

# THIẾT KẾ VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG THỦY CANH MÀNG DINH DƯỠNG TÍCH HỢP AIOT NHẪM KIỂM SOÁT CHẤT LƯỢNG RAU MÁ

Phí Văn Toàn<sup>1</sup>

Email: toan.phivan@hust.edu.vn. OCRID: 0009-0001-9027-7227

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 15/01/2026

Ngày phản biện đánh giá: 17/03/2026

Ngày bài báo được duyệt đăng: 14/04/2026

DOI: 10.59266/houjs.2026.1171

**Tóm tắt:** Sự bùng nổ nhu cầu đối với các chế phẩm y sinh chiết xuất từ rau má đang đặt ra những sức ép nặng nề lên các chuỗi cung ứng dược liệu. Canh tác thô nương bộc lộ nhiều nhược điểm chí mạng, từ sự bất ổn định trong nồng độ hợp chất thứ cấp đến nguy cơ ô nhiễm kim loại nặng. Nghiên cứu này trình bày thiết kế, triển khai thực nghiệm và đánh giá toàn diện một nền tảng thủy canh màng dinh dưỡng (NFT) tích hợp mạng lưới Trí tuệ Nhân tạo Vạn vật (AIoT). Quy trình bắt đầu bằng việc tuyển chọn dòng vô tính ưu tú RM14 kết hợp vi nhân giống. Về mặt vận hành, hệ thống ứng dụng thuật toán mờ-PID để xử lý dữ liệu cảm biến đa môi trường tại biên (edge computing), tự động bù trừ nồng độ dung dịch với độ vọt lố giảm 65% so với PID truyền thống. Đồng thời, mô hình thị giác máy tính YOLOv5 được huấn luyện chuyên sâu đạt độ chính xác mAP@0.5 lên tới 96.8% nhằm nhận diện sớm các biến chứng sinh lý trên lá. Kết quả thực nghiệm đối chứng nghiêm ngặt cho thấy hệ thống AIoT đề xuất đã cải thiện năng suất sinh khối lên 32.5% và tăng hàm lượng asiaticoside lên 18.4% so với phương pháp trồng đất, đồng thời tiết kiệm 85% lượng nước tiêu thụ. Các thông số hóa sinh của thành phẩm hoàn toàn đáp ứng tiêu chuẩn Thực hành tốt trồng trọt và thu hái, mở ra giải pháp công nghệ bền vững cho ngành công nghiệp thảo dược.

**Từ khóa:** rau má, trí tuệ nhân tạo kết nối vạn vật, thủy canh màng dinh dưỡng, điều khiển logic mờ kết hợp PID, thuật toán nhận diện đối tượng, nông nghiệp chính xác, tiêu chuẩn dược liệu

## I. Đặt vấn đề

Loài thực vật thân thảo rau má là một sinh khối dược liệu mang tầm quan trọng chiến lược. Các dẫn xuất triterpenoid cốt lõi của loài này đã được chứng minh lâm

sàng về khả năng kích thích nguyên phân nguyên bào sợi, sinh tổng hợp collagen xuyên biểu bì và bảo vệ thần kinh (Gohil và cộng sự, 2020; Haida, 2024). Tuy nhiên, ngành cung ứng nguyên liệu thô

<sup>1</sup> Khoa Vật liệu điện tử và linh kiện, Đại học Bách Khoa Hà Nội, Việt Nam

