



DOI:10.22144/ctujos.2026.106

PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG ROBOT DI ĐỘNG GIÁM SÁT MÔI TRƯỜNG ĐA THAM SỐ THEO THỜI GIAN THỰC

Trần Văn Lực*, Nguyễn Thị Cẩm Tú và Trần Thanh Toàn

Trường Cao đẳng Cộng đồng Đồng Tháp, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): tvluc@dtcc.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 12/08/2025

Sửa bài (Revised): 04/09/2025

Duyệt đăng (Accepted): 17/04/2026

Title: Development of a real-time multi-parameter environmental monitoring mobile robot system

Author(s): Tran Van Luc*, Nguyen Thi Cam Tu and Tran Thanh Toan

Affiliation(s): Dong Thap Community College, Viet Nam

TÓM TẮT

Quá trình thiết kế và triển khai một hệ thống giám sát chất lượng không khí đa tham số theo thời gian thực, kết hợp giữa các cảm biến môi trường giá thành thấp và công nghệ truyền thông không dây được giới thiệu trong bài báo. Hệ thống được xây dựng trên nền tảng vi điều khiển, hỗ trợ thu thập, xử lý và truyền dữ liệu linh hoạt trong nhiều điều kiện môi trường khác nhau, bao gồm không gian trong nhà nhiều vật cản và khu vực ngoài trời rộng mở. Các kết quả thử nghiệm thực tế cho thấy hệ thống đạt độ ổn định cao trong kết nối, tỉ lệ mất gói dưới 1%, khả năng hiển thị trực quan và đồng bộ dữ liệu lên máy chủ. Với kiến trúc mở và khả năng mở rộng linh hoạt, giải pháp này có tiềm năng ứng dụng trong các mô hình đô thị thông minh, khu công nghiệp và các hệ thống nông nghiệp chính xác tại Việt Nam và các quốc gia đang phát triển.

Từ khóa: Cảm biến không khí, giám sát môi trường, hệ thống nhúng, IoT, Wi-Fi

ABSTRACT

This paper presents the design and implementation of a real-time multi-parameter air quality monitoring system that integrates low-cost environmental sensors with wireless communication technologies. The system is built on the microcontroller platform, enabling flexible data acquisition, processing, and transmission in various environmental conditions, including indoor areas with signal obstructions and wide outdoor spaces. Experimental results demonstrate high connection stability, a packet loss rate below 1%, and effective data visualization and data server synchronization. With its open architecture and scalable design, the proposed solution is well-suited for deployment in smart urban areas, industrial zones, and precision agriculture systems in Vietnam and other developing countries.

Keywords: Environmental monitoring, air sensors, Wi-Fi, embedded system, IoT

1. GIỚI THIỆU

Giám sát môi trường đóng vai trò then chốt trong việc thu thập và phân tích dữ liệu liên quan đến các

thông số như nhiệt độ, độ ẩm, chất lượng không khí và nồng độ khí theo thời gian (Aboughaly & Fattah, 2023; Imam et al., 2024; Tahir et al., 2024; Verma et al., 2024). Việc giám sát định kỳ các tham số này

là nền tảng để đảm bảo quản lý môi trường hiệu quả, hướng tới phát triển bền vững (Essamlali et al., 2024; Saxena, 2025). Tuy nhiên, các phương pháp giám sát thủ công truyền thống thường tốn kém nhân lực, mất nhiều thời gian và có thể tiềm ẩn nguy cơ cho sức khỏe con người, đặc biệt trong các khu vực độc hại hoặc điều kiện khắc nghiệt (Nazarov et al., 2024; Mahammedi et al., 2025). Do đó, nhu cầu phát triển các hệ thống giám sát môi trường tự động, từ xa và có khả năng phân tích thông minh ngày càng trở nên cấp thiết.

Trong thời gian gần đây, nhiều nghiên cứu đã khai thác tiềm năng của giám sát di động (mobile monitoring) như một giải pháp bổ sung hoặc thay thế cho các hệ thống giám sát cố định. So với hệ thống truyền thống dựa trên trạm đo tĩnh, các nền tảng giám sát di động như robot, UAV hay xe tự hành có ưu thế vượt trội về tính linh hoạt, khả năng bao phủ không gian rộng và cung cấp dữ liệu có độ phân giải không gian cao (Junaedy et al., 2023; Kwe & Priyadarshini, 2024). Các so sánh gần đây giữa hệ thống giám sát cố định và di động cho thấy cách tiếp cận kết hợp hai loại hình có thể mang lại cái nhìn toàn diện hơn về biến động môi trường đô thị, từ cấp độ cục bộ (microclimate) đến toàn thành phố (urban scale) (Siddique et al., 2024).

Bên cạnh khả năng thu thập dữ liệu, việc phân tích thông tin theo thời gian thực đóng vai trò quan trọng để nâng cao giá trị ứng dụng. Các nghiên cứu tích hợp machine learning, edge computing hoặc các mô hình dự đoán vào hệ thống giám sát môi trường đã chứng minh khả năng phát hiện bất thường, phân loại nguồn ô nhiễm và dự báo xu hướng biến động môi trường (Luperto et al., 2023; Zhang et al., 2023). Tuy vậy, phần lớn các hệ thống hiện nay vẫn dừng lại ở mức hiển thị dữ liệu thô hoặc biểu đồ thời gian thực, chưa khai thác tối đa tiềm năng của các thuật toán phân tích nâng cao.

Về phần cứng, vi điều khiển ESP32 được xem là lựa chọn tối ưu nhờ ưu điểm về tiết kiệm năng lượng, chi phí thấp và khả năng tích hợp Wi-Fi/Bluetooth cùng nhiều chân I/O. Các nghiên cứu gần đây về energy-efficient ESP32-based IoT systems cho thấy thiết bị này phù hợp cho các ứng dụng IoT quy mô nhỏ đến trung bình, đồng thời hỗ trợ truyền dữ liệu tức thì lên nền tảng đám mây mà

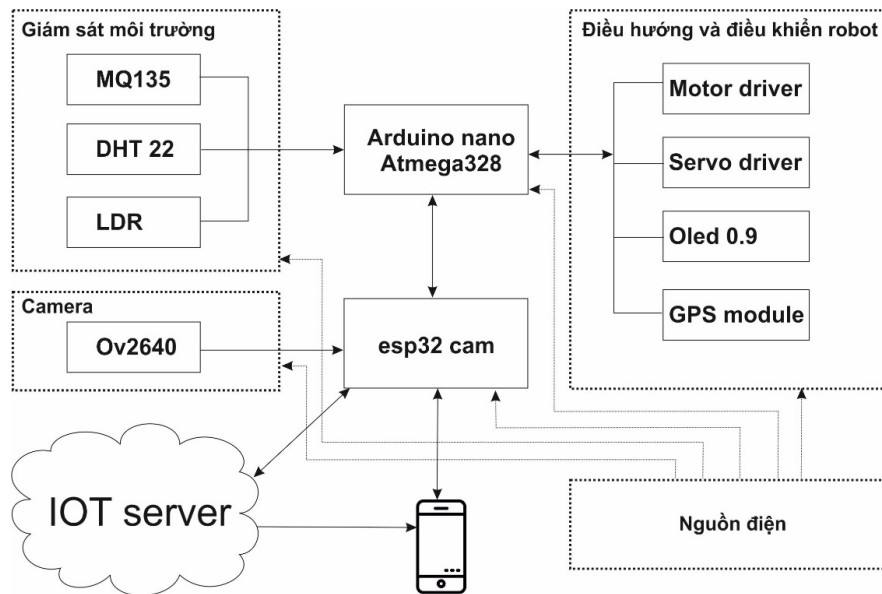
không làm tiêu hao nhiều năng lượng (El-Khozondar et al., 2024). Điều này lý giải việc ESP32 ngày càng được ưa chuộng trong các mô hình giám sát môi trường.

