A COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY AND WATER USE EFFICIENCY AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS BETWEEN SOIL-BASED AND HYDROPONIC FARMING SYSTEMS

Lam Truc Thanh, Ho Thi Thanh Hien*, Huynh Nhu, Nguyen Thi Tu Quyen
Van Lang University

ARTICLE INFO

Received: 16/01/2025
Revised: 08/4/2025
Published: 12/4/2025

KEYWORDS

Controlled environment agriculture
Hydroponic systems
Water scarcity
Embodied energy
Greenhouse gas emissions

ABSTRACT

Today, the area of agricultural land is increasingly shrinking, especially in urban areas. In this context, the development of controlled environment agriculture through hydroponic farms is emerging as a new strategy to address these challenges. However, the process of constructing and operating hydroponic farms is often considered resource- and energy-intensive, potentially leading to unsustainable development. This study evaluated the environmental impacts of hydroponic farming technology and compared them with those of traditional soil-based cultivation by adopting a life cycle assessment approach. The investigation was conducted at two commercial farms in Ho Chi Minh City: one hydroponic farm and one open-field farm, each occupying an area of 1,000 m². The results revealed that the hydroponic farm achieved higher productivity and land use efficiency in addition to consuming fewer resources in terms of water and energy, and emitting fewer greenhouse gases per kilogram of fresh biomass compared to the open-field farm. The findings provided an overview of the environmental strengths and limitations of each farming method, thereby offering valuable insights for more effective farm development and operations.

SO SÁNH HIỆU QUẢ SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG, NƯỚC VÀ PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH GIỮA TRANG TRẠI THỔ CANH VÀ THỦY CANH

Lâm Trúc Thanh, Hồ Thị Thanh Hiền*, Huỳnh Như, Nguyễn Thị Tú Quyên
Trường Đại học Văn Lang

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 16/01/2025
Ngày hoàn thiện: 08/4/2025
Ngày đăng: 12/4/2025

TỪ KHÓA

Nông nghiệp môi trường kiểm soát
Hệ thống thủy canh
Khan hiếm nước
Năng lượng tiêu tốn
Phát thải khí nhà kính

TÓM TẮT

Hiện nay diện tích đất nông nghiệp ngày càng bị thu hẹp, đặc biệt tại các đô thị. Trong bối cảnh đó, phát triển nông nghiệp trong môi trường kiểm soát với công nghệ thủy canh đang trở thành hướng đi mới nhằm vượt qua những thách thức này. Tuy nhiên, quá trình xây dựng và vận hành các trang trại thủy canh được cho là tiêu tốn tài nguyên và năng lượng, có khả năng dẫn đến phát triển không bền vững. Nghiên cứu này đánh giá tác động môi trường của công nghệ canh tác thủy canh và so sánh với công nghệ canh tác truyền thống trên đất áp dụng phương pháp đánh giá vòng đời. Nghiên cứu được triển khai ở 2 trang trại quy mô thương mại tại TP.HCM: một trang trại thủy canh và một trang trại thổ canh với diện tích 1000 m^2. Kết quả cho thấy, trang trại thủy canh mang lại năng suất và hiệu quả sử dụng đất cao hơn, đồng thời nhu cầu sử dụng tài nguyên nước, năng lượng và phát thải khí nhà kính tính trên mỗi kg rau tươi đều thấp hơn trang trại thổ canh. Nghiên cứu này cho thấy ưu, nhược điểm về môi trường của từng phương pháp, tạo tiền đề định hướng phát triển và vận hành các trang trại một cách hiệu quả hơn.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11910

* Corresponding author. *Email: hien.htt@vlu.edu.vn*

1. Giới thiệu

Trong bối cảnh dân số toàn cầu cũng như dân số đô thị liên tục tăng [1], [2] và tác động của biến đổi khí hậu, nhiều quốc gia trên thế giới đang đối mặt với tình trạng suy giảm diện tích đất nông nghiệp, suy thoái đất và khan hiếm nước. Những vấn đề này là động lực thúc đẩy mạnh mẽ việc phát triển và áp dụng các mô hình nông nghiệp môi trường được kiểm soát (controlled environment agriculture – CEA) tại các khu vực đô thị trên toàn cầu [3]. CEA bao gồm các hệ thống trồng trọt trong nhà, không sử dụng đất, nơi các yếu tố môi trường quan trọng như ánh sáng, nhiệt độ, độ ẩm, nước và chất dinh dưỡng được điều chỉnh để tạo ra điều kiện lý tưởng cho sự phát triển thực vật. Các hệ thống này cho phép canh tác quanh năm và đa tầng, nhờ đó có thể cung cấp sản lượng cao hơn trên cùng một diện tích đất so với nông nghiệp truyền thống ngoài trời sử dụng đất. Với điều kiện môi trường được kiểm soát lý tưởng cho sự phát triển của cây trồng, CEA có thể được thiết lập ở bất cứ đâu, giúp giảm sự phụ thuộc của các đô thị vào nhập khẩu thực phẩm cũng như cải thiện sức khỏe thông qua chế độ ăn uống lành mạnh hơn [4].

Ngày nay, trong số các phương pháp CEA, canh tác thủy canh vẫn là phương pháp được áp dụng rộng rãi nhất trên toàn cầu với một số ưu điểm nổi bật [5]. Trong hệ thống thủy canh khép kín và tuần hoàn, lượng nước, chất dinh dưỡng và thuốc trừ sâu có thể được giữ ở mức tối thiểu [6], do đó ngăn ngừa được dòng chảy ô nhiễm ra môi trường [7]. Tuy nhiên, hệ thống thủy canh cũng tồn tại nhiều vấn đề liên quan đến chi phí đầu tư ban đầu, nhu cầu sử dụng năng lượng và nguyên vật liệu trong quá trình xây dựng hệ thống trang trại kín [8]. Ngược lại, phương pháp canh tác trên đất (thổ canh) sử dụng nhiều phân bón và hóa chất bảo vệ thực vật luôn tạo ra các dòng thất thoát ra môi trường, gây tác động tiêu cực đến chất lượng đất, nguồn nước lân cận và hệ sinh thái [9]. Các máy móc thiết bị sử dụng năng lượng cũng được sử dụng trong thổ canh, tuy nhiên mức độ khác nhau tùy quy mô sản xuất, đồng thời thiết kế trang trại thổ canh cũng đơn giản hơn.

