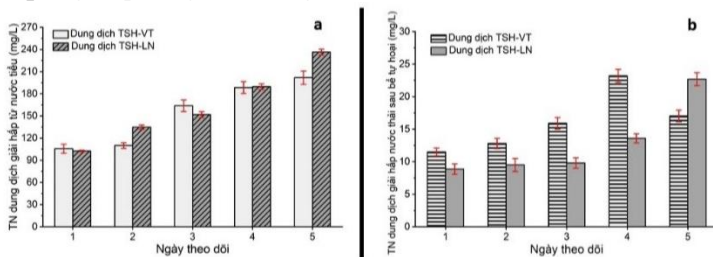
Hình 3.22. Hàm lượng carbon hữu cơ sau trong dung dịch dinh dưỡng sau khi giải hấp từ TSH hấp phụ (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại.

* Kết quả giải phóng carbon vô cơ (TIC)



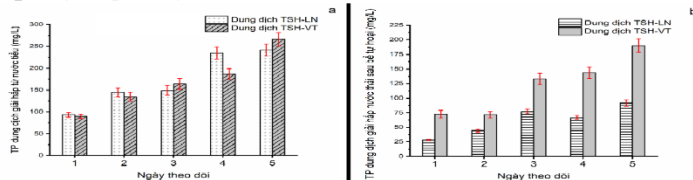
Hình 3.23. Hàm lượng carbon vô cơ sau trong dung dịch dinh dưỡng sau khi giải hấp từ TSH hấp phụ (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại.

* Kết quả giải phóng đạm tổng số (TN)



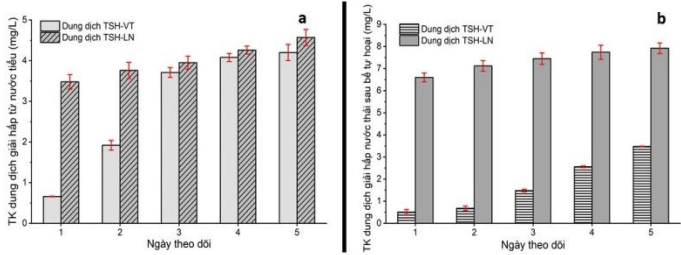
Hình 3.24. Hàm lượng đạm tổng số (TN) sau trong dung dịch dinh dưỡng sau khi giải hấp từ TSH hấp phụ (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại.

* Kết quả giải phóng lân hữu hiệu (TP)



Hình 3.25. Hàm lượng photpho sau trong dung dịch dinh dưỡng sau khi giải hấp từ TSH hấp phụ (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại.

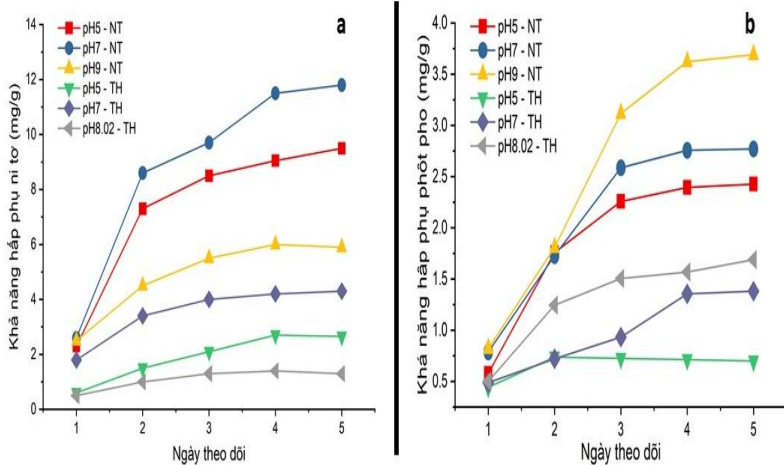
* Kết quả giải phóng kali



Hình 3.26. Hàm lượng kali sau trong dung dịch dinh dưỡng sau khi giải hấp từ TSH hấp phụ (a) nước tiểu người và (b) nước thải sau bể tự hoại.