Trong bối cảnh đó, một hệ thống giám sát môi trường đa tham số tích hợp robot di động, cảm biến môi trường, vi điều khiển ESP32 và hệ thống điều khiển từ xa được đề xuất. Giải pháp không chỉ cho phép thu thập dữ liệu chính xác theo thời gian thực mà còn hỗ trợ định vị GPS, hiển thị trực quan thông qua màn hình OLED và đồng bộ dữ liệu lên nền tảng đám mây. Đặc biệt, định hướng phát triển trong tương lai bổ sung các thuật toán học máy nhằm phát hiện bất thường và dự báo xu hướng, từ đó nâng cao giá trị khoa học cũng như hiệu quả ứng dụng thực tiễn của hệ thống trong giám sát môi trường thông minh.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tổng quan về thiết kế hệ thống

Hệ thống robot giám sát môi trường được phát triển với cấu trúc tổng thể bao gồm năm khối chức năng chính, tích hợp chặt chẽ giữa phần cứng và phần mềm nhằm đảm bảo khả năng giám sát thời gian thực và truyền thông hiệu quả (Angelini et al., 2023; Halder & Afsari, 2023). Như minh họa trong Hình 1, hệ thống bao gồm các cảm biến môi trường đảm nhận nhiệm vụ thu thập dữ liệu liên quan đến nhiệt độ, độ ẩm, ánh sáng và chất lượng không khí (CO₂, bụi mịn, các khí độc hại). Tín hiệu đầu ra từ các cảm biến được đưa vào bộ vi điều khiển trung tâm, nơi thực hiện chức năng xử lý sơ cấp, quản lý dữ liệu và điều khiển hoạt động tổng thể của robot. Vi điều khiển này đồng thời quản lý mô-đun định vị GPS để cung cấp thông tin vị trí theo thời gian thực và giao tiếp với mô-đun hiển thị OLED nhằm trình bày dữ liệu tại chỗ. Ngoài ra, hệ thống còn tích hợp mô-đun kết nối không dây Wi-Fi, cho phép truyền tải dữ liệu đã xử lý lên nền tảng đám mây phục vụ cho việc giám sát từ xa. Kiến trúc này phản ánh tính linh hoạt và khả năng mở rộng của các ứng dụng Internet of Things (IoT) trong lĩnh vực giám sát môi trường thông minh, đặc biệt phù hợp với các yêu cầu về chi phí thấp và tính cơ động cao trong các môi trường triển khai khác nhau. Song song đó, khối camera tích hợp, cho phép robot thu thập dữ liệu hình ảnh hoặc video từ môi trường xung quanh.



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống robot giám sát môi trường

Khối điều hướng và điều khiển robot đảm nhiệm chức năng quản lý chuyển động và định vị không gian của hệ thống robot. Thành phần này tích hợp mạch điều khiển động cơ (Motor Driver) và mạch điều khiển servo (Servo Driver) nhằm điều khiển chính xác các cơ cấu truyền động, bao gồm chuyển động của robot và điều chỉnh góc quay của cụm camera phục vụ giám sát. Ngoài ra, khối này còn được trang bị một màn hình hiển thị trạng thái để cung cấp thông tin hoạt động tại chỗ, cũng như một mô-đun GPS cho phép xác định vị trí địa lý của robot theo thời gian thực. Tất cả các thành phần trong khối đều được điều phối thông qua vi điều khiển Arduino Nano, đảm bảo khả năng điều hướng và điều khiển được thực thi chính xác, ổn định và có độ phản hồi cao trong môi trường vận hành.

Trung tâm giao tiếp và xử lý của hệ thống là vi điều khiển ESP32-CAM, đóng vai trò then chốt trong việc tích hợp và truyền tải dữ liệu. ESP32-CAM tiếp nhận các tín hiệu từ Arduino Nano, bao gồm dữ liệu từ các cảm biến môi trường và thông tin định vị từ mô-đun GPS, đồng thời trực tiếp xử lý dữ liệu hình ảnh thu nhận từ cụm camera tích hợp. Với khả năng tích hợp kết nối Wi-Fi và Bluetooth, ESP32-CAM hoạt động như một cổng giao tiếp chính giữa hệ thống phần cứng và nền tảng đám mây hoặc máy chủ, cho phép truyền dữ liệu thu thập được đến hệ thống lưu trữ và phân tích từ xa một cách hiệu quả. Bên cạnh đó, kết nối Wi-Fi tạo điều kiện cho việc điều khiển robot trực tiếp bằng thiết bị di động hoặc PC. Cuối cùng, khối nguồn điện cung cấp dòng điện ổn định cho toàn bộ hệ thống, bảo đảm

duy trì hoạt động liên tục và tin cậy của các thành phần phần cứng. Nhìn chung, thiết kế này thể hiện một giải pháp tích hợp toàn diện cho hệ thống robot giám sát môi trường, kết hợp hiệu quả giữa năng lực thu thập dữ liệu đa cảm biến, khả năng di chuyển thông minh và kết nối IoT, góp phần nâng cao hiệu quả giám sát môi trường từ xa.

2.2. Cấu tạo phần cứng robot

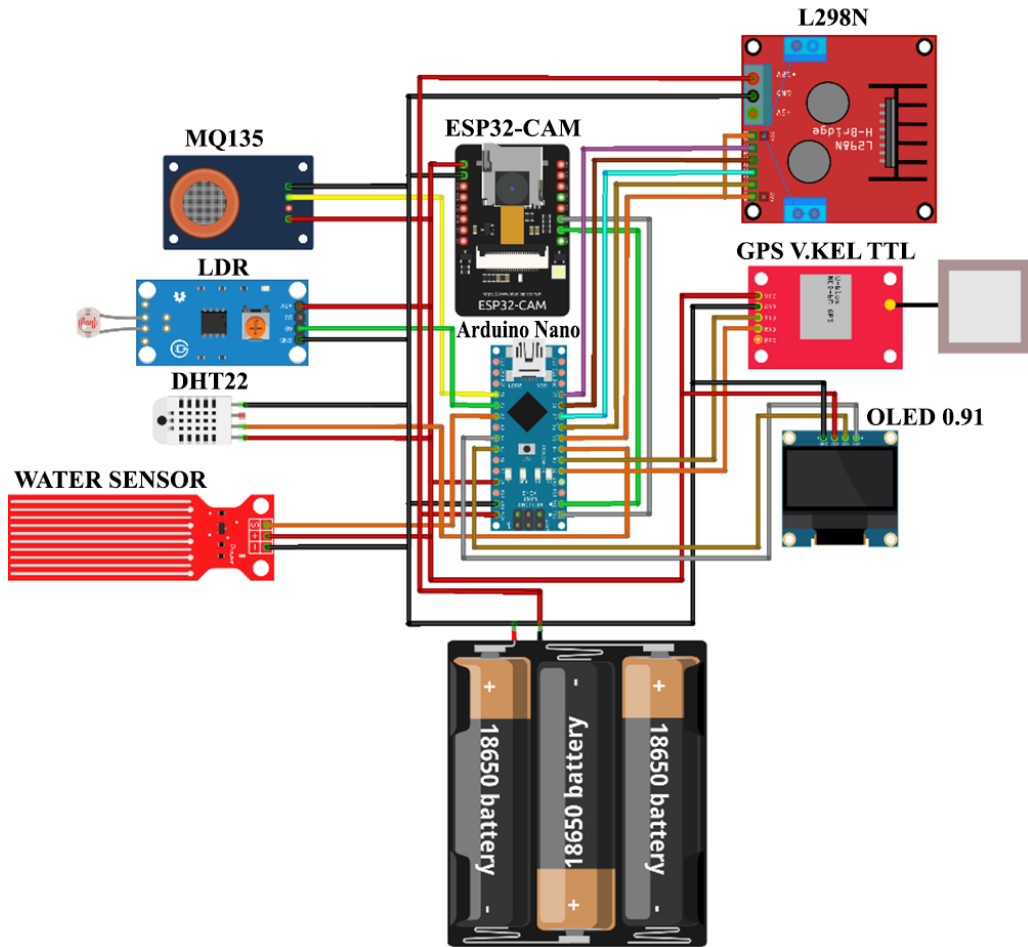
Kiến trúc tổng thể của robot giám sát môi trường được trình bày trong Hình 2, minh họa sự tích hợp giữa các thành phần IoT và phần cứng nhằm đảm bảo khả năng thu thập dữ liệu, xử lý tín hiệu, truyền thông và điều khiển linh hoạt. Cụ thể, vi điều khiển Arduino Nano chịu trách nhiệm thu thập và xử lý sơ bộ dữ liệu từ các cảm biến môi trường, trong khi ESP32-CAM thực hiện chức năng ghi nhận hình ảnh thời gian thực và đóng vai trò như một nút giao tiếp chính nhờ tích hợp kết nối Wi-Fi.