Phương pháp đánh giá vòng đời (life cycle assessment – LCA) đã được chứng minh sự thành công trong việc đánh giá các tác động từ các hệ thống nông nghiệp môi trường kiểm soát [4], [10], [11]. Các tác động môi trường chính của các hệ thống thủy canh được xem xét liên quan đến hiệu quả sử dụng nước, phân bón, thuốc bảo vệ thực vật, đất, năng lượng và phát thải khí nhà kính (KNK) [6], [12], [13]. Hiệu quả sử dụng đất của các hệ thống thủy canh cao hơn so với thổ canh từ 7 đến 18 lần [6]. Tùy vào mức độ hiện đại của công nghệ áp dụng mà lượng nước tiêu thụ trên 1 kg cà chua của trang trại thủy canh giảm từ 3 đến 15 lần so với thổ canh, tuy nhiên trang trại thủy canh tiêu thụ năng lượng gấp 8 lần so với thổ canh [6]. Nghiên cứu hệ thống thủy canh xà lách theo chiều dọc tại đô thị ở Thụy Điển cho thấy mức tiêu thụ năng lượng là đáng kể do nhu cầu chiếu sáng nhân tạo và kiểm soát khí hậu trong trang trại [14]. Casey và cộng sự [10] so sánh các hệ thống thủy canh và thổ canh ở một số quốc gia khác nhau trên thế giới cho kết quả thú vị là không phải hệ thống thủy canh nào cũng có chỉ số khan hiếm nước thấp, tác động cạn kiệt tài nguyên năng lượng và tiềm năng nóng lên toàn cầu cao. Sự khác nhau về mức độ tác động được quyết định rất lớn bởi yếu tố địa lý của khu vực trồng trọt, công nghệ sử dụng và các nguồn năng lượng tham gia vào lưới điện cung cấp cho hệ thống.

Tại Việt Nam, hình thức canh tác thủy canh đã và đang diễn ra mạnh mẽ trong hơn một thập kỷ qua, xu hướng này vẫn sẽ tiếp tục phát triển nhằm thích ứng với điều kiện quỹ đất ngày càng bị thu hẹp đặc biệt ở các đô thị. Tuy nhiên, số liệu nghiên cứu về mức độ tiêu thụ nguyên vật liệu đầu vào và các vấn đề môi trường phát sinh từ hệ thống canh tác thủy canh vẫn còn hạn chế. Xuất phát từ thực tế trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá, so sánh hiệu quả sử dụng tài nguyên đầu vào (đất, nước, năng lượng) và mức độ phát thải KNK giữa hai hình thức canh tác thủy canh và thổ canh. Đối tượng nghiên cứu được lựa chọn là trang trại sản xuất rau quy mô thương mại tại Thành phố Hồ Chí Minh (TP.HCM) có diện tích tương đương nhau và cùng trồng rau cải xanh để so sánh. Kết quả nghiên cứu cung cấp thông tin giá trị về một số khía cạnh môi trường và ứng phó với biến đổi khí hậu của trang trại thủy canh, làm cơ sở đưa ra các khuyến nghị về bảo vệ môi trường và phát triển bền vững cho lĩnh vực trồng trọt trong bối cảnh đô thị hóa tại Việt Nam.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Phương pháp đánh giá vòng đời (LCA)

Theo khuôn khổ của Tổ chức quốc tế về tiêu chuẩn hóa (ISO), LCA được thực hiện theo 04 bước chính: (i) Xác định mục tiêu: tính toán và so sánh nhu cầu sử dụng; (ii) Xác định phạm vi; (iii) Phân tích kiểm kê vòng đời (LCI); và (iv) Đánh giá tác động theo vòng đời (LCIA) [15]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này áp dụng LCA để tính toán mức độ sử dụng tài nguyên và phát thải khí nhà kính từ một trang trại thủy canh và một trang trại thổ canh trồng cải xanh tại TP.HCM. Quy trình LCA áp dụng trong nghiên cứu này được giới hạn ở giai đoạn kiểm kê vòng đời và được trình bày cụ thể dưới đây. Mục tiêu của nghiên cứu đã có thể đạt được với các dữ liệu kiểm kê trên hệ thống đánh giá.

2.1.1. Xác định mục tiêu

Quan điểm và phương pháp LCA được áp dụng trong nghiên cứu này nhằm cung cấp thông tin về mức độ sử dụng tài nguyên (đất, nước và năng lượng) và phát thải khí nhà kính đầy đủ nhất có thể thông qua xem xét các giai đoạn khác nhau liên quan đến quá trình sản xuất cải xanh. Qua tìm hiểu thực tế tại các trang trại thủy canh, nghiên cứu chọn cải xanh để đánh giá vì đây là một trong số các loại rau được trồng phổ biến nhất bằng phương pháp thủy canh, đồng thời được tiêu thụ nhiều nhất. Hai trang trại tại TP.HCM (Hình 1) được lựa chọn có quy mô thương mại với diện tích đất sản xuất tương đương nhau là 1.000 m^2 (không tính diện tích khu vực quản lý và đóng gói) và đều có trồng rau cải xanh. Ký hiệu của trang trại thủy canh và thổ canh lần lượt là H-HCM và O-HCM. Thông tin của hai trang trại này được tóm tắt tại Bảng 1, với bản đồ vị trí tại *Phụ lục 1* theo đường link sau: https://docs.google.com/document/d/1N2Ot0cDOPx6hYTl547B4J_ADyQTDZfr8/edit?usp=drive_link&ouid=118320262858807232199&rtpof=true&sd=true.