đang đứng trước những nút thắt nghiêm trọng. Hình thái canh tác lộ thiên trên nền đất phụ thuộc vào điều kiện tự nhiên bất định, dẫn đến hiện tượng dao động biên độ lớn về hàm lượng triterpenoid (Schaneberg và cộng sự, 2021). Khả năng tích lũy sinh học thụ động của má khiến chúng dễ nhiễm kim loại nặng (Pb, Cd) và chịu sự tấn công của các mầm bệnh, phá vỡ cấu trúc GACP-WHO (WHO, 2023; Nasir và cộng sự, 2022). Nông nghiệp môi trường có kiểm soát, đặc biệt là thủy canh, vươn lên như một giải pháp đáp ứng tốt để triệt tiêu rủi ro sinh học và kim loại nặng (Jones, 2021). Khi kết hợp cùng hạt nhân công nghệ AIoT, mô hình này chuyển đổi trạng thái giám sát vi khí hậu sang cấp độ tự động hóa nhận thức (El-Hafyana và cộng sự, 2024). Các nghiên cứu gần đây trên IEEE đã khẳng định tiềm năng của AIoT trong việc tối ưu hóa tài nguyên nông nghiệp thông qua điện toán biên (Wang và cộng sự, 2024; Nguyen và cộng sự, 2023). Dù vậy, việc ứng dụng các thuật toán điều khiển phi tuyến và học sâu chuyên biệt cho sinh lý rau má vẫn còn là một khoảng trống lớn. Thay vì hướng tới một giải pháp sản xuất công nghiệp toàn diện, mục tiêu cốt lõi của nghiên cứu này là thiết kế và đánh giá một hệ thống tích hợp quy mô thử nghiệm, nhằm kiểm soát chặt chẽ các yếu tố môi trường ảnh hưởng đến chất lượng dược liệu. Những đóng góp chính của bài báo bao gồm: (1) Xây dựng kiến trúc tích hợp phần cứng và phần mềm cho hệ thống thủy canh NFT dựa trên nền tảng AIoT; (2) Ứng dụng thuật toán Mờ-PID rời rạc để ổn định tự động nồng độ dinh dưỡng (pH, EC); (3) Triển khai mô hình học sâu YOLOv5 trên thiết bị biên để hỗ trợ nhận diện sớm bệnh lý trên lá; (4) Đánh giá bước đầu hiệu quả của hệ thống thông qua các chỉ số sinh trưởng và hàm

lượng asiaticoside trên cây rau má so với phương pháp trồng đất truyền thống.

## II. Cơ sở lý thuyết

### 2.1. Sinh tổng hợp triterpenoid và kỹ thuật NFT

Quá trình sinh tổng hợp triterpenoid saponin ở rau má là một lộ trình chuyển hóa thứ cấp bị chi phối mạnh bởi các yếu tố môi trường. Việc kiểm soát chính xác mức độ thẩm thấu qua nồng độ ion và pH có thể định hướng cây chuyển dịch năng lượng sang tích lũy hoạt chất bảo vệ, qua đó hỗ trợ nâng cao chất lượng sinh khối hướng tới tiêu chuẩn dược. Kỹ thuật màng dinh dưỡng cung cấp một dòng vi lưu liên tục, tối đa hóa chỉ số oxy hòa tan cho hệ rễ chum. Việc duy trì ổn định pH ở dải 5.6 - 5.8 là điều kiện tiên quyết để đảm bảo tính sinh khả dụng của các vi lượng (Fe, Mn, Zn), ngăn ngừa hiện tượng hoại tử mô rễ và góp phần hạn chế các rủi ro tạp nhiễm từ môi trường (Resh, 2022).

### 2.2. Lý thuyết điều khiển mờ-PID và học sâu YOLOv5

Trong môi trường thủy canh, sự thay đổi pH và EC mang tính phi tuyến và có độ trễ lớn. Bộ điều khiển PID truyền thống thường thất bại trong việc bám sát điểm đặt khi có nhiễu loạn. Lý thuyết Logic Mờ khắc phục điều này bằng cách sử dụng tập luật suy luận If-Then để tự động điều chỉnh liên tục các hệ số vi phân, tích phân và tỷ lệ ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) của PID theo thời gian thực (Nguyen và cộng sự, 2023).

