

# Đánh giá tính bền vững của mô hình sinh thái tích hợp trong canh tác thanh long bằng phân tích emergy

Hồ Thị Thiên Kim<sup>1</sup>, Đồng Thị Thu Huyền<sup>2</sup>, Nguyễn Thanh Hùng<sup>1</sup>, Lê Thanh Hải<sup>1</sup>,  
Trần Thị Hiệu<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Phương Thảo<sup>1</sup>, Trần Trung Kiên<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Viện Môi Trường và Tài nguyên, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 142 Tô Hiến Thành, phường Diên Hồng, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>2</sup>Khoa Công nghệ, Trường Đại học Công nghệ Đồng Nai, 206 Nguyễn Khuyến, khu phố 5, phường Trảng Dài, tỉnh Đồng Nai, Việt Nam

Ngày nhận bài 3/3/2025; ngày chuyển phản biện 5/3/2025; ngày nhận phản biện 21/3/2025; ngày chấp nhận đăng 28/3/2025

## **Tóm tắt:**

Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá tính bền vững của mô hình sinh thái tích hợp cho các hộ dân canh tác thanh long. Một mô hình sinh thái khép kín theo hướng tuần hoàn vật chất và năng lượng cho các hộ dân trồng cây thanh long đã được đề xuất và triển khai, dựa trên cơ sở xử lý chất thải từ sinh khối thanh long, kết hợp với chất thải chăn nuôi tạo ra các sản phẩm mới có giá trị. Bên cạnh đó, phương pháp phân tích emergy được áp dụng để đánh giá tính bền vững của mô hình sinh thái tích hợp đã triển khai cho các hộ dân. Kết quả cho thấy, hệ số năng suất năng lượng (EYR) của hệ thống là 0,99, nghĩa là không có đơn vị tài nguyên môi trường miễn phí nào có thể được khai thác khi một đơn vị đầu vào được đầu tư vào hệ thống tích hợp. Hệ số sức tải môi trường (ELR) của hệ thống là 0,35, cho thấy năng lượng tái tạo được sử dụng trong hệ thống này nhiều hơn năng lượng không tái tạo. Hơn nữa, chỉ số bền vững (EmSI) của mô hình sinh thái tích hợp đạt 2,8, cao hơn so với hệ thống nông nghiệp thông thường.

**Từ khóa:** canh tác cây thanh long, mô hình sinh thái tích hợp, phân tích emergy, tính bền vững.

**Chỉ số phân loại:** 4.1, 4.7

## Sustainability evaluation of an integrated ecological system for dragon fruit cultivation using emergy accounting

Thi Thien Kim Ho<sup>1</sup>, Thi Thu Huyen Dong<sup>2</sup>, Thanh Hung Nguyen<sup>1</sup>, Thanh Hai Le<sup>1</sup>,  
Thi Hieu Tran<sup>1</sup>, Thi Phuong Thao Nguyen<sup>1</sup>, Trung Kien Tran<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Institute for Environment and Resources, Vietnam National University - Ho Chi Minh City, 142 To Hien Thanh Street, Dien Hong Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

<sup>2</sup>Faculty of Technology, Dong Nai Technology University, 206 Nguyen Khuyen Street, Quarter 5, Trang Dai Ward, Dong Nai Province, Vietnam

Received 3 March 2025; revised 21 March 2025; accepted 28 March 2025

## **Abstract:**

This study aims to evaluate the sustainability of an integrated ecological system for dragon fruit cultivation by farming households. A closed ecological system based on material and energy circulation was proposed and implemented for dragon fruit farming households, utilising waste from dragon fruit biomass combined with livestock waste to generate valuable new products. In addition, emergy accounting analysis was applied for sustainability evaluation of an integrated ecological system. The results show that the emergy yield ratio (EYR) of the system is 0.99, indicating that no free environmental resource can be obtained for each unit of input invested in the integrated system. The emergy loading ratio (ELR) of the system is 0.35, which indicates a relatively low environmental loading, with renewable inputs outweighing non-renewable ones. Furthermore, the environmental sustainability index (EmSI) of the integrated system is 2.8, which is higher than that of conventional agricultural systems.

**Keywords:** dragon fruit cultivation, emergy accounting, integrated ecological system, sustainability.

**Classification numbers:** 4.1, 4.7

\*Tác giả liên hệ: Email: trungkienmt95@gmail.com

## 1. Đặt vấn đề

Việt Nam là nước có diện tích và sản lượng thanh long lớn nhất châu Á và cũng là nước xuất khẩu thanh long hàng đầu thế giới. Diện tích trồng thanh long ở nước ta vào khoảng hơn 25.000 ha, với sản lượng trên 460.000 tấn/năm, tập trung nhiều ở Lâm Đồng, Đồng Tháp và Tây Ninh. Diện tích thanh long của 3 tỉnh này chiếm 92% tổng diện tích và 96% sản lượng của cả nước [1]. Tuy nhiên, lượng chất thải phát sinh từ cây thanh long không chỉ gây ô nhiễm môi trường và phát thải khí nhà kính mà còn tiềm ẩn nhiều mầm bệnh, ảnh hưởng tiêu cực đến mỹ quan các khu vực canh tác [2]. Một số công trình trong những năm gần đây đã nghiên cứu xử lý chất thải này nhằm tạo ra các sản phẩm thứ cấp có giá trị. Chất thải từ vỏ thanh long được phối trộn với cám công nghiệp theo các tỷ lệ khác nhau để làm cơ chất cho quá trình nuôi ruồi lính đen (*Hermetia illucens*). Sau khi áp dụng các phương pháp xử lý sơ bộ như xay nhuyễn, kết quả cho thấy ruồi lính đen thích nghi và sinh trưởng tốt nhất trong môi trường có tỷ lệ chất nền vỏ thanh long: cám công nghiệp là 85:15, với hiệu suất đạt 71,89% [3]. Các chất thải có nguồn gốc sinh khối từ quá trình canh tác cây thanh long có thể được xử lý thành các sản phẩm có giá trị kinh tế và ứng dụng cao như: than sinh học từ cành cây thanh long với khả năng hấp phụ chất ô nhiễm lên đến 95% [4], vỏ thanh long ruột đỏ có khả năng trích ly chất màu betacyanin [5-7], bột thân thanh long ruột trắng có thể được sử dụng làm nguyên liệu chính phối trộn cùng với bột cám và bột bắp lên men chua làm thức ăn bổ sung cho vật nuôi [8].