Nguồn cấp cho toàn hệ thống được đảm bảo thông qua mạch ổn áp IC 7805, giúp duy trì mức điện áp 5 V ổn định cho các mô-đun vi điều khiển và cảm biến. Khả năng di chuyển của robot được điều khiển bởi hai động cơ DC kết hợp với mạch cầu H L298, cho phép thực hiện các thao tác cơ bản như tiến, lùi, rẽ trái hoặc rẽ phải. Các lệnh điều khiển được gửi từ thiết bị di động thông qua ứng dụng Metter, sử dụng giao tiếp Wi-Fi với ESP32-CAM, từ đó hỗ trợ điều khiển robot từ xa một cách hiệu quả.

Các thành phần phần cứng cốt lõi trong hệ thống robot giám sát môi trường bao gồm vi điều khiển

ESP32-CAM và Arduino Nano, trong đó ESP32-CAM đóng vai trò là nút truyền thông trung tâm. ESP32-CAM là một vi điều khiển chi phí thấp, tiêu thụ điện năng thấp, được tích hợp Wi-Fi và Bluetooth, sử dụng bộ xử lý lõi kép 2.4 GHz dựa trên công nghệ TSMC 40 nm, hỗ trợ đầy đủ giao thức TCP/IP và mô hình truyền thông client-server. Thiết bị này tích hợp sẵn camera OV2640, cho phép truyền dữ liệu hình ảnh theo thời gian thực từ robot về hệ thống giám sát từ xa.

Trong khi đó, Arduino Nano đảm nhiệm chức năng xử lý sơ bộ tín hiệu từ các cảm biến môi trường, bao gồm cảm biến đo nhiệt độ – độ ẩm, cảm biến chất lượng không khí (đặc biệt là nồng độ bụi mịn và khí độc hại) và cảm biến cường độ ánh sáng. Sau khi xử lý, dữ liệu được chuyển tiếp đến ESP32-CAM để truyền lên máy chủ IoT. Hệ thống còn tích hợp mô-đun định vị GPS, cho phép cung cấp thông tin tọa độ địa lý (vĩ độ và kinh độ) theo thời gian thực, hỗ trợ hiệu quả cho việc giám sát và theo dõi vị trí của robot trong môi trường hoạt động.



Hình 2. Sơ đồ mạch của hệ thống

Về mặt cơ khí, việc điều hướng được thực hiện thông qua hai động cơ DC, điều khiển bằng bộ điều khiển cầu H (L298), cho phép robot thực hiện các thao tác di chuyển tiến, lùi, rẽ trái và rẽ phải dựa trên tín hiệu điều khiển từ ứng dụng điều khiển từ xa thông qua kết nối Wi-Fi. Toàn bộ hệ thống hoạt động ổn định ở mức điện áp 5 V, được cung cấp thông qua mạch ổn áp sử dụng IC 7805. Các chân nối đất (GND) của các module được kết nối chung

để đảm bảo độ ổn định về điện trong toàn hệ thống. Đặc biệt, ESP32-CAM còn được tích hợp bộ chuyển đổi tương tự – số (ADC), hỗ trợ hiệu quả việc chuyển đổi tín hiệu cảm biến sang dạng số trước khi truyền đi.

Kết quả ở Bảng 1 cho thấy chi tiết cấu hình phần cứng của hệ thống robot giám sát môi trường được đề xuất. Thiết kế sử dụng kiến trúc vi điều khiển kép, kết hợp giữa ESP32-CAM và Arduino Nano

(ATmega328P), nhằm nâng cao hiệu quả xử lý dữ liệu tại chỗ và tối ưu hóa khả năng truyền thông không dây trong các điều kiện hoạt động thực tế. ESP32-CAM đóng vai trò thu nhận hình ảnh và truyền phát dữ liệu thời gian thực, trong khi Arduino Nano chịu trách nhiệm thu thập và xử lý dữ liệu từ các cảm biến môi trường trước khi chuyển tiếp đến ESP32-CAM.

Hệ thống sử dụng tổ hợp cảm biến đa thông số gồm DHT22 (đo nhiệt độ và độ ẩm), MQ135 (giám sát chất lượng không khí và phát hiện khí độc hại),

và LDR (đo cường độ ánh sáng), nhằm đảm bảo khả năng thu thập dữ liệu toàn diện phục vụ giám sát môi trường. Mô-đun định vị GPS V.KEL TTL được tích hợp để cung cấp thông tin vị trí địa lý với độ chính xác cao. Về cơ cấu chuyển động, hệ thống sử dụng hai động cơ DC điều khiển thông qua mạch cầu H L298N, giúp robot di chuyển linh hoạt theo tín hiệu điều khiển. Toàn bộ hệ thống được cấp nguồn bằng pin 12 V, với mạch ổn áp IC 7805 để chuyển đổi và duy trì điện áp đầu ra 5 V ổn định cho các thành phần điện tử.

Bảng 1. Cấu hình phần cứng của hệ thống robot

Thành phần	Mô tả chức năng	Thông số chính
ESP32-CAM	Vi điều khiển chính, truyền dữ liệu cảm biến, điều khiển động cơ, truyền hình ảnh thời gian thực	CPU lõi kép 2,4 GHz, Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4,2, Flash 4 MB, Camera OV2640
Arduino Nano (ATmega328P)	Xử lý sơ bộ dữ liệu từ cảm biến, giao tiếp với ESP32-CAM	8-bit AVR, xung nhịp 16 MHz, 14 chân I/O số, 8 kênh ADC 10-bit
DHT22	Đo nhiệt độ và độ ẩm	Nhiệt độ: -40°C → +80°C (±0,5°C), Độ ẩm: 0–100%RH (±2%RH)
MQ135	Phát hiện khí độc hại và bụi mịn trong không khí	Độ nhạy cao với NH ₃ , NO _x , CO ₂ , benzen; Ngõ ra analog
LDR	Đo cường độ ánh sáng	Ngõ ra analog, độ nhạy quang phổ 400–700 nm
GPS V.KEL TTL	Định vị vị trí robot, gửi tọa độ vĩ độ và kinh độ	Độ chính xác < 2,5 m, giao tiếp UART, tần số cập nhật 1 Hz
L298N	Điều khiển động cơ DC	Điện áp: 5–35 V, dòng tối đa 2 A/kênh, hỗ trợ 2 kênh điều khiển độc lập
Động cơ DC	Tạo chuyển động cho robot	Điện áp định mức 6–12 V, tốc độ quay ~150–200 RPM
IC 7805	Chuyển đổi điện áp nguồn xuống 5V cho toàn hệ thống	Điện áp vào 7–35 V, dòng tải tối đa 1 A
Nguồn pin 12 V	Cung cấp năng lượng cho robot	Pin sạc Li-ion 18650