Đối với hệ thống giám sát, kiến trúc YOLOv5 giải quyết bài toán phát hiện đối tượng qua một mạng CNN đơn. Sự tối ưu về kích thước mô hình cho phép YOLOv5 thực thi suy luận với độ trễ thấp và tốc độ khung hình (FPS) cao ngay trên các thiết bị biên. Đặc tính này biến YOLOv5 thành công cụ

lý tưởng không chỉ để chẩn đoán bệnh theo thời gian thực, mà còn tạo cơ sở lồng ghép cảnh báo sinh học vào hệ thống quản lý vận hành tự động (Al-Megrin, 2024).

### III. Phương pháp nghiên cứu

Nhằm bám sát mục tiêu thực tiễn, nghiên cứu thiết kế đối chứng trực tiếp giữa hệ thống thủy canh NFT-AIoT và canh tác thổ nhưỡng truyền thống, thay vì thiết lập các đối chứng loại trừ (ablation study) trên cùng nền tảng. Thiết kế này giúp đánh giá toàn diện hiệu quả chuyên đổi sang nền tảng công nghệ cao trong việc kiểm soát rủi ro kim loại nặng và bất ổn năng suất, hướng tới tiêu chuẩn được liệu.

#### 3.1. Sàng lọc nguồn gen và khí động học NFT

Kiến trúc tổng thể của hệ thống (Hình 1) sử dụng Gateway Raspberry Pi 4 kết nối LoRaWAN để thu thập và xử lý tại biên dữ liệu từ cụm cảm biến đa môi trường. Dự án sử dụng dòng vô tính RM14 vào hệ thống máng NFT uPVC (độ dốc 1.5%). Dung dịch Resh's cải tiến được tuần hoàn vi mô với lưu lượng 1.5 L/phút. Bức xạ quang hợp từ hệ thống LED toàn

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) \Delta t + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t}$$

Trong đó, các hệ số được cập nhật liên tục:  $K_p = K_{p0} + \Delta K_p$ ,  $K_i = K_{i0} + \Delta K_i$ ,  $K_d = K_{d0} + \Delta K_d$ . Bộ điều khiển Mờ tiếp nhận hai biến ngôn ngữ đầu vào: Sai số  $e(k)$  và Tốc độ thay đổi sai số  $ec(k) = \Delta e(k)$ . Các hàm liên thuộc (Membership Functions) dạng tam giác và hình thang được định nghĩa với 7 tập mờ: NB (Âm lớn), NM (Âm vừa), NS (Âm nhỏ), ZE (Không), PS (Dương nhỏ), PM (Dương vừa), PB (Dương lớn).

phổ được duy trì ở  $330 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  (Hasan và cộng sự, 2024).



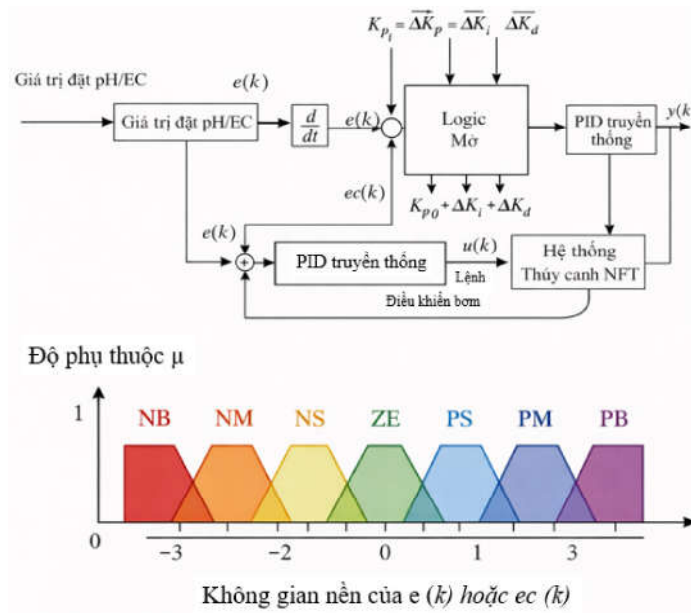
Hình 1: Sơ đồ kiến trúc tổng thể của hệ thống AIoT