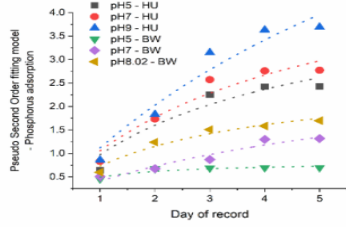
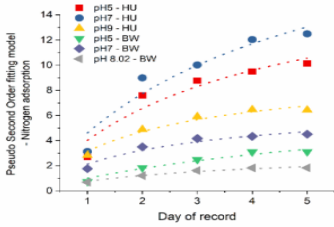
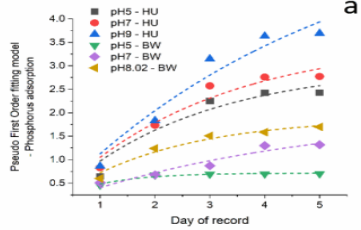
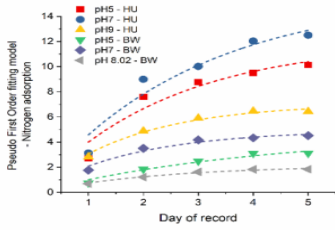
3.2.2.2. Đánh giá ảnh hưởng của độ pH đến hiệu suất thu hồi đạm tổng số và lân hữu hiệu từ nước tiểu người (HU) và nước sau bể tự hoại (BW) bằng than sinh học (biochar) lõi ngô (TSH-LN).

a. Đánh giá ảnh hưởng của pH đến khả năng hấp phụ đạm tổng số và lân hữu hiệu



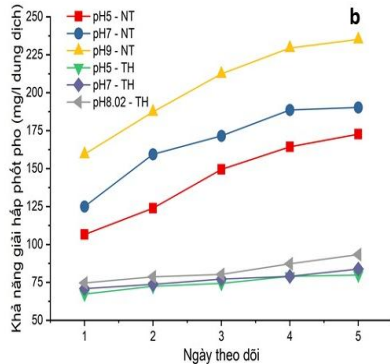
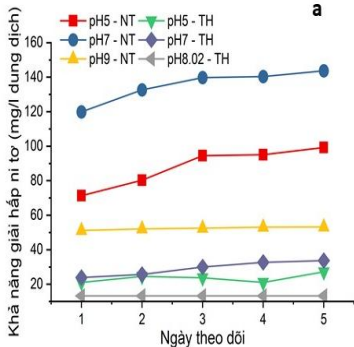
Hình 3.27. Kết quả thí nghiệm hấp phụ dưỡng chất: (a) đạm tổng số, (b) lân hữu hiệu

b. Đánh giá ảnh hưởng của pH đến hiệu suất hấp phụ đạm tổng số và lân hữu hiệu



Hình 3.28. Kết quả mô hình hóa động học: (a) mô hình PFO, (b) mô hình PSO

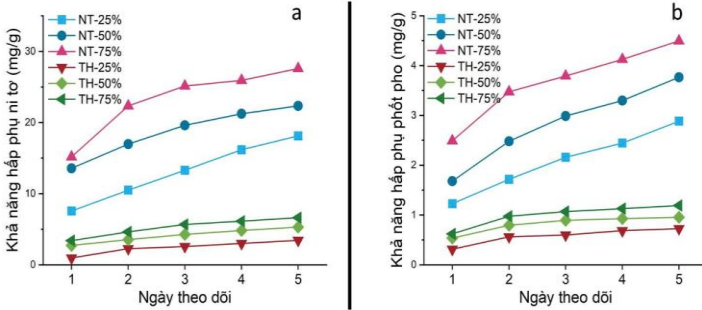
c. Đánh giá khả năng giải hấp đạm tổng số và lân hữu hiệu



Hình 3.29. Kết quả thí nghiệm giải hấp dưỡng chất đối với (a) đạm tổng số và (b) lân hữu hiệu giải hấp vào nước khử ion

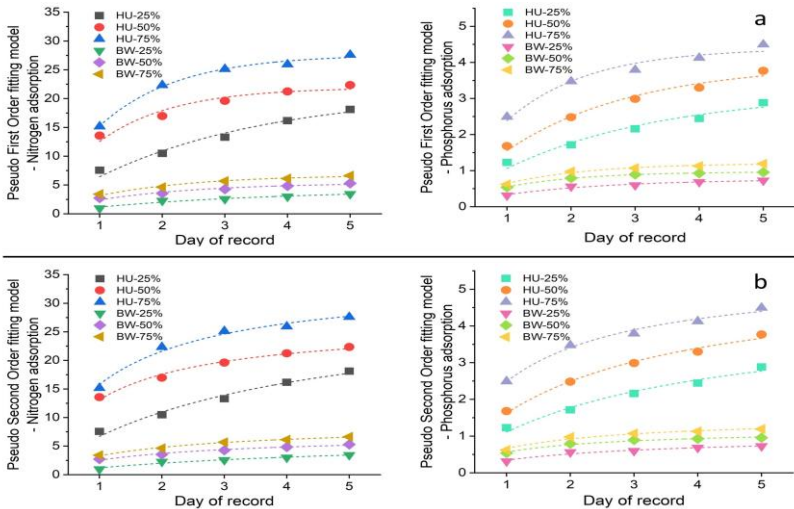
3.2.2.3. Ảnh hưởng của nồng độ đến hiệu suất thu hồi đạm tổng số và lân hữu hiệu từ nước tiểu người và nước sau bể tự hoại bằng than sinh học (biochar) lõi ngô (TSH-LN)

