
APPLYING THE CROPWAT 8.0 MODEL IN CALCULATING THE VIRTUAL WATER FOOTPRINT TO EVALUATE WATER USE EFFICIENCY AND PROPOSE SUSTAINABLE SOLUTIONS IN TEA PRODUCTION IN PHU THO

Nguyen Thi Thu Huong¹, Do Ngoc Minh¹, Trinh Phuong Ngoc^{2*}¹ School of Chemistry and Life Sciences, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam² Faculty of Agriculture, Forestry and Fisheries, Tan Trao University, Tuyen Quang Province, VietnamEmail address: tpngoc@tqu.edu.vn

*Corresponding author: Trinh Phuong Ngoc

<https://doi.org/10.51453/3093-3706/2026/1450>

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	23/4/2026	Increasing pressure on freshwater resources driven by climate change and agricultural intensification necessitates a robust assessment of water use efficiency in crop production systems. This study applies the FAO CROPWAT 8.0 model to quantify the water footprint (WF) of tea production in Phu Tho province, Vietnam, with the aim of evaluating water use efficiency and proposing sustainable management solutions. The water footprint includes green, blue, and grey components following the Hoekstra framework, incorporating both cultivation and processing stages based on field survey data from representative tea production facilities. The results show that the green water footprint dominates total water consumption, highlighting a strong dependence on rainfall. However, blue water use increases during dry periods and in processing activities, while the grey water footprint shows potential environmental pressure from nitrogen-based fertilizer application. Comparative analysis suggests that water use efficiency in Phu Tho tea production is moderate relative to global benchmarks, with considerable potential for improvement. This study proposes some sustainability-oriented strategies including optimizing irrigation scheduling based on actual crop water demand, improving soil moisture retention, reducing nutrient losses to minimize grey water impacts and promoting circular economy practices in tea production systems. The results support sustainable water resource management in agricultural systems, contributing to enhanced environmental performance and long-term resilience of the tea production sector in Vietnam.
Revised:	8/6/2026	
Published:	28/6/2026	
KEYWORDS		
<i>Water Footprint;</i> <i>Tea Production;</i> <i>CROPWAT 8.0;</i> <i>Water Resource Management;</i> <i>Sustainable Agriculture;</i>		

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH CROPWAT 8.0 TRONG TÍNH TOÁN DẤU CHÂN NƯỚC ẢO ĐỂ ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ VÀ ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP SỬ DỤNG NƯỚC BỀN VỮNG TRONG SẢN XUẤT CHÈ TẠI PHÚ THỌ, VIỆT NAM**Nguyễn Thị Thu Hương¹, Đỗ Ngọc Minh¹, Trịnh Phương Ngọc^{2*}**¹ Trường Hoá và Khoa học sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam² Khoa Nông, lâm, ngư nghiệp, Trường Đại học Tân Trào, Tuyên Quang, Việt Nam

Địa chỉ email: tpngoc@tqu.edu.vn

*Tác giả liên hệ: Trịnh Phương Ngọc

<https://doi.org/10.51453/3093-3706/2026/1450>

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 23/4/2026	Áp lực ngày càng gia tăng lên tài nguyên nước ngọt do biến đổi khí hậu và quá trình thâm canh nông nghiệp đòi hỏi phải có những đánh giá toàn diện và đáng tin cậy về hiệu quả sử dụng nước trong các hệ thống sản xuất cây trồng. Nghiên cứu này ứng dụng mô hình CROPWAT 8.0 của FAO để định lượng dấu chân nước (WF) trong sản xuất chè tại tỉnh Phú Thọ, Việt Nam, nhằm đánh giá hiệu quả sử dụng nước và đề xuất các giải pháp quản lý theo hướng bền vững. Dấu chân nước được phân tích theo ba thành phần gồm nước xanh, nước xanh lam và nước xám theo khung phương pháp của Hoekstra, bao quát cả giai đoạn canh tác và chế biến, dựa trên số liệu khảo sát thực tế tại các cơ sở sản xuất chè điển hình. Kết quả cho thấy dấu chân nước xanh chiếm tỷ trọng lớn nhất trong tổng lượng nước tiêu thụ, phản ánh sự phụ thuộc đáng kể vào nguồn nước mưa tự nhiên. Tuy nhiên, lượng nước xanh lam có xu hướng gia tăng trong các giai đoạn khô hạn và trong hoạt động chế biến, trong khi dấu chân nước xám cho thấy nguy cơ gây áp lực môi trường từ việc sử dụng phân bón chứa nitơ. Phân tích so sánh cho thấy hiệu quả sử dụng nước trong sản xuất chè tại Phú Thọ ở mức trung bình so với các tiêu chuẩn toàn cầu, song vẫn còn nhiều tiềm năng cải thiện. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất một số giải pháp bao gồm tối ưu hóa chế độ tưới theo nhu cầu nước thực tế của cây trồng, cải thiện khả năng giữ ẩm của đất, giảm thất thoát dinh dưỡng nhằm hạn chế tác động của nước xám và thúc đẩy áp dụng mô hình kinh tế tuần hoàn trong sản xuất chè. Kết quả nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho quản lý tài nguyên nước trong nông nghiệp, đồng thời nâng cao hiệu quả môi trường và khả năng phát triển bền vững của ngành chè tại Việt Nam.
Ngày hoàn thiện: 8/6/2026	
Ngày đăng bài: 28/6/2026	
TỪ KHOÁ	
<i>Dấu chân nước; Sản xuất chè; CROPWAT 8.0; Quản lý tài nguyên nước; Nông nghiệp bền vững;</i>	

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tài nguyên nước ngọt toàn cầu đang chịu áp lực ngày càng gia tăng do tác động đồng thời của biến đổi khí hậu, gia tăng dân số và quá trình thâm canh nông nghiệp. Nông nghiệp hiện chiếm khoảng 70% tổng lượng nước khai thác toàn cầu, đặc biệt tại các quốc gia đang phát triển, nơi hiệu quả sử dụng nước còn hạn chế và phụ thuộc nhiều vào điều kiện khí hậu [1]. Trong bối cảnh đó, nâng cao hiệu quả sử dụng nước (Water Use Efficiency – WUE) trong sản xuất nông nghiệp không chỉ là yêu cầu cấp thiết nhằm đảm bảo an ninh lương thực mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc giảm áp lực lên tài nguyên nước và hệ sinh thái.

Trong những thập kỷ gần đây, khái niệm “nước ảo” (virtual water) và “dấu chân nước” (water footprint – WF) đã được phát triển như một công cụ phân tích hiệu quả nhằm định lượng tổng lượng nước tiêu thụ trực tiếp và gián tiếp trong chuỗi sản xuất. Khung phương pháp WF do Hoekstra và cộng sự đề xuất cho phép phân tích toàn diện việc sử dụng nước thông qua ba thành phần chính: nước xanh (green water), nước xanh lam (blue water) và nước xám (grey water), tương ứng với nước mưa, nước mặt/nước ngầm và lượng nước cần thiết để pha loãng chất ô nhiễm [2]. Cách tiếp cận này không chỉ phản ánh mức tiêu thụ tài nguyên mà còn cung cấp thông tin về tác động môi trường liên quan đến ô nhiễm nước, từ đó hỗ trợ hiệu quả cho quản lý tài nguyên nước và hoạch định chính sách.