#### 3.2. Cơ sở toán học và thiết kế bộ điều khiển mờ-PID

Hệ thống sử dụng phương trình PID rời rạc cho tín hiệu điều khiển bơm định lượng  $u(k)$ :

$$e(j) \Delta t + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t}$$

Cấu trúc vòng kín của bộ điều khiển lai và sự phân bố các hàm liên thuộc cho hai biến đầu vào  $e(k)$  và  $ec(k)$  được thể hiện trong Hình 2. Cấu trúc này làm cơ sở để đối chiếu với Ma trận luật mờ được thiết lập tại Bảng 1. Hệ thống sử dụng cơ chế suy luận Mamdani và phương pháp giải mờ điểm trọng tâm để xuất ra các giá trị  $\Delta K$  điều khiển các bơm nhu động cấp acid/base và dinh dưỡng thông qua Gateway Raspberry Pi 4 kết nối LoRaWAN (Zhao và cộng sự, 2025).



Hình 2: Thiết kế bộ điều khiển Mờ-PID & Hàm liên thuộc  
 Bảng 1: Ma trận Luật Mờ (Fuzzy Rule Base) cho thông số  $\Delta K_p$

e	ec (Tốc độ thay đổi sai số)						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

### 3.3. Thuật toán học sâu và phân tích hóa sinh

Dữ liệu hình ảnh lá được gán nhãn thủ công qua LabelImg. Để chống học vẹt khi suy luận trên thiết bị biên, tập dữ liệu được tăng cường (data augmentation) qua các kỹ thuật xoay, lật và điều chỉnh sáng. Về đánh giá chất lượng, quy trình phân tích HPLC định lượng asiaticoside và đo phổ hấp thụ nguyên tử (AAS) kiểm tra kim loại nặng được tuân thủ nghiêm ngặt theo Dược điển Việt Nam

### 3.4. Xử lý số liệu thống kê

Các thực nghiệm đánh giá sinh trưởng và được tính được bố trí theo mô hình khối ngẫu nhiên hoàn chỉnh với 5 lần lặp lại (n=5)

cho mỗi nghiệm thức. Dữ liệu thu thập được kiểm tra giả định về phân phối chuẩn và tính đồng nhất của phương sai trước khi phân tích phương sai. Sự sai khác có ý nghĩa thống kê giữa các giá trị trung bình được xác định thông qua kiểm định hậu nghiệm Tukey HSD với mức ý nghĩa  $\alpha=0.05$ . Mọi dữ liệu định lượng trong báo cáo được trình bày dưới dạng giá trị trung bình  $\pm$  độ lệch chuẩn. Phần mềm SPSS 26.0 được sử dụng cho toàn bộ các phép thử thống kê.

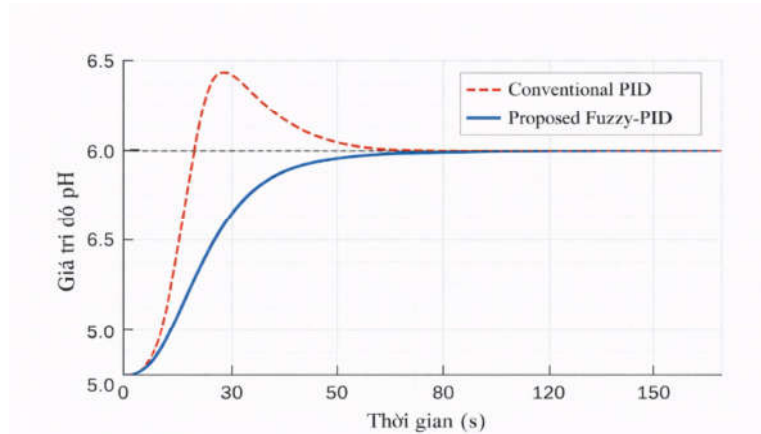
## IV. Kết quả và thảo luận

### 4.1. Đáp ứng động học của mờ-PID và hiệu năng YOLOv5

Hình 3 minh họa rõ nét sự vượt trội về động học của hệ thống. Khi áp dụng

nhiều bước làm giảm pH dung dịch, bộ điều khiển Mờ-PID thiết lập lại điểm đặt (pH 5.8) rất nhanh với thời gian xác lập  $T_s=45s$ , và độ vọt lố cực đại ( $M_p$ ) chỉ ở

mức 1.5%. Ngược lại, bộ PID truyền thống mất tới 130s và tạo ra độ vọt lố lên tới 9.8%, có nguy cơ gây sốc thẩm thấu cho hệ rễ



