

QUẢN LÝ DƯỢC LIỆU GIÚP TRUY XUẤT NGUỒN GỐC
TRÊN NỀN TẢNG BLOCKCHAIN
BLOCKCHAIN-BASED HERBAL MEDICINE MANAGEMENT
FOR TRACEABILITY

NGUYỄN TRUNG HIẾU¹, NGUYỄN VIỆT DŨNG¹, HỒNG QUANG ĐỨC¹,
HỒ THỊ HƯƠNG THOM^{2*}

¹Viện Đào tạo Chất lượng cao, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: thomhth@vamaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.940>

Tóm tắt

Ngành dược liệu truyền thống đang đối mặt với nhiều thách thức như dược liệu giả, chất lượng không đồng đều và thiếu minh bạch trong chuỗi cung ứng, gây ảnh hưởng đến sức khỏe cộng đồng và niềm tin của người tiêu dùng. Nghiên cứu này đề xuất và triển khai một mô hình hệ thống quản lý và truy xuất nguồn gốc dược liệu dựa trên công nghệ Blockchain, sử dụng nền tảng Ethereum kết hợp với Hợp đồng Thông minh. Hệ thống cho phép ghi nhận và lưu trữ các thông tin quan trọng trong vòng đời dược liệu, bao gồm nguồn gốc trồng trọt, thời điểm thu hoạch và kết quả kiểm soát chất lượng (QC), trên sổ cái phân tán nhằm đảm bảo tính toàn vẹn và khả năng truy vết dữ liệu. Mô hình được triển khai và đánh giá trong môi trường thử nghiệm mô phỏng chuỗi cung ứng với nhiều bên tham gia. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống đạt thông lượng giao dịch tối đa từ 45 đến 51.2 giao dịch mỗi giây tại các thời điểm tải cao, cùng với độ trễ ở mức chấp nhận được, đặc biệt hiệu quả đối với các giao dịch truy vấn nguồn gốc. Kết quả cho thấy mô hình có tiềm năng ứng dụng thực tế trong quản lý dược liệu.

Từ khóa: Blockchain, truy xuất Nguồn gốc, dược liệu, chuỗi Cung ứng, Ethereum.

Abstract

The traditional herbal medicine industry faces significant challenges, including counterfeit products, inconsistent quality, and a lack of transparency in supply chains, which undermine public health and consumer trust. This study proposes and implements a blockchain-based system for herbal medicine management and traceability using the Ethereum platform

combined with smart contracts. The system records and stores critical information throughout the herbal medicine lifecycle, including cultivation origin, harvesting time, and quality control (QC) results, on a distributed ledger to ensure data integrity and traceability. The proposed model is deployed and evaluated in an experimental environment that simulates a multi-stakeholder supply chain. Experimental results indicate that the system achieves a peak transaction throughput ranging from 45 to 51.2 transactions per second during high-load periods, with acceptable transaction latency, particularly for read-dominant traceability queries. These results demonstrate that the proposed approach is technically feasible and shows strong potential for practical application in enhancing transparency and reliability in herbal medicine supply chain management.

Keywords: Blockchain, traceability, herbal medicine, supply chain, Ethereum.

1. Mở đầu

Dược liệu truyền thống đóng vai trò quan trọng trong chăm sóc sức khỏe và điều trị bệnh tại nhiều quốc gia. Tuy nhiên, chuỗi cung ứng dược liệu thường có cấu trúc phức tạp, bao gồm nhiều chủ thể và khâu trung gian, dẫn đến những thách thức đáng kể trong công tác quản lý chất lượng và truy xuất nguồn gốc [4]. Sự thiếu minh bạch và kiểm soát hiệu quả trong các khâu này làm gia tăng nguy cơ dược liệu kém chất lượng hoặc bị giả mạo, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến độ an toàn, hiệu quả điều trị cũng như niềm tin của người tiêu dùng [1].

Công nghệ sổ cái phân tán (Distributed Ledger Technology - DLT), đặc biệt là Blockchain, mang lại các đặc tính quan trọng như tính bất biến, minh bạch

và khả năng chống sửa đổi dữ liệu. Trong số các nền tảng Blockchain hiện nay, Ethereum là một nền tảng phổ biến [6] cho việc triển khai các ứng dụng phi tập trung nhờ khả năng hỗ trợ Hợp đồng Thông minh linh hoạt và hệ sinh thái phát triển rộng lớn. Việc sử dụng Hợp đồng Thông minh trên Ethereum cho phép tự động hóa các quy trình nghiệp vụ, đồng thời đảm bảo dữ liệu được ghi nhận một cách minh bạch và không thể thay đổi sau khi xác nhận.

Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này hướng tới các mục tiêu chính sau:

- Đề xuất một kiến trúc hệ thống quản lý và truy xuất nguồn gốc dược liệu dựa trên công nghệ Ethereum.
- Phân tích vai trò của Hợp đồng Thông minh trong việc tự động hóa các quy trình kiểm soát chất lượng (Quality Control - QC).
- Đánh giá hiệu suất kỹ thuật của mô hình triển khai thông qua các chỉ số thông lượng, độ trễ giao dịch và chi phí gas trong môi trường thử nghiệm.

2. Kiến trúc mô hình quản lý dược liệu trên Blockchain

Mô hình hệ thống được đề xuất sử dụng nền tảng Ethereum, một Blockchain hỗ trợ triển khai các ứng dụng phi tập trung thông qua Hợp đồng Thông minh (Smart Contract). Ethereum cho phép lưu trữ và thực thi các logic nghiệp vụ một cách minh bạch, bất biến và có thể kiểm chứng công khai, phù hợp cho các hệ thống truy xuất nguồn gốc trong chuỗi cung ứng dược liệu với nhiều bên tham gia như nhà sản xuất, phòng kiểm nghiệm và nhà phân phối [2]. Trong mô hình này, việc định danh và phân quyền truy cập được thực hiện thông qua các địa chỉ ví và cơ chế kiểm soát quyền trong hợp đồng thông minh.

Kiến trúc hệ thống được thiết kế theo mô hình phân lớp, bao gồm bốn lớp chính (Hình 1) như sau:

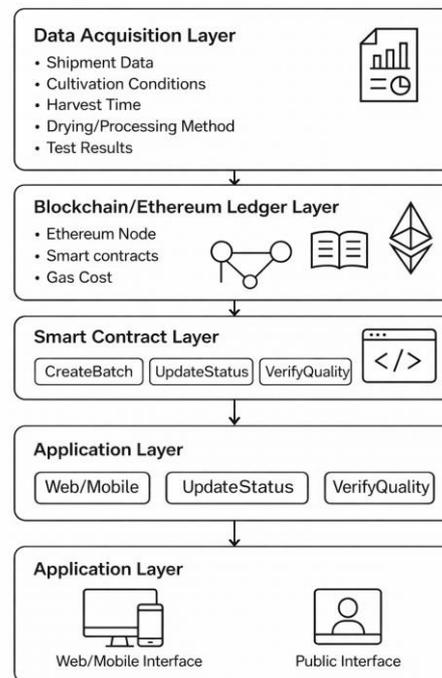
- Lớp Dữ liệu đầu vào (Data Acquisition Layer): Lớp này chịu trách nhiệm thu thập và chuẩn hóa các dữ liệu liên quan đến dược liệu, bao gồm thông tin lô hàng, nguồn gốc trồng trọt và kết quả kiểm soát chất lượng. Dữ liệu được nhập vào hệ thống thông qua giao diện ứng dụng hoặc các dịch vụ trung gian trước khi được ghi nhận lên Blockchain.

- Lớp Blockchain/Sổ cái Ethereum: Lớp này bao gồm mạng lưới các nút Ethereum chịu trách nhiệm xác thực giao dịch và duy trì sổ cái phân tán. Mọi giao dịch ghi dữ liệu đều được đóng gói, xác thực thông qua cơ chế đồng thuận của Ethereum và lưu trữ vĩnh viễn trên Blockchain. Việc ghi dữ liệu phát sinh chi

phí gas, trong khi các giao dịch truy vấn chỉ đọc dữ liệu không làm thay đổi trạng thái sổ cái.

- Lớp Hợp đồng Thông minh (Smart Contract Layer): Các Hợp đồng Thông minh được triển khai bằng ngôn ngữ Solidity, định nghĩa các quy tắc nghiệp vụ cốt lõi của hệ thống, bao gồm tạo lô dược liệu (CreateBatch), cập nhật trạng thái trong chuỗi cung ứng (UpdateStatus) và xác nhận kết quả kiểm soát chất lượng (VerifyQuality). Các hợp đồng này đảm bảo việc thực thi nghiệp vụ được tự động hóa, minh bạch và không thể thay đổi sau khi được triển khai.