Bảng 1. *Thông tin chung về hai trang trại thổ canh (O-HCM) và thủy canh (H-HCM)*

Thông tin	H-HCM	O-HCM
Quy mô canh tác	1.000 m^2	1.000 m^2
Diện tích trồng cải xanh	600 m^2	600 m^2
Công nghệ	Thủy canh ngang 1 lớp, đáp ứng tiêu chuẩn Vietgap	Trồng trọt trên đất, đáp ứng tiêu chuẩn Vietgap
Năng suất	16,7 tấn rau tươi/ha/năm	11,7 tấn rau tươi/ha/năm
Cơ sở hạ tầng	Kết cấu thép chắc chắn với lưới PE, môi trường được kiểm soát thủ công, nguồn điện 220V từ điện lưới quốc gia, nguồn nước tưới sử dụng nước mặt, sử dụng ánh sáng tự nhiên	Đơn giản, chỉ gồm màng PE và các thanh sắt cố định màng, nguồn điện 220V từ điện lưới quốc gia, nguồn nước tưới sử dụng nước ngầm, sử dụng ánh sáng tự nhiên

a) *b)*

Hình 1. *Hình ảnh thực tế: a) trang trại thủy canh; b) trang trại thổ canh*

2.1.2. Xác định phạm vi

Ranh giới hệ thống đánh giá

Hệ thống đánh giá đối với cả hai trang trại bao gồm 03 quá trình: (i) Sản xuất nguyên vật liệu (NVL) và lắp đặt trang trại; (ii) Canh tác tại trang trại; và (iii) Thu hoạch và đóng gói (Hình 2).

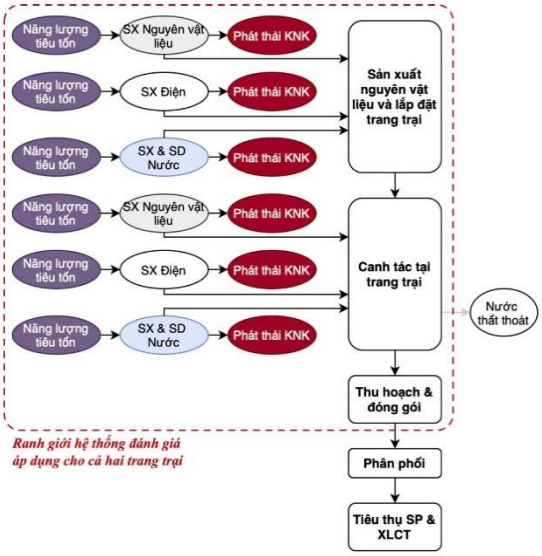
Các quy trình bảo quản sau thu hoạch và chuyên chở sản phẩm đến người tiêu dùng không bao gồm trong nghiên cứu này. Quá trình tính toán được thực hiện cho 1 năm vận hành của trang trại.

Chỉ số đánh giá

Theo mục tiêu nghiên cứu, các chỉ số đánh giá và đơn vị đo lường tương ứng đối với hai trang trại bao gồm: (1) Nhu cầu sử dụng đất (m^2); (2) Lượng nước tiêu thụ (L); (3) Năng lượng tiêu tốn (MJ); và (4) Phát thải khí nhà kính ($kgCO_{2\text{-}eq}$).

Đơn vị chức năng

Đơn vị chức năng trong nghiên cứu được định nghĩa là một kg rau cải xanh (sinh khối tươi thương mại – viết tắt là CFB) sản xuất ra trong điều kiện canh tác của trang trại [16]. Như vậy, các chỉ số đánh giá được biểu diễn theo đơn vị chức năng như sau: (1) Nhu cầu sử dụng đất (m^2/kg CFB); (2) Lượng nước tiêu thụ (L/kg CFB); (3) Năng lượng tiêu tốn (MJ/kg CFB); và (4) Phát thải khí nhà kính ($kgCO_{2\text{-}eq}$/kg CFB).



Hình 2. *Ranh giới hệ thống đánh giá tại hai trang trại*

2.1.3. Phân tích kiểm kê theo vòng đời (LCI)

LCI là quá trình xây dựng một bảng kiểm kê các lượng tổng hợp của các "dòng cơ bản" theo hai nhóm: *tài nguyên và phát thải* từ các quá trình trong hệ thống đánh giá. Nghiên cứu này có hai dạng thông số kiểm kê: thông số trực tiếp và thông số gián tiếp (Bảng 2). Các thông số kiểm kê gián tiếp được tính toán từ các thông số kiểm kê trực tiếp.

Bảng 2. *Tóm tắt các thông số kiểm kê theo giai đoạn đánh giá*

Giai đoạn	Thông số kiểm kê trực tiếp (trung bình 1 năm)	Thông số kiểm kê gián tiếp (trung bình 1 năm)
Sản xuất NVL và lắp đặt trang trại	Nhu cầu nguyên vật liệu (kg) Nhu cầu sử dụng điện (kWh) Nhu cầu sử dụng nước (L)	Năng lượng tiêu tốn (MJ) Phát thải KNK (kg $CO_{2\text{-}eq}$)
Canh tác tại trang trại	Nhu cầu sử dụng điện (kWh) Nhu cầu sử dụng nước (L)	Năng lượng tiêu tốn (MJ) Phát thải KNK (kg $CO_{2\text{-}eq}$)
Thu hoạch và đóng gói	Khối lượng sinh khối tươi thương mại (kg CFB)	

2.2. Phương pháp điều tra, khảo sát

Bảng 3. *Phiếu khảo sát thu thập thông tin tại trang trại thổ canh và thủy canh*

Giai đoạn	Đầu vào	Nhu cầu sử dụng
Sản xuất NVL và lắp đặt trang trại	Diện tích đất	Bao nhiêu m^2
	Sắt thép, lưới, tủ điện, thiết bị: quạt, bơm nước, thiết bị phun sương...	Thông tin từng loại vật liệu, định lượng (kg), chế độ sử dụng, thời gian khấu hao (năm)
	Bể chứa nước/ dinh dưỡng	Vật liệu, kích thước dài, rộng, cao (m)
	Máng trồng cây, hệ thống giá đỡ máng, hệ thống tưới nước, ống dẫn dung dịch	Vật liệu, đường kính (m), chiều dài tính trên tổng diện tích nhà màng (m)
Canh tác tại trang trại **Gieo hạt**	Hạt giống	Khối lượng hạt giống sử dụng (g)
	Khay gieo hạt	Vật liệu, kích cỡ, khối lượng khay (g), số lượng khay, thời gian sử dụng (năm)
	Giá thể	Loại giá thể (đất, xơ dừa...), khối lượng giá thể cho mỗi khay gieo hạt (g)

Giai đoạn		Đầu vào	Nhu cầu sử dụng
		Phân bón (nếu có)	Loại phân bón, lượng sử dụng /khay (g)
		Nước tưới	Chu kỳ tưới, lượng nước tưới (L)
	Ươm cây con	Cây con	Tỷ lệ sống của cây (%)
		Khay ươm	Vật liệu, kích cỡ, khối lượng khay (g), số lượng khay, thời gian sử dụng (năm)
		Phân bón	Loại phân bón, lượng sử dụng/ khay (g)
		Nước tưới	Chu kỳ tưới, lượng nước tưới (L)
	Trồng cây	Cây con đưa vào luống/máng thủy canh	Số lượng cây trồng trên diện tích 600 m^2
		Nước tưới	Chu kỳ tưới, lượng nước tưới (L)
	Hạng mục chung	Điện (cho tất cả các hoạt động sản xuất của trang trại)	Lượng điện tiêu thụ (kWh)
		Nước cấp (cho tất cả các hoạt động sản xuất của trang trại)	Lượng nước tiêu thụ (L)
Thu hoạch và đóng gói		Khối lượng rau thu hoạch	Khối lượng rau cải xanh thu hoạch trên diện tích trồng (kg), số lượng cây, khối lượng trung bình mỗi cây cải xanh trưởng thành (kg)
		Bao bì đóng gói	Quy cách đóng gói (bao nhiêu gram/gói), khối lượng bao bì đóng gói (kg)

Phương pháp điều tra khảo sát kết hợp các hình thức thu thập thông tin khác nhau được thực hiện tại hai trang trại nhằm thu thập các thông số kiểm kê trực tiếp trình bày tại Bảng 2. Phương pháp phỏng vấn được sử dụng đầu tiên để tìm hiểu các nguồn thông tin chung và dữ liệu (thứ cấp) sẵn có của trang trại như: quy mô sản xuất và quy trình công nghệ, bản vẽ thiết kế, các trang thiết bị của trang trại và số lượng v.v. Các dữ liệu không sẵn có, chẳng hạn khay gieo hạt, khay ươm v.v.) sẽ được thu thập tại hiện trường bằng phương pháp cân, đo, đếm trực tiếp. Lượng điện và nước tiêu thụ được thu thập thông qua các hóa đơn hóa đơn điện, nước. Phiếu khảo sát (Bảng 3) được sử dụng để tổng hợp các thông tin được thu thập một cách hệ thống tại mỗi trang trại.

2.3. Công thức tính toán các thông số tiêu thụ tài nguyên và phát thải khí nhà kính

Các dữ liệu kiểm kê được tính toán quy đổi về giá trị cho 1 năm vận hành trang trại, sau đó áp dụng các công thức từ (1) đến (6) để tính toán các chỉ số hiệu quả sử dụng đất, nước, năng lượng và phát thải KNK của hai trang trại theo phương pháp của Ashby [17] như sau:

Năng lượng tiêu tốn cho quá trình "sản xuất NVL và xây dựng trang trại":

$$\boldsymbol{dE_i\left(\frac{MJ}{kgCFB}\right) = E_i\left(\frac{MJ}{kg}\right) \times M_i(kg) \div T_i(năm) \div P\left(\frac{kgCFB}{năm}\right)} \quad (1)$$

Trong đó, $dE_i\left(\frac{MJ}{kgCFB}\right)$ và $E_i\left(\frac{MJ}{kg}\right)$ lần lượt là năng lượng tiêu tốn tính trên 1 đơn vị chức năng và hệ số năng lượng tiêu tốn cho quá trình "sản xuất NVL" hoặc "xây dựng trang trại" thứ *i*; $M_i(kg)$ là khối lượng NVL thuộc quá trình "sản xuất NVL" hoặc quá trình "xây dựng trang trại" thứ *i*; $T_i(năm)$ là thời gian khấu hao loại NVL thứ *i*; $P\left(\frac{kgCFB}{năm}\right)$ là năng suất sản xuất sản phẩm của trang trại trong 1 năm.

Phát thải KNK từ quá trình "sản xuất NVL và lắp đặt trang trại":

$$\boldsymbol{dGHG_i\left(\frac{kgCO_{2-eq}}{kgCFB}\right) = GHG_i\left(\frac{kgCO_{2-eq}}{kg}\right) \times M_i(kg) \div T_i(năm) \div P\left(\frac{kgCFB}{năm}\right)} \quad (2)$$

Trong đó, $dGHG_i\left(\frac{kgCO_{2-eq}}{kgCFB}\right)$ và $GHG_i\left(\frac{kgCO_{2-eq}}{kg}\right)$ lần lượt là phát thải KNK tính trên 1 đơn vị chức năng và hệ số phát thải KNK từ quá trình "sản xuất NVL" hoặc "xây dựng trang trại" thứ *i*.