a. Đánh giá ảnh hưởng của nồng độ đến khả năng hấp phụ đạm tổng số và lân hữu hiệu.



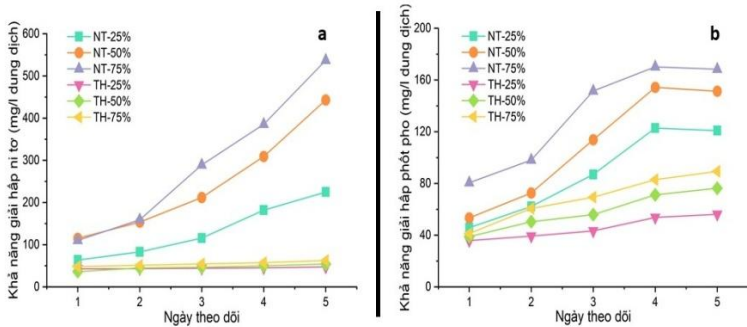
Hình 3.30. Ảnh hưởng của nồng độ đến khả năng hấp phụ đạm tổng số và lân hữu hiệu: (a) đạm tổng số, (b) lân hữu hiệu của TSH-LN của nước tiểu người và nước sau bể tự hoại.

b. Đánh giá ảnh hưởng của nồng độ đến hiệu suất hấp phụ đạm tổng số và lân hữu hiệu



Hình 3.31. Kết quả mô hình hóa động học: (a) mô hình PFO, (b) mô hình PSO của hiệu suất quá trình thu hồi dưỡng chất ở các nồng độ pha loãng

c. Đánh giá khả năng giải hấp ậm tổng số và lân hữu hiệu.



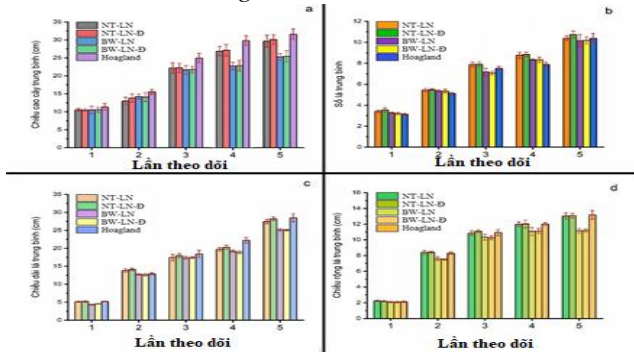
Hình 3.32 Kết quả thí nghiệm giải hấp ậm tổng số và lân hữu hiệu, với (a) là khả năng giải hấp ậm tổng số và (b) là khả năng giải hấp lân hữu hiệu từ TSH-LN đã bão hòa dinh dưỡng.

3.3. Kết quả thử nghiệm đánh giá chất lượng dinh dưỡng trên cây trồng

3.3.1. Đánh giá chất lượng dung dịch

3.3.1.1. Kết quả thử nghiệm trên cây rau cải mè

3.3.1.1.1. Chỉ tiêu sinh trưởng



Hình 3.33. Các chỉ tiêu sinh trưởng của cây rau cải mè được trồng bởi các dung dịch dinh dưỡng mới.