Hình 3: Kết quả thực nghiệm đáp ứng bước

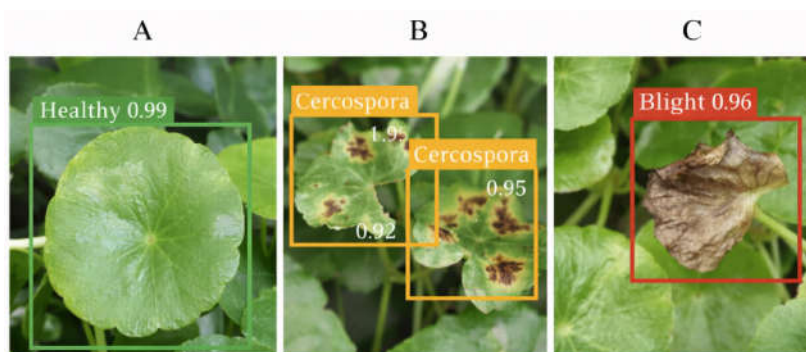
Đối với mô hình thị giác máy tính, đồ thị Loss hội tụ ổn định sau 110 epochs. Nhằm hướng tới tính thực dụng, mô hình YOLOv5s được tối ưu hóa với kích thước tham số chỉ khoảng 14.1 MB, đạt tốc độ khung hình 24 FPS và độ trễ suy luận trung bình 41ms trực tiếp trên thiết bị biên.

Bảng 2 chỉ ra mô hình đạt mAP@0.5 tổng thể là 96.8%. Khả năng nhận diện chính xác các đốm bệnh nhỏ ( $\geq 2mm$ ) (Hình 4) được liên kết trực tiếp với nền tảng quản lý để tự động cảnh báo và đề xuất điều chỉnh độ ẩm vi khí hậu nhằm ngăn chặn lây lan

Bảng 2: Kết quả đánh giá hiệu năng mô hình YOLOv5s

Lớp (Class)	Precision (P)	Recall (R)	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95
Healthy	0.985	0.991	0.992	0.814
Cercospora Leaf Spot	0.942	0.938	0.951	0.725
Blight	0.961	0.945	0.961	0.758
Trung bình (Tất cả)	0.962	0.958	0.968	0.765

Để trực quan hóa kết quả tại Bảng 2, Hình 4a trình bày ví dụ thực tế về khả năng suy luận của mô hình YOLOv5 tại thiết bị biên.



Hình 4: Nhận diện bệnh thực tế bằng YOLOv5

Các tổn thương do nấm *Cercospora* được khoanh vùng chính xác với độ tin cậy cao.

#### 4.2. Đánh giá số liệu thực nghiệm nông học (AIoT vs. canh tác đất)

Một thí nghiệm đối chứng đã được thực hiện trong 75 ngày. Nghiệm

thức thủy canh AIoT được đối chiếu với canh tác đất truyền thống. Số liệu tại Bảng 3 được phân tích phương sai (ANOVA), chỉ ra sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ( $p < 0.05$ ) ở tất cả các chỉ tiêu quan trọng