Bảng 2. Cấu hình kết nối phần cứng giữa các thành phần với ESP32 và Arduino Nano

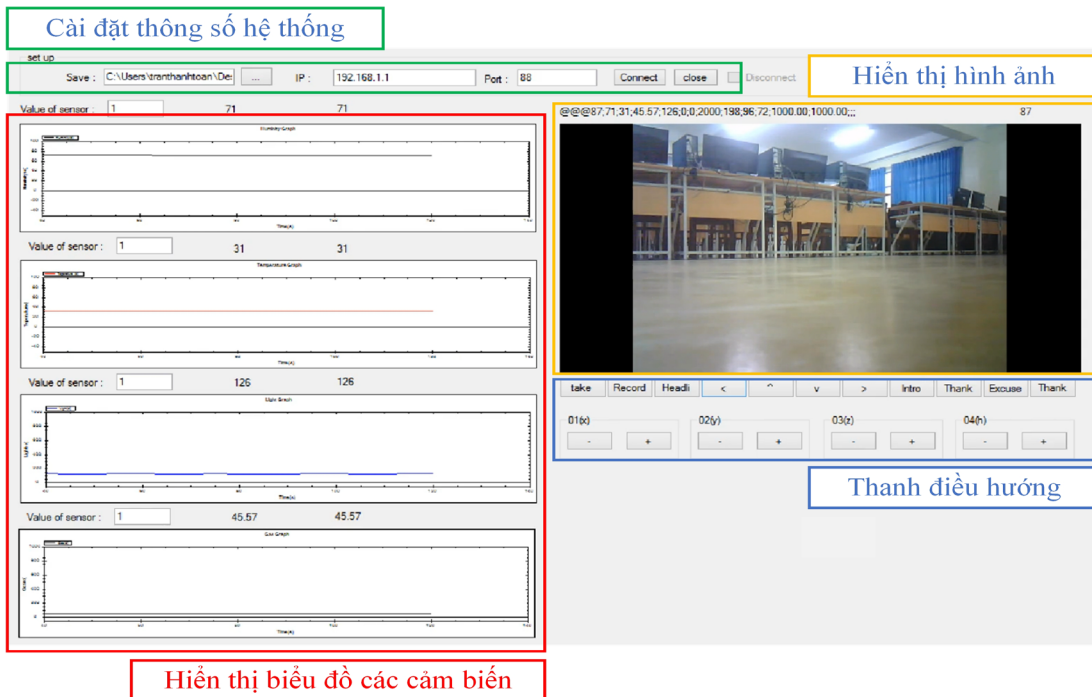
Thành phần	Chân tín hiệu	Kết nối đến
MQ135	DOUT	A0 (Arduino Nano)
LDR	AOUT	A1 (Arduino Nano)
DHT22	DATA	D4 (Arduino Nano)
GPS V.KEL TTL	TX	D3 (Arduino Nano)
	RX	D2 (Arduino Nano)
OLED 0.9 inch	SDA	A4 (Arduino Nano)
	SCL	A5 (Arduino Nano)
	L298	IN1
IN2		D8 (Arduino Nano)
IN3		D7 (Arduino Nano)
IN4		D6 (Arduino Nano)
Mạch ổn áp IC 7805	VIN	Nguồn 12V
	GND	GND hệ thống

Kết quả được trình bày ở Bảng 2 cho thấy chi tiết sơ đồ kết nối phân cứng giữa các mô-đun cảm biến, vi điều khiển và các thiết bị ngoại vi. ESP32 được tích hợp bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự-số (ADC), cho phép thu thập và số hóa tín hiệu đầu ra từ các cảm biến analog để xử lý. Vi điều khiển ESP32-CAM đóng vai trò trung tâm trong truyền thông dữ liệu, thực hiện chức năng truyền dữ liệu cảm biến lên máy chủ IoT theo mô hình client-server, sử dụng giao thức TCP/IP nhằm đảm bảo độ tin cậy và hiệu suất cao trong quá trình truyền tải.

Trong hệ thống, các cảm biến LDR, MQ135 và DHT22 được kết nối trực tiếp với ESP32 để thu thập các thông số môi trường ánh sáng, chất lượng không khí và nhiệt độ/độ ẩm. Màn hình OLED sử dụng giao thức giao tiếp I²C, trong đó chân dữ liệu (SDA) được nối với chân A4 và chân xung nhịp (SCL) nối với chân A5 của Arduino. Mạch điều khiển động cơ (motor driver) nhận tín hiệu từ vi điều khiển Arduino Nano thông qua các chân D6 đến D9, điều khiển hoạt động của hai động cơ DC, từ đó điều hướng chuyển động cho hệ thống robot.

2.3. Xây dựng giao diện điều khiển và thu thập dữ liệu

Để hỗ trợ quá trình điều khiển và giám sát robot theo thời gian thực, nghiên cứu đã phát triển ứng dụng Metter (Hình 3), cho phép kết nối trực tiếp với hệ thống robot nhằm thu thập, lưu trữ và phân tích dữ liệu môi trường. Ứng dụng được thiết kế theo kiến trúc client-server, trong đó máy chủ đóng vai trò trung gian kết nối với hệ thống robot để tiếp nhận dữ liệu cảm biến và truyền tiếp đến các máy khách. Kiến trúc này cho phép người dùng giám sát và điều khiển robot từ xa thông qua kết nối mạng không dây, đồng thời đảm bảo tính ổn định và hiệu quả trong quá trình truyền thông dữ liệu. Metter hoạt động với hai cổng giao tiếp chính: Port 88 phục vụ điều khiển hướng di chuyển của robot qua các phím mũi tên và đồng thời nhận dữ liệu cảm biến, trong khi Port 544 sử dụng để truyền video trực tuyến từ camera OV2640. Chương trình điều khiển robot được lập trình bằng Embedded C trên Arduino Nano, nhận dữ liệu từ cảm biến DHT22, MQ135, LDR và mô-đun GPS, sau đó truyền dữ liệu tới ESP32-CAM để gửi lên máy chủ IoT thông qua kết nối Wi-Fi.



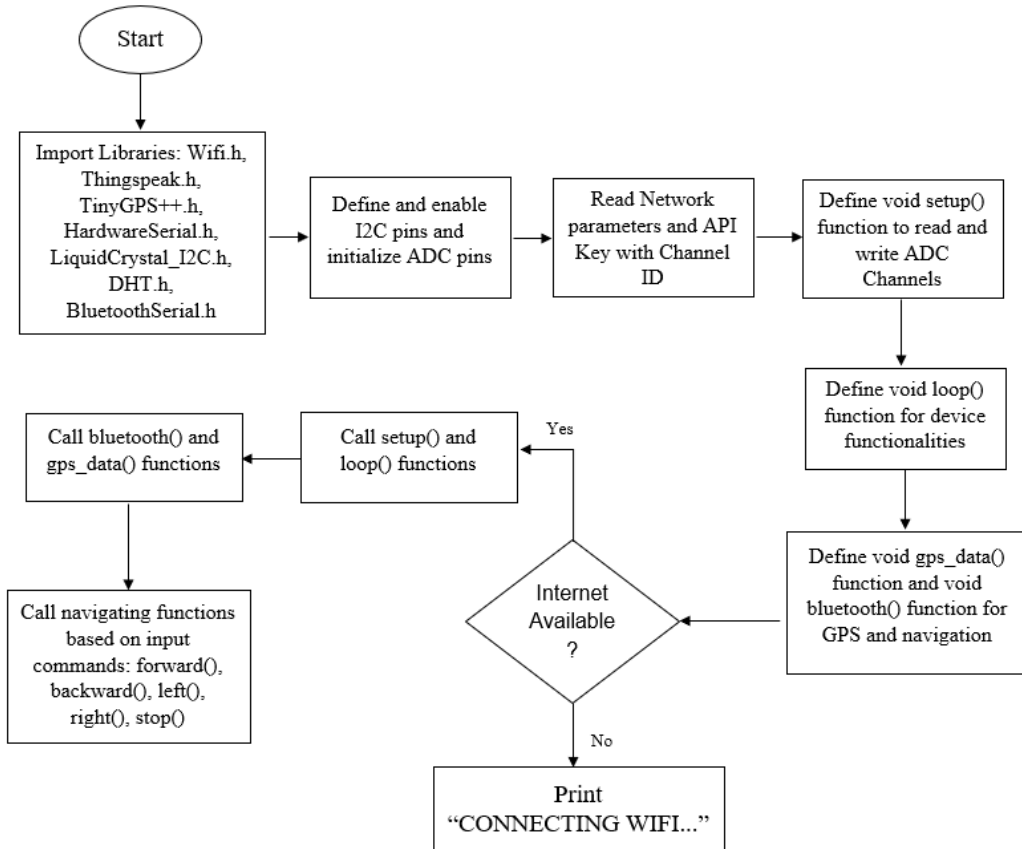
Hình 3. Giao diện dashboard với các biểu đồ theo thời gian thực

Một hệ thống giám sát chuyên dụng đã được phát triển nhằm hỗ trợ người dùng theo dõi dữ liệu môi trường được thu thập từ robot một cách trực quan và hiệu quả thông qua trình duyệt web hoặc ứng dụng di động. Giao diện dashboard cung cấp khả năng

hiển thị các thông số cảm biến như nhiệt độ, độ ẩm, nồng độ CO₂ dưới dạng biểu đồ thời gian thực hoặc giá trị số, giúp đơn giản hóa quá trình giám sát và phân tích. Trong trường hợp robot được tích hợp mô-đun định vị GPS, hệ thống cũng hỗ trợ hiển thị

vị trí của robot trên bản đồ với khả năng cập nhật theo thời gian thực. Bên cạnh đó, chức năng cảnh báo ngưỡng được tích hợp nhằm tăng cường tính an toàn vận hành, với cơ chế tự động gửi thông báo khi

một thông số vượt quá giới hạn cho phép (ví dụ như nồng độ CO₂ vượt 1000 ppm), từ đó hỗ trợ người vận hành đưa ra các quyết định can thiệp kịp thời.



