

THIẾT KẾ VÀ ĐÁNH GIÁ MÔ HÌNH NÔNG NGHIỆP TÍCH HỢP HƯỚNG TỚI KHÔNG PHÁT THẢI, ỨNG DỤNG TẠI TRANG TRẠI TRỒNG CÂY ĂN QUẢ QUY MÔ TẬP TRUNG Ở AN GIANG

NGUYỄN QUỐC AN¹, ĐỖ THỊ THU HUYỀN¹, LÊ QUỐC VĨ¹, NGUYỄN THỊ PHƯƠNG THẢO¹, TRẦN TRUNG KIÊN¹, NGUYỄN TRẦN THIÊN KHÁNH², NGÔ THỊ PHƯƠNG NAM¹

¹Viện Môi trường và Tài nguyên, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

²Trường Đại học An Giang, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

Tóm tắt:

Tình trạng ô nhiễm do chất thải nông nghiệp tại các trang trại cây ăn quả kết hợp chăn nuôi đang trở thành vấn đề nghiêm trọng tại nhiều địa phương ở đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), đặc biệt là tỉnh An Giang. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm thiết kế và đánh giá mô hình nông nghiệp tích hợp hướng tới không phát thải cho một trang trại trồng mít quy mô 2,5 ha kết hợp nuôi dê tại xã Vĩnh Phú, huyện Thoại Sơn. Phương pháp nghiên cứu bao gồm: Khảo sát các hộ dân; lấy mẫu môi trường (đất, nước); áp dụng công cụ SWOT, DPSIR và triển khai thí điểm mô hình tuần hoàn khép kín (đệm lót sinh học - ủ compost - sản xuất biochar - ao thủy sinh). Kết quả dự báo mô hình giúp giảm 75% BOD₅, > 80% NH₄⁺ trong nước thải, cải thiện độ phì nhiêu đất, tiết kiệm 50% chi phí phân bón hóa học và nhiên liệu, với thời gian hoàn vốn khoảng 3 năm và IRR đạt khoảng 20%. Mô hình cũng được dự báo có khả năng tích hợp linh hoạt nhiều công nghệ sinh thái đơn giản, phù hợp quy mô hộ gia đình, góp phần BVMT, tăng hiệu quả sản xuất. Trên cơ sở đó, nhóm nghiên cứu đề xuất nhân rộng mô hình cho các trang trại tương tự tại ĐBSCL, kết hợp hỗ trợ kỹ thuật - chính sách và tiếp tục nghiên cứu hiệu quả dài hạn của biochar, khả năng xử lý nước thải nâng cao, ứng dụng năng lượng tái tạo trong hệ thống nông nghiệp khép kín.

Từ khóa: Nông nghiệp không phát thải, mô hình tuần hoàn, compost và biochar, trang trại cây ăn quả, ĐBSCL.

Ngày nhận bài: 24/12/2024; Ngày sửa chữa: 18/2/2025; Ngày duyệt đăng: 24/3/2025.

Design and evaluation of an integrated agricultural model toward zero emissions applied to a concentrated fruit farming system in An Giang province

Abstract:

Agricultural waste pollution at fruit tree farms combined with livestock raising has become a serious issue in many areas of the Mekong Delta, particularly in An Giang province. This study was conducted to design and evaluate an integrated low-emission agricultural model for a 2.5 hectare jackfruit farm combined with goat rearing in Vinh Phu commune, Thoai Son district. The research methods included household surveys, environmental sampling (soil and water), application of SWOT and DPSIR frameworks, and pilot implementation of a closed-loop system integrating bio-litter bedding, composting, biochar production, ecological pond treatment. The preliminary results suggest that the model can reduce BOD₅ by 75% and NH₄⁺ by over 80% in wastewater, enhance soil fertility, and lower chemical fertilizer and energy costs by approximately 50%, with an estimated payback period of three years and an internal rate of return (IRR) of around 20%. The model also demonstrates flexibility in integrating simple ecological technologies suitable for household-scale farms, contributing to both environmental protection and production efficiency. Based on these findings, the research team recommends scaling up the model for similar farms in the Mekong Delta, with combined support in technology and policy, and further studies on the long-term effects of biochar, advanced wastewater treatment, and the integration of renewable energy into circular agricultural systems.

Keywords: Low-emission agriculture, circular model, compost and biochar, fruit tree farm, Mekong Delta.

JEL Classifications: O13, O44, Q51, Q53, R11.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, hoạt động nông nghiệp tại Việt Nam đang đối mặt với nhiều thách thức nghiêm trọng liên quan đến ô nhiễm môi trường. Sự phát triển thâm canh trong cả trồng trọt và chăn nuôi đã làm phát sinh một lượng lớn chất thải nông nghiệp, trong đó phần lớn chưa được xử lý triệt để. Theo ước tính, tổng lượng chất thải chăn nuôi trên phạm vi cả nước vào khoảng 60 - 80 triệu tấn/năm, trong đó có đến gần 36% đang xả trực tiếp ra môi trường mà không qua xử lý phù hợp (Nguyen et al., 2017; Trung & cs, 2024). Thực trạng này đặc biệt đáng lo ngại ở những vùng chuyên canh cây ăn quả kết hợp chăn nuôi quy mô hộ gia đình, nơi thiếu cơ sở hạ tầng xử lý và nhận thức cộng đồng còn hạn chế.