Mô hình sinh thái tích hợp trong nông nghiệp nhằm tái sử dụng chất thải, tuần hoàn nguyên vật liệu hướng đến nâng cao tính bền vững cho hệ sinh thái đã được nghiên cứu trước đây [9-11]. Tuy nhiên, việc sử dụng hiệu quả chất thải hữu cơ cho mục đích nông nghiệp đòi hỏi phải đánh giá rủi ro kỹ lưỡng và nghiêm ngặt để ngăn ngừa tác động xấu của các chất gây ô nhiễm như kim loại nặng, chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy nhằm đảm bảo tính bền vững nông nghiệp [12]. Kết quả 1 nghiên cứu điển hình trước đây cho thấy, các chức năng của hệ thống nông nghiệp tích hợp hoặc nông nghiệp tuần hoàn (CA) phải được xác định trước khi vận hành nhằm nâng cao hiệu quả sinh thái của hệ thống. Nếu chỉ tăng diện tích thanh long 10% thì hiệu quả của hệ thống CA sẽ giảm 0,17% mỗi năm, nếu tăng 10% hệ thống chăn nuôi heo thì hiệu quả của CA sẽ tăng 0,20% mỗi năm [13]. Chất thải từ canh tác và chế biến thanh long có thể được tái sử dụng do chứa một số hóa chất và dầu có giá trị gia tăng và có thể là nguồn tài nguyên tái tạo để sản xuất một số hợp chất có giá trị gia tăng có tiềm năng ứng dụng trong các ngành công nghiệp khác nhau theo định hướng kinh tế tuần hoàn [14]. Các hệ thống trồng trọt - chăn nuôi tích hợp

(ICLS) phù hợp cho các trang trại, vì chúng có tiềm năng cải tạo những vùng đồng cỏ rộng lớn bị suy thoái, đồng thời giảm thiểu phát thải khí nhà kính, khuyến khích thâm canh bền vững [15].

Emergy được định nghĩa là “Năng lượng sẵn có của một dạng được sử dụng một cách trực tiếp hoặc gián tiếp trước đó để tạo nên một sản phẩm hoặc dịch vụ”. Đơn vị của emergy là emjoule hoặc solar emjoule (viết tắt là SeJ) [16-19]. Trong nhiều năm qua, đã có nhiều nghiên cứu được thực hiện để chứng minh căn cứ vững chắc của phương pháp phân tích emergy. Phương pháp này cũng có thể được kết hợp với các phương pháp khác như: “phân tích vòng đời” (LCA), “dấu chân sinh thái” (EF), “đánh giá môi trường chiến lược” (SEA) [16-19]. Phân tích emergy có thể lấp đầy những “khoảng trống” thường tồn tại trong các nghiên cứu muốn quy đổi kinh tế và môi trường về cùng một vấn đề. Tính chất này cũng cho phép phương pháp phân tích emergy trở thành một lựa chọn tốt để đánh giá tính bền vững của các hệ thống, từ đó giúp đưa ra các quyết định liên quan đến năng lượng, môi trường và xã hội [20].

Qua việc sử dụng các giá trị chỉ số bền vững emergy (EmSI) để đánh giá sáu hệ thống phát điện khác nhau, phân loại chúng dựa trên nhiệt động lực học và hiệu quả môi trường, cho thấy sử dụng năng lượng tái tạo bền vững hơn so với những công nghệ dựa trên nhiên liệu hóa thạch [21]. Phương pháp phân tích emergy cũng được sử dụng để phân tích việc sử dụng sinh khối làm nguyên liệu cho sản xuất nhiên liệu sinh học và điện [22]. Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu sử dụng emergy để đánh giá hiệu quả sản xuất ethanol sinh học từ ngô, lúa mì và mía [23-25], hay các nghiên cứu sản xuất nhiên liệu sinh học bằng chất thải từ mía và sản xuất biodiesel từ dầu thực vật [26-28].

Ngoài ra, phân tích emergy còn được sử dụng để đánh giá hiệu quả của hệ thống cung cấp nước cho đô thị, các dòng chảy và quy trình hệ thống, dựa trên mô hình hóa và tính toán trên cơ sở khả năng tích lũy năng lượng sẵn có của hệ sinh thái. Các nguồn nước được thực hiện đánh giá bao gồm: nguồn nước mặt, nước ngầm và nước sau khử mặn. Kết quả cho thấy, để vận chuyển được 1 m<sup>3</sup> nước cấp phải tiêu tốn khoảng 3,22E+12 SeJ [29]. Trong khi nghiên cứu tính bền vững dựa trên phân tích emergy của nhà máy xử lý nước cấp độc lập lại phụ thuộc vào chất lượng nguồn nước thô, giá trị năng lượng sinh thái của riêng nhà máy nước cấp khoảng 9,03E+11 SeJ/m<sup>3</sup> [30]. Khi phân tích hiệu quả của hệ thống xử lý nước thải nhằm hạn chế mối đe dọa cho môi trường địa phương, các kịch bản khác nhau đã được đề xuất, đánh giá hiệu quả dựa trên phân tích emergy. Kết quả cho thấy, các kịch bản đều hạn chế áp lực môi trường, các

giải pháp về tái sử dụng nước đã qua xử lý và bùn thải có thể giúp cải thiện chất lượng môi trường [31-34]. Ngoài ra, phân tích emergy còn được sử dụng để đánh giá tính bền vững cho một số hệ thống nông nghiệp và dịch vụ hệ sinh thái, ô nhiễm nước. Phương pháp này hạn chế sự phức tạp, không chắc chắn và tính trùng lặp dữ liệu của khung tính toán dịch vụ hệ sinh thái. Phương pháp cũng được áp dụng để đánh giá tính bền vững dựa trên tương tác giữa thiên nhiên và con người, khi sử dụng dịch vụ hệ sinh thái nông nghiệp thông qua khả năng tái tạo (RNP%) và không tái tạo (NRP%) [35-37].

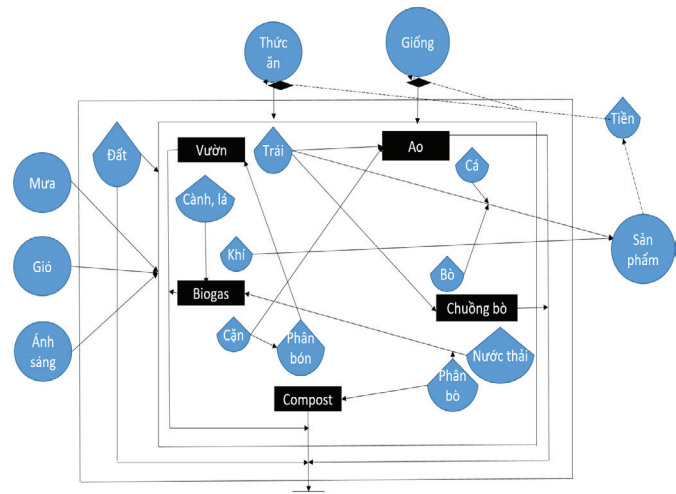
Các nghiên cứu trước đây đã định nghĩa về emergy và ứng dụng vào các hệ thống khác nhau, từ quá trình quản lý năng lượng hệ sinh thái của trang trại đến tổn thất năng lượng của hệ thống cấp nước và xử lý nước thải. Tuy nhiên, các nghiên cứu này vẫn chưa áp dụng phân tích emergy để lượng hóa năng lượng sinh thái của hệ thống sinh thái tích hợp, hướng đến tuần hoàn vật chất và năng lượng. Trong nghiên cứu này, một hệ thống nông nghiệp tích hợp cho hộ dân trồng thanh long kết hợp chăn nuôi được đề xuất, sau đó emergy được sử dụng để đánh giá tính bền vững của mô hình khi áp dụng thực tiễn. Thanh long là loại cây trồng yêu cầu có cường độ chiếu sáng cao, do đó liên quan đến việc sử dụng điện. Emergy là phương pháp phù hợp để tính toán tổng chi phí năng lượng, không chỉ từ việc sử dụng điện mà còn từ nguồn tài nguyên có thể tái tạo khác như nước và đất.

## 2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Cách tiếp cận

Mỗi joule năng lượng, dù ở dạng bức xạ mặt trời, điện năng hay lao động con người quy đổi, có thể giống nhau về lượng, nhưng khác nhau về chất lượng và khả năng sử dụng. Hệ số chuyển đổi được định nghĩa là lượng emergy đầu vào cần thiết để tạo ra một đơn vị đầu ra khả dụng. Trong nghiên cứu này, phân tích emergy để đánh giá sự bền vững về mô hình sinh thái tích hợp cho cây thanh long được thực hiện theo các bước sau:

- Bước 1: Vẽ sơ đồ hệ thống tổng quan để xác định ranh giới của hệ thống đã cho và xác định các nguồn đầu vào, đầu ra được đánh giá trên các ký hiệu cơ bản do Odum trình bày (hình 1). Tổng mức sử dụng năng lượng (U) bằng tổng các dòng tái tạo và năng lượng không thể tái tạo trong hệ thống, tương ứng, năng lượng sản xuất (Ep) biểu thị sản lượng của tổng năng lượng được sản xuất bởi hệ thống sinh thái tích hợp. Bên cạnh đó, phân lộn và bã khí được tái chế thông qua hệ thống phụ biogas trong mô hình này, đóng vai trò là nguồn nội lực thúc đẩy quá trình chuyển đổi tuần hoàn chuồng - ao - vườn... Do đó, hệ thống thức ăn chăn nuôi (SF) đại diện cho sự trao đổi vật chất trong hệ thống này.



Hình 1. Sơ đồ ranh giới của hệ thống tích hợp.

- Bước 2: Phân tích giá trị năng lượng thu được của từng hạng mục được xem xét trong hệ thống “sinh thái tích hợp”. Trong bước này, tất cả các dữ liệu thô như jun, kilogram được chuyển thành dạng năng lượng mặt trời, với đơn vị là SeJ nhằm chuyển về đơn vị năng lượng chung của emergy. Đối với sự chuyển đổi này, giá trị đơn vị của emergy là UEV, được coi là lượng mặt trời cần thiết để tạo ra trên một đơn vị (jun, khối lượng hoặc tiền) của một sản phẩm hoặc dịch vụ. UEV là một đối tượng nhất định, có thể có giá trị khác nhau do vị trí địa lý cụ thể hoặc quy trình sản xuất.

- Bước 3: Thiết lập chỉ số năng lượng và định lượng các hành vi sinh thái của hệ thống “sinh thái tích hợp” sẽ được làm rõ.

Sự nóng lên toàn cầu nhằm duy trì sinh quyển được coi là sự tham chiếu cho phân tích emergy, trước đây có giá trị lần đầu là  $9,44E+24$  SeJ/yr, sau đó được cập nhật là  $1,58E+25$  SeJ/yr và hiện tại là  $1,52E+25$  SeJ/yr [13].

### 2.2. Đối tượng nghiên cứu

Sinh kế chính của hộ dân là trồng thanh long kết hợp với chăn nuôi, cụ thể diện tích trồng thanh long là 10.000 m<sup>2</sup> (tức khoảng 1.100 trụ), số lượng vật nuôi là 9 con bò, diện tích trồng cỏ là 3.000 m<sup>2</sup> (hình 2). Đối với nhu cầu nguyên liệu trong canh tác nông nghiệp của hộ dân bao gồm: thức ăn cho bò, phân bón cho thanh long. Đối với chăn nuôi bò, thức ăn chủ yếu là cỏ voi, ngoài ra hộ chăn nuôi bổ sung thêm 400 kg cám gạo và 200 kg thức ăn chuyên dùng cho vỗ béo bò. Nước uống cho bò khoảng 50-60 lít/con/ngày, nước vệ sinh chuồng trại là 0,9-1,08 m<sup>3</sup>/lần (mỗi ngày vệ sinh 2 lần), nguồn nước được sử dụng là nước ngầm. Đối với quá trình canh tác thanh long, trung bình một hộ dùng khoảng 25 tấn phân hữu cơ (phân chuồng)/năm/2 lần bón, toàn bộ lượng phân hữu cơ sử dụng từ chất thải chăn nuôi. Canh

thanh long tía bò mỗi năm 1 lần, trung bình 150 cành/trụ (tương ứng khoảng 50 kg/trụ). Như vậy, mỗi năm một hộ phát thải ra môi trường gần 55 tấn cành thanh long tía bò.



Hình 2. (A) Khu vực chăn nuôi bò, (B) ruộng cò voi, (C) vườn thanh long, (D) rơm dự trữ.

### 2.3. Phương pháp phân tích chỉ số emergy

Trên cơ sở các giá trị được đề cập ở trên bao gồm: năng lượng có thể tái tạo (RR), năng lượng không thể tái tạo (NR), tổng năng lượng sử dụng (U), năng lượng sản xuất (Ep), một loạt các chỉ số được đưa ra như sau để trình bày hiệu suất của hệ thống sinh thái tích hợp.

Sự biến đổi (Tr):

$$Tr = \frac{U}{E_p} \quad (1)$$

trong đó: Sự biến đổi (Tr) là một loại UEV được định nghĩa như đầu vào xuất hiện trên một đơn vị đầu ra năng lượng khả dụng với đơn vị SeJ/J. Nó thu được bằng tỷ số giữa tổng số năng lượng được sử dụng trong một quá trình và năng lượng do quá trình đó tạo ra. Tr đại diện cho chất lượng của chính đầu ra. Độ biến đổi càng cao thì cần càng nhiều nhiệt độ cho hệ thống.

Chỉ số phần trăm tái tạo (Pr):

$$Pr = \frac{RR+RP}{U} \quad (2)$$

trong đó: Renewable resources (RR) là các nguồn năng lượng tái tạo sẵn có trong hệ thống, còn renewable purchased (RP) là các nguồn năng lượng tái tạo được bổ sung từ bên ngoài, thông qua quá trình mua hoặc đưa vào hệ thống. U là tổng năng lượng đầu vào của hệ thống, bao gồm cả các nguồn tái tạo và không tái tạo. Khác với chỉ số phần trăm tái tạo là tỷ lệ giữa năng lượng tái tạo có sẵn (R) và U, chỉ số phần trăm khả năng gia hạn được sửa đổi (Pr) được định nghĩa là tỷ lệ của tất cả các năng lượng đầu vào có sẵn hoặc được thêm

vào trên tổng số năng lượng đầu vào, minh họa sự đóng góp có thể tái tạo trong tổng đầu vào sử dụng cho hệ thống. Hệ thống Pr cao hơn được coi là bền vững hơn về lâu dài.

Tỷ số năng suất năng lượng tích lũy (EYR):

$$EYR = \frac{U}{RP+NP} \quad (3)$$

trong đó: Non-renewable purchased (NP) là các nguồn năng lượng không tái tạo mua từ nền kinh tế bên ngoài, EYR là tỷ số tổng chi phí hiện có so với chi phí thu được từ nền kinh tế bên ngoài, thể hiện hiệu quả của hoạt động sử dụng các yếu tố đầu vào đã mua để khai thác tài nguyên thiên nhiên. Chỉ số này càng cao, lợi tức thu được trên một đơn vị đầu tư emergy càng lớn.

Tỷ số sức tải môi trường (ELR):

$$ELR = \frac{NR+NP}{RR+RP} \quad (4)$$

trong đó: Non-renewable resources (NR) là các nguồn năng lượng không tái tạo sẵn có trong hệ thống, ELR là tỷ số giữa tổng nguyên liệu đầu vào không thể tái sinh trên tổng số nguyên liệu đầu vào có thể tái sinh, cho biết mức độ căng thẳng của hệ thống nhất định đối với môi trường. Tỷ lệ này càng thấp thì áp lực môi trường càng giảm.

Chỉ số bền vững emergy (EmSI):

$$EmSI = \frac{EYR}{ELR} \quad (5)$$

EmSI có tính đến cả khả năng tương thích về sinh thái và kinh tế, cho biết liệu một quy trình cung cấp cho người sử dụng áp lực môi trường thấp hay cao, phản ánh tính bền vững tổng thể của một quy trình sản xuất. Chỉ số này càng cao thì tính bền vững của hệ thống càng cao.

Tỷ lệ phản hồi emergy (EFR):

$$EFR = \frac{SF}{RP+NP} \quad (6)$$

trong đó: System feedback (SF) là emergy phản hồi nội tại của hệ thống, thể hiện các dòng năng lượng được tái sử dụng và tuần hoàn bên trong hệ thống; EFR là tỷ lệ giữa năng suất phản hồi của hệ thống so với sản lượng được mua từ nền kinh tế, thể hiện khả năng tự tổ chức của hệ thống. Chỉ số này càng cao thì hệ thống chuyển động bên trong càng mạnh [28].

Tính bền vững của một hệ thống phản ánh hiệu suất toàn diện của hệ thống về hiệu quả và áp lực môi trường. Một hệ thống bền vững sẽ gây ra ít tải môi trường hơn để duy trì nguồn cung cấp tài nguyên, đồng thời tạo ra nhiều đầu ra hơn để đóng góp cho môi trường. EmSI là tỷ lệ của EYR và ELR, đánh giá tính bền vững qua chỉ số bền vững emergy (EmSI) có các trường hợp sau:

EmSI<1: không bền vững.

1<EmSI<10: ranh giới giữa bền vững và không bền vững.

EmSI>10: bền vững.

### 3. Kết quả và bàn luận

#### 3.1. Đề xuất mô hình tích hợp cho khu vực canh tác cây thanh long

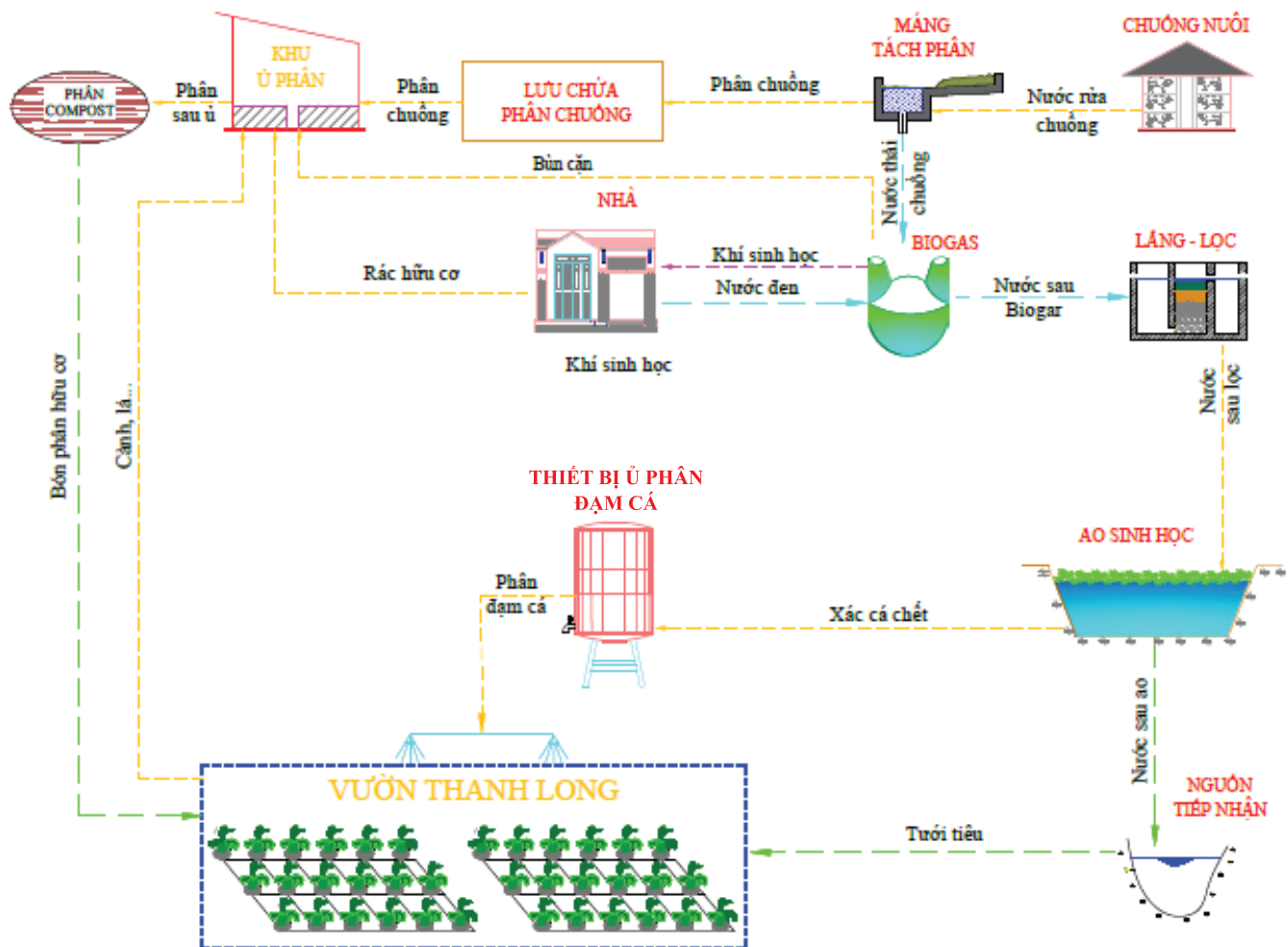
Phương án xử lý ô nhiễm đề xuất dựa vào đặc điểm tự nhiên, hiện trạng môi trường tại chỗ để tạo ra sinh kế bền vững cho hộ trồng thanh long kết hợp chăn nuôi. Mô hình được đề xuất trong hình 3.

Cành thanh long tỉa bỏ: Được thu gom, chặt 3-5 cm, hoặc băm nhỏ bằng máy băm. Sau đó trộn với phân bò theo tỷ lệ 1:4 (1 phân bò:4 cành), bổ sung thêm chế phẩm sinh học Biofert UPC theo tỷ lệ 2-3 lít chế phẩm/tấn. Chế phẩm này chứa các vi sinh vật hiếu khí, *Bacillus sp.*, *Lactobacillus sp.* giúp rút ngắn thời gian hoại mục của phân chuồng hoặc các phế, phụ phẩm nông nghiệp, ức chế sự phát triển của các loài vi sinh vật gây bệnh cho cây trồng, con người trong và sau quá trình ủ hoai. Phân bón hữu cơ sau quá trình ủ khoảng 8 tuần, thì khối lượng đạt khoảng 30% so với khối lượng nguyên ủ ban đầu, đồng ủ sẽ được đảo trộn liên tục cách nhau khoảng 7-10 ngày. Như vậy, với 55 tấn cành của

hộ dân sẽ phối trộn với 13,75 tấn phân bò từ chuồng, bổ sung 110 lít chế phẩm sinh học Biofert UPC sẽ được 20,625 tấn phân compost bón cho cây thanh long.

Phân bò: Được thu gom và dùng để ủ phân hữu cơ tại khu ủ phân cùng với cành thanh long. Toàn bộ lượng phân hữu cơ ủ được sẽ được bón cho cây thanh long.

Nước thải từ chuồng nuôi: Trung bình 0,5 m<sup>3</sup>/ngày đêm được thu toàn bộ vào biogas 8 m<sup>3</sup>. Nước thải sau biogas được dẫn vào bể lắng - lọc 3 ngăn thể tích trữ nước 3 m<sup>3</sup> theo độ cao địa hình, tại đây đảm bảo lắng, lọc cặn cũng như giảm nồng độ COD, BOD<sub>5</sub>, TSS sau biogas. Sau đó, toàn bộ nước thải sẽ được dẫn vào ao sinh học thể tích 20 m<sup>3</sup>, đảm bảo khả năng lưu nước 30-50 ngày trước khi tái sử dụng. Tại ao sinh học thả các loại thực vật dễ thích nghi và trồng các loại cây thủy sinh bản địa, có thể sử dụng để xử lý nước thải như lục bình, bèo, rau muống... Xác cá chết thu được tại ao sinh học sẽ được ủ làm đạm cá, dùng để cung cấp chất dinh dưỡng cho cây thanh long. Khí sinh học sinh ra từ biogas sẽ dùng cho nhu cầu nấu ăn của gia đình. Nước tại ao sinh học sau thời gian lưu chứa khoảng 3-15 ngày, có



Hình 3. Mô hình ứng dụng các sinh khối, điều kiện tự nhiên và môi trường sẵn có cho hộ trồng thanh long kết hợp chăn nuôi.

thể được sử dụng để tưới cho vườn thanh long. Rác hữu cơ từ nhà sẽ dùng làm phân compost. Rác vô cơ được thu gom bán phế liệu.

### 3.2. Đánh giá tính bền vững của mô hình tích hợp

#### 3.2.1. Tính toán và đưa ra kết quả của chỉ số emergy

Đánh giá emergy là một phương pháp hoàn hảo cho quá trình tương tác giữa hệ thống con người và tự nhiên. Nghiên cứu này nhằm đánh giá tác động môi trường của hệ thống sinh thái tích hợp được triển khai cho hộ dân trồng thanh

**Bảng 1. Kết quả tính toán các chỉ số emergy.**

STT	Các dòng năng lượng	Giá trị thô	Đơn vị	Hệ số chuyển hóa (SeJ/dv)	Solar emergy (SeJ/yr)
Nguồn tài nguyên tái tạo (RR)					
1	Năng lượng mặt trời	2,64E+08	J/yr	1	2,64E+08
2	Gió	3,54E+05	J/yr	2,45E+03	8,67E+08
3	Mưa	8,46E+08	J/yr	3,10E+04	2,62E+12
Nguồn tài nguyên không tái tạo (NR)					
4	Đất	2,00E+04	J/yr	1,24E+05	2,48E+09
Các đầu vào tái tạo và không tái tạo được (RP+NP)					
Chuồng bò					
5	Thức ăn nhuyễn	2,00E+02	kg/yr	1,07E+13	2,14E+15
6	Cám gạo	4,00E+02	kg/yr	1,31E+05	5,24E+07
7	Cỏ	4,00E+03	kg/yr	1,15E+05	4,60E+08
8	Nước	2,27E+05	kg/yr	7,49E+08	1,70E+14
9	Xi măng	8,75E+02	kg/yr	4,88E+11	2,74E+14
10	Gạch	5,32E+03	kg/yr	4,88E+11	1,59E+15
Bể biogas					
11	Khí	1,71E+03	kg/yr	1,24E+05	2,12E+08
12	Nước thải	2,92E+03	kg/yr	6,12E+06	1,78E+10
13	Xi măng	5,00E+02	kg/yr	4,88E+11	2,44E+14
14	Gạch	1,14E+03	kg/yr	4,88E+11	5,56E+14
Ao cá					
15	Thức ăn	5,00E+02	kg/yr	1,07E+13	5,35E+15
16	Ấu trùng cá	1,00E+02	kg/yr	5,60E+05	5,60E+07
Vườn thanh long					
17	Phân bón hữu cơ	2,50E+04	kg/yr	1,24E+05	3,10E+09
18	Cây con	1,10E+03	J/yr	2,57E+05	2,83E+08
19	Cây rom	3,40E+03	kg/yr	1,31E+05	4,45E+08
Tổng:					
Năng lượng sản sinh (EP)					
20	Bò	3,97E+10			
21	Trái thanh long	3,50E+07			
22	Khí sinh học	1,37E+10			
23	Cá	1,95E+10			

long, các hệ số chuyển đổi năng lượng là giá trị kế thừa từ các nghiên cứu trước [34]. Trồng thanh long và chăn nuôi kết hợp thủy sản có nhiều tương tác với môi trường xung quanh, sử dụng tài nguyên và tạo ra những thay đổi trong hệ sinh thái khi được đánh giá. Kết quả cho thấy, các nguồn sinh khối tái chế ảnh hưởng đến cấu trúc đầu vào emergy của các hệ thống, mặc dù tất cả chúng đều được bón vào quá trình canh tác thanh long dưới dạng phân hữu cơ. Hơn nữa, dòng emergy cục bộ không tái tạo của hệ thống giảm 30% so với ban đầu, phản ánh rằng sinh khối tái chế góp phần làm giảm việc khai thác tài nguyên không tái tạo từ đất dự trữ.

- Năng lượng mặt trời = Diện tích x Độ chói x (1-Độ phản chiếu) =  $(2,00E + 5 \text{ m}^2) \times (1,65E + 3 \text{ cd/m}^2) \times (1-20\%) = 2,64E + 08 \text{ J/yr}$ .

- Năng lượng gió = Diện tích x Mật độ không khí x Vận tốc gió trung bình x Thời gian làm việc hằng năm x Hệ số cản =  $(2,00E + 5 \text{ m}^2) \times (1,23 \text{ kg/m}^3) \times (6 \text{ m/s})^3 \times (2,40E + 3) \times (0,01) = 3,54E + 05 \text{ J/yr}$ .

- Năng lượng mưa = Diện tích x Lượng mưa x Tốc độ dòng chảy x Độ cao trung bình x Tỷ trọng x Trọng lượng =  $(2,00E + 5 \text{ m}^2) \times (0,8 \text{ m}) \times (20\%) \times (2,70E + 1 \text{ m}) \times (1,00E + 3 \text{ kg/m}^3) \times 9,8 = 8,46E + 08 \text{ J/yr}$ .

- Đất = 2 ha = 2,00E + 04 J/yr  
 - Chuồng bò (300 m<sup>2</sup>):  
 + Dài - Rộng - Cao = 15 - 20 - 2 m.  
 + Thức ăn nhuyễn = 200 kg = 2,00E + 2 kg/yr.  
 + Cám gạo = 400 kg = 4,00E + 2 kg/yr.  
 + Cỏ: 150 m<sup>2</sup>= 100 kg cỏ -> 3000 m<sup>2</sup>= 2000 x 2 kg = 4000 kg = 4,00E + 3 kg/yr.

+ Nước: 1 ngày 70 l cho 9 con -> năm = 360 x 9 x 70 = 226800 l = 2,27E + 5 kg/yr.

+ Xi măng: 1 bao = 4 m<sup>2</sup> -> 300 m<sup>2</sup> (xây cho 3 mặt) = 8,75E + 2 kg/yr.

+ Gạch: 1m<sup>2</sup> = 76 viên -> 300 m<sup>2</sup> = 5,32E + 3 kg/yr.

- Bể biogas (8 m<sup>3</sup>):

+ Khí cho ra là 4,7 m<sup>3</sup> khí -> 4,7 x 365 = 1,71E + 3 kg/yr.

+ Nước thải = 8 x 360 = 2,92E + 3 kg/yr.

+ Xi măng = 5,00E + 2 kg/yr.

+ Gạch = 1,14E + 3 kg/yr.

- Ao cá (0,3 ha):

+ Ấu trùng cá = 50 x 2 = 100 kg = 1,00E + 2 kg/yr (ước tính 50 kg ấu trùng sau khi nuôi ta có khoảng 2500 con cá trưởng thành).

+ Thức ăn cá = 10% khối lượng cá = 5,00E + 2 kg/yr.

- Vườn thanh long:

+ Phân bón hữu cơ = 25 tấn/ năm = 2,50E + 4 kg/yr.

+ Cây con = 1,10E + 3 J/yr.

+ Cây rom (1 cây 10 kg) = 3,40E + 3 kg/yr.

Theo kết quả tính toán emergy chi tiết của các yếu tố trong mô hình (bảng 1), sự cải thiện về tính bền vững của hệ thống thể hiện qua sự khác biệt về nguồn năng lượng đầu vào giữa mô hình canh tác truyền thống và mô hình trồng trọt - chăn nuôi kết hợp. Trong mô hình kết hợp, việc nuôi cá trong ao sinh học làm tăng lượng emergy đầu vào trong quá trình đánh giá hệ thống. Đối với điều kiện khu vực miền Trung, việc bố trí ao nuôi cá cần được đặt tại những khu vực phù hợp, chẳng hạn như vùng đồng bằng, nhằm nâng cao hiệu quả khai thác và sử dụng tài nguyên thiên nhiên. Tuy nhiên, các nguồn sinh khối khác nhau có đặc tính vật lý và hóa học khác nhau, dẫn đến sự khác biệt về chất lượng sinh khối tái chế. Điều này có thể ảnh hưởng đến khả năng cải thiện và duy trì độ phì đất phục vụ canh tác cây trồng. Vì vậy, cần tiến hành tính toán và đánh giá cụ thể mức độ đóng góp thực tế của sinh khối tái chế đối với hoạt động trồng trọt.

Bên cạnh đó, tồn tại 2 trường hợp trong thực tế để đánh giá hiệu quả emergy của hệ thống nông nghiệp được bón các loại phân hữu cơ khác nhau. Nếu sinh khối có thể tái chế thì xem như tuần hoàn bên trong hệ thống được đánh giá chính xác, tuy nhiên nếu sự đóng góp của dòng tái chế được đưa từ nguồn bên ngoài hệ thống thì kết quả đánh giá hiệu suất emergy của hệ thống tích hợp sẽ bị ảnh hưởng đáng kể (bảng 2) [24].

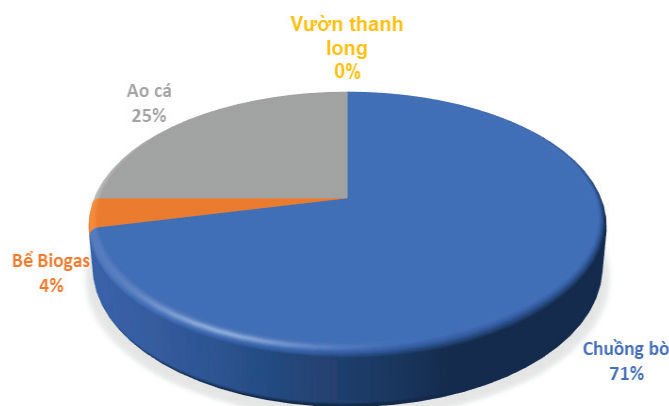
**Bảng 2.** Chỉ số emergy để đánh giá hệ thống.

Dòng năng lượng (Flux)	Giá trị	Đơn vị
Năng lượng có thể tái tạo (RR)	2,62E+12	SeJ/yr
Năng lượng không thể tái tạo được (NR)	2,48E+09	SeJ/yr
Năng lượng đầu vào tái tạo được (RP)	7,66E+15	SeJ/yr
Năng lượng đầu vào không tái tạo được (NP)	2,66E+15	SeJ/yr
Tổng mức emergy sử dụng (U)	1,03E+16	SeJ/yr
Chỉ số		
Chỉ số phần trăm năng lượng tái tạo (Pr)	0,74	
Tỷ lệ năng suất (EYR)	0,99	
Hệ số sức tải môi trường (ELR)	0,35	
Chỉ số bền vững emergy (EmSI)	2,8	

### 3.2.2. Đánh giá chung về hiệu quả của mô hình

Bảng 1 liệt kê các chỉ số emergy được đánh giá của các dòng chảy tổng hợp liên quan đến hệ thống. Kết quả cho thấy, hóa năng của mưa cao hơn so với năng lượng bức xạ mặt trời, động năng gió nên giá trị của nó được lấy làm giá trị (2,62E+12) đầu vào của năng lượng có thể tái tạo (RR). Đối với năng lượng không thể tái tạo, ta chỉ có đất nên lấy giá trị (2,48E+09) của đất làm giá trị năng lượng tài nguyên không thể tái tạo. Các đầu vào tái tạo và không tái tạo

được (RP+NP) bao gồm những đầu vào được mua từ nền kinh tế, chẳng hạn như thức ăn chăn nuôi, cám gạo, xi măng, gạch... cung cấp các chi tiết về các yếu tố đầu vào hệ thống (hình 4). Năng lượng sản sinh (Ep) 7,29E+10 J/yr chủ yếu bao gồm bốn sản phẩm là bò, cá, khí sinh học và trái thanh long. Trong đó, cá và thanh long được đưa trực tiếp ra thị trường, khí sinh học được sử dụng bởi hộ gia đình và cắt giảm lượng than mua từ thị trường.



**Hình 4.** Tỷ lệ phần trăm các chỉ số emergy của hệ thống.

Kết quả cho thấy, tổng mức emergy sử dụng (U) là 1,03E+16 SeJ/yr, trong đó các năng lượng đầu vào tái tạo và không tái tạo chiếm ưu thế cao nhất tới 99,8%. Ngược lại, các năng lượng tài nguyên tái tạo và không tái tạo chỉ chiếm 0,2%, cả hai đều cung cấp bởi môi trường tự do và biểu thị hỗ trợ trực tiếp từ thiên nhiên. Hai phần này được tính tổng cộng là 2,62E+12. Bảng 2 cho thấy, tỷ lệ năng suất của hệ thống là 0,99, có nghĩa là không có đơn vị tài nguyên môi trường miễn phí có thể được khai thác khi một đơn vị đầu vào đã mua được đầu tư vào hệ thống này. ELR của hệ thống là 0,35 cho thấy, năng lượng tái tạo được sử dụng trong hệ thống này nhiều hơn năng lượng không tái tạo, trong khi chỉ số ELR của hệ thống nông nghiệp thông thường không có tuần hoàn chất thải là 1,97. Hơn nữa, kết hợp EYR, ELR, EmSI đưa ra một phân tích toàn diện về tính bền vững của hệ thống này, và được tính là 2,8 cao hơn so với hệ thống nông nghiệp thông thường là 0,57 [34]. Cho thấy rằng, hệ thống xử lý chất thải cho hoạt động nông nghiệp theo hướng tích hợp có tính bền vững cao hơn. Tính bền vững của mô hình được trình bày bởi chỉ số EmSI, chỉ số càng cao thì khả năng bền vững của mô hình càng cao [29]. Kết quả nghiên cứu này cho thấy, điểm mấu chốt đối với một hệ thống nông nghiệp xử lý chất thải tích hợp là khả năng tái chế chất thải nông nghiệp và tài nguyên thiên nhiên tái tạo tại địa phương bằng cách đầu tư vào các nguồn lực bên ngoài và sử dụng các nguồn lực tái tạo tại địa phương.

#### 4. Kết luận

Ảnh hưởng của tài nguyên được tái chế đến hiệu quả emergy và tính bền vững của các hệ thống được nghiên cứu không được thể hiện một cách toàn diện và hợp lý ở một mức độ nào đó. Điểm mấu chốt của việc cải thiện vấn đề là làm thế nào để phân bổ năng lượng được sử dụng, hay quy đổi trên một đơn vị sinh khối chất thải được tái chế trong các mô hình tích hợp. Tuy nhiên, phân tích emergy đã được thực hiện để đánh giá một cách định hướng mối liên hệ giữa môi trường tự nhiên và xã hội con người. Phân tích emergy đã cho thấy rõ vai trò quan trọng của tài nguyên môi trường nước, đất và hoạt động sản xuất nông nghiệp đối với sự phát triển kinh tế của người dân. Ngăn ngừa ô nhiễm môi trường và sử dụng bền vững tài nguyên là rất cần thiết. Phân bổ đầu tư cho các nguồn năng lượng không tái tạo cần được điều chỉnh phù hợp dựa trên sự sẵn có của tài nguyên môi trường. Hơn nữa, nhu cầu sử dụng tài nguyên của người dân cũng nên được duy trì một cách tương xứng với khả năng cung cấp của thiên nhiên. Các giải pháp chiến lược để có được sự phát triển bền vững cho mô hình sinh thái tích hợp khép kín cần được tiếp tục nghiên cứu.

#### 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 “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, quản lý chất thải và bảo vệ môi trường” (mã số ĐTĐL.CN-71/21). Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Ministry of Industry and Trade (2024), *Vietnam's Dragon Fruit Export Potential*, Trade Information Center (in Vietnamese).

[2] V. Kiangte, S. Lalmangaihzuwala, Z.T. Laldinpui, et al. (2023), “Novel dragon fruit peel ash-derived solid catalyst for biodiesel production and PET waste recycling”, *Bioresource Technology Reports*, **24**, DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101663.

[3] P.N.V. Hoang (2023), “Study on treatment of dragon fruit peel waste using black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) with different substrate mixing ratios”, *Journal of Natural Resources and Environment*, **45**, pp.121-134 (in Vietnamese).

[4] D.H. Sam (2023), “Study on methylene blue adsorption capacity of biochar produced from dragon fruit branches (*Hylocereus* sp.)”, *Can Tho University Journal of Science*, **59(5)**, pp.72-78 (in Vietnamese).

[5] D.T.M. Linh, N.T.Q. Mai, P.T.P. Thuy (2020), “Optimization of microwave-assisted extraction of betacyanin from dragon fruit peel (*Hylocereus undatus*)”, *Hue University Journal of Science: Natural Science*, **129(1A)**, pp.11-20 (in Vietnamese).

[6] N.V.N. Hoa (2024), “Ultrasound-assisted extraction of betacyanin from dragon fruit peel (*Hylocereus undatus*): Extraction parameters, stability and biological activity”, *Can Tho University Journal of Science*, **60**, pp.287-298 (in Vietnamese).

[7] V.T.T. Dao (2017), “Study on extraction and preservation of natural pigments from red-fleshed dragon fruit peel”, *Dong Thap University Journal of Science*, **27**, pp.88-93 (in Vietnamese).

[8] V.V.S. Toan (2020), “Use of dragon fruit stem powder (*Hylocereus undatus*) for fermentation by *Bacillus* spp.”, *Can Tho University Journal of Science*, **56(4)**, pp.61-70 (in Vietnamese).

[9] T.T. Hieu, N.T.P. Thao, L.T. Hai, et al. (2020), “The integrated model of industry-agriculture towards sustainable development: A pilot model in Cho Moi district, An Giang province”, *VNUHCM Journal of Earth Science, Environment and Sustainability*, **4(2)**, pp.188-196, DOI: 10.32508/stdjsee.v4i2.523.

[10] T.T. Kien, H.T.T. Dong, H.T. Nguyen, et al. (2023), “Research on evaluating the efficiency of nutrient recovery (N, P) in an integrated ecological system for catfish farming”, *Science and Technology Development Journal: Science of The Earth and Environment*, **7(2)**, pp.702-714, DOI: 10.32508/stdjsee.v7i2.742.

[11] T. Swarnam, A. Velmurugan, T. Subramani, et al. (2024), “Climate-smart crop-livestock integrated farming as a sustainable agricultural strategy for humid tropical islands”, *International Journal of Agricultural Sustainability*, **22(1)**, DOI: 10.1080/14735903.2023.2298189.

[12] B. Sharma, U.K. Singh, P. Singh, et al. (2019), “Recycling of organic wastes in agriculture: an environmental perspective”, *International Journal of Environmental Research*, **13**, pp.409-429, DOI: 10.1007/s41742-019-00175-y.

[13] Z. Xu, W. Fan, X. Dong, et al. (2020), “Analysis of the functional orientation of agricultural systems from the perspective of resource circulation”, *Journal of Cleaner Production*, **258**, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120642.

[14] M. Tripathi, D. Diwan, A.C. Shukla, et al. (2024), “Valorization of dragon fruit waste to value-added bioproducts and formulations: A review”, *Critical Reviews in Biotechnology*, **44(6)**, pp.1061-1079, DOI: 10.1080/07388551.2023.2254930.

[15] O. Cortner, J. Ferreira, M.T. Niles, et al. (2019), “Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon”, *Land Use Policy*, **82**, pp.841-853, DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.01.006.

[16] G. Liu, Y. Hao, L. Dong, et al. (2017), “An emergy-LCA analysis of municipal solid waste management”, *Resources, Conservation and Recycling*, **120**, pp.131-143, DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.12.003.

[17] N.C. Londono, H. Cabezas, K. Baracza, et al. (2022), “Integrated sustainability assessment: Exergy, emergy, life cycle assessment”, *Frontiers in Sustainability*, **3**, DOI: 10.3389/frsus.2022.921874.

- [18] B. Yang, W. Jia, Y. Yu, et al. (2024), “Sustainability assessment of agricultural waste biogas production system in China based on emergy and carbon evaluation methods”, *Agriculture*, **14**(11), DOI: 10.3390/agriculture14111912.
- [19] X. Lei, B. Liang, L. Feng, et al. (2024), “Emergy-based evaluation of production efficiency and sustainability of diversified multi-cropping systems in the Yangtze River Basin”, *Frontiers in Plant Science*, **15**, DOI: 10.3389/fpls.2024.1454130.
- [20] L.P. Amaral, N. Martins, J.B. Gouveia (2016), “A review of emergy theory, its application and latest developments”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **54**, pp.882-888, DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.048.
- [21] M.T. Brown, S. Ulgiati (2002), “Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems”, *Journal of Cleaner Production*, **10**(4), pp.321-334, DOI: 10.1016/S0959-6526(01)00043-9.
- [22] D. Nilsson (1997), “Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants”, *Biomass and Bioenergy*, **13**(1-2), pp.63-73, DOI: 10.1016/S0961-9534(97)00025-1.
- [23] M.T. Brown, S. Ulgiati (2004), “Emergy analysis and environmental accounting”, *Encyclopedia of Energy*, **2**(1), pp.329-354.
- [24] X. Dong, S. Ulgiati, M. Yan, et al. (2008), “Energy and emergy evaluation of bioethanol production from wheat in Henan Province, China”, *Energy Policy*, **36**(10), pp.3882-3892, DOI: 10.1016/j.enpol.2008.04.027.
- [25] C.L.F. Pereira, E. Ortega (2010), “Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane”, *Journal of Cleaner Production*, **18**(1), pp.77-82, DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.09.007.
- [26] W.A. Pippo, J. Rocha, J.M. Perez (2004), “Emergy evaluation of bio-oil production using sugarcane biomass residues at fast pyrolysis pilot in Brazil”, *Proceedings of The IV Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”*, Unicamp, Campinas, Brazil.
- [27] O. Cavalett, E. Ortega (2010), “Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil”, *Journal of Cleaner Production*, **18**(1), pp.55-70, DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.09.008.
- [28] G. Zhang, W. Long (2010), “A key review on emergy analysis and assessment of biomass resources for a sustainable future”, *Energy Policy*, **38**(6), pp.2948-2955, DOI: 10.1016/j.enpol.2010.01.032.
- [29] G. Liu, Y. Hao, Y. Zhang, et al. (2019), “Emergy analysis of urban domestic water metabolism: A case study in Beijing (China)”, *Journal of Cleaner Production*, **234**, pp.714-724, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.231.
- [30] Y. Qi, X. Zhang, X. Yang, et al. (2018), “The environmental sustainability evaluation of an urban tap water treatment plant based on emergy”, *Ecological Indicators*, **94**, pp.28-38, DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.06.042.
- [31] F.M. Pulselli, N. Patrizi, S. Focardi (2011), “Calculation of the unit emergy value of water in an Italian watershed”, *Ecological Modelling*, **222**(16), pp.2929-2938, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.04.021.
- [32] X.H. Zhang, J. Wu, W. Jiang, et al. (2010), “A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based on emergy”, *Ecological Engineering*, **36**(5), pp.685-696, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.010.
- [33] X. Zhang, Y. Wei, M. Li, et al. (2014), “Emergy evaluation of an integrated livestock wastewater treatment system”, *Resources, Conservation and Recycling*, **92**, pp.95-107, DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.09.003.
- [34] X. Wang, Z. Li, P. Long, et al. (2017), “Sustainability evaluation of recycling in agricultural systems by emergy accounting”, *Resources, Conservation and Recycling*, **117**, pp.114-124, DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.11.009.
- [35] Z. Wu, X. Guo, C. Lv, et al. (2018), “Study on the quantification method of water pollution ecological compensation standard based on emergy theory”, *Ecological Indicators*, **92**, pp.189-194, DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.09.052.
- [36] S.M. Shah, G. Liu, Q. Yang, et al. (2019), “Emergy-based valuation of agricultural ecosystem services and dis-services”, *Journal of Cleaner Production*, **239**, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118019.
- [37] C.D. Delgado, C.R. Fonseca, M.V. Esteller, et al. (2014), “The establishment of integrated water resources management based on emergy accounting”, *Ecological Engineering*, **63**, pp.72-87, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.12.034.