Hình 4. Sơ đồ chương trình nhận dữ liệu từ cảm biến và tương tác mạng (network)

2.4. Quy trình thực nghiệm

Quy trình hoạt động và thu nhận dữ liệu của robot giám sát môi trường được thể hiện dưới dạng sơ đồ khối như Hình 4. Trước tiên, chương trình khởi tạo bằng cách nhập các thư viện cần thiết, bao gồm WiFi.h, ThingSpeak.h, TinyGPS++.h, HardwareSerial.h, DHT.h và server.h. Tiếp theo, các chân giao tiếp I²C được định nghĩa và kích hoạt, đồng thời khởi tạo các kênh ADC nhằm chuẩn bị cho quá trình thu nhận dữ liệu cảm biến. Sau khi khởi tạo phần cứng, hệ thống đọc các tham số mạng (SSID, mật khẩu). Các hàm setup() và loop() được định nghĩa nhằm khởi tạo thiết bị và duy trì hoạt động liên tục. Song song đó, các hàm gps_data() và server_socket() được cài đặt để hỗ trợ định vị GPS và điều hướng robot.

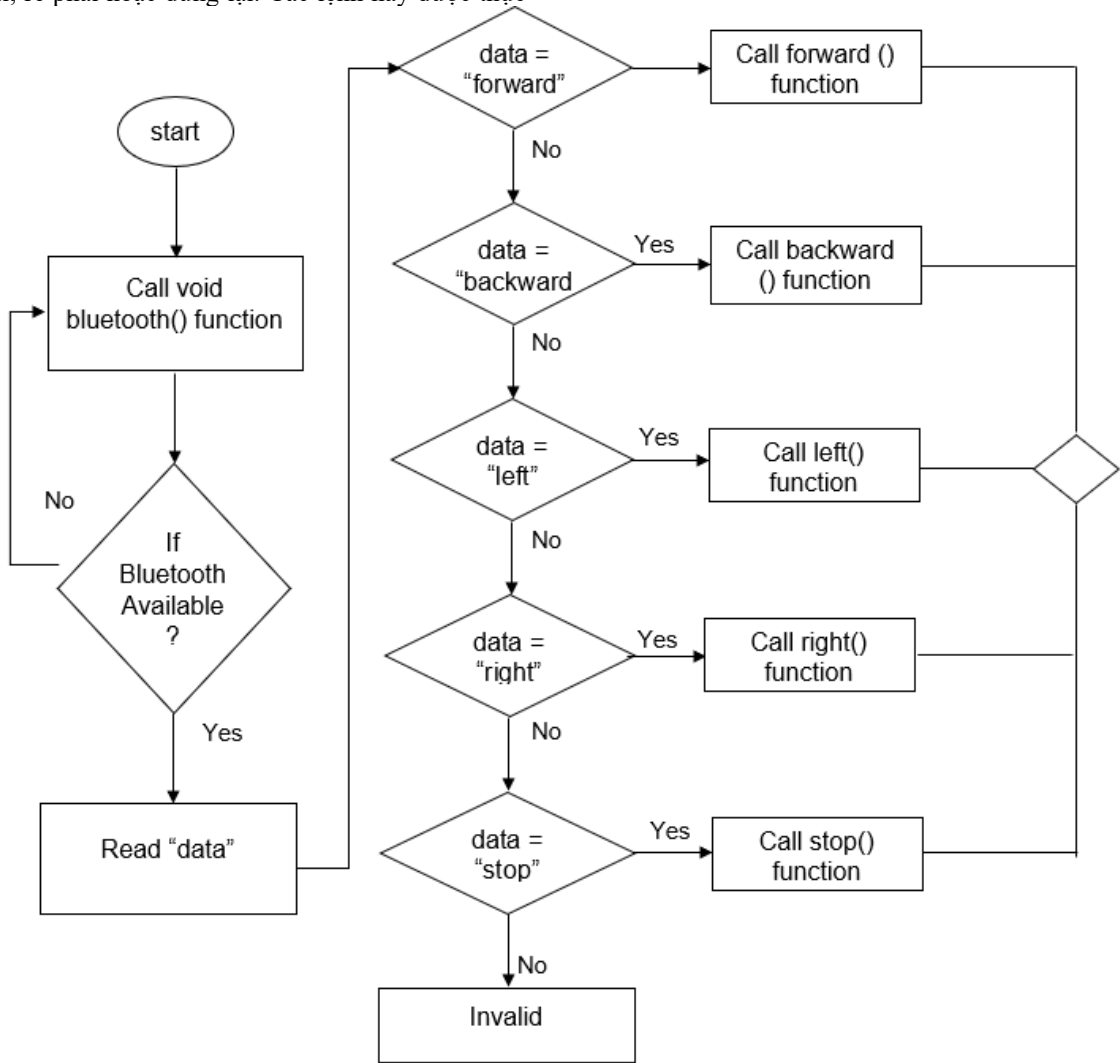
Khi chương trình bắt đầu vận hành, hệ thống kiểm tra trạng thái kết nối với Robot thông qua kết nối tin cậy TCP/IP. Nếu kết nối thành công, các hàm

xử lý được gọi để thực hiện điều khiển robot dựa trên lệnh đầu vào (forward(), backward(), left(), right(), stop()). Nếu kết nối thất bại, hệ thống liên tục hiển thị thông báo “CONNECTING WIFI...” cho đến khi mạng khả dụng.

Hình 5 minh họa luồng chương trình của hệ thống điều hướng và điều khiển robot, trong đó các tiến trình được thực hiện tuần tự từ khởi tạo đến thực thi lệnh di chuyển. Quá trình bắt đầu với việc khởi tạo thư viện và cấu hình phần cứng, bao gồm thiết lập kết nối I²C, khởi tạo các kênh ADC để đọc dữ liệu cảm biến, và cấu hình các tham số mạng cùng khóa API cho kênh dữ liệu IoT. Tiếp theo, chương trình định nghĩa các hàm setup() và loop() nhằm quản lý chức năng của thiết bị, đồng thời xây dựng các hàm gps_data() và server_socket() để phục vụ cho việc định vị và điều khiển từ xa. Hệ thống sau đó kiểm tra trạng thái kết nối Wi-Fi; nếu chưa khả dụng, thông báo "CONNECTING WIFI..." được

hiển thị và tiến trình kết nối tiếp tục cho đến khi thành công. Khi kết nối mạng được thiết lập, các hàm điều khiển định hướng được kích hoạt dựa trên lệnh đầu vào từ người dùng, bao gồm tiến, lùi, rẽ trái, rẽ phải hoặc dừng lại. Các lệnh này được thực

thi thông qua vi điều khiển, điều khiển trực tiếp động cơ DC để thay đổi hướng di chuyển của robot, đồng thời cập nhật thông tin vị trí GPS và dữ liệu cảm biến lên máy chủ IoT theo thời gian thực.

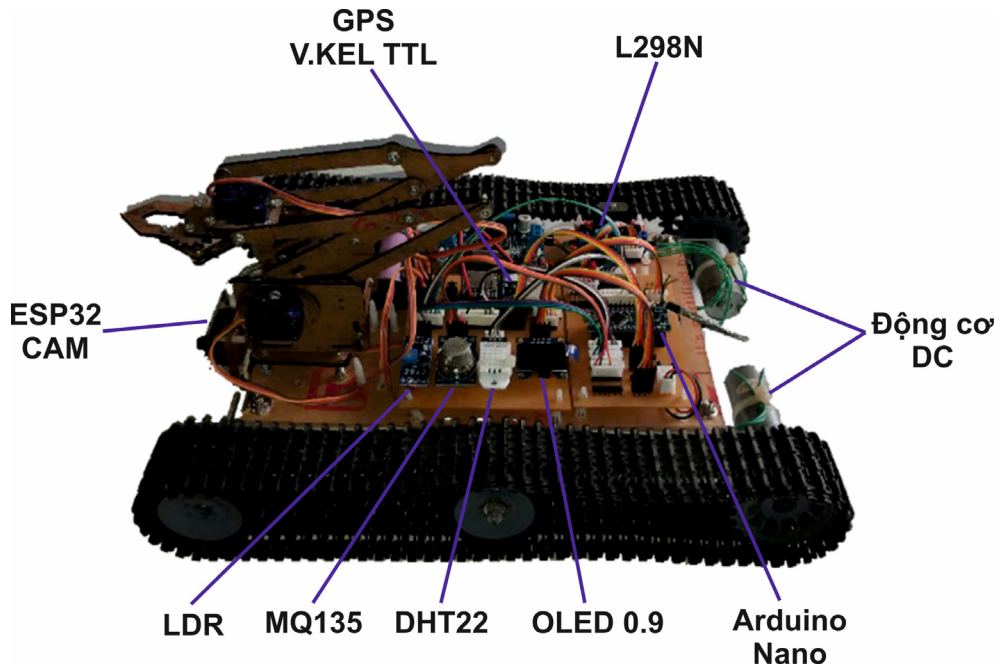


Hình 5. Sơ đồ chương trình của hệ thống điều hướng và điều khiển robot

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 6 minh họa robot di động giám sát môi trường đa tham số sau khi hoàn thiện phần cứng. Hệ thống sử dụng khung gầm xe bánh xích nhằm tăng

khả năng di chuyển ổn định trên nhiều loại địa hình, bao gồm cả địa hình gồ ghề và bề mặt không bằng phẳng. Toàn bộ linh kiện điện tử và mô-đun cảm biến được bố trí gọn gàng trên bo mạch chính, giúp giảm nhiễu tín hiệu và tối ưu khả năng bảo trì.



Hình 6. Mô hình robot di động giám sát môi trường theo thời gian thực

3.1. Kết quả đo lường các chỉ tiêu môi trường

Nhằm đáp ứng yêu cầu giám sát đa tham số trong môi trường, hệ thống robot đã được tích hợp các cảm biến chuyên dụng để thu thập các thông số môi trường quan trọng, bao gồm: nhiệt độ, độ ẩm, nồng độ CO, cũng như các loại khí độc hại như CO, NH₃ và CH₄. Việc lựa chọn cảm biến được thực hiện dựa trên các tiêu chí nghiêm ngặt như độ chính xác, độ tin cậy và khả năng hoạt động ổn định trong điều kiện vận hành thực tế. Cấu hình cảm biến này cho phép hệ thống cung cấp dữ liệu đầy đủ và đáng tin cậy, phục vụ hiệu quả cho mục tiêu giám sát môi trường theo thời gian thực. Thông tin chi tiết về các cảm biến và đơn vị đo được trình bày trong Bảng 3.

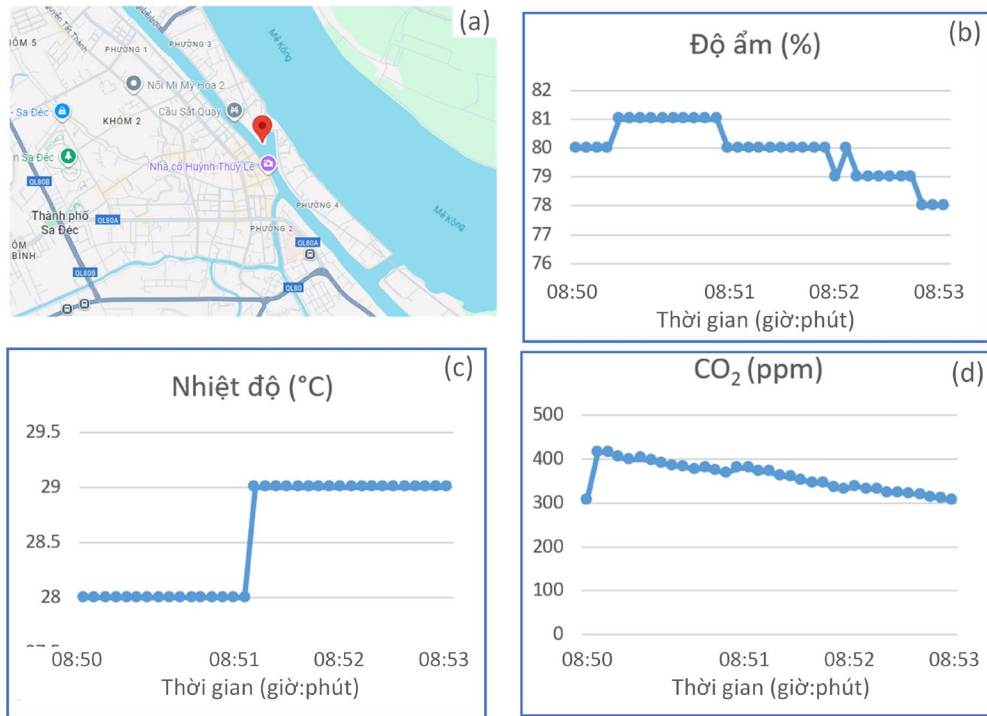
Bảng 3. Các thông số môi trường và cảm biến tương ứng

Thông số môi trường	Cảm biến sử dụng	Đơn vị đo
Nhiệt độ không khí	DHT22 / SHT31	°C
Độ ẩm không khí	DHT22 / SHT31	%RH
Nồng độ CO ₂	MH-Z19B / SCD30	ppm

Quá trình thu thập dữ liệu được triển khai trong môi trường thực tế ngoài trời sau mưa tại địa chỉ Sa Đéc, Đồng Tháp, Việt Nam (tọa độ: 10.296527, 105.768049) vào lúc 08:50 ngày 19/07/2025 (xem Bảng 4). Robot di động thực hiện chu trình đo lường định kỳ với tần suất 5 giây/lần, trong đó dữ liệu cảm biến được truyền trực tiếp đến giao diện giám sát theo thời gian thực. Các thông số môi trường thu nhận được được lưu trữ có cấu trúc theo dấu thời gian (timestamp), nhằm phục vụ cho các phân tích định lượng và đánh giá biến động môi trường trong không gian và thời gian. Dữ liệu cho thấy nhiệt độ ổn định ở mức 28-29°C, độ ẩm giảm nhẹ từ 80% xuống 78% và nồng độ CO₂ giảm đáng kể từ 403 ppm xuống 305 ppm trong khoảng thời gian khảo sát, phản ánh sự cải thiện chất lượng không khí sau cơn mưa.

Bảng 4. Dữ liệu cảm biến thu thập từ robot ngoài trời sau mưa

Thời gian	Nhiệt độ (°C)	Độ ẩm (%)	CO ₂ (ppm)
08:50:00	28	80	403
08:51:00	28	80	381
08:52:00	29	79	332
08:53:00	29	78	305



Hình 7. Kết quả đo từ cảm biến ngoài trời sau mưa

Ghi chú: (a) Vị trí khảo sát trên Google Maps; (b) độ ẩm; (c) nhiệt độ; (d) nồng độ CO₂

Hệ thống robot giám sát đa tham số thể hiện khả năng vận hành ổn định (Hình 7). Các cảm biến tích hợp cho phép phát hiện kịp thời những biến động đột ngột về nồng độ CO₂ hoặc bụi mịn. Robot này có tiềm năng ứng dụng rộng rãi tại các khu vực công cộng, cơ sở giáo dục và nhà xưởng sản xuất nhằm giám sát liên tục và cảnh báo sớm các rủi ro môi trường. Kết quả đo đạc cho thấy hầu hết các thông số môi trường nằm trong ngưỡng cho phép theo quy chuẩn của Việt Nam. Tuy nhiên, tại một số thời điểm, hệ thống ghi nhận sự gia tăng nhẹ của nồng độ CO₂ và bụi mịn, nguyên nhân có thể do hoạt động di chuyển đông người hoặc điều kiện thông gió chưa đảm bảo. Xu hướng tăng nhẹ nồng độ CO₂ trong suốt thời gian giám sát khẳng định hiệu quả của hệ thống trong việc phát hiện sớm những thay đổi về chất lượng không khí

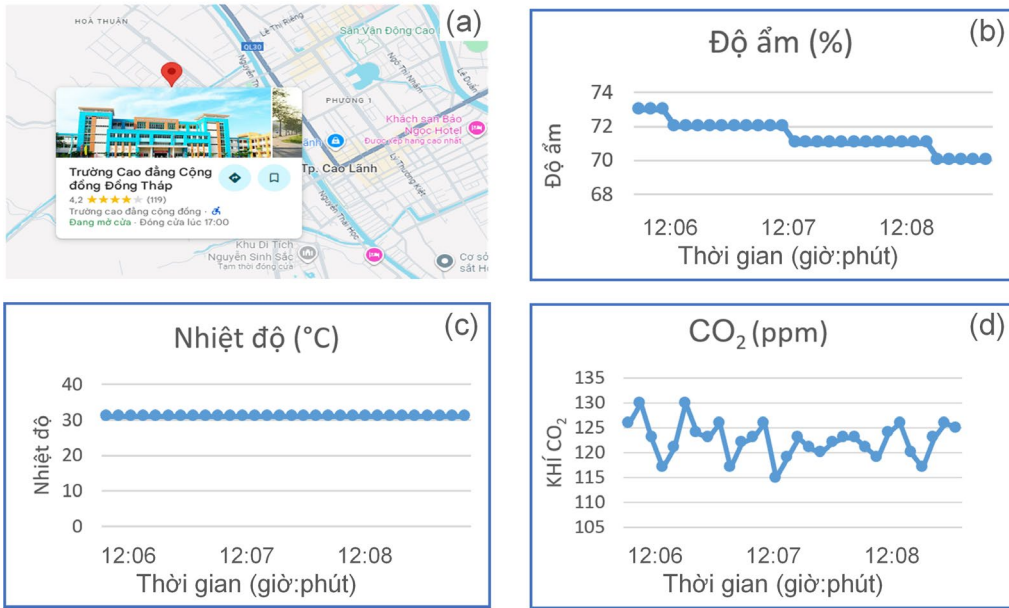
Quá trình thu thập dữ liệu được triển khai trong môi trường phòng thí nghiệm có kiểm soát tại Trường Cao đẳng Cộng đồng Đồng Tháp (tọa độ: 10.461083, 105.623628) vào lúc 12:05 ngày 20/07/2025 (xem Bảng 5). Kết quả thu được cho

thấy nhiệt độ duy trì ổn định ở 31°C, độ ẩm giảm nhẹ từ 73% xuống 71%, và nồng độ CO₂ luôn ở mức thấp (123-126 ppm), phản ánh điều kiện môi trường được kiểm soát tốt trong phòng thí nghiệm.

Bảng 5. Dữ liệu cảm biến thu thập từ robot trong phòng thí nghiệm

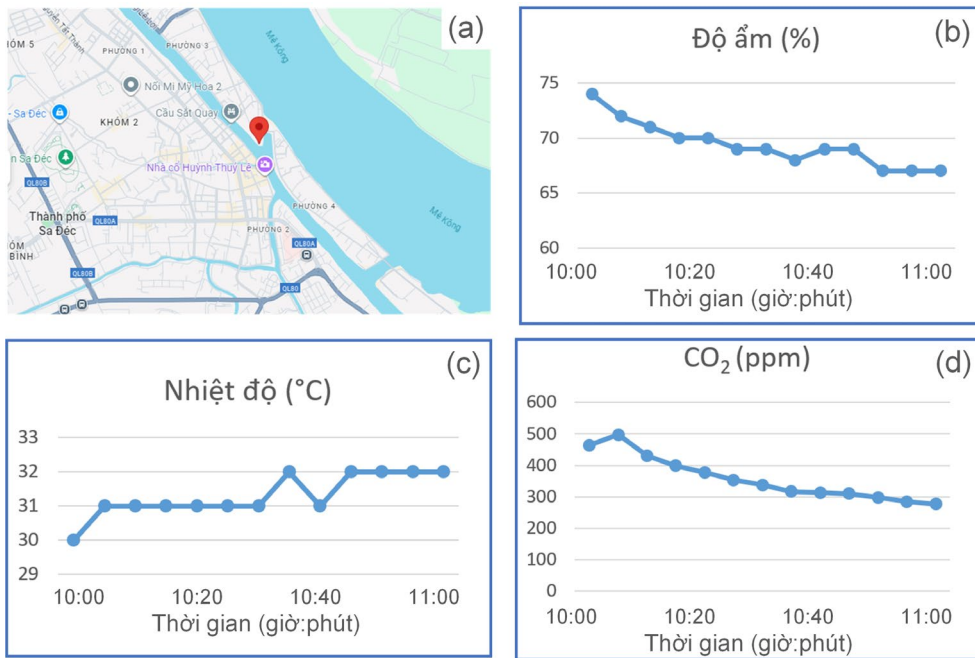
Thời gian	Nhiệt độ (°C)	Độ ẩm (%)	CO ₂ (ppm)
12:06:00	31	73	126
12:07:00	31	72	123
12:08:00	31	71	124

Hệ thống robot giám sát đa tham số cho thấy khả năng hoạt động ổn định, thu thập và truyền dữ liệu tin cậy như Hình 8. Kết quả cho thấy hệ thống có khả năng phát hiện sự thay đổi nhỏ về độ ẩm và dao động nhanh của CO₂ trong điều kiện môi trường thực tế. Điều này chứng minh hiệu quả của giải pháp trong việc giám sát chất lượng không khí tại các khu vực công cộng, cơ sở giáo dục hoặc nhà xưởng, đồng thời tạo cơ sở cho việc triển khai cảnh báo sớm các rủi ro môi trường.



Hình 8. Kết quả đo từ cảm biến trong phòng thí nghiệm

Ghi chú: (a) Vị trí khảo sát trên Google Maps; (b) độ ẩm; (c) nhiệt độ; (d) nồng độ CO₂



Hình 9. Kết quả đo từ cảm biến ngoài trời trong bóng râm

Ghi chú: (a) Vị trí khảo sát trên Google Maps; (b) độ ẩm; (c) nhiệt độ; (d) nồng độ CO₂

Quá trình thu thập dữ liệu được triển khai ngoài trời trong bóng râm tại địa chỉ Sa Đéc, Đồng Tháp, Việt Nam (tọa độ: 10.296527, 105.768049) vào lúc 10:00–11:00, ngày 03/09/2025 (xem Bảng 6). Trong khoảng thời gian từ 10:00 đến 11:00, dữ liệu cho thấy nhiệt độ tăng nhẹ từ 30°C lên 32°C, phù hợp

với xu hướng nhiệt độ buổi sáng. Độ ẩm giảm dần từ 74% xuống 67%, phản ánh sự gia tăng nhiệt độ và giảm độ ẩm tương đối theo thời gian. Đặc biệt, nồng độ CO₂ giảm đáng kể từ 464 ppm xuống 277 ppm, cho thấy sự cải thiện rõ rệt về chất lượng không khí trong khu vực khảo sát. Xu hướng này có

thể được giải thích bởi sự lưu thông không khí tốt hơn và khả năng hấp thụ CO₂ của thảm thực vật trong khu vực có bóng râm.

Hình 9 minh họa khả năng giám sát ngoài trời trong bóng râm của hệ thống robot đa tham số, với dữ liệu được thu thập và truyền tải ổn định, tin cậy. Kết quả này khẳng định tính ổn định của hệ thống trong việc ghi nhận biến thiên môi trường theo thời gian, đồng thời chứng minh khả năng phát hiện xu hướng thay đổi rõ rệt về độ ẩm, nhiệt độ và CO₂ trong điều kiện ngoài trời.