- Lớp Ứng dụng (Application Layer): Lớp ứng dụng cung cấp giao diện Web/Mobile cho các bên tham gia trong chuỗi cung ứng để nhập dữ liệu, theo dõi trạng thái lô hàng và thực hiện các giao dịch với Blockchain. Đồng thời, hệ thống cũng cung cấp giao diện truy xuất công khai cho người tiêu dùng, cho phép quét mã QR hoặc tra cứu thông tin nguồn gốc dược liệu dựa trên dữ liệu đã được ghi nhận trên Ethereum.



Hình 1. Mô hình quản lý dược liệu trên nền tảng Blockchain

3. Quản lý chất lượng và truy xuất nguồn gốc dược liệu

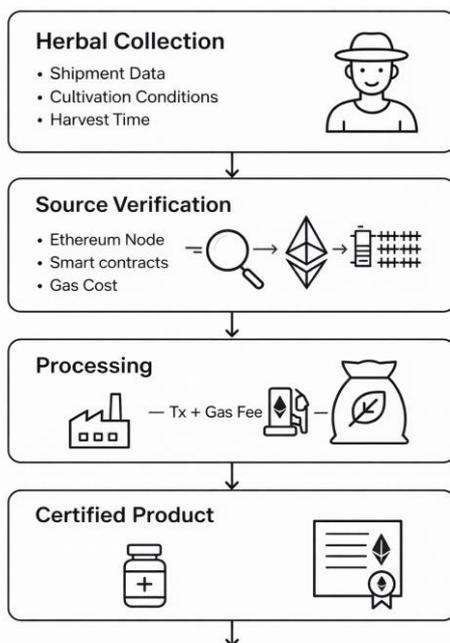
Quản lý chất lượng và truy xuất nguồn gốc dược liệu đòi hỏi khả năng theo dõi xuyên suốt toàn bộ vòng đời sản phẩm, từ khâu trồng trọt, thu hoạch, kiểm định cho đến phân phối tới người tiêu dùng cuối. Trong mô

hình đề xuất, mỗi lô dược liệu được gán một mã định danh duy nhất (Batch ID) ngay từ giai đoạn đầu, đóng vai trò là khóa liên kết các thông tin liên quan trong suốt chuỗi cung ứng.

Các dữ liệu quan trọng như thông tin nguồn gốc trồng trọt, thời điểm thu hoạch, phương pháp sơ chế - chế biến và kết quả kiểm soát chất lượng (Quality Control - QC) được thu thập tại Lớp Dữ liệu đầu vào theo quy chuẩn quốc gia [8] và sau đó được ghi nhận lên Ethereum thông qua các giao dịch gọi đến Hợp đồng Thông minh. Để tối ưu chi phí lưu trữ và đảm bảo tính toàn vẹn dữ liệu, các tài liệu kiểm định chi tiết (ví dụ: Giấy chứng nhận QC) được lưu trữ ngoài chuỗi (off-chain), trong khi giá trị băm (hash) của các tài liệu này được ghi trực tiếp lên Blockchain.

Quy trình quản lý chất lượng được tự động hóa thông qua các Hợp đồng Thông minh triển khai bằng ngôn ngữ Solidity. Cụ thể, hợp đồng cung cấp các hàm nghiệp vụ chính như CreateBatch để khởi tạo lô dược liệu, UpdateStatus để cập nhật trạng thái của lô hàng trong chuỗi cung ứng, và VerifyQuality để xác nhận kết quả kiểm định từ phòng thí nghiệm hoặc cơ quan có thẩm quyền. Mỗi giao dịch ghi dữ liệu đều yêu cầu chi phí gas và chỉ được thực thi khi thỏa mãn các điều kiện phân quyền đã được định nghĩa trong hợp đồng.

Mỗi lô dược liệu đi qua các giai đoạn quan trọng, được ghi lại trên Blockchain bằng cách thực thi các Hợp đồng Thông minh [4] theo Hình 2.



Hình 2. Quy trình dược liệu cần xác minh nguồn gốc

Nhờ đặc tính bất biến và minh bạch của Ethereum, các thông tin đã được xác nhận không thể bị chỉnh sửa hoặc xóa bỏ, giúp ngăn chặn hiệu quả các hành vi gian lận hoặc giả mạo dữ liệu. Người tiêu dùng và các bên liên quan có thể truy xuất lịch sử đầy đủ của từng lô dược liệu thông qua giao diện ứng dụng hoặc quét mã QR, từ đó kiểm chứng nguồn gốc và chất lượng sản phẩm một cách nhanh chóng và đáng tin cậy.