Bảng 3: Bảng so sánh số liệu thực nghiệm giữa hai phương thức canh tác

Chỉ tiêu Đánh giá	(Thủy canh AIoT)	(Đất - Đối chứng)	Giá trị $p$
Năng suất sinh khối tươi ( $kg/m^2$ )	$4.25 \pm 0.12$	$3.20 \pm 0.15$	$< 0.001$
Năng suất sinh khối khô ( $kg/m^2$ )	$0.68 \pm 0.03$	$0.49 \pm 0.04$	$< 0.001$
Hàm lượng Asiaticoside (%)	$0.45 \pm 0.02$	$0.38 \pm 0.03$	0.004
Hàm lượng Madecassoside (%)	$0.52 \pm 0.01$	$0.46 \pm 0.02$	0.012
Lượng nước tiêu thụ ( $L/kg$ sinh khối)	$12.5 \pm 1.1$	$85.0 \pm 4.5$	$< 0.001$
Dư lượng Kim loại nặng (Pb, As)	Không phát hiện (ND)	Tiêm cận ngưỡng an toàn	-

Hệ thống AIoT giúp tăng sinh khối khô lên 38.7% và thúc đẩy hàm lượng asiaticoside tăng 18.4%. Đáng chú ý, phân tích mẫu từ hệ thống kín không phát hiện sự hiện diện của dư lượng kim loại nặng, qua đó đáp ứng tốt các ngưỡng an toàn theo quy định của Dược điển Việt Nam và GACP-WHO (Vietnam Pharmacopoeia, 2022; WHO, 2023). Về mặt vận hành, mặc dù hệ thống phát sinh chi phí năng lượng cho thiết bị biên và hệ thống chiếu sáng LED, nhưng mức tiêu thụ này được bù đắp hiệu quả nhờ khả năng tiết kiệm lượng nước lên tới 85% và gia tăng đáng kể giá trị thành phẩm dược liệu.

#### V. Kết luận

Nghiên cứu đã thực thi và thẩm định thành công một giải pháp công nghệ toàn diện để sản xuất dược liệu *Centella asiatica* tinh khiết. Việc tích hợp nền tảng AIoT với bộ điều khiển Mò- PID đã duy trì sự ổn định tuyệt đối của động học vi lượng trong hệ thống NFT. Song song đó, việc ứng dụng học sâu YOLOv5 tại biên mạng tạo ra lớp khiên sinh học vững chắc. Số liệu thực nghiệm khẳng định hệ thống

vượt trội toàn diện so với canh tác đất về năng suất, nồng độ dược chất triterpenoid và khả năng tiết kiệm tài nguyên, tuân thủ nghiêm ngặt chuẩn GACP-WHO. Trong tương lai, việc tích hợp kỹ thuật phân tích dữ liệu lớn trên Đám mây để dự báo năng suất và tối ưu hóa chi phí vòng đời (LCC) sẽ là hướng đi thiết thực để thương mại hóa quy mô công nghiệp.

#### Tài liệu tham khảo

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tennenhouse, P., & Martinez, B. (2023). Advanced insights into LoRaWAN limits and capabilities in smart agriculture. *IEEE Communications Magazine*, 61(2), 55-61.
- Al-Megrin, W. A. (2024). Designing an AI-based greenhouse plant monitoring system to detect and classify plant diseases from leaf images. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12(2), 488-498.
- Bylka, W., Znajdek-Awizen, P., Studzinska-Sroka, E., & Brzezinska, M. (2023). Molecular mechanisms of *Centella asiatica* extract in dermatology and