Các nghiên cứu ở quy mô toàn cầu cho thấy sản xuất cây trồng chiếm tỷ trọng lớn trong tổng dấu chân nước, trong đó nước xanh chiếm ưu thế (khoảng 78%), tiếp theo là nước xanh lam và nước xám [3]. Đáng chú ý, các loại cây công nghiệp dài ngày như chè, cà phê và ca cao thường có dấu chân nước cao tính theo đơn vị sản phẩm, phản ánh mức độ tiêu thụ nước đáng kể trong suốt chu kỳ sinh trưởng và chế biến [3], [4]. Sự khác biệt về dấu chân nước giữa các khu vực phụ thuộc mạnh vào điều kiện khí hậu, năng suất, đặc điểm đất đai và phương thức canh tác [3]. Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng việc cải thiện năng suất cây trồng, tối ưu hóa tưới tiêu và giảm thất thoát dinh dưỡng có thể góp phần đáng kể vào việc giảm dấu chân nước [5].

Song song với phương pháp WF, các mô hình tính toán nhu cầu nước cây trồng đóng vai trò quan trọng trong việc định lượng chính xác lượng nước cần thiết cho sinh trưởng và phát triển của cây. Trong số đó, mô hình CROPWAT của Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc (FAO) được sử dụng rộng rãi để tính toán lượng bốc thoát hơi (ET_0), nhu cầu nước cây trồng (CWR) và nhu cầu tưới dựa trên các tham số khí tượng, đặc tính đất và hệ số cây trồng [6]. Việc tích hợp mô hình CROPWAT với phương pháp đánh giá dấu chân nước được xem là hướng tiếp cận hiệu quả nhằm liên kết giữa nhu cầu nước sinh lý của cây trồng và lượng nước tiêu thụ thực tế trong hệ thống sản xuất [3], [6]. Cách tiếp cận tích hợp này cho phép nâng cao độ chính xác của kết quả đánh giá, đồng thời hỗ trợ phân tích kịch bản và ra quyết định trong quản lý tài nguyên nước.

Đối với cây chè, mặc dù có vai trò quan trọng trong kinh tế nông nghiệp và thương mại quốc tế, số lượng nghiên cứu về dấu chân nước còn tương đối hạn chế so với các cây lương thực chính. Các nghiên cứu hiện có cho thấy nước xanh thường chiếm tỷ trọng lớn trong sản xuất chè, trong khi nước xanh lam và nước xám phụ thuộc vào điều kiện tưới và mức độ sử dụng phân bón [4], [7]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào giai đoạn canh tác, trong khi các công đoạn sau thu hoạch và chế biến – vốn cũng tiêu thụ đáng kể nước – chưa được đánh giá đầy đủ.

Tại Việt Nam, chè là một trong những cây công nghiệp chủ lực, đóng góp quan trọng vào phát triển kinh tế nông thôn và xuất khẩu. Tỉnh Phú Thọ là một trong những vùng sản xuất chè trọng điểm với điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa, lượng mưa dồi dào và đất feralit phù hợp với sinh trưởng của cây chè. Tuy nhiên, hệ thống sản xuất chè tại đây vẫn mang tính truyền thống, phụ thuộc chủ yếu vào nước mưa, hiệu quả sử dụng nước chưa cao và còn thiếu các giải pháp quản lý tích hợp. Mặc dù đã có một số nghiên cứu liên quan đến nhu cầu nước cây trồng và kỹ thuật canh tác, các nghiên cứu tích hợp giữa mô hình hóa nhu cầu nước và đánh giá dấu chân nước trong toàn bộ chuỗi sản xuất chè (bao gồm cả trồng trọt và chế biến) tại Việt Nam vẫn còn hạn chế.

Từ tổng quan nghiên cứu có thể nhận thấy một số khoảng trống chính: (i) thiếu các nghiên cứu tích hợp giữa mô hình CROPWAT và phương pháp đánh giá dấu chân nước trong cùng một khung phân tích; (ii) thiếu các nghiên cứu đánh giá toàn bộ chuỗi giá trị sản xuất chè từ canh tác đến chế biến; và (iii) hạn chế về nghiên cứu thực nghiệm trong bối cảnh các quốc gia đang phát triển, đặc biệt là Việt Nam. Đồng thời, việc liên kết giữa đánh giá dấu chân nước và

định hướng phát triển kinh tế tuần hoàn trong nông nghiệp vẫn chưa được khai thác đầy đủ. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm lấp đầy các khoảng trống nêu trên thông qua việc ứng dụng mô hình CROPWAT 8.0 kết hợp với phương pháp đánh giá dấu chân nước để phân tích hiệu quả sử dụng nước trong sản xuất chè tại tỉnh Phú Thọ. Nghiên cứu hướng tới các mục tiêu như: (i) xác định nhu cầu nước cây trồng trong điều kiện khí hậu địa phương; (ii) định lượng các thành phần dấu chân nước (xanh, xanh lam, xám) trong toàn bộ chuỗi sản xuất; và (iii) đánh giá hiệu quả sử dụng nước thông qua so sánh với các nghiên cứu quốc tế. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất các giải pháp quản lý nước theo hướng bền vững, bao gồm tối ưu hóa chế độ tưới, cải thiện khả năng giữ ẩm của đất, giảm thiểu thất thoát dinh dưỡng và thúc đẩy áp dụng các mô hình kinh tế tuần hoàn trong sản xuất chè. Đóng góp chính của nghiên cứu nằm ở việc xây dựng một cách tiếp cận tích hợp giữa mô hình hóa và đánh giá dấu chân nước trong điều kiện cụ thể của Việt Nam, qua đó cung cấp cơ sở khoa học cho quản lý tài nguyên nước trong nông nghiệp và nâng cao tính bền vững của hệ thống sản xuất chè.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện tại tỉnh Phú Thọ, một trong những vùng sản xuất chè trọng điểm của Việt Nam, thuộc khu vực Trung du và miền núi phía Bắc. Khu vực này có điều kiện tự nhiên đặc trưng với địa hình đồi núi, khí hậu nhiệt đới gió mùa, nhiệt độ trung bình năm dao động từ 20-28°C, lượng mưa trung bình năm từ 1.500-2.000 mm và độ ẩm không khí cao (80-90%). Đất trồng chủ yếu là đất feralit đỏ vàng, có độ pH từ 4,5–5,5, phù hợp với sinh trưởng của cây chè. Các đặc điểm này tạo điều kiện thuận lợi cho phát triển của cây chè, đồng thời ảnh hưởng trực tiếp đến nhu cầu nước và dấu chân nước trong sản xuất. Nghiên cứu tiến hành khảo sát hoạt động sản xuất của 3 công ty chè tại Phú Thọ nhằm thu thập các dữ liệu trong nước sử dụng trong quá trình sản xuất (Bảng 1). Ba nhà máy chè này được lựa chọn do là những nhà máy chè sản xuất đồng thời khối chè tái sinh CTC (phương pháp Nghiền (Crush) - Xé (Tear) - Cuộn (Curl) lá chè, thường dùng để sản xuất chè đen) và chè đen OTD (Orthodox Black Tea). Ba nhà máy được lựa chọn nằm ở các huyện có diện tích trồng chè lớn và lâu đời thuộc ba huyện theo phân bậc hành chính cũ là Hạ Hoà, Thanh Hùng, và Đoan Hùng.