Tại tỉnh An Giang - một trong những địa phương trọng điểm của ĐBSCL về phát triển cây ăn quả, huyện Thoại Sơn đang đẩy mạnh tái cơ cấu nông nghiệp. Theo kế hoạch, toàn huyện thực hiện chuyển đổi thêm 95 ha đất trồng lúa kém hiệu quả sang trồng rau màu và cây ăn quả, nâng tổng diện tích cây ăn quả toàn huyện lên khoảng 1.000 ha vào cuối năm 2024 (Sở NN&PTNT tỉnh An Giang, 2023). Trong số các loại cây trồng chủ lực, cây mít đang ngày càng chiếm ưu thế nhờ khả năng thích nghi tốt với điều kiện khí hậu - thổ nhưỡng, cho năng suất ổn định và giá trị kinh tế cao. Mít được trồng tập trung tại các xã Vĩnh Phú, Vĩnh Trạch, Định Thành, với quy mô mỗi hộ từ vài nghìn đến hàng chục nghìn m². Tuy nhiên, quá trình chăm sóc, canh tác mít cũng phát sinh nhiều phụ phẩm nông nghiệp như lá, cành tỉa, vỏ quả, phần lớn chưa được xử lý mà thường được đốt trực tiếp ngoài đồng, gây phát thải nhiều chất độc hại cho sức khỏe con người và ảnh hưởng đến chất lượng không khí địa phương.

Song song với trồng cây ăn quả, nhiều hộ nông dân tại Thoại Sơn còn kết hợp chăn nuôi quy mô vừa và nhỏ như nuôi dê, bò, nhằm tận dụng mặt bằng chuồng trại, phụ phẩm nông nghiệp làm thức ăn thô xanh và tạo thêm nguồn thu. Tuy nhiên, việc thiếu mô hình xử lý chất thải đồng bộ khiến lượng phân, nước tiểu từ đàn vật nuôi thải ra môi trường một cách tự phát, thấm trực tiếp xuống đất, chảy ra kênh mương hoặc phát tán mùi hôi trong không khí, ảnh hưởng đến chất lượng đất, nước mặt và sức khỏe cộng đồng nếu không được kiểm soát hợp lý.

Các mô hình nông nghiệp tuần hoàn và không phát thải đã được nghiên cứu, áp dụng nhằm giải quyết những vấn đề nêu trên. Ở Việt Nam, mô hình VAC (Vườn - Ao - Chuồng) là một hệ thống canh tác tích hợp truyền thống, kết hợp vườn cây, ao cá, chuồng chăn nuôi để tận dụng tuần hoàn chất thải trong quy mô hộ gia đình (Trọng & cs, 2013). Mô hình VAC đã chứng minh hiệu quả trong việc tận dụng phụ phẩm nông nghiệp và cải thiện sinh kế nông thôn suốt nhiều thập kỷ qua. Bên cạnh VAC, nhiều khái niệm hiện đại

hơn cũng đã được phát triển trên thế giới, chẳng hạn như Hệ thống sinh học tích hợp (Integrated Biosystems - IBS) (Foo et al., 2002) và Hệ thống không phát thải (Zero Emission Systems - ZETS) (Schnitzer et al., 2007) nhấn mạnh việc thiết kế trang trại như một hệ sinh thái khép kín, trong đó chất thải của quá trình này trở thành đầu vào cho quá trình khác. Gần đây, nghiên cứu về mô hình tích hợp VACBNXT của Lê Thanh Hải và cs, 2016 đã mở rộng khái niệm này bằng cách tích hợp các công nghệ tiên tiến như hệ thống biogas, bể ủ compost, lò đốt biochar, nhằm tối ưu hóa chu trình tuần hoàn, đồng thời tạo ra giá trị kinh tế mới từ chất thải nông nghiệp. Mô hình VACBNXT không chỉ cải thiện hiệu quả xử lý chất thải mà còn giúp tăng cường khả năng giữ nước, cải tạo đất, giảm phát thải khí nhà kính, từ đó mang lại lợi ích về kinh tế và môi trường. Nghiên cứu cho thấy, so với mô hình VAC truyền thống, VACBNXT có khả năng tái sử dụng chất thải đạt trên 90% và tiết kiệm chi phí đầu vào lên đến 50%, đồng thời cải thiện năng suất cây trồng cũng như sức khỏe đàn vật nuôi (Hải & cs, 2016).

Mặc dù vậy, hiện vẫn thiếu các mô hình tích hợp được thiết kế cụ thể cho trang trại cây ăn quả quy mô tập trung kết hợp với chăn nuôi hộ tại các địa phương, điển hình là An Giang. Xuất phát từ khoảng trống khoa học này và nhu cầu thực tiễn tại địa phương, nghiên cứu được thực hiện nhằm thiết kế, đánh giá một mô hình nông nghiệp tích hợp hướng tới không phát thải cho một trang trại trồng mít có quy mô tương đối lớn kết hợp chăn nuôi dê tại An Giang.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện tại trang trại hộ ông Trần Duy Đức (ấp Trung Phú 2, xã Vĩnh Phú, huyện Thoại Sơn, tỉnh An Giang), có quy mô 2,5 ha, trồng mít kết hợp chăn nuôi trên 60 con dê. Đây là mô hình tích hợp tiêu biểu tại địa phương, nơi nhiều hộ kết hợp trồng cây ăn quả và chăn nuôi quy mô nhỏ.