Cách tiếp cận này tương đồng với các nghiên cứu trước đó về chống giả dược phẩm dựa trên Blockchain, trong đó Blockchain được sử dụng để ghi nhận bất biến thông tin lô sản phẩm và hỗ trợ truy xuất nguồn gốc xuyên suốt chuỗi cung ứng, như các mô hình xác minh thuốc được đề xuất trong [3], [5], [7].

4. Phương pháp thực nghiệm

Nghiên cứu này triển khai và đánh giá hệ thống quản lý và truy xuất nguồn gốc dược liệu trên nền tảng Ethereum nhằm phân tích tính khả thi và hiệu suất kỹ thuật của mô hình đề xuất trong điều kiện mô phỏng gần với kịch bản ứng dụng thực tế. Các thí nghiệm tập trung vào việc đo lường khả năng xử lý giao dịch, độ trễ và chi phí thực thi của các Hợp đồng Thông minh trong môi trường Ethereum.

4.1. Thiết lập thử nghiệm

Để đánh giá hiệu năng và khả năng ứng dụng của hệ thống trong bài toán quản lý và truy vết dược liệu, một môi trường thử nghiệm được xây dựng mô phỏng chuỗi cung ứng với nhiều bên tham gia, bao gồm nhà sản xuất, phòng kiểm nghiệm và đơn vị phân phối. Cấu hình thử nghiệm bao gồm các thành phần chính về hạ tầng Blockchain, Hợp đồng Thông minh và công cụ đo lường hiệu suất, được mô tả chi tiết như sau:

- Mạng Blockchain: Hệ thống được triển khai trên mạng Ethereum, sử dụng các nút Ethereum để xác thực và ghi nhận giao dịch lên sổ cái phân tán. Việc định danh các bên tham gia được thực hiện thông qua địa chỉ ví Ethereum, trong đó mỗi bên được cấp quyền thực hiện các chức năng tương ứng theo logic phân quyền được định nghĩa trong Hợp đồng Thông minh.

- Hợp đồng Thông minh (Smart Contract): Các Hợp đồng Thông Minh được phát triển bằng ngôn ngữ Solidity, tập trung vào các chức năng nghiệp vụ cốt lõi của hệ thống, bao gồm: khởi tạo lô dược liệu (CreateBatch), cập nhật trạng thái trong chuỗi cung ứng (UpdateStatus) và xác nhận kết quả kiểm soát chất lượng (VerifyQuality). Các giao dịch ghi dữ liệu yêu cầu chi phí gas và chỉ được thực thi khi thỏa mãn các điều kiện kiểm soát quyền truy cập.

- Công cụ đo lường và đánh giá hiệu suất: Các chỉ

số hiệu suất như thông lượng giao dịch, độ trễ và chi phí gas được thu thập thông qua việc theo dõi các giao dịch gửi lên mạng Ethereum trong quá trình thử nghiệm. Dữ liệu giao dịch được phân tích nhằm đánh giá mức độ phù hợp của mô hình đối với các kịch bản truy xuất nguồn gốc, trong đó các giao dịch đọc chiếm tỷ lệ lớn từ phía người dùng cuối.

Các thử nghiệm được thực hiện trên môi trường Ethereum Sepolia testnet nhằm đánh giá xu hướng hiệu năng tương đối và hành vi thực thi của hệ thống, thay vì phản ánh chính xác hiệu suất tuyệt đối của mạng Ethereum công khai (mainnet). Do đó, các kết quả thu được mang tính tham khảo nhưng vẫn đủ tin cậy để đánh giá tính khả thi của mô hình đề xuất.

Hình 3 là Giao diện hệ thống đã triển khai.



Hình 3. Giao diện trang chủ hệ thống

4.2. Kịch bản thử nghiệm

Để đánh giá toàn diện hành vi thực thi và xu hướng hiệu năng của hệ thống quản lý và truy xuất nguồn gốc được triển khai trên nền Blockchain Ethereum, nghiên cứu xây dựng các kịch bản thử nghiệm dựa trên đặc điểm vận hành thực tế của chuỗi cung ứng. Các kịch bản thử nghiệm tập trung vào hai nhóm giao dịch chính là giao dịch ghi dữ liệu (write transactions) và giao dịch truy vấn dữ liệu (read transactions), đồng thời theo dõi chi phí gas phát sinh trong quá trình thực thi các Hợp đồng Thông Minh triển khai trên mạng Ethereum Sepolia testnet.