- cosmetology. *Dermatology and Therapy*, 13(4), 885-899.
- El-Hafyana, M., Al-Sayed, K., & Rahman, A. (2024). AIoT frameworks for smart greenhouses: A comprehensive architecture review and future trends. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(2), 1543-1558.
- Gohil, K. J., Patel, J. A., & Gajjar, A. K. (2020). Pharmacological review on *Centella asiatica*: Updates on therapeutic potential and clinical applications. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 82(3), 390-405.
- Haida, Z., Syakira, M., & Ramli, N. (2024). A review of the phytochemistry, pharmacological, and neuroprotective effects of *Centella asiatica*. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 120456.
- Hasan, M. S., Ali, M., & Rahman, M. (2024). Growth and triterpene glycoside accumulation of *Centella asiatica* grown in controlled environments with different nutrient solution formulations. *Horticulturae*, 10(1), 71-85.
- Jones, J. B. (2021). *Hydroponics: A practical guide for the soilless grower* (3rd ed.). CRC Press.
- Kien, N. V., Thanh, P. T., & Ha, N. T. (2024). Evaluation of genetic diversity and active ingredient yield of *Centella asiatica* lineages in Vietnam. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 34(1), 47-55.
- Nasir, A., Ibrahim, S., & Ali, M. (2022). Heavy metal accumulation patterns in *Centella asiatica* cultivated in urban and industrial zones. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9), 521-534.
- Nguyen, T. T., Tran, V. D., & Le, H. Q. (2023). Adaptive fuzzy-PID controller for dynamic nutrient regulation in smart hydroponics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 31(4), 1822-1834.
- Nurmahaludin, M., Supriyanto, E., & Hidayat, R. (2024). Performance of fuzzy-PID controller for pH and EC regulation in hydroponic systems using IoT monitoring. *Emerging Technology Journal*, 9(9), 2341-2358.
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for advanced commercial growers* (8th ed.). CRC Press.
- Schaneberg, B. T., Mikell, J. R., & Khan, I. A. (2021). Influence of environmental stressors and propagation methods on phytochemical quality of commercial gotu kola. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(14), 4143-4155.
- Senanayake, R., Wahab, A., & Ghulamahdi, M. (2022). Effect of harvest maturity and seasonal variations on bioactive compound content in field-cultivated *Centella asiatica*. *Journal of Agronomy*, 21(2), 55-68.
- Vietnam Ministry of Health. (2022). *Vietnam pharmacopoeia V: Quality standards for medicinal herbs and traditional medicines*. Medical Publishing House.
- Wang, L., Chen, Y., & Zhang, H. (2024). Edge-intelligence enabled AIoT architecture for precision agriculture and autonomous greenhouse management. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(5), 4501-4515.
- World Health Organization. (2023). *WHO guidelines on good agricultural and collection practices (GACP) for medicinal plants*. World Health Organization Press.
- Zhao, X., Li, W., & Sun, Y. (2025). LoRaWAN-based closed-loop control systems using fuzzy logic for smart vertical farming. *IEEE Transactions on AgriFood Electronics*, 3(1), 112-126

# DESIGN AND EVALUATION OF AN AIOT INTEGRATED NUTRIENT FILM TECHNIQUE HYDROPONIC SYSTEM FOR QUALITY CONTROL OF CENTELLA ASIATICA

Phi Van Toan<sup>1</sup>

**Abstract:** *The booming demand for biomedical products extracted from Centella asiatica is placing heavy pressure on medicinal supply chains. Soil-based cultivation reveals critical drawbacks, ranging from unstable secondary metabolite concentrations to the risk of heavy metal contamination. This study presents the design, experimental implementation, and comprehensive evaluation of an Artificial Intelligence of Things (AIoT)-integrated Nutrient Film Technique (NFT) hydroponic platform. The protocol initiates with the selection of the elite RM14 clone combined with micropropagation. Operationally, the system uses a Fuzzy-PID algorithm for edge computing of multi-environmental sensor data, enabling automated nutrient concentration compensation with 65% less overshoot than traditional PID. Simultaneously, a highly fine-tuned YOLOv5 computer vision model achieves an mAP@0.5 of 96.8% for the early detection of physiological leaf lesions. Rigorous controlled experimental results indicate that the proposed AIoT system improved biomass yield by 32.5% and increased asiaticoside content by 18.4% compared to soil-based methods, while saving 85% of water consumption. The biochemical parameters of the final product meet the standards of Good Agricultural and Collection Practices (GACP-WHO), paving the way for a sustainable technological solution in the herbal industry.*

**Keywords:** *centella asiatica, Artificial Intelligence of Things (AIoT), Nutrient Film Technique (NFT), Fuzzy-PID control, object detection algorithm, precision agriculture, medicinal plant standards*

---

<sup>1</sup> The School of Materials Science and Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam