JOURNAL OF SCIENCE
OF LAC HONG UNIVERSITY
ISSN: 2525 - 2186
Tạp chí Khoa học Lạc Hồng, **2026**, 29, 001-007

THIẾT KẾ VÀ TRIỂN KHAI HỆ THỐNG NÔNG NGHIỆP THÔNG MINH DỰA TRÊN NỀN TẢNG IOT

Phan Công Thắng[1*], Phạm Duy Đông[1], Vũ Văn Tuyên[1], Trần Thị Thùy Hương[1], Lê Phương Trường[2]

[1] *Trường Cao đẳng Cơ giới và Thủy lợi, phường Hố Nai, Thành phố Đồng Nai, Việt Nam*

[2] *Trường Đại học Lạc Hồng, phường Trấn Biên, Thành phố Đồng Nai, Việt Nam*

* Tác giả liên hệ: congthang1977@gmail.com

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận: 25/06/2026

Ngày hoàn thiện: 30/09/2026

Ngày chấp nhận: 07/10/2026

Ngày đăng: 15/10/2026

TỪ KHÓA

Internet vạn vật (IoT);
Nông nghiệp thông minh;
Tự động hóa nông nghiệp.

TÓM TẮT

Nghiên cứu trình bày quá trình thiết kế và triển khai hệ thống nông nghiệp thông minh ứng dụng công nghệ Internet vạn vật (IoT) nhằm tự động hóa giám sát, điều khiển dinh dưỡng và môi trường canh tác.

Hệ thống tích hợp các cảm biến đo NPK, độ ẩm đất và pH để thu thập dữ liệu theo thời gian thực. Dữ liệu từ cảm biến được số hóa ngay bên trong cảm biến và truyền đến bộ điều khiển PLC qua giao tiếp RS485/Modbus RTU để xử lý. Cấu trúc hệ thống có năm bồn chứa riêng biệt gồm: dung dịch đạm (N), lân (P), kali (K), dung dịch điều chỉnh pH và nước tưới. Khi nồng độ NPK, độ ẩm hoặc giá trị pH lệch khỏi ngưỡng cài đặt, các bơm tương ứng sẽ tự động kích hoạt để bổ sung dinh dưỡng, cân bằng pH và tưới tiêu. Bên cạnh đó, hệ thống trang bị đèn LED grow light với ánh sáng đỏ (660 nm) và xanh (450 nm) hỗ trợ quang hợp. Các thông số vận hành đều có thể điều chỉnh linh hoạt theo từng loại cây và giai đoạn sinh trưởng.

Hiệu năng hệ thống được đánh giá thực nghiệm trên mô hình trồng cải xanh (*Brassica juncea*), dựa trên khả năng thu thập, xử lý dữ liệu, độ ổn định môi trường và đáp ứng của hệ thống tự động hóa nông nghiệp.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN IOT-BASED SMART AGRICULTURE SYSTEM

Phan Cong Thang[1*], Pham Duy Dong[1], Vu Van Tuyen[1], Tran Thi Thuy Huong[1], Le Phuong Truong[2]

[1] *College of Machinery and Irrigation, Ho Nai ward, Dong Nai City, Vietnam*

[2] *Lac Hong University, Tran Bien ward, Dong Nai City, Vietnam*

*Corresponding Author: congthang1977@gmail.com

ARTICLE INFO

Received: June 25th, 2026

Revised: Sep 30th, 2026

Accepted: Oct 7th, 2026

Published: Oct 15th, 2026

KEYWORDS

Internet of Things (IoT);
Smart Agriculture;
Agricultural Automation.

ABSTRACT

This study presents the design and implementation of a smart agriculture system based on Internet of Things (IoT) technology to automate the monitoring and control of nutrient supply and cultivation environmental conditions.

The system integrates sensors for measuring NPK, soil moisture, and pH to collect real-time data. The sensor data are digitized internally by the sensor and transmitted to the programmable logic controller (PLC) via RS485/Modbus RTU for processing. The system consists of five separate tanks containing nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), pH-adjusting solution, and irrigation water. When the NPK concentration, soil moisture, or pH value deviates from the preset thresholds, the corresponding pumps are automatically activated to supply nutrients, regulate pH, and provide irrigation. In addition, the system is equipped with LED grow lights providing red light (660 nm) and blue light (450 nm) to support photosynthesis. The operating parameters can be flexibly adjusted according to the crop type and growth stage.

The system performance was experimentally evaluated using a mustard green (Brassica juncea) cultivation model based on data acquisition and processing capabilities, environmental stability, and the response of the agricultural automation system.

Available online at: https://lhj.vn

1. GIỚI THIỆU

Nông nghiệp đóng vai trò quan trọng trong sự phát triển kinh tế – xã hội. Tuy nhiên, ngành nông nghiệp đang đối mặt với nhiều thách thức liên quan đến biến đổi khí hậu, các vấn đề về nhân khẩu học và quản lý tài nguyên nước [1]. Trong bối cảnh đó, việc quản lý hiệu quả nguồn nước tưới là một yêu cầu cấp thiết, theo thống kê nông nghiệp tiêu thụ khoảng 70% tổng nước ngọt trên toàn thế giới trong khi đó các hệ thống tưới tiêu truyền thống dựa trên quan sát thủ công dẫn đến lãng phí nguồn nước và không phản ứng kịp thời với sự biến động của môi trường. Sự bùng nổ về công nghệ 4.0 đã thúc đẩy quá trình chuyển đổi từ truyền thống sang nông nghiệp thông minh nơi các quy trình canh tác dựa trên dữ liệu và tự động hóa.