Bảng 1. Hoạt động sản xuất chè của nhà máy các nhà máy chè thuộc phạm vi nghiên cứu

		Nhà máy chè số 1		Nhà máy chè số 2		Nhà máy chè số 2	
		Chè tái sinh CTC	Chè đen OTD	Chè tái sinh CTC	Chè đen OTD	Chè tái sinh CTC	Chè đen OTD
Sản lượng lá tươi (tấn/ngày)		10		30		10	
Sản lượng chè khô (tấn/ngày)		1	2,5	3,5	7	1	2
Số công nhân (người)		30	60	100	200	30	60
Lượng nước TB (lít/tháng)	Nước sinh hoạt	750.000	2.100.000	2.200.000	6.400.000	750.000	2.000.000
	Nước sản xuất	870.000	2.400.000	2.700.000	7.200.000	850.000	2.200.000

2.2. Phương pháp nghiên cứu và thu thập dữ liệu

Nghiên cứu áp dụng cách tiếp cận tích hợp giữa mô hình CROPWAT 8.0 của FAO và phương pháp đánh giá dấu chân nước (Water Footprint) theo Hoekstra. Quy trình nghiên cứu gồm ba bước chính: (i) Tính toán nhu cầu nước của cây chè (Crop Water Requirement - CWR) bằng mô hình CROPWAT; (ii) Xác định các thành phần dấu chân nước (xanh, xanh lam, xám) trong giai đoạn trồng trọt và chế biến; (iii) Đánh giá hiệu quả sử dụng nước và đề xuất giải pháp quản lý bền vững. Dữ liệu đầu vào cho mô hình và tính toán được chuẩn hóa và nhập vào mô

hình CROPWAT, bao gồm: Dữ liệu khí tượng (nhiệt độ tối đa và tối thiểu, độ ẩm, tốc độ gió, số giờ nắng, lượng mưa (thu thập từ nguồn khí tượng và xử lý theo tháng); Dữ liệu cây trồng (hệ số cây trồng (Kc), các giai đoạn sinh trưởng, độ sâu rễ, năng suất), Dữ liệu đất (loại đất feralit, khả năng giữ nước, độ thấm, tổng lượng nước sẵn có); Dữ liệu sản xuất (sản lượng, lượng nước sử dụng, phân bón, quy trình công nghệ) và Dữ liệu môi trường (lượng phân bón nitơ sử dụng (kg/ha/năm) phục vụ tính toán dấu chân nước xám).

Nhu cầu nước của cây chè được xác định thông qua lượng thoát hơi nước của cây trồng (ET_c), tính theo phương trình: $CWR = Kc \times ET_o$ (1); $CWR = ET_c$ (2). Trong đó: ET_o: thoát hơi nước tham chiếu (mm), tính theo phương pháp FAO Penman–Monteith; Kc: hệ số cây trồng, thay đổi theo từng giai đoạn sinh trưởng; Mô hình CROPWAT 8.0 được sử dụng để tính toán ET_o, lượng mưa hiệu quả (Effective Rainfall) và nhu cầu tưới, từ đó xác định CWR theo chu kỳ sinh trưởng của cây chè.

Dấu chân nước trong sản xuất chè được xác định theo ba thành phần: (i) Dấu chân nước xanh lá là lượng nước mưa được sử dụng trong quá trình sinh trưởng của cây: $WF_{green} = CWR_{green}/Y$ (3); (ii) Dấu chân nước xanh lam là lượng nước tưới từ nguồn nước mặt hoặc nước ngầm: $WF_{blue} = CWR_{blue}/Y$ (4); (iii) Dấu chân nước xám được xác định dựa trên lượng nước cần thiết để pha loãng chất ô nhiễm (nitơ) Công thức tính dấu ấn nước theo Hoekstra và Chapagain: $WF_{grey} = (\alpha AR / (C_{max} - C_{nat})) / Y$ (5). Trong đó: α : là hệ số thấm thấu; AR (kg/ha): là lượng phân bón có chứa N sử dụng trên một hecta đất canh tác; C_{max}, C_{nat} (kg/m³): nồng độ tối đa cho phép và nồng độ tự nhiên của chất hóa học gây ô nhiễm; Y (tấn/ha): là năng suất cây trồng.

Dấu chân nước trong giai đoạn chế biến chè được xác định dựa trên tổng lượng nước tiêu thụ trực tiếp (rửa nguyên liệu, vệ sinh thiết bị, sinh hoạt) chia cho sản lượng sản phẩm. Dấu chân nước trong giai đoạn này chủ yếu là dấu chân nước xanh lam bổ sung vào quá trình sản xuất và sử dụng cho sinh hoạt của công nhân viên không sử dụng nước mưa (nước xanh lá), và nước thải phải được xử lý theo quy định nên không tính lượng nước xám trong công đoạn này [10]. Ngoài ra, phương pháp cân bằng khối lượng được áp dụng để quy đổi dấu chân nước giữa các công đoạn chế biến thông qua hệ số phân đoạn sản phẩm.

Hiệu quả sử dụng nước trong sản xuất chè được đánh giá thông qua (1) Tỷ trọng các thành phần WF (green, blue, grey); (2) So sánh với các nghiên cứu và dữ liệu quốc tế; (3) Phân tích các công đoạn tiêu thụ nước lớn trong chuỗi sản xuất.

Nghiên cứu đã thực hiện thu thập dữ liệu từ các nguồn chính thống kết hợp với khảo sát thực tế nhằm tính toán dấu chân nước cho sản phẩm chè. Trong đó các giá trị hàng tháng của dữ liệu khí hậu và lượng mưa của tỉnh Phú Thọ thu được từ trang Weather spark [11] bao gồm dữ liệu lượng mưa hàng tháng (mm/tháng), lượng mưa hiệu quả (mm), trung bình hàng tháng cho các thông số khí hậu; nhiệt độ tối đa và tối thiểu (°C), tốc độ gió (km/h), độ ẩm tương đối (%) và giờ nắng (Giờ). Dữ liệu về giá trị Kc loại cây trên mỗi tỉnh được lấy từ cơ sở dữ liệu CROPWAT theo (Allen và cộng sự, 1998; FAO, 2019) [6] bao gồm sự suy kiệt nghiêm trọng, hệ số đáp ứng năng suất, độ sâu rễ, hệ số cây trồng và độ dài của các giai đoạn sinh trưởng 24 của cây. Dữ liệu địa phương về năng suất cây trồng (tấn/ha), sản lượng (tấn/năm), thời vụ gieo trồng và thu hoạch được thu thập từ Niên giám thống kê. Dữ liệu loại đất, loại chè, thời gian gieo trồng, lượng phân bón sử dụng, quy trình sản xuất, lượng nước sử dụng trong quá trình sản xuất được thực hiện qua khảo sát tại tỉnh Phú Thọ.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Nhu cầu nước cây trồng (CWR) và cân bằng nước

Kết quả mô phỏng bằng mô hình CROPWAT 8.0 cho thấy nhu cầu nước của cây chè tại khu vực nghiên cứu có sự phụ thuộc lớn vào điều kiện khí tượng, đặc biệt là lượng mưa hiệu quả. Tổng lượng bốc thoát hơi nước của cây trồng (ET_c) được xác định thông qua lượng mưa

hiệu quả (Effective rainfall – Eff.rain) đạt 1.077,5 mm/năm, phản ánh vai trò chi phối của nguồn nước mưa trong hệ thống canh tác chè (bảng 2)

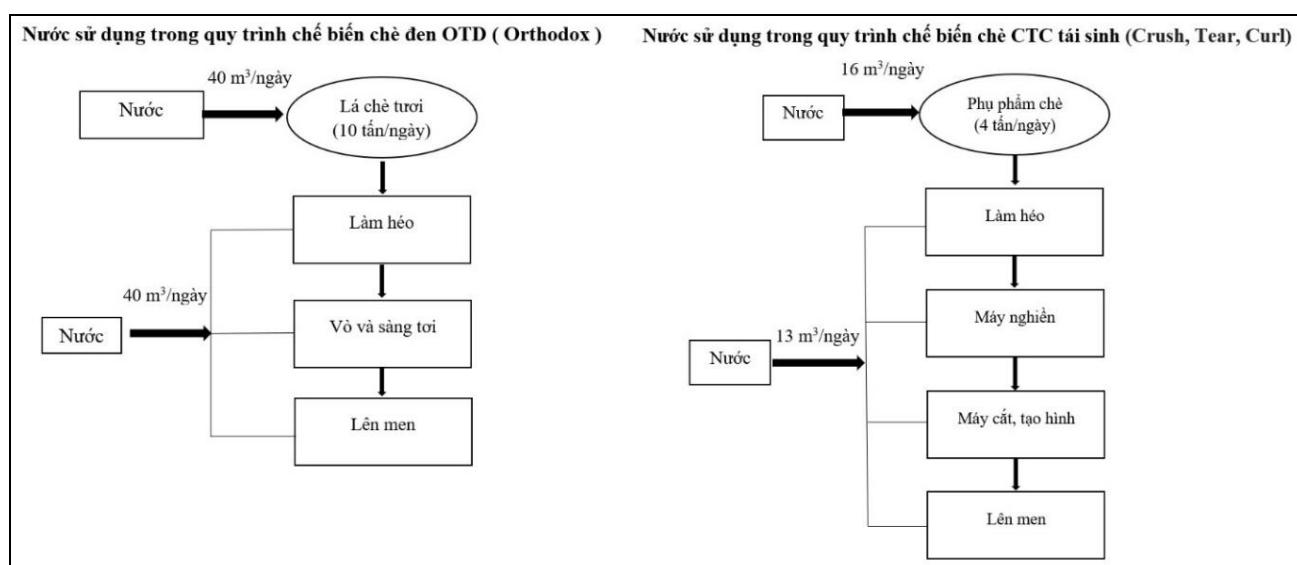
Bảng 2. Kết quả đầu chân nước trong sản xuất chè.

Thông số	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Y	11	tấn/ha	
Eff.rain	1.077,5	mm	
IR	560,9	mm	
CWRxanh lá	10.775	m ³ /ha	
CWRxanh lam	5.609	m ³ /ha	
WFgreen	979,55	m ³ /tấn	
WFblue	509,91	m ³ /tấn	
WFgrey	83,64	m ³ /tấn	Theo (Hoekstra, A. Y. and Hung, P. Q., 2002)

Nhu cầu tưới bổ sung (Irrigation Requirement – IR) được tính toán ở mức 560,9 mm/năm, cho thấy trong một số giai đoạn khô hạn, nguồn nước xanh lam đóng vai trò bổ trợ cho nhu cầu sinh trưởng của cây trồng. Quy đổi theo đơn vị thể tích trên diện tích canh tác, lượng nước sử dụng CWRxanh lá và CWRxanh lam được xác định lần lượt là 10.775 m³/ha/năm và 5.609 m³/ha/năm. Với năng suất trung bình đạt 11 tấn/ha, đầu chân nước Wfgreen, WFblue, Wfgrey trong giai đoạn canh tác được xác định lần lượt là 979,55 m³/tấn, 509,91 m³/tấn, 83,64 m³/tấn. Tổng đầu chân nước của lá chè tươi đạt 1.573,1 m³/tấn, trong đó nước xanh chiếm tỷ trọng lớn nhất (khoảng 62,3%), tiếp theo là nước xanh lam (32,4%) và nước xám (5,3%). Kết quả này cho thấy hệ thống sản xuất chè tại Phú Thọ phụ thuộc chủ yếu vào nước mưa tự nhiên, trong khi áp lực từ tưới và mức sử dụng phân bón ở mức thấp hơn nhưng vẫn đáng kể.

3.2. Đầu chân nước trong giai đoạn chế biến chè

Kết quả khảo sát thực tế tại ba cơ sở chế biến chè tại Phú và kết quả nước sử dụng cho hoạt động chế biến chè từ hoạt động khảo sát thực tế tại 03 đơn vị sản xuất chè được trình bày ở hình 1 và bảng 3.



Hình 1. Lượng nước sử dụng trong chế biến chè đen OTD và chè CTC

Với tổng sản lượng trung bình khoảng 168 tấn sản phẩm/tháng, đầu chân nước xanh lam trong giai đoạn chế biến được xác định tương đối thấp, chỉ khoảng 32,7 m³/tấn sản phẩm. Điều

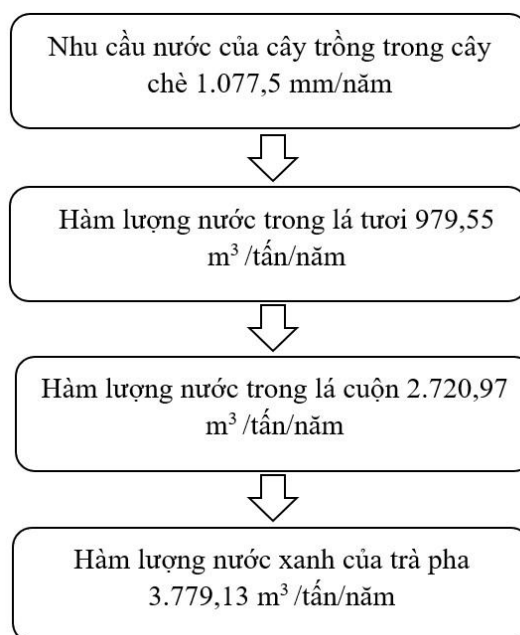
này cho thấy so với giai đoạn canh tác, lượng nước tiêu thụ trong chế biến không phải là thành phần chi phối, tuy nhiên vẫn đóng góp vào tổng dấu chân nước.