Trong quá trình thử nghiệm, các giao dịch được gửi liên tục từ nhiều tài khoản Ethereum đại diện cho các bên tham gia trong chuỗi cung ứng, bao gồm nhà sản xuất, phòng kiểm nghiệm và đơn vị phân phối. Tổng số giao dịch được phân bố đều trong khoảng thời gian thử nghiệm nhằm mô phỏng tải hoạt động của hệ thống trong điều kiện gần với thực tế, đồng thời hạn chế ảnh hưởng của các biến động ngẫu nhiên trong quá trình gửi giao dịch.

Hai kịch bản thử nghiệm chính được xây dựng như sau:

- Kịch bản 1 - Tải ghi dữ liệu chiếm ưu thế (Write-heavy workload): Trong kịch bản này, 70% số

giao dịch là giao dịch ghi, bao gồm các thao tác tạo lô được (CreateBatch), cập nhật trạng thái (UpdateStatus) và xác nhận kiểm soát chất lượng (VerifyQuality). Các giao dịch còn lại (30%) là giao dịch đọc, phục vụ truy vấn thông tin nguồn gốc. Kịch bản này mô phỏng giai đoạn đầu của chuỗi cung ứng, khi dữ liệu được cập nhật liên tục và phát sinh chi phí gas cho mỗi giao dịch ghi.

- Kịch bản 2 - Tải truy vấn chiếm ưu thế (Read-heavy workload): Trong kịch bản này, 70% số giao dịch là giao dịch đọc, thực hiện truy vấn lịch sử và thông tin chi tiết của các lô được ghi nhận trên Blockchain. 30% còn lại là các giao dịch ghi nhằm cập nhật trạng thái bổ sung. Kịch bản này phản ánh hành vi sử dụng phổ biến của người tiêu dùng và các bên liên quan ở giai đoạn cuối chuỗi cung ứng, trong đó các giao dịch đọc không làm thay đổi trạng thái số cái và không phát sinh chi phí Gas.

Trong cả hai kịch bản, các chỉ số hiệu suất được thu thập bao gồm thông lượng giao dịch, độ trễ giao dịch và chi phí gas trung bình đối với từng loại giao dịch ghi. Các kết quả thu được được sử dụng làm cơ sở để phân tích khả năng đáp ứng của hệ thống và đánh giá mức độ phù hợp của mô hình đề xuất đối với bài toán quản lý và truy xuất nguồn gốc được triển khai trên nền Ethereum, thay vì đánh giá hiệu suất tuyệt đối của mạng Blockchain công khai.

5. Phân tích thử nghiệm và kết quả

Sau đây là phân tích các kết quả thực nghiệm thu được từ quá trình triển khai hệ thống quản lý và truy xuất nguồn gốc được triển khai trên nền tảng Ethereum. Các đánh giá tập trung vào ba chỉ số hiệu suất chính, bao gồm thông lượng giao dịch (Throughput), độ trễ giao dịch (Latency) và chi phí gas, nhằm phản ánh khả năng đáp ứng của hệ thống trong các kịch bản tải khác nhau.

5.1. Kết quả thông lượng (Throughput) và độ trễ giao dịch (Latency)

Kiểm tra thông lượng trên 2 kịch bản được thể hiện trong Bảng 1.

Từ Bảng 1, kết quả thực nghiệm cho thấy, trong Kịch bản 1 (Write-heavy workload), hệ thống đạt thông lượng ổn định với độ trễ giao dịch trung bình cao hơn so với kịch bản đọc, do các giao dịch ghi yêu cầu thực thi Hợp đồng Thông Minh và tiêu tốn chi phí gas. Ngược lại, trong Kịch bản 2 (Read-heavy workload), độ trễ giảm đáng kể do phần lớn các thao tác là truy vấn dữ liệu chỉ đọc, không làm thay đổi trạng thái số cái và không yêu cầu xác nhận giao dịch trên Blockchain.

Bảng 1. Hiệu suất mạng trên nền tảng Ethereum

Kịch bản	Tỷ lệ Ghi/Đọc	Thông lượng đỉnh (TPS)	Độ trễ giao dịch TB (giây)	Chi phí Gas TB (ghi)
Kịch bản 1 (Write-heavy)	70% Ghi / 30% Đọc	45.6	1.85	Cao
Kịch bản 2 (Read-heavy)	30% Ghi / 70% Đọc	51.2	0.45	Thấp

Bảng 2. Chi phí Gas và mức độ tiêu thụ tài nguyên trên nền tảng Ethereum

Hoạt động	Kích thước dữ liệu (KB)	Chi phí Gas (trung đối)	Ghi chú
Tạo lô hàng (CreateBatch)	~5 (Dữ liệu + Hash)	Cao	Ghi dữ liệu mới lên Blockchain
Cập nhật trạng thái (UpdateStatus)	~1	Trung bình	Thay đổi trạng thái lô hàng
Truy vấn nguồn gốc (Read)	~1	Rất thấp / 0	Chỉ đọc dữ liệu, không thay đổi trạng thái

5.2. Phân tích chi phí Gas

Chi phí gas là yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng triển khai và mở rộng hệ thống trên nền tảng Ethereum. Trong quá trình thử nghiệm, chi phí gas được ghi nhận cho từng loại giao dịch ghi, bao gồm tạo lô dược liệu (CreateBatch), cập nhật trạng thái (UpdateStatus) và xác nhận kiểm soát chất lượng (VerifyQuality).

Từ Bảng 2 có thể thấy rằng chi phí gas của các giao dịch trong hệ thống phụ thuộc chủ yếu vào loại thao tác và mức độ thay đổi trạng thái trên Ethereum. Các giao dịch ghi dữ liệu, đặc biệt là thao tác tạo lô hàng (CreateBatch), tiêu tốn chi phí gas cao hơn do yêu cầu lưu trữ dữ liệu mới và thực thi logic hợp đồng thông minh. Ngược lại, các giao dịch truy vấn nguồn gốc chỉ đọc dữ liệu không làm thay đổi trạng thái số cái nên hầu như không phát sinh chi phí gas. Kết quả này cho thấy mô hình đề xuất phù hợp với kịch bản ứng dụng thực tế, trong đó các giao dịch truy vấn từ người tiêu dùng chiếm tỷ lệ lớn, giúp tối ưu chi phí vận hành trong khi vẫn đảm bảo khả năng truy xuất nguồn gốc minh bạch và đáng tin cậy.

5.3. Trải nghiệm người dùng cuối (truy xuất nguồn gốc)

Từ góc độ người dùng cuối, khả năng truy xuất nguồn gốc nhanh chóng và minh bạch là yếu tố quan trọng nhất. Trong hệ thống đề xuất, người tiêu dùng có thể sử dụng giao diện Web/Mobile hoặc quét mã QR được gắn trên sản phẩm để truy vấn toàn bộ lịch sử của lô dược liệu trực tiếp từ dữ liệu đã được ghi nhận trên Ethereum.

Quy trình thực hiện quét QR để truy xuất nguồn gốc được thể hiện trong Hình 4.

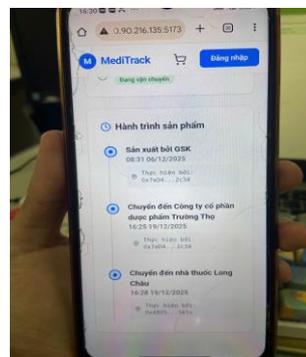
Người tiêu dùng chỉ cần quét mã QR được in trên bao bì dược liệu hoặc trên hệ thống tìm kiếm (Hình 5) sẽ hiển thị thông tin nguồn gốc xuất xứ của dược liệu (Hình 6).



Hình 4. Quy trình thực hiện quét Mã QR và hiển thị lịch sử truy xuất nguồn gốc



Hình 5. Quét mã QR



Hình 6. Kết quả hiển thị thông tin dược liệu

Kết quả thử nghiệm cho thấy các truy vấn được thực hiện với thời gian phản hồi ngắn và không phát sinh chi phí gas, mang lại trải nghiệm thuận tiện cho người dùng. Đồng thời, việc dữ liệu được lưu trữ trên sổ cái phân tán giúp nâng cao mức độ tin cậy và minh bạch, góp phần củng cố niềm tin của người tiêu dùng vào chất lượng và nguồn gốc dược liệu.