Tích hợp các công nghệ IoT, trí tuệ nhân tạo (AI) hoặc học máy (Machine Learning) đã mở ra những giải pháp công nghệ tối ưu trong việc sử dụng tài nguyên. Hệ thống IoT cho phép thu thập dữ liệu thời gian thực về điều kiện đất (độ ẩm, nhiệt độ, độ pH) thông qua mạng lưới cảm biến và các bộ vi điều khiển như ESP32, Arduino hoặc Raspberry Pi. Đồng thời, các thuật toán AI như mạng nơron nhân tạo (ANN), KNN và SVM giúp phân tích các mối quan hệ phi tuyến phức tạp, từ đó đưa ra quyết định tưới tiêu chính xác và khuyến nghị loại cây trồng phù hợp. Bảng 1 trình bày sự so sánh các công nghệ trong nông nghiệp thông minh.

Bảng 1. So sánh các công nghệ trong nông nghiệp thông minh

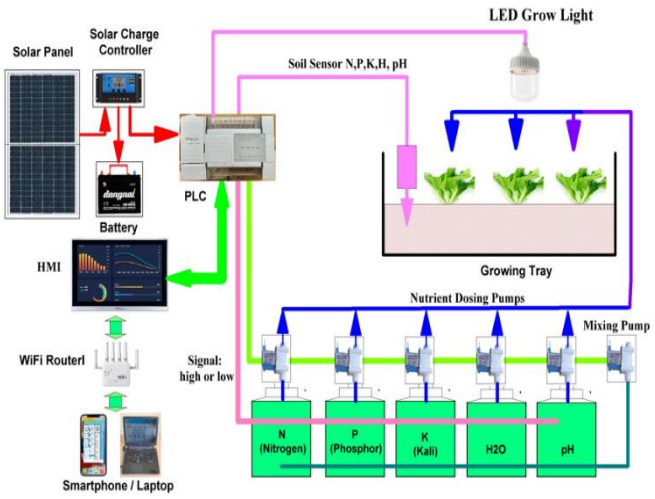
Tài liệu tham khảo	Mục tiêu	Công nghệ	Khoảng trống
Morchid [1], 2026	Tối ưu quản lý tưới tiêu bền vững.	IoT (NPK, độ ẩm), ML (ANN, CNN-LSTM), Cloud.	Bảo mật dữ liệu và chi phí cho nông dân nhỏ.
Ayaz [2], 2019	Chuyển đổi nông nghiệp qua kết nối IoT.	WSN, UAV, LoRaWAN, Cảm biến thông minh.	Thiếu kiến trúc chuẩn hóa và kết nối vùng sâu.
Hasib [3], 2026	Giám sát cây trồng và cảnh báo thời gian thực.	ESP32, ThingSpeak, DHT22, HC-SR04.	Thiếu tích hợp thị giác máy tính để phát hiện bệnh.
Sundaresan [4], 2023	Khuyến nghị cây trồng và phân bón.	ML (KNN, RFC), Cảm biến NPK/pH, Weather API.	Thiếu hệ thống dự đoán bệnh bằng hình ảnh.
Miller [5], 2025	Đánh giá cảm biến cho cây trồng/đồng cỏ.	Edge AI, Blockchain, Cảm biến quang học/acoustic.	Rào cản về chi phí và khả năng mở rộng quy mô.
Wolfert [6], 2017	Phân tích tác động của Dữ liệu lớn.	Big Data analytics, Cloud Computing, IoT.	Quyền sở hữu dữ liệu và quản trị chuỗi cung ứng.
Rahman [7], 2024	Đo độ mặn đất bằng phương pháp mới.	ANN, Raspberry Pi, Cảm biến điện trở suất.	Xử lý dữ liệu phi tuyến khi đất bão hòa nước.
Aisyah [8], 2025	Tăng hiệu quả sử dụng nước tưới.	ESP32, Blynk, Cảm biến YL-69, Pin mặt trời.	Cần kiểm chứng thực địa trên nhiều loại cây trồng.
Đóng góp này của nhóm tác giả, 2026	Giám sát và cung cấp dinh dưỡng, tưới tiêu tự động	PLC, RS485/Modbus RTU, IoT/Web, cảm biến NPK/pH/độ ẩm	Đánh giá còn giới hạn trên mô hình cải xanh

Qua so sánh các nghiên cứu liên quan trong bảng 1, có thể nhận thấy các công trình trước đây chủ yếu tập trung vào một hoặc một số chức năng riêng như giám sát môi trường, thu thập dữ liệu IoT, phân tích dữ liệu hoặc tự động hóa tưới tiêu. Trong nghiên cứu này, hệ thống được phát triển theo hướng tích hợp điều khiển tự động bằng PLC với giám sát IoT/Web, cho phép thực hiện đồng thời việc thu thập dữ liệu, giám sát và điều khiển quá trình cung cấp dinh dưỡng, điều chỉnh pH và tưới tiêu. Các cảm biến NPK, pH và độ ẩm đất sử dụng giao tiếp RS485/Modbus RTU để truyền dữ liệu số về PLC. Các giá trị thanh ghi Modbus được quy đổi thành các đại lượng vật lý tương ứng, phục vụ giám sát và điều khiển theo các ngưỡng cài đặt. Đồng thời, dữ liệu vận hành được truyền lên nền tảng IoT/Web, cho phép theo dõi trạng thái hệ thống từ xa. Việc kết hợp PLC, RS485/Modbus RTU và IoT/Web tạo thành một kiến trúc thống nhất, đáp ứng đồng thời yêu cầu điều khiển tự động tại hiện trường và giám sát từ xa, đồng thời hỗ trợ khả năng mở rộng hệ thống thông qua việc tích hợp thêm các thiết bị và mô-đun tiêu chuẩn.

2. NỘI DUNG

2.1. Thiết kế phần cứng hệ thống

Như thể hiện trong hình 1, phần cứng của hệ thống chăm sóc rau dựa trên nền tảng IoT và hệ thống điều khiển bao gồm các phần chính.



Hình 1. Thiết kế và triển khai hệ thống nông nghiệp thông minh dựa trên nền tảng IoT

Khối cảm biến đầu vào, được tích hợp vào hệ thống thu thập dữ liệu IoT sử dụng cảm biến đa năng (ZTS-3002-TR-THNPKPH-N01) giao tiếp qua chuẩn RS485. Khối này được thiết kế để giúp người nông dân canh tác trong điều kiện tối ưu, bao gồm: cảm biến độ ẩm đất (H) để theo dõi mức độ nước, cảm biến pH để đánh giá độ axit/bazơ của môi trường đất trồng, và các cảm biến dinh dưỡng Nitơ (N), Photpho (P), Kali (K) để xác định hàm lượng các chất thiết yếu này trong đất.

Cảm biến tích hợp sẵn bộ chuyển đổi analog sang số (ADC) bên trong và truyền dữ liệu qua RS485 sử dụng giao thức Modbus. Vì vậy, bộ điều khiển có thể trực tiếp đọc dữ liệu số từ các thanh ghi mà không cần xử lý ADC bên ngoài.

Bảng 2. Phân bổ địa chỉ thanh ghi trong hệ thống điều khiển

STT	Địa chỉ thanh ghi cảm biến (Modbus)	Địa chỉ thanh ghi PLC được cấu hình	Nội dung
1	0000H	40001	Moisture (H)
2	0003H	40004	pH
3	0004H	40005	Nitrogen (N)
4	0005H	40006	Phosphorus (P)
5	0006H	40007	Potassium (K)

Khối thứ hai là bộ điều khiển trung tâm PLC Wecon LX3V-1212MT, có nhiệm vụ tiếp nhận, xử lý và truyền dữ liệu từ khối cảm biến. PLC thực hiện việc so sánh các giá trị đo được với các giá trị đặt hoặc ngưỡng điều khiển đã được cài đặt, từ đó phát tín hiệu điều khiển đến các cơ cấu chấp hành. Các chức năng điều khiển bao gồm cấp nước, cung cấp dung dịch dinh dưỡng NPK và điều chỉnh pH theo yêu cầu của quá trình canh tác.

Khối thứ ba là khối chấp hành đầu ra, bao gồm các bơm cấp nước, bơm định lượng dung dịch dinh dưỡng và các thiết bị điều chỉnh pH. Các thiết bị này nhận tín hiệu điều khiển từ PLC để thực hiện các tác động tương ứng theo điều kiện điều khiển được cài đặt. Hệ thống cũng tích hợp cơ cấu khuấy trộn trước khi thực hiện bơm áp lực DC 24 V nhằm đảm bảo dung dịch dinh dưỡng được trộn đồng đều.

Bên cạnh đó, dữ liệu vận hành được truyền thông qua bộ định tuyến không dây đến máy chủ, cho phép giám sát và điều khiển từ xa thông qua ứng dụng của trang Web: https://asean.v-iec.com có giao diện Web/IoT kết hợp HMI Wecon PI3070iG 7 inch. Hệ thống sử dụng nguồn năng lượng từ tấm pin mặt trời Mono18 V 80 W 67x72cm - TEKI, bộ điều khiển sạc RBL-30 A và hệ thống 2 ắc quy 12 V, 10 Ah nối tiếp thành nguồn 24 V, hỗ trợ vận hành độc lập tại các khu vực không có lưới điện.

Trong nghiên cứu này, dữ liệu của quá trình canh tác rau cải xanh (Brassica juncea) được thu thập trong quá trình thực nghiệm để đánh giá khả năng hoạt động và hiệu quả của hệ thống trong điều kiện canh tác thực tế.

2.2. Công thức chuyển đổi dữ liệu

a) Độ ẩm đất H

Cảm biến độ ẩm đất không xuất trực tiếp giá trị phần trăm (%), giá trị thanh ghi được biểu diễn theo hệ số 10. Giá trị đọc từ cảm biến vì vậy là một số nguyên đã được chia tỷ lệ. Dải đo của cảm biến là từ 0 đến 100% độ ẩm. Tương ứng, giá trị đọc sẽ nằm trong khoảng 0 đến 1000. Mỗi 1% độ ẩm sẽ tương ứng với 10 đơn vị giá trị đọc. Điều này giúp cảm biến đạt độ phân giải cao đến 0,1%**.** Khi nhận dữ liệu từ cảm biến, cần thực hiện chuyển đổi ngược lại.

Gọi H_{raw} là giá trị đọc từ thanh ghi và H (%) là độ ẩm thực tế:

$$H = \frac{H_{raw}}{10} \quad (1)$$

b) Nồng độ pH

Trong cảm biến đo pH đất, giá trị không được truyền trực tiếp dưới dạng số thập phân mà được nhân với hệ số 10 để thuận tiện cho việc xử lý và truyền dữ liệu số. Vì các hệ thống như PLC thường làm việc tốt với số nguyên, nên việc nhân 10 giúp tránh sai số khi biểu diễn số thực.

Dải đo pH của cảm biến là 3 – 9, tương ứng với giá trị đọc từ 30 – 90. Điều này có nghĩa là mỗi 1 đơn vị pH sẽ tương ứng với 10 đơn vị giá trị đọc.

Gọi pH_{raw} là giá trị đọc từ thanh ghi và pH thực tế:

$$pH = \frac{pH_{raw}}{10} \quad (2)$$

c) Hàm lượng N, P, K

Cảm biến NPK qua chuẩn RS485/Modbus RTU sẽ trả về giá trị trực tiếp theo đơn vị mg/kg và là số nguyên biểu diễn trực tiếp hàm lượng dinh dưỡng trong đất, không cần chuyển đổi. Dải đo của cảm biến là từ 0 đến 2999 mg/kg, tương ứng với giá trị đọc từ 0 đến 2999.

Gọi N_{raw} là giá trị đọc từ thanh ghi và N thực tế:

$$N = N_{raw} \quad (3)$$

Gọi P_{raw} là giá trị đọc từ thanh ghi và P thực tế:

$$P = P_{raw} \quad (4)$$

Gọi K_{raw} là giá trị đọc từ thanh ghi và K thực tế:

$$K = K_{raw} \quad (5)$$

Việc sử dụng số nguyên giúp tối ưu hóa băng thông truyền dẫn và giảm thiểu khối lượng tính toán số thực cho các bộ điều khiển cấp thấp.

Các biểu thức (1) và (2) quy đổi giá trị độ ẩm, pH về đơn vị thực tế, trong khi các biểu thức (3), (4), (5) xác định hàm lượng N, P, K (mg/kg). Dữ liệu sau quy đổi được PLC xử lý, lưu trữ, hiển thị trên HMI/Web và truyền lên nền tảng IoT để giám sát từ xa. Đồng thời, PLC so sánh giá trị đo với ngưỡng cài đặt để xuất tín hiệu điều khiển các cơ cấu chấp hành tương ứng.

3. PHƯƠNG PHÁP

Nghiên cứu này giải quyết nhu cầu về một hệ thống giám sát và điều khiển toàn diện, chi phí thấp cho nông nghiệp thông minh dựa trên nền tảng IoT. Hệ thống sử dụng PLC để điều chỉnh các thông số môi trường quan trọng như độ ẩm đất, pH và nồng độ dinh dưỡng (N, P, K). Hệ thống có khả năng đáp ứng linh hoạt trước những biến động của các thông số môi trường trong quá trình canh tác, qua đó duy trì các điều kiện phù hợp cho sự sinh trưởng và phát triển của cây trồng.

Hệ thống thực nghiệm gồm cảm biến thu thập dữ liệu về các thông số dinh dưỡng của đất trồng, sau đó truyền dữ

liệu về PLC để xử lý. Dựa trên các giá trị đo được, PLC thực hiện điều khiển các cơ cấu chấp hành như bơm nước, bơm dinh dưỡng và đèn LED grow light TRR 25 W 120/WR nhằm duy trì các điều kiện phù hợp cho quá trình sinh trưởng của cây trồng.

Ngoài ra, hệ thống tích hợp nền tảng giám sát qua HMI và ứng dụng Web, cho phép người dùng theo dõi dữ liệu, cài đặt ngưỡng cảnh báo và điều khiển từ xa. Kết nối IoT thông qua Wi-Fi và máy chủ đám mây giúp lưu trữ dữ liệu an toàn, đồng thời tăng tính linh hoạt và khả năng mở rộng hệ thống.

3.1. Bộ điều khiển PLC Wecon LX3V-1212MT

Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển PLC được sử dụng để điều khiển hệ thống tưới tiêu, cân bằng dinh dưỡng NPK và ổn định giá trị pH của môi trường trồng. Đầu vào của hệ thống là các tín hiệu thu thập từ cảm biến bao gồm độ ẩm đất, pH, nồng độ N, P, K. Các tín hiệu này được chuyển đổi sang dạng số thông qua Modbus RTU và đưa vào PLC để xử lý.

PLC thực hiện việc thu thập và xử lý dữ liệu theo chu trình quét liên tục. Dựa trên các giá trị đo được, chương trình điều khiển trong PLC sẽ so sánh với các ngưỡng cài đặt trước để đưa ra quyết định điều khiển phù hợp. Quá trình này đảm bảo hệ thống đáp ứng theo cơ chế điều khiển ON/OFF trong quá trình vận hành thực nghiệm với sự thay đổi của môi trường.

Tín hiệu đầu ra từ PLC được sử dụng để điều khiển các thiết bị chấp hành như bơm nước, bơm dinh dưỡng N, P, K, bơm trộn và đèn LED grow light TRR 25 W 120/WR giúp tối ưu hóa quá trình quang hợp, thúc đẩy cây trồng phát triển, ra rễ và lá tốt hơn. Đây là giải pháp chiếu sáng thay thế hoặc bổ sung cho cây trong nhà, nhà kính, hoặc khu vực thiếu nắng. Các thiết bị này có thể được điều khiển theo dạng ON/OFF theo yêu cầu vận hành.

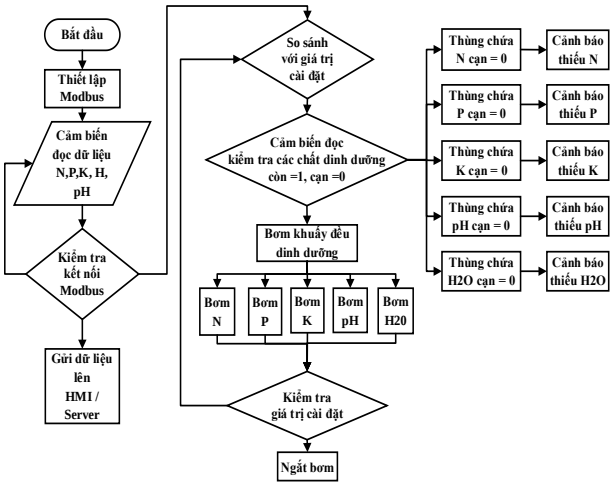
Cơ chế điều khiển dựa trên PLC cho phép hệ thống hoạt động ổn định, dễ lập trình và có độ tin cậy cao. Đồng thời, PLC có khả năng mở rộng và tích hợp với các hệ thống giám sát như HMI, giúp nâng cao khả năng điều khiển và quản lý toàn bộ hệ thống nông nghiệp thông minh.

3.2. Sơ đồ hoạt động của hệ thống

Sơ đồ hoạt động của hệ thống được trình bày trong hình 2, gồm ba khối chức năng chính: khối thu thập và truyền dữ liệu, khối điều khiển PLC và khối giám sát Web/HMI. Dữ liệu từ các cảm biến được thu thập và truyền về PLC để xử lý và thực hiện các chức năng điều khiển theo các giá trị cài đặt. PLC đồng thời gửi dữ liệu đo lường và trạng thái hoạt động của các thiết bị đến máy chủ thông qua kết nối IoT. Các dữ liệu này được hiển thị trên giao diện Web/HMI, cho phép người vận hành theo dõi các thông số của hệ thống và trạng thái thiết bị theo thời gian thực. Khi có yêu cầu điều khiển, tín hiệu từ PLC được truyền đến các thiết bị chấp hành như bơm nước, bơm dinh dưỡng và các thiết bị liên quan. Quá trình thu thập, truyền dữ liệu, điều khiển và giám sát được thực hiện liên tục nhằm đảm bảo hệ thống vận hành ổn định và đáp ứng yêu cầu chăm sóc cây trồng.

3.3. Thu thập và phân tích dữ liệu thực nghiệm thông qua HMI

Để đánh giá hiệu quả của hệ thống, dữ liệu được thu thập từ mô hình thực nghiệm nhằm đánh giá khả năng thu thập, xử lý dữ liệu và điều khiển hệ thống. Thực nghiệm dựa trên kiến trúc thực tế gồm ba thành phần chính: PLC, truyền thông Modbus RTU và giao diện HMI.



Hình 2. Lưu đồ điều khiển và giám sát hệ thống nông nghiệp thông minh sử dụng PLC, Modbus RTU và HMI.

PLC được lập trình bằng phần mềm chuyên dụng để xử lý tín hiệu đầu vào và thực hiện điều khiển hệ thống. Cảm biến độ ẩm đất, pH, N, P, K cung cấp tín hiệu đầu vào cho PLC, cho phép hệ thống thu thập và xử lý dữ liệu theo thời gian thực.

Giao thức Modbus RTU được sử dụng để truyền dữ liệu giữa các thiết bị trong hệ thống. Dữ liệu từ cảm biến được gửi đến PLC, sau đó PLC đưa ra tín hiệu điều khiển đến các cơ cấu chấp hành như bơm nước, bơm dinh dưỡng và đèn LED grow light theo chu trình quét liên tục.

Giao diện HMI/Web cho phép hiển thị thông số thời gian thực, cài đặt giá trị đặt và giám sát trạng thái hệ thống. Người dùng cũng có thể nhận cảnh báo khi thông số vượt ngưỡng và theo dõi dữ liệu phục vụ đánh giá.

Các sơ đồ thực nghiệm được hiển thị trên HMI để kiểm tra đáp ứng của hệ thống, như: khi độ ẩm thấp, hệ thống kích hoạt tưới; khi thiếu dinh dưỡng, hệ thống kích hoạt bơm bổ sung NPK; khi pH lệch khỏi ngưỡng cài đặt, hệ thống thực hiện điều chỉnh tương ứng. Kết quả cho thấy hệ thống có khả năng vận hành ổn định và đáp ứng các yêu cầu điều khiển trong phạm vi mô hình thực nghiệm. Kết quả này là cơ sở ban đầu cho việc mở rộng và đánh giá hệ thống trên các quy mô và điều kiện canh tác khác.

3.4. Phát triển giao diện ứng dụng Web

Giao diện ứng dụng Web được phát triển nhằm hỗ trợ giám sát và điều khiển hệ thống từ xa một cách trực quan và thuận tiện. Ứng dụng đóng vai trò kết nối giữa người dùng và hệ thống PLC thông qua nền tảng IoT, cho phép truy cập dữ liệu mọi lúc, mọi nơi.

Giao diện Web hiển thị các thông số môi trường theo thời gian thực như: độ ẩm đất, pH và nồng độ dinh dưỡng (N, P, K). Dữ liệu được cập nhật liên tục từ máy chủ, đảm bảo phản ánh chính xác trạng thái hoạt động của hệ thống.

Người dùng có thể thiết lập các giá trị đặt và gửi lệnh điều khiển đến PLC thông qua giao thức truyền thông. Các thiết bị như bơm nước, bơm dinh dưỡng và đèn LED grow light được điều khiển linh hoạt theo yêu cầu vận hành.

Hệ thống cũng tích hợp chức năng cảnh báo khi thông số vượt ngưỡng, giúp người dùng kịp thời xử lý các tình huống bất thường. Dữ liệu vận hành được lưu trữ trên máy chủ, hỗ trợ theo dõi lịch sử và đánh giá hiệu quả hệ thống.

Giao diện được thiết kế thân thiện, dễ sử dụng và có khả năng mở rộng, góp phần nâng cao hiệu quả quản lý và vận hành hệ thống nông nghiệp thông minh.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kết quả thực nghiệm và thu thập dữ liệu trên HMI

Sau khi triển khai và vận hành mô hình thực nghiệm, nhóm nghiên cứu tiến hành thu thập dữ liệu từ hệ thống HMI trong thời gian thực. Các thông số độ ẩm đất, pH và nồng độ dinh dưỡng N, P, K được đánh giá khả năng vận hành và đáp ứng điều khiển của hệ thống trong phạm vi thực nghiệm đã thực hiện. Kết quả thu được thể hiện như sau:

Kiểm soát dinh dưỡng (N–P–K):

Nitơ (N): Nồng độ N được duy trì tương đối ổn định quanh giá trị xấp xỉ 300–320 mg/kg. Trong một số thời điểm xuất hiện suy giảm, hệ thống đã kích hoạt bơm để bổ sung, giúp đưa giá trị trở lại vùng ổn định mong muốn.

Photpho (P) và Kali (K): Hai thông số này được giữ ở mức cao và ổn định hơn, dao động quanh khoảng 780–820 mg/kg. Biểu đồ cho thấy các dao động nhỏ nhưng luôn nằm trong ngưỡng cho phép, chứng tỏ hệ thống phản ứng nhanh và hiệu quả khi có sai lệch.

Kiểm soát độ ẩm (H): Độ ẩm đất dao động trong khoảng 65,5–74%. Độ ẩm đất được duy trì trong vùng cài đặt, khi giá trị giảm, hệ thống kích hoạt bơm tưới và tự động ngắt khi đạt ngưỡng.

Kiểm soát pH: Giá trị pH được duy trì tương đối ổn định trong khoảng từ 6,1 đến 6,6. Các biến động được kiểm soát tốt, không xuất hiện sai lệch lớn, đảm bảo môi trường thuận lợi cho quá trình hấp thụ dinh dưỡng của cây trồng.

4.2. Thảo luận và đánh giá

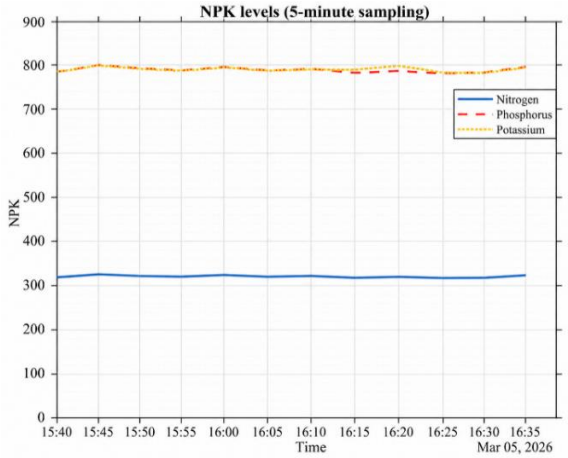
Từ kết quả thực nghiệm thu được, nhóm nghiên cứu đưa ra các đánh giá sau:

Độ chính xác của hệ thống điều khiển: Các biểu đồ cho thấy sự tương quan chặt chẽ giữa giá trị cảm biến và lệnh điều khiển bơm. Kết quả thực nghiệm cho thấy sai lệch giữa giá trị đo và giá trị đặt được duy trì ở mức tương đối nhỏ trong phạm vi khảo sát, cho thấy chương trình điều khiển PLC đáp ứng yêu cầu vận hành của mô hình thực nghiệm.

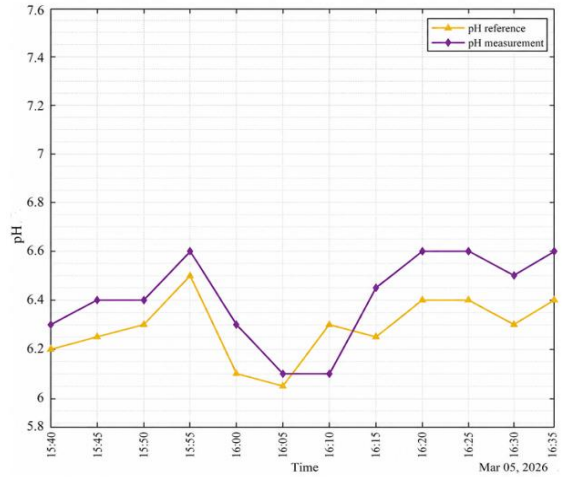
Khả năng đáp ứng thời gian thực: Hệ thống thể hiện khả năng phản ứng nhanh chóng với sự thay đổi của môi trường. Khi nồng độ dinh dưỡng hoặc độ ẩm giảm xuống dưới ngưỡng cài đặt, lệnh điều khiển được PLC thực hiện tương ứng, giúp hệ thống duy trì các thông số trong phạm vi cài đặt, đảm bảo cây trồng không bị rơi vào tình trạng thiếu hụt tài nguyên.

Tính ổn định và tin cậy: Việc kết hợp PLC (cho điều khiển tầng thấp) và IoT (cho giám sát tầng cao) tạo ra một hệ thống hoạt động ổn định. Đồ thị Pump Command cho thấy tần suất đóng ngắt hợp lý, không xảy ra hiện tượng dao động quá mức, giúp bảo vệ tuổi thọ của các thiết bị chấp hành (bơm, van).

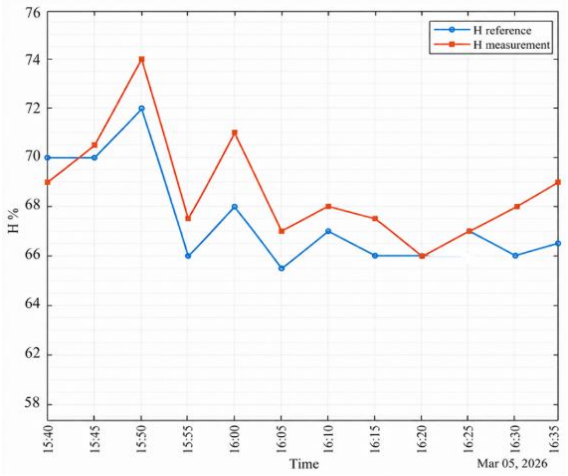
Hiệu quả ứng dụng: Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống có khả năng giảm sự phụ thuộc vào phương thức chăm sóc thủ công, hỗ trợ kiểm soát lượng nước tưới và dung dịch dinh dưỡng theo các ngưỡng cài đặt, đồng thời góp phần duy trì các điều kiện môi trường phù hợp cho cây trồng trong mô hình nông nghiệp công nghệ cao.



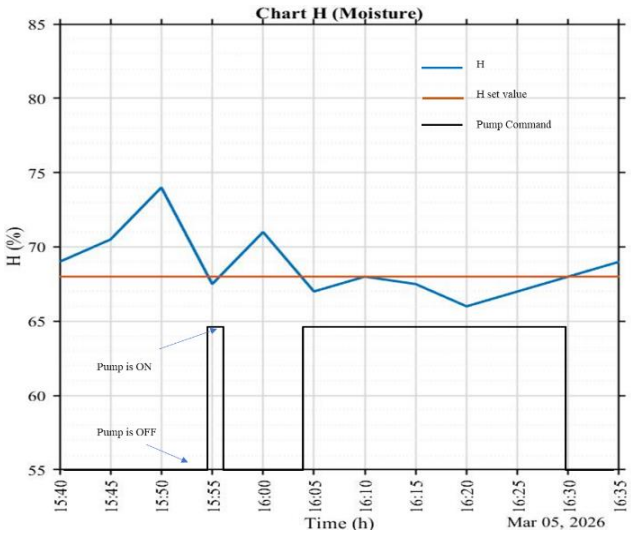
Hình 3. Diễn biến nồng độ N, P và K



Hình 4. Diễn biến nồng độ pH



Hình 5. Diễn biến độ ẩm H



Hình 6. Diễn biến độ ẩm H đo được và tín hiệu điều khiển bơm

4.3. Phân tích độ chính xác của hệ thống

Độ chính xác của hệ thống điều khiển dựa trên PLC và IoT được đánh giá dựa trên hai tiêu chuẩn kỹ thuật chính: sai số xác lập (steady-state error) và đặc tính đáp ứng thời gian thực của hệ thống.

Dựa trên kết quả thu thập từ các biểu đồ thực nghiệm, hệ thống cho thấy khả năng bám sát giá trị đặt (Set Value) ổn định. Sự khác biệt giữa các giá trị đo được và giá trị tham chiếu của pH và độ ẩm (H) nằm trong khoảng từ -0,2 đến 0,2 và -1 đến 3. Các sai số được tổng hợp và phân tích chi tiết như sau:

Về chỉ số pH: Kết quả cho thấy hệ thống có khả năng bám sát giá trị đặt với sai lệch trung bình chỉ ở mức 0,02. Chỉ số căn bậc hai của sai số bình phương trung bình (RMSE) đạt mức 0,17, cho thấy khả năng duy trì các điều kiện môi trường đất ổn định, phù hợp với quá trình sinh trưởng của cây trồng.

Về chỉ số độ ẩm (H): Độ ẩm được duy trì trong vùng giá trị đặt với sai lệch trung bình là 0,02. Chỉ số RMSE đạt 1,64, cho thấy bộ điều khiển PLC đã xử lý tốt các tín hiệu từ cảm biến, giảm thiểu nhiễu và duy trì độ ẩm trong vùng mục tiêu an toàn.

Về dinh dưỡng NPK: Hệ thống bám sát giá trị đặt với sai số thấp, hỗ trợ duy trì hàm lượng dinh dưỡng trong vùng cài đặt cho cây trồng trong suốt chu kỳ giám sát.

Độ chính xác của hệ thống còn được thể hiện qua mối tương quan giữa tín hiệu phản hồi từ cảm biến và lệnh điều khiển bơm (Pump Command):

Tính thời gian thực: Quan sát biểu đồ Pump Command cho thấy khi các giá trị đo vượt qua hoặc giảm xuống dưới ngưỡng cài đặt, tín hiệu điều khiển ON/OFF được kích hoạt tương ứng. Sự thay đổi của tín hiệu điều khiển theo các giá trị đo cho thấy bộ điều khiển tầng thấp có khả năng phản hồi phù hợp với điều kiện thực tế của mô hình. Đặc tính này được thể hiện tương tự đối với các thông số N, P, K và pH, qua đó cho thấy hệ thống đáp ứng phù hợp với yêu cầu điều khiển trong mô hình thực nghiệm.

Khả năng tự động duy trì giá trị trong vùng đặt: Hệ thống có khả năng tự động điều chỉnh trạng thái vận hành khi giá trị độ ẩm thay đổi. Khi độ ẩm đất (H) giảm xuống dưới ngưỡng 68%, hệ thống kích hoạt bơm tưới để bổ sung nước; khi độ ẩm đạt ngưỡng cài đặt, bơm được tự động ngắt, giúp duy trì độ ẩm trong vùng giá trị cài đặt.

Sự đồng bộ dữ liệu: Độ chính xác về mặt thông tin giữa tầng hiện trường (PLC) và tầng giám sát (IoT Dashboard) đạt mức cao.

$$e = y_i - \hat{y}_i \quad (6)$$

$$e\% = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} * 100\% \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (8)$$

Trong đó, e là sai lệch; e% là sai lệch trung bình; RMSE là căn bậc hai của sai số bình phương trung bình; y_i và giá trị tham chiếu tương ứng lần lượt là kết quả đo và kết quả tham chiếu thứ i; n là tổng số mẫu đo. Các chỉ số này được tính toán và tổng hợp trong Bảng 3.

Bảng 3. Giá trị RMSE của pH và độ ẩm (H)

Thông số	e	e%	RMSE
pH	-0,2 ÷ 0,2	0,02	0,17
H	-1 ÷ 3	0,02	1,64

4.4. Hệ thống cảnh báo

Hệ thống cảnh báo được xây dựng nhằm giám sát liên tục các thông số dinh dưỡng và môi trường, từ đó phát hiện kịp thời các sai lệch so với giá trị cài đặt và đưa ra thông báo phù hợp.

Nguyên lý hoạt động dựa trên việc so sánh các giá trị đo từ cảm biến (N, P, K và độ ẩm H) với ngưỡng cài đặt. Nếu các thông số nằm trong phạm vi cho phép, hệ thống duy trì trạng thái hoạt động bình thường. Ngược lại, khi phát hiện thông số thấp hơn ngưỡng, hệ thống sẽ kích hoạt cảnh báo tương ứng như thiếu Nitơ (N), Photpho (P), Kali (K) hoặc độ ẩm (H).

Thông tin cảnh báo được hiển thị trên giao diện giám sát (Web hoặc HMI), giúp người vận hành nhanh chóng nắm bắt tình trạng và có biện pháp xử lý phù hợp. Qua đó, hệ thống góp phần nâng cao hiệu quả kiểm soát dinh dưỡng và đảm bảo điều kiện tối ưu cho cây trồng.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và triển khai mô hình nông nghiệp thông minh tích hợp PLC và IoT, cho phép tự động thu thập, giám sát và điều khiển các thông số N, P, K, pH và độ ẩm đất. PLC thực hiện việc tiếp nhận dữ liệu từ cảm biến, so sánh với các giá trị đặt hoặc ngưỡng điều khiển và phát tín hiệu đến các cơ cấu chấp hành tương ứng. Hệ thống đồng thời kết hợp giao diện HMI và nền tảng Web/IoT, cho phép theo dõi các thông số và trạng thái thiết bị từ xa.

Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống có khả năng hoạt động ổn định trong quá trình canh tác rau cải xanh, đáp ứng các yêu cầu về thu thập dữ liệu, điều khiển cấp nước và cung cấp dinh dưỡng theo các điều kiện cài đặt. Việc kết hợp PLC với IoT cho phép mở rộng chức năng giám sát và hỗ trợ thuận tiện trong quá trình vận hành hệ thống.

Bên cạnh những kết quả đạt được, hệ thống vẫn phụ thuộc vào việc thu thập dữ liệu của cảm biến, chất lượng kết nối truyền thông và điều kiện vận hành thực tế. Trong các nghiên cứu tiếp theo, hệ thống có thể được mở rộng về số lượng cảm biến, cơ cấu chấp hành và chức năng giám sát; đồng thời cải thiện khả năng lưu trữ và phân tích dữ liệu nhằm đáp ứng các mô hình canh tác có quy mô và điều kiện khác nhau.

Nhìn chung, mô hình đề xuất cho thấy khả năng ứng dụng PLC và IoT trong tự động hóa thu thập dữ liệu, giám sát và điều khiển các thông số môi trường trong mô hình canh tác thông minh. Kết quả thực nghiệm là cơ sở để tiếp tục phát triển hệ thống theo hướng mở rộng quy mô, tăng cường khả năng lưu trữ và phân tích dữ liệu, cũng như tích hợp thêm các chức năng giám sát và điều khiển trong các nghiên cứu tiếp theo.

6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. Morchid, Z. Said, and H. Tairi, "Innovative applications of Internet of Things and machine learning in sustainable agricultural irrigation management: Benefits and challenges," *Smart Agric. Technol.*, vol. 13, p. 101661, 2026, doi: 10.1016/j.atech.2025.101661.

[2] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and E.-H. M. Aggoune, "Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129551–129583, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932609.

[3] A. Hasib and A. S. M. A. S. Akib, "An IoT-based smart plant monitoring and irrigation system with real-time environmental sensing, automated alerts, and cloud analytics," *arXiv preprint arXiv:2601.15830*, 2026, doi: 10.48550/arXiv.2601.15830.

[4] S. Sundaresan, S. D. Johnson, V. M. Bharathy, P. M. Kumar, and M. Surendar, "Machine learning and IoT-based smart farming for enhancing the crop yield," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2466, no. 1, p. 012028, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2466/1/012028.

[5] T. Miller, G. Mikiciuk, I. Durlik, M. Mikiciuk, A. Łobodzińska, and M. Śnieg, "The IoT and AI in agriculture: The time is now—A systematic review of smart sensing technologies," *Sensors*, vol. 25, no. 12, p. 3583, 2025, doi: 10.3390/s25123583.

[6] S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw, and M. J. Bogaardt, "Big data in smart farming—A review," *Agric. Syst.*, vol. 153, pp. 69–80, 2017, doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.

[7] M. N. Rahman *et al.*, "Soil characterization of watermelon field through Internet of Things: A new approach to soil salinity measurement," *arXiv preprint arXiv:2411.17731*, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2411.17731.

[8] N. Aisyah, E. D. Ulhaq, A. Dharmawan, and R. Purbakawaca, "Design of an IoT-based smart irrigation system using soil moisture sensors for water efficiency," *J. Online Phys.*, vol. 11, no. 1, pp. 89–97, 2025, doi: 10.22437/jop.v11i1.48928.