3.3.1.2. Chỉ tiêu về giá trị dinh dưỡng

Bảng 3.5. Giá trị dinh dưỡng trong rau cải mè được canh tác bởi các loại dung dịch dinh dưỡng mới

| Công thức dinh dưỡng | Hàm lượng khô (%) | Hàm lượng nitrate (mg/kg) | Vitamin C (mg/100g) | Carbohydrate tổng (g/100g) | Pb (mg/kg) | Cd (mg/kg) |
|----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|------------|------------|
| NT-LN | 8.75 | 64.85 | 109.38 | 0.53 | 0.013 | 0.008 |
| Std.Error | 0.11 | 0.15 | 0.51 | 0.43 | 0.04 | - |
| NT-LN-Đ | 8.83 | 69.29 | 108.10 | 0.54 | 0.008 | 0.07 |
| Std.Error | 0.17 | 0.03 | 0.41 | 0.32 | 0.03 | - |
| BW-LN | 8.84 | 59.36 | 113.57 | 0.54 | 0.011 | 0.010 |
| Std.Error | 0.09 | 0.07 | 0.30 | 0.67 | 0.03 | - |
| BW-LN-Đ | 8.66 | 60.81 | 109.56 | 0.51 | 0.009 | 0.007 |
| Std.Error | 0.8 | 0.06 | 0.35 | 0.27 | 0.02 | - |
| Hoagland | 7.82 | 85.64 | 102.75 | 0.46 | 0.014 | 0.009 |
| Std.Error | 0.10 | 0.04 | 0.69 | 0.36 | 0.01 | - |

3.3.1.3. Chỉ tiêu về sản lượng

Bảng 3.6. Sản lượng của các mô hình thủy canh trồng rau cải mè sử dụng dung dịch dinh dưỡng mới

| Công thức dinh dưỡng | Khối lượng trung bình mỗi cá thể (g/cây) | | Năng suất lý thuyết (kg/1000 m ²) | | Năng suất thực tế (kg/1000 m ²) | |
|----------------------|--|-------|---|---------|---|---------|
| | Vụ 01 | Vụ 02 | Vụ 01 | Vụ 02 | Vụ 01 | Vụ 02 |
| NT-LN | 86.30 | 84.72 | 2157.42 | 2118.00 | 1859.38 | 1820.83 |
| NT-LN-Đ | 86.77 | 85.11 | 2169.25 | 2127.75 | 1865.56 | 1826.87 |
| BW-LN | 79.86 | 78.09 | 1996.42 | 1952.17 | 1716.15 | 1656.25 |
| BW-LN-Đ | 81.01 | 79.85 | 2025.24 | 1996.25 | 1741.30 | 1697.81 |
| Hoagland | 80.75 | 79.18 | 2018.67 | 1979.50 | 1723.96 | 1687.50 |
| <i>P</i> | 0.041 | 0.043 | 0.041 | 0.044 | 0.0231 | 0.0185 |
| <i>CV (%)</i> | 3.64 | 3.12 | 3.64 | 3.11 | 4.24 | 4.34 |
| <i>LSD.05</i> | 5.59 | 4.69 | 139.81 | 117.09 | 139.28 | 138.34 |

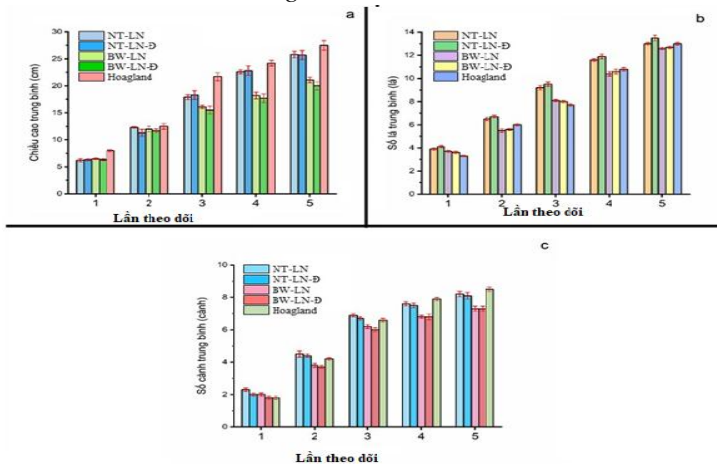
3.3.1.4. Chỉ tiêu về tính kinh tế

Bảng 3.7. Tính kinh tế của các mô hình thủy canh trồng rau cải mè sử dụng dung dịch dinh dưỡng mới

| Công thức dinh dưỡng | Doanh thu | | Chi phí (1.000 VND) | | | Lợi nhuận (1.000 VND) |
|----------------------|----------------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------|-----------------------|
| | Năng suất (kg) | Doanh thu (1.000 VND) | Chi phí chung | Chi phí dinh dưỡng | Tổng chi phí | |
| NT-LN | 1.840 | 27.601 | 11.300 | 3.500 | 14.800 | 12.801 |
| NT-LN-Đ | 1.846 | 27.693 | 11.300 | 3.500 | 14.800 | 12.893 |
| BW-LN | 1.686 | 25.293 | 11.300 | 2.500 | 13.300 | 11.993 |
| BW-LN-Đ | 1.719 | 25.794 | 11.300 | 2.500 | 13.300 | 12.494 |
| Hoagland | 1.705 | 25.585 | 11.300 | 7.700 | 19.000 | 6.585 |

3.3.2. Nghiên cứu thử nghiệm trên cây húng quế

3.3.2.1. Chỉ tiêu sinh trưởng



Hình 3.34. Các chỉ tiêu sinh trưởng của cây húng quế được trồng bởi các dung dịch dinh dưỡng mới.

3.3.2.2. *Chỉ tiêu về giá trị dinh dưỡng*

Bảng 3.8. Giá trị dinh dưỡng trong rau húng quế được canh tác bởi các loại dung dịch dinh dưỡng mới

| Công thức dinh dưỡng | Hàm lượng khô (%) | Hàm lượng nitrate (mg/kg) | Vitamin C (mg/100g) | Carbohydrate tổng (g/100g) | Pb (mg/kg) | Cd (mg/kg) |
|----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------|------------|------------|
| NT-LN | 11.29 | 61.66 | 120.33 | 0.48 | 0.010 | 0.008 |
| Std.Error | 0.12 | 0.10 | 0.52 | 0.03 | 0.003 | - |
| NT-LN-Đ | 11.29 | 62.22 | 123.68 | 0.46 | 0.008 | 0.008 |
| Std.Error | 0.15 | 0.09 | 0.47 | 0.04 | 0.002 | - |
| BW-LN | 10.73 | 57.53 | 96.81 | 0.43 | 0.008 | 0.008 |
| Std.Error | 0.10 | 0.12 | 0.35 | 0.03 | 0.002 | - |
| BW-LN-Đ | 10.80 | 57.94 | 96.75 | 0.41 | 0.010 | 0.013 |
| Std.Error | 0.08 | 0.11 | 0.37 | 0.04 | 0.003 | - |
| Hoagland | 11.03 | 120.41 | 111.40 | 0.43 | 0.011 | 0.010 |

3.3.2.3. *Chỉ tiêu về sản lượng*

Bảng 3.9. Sản lượng của các mô hình thủy canh trồng húng quế sử dụng dung dịch dinh dưỡng mới

| Công thức dinh dưỡng | Khối lượng trung bình mỗi cá thể (g/cây) | | Năng suất lý thuyết (kg/1000 m ²) | | Năng suất thực tế (kg/1000 m ²) | |
|----------------------|--|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|
| | Vụ 01 | Vụ 02 | Vụ 01 | Vụ 02 | Vụ 01 | Vụ 02 |
| NT-LN | 21.24 ^e | 19.33 ^e | 530.9 ^e | 483.3 ^e | 457.5 ^e | 419.4 ^e |
| NT-LN-Đ | 21.4 ^d | 19.74 ^d | 534.8 ^d | 493.5 ^d | 461 ^d | 425.4 ^d |
| BW-LN | 15.56 ^c | 14.6 ^c | 389 ^c | 364.9 ^c | 334.1 ^c | 310.9 ^c |
| BW-LN-Đ | 15.47 ^b | 14.38 ^b | 386.4 ^b | 359.4 ^b | 332.3 ^b | 309.1 ^b |
| Hoagland | 22.61 ^a | 21.84 ^a | 565.3 ^a | 545.9 ^a | 480.5 ^a | 469.9 ^a |
| P | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 |

| | | | | | | |
|--------------------|------|------|--------|--------|--------|--------|
| CV (%) | 6.95 | 5.98 | 6.95 | 5.98 | 4.74 | 5.02 |
| LSD _{.05} | 8.33 | 7.18 | 208.25 | 179.53 | 123.59 | 131.33 |

3.3.2.4. Tính kinh tế

Bảng 3.10. Tính kinh tế của các mô hình thủy canh trồng húng quế sử dụng dung dịch dinh dưỡng mới

| Công thức dinh dưỡng | Doanh thu | | Chi phí (1.000 VND) | | | Lợi nhuận (1.000 VND) |
|----------------------|----------------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------|-----------------------|
| | Năng suất (kg) | Doanh thu (1.000 VND) | Chi phí chung | Chi phí dinh dưỡng | Tổng chi phí | |
| NT-LN | 438.5 | 24.118 | 11.300 | 3.500 | 14.800 | 9.318 |
| NT-LN-Đ | 443.2 | 24.376 | 11.300 | 3.500 | 14.800 | 9.576 |
| BW-LN | 349.5 | 19.222 | 11.300 | 2.500 | 13.300 | 5.922 |
| BW-LN-Đ | 320.7 | 17.638 | 11.300 | 2.500 | 13.300 | 4.338 |
| Hoagland | 475.2 | 26.136 | 11.300 | 7.700 | 19.000 | 7.136 |

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Kết quả nghiên cứu trên nước thải giả định cho thấy biochar từ phụ phẩm nông nghiệp có khả năng thu hồi hiệu quả các chất dinh dưỡng (N, P, K), trong đó hiệu suất phụ thuộc rõ rệt vào loại vật liệu và điều kiện vận hành. Cụ thể, biochar lõi ngô (TSH-LN) thể hiện ưu thế trong hấp phụ K (60–75% sau 6–12 giờ) và P (duy trì 10 mg/L), trong khi biochar vỏ trấu (TSH-VT) hiệu quả hơn với N trong thời gian dài (giảm 25–30% sau 5 ngày). Mô hình hấp phụ tĩnh cho hiệu quả ổn định hơn so với hấp phụ động, đặc biệt đối với TN, và nồng độ đầu vào 100% (N = 2371 mg/L; P = 110 mg/L; K = 215 mg/L) là điều kiện tối ưu. Đồng thời, tăng tỷ lệ vật liệu từ 0,05/1 lên 0,1/1 giúp nâng hiệu suất hấp phụ TN từ 20% lên 35–40%, nhưng có xu hướng bão hòa ở 0,15/1. Các kết quả này làm rõ vai trò của các cơ chế trao đổi ion, hấp phụ bề mặt và khuếch tán nội hạt, qua đó khẳng định khả

năng tối ưu hóa điều kiện để nâng cao hiệu quả thu hồi dinh dưỡng từ nước thải giả định.

Kết quả nghiên cứu cho thấy cả hai loại biochar đều có cấu trúc xốp và giàu nhóm chức bề mặt, tuy nhiên biochar lõi ngô (TSH-LN) thể hiện ưu thế vượt trội về khả năng hấp phụ và tương tác hóa học. Phân tích SEM-EDS và XRD xác nhận sự hình thành kết tủa phosphate rõ rệt cùng sự gia tăng các nguyên tố dinh dưỡng (Mg, Ca, K, P) trên TSH-LN. Về hiệu quả xử lý, TSH-LN đạt hiệu suất loại bỏ cao hơn đáng kể (TOC = 87%, TN = 54%, TK = 77% trong nước tiểu), đồng thời hấp phụ đạm tối ưu ở pH trung tính (10,702 mg/g) và lân ở pH kiềm (3,691 mg/g). Phân tích động học cho thấy đạm tuân theo mô hình PFO, trong khi lân có xu hướng hóa hấp phụ ở điều kiện kiềm. Quá trình giải hấp thu được dung dịch giàu dinh dưỡng (tới 550 mg/L N và 265,73 mg/L P), khẳng định tiềm năng tái sử dụng. Nhìn chung, TSH-LN là vật liệu chi phí thấp, hiệu quả cao cho thu hồi và tái sử dụng dinh dưỡng trong xử lý nước thải theo hướng kinh tế tuần hoàn.

Kết quả cho thấy dung dịch NT-LN và NT-LN-Đ từ biochar lõi ngô có hiệu quả cao, với mật độ vi sinh đạt $1,13-1,19 \times 10^6$ CFU/mL, không phát hiện E.coli và kim loại nặng đều $<0,001$ mg/L. Hàm lượng P (47,50–92,99 mg/L) và K (133,24–330,64 mg/L) cao hơn rõ rệt so với Hoagland, dù N thấp hơn (29,61–48,53 so với 93,75 mg/L). Trên cải mè, NT-LN đạt khối lượng 86,77 g/cây và năng suất thực tế 1865,56 kg/1000 m², cao hơn Hoagland (1723,96 kg/1000 m²). Trên húng quế, NT-LN đạt năng suất 461 kg/1000 m², tiệm cận Hoagland (480,5 kg/1000 m²) nhưng có vitamin C cao hơn (120,33 so với 111,40 mg/100g) và nitrate thấp hơn (61–62 so với 120,41 mg/kg). Về kinh tế, NT-LN-Đ cho lợi nhuận cao nhất (12,89 triệu VND/vụ cải mè; 9,58 triệu VND/vụ húng quế), vượt Hoagland (6,59 và 7,14 triệu VND). Kết quả xác nhận giả thuyết về khả năng thu hồi và tái sử dụng dinh dưỡng hiệu quả từ nước thải bằng biochar.

2. Kiến nghị

Dựa trên các kết quả đạt được, nghiên cứu khẳng định biochar từ lõi ngô (TSH-LN) là vật liệu có hiệu quả cao trong hấp phụ và giải hấp các chất dinh dưỡng (N-P-K), đồng thời có khả năng tái sử dụng trong sản xuất nông nghiệp. Phát hiện này cho thấy tiềm năng ứng dụng biochar không chỉ trong xử lý nước thải mà còn trong xây dựng mô hình nông nghiệp tuần hoàn quy mô nhỏ và trung bình.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất một số định hướng ứng dụng và kiến nghị như sau:

Ứng dụng thực tiễn: Mô hình xử lý nước thải kết hợp thu hồi dinh dưỡng bằng biochar có thể triển khai tại các homestay nông nghiệp, trang trại sinh thái nhằm tận dụng nguồn thải tại chỗ, tạo vòng tuần hoàn dinh dưỡng khép kín. Đồng thời, mô hình này có thể áp dụng tại trường học như một hệ thống thực hành ngoại khóa, giúp học sinh tiếp cận kiến thức về môi trường, xử lý nước thải và nông nghiệp bền vững.

Kiến nghị 1 (công nghệ): Tối ưu hóa quy trình sản xuất biochar từ phụ phẩm nông nghiệp (đặc biệt là lõi ngô) nhằm nâng cao diện tích bề mặt và khả năng trao đổi ion, từ đó cải thiện hiệu suất hấp phụ amoni và các chất dinh dưỡng.

Kiến nghị 2 (vận hành): Xây dựng và hoàn thiện các điều kiện vận hành tối ưu cho quá trình hấp phụ amoni, bao gồm pH, nồng độ đầu vào và tỷ lệ vật liệu, nhằm đảm bảo hiệu quả xử lý ổn định trong điều kiện nước thải thực tế.

Kiến nghị 3 (mô hình ứng dụng): Phát triển mô hình xử lý tích hợp hấp phụ amoni bằng biochar kết hợp với các công nghệ sinh học hoặc hệ thống trồng cây (thủy canh, đất), hướng tới ứng dụng quy mô thực tế trong nông nghiệp tuần hoàn.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Quang, N. V.**, Khai, N. M., Hung, N. T., Chi, V. D. L., & Hang, T. T. M. (2024, August). Recycling plant nutrients in mixing several organic to serve hydroponic cultivation of vegetables and herbs, enhancing circulatory economy. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1383, No. 1, p. 012003). IOP Publishing. **Scopus**
2. **Van Nguyen, Q.**, Nguyen, K. M., Nguyen, H. T., Duong, T. D., Dong, M. N. T., Tran, H. M. T., & Van Hoang, H. (2025). Evaluation of adsorption and desorption of wastewater onto rice husk biochar on the course of hydroponic nutrient production. Biomass Conversion and Biorefinery, 1-14. SCIE, Q2
3. **Van Nguyen, Q.**, Nguyen, K. M., Van Hoang, H., Duong, T. D., Dong, M. T. N., & Tran, H. T. M. (2025). Transforming Domestic Wastewater into Hydroponic Nutrients Using Corncob-Derived Biochar Adsorption. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 1-17. SCIE, Q2
4. **Van Nguyen, Q.**, Tran, H. M. T., Van Hoang, H., & Nguyen, K. M. (2025). The Effect of pH on Nitrogen and Phosphorus Recovery Efficiency From Wastewater Using Biochar Derived From Corncob. Water, Air, & Soil Pollution, 236(11), 1-13. SCIE, Q2
5. Bằng độc quyền sáng chế số 3645 tại Quyết định số 89522/QĐ-SHTT ngày 25/07/2024. Tên giải pháp hữu ích: Quy trình sản xuất dung dịch dinh dưỡng cho cây trồng từ nước tiểu.