Bảng 3. Dấu chân nước xanh lam trong sản xuất chè (tính trung bình của 3 nhà máy)

		Chè CTC tái sinh (tấn/ngày)	Chè đen OTD (tấn/ngày)	Tổng (tấn/tháng)	WF _{blue} (m ³ /tấn)
Sản lượng		1,8	3,8	168	32,7
Số công nhân (người)		50	100		
Lượng nước trung bình (lít/tháng)	Nước sinh hoạt	1.200.000	3.500.000	5.500.000	
	Nước sản xuất	1.500.000	4.000.000	4.700.000	

3.3. Dấu chân nước ảo cho sản xuất chè đen

Quá trình chế biến chè đen bao gồm hai giai đoạn chính làm giảm khối lượng nguyên liệu: (1) Giai đoạn làm héo và cán: hệ số chuyển đổi 0,36; (2) Giai đoạn sấy (oxy hóa): hệ số chuyển đổi 0,72. Trên cơ sở đó, dấu chân nước được tích lũy qua từng công đoạn sản xuất (hình 2). Hình 2 cho thấy phép tính dấu chân nước xanh (m³/tấn) cho sản xuất trà đen, hàm lượng nước xanh trong trà đen được tính toán là 3.779,13 m³/tấn. Ngoài ra, dấu chân nước xanh lam của quá trình chế biến là 32,7 m³/tấn. Nước được lấy từ mạch nước ngầm và giếng khoan được dùng để tạo ẩm và rửa trực trong quá trình sản xuất, lượng nước xanh lam tiêu thụ thấp hơn rất nhiều so với hàm lượng nước xanh từ lá trà tươi.



Hình 2. Dấu chân nước ảo trong sản phẩm trà đen

Khi tính thêm các thành phần nước xanh lam trong chế biến (32,7 m³/tấn) và nước xám trong canh tác (83,64 m³/tấn), tổng dấu chân nước ảo của sản phẩm chè đen đạt 3.901,2 m³/tấn. Hay nói cách khác hàng năm khu vực Hạ Hòa – Phú Thọ sử dụng 3.901,2 m³ nước khi sản xuất ra 1 tấn trà đen. Kết quả này phản ánh rõ ràng hiệu ứng “tích lũy dấu chân nước” do quá trình giảm khối lượng sản phẩm trong chuỗi chế biến, dẫn đến gia tăng đáng kể lượng nước tính trên đơn vị sản phẩm cuối cùng. Việc xuất khẩu trà có tác động tích cực đến nền kinh tế của tỉnh Phú

Thọ và tạo ra lợi ích kinh tế cho đất nước với việc sử dụng nước mưa chủ yếu có chi phí cơ hội tương đối thấp. Tổng hợp các kết quả cho thấy, trong sản xuất chè tại Phú Thọ, nước xanh lá là thành phần chi phối trong toàn bộ chuỗi sản xuất, đặc biệt trong giai đoạn canh tác; nước xanh lam đóng vai trò bổ sung trong điều kiện thiếu nước và trong chế biến; nước xám phản ánh áp lực ô nhiễm từ sử dụng phân bón, mặc dù chiếm tỷ trọng thấp hơn. Cấu trúc đầu chân nước của sản xuất chè tại Phú Thọ thể hiện đặc trưng của hệ thống nông nghiệp phụ thuộc vào khí hậu nhiệt đới gió mùa, trong đó hiệu quả sử dụng nước chịu ảnh hưởng đồng thời bởi điều kiện tự nhiên và trình độ quản lý sản xuất.

4. THẢO LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ thống sản xuất chè tại Phú Thọ mang đặc trưng rõ rệt của vùng nông nghiệp phụ thuộc vào nước mưa, thể hiện qua tỷ trọng nước xanh chiếm ưu thế trong tổng đầu chân nước. Điều này phù hợp với điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa, nơi lượng mưa đóng vai trò nguồn cung cấp nước chính cho cây trồng. Tuy nhiên, nhu cầu tưới bổ sung vẫn ở mức đáng kể, phản ánh sự mất cân đối theo mùa giữa cung và cầu nước. So với các nghiên cứu quốc tế về đầu chân nước cây trồng, cấu trúc này tương đồng với các hệ thống canh tác ở khu vực có lượng mưa trung bình đến cao, nơi nước xanh chiếm ưu thế nhưng vẫn tồn tại nhu cầu nước xanh lam trong các giai đoạn khô hạn. Điều này cho thấy việc chỉ dựa vào nguồn nước tự nhiên là chưa đủ để đảm bảo tính ổn định của hệ thống sản xuất trong bối cảnh biến đổi khí hậu làm gia tăng tính bất định của chế độ mưa.

Bảng 4. So sánh giữa các nước sản xuất trà trên thế giới [7]

Khu vực	Hàm lượng nước ảo của lá tươi ($\text{m}^3/\text{tấn}$)	Hàm lượng nước ảo trong lá cuộn ($\text{m}^3/\text{tấn}$)	Hàm lượng nước ảo của trà pha ($\text{m}^3/\text{tấn}$)	Năng suất lá tươi (tấn/ha)
Nilgiri (Ấn Độ)	524	1.454	2.020	20
Quảng Đông (Trung Quốc)	440	1.221	1.696	26
Kandy (Sri Lanka)	642	1.782	2.476	18
Agrabinta (Indonesia)	1.037	2881	4002	14
Gambung (Indonesia)	1.031	2.863	3.976	14
Trung bình	735	2.040	2.834	18,4
Hạ Hòa (Phú Thọ)	980	2.721	3.779	11

So sánh với các khu vực sản xuất chè điển hình trên thế giới cho thấy đầu chân nước của chè tại Phú Thọ ở mức tương đối cao. WF của chè thành phẩm tại Phú Thọ $3.779 \text{ m}^3/\text{tấn}$ (nước xanh), trong khi giá trị trung bình toàn cầu là $2.834 \text{ m}^3/\text{tấn}$. Ngoài ra, năng suất chè tại Phú Thọ chỉ đạt 11 tấn/ha, thấp hơn đáng kể so với mức trung bình của các khu vực khác (18,4 tấn/ha). Sự chênh lệch này cho thấy hiệu quả sử dụng nước tại khu vực nghiên cứu chưa cao, nguyên nhân chủ yếu liên quan đến năng suất thấp làm tăng WF tính trên đơn vị sản phẩm, phương thức canh tác truyền thống, chưa tối ưu hóa tưới và hạn chế trong công nghệ chế biến và quản lý nước. Tuy nhiên, so với các khu vực khô hạn, đầu chân nước tại Phú Thọ vẫn ở mức trung bình do hệ thống sản xuất phụ thuộc chủ yếu vào nước mưa, giúp giảm áp lực khai thác nước xanh lam.

Kết quả nghiên cứu cho thấy đầu chân nước của chè tại Phú Thọ cao hơn mức trung bình của một số quốc gia sản xuất chè trên thế giới. Nguyên nhân chính là năng suất chè thấp, làm tăng lượng nước tính trên mỗi đơn vị sản phẩm. Điều này cho thấy hiệu quả sử dụng nước không chỉ phụ thuộc vào tổng lượng nước tiêu thụ mà còn phụ thuộc lớn vào năng suất cây trồng. Vì vậy, nâng cao năng suất thông qua cải tiến giống, tối ưu dinh dưỡng và quản lý canh

tác có thể giúp giảm dấu chân nước, đồng thời cải thiện hiệu quả kinh tế. Tuy nhiên, việc tăng năng suất cần được kiểm soát để tránh làm gia tăng sử dụng phân bón và nước tưới, dẫn đến tăng nước xám và nước xanh lam.

Nước xanh là thành phần chiếm ưu thế trong tổng dấu chân nước của chè tại Phú Thọ, phù hợp với điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa, nơi lượng mưa là nguồn cung cấp nước chính. Cấu trúc này tương đồng với các vùng sản xuất chè có lượng mưa trung bình đến cao như Ấn Độ, Sri Lanka, Indonesia và Trung Quốc. Tuy nhiên, sự phụ thuộc lớn vào nước mưa cũng làm sản xuất chè dễ bị ảnh hưởng bởi biến đổi khí hậu, đặc biệt khi lượng mưa phân bố không đều hoặc xuất hiện các giai đoạn khô hạn. Khi đó, nhu cầu nước xanh lam có thể tăng, gây áp lực lên nguồn nước mặt và nước ngầm.

Giá trị WFgrey phản ánh tác động tiềm tàng của hoạt động bón phân đến chất lượng nước. Mặc dù nghiên cứu sử dụng giả định hệ số rửa trôi nitơ ở mức 10%, kết quả vẫn cho thấy áp lực đáng kể từ phân bón hóa học. Điều này phù hợp với các nghiên cứu của Hoekstra et al. (2011), cho thấy nông nghiệp là nguồn phát thải chính gây ô nhiễm nước tại nhiều quốc gia đang phát triển. Việc giảm lượng phân bón dư thừa, kết hợp với các biện pháp canh tác bền vững (ví dụ: bón phân hợp lý, sử dụng phân hữu cơ) có thể giúp giảm đáng kể dấu chân nước xám. So với các hệ thống sản xuất chè tiên tiến, hiệu quả sử dụng nước tại Phú Thọ vẫn còn hạn chế do thiếu áp dụng công nghệ và quản lý tích hợp. Các nghiên cứu quốc tế cho thấy việc kết hợp quản lý nước – đất – dinh dưỡng có thể giảm 10–30% dấu chân nước mà vẫn duy trì năng suất [1,5].

Bảng 5. Điều kiện tự nhiên ở các khu vực [5]

Khu vực ĐKTN	Hạ Hòa- Phú Thọ	Nilgiri- Ấn Độ	Agrabinta Indonesia	Gambung Indonesia	Quảng Đông- Trung Quốc	Kandy - Sri Lanka
Khí hậu	Nhiệt đới gió mùa	Ôn đới	Nhiệt đới gió mùa	Nhiệt đới gió mùa	Nhiệt đới	Nhiệt đới gió mùa
Nhiệt độ (°C)	20-28	20-30	20-30	22-32	20-28	20-29
Lượng mưa (mm)	1500 - 2000	1500 - 2000	2000 - 2500	2000 - 2500	1500 - 2000	1500 - 2000
Độ ẩm (%)	80-90	80-85	80-85	80-85	75-85	80-85
Đất đai	Đất ferarit	Đất đỏ	Đất ferarit	Đất ferarit	Đất đỏ, đất mùn	Đất mùn, đất ferarit
Địa hình	Đồi núi	Đồng bằng	Đồi núi	Đồi núi	Đồi núi thấp	Đồi núi

Điều kiện tự nhiên, lượng mưa của Phú Thọ khá thuận lợi cho sự phát triển của cây chè và không có sự khác biệt nhiều so với các khu vực được so sánh. Tuy nhiên hàm lượng nước ảo ở mức cao so với trung bình các khu vực nguyên nhân chính là do năng suất chè tươi (tấn/ha) chưa cao cũng dẫn tới lượng sản phẩm chè khô thấp.

Ở Hạ Hòa, Phú Thọ quy mô sản xuất chè vẫn ở mức nhỏ và trung bình nên các hộ dân cũng như cơ sở chế biến chưa chú trọng tới quy trình canh tác khi vẫn đang sử dụng phương pháp tưới tiêu truyền thống là tưới tràn và tưới thủ công. Không sử dụng các công nghệ tiết kiệm nước như tưới nhỏ giọt hoặc phun sương dẫn tới lãng phí nước trong khi các khu vực ở Trung Quốc và Ấn Độ đã áp dụng.

Sử dụng giống chè chưa đạt năng suất cao cũng như không phù hợp với điều kiện khí hậu, đất đai dẫn tới năng suất lá tươi thấp làm giảm hiệu quả sử dụng nước. Hơn nữa quá trình thu hái lá chè sử dụng công nhân là nhiều chưa ứng dụng máy móc, công nghệ hiện đại.

Bảng 6. Phương pháp canh tác giữa Phú Thọ và các khu vực khác

Yếu tố	Hạ Hòa - Phú Thọ	Các khu vực khác
Phương pháp tưới tiêu	Tưới thủ công hoặc mưa tự nhiên. Hệ thống tưới không đồng đều, dẫn đến lãng phí nước.	Tưới nhỏ giọt, phun sương, hoặc tưới tự động. Ứng dụng hệ thống tưới tiết kiệm nước (drip irrigation)
Mật độ trồng chè	Mật độ không đồng đều, trung bình 20.000 cây/ha.	Mật độ tối ưu, trung bình 25.000-30.000 cây/ha.
Phương pháp hái lá chè	Chủ yếu hái bằng tay (thủ công). Kỹ thuật hái chưa đồng nhất, phụ thuộc kinh nghiệm.	Phối hợp hái thủ công và cơ giới hóa (máy hái chè).
Tần suất hái	Tần suất hái không ổn định, thường 1-2 tuần/lần.	Hái chè đúng thời điểm sinh trưởng (7-10 ngày/lần), đảm bảo chất lượng.
Năng suất thu hoạch kg/ngày)	Thủ công: 40-50 kg/người/ngày.	Máy hái chè: 100-150 kg/người/ngày (gấp 2-3 lần).
Chất lượng lá chè	Lá không đồng đều, do chọn lọc thủ công kém hiệu quả. Tỷ lệ lãng phí cao do hái sót hoặc làm hỏng búp chè.	Lá chè đồng đều hơn, chọn lọc bằng công nghệ chính xác hơn. Tỷ lệ lãng phí thấp nhờ công nghệ hiện đại kiểm soát chặt chẽ.

Công nghệ chế biến Phú Thọ còn nhiều hạn chế khi chủ yếu được sản xuất bởi các hộ gia đình, cơ sở nhỏ với quy trình thủ công hoặc bán tự động. Sử dụng nhiều nước trong các công đoạn như rửa lá chè nhưng không có công nghệ tái sử dụng. Thiếu các thiết bị tự động hóa kiểm soát nhiệt độ, độ ẩm trong quá trình làm héo, lên men hoặc sấy khô dẫn tới thời gian chế biến kéo dài, tiêu tốn nước và năng lượng. Lượng nước sau khi bị thất thoát không được tái sử dụng làm tăng tổng hàm lượng nước ảo. Ở các khu vực khác như Ấn Độ, Trung Quốc, Sri Lanka ứng dụng công nghệ chế biến hiện đại, có các biện pháp quản lý nước tái sử dụng cũng như quy trình chế biến tối ưu tạo ra sản phẩm chất lượng cao dẫn tới đồng đều về chất lượng, đáp ứng tiêu chuẩn xuất khẩu.

Bảng 7. Quy trình chế biến giữa Phú Thọ với các khu vực

Công đoạn	Hạ Hòa (Phú Thọ)	Nilgiri (Ấn Độ)	Indonesia	Quảng Đông (Trung Quốc)
Làm héo	Phơi nắng hoặc làm héo thủ công, không kiểm soát nhiệt độ.	Làm héo bằng máy với tuần hoàn không khí.	Kết hợp phơi tự nhiên và máy làm héo bán tự động	Máy làm héo tự động, kiểm soát độ ẩm và nhiệt độ chính xác.
Làm sạch lá	Rửa thủ công, tiêu tốn nhiều nước.	Máy làm sạch lá cơ giới hóa.	Tự động rửa, quản lý nước tái sử dụng.	Máy rửa tiết kiệm nước, tái sử dụng nước.
Lên men	Phun sương tăng độ ẩm, tiêu tốn nước	Lên men trong buồng kín, không phun sương.	Lên men bán tự động với phun sương tối thiểu.	Máy lên men có kiểm soát nhiệt độ và độ ẩm
Sấy khô	Sấy bằng nhiệt trực tiếp (tiêu tốn năng lượng và nước).	Sấy bằng máy năng lượng tái tạo (không dùng nước).	Sấy tầng	Sấy không tiếp xúc

Sự gia tăng dầu chân nước từ lá chè tươi đến chè thành phẩm cho thấy giai đoạn chế biến có ảnh hưởng đáng kể đến áp lực sử dụng nước trong toàn chuỗi sản xuất. Dù lượng nước dùng trực tiếp không lớn, sự giảm khối lượng nguyên liệu qua chế biến làm tăng lượng nước ảo trên một đơn vị sản phẩm. Vì vậy, giảm hao hụt nguyên liệu và nâng cao hiệu suất chế biến là giải pháp quan trọng để giảm dầu chân nước. Nước xám tuy chiếm tỷ trọng nhỏ nhưng phản ánh nguy cơ ô nhiễm từ hoạt động bón phân và dòng chảy mặt. Trong điều kiện thâm canh, nước xám có thể gia tăng nếu dinh dưỡng không được quản lý hợp lý. Do đó, cần áp dụng bón phân cân đối, tăng sử dụng phân hữu cơ và kiểm soát rửa trôi nhằm bảo vệ chất lượng nguồn nước. So với các nghiên cứu quốc tế, dầu chân nước của chè tại Phú Thọ ở mức trung bình đến cao, chủ yếu do hiệu quả sản xuất còn hạn chế dù điều kiện tự nhiên tương đối thuận lợi. Điều này cho thấy cần tối ưu hóa canh tác, nâng cao năng suất và chuẩn hóa phương pháp đánh giá để tăng tính so sánh và độ tin cậy của kết quả.

Từ các kết quả trên, giải pháp sử dụng nước bền vững cho sản xuất chè tại Phú Thọ cần tập trung vào bốn hướng chính. Thứ nhất, tối ưu hóa tưới tiêu thông qua áp dụng tưới nhỏ giọt, tưới phun mưa cục bộ, xây dựng lịch tưới theo nhu cầu thực tế của cây và tích trữ nước mưa cho mùa khô. Thứ hai, nâng cao năng suất bằng cải thiện giống, trẻ hóa vườn chè, điều chỉnh mật độ trồng và chuẩn hóa kỹ thuật chăm sóc. Thứ ba, giảm dầu chân nước xám thông qua bón phân theo phân tích đất, sử dụng phân hữu cơ và xây dựng vùng đệm thực vật ven nguồn nước. Thứ tư, cải tiến công nghệ chế biến theo hướng tiết kiệm và tái sử dụng nước, giảm hao hụt nguyên liệu và nâng cao hiệu suất chuyển đổi từ chè tươi sang chè thành phẩm.

Nhìn chung, Phú Thọ có điều kiện tự nhiên thuận lợi cho phát triển cây chè, nhưng hiệu quả sử dụng nước còn thấp do hạn chế trong canh tác và chế biến. Do đó, giảm dầu chân nước không chỉ là giảm lượng nước sử dụng, mà quan trọng hơn là nâng cao năng suất, giảm thất thoát và kiểm soát ô nhiễm. Các bảng so sánh chi tiết về điều kiện tự nhiên, phương pháp canh tác và quy trình chế biến nên được chuyển xuống phụ lục; trong phần chính chỉ cần giữ các chỉ tiêu cốt lõi như dầu chân nước, năng suất, nguồn nước chủ đạo và mức độ áp dụng công nghệ để làm rõ ý nghĩa của kết quả nghiên cứu.

Mặc dù nghiên cứu đã cung cấp một cái nhìn toàn diện về sử dụng nước trong sản xuất chè, một số hạn chế cần được xem xét khi diễn giải kết quả. Thứ nhất, dữ liệu đầu vào, đặc biệt trong giai đoạn chế biến, còn hạn chế về quy mô và số lượng mẫu, có thể ảnh hưởng đến tính đại diện. Thứ hai, nghiên cứu chưa xem xét đầy đủ biến động theo thời gian và các kịch bản biến đổi khí hậu, trong khi đây là yếu tố có ảnh hưởng lớn đến cân bằng nước trong dài hạn. Thứ ba, một số giả định trong mô hình CROPWAT, như hệ số cây trồng và hiệu quả sử dụng nước, có thể chưa phản ánh hoàn toàn điều kiện thực tế tại địa phương. Do đó, các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng phạm vi dữ liệu, tích hợp các kịch bản khí hậu và cải tiến phương pháp luận để nâng cao độ chính xác và tính ứng dụng của kết quả.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã ứng dụng mô hình CROPWAT 8.0 kết hợp với phương pháp đánh giá dầu chân nước nhằm phân tích toàn diện hiệu quả sử dụng nước trong chuỗi sản xuất chè tại tỉnh Phú Thọ, Việt Nam. Kết quả cho thấy nhu cầu nước của cây chè phụ thuộc chủ yếu vào nguồn nước mưa, với lượng nước xanh lá chiếm ưu thế trong tổng nhu cầu nước cây trồng ($10.775 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{năm}$), trong khi nước xanh lam đóng vai trò bổ sung với mức $5.609 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{năm}$. Trên cơ sở năng suất trung bình $11 \text{ tấn}/\text{ha}$, tổng dầu chân nước trong giai đoạn canh tác được xác định đạt $1.573,1 \text{ m}^3/\text{tấn}$, trong đó nước xanh lá chiếm tỷ trọng lớn nhất, tiếp theo là nước xanh lam và nước xám.

Khi mở rộng đánh giá sang toàn bộ chuỗi sản xuất, kết quả cho thấy dầu chân nước tăng đáng kể do hiệu ứng tích lũy nước ảo trong quá trình chế biến. Cụ thể, tổng dầu chân nước của

chè đen thành phẩm đạt 3.901,2 m³/tấn, gần gấp 2,5 lần so với giai đoạn nguyên liệu ban đầu. Sự gia tăng này chủ yếu xuất phát từ sự suy giảm khối lượng sản phẩm qua các công đoạn chế biến, trong khi lượng nước sử dụng trực tiếp trong chế biến chỉ chiếm tỷ trọng nhỏ (32,7 m³/tấn). Kết quả này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tiếp cận đánh giá theo chuỗi giá trị thay vì chỉ tập trung vào giai đoạn canh tác. So sánh với các nghiên cứu quốc tế cho thấy dấu chân nước của chè tại Phú Thọ ở mức tương đối cao, chủ yếu do năng suất thấp hơn so với trung bình toàn cầu. Điều này cho thấy hiệu quả sử dụng nước của hệ thống sản xuất chè tại khu vực nghiên cứu chưa tối ưu, đồng thời phản ánh tiềm năng cải thiện đáng kể thông qua nâng cao năng suất và tối ưu hóa quản lý tài nguyên đầu vào.

Trên cơ sở các kết quả định lượng, nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc cải thiện hiệu quả sử dụng nước cần được tiếp cận theo hướng tích hợp, bao gồm: (i) nâng cao năng suất cây trồng thông qua cải tiến giống và kỹ thuật canh tác; (ii) tối ưu hóa chế độ tưới nhằm giảm phụ thuộc vào nước xanh lam trong điều kiện khô hạn; (iii) nâng cao hiệu suất chế biến để giảm hao hụt nguyên liệu và hạn chế gia tăng dấu chân nước ảo; và (iv) kiểm soát sử dụng phân bón nhằm giảm áp lực nước xám và ô nhiễm môi trường. Các giải pháp này không chỉ góp phần giảm dấu chân nước mà còn phù hợp với định hướng phát triển nông nghiệp bền vững và kinh tế tuần hoàn.

Đóng góp chính của nghiên cứu là xây dựng được một cách tiếp cận tích hợp giữa mô hình hóa nhu cầu nước cây trồng và đánh giá dấu chân nước trong điều kiện cụ thể của Việt Nam, qua đó cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho quản lý tài nguyên nước trong sản xuất nông nghiệp. Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa tham khảo quan trọng cho các nhà quản lý, doanh nghiệp và người sản xuất trong việc hoạch định các chiến lược sử dụng nước hiệu quả và bền vững. Kết quả nghiên cứu không chỉ có ý nghĩa đối với ngành chè tại Phú Thọ mà còn có thể được mở rộng áp dụng cho các hệ thống cây trồng tương tự, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng nước và thúc đẩy phát triển nông nghiệp bền vững trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được thực hiện dưới sự tài trợ của Quỹ phát Triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) mã số đề tài 105.99-2025.56

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. M. Mekonnen and A. Y. Hoekstra, "The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products" *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, pp. 1577–1600, 2011. <https://www.waterfootprint.org/resources/Mekonnen-Hoekstra-2011-WaterFootprintCrops.pdf>
- [2]. A.Y. Hoekstra, A. K. Chapagain, M. M. Aldaya, and M. M. Mekonnen, *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. London: Earthscan, 2011.
- [3]. Ashok Chapagain, Arjen Hoekstra. 2003. The water needed to have the Dutch drink tea, https://www.researchgate.net/publication/253387049_The_water_needed_to_have_the_Dutch_drink_coffee
- [4]. M. M. Mekonnen and A. Y. Hoekstra, The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, *Hydrology and Earth System Sciences*, Volume 15, issue 5, HESS, 15, 1577–1600, 2011, <https://hess.copernicus.org/articles/15/1577/2011/hess-15-1577-2011-discussion.html>
- [5]. K. Chapagain and A. Y. Hoekstra, "The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands," *Ecological Economics*, vol. 64, no. 1, pp. 109–118, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.022>
- [6]. FAO, *Crop Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, Rome, 2012. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fb1683eb-df22-438f-b997-a34d44b86ba7/content>

-
- [7]. M. M. Mekonnen and A. Y. Hoekstra, “The water footprint of humanity,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, no. 9, pp. 3232–3237, 2012.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>
- [8]. Nguyễn Thị Liễu, Đào Ngọc Hùng, Hà Thị Phương Mai, Trần Thị Tâm, Tạ Thị Ngọc Hà. 2024. Nghiên cứu phân vùng phát triển chè hữu cơ tại tỉnh Phú Thọ, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* Tập 765 Số. 9 (2024).
<https://vjol.info.vn/index.php/TCKHTV/article/view/95713>
- [9]. J.M.D.M.Jayasundara, R.M.N.S.Ranundeniya, W.A.S.Lakmali. 2016. Water Footprint Assessment of Black Tea; a Case Study from Nuwara Eliya District, Sri Lanka, Proceeding of 15th Agricultural research symposium (2016).
https://www.researchgate.net/publication/343774932_Water_Footprint_Assessment_of_Black_Tea_A_Case_Study_from_Nuwara_Eliya_District_Sri_Lanka
- [10]. Ariyani, M., Pitoi, M. M., Yusiasih, R., Maulana, H., Mastur, A. I., Koesmawati, T. A., Ridwan, Y. S., & Sunardi. (2022). Water Footprint Analysis of Indonesian Tea: Exploring the Impact of Pesticides on the Grey Water Footprint. *Environment Asia*, 15(1), 47-59.
<https://doi.org/10.14456/ea.2022.5>
- [11]. Website The Weather Spark, <http://weatherspark>, ngày truy cập 20/02/2026.