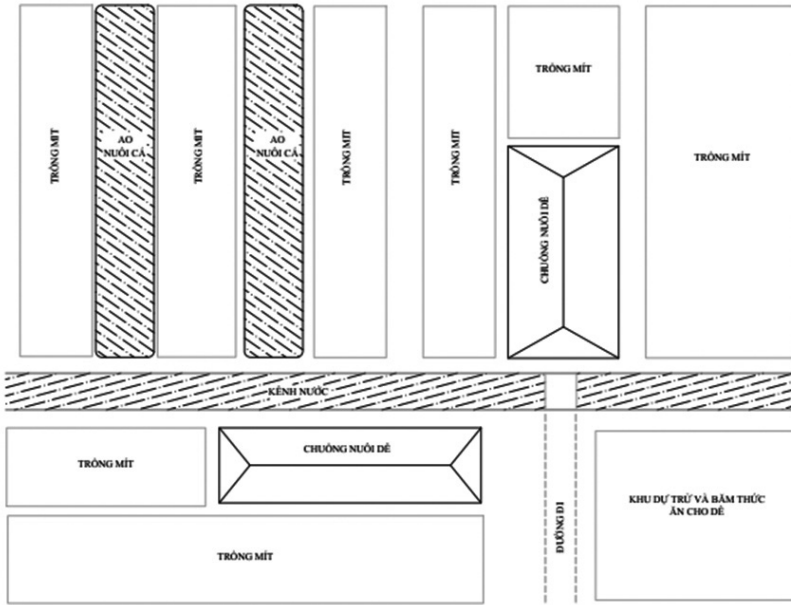
2.2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp đánh giá hiện trạng

Nhóm nghiên cứu thu thập 3 mẫu đất tầng canh tác, 2 mẫu nước ngầm, 2 mẫu nước tưới (từ ao cá cũ), lấy vào tháng 5/2024, phân tích theo QCVN 03-MT:2015 (đất) và QCVN 08-MT:2015 (nước mặt), với các chỉ tiêu pH, OM, COD, BOD₅... Ngoài ra, khảo sát 15 hộ (1 hộ thực hiện mô hình, 14 hộ xung quanh) thông qua bảng hỏi về quy mô sản xuất, chi phí đầu vào, phụ phẩm và khó khăn trong công tác quản lý chất thải (QLCT). Dữ liệu được tổng hợp, phân tích theo công cụ SWOT, mô hình DPSIR để xác định nguyên nhân - hệ quả các vấn đề môi trường tại hộ.

Phương pháp thiết kế và triển khai mô hình

Mô hình được xây dựng dựa trên việc kế thừa cấu



Hình 1. Sơ đồ tổng quát mặt bằng của hộ

trúc VACBNXT do nhóm nghiên cứu của GS.TS. Lê Thanh Hải phát triển (Hải & cs, 2016). Nguyên tắc thiết kế là tối ưu hóa tuần hoàn nội bộ giữa trồng trọt và chăn nuôi, giảm thiểu dòng thải ra môi trường thông qua tái sử dụng, tái chế toàn bộ phụ phẩm hữu cơ tại chỗ.

Các hạng mục thiết kế được triển khai xây dựng từ tháng 8 - 9/2024 và vận hành từ 10/2024. Nông hộ được tập huấn kỹ thuật trước khi vận hành.

Phương pháp đánh giá hiệu quả sau triển khai

- *Môi trường*: Lấy 3 mẫu nước thải đầu vào sau xử lý và 3 mẫu đất canh tác để phân tích các chỉ tiêu BOD₅, COD, NH₄⁺ (nước); pH, OM, N tổng (đất).

- *Kỹ thuật - kinh tế*: Theo dõi lượng phân bón và nhiên liệu LPG sử dụng trong 1 tháng trước - sau mô hình; đo khối lượng compost, biochar... quy đổi chi phí tiết kiệm theo đơn giá địa phương. Tính toán CBA: Tổng hợp chi phí đầu tư mô hình; tính dòng tiền tiết kiệm từ phụ phẩm và đầu vào giảm; xác định thời gian hoàn vốn, hiệu quả tài chính theo khung phân tích chi phí - lợi ích đơn giản.

Phương pháp xử lý dữ liệu

Dữ liệu được tổng hợp, mã hóa, xử lý bằng các phần mềm Excel, SPSS, so sánh trước - sau và đánh giá hiệu quả theo từng chỉ tiêu môi trường, kinh tế.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá hiện trạng đối tượng nghiên cứu

Qua quá trình khảo sát và kết quả phân tích mẫu cho thấy:

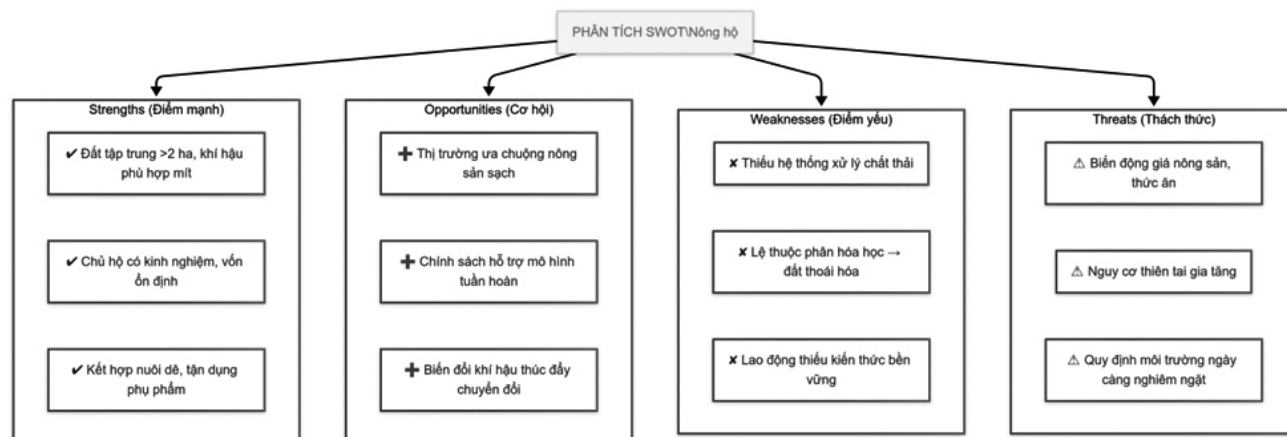
⇒ *Về chất lượng đất*: Phân tích mẫu đất vườn cho thấy pH đất ở mức 5,5 - 6,0, thấp hơn ngưỡng tối ưu cho cây ăn quả (khoảng pH 6,5 - 7,0) (Raese et al., 1994). Hàm lượng chất hữu cơ (OM) trong đất khá thấp, khoảng 2,0%. Mặc dù các kim loại nặng trong đất (As, Pb, Cd) đều nằm dưới giới hạn cho phép của QCVN 03-MT:2015/BTNMT, đất có dấu hiệu tích lũy dinh dưỡng vô cơ: Hàm lượng nitrat (NO₃⁻) trong đất mặt cao (khoảng 45 mg/kg).

⇒ *Về chất lượng nước*: Kết quả phân tích mẫu nước mặt tại ao cá (đang để trống) của hộ là: BOD₅ (80 mg/L), COD (150 mg/L), NH₄⁺

(25 mg/L). Căn cứ QCVN 08:2023/BTNMT chất lượng nước được phân loại ở mức D - Tức chất lượng rất xấu. Nước ao màu xanh, có mùi hôi nhẹ, pH ở mức 7,8 và giàu dinh dưỡng (tổng phosphor > 4 mg/L), có dấu hiệu của hiện tượng phú dưỡng cục bộ do tích tụ phân dê, phân bón rửa trôi. Mẫu nước ngầm ghi nhận nồng độ nitrat là 12 mg/L và tổng Coliform đạt 52 MPN/100 mL, mặc dù giá trị nitrat còn thấp, nhưng sự hiện diện của Coliform cho thấy có nguy cơ ô nhiễm vi sinh.

⇒ *Về khía cạnh kinh tế*: Kết quả điều tra 15 hộ nông dân (1 hộ thực hiện mô hình và 14 hộ xung quanh) cho thấy, thu nhập bình quân từ trồng mít của một hộ khoảng 80 - 100 triệu đồng/ha/năm, đồng thời mỗi ha mít tiêu tốn trung bình 8 - 10 triệu đồng/năm cho phân bón và thuốc bảo vệ thực vật, cùng với đó là khoảng hơn 3 triệu đồng cho nhiên liệu (dầu máy bơm nước, điện). Chăn nuôi dê quy mô nhỏ (10 - 15 con/hộ) mang lại thu nhập bổ sung khoảng 30 - 40 triệu đồng/năm. Kết quả khảo sát cho thấy, hộ đang đối mặt với 3 nhóm khó khăn chính: Chi phí sản xuất cao do giá phân bón, thức ăn chăn nuôi tăng; sâu bệnh, rui ro thị trường (54% hộ từng bị sâu đục trái mít, giá cả biến động gây thu nhập không ổn định); sức ép môi trường khi trên 85% hộ đốt cành lá sau thu hoạch, khoảng 73% xả nước thải chăn nuôi trực tiếp ra môi trường.

Hình 2 cho thấy, trang trại sở hữu nhiều lợi thế tự nhiên, kinh nghiệm sản xuất, song vẫn tồn tại hạn chế trong QLCT và tiếp cận mô hình canh tác bền vững. Kết hợp với kết quả phân tích SWOT, mô hình DPSIR được áp dụng để hiểu rõ mối quan hệ nhân quả trong hiện trạng của trang trại: Động lực (drivers) chính là nhu cầu mở rộng sản xuất và lợi nhuận từ thị trường trái cây, thịt dê, cùng với chính sách khuyến khích phát triển nông nghiệp hàng hóa. Những động lực này tạo ra áp lực (pressures) lên môi trường như tăng sử dụng phân hóa học, tăng quy mô đàn dê - kéo theo nhiều chất thải hơn. Kết quả, tình trạng môi trường (state) của



Hình 2. Sơ đồ phân tích SWOT cho hiện trạng của hộ

khu vực có dấu hiệu suy giảm: Nước ao tù nhiễm bẩn, đất vườn thiếu dinh dưỡng hữu cơ, hệ sinh thái vi sinh trong đất và nước bị ảnh hưởng. Các tác động hậu quả (impacts) đã xuất hiện như nước ao giàu dinh dưỡng gây tảo phát triển làm cá chậm phát triển, đất chua, nghèo mùn làm cây trồng kém bền vững, mùi hôi ảnh hưởng đến sức khỏe, cuộc sống sinh hoạt của người dân xung quanh. Thực tế này đòi hỏi phản hồi (response) từ cộng đồng và chủ trang trại: Cần áp dụng các giải pháp canh tác sinh thái, tuần hoàn để giảm phát thải, phục hồi môi trường.

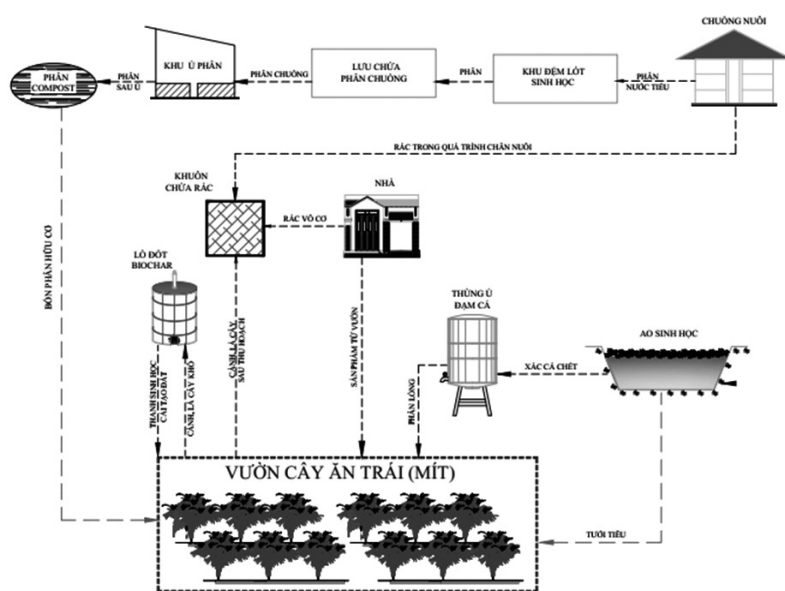
So sánh với các nghiên cứu tương tự, nhiều trang trại cây ăn quả khác ở ĐBSCL cũng ghi nhận tình trạng lạm dụng phân hóa học dẫn đến thoái hóa đất, ô nhiễm nước mặt cục bộ (Yến & cs, 2019; Quang & cs, 2020). Mức độ ô nhiễm tại hộ nhìn chung chưa nghiêm trọng trên diện rộng (chưa phát hiện kim loại nặng hoặc hóa chất vượt chuẩn trong đất, nước ngầm), nhưng những chỉ dấu như BOD_5 , NH_4^+ cao trong nước thải và đất thiếu mùn là đáng lo ngại. Nguyên nhân chính được xác định là do hạn chế trong QLCT và phụ phẩm - một điểm yếu mà SWOT đã nêu. Hộ hiện chưa tận dụng được phế phẩm để tạo giá trị, do đó rất cần một mô hình QLCT tích hợp nhằm biến các dòng thải hiện hữu thành tài nguyên, góp phần khắc phục những điểm yếu hiện tại.

3.2. Thiết kế và triển khai xây dựng mô hình nông nghiệp tích hợp

Trên cơ sở hiện trạng và nhu cầu cải thiện, nhóm nghiên cứu đã đề xuất mô hình nông nghiệp tích hợp cho trang trại như Hình 3.

Trong mô hình này, các dòng phụ phẩm và chất thải được tuần hoàn giữa các hợp phần. Cụ thể, khoảng 45 - 50 kg phân dê/ngày được thu gom, trong khi đó, 60 - 80 lít nước tiểu/ngày được hấp thụ vào lớp đệm lót sinh học; đệm lót sau 2 - 3 tuần được đưa sang ngăn chứa, phối trộn với phân dê, phụ phẩm để ủ compost hiếu khí trong 45 - 60 ngày. Quá trình ủ diễn ra trong bể xây có mái che; cấp khí cưỡng bức bằng quạt ly tâm công suất 0,5 kW; tỷ lệ phối trộn 70 : 30 (đệm lót : phân), độ ẩm duy trì 55 - 60%; tỷ lệ C/N dự kiến khoảng 22 : 1. Compost sau ủ được sử dụng làm phân bón hữu cơ cho cây trồng. Mặt khác, toàn bộ cành lá khô từ vườn mít khoảng ~ 0,5 - 0,7 tấn/tháng được thu gom, đốt yếm khí trong lò biochar thể tích 0,8 m³; mỗi mẻ 40 - 50 kg phụ phẩm, tạo ra 10 - 12 kg biochar, đủ bón cải tạo đất cho toàn bộ vườn mít 2 ha với lượng biochar khoảng 1 - 1,2 tấn/ha/năm.

Ao thủy sinh có diện tích 400 m², sâu 1,2 m đã được lót bạt HDPE từ trước. Sau khi cải tạo, ao được bổ sung bèo, lục bình và nuôi cá



Hình 3. Sơ đồ mô hình nông nghiệp tích hợp đề xuất cho hộ

Bảng 1. Thông số chi tiết các hạng mục triển khai cho mô hình của hộ

TT	Hạng mục	Mô tả
1	Ngăn chứa đệm lót sinh học	DxRxC: 5,0 x 8,0 x 0,8 m; Vật liệu: Gạch, xi măng, đệm lót sinh học
2	Hệ thống phun vi sinh	DxRxC: 5,0 x 8,0 m; Vật liệu: Ống nhựa, béc phun, vi sinh EM
3	Ngăn chứa phân	DxRxC: 2,0 x 4,0 x 0,8m; Vật liệu: Gạch, xi măng, mái tôn
4	Ngăn ủ phân	DxRxC: 2,0 x 4,0 x 0,8 m; Vật liệu: Gạch, xi măng, mái tôn
5	Ao thủy sinh	Diện tích: 400 m ² ; cải tạo từ ao cũ đã lót bạt HDPE, độ sâu 1,2 - 1,5 m
6	Thiết bị ủ phân đạm cá	Thùng nhựa 250 L
7	Lò đốt biochar	Thể tích: 0,8 m ³ ; lò bằng thép hàn, dạng thùng đứng
8	Khu chứa rác	DxRxC: 2,0 x 2,0 x 0,8 m; Vật liệu: Gạch, xi măng, mái tôn
9	Hệ thống tưới tiêu tự động	Hệ thống gồm bơm điện, ống dẫn và béc nhỏ giọt
10	Chuồng nuôi	Diện tích: 50 m ² ; cải tạo, thay thế sàn, máng uống, vệ sinh chuồng