Nhu cầu sử dụng nước và đất cho quá trình "canh tác tại trang trại":

$$\boldsymbol{dW_P\left(\frac{L}{kgCFB}\right) = W_P\left(\frac{L}{năm}\right) \div P\left(\frac{kgCFB}{năm}\right)} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{dL_P\left(\frac{m^2}{kgCFB}\right) = L_P(\frac{m^2}{năm}) \div P\left(\frac{kgCFB}{năm}\right)} \quad (4)$$

Trong đó, $dW_P\left(\frac{L}{kgCFB}\right)$ và $dL_P\left(\frac{m^2}{kgCFB}\right)$ là nhu cầu sử dụng nước và đất cho quá trình "canh tác tại trang trại" tính trên 1 đơn vị chức năng; $W_P\left(\frac{L}{năm}\right)$ và $L_P(\frac{m^2}{năm})$ là nhu cầu sử dụng nước và đất cho quá trình "canh tác tại trang trại" trong 1 năm.

Năng lượng tiêu tốn cho sản xuất điện và nước cấp trong quá trình "canh tác tại trang trại":

$$\boldsymbol{dE_i\left(\frac{MJ}{kgCFB}\right) = E_i\left(\frac{MJ}{kWh}\ hoặc\ \frac{MJ}{m^3}\right) \times M_i(kWh\ hoặc\ m^3) \div P\left(\frac{kgCFB}{năm}\right)} \quad (5)$$

Trong đó, $E_i\left(\frac{MJ}{kWh}\ hoặc\ \frac{MJ}{m^3}\right)$ là hệ số năng lượng tiêu tốn cho quá trình sản xuất điện từ nguồn năng lượng thứ *i* hoặc cho nước cấp; $M_i(kWh\ hoặc\ m^3)$ là lượng điện từ nguồn năng lượng thứ *i* hoặc lượng nước cấp cho quá trình "canh tác tại trang trại" trong 1 năm.

Phát thải KNK từ sản xuất điện trong quá trình "canh tác tại trang trại":

$$\boldsymbol{dGHG_i\left(\frac{kgCO_{2-eq}}{kgCFB}\right) = GHG_i\left(\frac{kgCO_{2-eq}}{kWh}\right) \times M_i(kWh) \div P\left(\frac{kgCFB}{năm}\right)} \quad (6)$$

Trong đó, $GHG_i\left(\frac{kgCO_{2-eq}}{kWh}\right)$ là hệ số phát thải KNK từ quá trình sản xuất điện từ nguồn năng lượng thứ *i*; $M_i(kWh)$ là nhu cầu sử dụng điện từ nguồn năng lượng thứ *i* cho quá trình "canh tác tại trang trại" trong 1 năm. Ngoài ra, năng lượng tiêu tốn và phát thải KNK từ sản xuất NVL phục vụ quá trình "canh tác tại trang trại" được tính toán tương tự theo công thức (1) và (2).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Nhu cầu sử dụng tài nguyên, năng lượng và phát thải KNK tại hai trang trại

Trên cơ sở dữ liệu thu thập tại hai trang trại về nguyên vật liệu, nước và điện sử dụng, các giá trị năng lượng tiêu tốn và phát thải KNK được tính toán riêng cho mỗi hạng mục kiểm kê trong thời gian 1 năm, áp dụng công thức từ (1) đến (6) và hệ số năng lượng tiêu tốn và thời gian khấu hao của mỗi loại nguyên vật liệu (*Phụ lục 2* theo đường link: https://docs.google.com/document/d/1y70N6qQcjc8dW6Now7YF2R7CPVNEZlvk/edit?usp=drive_link&ouid=118320262858807232199&rtpof=true&sd=true).

Kết quả tính toán cho thấy năng lượng tiêu tốn cho giai đoạn "sản xuất NVL và lắp đặt trang trại" của O-HCM (9.581,30 MJ/năm) nhỏ hơn so với H-HCM (11.723,00 MJ/năm) (Bảng 4 và 5). Lý do là vì O-HCM có thiết kế nhà màng đơn giản hơn, sử dụng lượng thép ít hơn và không sử dụng hệ thống máng thủy canh như H-HCM. Ngược lại, trong giai đoạn "canh tác tại trạng trại", O-HCM sử dụng bơm nước ngầm để tưới rau hằng ngày nên tiêu tốn năng lượng nhiều hơn (24.351,88 MJ/năm) so với H-HCM (22.290,99 MJ/năm). Điều này dẫn đến sự khác biệt không đáng kể về năng lượng tiêu tốn trong 1 năm tại mỗi trang trại (O-HCM: 35.163,18 MJ/năm; H-HCM: 35.147,99 MJ/năm).

Tương tự, phát thải KNK cho giai đoạn "sản xuất NVL và lắp đặt trang trại" của O-HCM là 671,95 ($kgCO_{2\text{-}eq}$/năm), cũng thấp hơn H-HCM với giá trị 718,19 ($kgCO_{2\text{-}eq}$/năm). Trong giai đoạn "canh tác tại trạng trại", O-HCM sử dụng thêm 1 lớp màng PE che phủ các luống cây con và toàn bộ màng được thải bỏ mỗi năm dẫn đến phát thải KNK của O-HCM (1.733,36 $kgCO_{2\text{-}eq}$/năm) mặc dù thấp hơn H-HCM (1.801,27 $kgCO_{2\text{-}eq}$/năm) nhưng mức độ chênh lệch không đáng kể. Tổng phát thải KNK trong 1 năm của O-HCM (2.445,81 $kgCO_{2\text{-}eq}$/năm) thấp hơn khoảng 4,3% so với H-HCM (2.557,26 $kgCO_{2\text{-}eq}$/năm). Cũng trong giai đoạn này, nếu như phát thải KNK tại O-HCM liên quan nhiều đến sử dụng điện và màng PE thì tại H-HCM phát thải KNK chủ yếu liên quan đến điện vận hành trang trại.

Trong các hoạt động được đánh giá thì "canh tác tại trang trại" gây tác động lớn nhất, trong đó năng lượng tiêu tốn trong 1 năm chiếm 63,4% đối với H-HCM và 69,3% đối với O-HCM; phát

thải KNK chiếm khoảng 71% cho cả hai trang trại. Hoạt động gây tác động đáng kể thứ hai là "sản xuất NVL và lắp đặt trang trại" với mức năng lượng tiêu tốn trong 1 năm chiếm 34,4% đối với H-HCM và 27,2% đối với O-HCM; phát thải KNK chiếm khoảng 28% cho cả hai trang trại. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự tương đồng với công bố của Blom và cộng sự [18]. Theo đó, giai đoạn canh tác tại trang trại thủy canh đơn lớp chịu trách nhiệm cho 56% tổng phát thải KNK trong 1 năm, trong khi giá trị này tại trang trại thủy canh đa lớp lên đến 85%. Phát thải KNK cũng phần lớn liên quan đến việc sử dụng điện phục vụ quá trình vận hành trang trại.

Bảng 4. *Nguyên vật liệu, năng lượng tiêu tốn và phát thải KNK của H-HCM*

Giai đoạn	Đầu vào	Đơn vị	Số lượng/ năm	Năng lượng tiêu tốn (MJ/năm)	Phát thải KNK ($kgCO_{2-q}$/năm)
Sản xuất NVL và lắp đặt trang trại	Khung nhà màng (thép)	kg/năm	101,24	7.391,00	546,70
	Quá trình đúc kim loại (NM)	kg/năm	101,24	911,00	65,81
	Màng PE	kg/năm	33,25	2.693,00	73,15
	Quạt thông gió	kg/năm	0,50	37,00	2,70
	Quá trình đúc kim loại	kg/năm	0,50	5,00	0,33
	Máy bơm dung dịch	kg/năm	0,50	15,00	1,05
	Quá trình đúc kim loại	kg/năm	0,50	5,00	0,33
	Máy bơm nước	kg/năm	1,20	35,00	2,52
	Quá trình đúc kim loại	kg/năm	1,20	11,00	0,78
	Thiết bị phun sương (PVC)	kg/năm	0,70	46,00	1,89
	Bể chứa dung dịch	kg/năm	0,06	0,00	0,01
	Máng trồng cây (PP)	kg/năm	6,00	480,00	17,40
	HT giá đỡ máng (sắt)	kg/năm	2,00	58,00	4,20
	HT ống dẫn dung dịch	kg/năm	0,10	7,00	0,27
	HT ống dẫn nước tuần hoàn	kg/năm	0,10	7,00	0,27
	Đèn chiếu sáng năng lượng mặt trời	kg/năm	0,27	22,00	0,78
	Tổng			*11.723,00*	*718,19*
Canh tác tại trang trại	Rọ nhựa PP	kg/năm	0,67	54,00	1,94
	Quá trình đúc nhựa (rọ)	kg/năm	0,67	4,00	0,28
	Khay gieo hạt	kg/năm	6,00	480,00	17,40
	Rổ nhựa PP	kg/năm	3,12	250,00	9,05
	Quá trình đúc nhựa (tạo hình)	kg/năm	3,12	20,00	1,31
	Nước pha dung dịch thủy canh và phun sương	m^3/năm	5,50	9,95	-
	Điện sử dụng tại trang trại	kWh/năm	3.324,00	21.473,04	1.771,29
	Tổng			*22.290,99*	*1.801,27*
Thu hoạch và đóng gói	Bao bì đóng gói	kg/năm	14,00	1.134,00	37,80
Tổng cộng				***35.147,99***	***2.557,26***

Bảng 5. *Nguyên vật liệu đầu vào, năng lượng tiêu tốn và phát thải KNK của O-HCM*

Giai đoạn	Đầu vào	Đơn vị	Số lượng/ năm	Năng lượng tiêu tốn (MJ/năm)	Phát thải KNK ($kgCO_{2-eq}$/năm)
Sản xuất NVL và lắp đặt trang trại	Cuốc, xẻng	kg/năm	0,70	20,30	14,70
	Khung nhà màng (thép)	kg/năm	22,00	638,00	46,20
	Quá trình đúc kim loại (NM)	kg/năm	22,00	198,00	14,30
	Màng PE	kg/năm	11,40	923,00	25,08
	Bơm nước tưới	kg/năm	0,50	15,00	1,05
	Quá trình đúc kim loại	kg/năm	0,50	5,00	0,33

Giai đoạn	Đầu vào	Đơn vị	Số lượng/ năm	Năng lượng tiêu tốn (MJ/năm)	Phát thải KNK ($kgCO_{2\text{-}eq}$/năm)
	Thiết bị tưới nước tự động	kg/năm			
	+ Ống nhựa PVC		0,20	13,00	0,54
	+ Đầu tưới bằng sắt		0,15	4,00	0,32
	Bể chứa nước và khung đỡ	kg/năm	3,20	234,00	17,28
	Quá trình uốn kim loại	kg/năm	3,20	14,00	1,34
	Quá trình hoàn thành khung	kg/năm	3,20	4,00	0,27
	Hệ thống ống nước	kg/năm	0,20	13,00	0,54
	Diode bán dẫn và LED	kg/năm	2,50	7.500,00	550,00
	Tổng			*9.581,30*	*671,95*
Canh tác tại trang trại	Màng PE (che luống cây con)	kg/năm	57,00	4.617,00	125,40
	Vỏ thuốc BVTV (PET)	kg/năm	0,50	41,00	1,35
	Rổ nhựa PP	kg/năm	2,40	192,00	6,96
	Quá trình đúc nhựa (tạo hình)	kg/năm	2,40	16,00	1,01
	Nước pha hóa chất BVTV, tưới, rửa rễ cây sau thu hoạch	m^3/năm	58,50	105,88	-
	Điện sử dụng tại trang trại	kWh/năm	3.000	19.380,00	1.598,64
	Tổng			*24.351,88*	*1.733,36*
Thu hoạch và đóng gói	Bao bì đóng gói	kg/năm	15,00	1.230,00	40,50
Tổng cộng				***35.163,18***	***2.445,81***

3.2. Mức độ sử dụng tài nguyên, năng lượng và phát thải KNK từ các trang trại tính trên 1 kg sinh khối tươi rau cải xanh

Trung bình 1 năm, cả hai trang trại đều sản xuất được 5 vụ rau cải xanh. Tuy nhiên, khối lượng rau cải xanh thu hoạch từ H-HCM (1.000 kg/năm) lớn hơn so với từ O-HCM (700 kg/năm). Trên cơ sở này, tính toán được các chỉ số: (1) Nhu cầu sử dụng đất (m^2/kg CFB); (2) Lượng nước tiêu thụ (L/kg CFB); (3) Năng lượng tiêu tốn (MJ/kg CFB); và (4) Phát thải khí nhà kính ($kgCO_{2\text{-}eq}$/kg CFB) cho mỗi trang trại (Bảng 6). Kết quả cho thấy các chỉ số tính toán cho H-HCM đều tốt hơn so với O-HCM. Cụ thể, hiệu quả sử dụng đất của H-HCM (0,6 m^2/kg CFB) tốt hơn 1,5 lần so với O-HCM (0,9 m^2/kg CFB). Đặc biệt, lượng nước tiêu thụ trên mỗi kg rau cải xanh thương mại tại H-HCM (5,5 L/kg CFB) tiết kiệm hơn gấp 15 lần so với tại O-HCM (83,6 L/kg CFB). Tương tự, mức tiêu thụ năng lượng trên 1 kg rau cải xanh thương mại tại H-HCM (35,1 MJ/kg CFB) cũng tiết kiệm 30% so với O-HCM (50,2 MJ/kg CFB), và phát thải KNK tại H-HCM (2,6 kg $CO_{2\text{-}eq}$/kg CFB) cũng thấp hơn 26% so với O-HCM (3,5 kg $CO_{2\text{-}eq}$/kg CFB). Hiệu quả cao về sử dụng đất và nước cũng như phát thải KNK thấp của các hệ thống thủy canh trong nghiên cứu này cũng được khẳng định tại các công bố trên thế giới [4], [19].

Tuy hiệu quả sử dụng đất của H-HCM cao hơn O-HCM nhưng khi so sánh với trang trại thủy canh đơn lớp tại Hà Lan với hiệu quả sử dụng đất là 0,02 m^2/kg CFB [18], có thể thấy hiệu quả sử dụng đất tại H-HCM vẫn còn thấp. Điều này có thể giải thích là do diện tích chuẩn bị cây con cũng được bao gồm trong diện tích đất sản xuất theo nghiên cứu này, nhưng được loại trừ trong nghiên cứu của Blom và cộng sự [18]. Trang trại thủy canh 7 lớp có hiệu quả sử dụng đất 0,01 m^2/kg CFB [18] cho thấy càng tận dụng được chiều cao của trang trại thì hiệu quả sử dụng đất càng cao hơn. Phát thải KNK tại H-HCM cao hơn trang trại thủy canh đơn lớp (1,451 $kgCO_{2\text{-}eq}$/kg CFB) nhưng thấp hơn nhiều so với trang trại thủy canh 7 lớp (8,177 $kgCO_{2\text{-}eq}$/kg CFB) vì hệ thống đa lớp lệ thuộc vào ánh sáng nhân tạo và có kết cấu trang trại cồng kềnh hơn [18].

So sánh với công bố của Casey và cộng sự [10], H-HCM tiêu thụ nước, năng lượng và phát thải KNK thấp hơn trang trại thủy canh tại Anh và Nam Phi. Tuy nhiên, các chỉ số về năng lượng tiêu thụ và phát thải KNK của H-HCM lại cao hơn trang trại thủy canh tại Na Uy. Tỷ lệ các nguồn năng lượng sản xuất điện là yếu tố quan trọng giải thích mức độ tiêu thụ năng lượng và

phát thải KNK tính trên 1 kWh điện [10]. Các nguồn năng lượng đóng góp vào điện lưới Việt Nam bao gồm <60% từ năng lượng hóa thạch, thủy điện chiếm khoảng 26%, và khoảng 14,1% là năng lượng tái tạo [20]. Trong khi đó, các trang trại thủy canh tại Anh và Nam Phi sử dụng điện chủ yếu từ các nguồn năng lượng hóa thạch như than, khí thiên nhiên, và trang trại thủy canh tại Na Uy sử dụng nguồn điện từ thủy điện. Điều này cho thấy hệ số năng lượng tiêu tốn và phát thải từ 1 kWh điện Việt Nam sẽ cao hơn Anh và Nam Phi, nhưng thấp hơn Na Uy, dẫn đến kết quả so sánh như trên.

Bảng 6. *So sánh mức độ sử dụng tài nguyên và phát thải từ các trang trại*

Hạng mục	O-HCM	H-HCM	H-GB	H-SA	H-NO
Loại cây trồng	Rau cải xanh	Rau cải xanh	Rau xà lách		
Diện tích đất canh tác	600 m^2	600 m^2	-		
Năng suất trung bình	5 vụ/năm 700 kg CFB/năm	5 vụ/năm 1.000 kg CFB/năm	Năng suất cao do thiết kế theo chiều dọc, dữ liệu không có sẵn		
Mức độ sử dụng tài nguyên và phát thải					
Nhu cầu sử dụng đất (m^2/kg CFB)	0,9	0,6	-	-	-
Lượng nước tiêu thụ (L/kg CFB)	83,6	5,5	23	24	37
Năng lượng tiêu tốn (MJ/kg CFB)	50,2	35,1	183	239	12
Phát thải KNK (kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg CFB)	3,5	2,6	8,9	17,8	0,9
Nguồn	Nghiên cứu này		[10]		

Chú thích: H-GB: trang trại thủy canh tại Anh; H-SA: trang trại thủy canh tại Nam Phi; H-NO: trang trại thủy canh tại Na Uy.