6. Kết luận và hướng phát triển

Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình quản lý và truy xuất nguồn gốc dược liệu dựa trên Blockchain Ethereum có khả năng đáp ứng hiệu quả các yêu cầu về tính minh bạch, toàn vẹn dữ liệu và khả năng truy vết xuyên suốt chuỗi cung ứng. Mô hình đặc biệt phù hợp với các kịch bản ứng dụng thực tế, trong đó các giao dịch truy vấn nguồn gốc chiếm tỷ lệ lớn và không làm thay đổi trạng thái sổ cái, do đó không phát sinh chi phí gas. Đặc điểm này góp phần làm giảm chi phí vận hành khi hệ thống được sử dụng rộng rãi bởi người tiêu dùng và các bên liên quan.

Mặc dù đạt được các kết quả tích cực, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế cần được xem xét. Thứ nhất, chi phí gas của các giao dịch ghi dữ liệu trên mạng Ethereum có thể biến động theo tình trạng tải của mạng và cơ chế định giá gas tại từng thời điểm, từ đó ảnh hưởng đến chi phí vận hành khi triển khai trên mạng công khai (public Ethereum). Thứ hai, độ trễ giao dịch phụ thuộc vào thời gian xác nhận khối, khiến hệ thống khó đáp ứng yêu cầu thời gian thực tuyệt đối trong các kịch bản cần phản hồi tức thời. Thứ ba, do hạn chế về dung lượng lưu trữ trên Blockchain, nghiên cứu hiện chỉ lưu trữ giá trị băm của các tài liệu kiểm định trên chuỗi, trong khi dữ liệu chi tiết được lưu trữ ngoài chuỗi (off-chain), dẫn đến sự phụ thuộc nhất định vào các hệ thống lưu trữ bổ trợ.

Ngoài ra, các thử nghiệm được thực hiện trên Ethereum Sepolia testnet với số lượng tài khoản và mức tải giao dịch giới hạn, do đó chưa phản ánh đầy đủ tác động của quy mô mạng lớn và hành vi người dùng phức tạp trong môi trường triển khai thực tế. Trong tương lai, các nghiên cứu tiếp theo có thể xem xét tích hợp các giải pháp mở rộng như Layer-2, sidechain, hoặc mạng Ethereum riêng (private Ethereum network) nhằm giảm chi phí gas, rút ngắn độ trễ giao dịch và nâng cao khả năng mở rộng của hệ thống. Bên cạnh đó, việc kết hợp với các cơ chế lưu trữ phân tán như IPFS hoặc các mô hình quản lý danh tính phi tập trung cũng là hướng phát triển tiềm năng cho hệ thống trong các ứng dụng truy xuất nguồn gốc dược liệu quy mô lớn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **SV25-26.208**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Mishra, D. Ramesh, N. Mohammad, and B. Mondal, (2024), *A Blockchain-Based Secure and Efficient Traceable Supply Chain Infrastructure for Pharmaceutical Products*, Research Gate.
- [2] A. Betouil, S. El Haddouti, and H. Chaoui, (2024), *A Systematic Review of Blockchain Applications in Pharmaceutical Supply Chain Traceability and Security*, in Proc. 2024 10th Int. Conf. Netw. Syst. Secur. (NSysS), pp.1-6.
- [3] E. Ehioghae, S. Idowu, and O. Ebiesuwa, (2025), *Enhanced Drug Anti-Counterfeiting and Verification System for the Pharmaceutical Drug Supply Chain using Blockchain*, Research Gate.
- [4] M. Zayd, A. Johari, and M. Manimozhi, (2024), *Supply Chain Management Using Blockchain and IoT in Pharmaceutical Industries*, in Proc. 2024 IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag. (IEEM), pp.110-115.
- [5] S. Kum and A. S. Poornima, (2024), *SafeMeds: A Blockchain-Driven Drug Supply Chain Verification System*, in Proc. 2024 Int. Conf. Technol. Adv. Comput. Sci. (ICTACS), pp.1-6.
- [6] V. Buterin, (2014), *Ethereum Whitepaper: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*, Ethereum Foundation.
- [7] H. Kim and M. E. Kang, (2021), *Blockchain-Based Supply Chain Management using Hyperledger Fabric: A Case Study*, IEEE Access, Vol.9, pp.9368-9378.
- [8] Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng (STAMEQ), (2016), *Dược liệu - Định nghĩa và phân loại (Herbal medicinal materials - Definition and classification)*, Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 11632:2016.

Ngày nhận bài:	19/12/2025
Ngày nhận bản sửa:	03/01/2026
Ngày duyệt đăng:	10/01/2026