rô phi nhằm xử lý sinh học phần nước tồn đọng trong hệ thống. Dù không tiếp nhận nước thải (nước tiểu dê) trực tiếp từ chuồng trại, nhưng với vai trò là nơi chứa, cải thiện chất lượng nước từ các nguồn nội sinh (nước rửa chuồng, nước tưới dư, nước rỉ từ khu ủ phân), ao được xem là một hạng mục xử lý nước thải trong nông nghiệp. Vào mùa mưa, ao có cơ chế xả tràn khi quá tải qua mương thoát. Cá chết được thu gom, đưa vào thùng ủ 250 lít bổ sung vi sinh để lên men tạo phân đạm cá dạng lỏng, phục vụ bón cây (Bảng 1).

Mô hình được xây dựng trong khoảng thời gian từ tháng 8/2024 - 9/2024 và bắt đầu vận hành từ 10/2024.

3.3. Dự báo hiệu quả của mô hình sau triển khai

Sau một thời gian vận hành thí điểm, mô hình đã cho thấy những kết quả cụ thể như sau:

⇒ *Dự báo về hiệu quả môi trường:*

Bảng 2 cho thấy, chất lượng môi trường cải thiện rõ rệt sau vận hành mô hình. Nồng độ ô nhiễm trong nước thải giảm mạnh: BOD₅ giảm 75%, COD giảm 70%, NH₄⁺ giảm trên 80%. Đất được bón compost và biochar có hàm lượng hữu cơ tăng từ 2,0% lên 2,5%,

pH tăng từ 5,5 - 6,0 lên 6,3, cấu trúc đất tơi xốp hơn, giữ ẩm tốt hơn, thuận lợi cho cây mít sinh trưởng và phát triển. Không khí chuồng trại cũng cải thiện đáng kể: Mùi hôi giảm, gần như không còn ruồi nhặng.

⇒ *Dự báo về hiệu quả kinh tế:*

Mô hình không phát thải mang lại lợi ích kinh tế rõ rệt cho nông hộ. Nhờ tự sản xuất phân compost và đạm cá, trang trại đã giảm khoảng 50% lượng phân hóa học, tiết kiệm 8 - 10 triệu đồng/năm/2 ha mít. Hệ thống tưới tự động giúp giảm thêm 20 - 30% chi phí điện và nước (~ 1 - 2 triệu đồng/năm). Đất cải tạo tốt hơn nhờ bón biochar và compost, góp phần duy trì năng suất mít ổn định (~ 90 triệu đồng/ha/năm) và tiềm năng tăng. Về chăn nuôi, chuồng trại sạch hơn, giúp đàn dê khỏe mạnh, duy trì thu nhập 120 triệu đồng/năm, giảm thiệt hại do bệnh. Các phụ phẩm trước đây bị lãng phí (lá, cành, phân) nay được tái chế thành sản phẩm hữu ích như phân hữu cơ, biochar.

Bảng 3 phân tích chi phí - lợi ích (Cost-Benefit Analysis, CBA) được thực hiện theo chu kỳ 5 năm, sử dụng tỷ lệ chiết khấu r = 5%/năm (tại Việt Nam và



Hình 4. Lò đốt biochar



Hình 5. Khu đệm lót sinh học



Bảng 2: Dự báo hiệu quả môi trường khi vận hành mô hình

Chỉ tiêu cụ thể	Trước mô hình	Sau mô hình	Giá trị tham chiếu	Quy chuẩn tham chiếu
BOD5	80	20	< 50 mg/L	QCVN 62-MT:2016/BTNMT
COD	150	50	< 150 mg/L	QCVN 62-MT:2016/BTNMT
Nồng độ NH ₄ ⁺	25	< 5	<10 mg/L	QCVN 62-MT:2016/BTNMT
pH đất vườn	6	6,3	6,5 - 7,0	(Raese et al., 1994)

Bảng 3: Dự báo hiệu quả kinh tế sau khi vận hành mô hình

Chỉ tiêu	Trước mô hình	Sau mô hình	Đơn vị
Chi phí phân hóa học (2 ha)	18	10	Triệu đồng/năm
Chi phí nhiên liệu bơm tưới (2 ha)	6	4,2	Triệu đồng/năm
Thu nhập từ mít	90	95	Triệu đồng/ha/năm
Thu nhập từ chăn nuôi dê	120	120	Triệu đồng/năm

nhiều quốc gia đang phát triển, tỷ lệ chiết khấu thường chọn từ 5% - 10%, chọn giá trị 5%/năm là phù hợp với mặt bằng tín dụng nông thôn Việt Nam và phản ánh mức chi phí sử dụng vốn trong điều kiện áp dụng thực tế cho hộ nông dân). Tổng lợi ích ròng hàng năm ước tính khoảng 15 triệu đồng, bao gồm: Tiết kiệm chi phí phân bón, năng lượng (~ 10 triệu đồng/năm); gia tăng thu nhập từ sản xuất (~ 5 triệu đồng/năm).

Giá trị hiện tại ròng (Net Present Value - NPV) được tính theo công thức (Hajdasinski et al., 2004):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + r)^t} - C_0$$

Trong đó:

- B_t : Lợi ích hàng năm (15 triệu đồng)
- C_t : Chi phí vận hành hàng năm (giá định không đáng kể so với đầu tư ban đầu)
- C_0 : Chi phí đầu tư ban đầu (50 triệu đồng)
- r : Lãi suất chiết khấu (5%)
- n : Số năm phân tích (5 năm)

Kết quả cho thấy NPV khoảng 20 triệu, NPV > 0 chứng tỏ dự án khả thi về mặt tài chính trong dài hạn. Kế đến, suất sinh lợi nội tại (Internal Rate of Return - IRR) là giá trị r khiến NPV = 0, được ước tính theo phương pháp nội suy tuyến tính từ hai giá trị r gần nhau (Hajdasinski et al., 1993). Theo tính toán, IRR vào khoảng 20%, tức cao hơn đáng kể so với lãi suất chiết khấu xã hội $r = 5\%$.

Thời gian hoàn vốn (Payback Period - PBP) được xác định theo công thức đơn giản (Hajdasinski et al., 1993):

$$PBP = \frac{C_0}{\text{Lợi ích ròng hàng năm}} = \frac{50}{15} = 3,33 \text{ năm}$$

Như vậy, mô hình dự kiến hoàn vốn sau khoảng 3 - 4 năm, mang lại lợi nhuận ròng từ năm thứ 4 trở đi. Điều này khẳng định tính khả thi, hiệu quả tài chính của mô hình đối với hộ nông dân quy mô vừa tại khu vực ĐBSCL.

Thảo luận chung

Mô hình thí điểm đã chứng minh hiệu quả toàn diện khi vừa kiểm soát tốt ô nhiễm môi trường, tái sử dụng > 90% chất thải thành tài nguyên hữu ích, giảm chi phí đầu vào khoảng 50%, hoàn vốn sau 3 - 4 năm, tích hợp linh hoạt các công nghệ xử lý phù hợp quy mô hộ... từ đó khẳng định tính khả thi, hiệu quả và bền vững trong thực tiễn nông nghiệp vùng ĐBSCL. Khi so sánh với các mô hình tích hợp đã công bố trong và ngoài nước, có thể thấy mô hình thí điểm này đạt hiệu quả tương đương hoặc cao hơn. Cụ thể, kết quả nghiên cứu tương đồng với nghiên cứu của Hải & cs, 2016 về VACBNXT tại ĐBSCL. Đồng thời, hiệu suất loại bỏ BOD₅/COD tương đương với nghiên cứu về các biện pháp loại bỏ chất ô nhiễm trong chăn nuôi tại một số nước khu vực Đông Nam Á (giảm ~75% BOD, ~ 70% COD) (Stewart et al., 2009).

Từ quá trình triển khai, có thể rút ra 4 yếu tố chính góp phần vào thành công của mô hình: (i) Sự tham gia tích cực và cam kết của nông hộ; (ii) Công nghệ phù hợp quy mô hộ, dễ điều chỉnh, chi phí thấp; (iii) Hỗ trợ kỹ thuật ban đầu từ nhóm nghiên cứu; (iv) Điều kiện tự nhiên thuận lợi cùng với nhận thức cộng đồng nâng cao. Tuy nhiên, mô hình cũng đối mặt 3 thách thức: (1) Chi phí đầu tư ban đầu cao, cần hỗ trợ tài chính hoặc liên kết nhóm hộ; (2) Yêu cầu kỹ thuật và kỷ luật vận hành cao hơn, đòi hỏi đào tạo; (3) Đầu ra sản phẩm phụ như compost, biochar còn hạn chế, cần có giải pháp tiêu thụ hoặc lưu trữ lâu dài.

Về khả năng nhân rộng, mô hình có tiềm năng nhân rộng tại các trang trại cây ăn quả kết hợp chăn nuôi ở ĐBSCL, với khả năng điều chỉnh linh hoạt theo loại cây, vật nuôi, điều kiện từng hộ. Để triển khai hiệu quả, cần tập huấn kỹ thuật cho nông dân và có chính sách hỗ trợ phù hợp (như tích hợp vào Chương trình mục tiêu quốc gia về xây dựng nông thôn mới hoặc tín dụng xanh).

Về tính bền vững dài hạn, mô hình có thể duy trì dài hạn nếu được quản lý tốt, nhờ vận hành theo quy luật sinh thái và hiệu quả về chi phí. Tuy nhiên, cần theo dõi định kỳ chất lượng đất, nước, hoạt động hệ vi sinh, tránh rủi ro tích lũy muối, kim loại nặng hoặc suy giảm hiệu suất sau 5- 10 năm. Do đó, khuyến nghị tiếp tục hỗ trợ kỹ thuật, nghiên cứu bổ sung (kết hợp biochar với công nghệ xử lý nước khác, thử nghiệm tại vùng đất phèn hoặc ngập úng).

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế, triển khai thành công mô hình nông nghiệp tích hợp hướng tới không phát thải cho một trang trại trồng mít kết hợp nuôi dê tại huyện Thoại Sơn, tỉnh An Giang. Mô hình đã đạt được các mục tiêu: Giảm thiểu phát thải ô nhiễm (BOD_5 , COD, NH_4^+ trong nước thải từ 70 - 80%; OM và pH đất được cải thiện); tận dụng triệt để phế phụ phẩm (trên 90% chất thải hữu cơ được tái sử dụng); nâng cao hiệu quả kinh tế hộ nông dân (tiết kiệm chi phí đầu vào, ổn định năng suất, thời gian hoàn vốn là 3- 4 năm, IRR ước tính ~ 20%). Điểm mới của nghiên cứu là lần đầu tiên tích hợp chu trình xử lý khép kín (đệm lót sinh học - compost - biochar - ao thủy sinh) chuyên biệt cho trang trại cây ăn quả quy mô vừa, đồng thời cung cấp dữ liệu thực nghiệm về hiệu quả môi trường và kinh tế. Kiến nghị cần hỗ trợ vốn, tập huấn kỹ thuật để nhân rộng mô hình; tiếp tục nghiên cứu dài hạn về hiệu quả biochar, tối ưu công nghệ xử lý nước thải và thử nghiệm mở rộng mô hình tại các vùng sinh thái khác.

Song song với những kết quả đạt được, nghiên cứu còn một số hạn chế nhất định, như quy mô triển khai thí điểm còn nhỏ, thời gian theo dõi ngắn hạn (dưới một năm) nên chưa đánh giá đầy đủ các biến động dài hạn của môi trường đất - nước - khí. Ngoài ra, tác động kinh tế - xã hội mới ghi nhận ở mức hộ gia đình đơn lẻ, chưa phân tích sâu tác động cộng đồng hay chuỗi giá trị nông sản. Trong thời gian tới, cần tiếp tục nghiên cứu, theo dõi dài hạn (5 - 10 năm) để đánh giá tính ổn định của mô hình, hiệu quả lâu dài của biochar trong cải tạo đất, khả năng kiểm soát ô nhiễm khi mở rộng quy mô; thử nghiệm áp dụng mô hình tại các vùng sinh thái khác như đất phèn, vùng lũ để kiểm chứng tính linh hoạt và đề xuất hoàn thiện mô hình phù hợp với từng điều kiện địa phương.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ trong khuôn khổ Đề tài độc lập cấp quốc gia, mã số ĐTĐL.CN-71/21 với tên Đề tài là “Nghiên cứu các giải pháp phát triển sinh kế bền vững cho các cộng đồng dân cư nông thôn tỉnh An Giang gắn với sử dụng hợp lý tài nguyên, QLCT và BVMT”. Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Viện Môi

trường và Tài nguyên, Trường Đại học An Giang đã hỗ trợ, tạo điều kiện thuận lợi để nhóm có thể hoàn thành nghiên cứu ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Canova, A., et al. Comparative economical analysis of a small scale trigenerative plant: a case study. in 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting. 2007. IEEE.
2. Foo, J.J.P.C., Integrated Bio-systems: A global perspective. 2002. 37.
3. Hai, L.T., et al., An integrated eco-model of agriculture and small-scale industry in craft villages toward cleaner production and sustainable development in rural areas - A case study from Mekong delta of Viet Nam. *Journal of Cleaner Production*, 2016. 137: p. 274 - 282.
4. Hajdasinski, M.M.J.T.E.E., The internal rate of return (IRR) as a financial indicator. 2004. 49 (2): p. 185 - 197.
5. Hajdasiński, M.M.J.T.E.E., The payback period as a measure of profitability and liquidity. 1993. 38 (3): p. 177 - 191.
6. Nguyen, T.H. and E. Cassou, An overview of agricultural pollution in Vietnam. 2017.
7. Quang, N.J.T.C.K.h.v.C.n.V.N., ĐBSCL trước nguy cơ mất an ninh nguồn nước: Những nguyên nhân và thách thức. 2020.
8. Raese, J.T.J.C.i.S.S. and P. Analysis, Effect of fertilizers on soil pH and performance of apple and pear trees. II. Grown in different soils in the orchard. 1994. 25 (9 - 10): p. 1865 - 1880.
9. Schnitzer, H. and S. Ulgiati, Less bad is not good enough: approaching zero emissions techniques and systems. *Journal of Cleaner Production*, 2007. 15 (13): p. 1185 - 1189.
10. Stewart, S. W., & Alvarado, C. (2009, October 15 - 16). Optimizing the conversion of the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) to energy. Presented at the Conference on Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Livestock and Agro-Industrial Waste, Manila Peninsula Hotel, Philippines. Philippine Bio-Sciences Company Inc., a unit of Asia Biogas Co. Ltd.
11. Trọng, T.Q., et al., Heritability and genotype by environment interaction estimates for harvest weight, growth rate, and shape of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) grown in river cage and VAC in Vietnam. *Aquaculture*, 2013. 384 - 387: p. 119 - 127.
12. Trung, N.T. and D.T.B.J.T.c.K.h.C.n.C.n. Le Xuan Tung, Application of circular economy principles to livestock production in Vietnam. 2024 (148): p. 2 - 10.
13. Yễn, H.P.J.T.c.K.h., Thực trạng ô nhiễm và suy thoái môi trường đất trong phát triển nông nghiệp ở tỉnh Vĩnh Long. 2019. 16 (9): p. 467.