4. Kết luận

Kết quả đánh giá, so sánh giữa hai trang trại cho thấy, hệ thống H-HCM hiệu quả hơn O-HCM về năng suất sản xuất (1.000 kg sinh khối tươi rau cải xanh/ năm), hiệu quả sử dụng đất (0,6 m^2/kg CFB), lượng nước tiêu thụ (5,5 L/kg CFB) và năng lượng tiêu tốn (35,1 MJ/kg CFB), đồng thời phát thải KNK (2,6 kg $CO_{2\text{-eq}}$/kg CFB) thấp hơn hệ thống O-HCM. Mức độ tác động liên quan đến năng lượng tiêu thụ và phát thải KNK của các hệ thống thủy canh được thể hiện rõ nhất qua các nguồn cung cấp điện. Hiện nay các hệ thống thủy canh tại TP.HCM đang canh tác theo hình thức đơn lớp, nếu cải thiện được vấn đề này, có nghĩa là tăng số tầng rau canh tác hợp lý, các chỉ số về sử dụng tài nguyên và phát thải KNK sẽ được cải thiện hơn nữa. Ngoài ra, giải pháp năng lượng mặt trời sẽ mang lại hiệu quả tiết kiệm năng lượng điện và giảm phát thải KNK trong quá trình vận hành trang trại. Kết quả nghiên cứu ban đầu cho thấy các hệ thống canh tác thủy canh hiện nay có thể đóng góp tích cực cho công tác bảo vệ môi trường và phát triển bền vững ngành trồng trọt tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] FAO, "Re: Global agriculture towards 2050," 2009. [Online]. Available: https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf. [Accessed March 22, 2024].

[2] United Nations, "World Population Prospects: The 2000 Revision—Highlights," 2001. [Online]. Available: https://enerpedia.net/images/2/2c/Wpp2000h.pdf. [Accessed November 28, 2022].

[3] M. Marini, D. Caro, and M. Thomsen, "Investigating local policy instruments for different types of urban agriculture in four European cities: A case study analysis on the use and effectiveness of the applied policy instruments," *Land Use Policy*, vol. 131, 2023, Art. no. 106695, doi: 10.1016/j.landusepol.2023.106695.

[4] D. Romeo, E. B. Vea, and M. Thomsen, "Environmental impacts of urban hydroponic in Europe: a case study in Lyon," *Procedia CIRP*, vol. 69, pp. 540-545, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.11.048.

[5] M. Jensen, M. Kacira, G. Giacomelli, and C. Kubota, "Agricultural plastics secure CEA ubiquitous applications in 21st century," *XXI International Congress on Plastics in Agriculture: Agriculture, Plastics and Environment*, vol. 1252, pp. 163-172, 2018, doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1252.22.

[6] D. I. Pomoni, K. Koukou, M. G. Vrachopoulos, and L. Vasiliadis, "A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use," *Energies*, vol. 16, no. 4, 2023, doi: 10.3390/en16041690.

[7] K. Benke and B. Tomkins, "Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture," *Sustainability: Science, Practice and Policy*, vol. 13, no. 1, pp. 13-26, 2017. doi: 10.1080/15487733.2017.1394054.

[8] M. Majid, J. N. Khan, Q. M. A. Shah, K. Z. Masoodi, B. Afroza, and S. Parvaze, "Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (Lactuca sativa L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation," *Agricultural Water Management*, vol. 245, 2021, Art. no. 106572, doi: 10.1016/j.agwat.2020.106572.

[9] M. Tudi *et al.*, "Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 3, 2021, doi: 10.3390/ijerph18031112.

[10] L. Casey, B. Freeman, K. Francis, G. Brychkova, P. McKeown, C. Spillane, and D. Styles, "Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains," *Journal of Cleaner Production*, vol. 369, 2022, Art. no. 133214, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133214.

[11] M. P. Costa, D. Chadwik, S. Saget, R. M. Rees, M. Williams, and D. Styles, "Representing crop rotations in life cycle assessment: a review of legume LCA studies," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, no. 10, pp. 1942-1956, 2020, doi: 10.1007/s11367-020-01812-x.

[12] R. Newell, L. Newman, M. Dickson, B. Vanderkooi, T. Fernback, and C. White, "Hydroponic fodder and greenhouse gas emissions: a potential avenue for climate mitigation strategy and policy development," *FACETS*, vol. 6, pp. 334-357, 2021, doi: 10.1139/facets-2020-0066.

[13] G. Rajaseger *et al*., "Hydroponics: current trends in sustainable crop production," *Bioinformation*, vol. 19, no. 9, pp. 925-938, 2023, doi: 10.6026/97320630019925.

[14] M. Martin and E. Molin, "Environmental Assessment of an Urban Vertical Hydroponic Farming System in Sweden," *Sustainability*, vol. 11, no. 15, 2019, doi: 10.3390/su11154124.

[15] ISO14040, "Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework," 2006. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/37456.html. [Accessed February 18, 2025].

[16] B. Weidema, H. Wenzel, C. Petersen, and K. Hansen, "The Product, Functional Unit and Reference Flows in LCA," *Environmental News*, pp. 1-46, 2004. [Online]. Available: https://lca-center.dk/wp-content/uploads/2015/08/The-product-functional-unit-and-reference-flows-in-LCA.pdf. [Accessed February 18, 2025].

[17] M. Ashby, *Materials and the environmental: eco-informed material choice*, 3rd edition. Elsevier, 2021, doi: 10.1016/C2016-0-04008-1.

[18] T. Blom, A. Jenkins, R. M. Pulselli, and A. A. J. F. van den Dobbelsteen, "The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands," *Journal of Cleaner Production*, vol. 377, 2022, Art. no. 134443, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134443.

[19] A. J. D. Ferreira, R. I. M. M. Guilherme, C. S. S. Ferreira, and M. d. F. M. L. d. Oliveira, "Urban agriculture, a tool towards more resilient urban communities?," *Current Opinion in Environmental Science & Health*, vol. 5, pp. 93-97, 2018, doi: 10.1016/j.coesh.2018.06.004.