Bảng 6. Dữ liệu cảm biến thu thập từ robot ngoài trời trong bóng râm

Thời gian	Nhiệt độ (°C)	Độ ẩm (%)	CO ₂ (ppm)
10:00:00	30	74	464
10:10:00	31	71	431
10:20:00	31	70	378
10:30:00	31	69	338
10:40:00	31	69	314
10:50:00	32	67	298
11:00:00	32	67	277

3.2. Đánh giá hiệu năng tổng thể của hệ thống

Hiệu năng tổng thể của robot giám sát môi trường đa thông số được đánh giá dựa trên bốn chỉ tiêu cốt lõi: (1) độ chính xác đo lường của các cảm biến, (2) độ trễ trong truyền thông không dây, (3) thời lượng hoạt động của pin và (4) khả năng phủ sóng và duy trì kết nối không dây trong không gian giám sát. Các chỉ tiêu này không chỉ phản ánh hiệu suất hoạt động mà còn là yếu tố quyết định mức độ hiệu quả khi phát triển hệ thống trong các môi trường thực tế với điều kiện thay đổi.

3.2.1. Độ chính xác đo lường của các cảm biến

Nhằm đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu thu thập, các cảm biến tích hợp trên robot đã được hiệu chuẩn sơ bộ thông qua so sánh với các thiết bị đo lường chuẩn tại phòng thí nghiệm. Quá trình hiệu chuẩn này cho phép xác định và hiệu chỉnh sai số hệ thống của từng cảm biến, từ đó nâng cao độ chính xác trong các phép đo thực địa. Bảng 5 trình bày sai số trung bình thu được sau quá trình hiệu chuẩn đối với từng loại cảm biến được sử dụng trong hệ thống.

Tất cả cảm biến đều đạt độ chính xác nằm trong khoảng sai số cho phép, phù hợp với tiêu chuẩn giám sát môi trường trong nhà, khu vực bán ngoài trời và các không gian bán mở. Mức sai số ±0,5 °C và ±2% RH là chấp nhận được cho các ứng dụng theo dõi điều kiện vi khí hậu. CO₂ và bụi mịn PM2.5 là hai

thông số quan trọng trong đánh giá chất lượng không khí; các cảm biến cho độ chính xác đáp ứng được yêu cầu theo dõi xu hướng và phát hiện bất thường môi trường.

Bảng 5. Độ chính xác đo lường của các cảm biến môi trường sử dụng trong hệ thống

Chỉ tiêu đo	Cảm biến sử dụng	Sai số trung bình so với thiết bị chuẩn
Nhiệt độ	DHT22	±0.5 °C
Độ ẩm	DHT22	±2% RH
CO ₂	MH-Z19B	±30 ppm hoặc ±3% giá trị đo

3.2.2. Độ trễ trong truyền thông không dây

Trong hệ thống giám sát môi trường sử dụng robot di động, mô-đun truyền thông không dây giữ vai trò then chốt trong việc đảm bảo quá trình truyền tải dữ liệu cảm biến diễn ra nhanh chóng, ổn định và liên tục từ robot đến nền tảng giám sát. Nghiên cứu này đã tích hợp các mô-đun truyền thông phổ biến như ESP8266/ESP32 (sử dụng kết nối Wi-Fi) nhằm đáp ứng các kịch bản triển khai khác nhau, bao gồm cả môi trường trong nhà và không gian mở với yêu cầu khoảng cách truyền khác nhau.

Hệ thống truyền thông trong robot giám sát môi trường được thiết kế với tính linh hoạt cao, hỗ trợ các giao thức phổ biến như MQTT, HTTP và WebSocket, nhằm đáp ứng các yêu cầu khác nhau về độ trễ, tính thời gian thực và mức độ tin cậy trong truyền dữ liệu. Tần suất truyền dữ liệu có thể được cấu hình tùy biến, với các mức phổ biến là 5 giây hoặc 10 giây, phù hợp cho cả giám sát liên tục và giám sát theo chu kỳ. Độ trễ trung bình của hệ thống được xác định từ thời điểm cảm biến ghi nhận dữ liệu cho đến khi thông tin được hiển thị trên giao diện giám sát (dashboard). Ngoài ra, phạm vi và độ ổn định của kết nối không dây được đánh giá thông qua tỷ lệ mất gói (packet loss rate), được đo tại các khoảng cách khác nhau giữa robot và điểm thu dữ liệu.

Bảng 6 thể hiện kết quả thí nghiệm hiệu năng truyền thông không dây ở các khoảng cách khác nhau, cho thấy ở khoảng cách 5–10 m trong điều kiện không vật cản, hệ thống truyền dữ liệu gần như tức thời và rất ổn định. Tuy nhiên, khi khoảng cách tăng lên 15 m và có vật cản, chất lượng tín hiệu giảm dẫn đến độ trễ tăng gấp đôi và tỉ lệ mất gói tăng lên. Do đó, lựa chọn giao thức và mô-đun truyền thông cần được cân nhắc phù hợp với môi trường triển khai thực tế.

Bảng 6. Đánh giá hiệu năng truyền thông không dây ở các khoảng cách khác nhau

Khoảng cách	Tỉ lệ mất gói (%)	Độ trễ trung bình (ms)
5 m	~ 0,0%	~ 0,00
10 m	~ 0,0%	~ 0,00
15 m (có vật cản)	~ 0,1%	~ 0,01

3.2.3. Thời lượng hoạt động của pin

Hệ thống được cấp nguồn bằng pin lithium-ion (18650) với dung lượng từ 2600 đến 3000 mAh, là loại pin phổ biến có khả năng cung cấp dòng điện ổn định cho các thiết bị điện tử nhúng. Để đánh giá hiệu năng tiêu thụ năng lượng, hệ thống được thử nghiệm trong điều kiện hoạt động liên tục, với các tham số như: tần suất đo và truyền dữ liệu (mỗi 10 giây) và thời gian hoạt động liên tục (dao động từ 8 đến 10 giờ) phụ thuộc vào số lượng cảm biến tích hợp (nếu thêm cảm biến khí hoặc GPS tiêu tốn nhiều điện hơn) và tần suất truyền dữ liệu không dây. Kết quả này cho thấy hệ thống hoàn toàn đáp ứng tốt nhu cầu giám sát trong các nhiệm vụ ngắn hạn, chẳng hạn như khảo sát môi trường trong ngày hoặc giám sát sự kiện đặc biệt.

Ngoài ra, để kéo dài thời gian hoạt động, hệ thống có thể được cấu hình để sử dụng chế độ tiết kiệm năng lượng (deep sleep) là một chế độ trong đó bộ vi điều khiển và các cảm biến tạm ngừng hoạt động trong khoảng thời gian không cần thiết. Với việc tối ưu hóa các chu kỳ hoạt động, nghỉ hợp lý, thời lượng pin có thể tăng lên gấp nhiều lần, phục vụ tốt cho các ứng dụng giám sát môi trường dài hạn hoặc tại các khu vực khó tiếp cận nguồn điện.

3.2.4. Khả năng phủ sóng và duy trì kết nối không dây

Hệ thống hỗ trợ giao thức truyền thông không dây (Wi-Fi), cho phép linh hoạt lựa chọn tùy theo yêu cầu ứng dụng thực tế. Để đánh giá hiệu suất truyền thông, các thử nghiệm đã được thực hiện trong các môi trường đặc trưng, tập trung vào hai tiêu chí chính như phạm vi truyền tín hiệu tối đa và tỉ lệ mất gói dữ liệu như Bảng 7.

Wi-Fi là một giao thức truyền thông có tốc độ truyền dữ liệu cao và khả năng tích hợp dễ dàng vào các mạng nội bộ (LAN), do đó rất phù hợp cho các ứng dụng giám sát trong nhà hoặc trong các khu vực có không gian giới hạn. Tuy nhiên, phạm vi truyền dẫn của Wi-Fi thường bị giới hạn dưới 30 mét, chủ yếu do ảnh hưởng của vật cản như tường, đồ nội thất và nhiễu từ các thiết bị điện tử khác. Kết quả thực nghiệm tại môi trường văn phòng cho thấy tỷ lệ mất

gói của Wi-Fi duy trì dưới 0,5% khi thiết bị đặt gần router hoặc điểm truy cập (access point), khẳng định tính ổn định của kết nối trong khoảng cách ngắn.

Bảng 7. Khả năng kết nối của hai giao thức không dây trong môi trường thử nghiệm thực tế

Giao thức	Phạm vi tối đa	Tỉ lệ mất gói	Môi trường thử nghiệm
Wi-Fi	~30 m (trong nhà)	< 0.05%	Văn phòng, có nhiều vật cản

3.3. Hạn chế và vấn đề tồn tại

Mặc dù hệ thống robot giám sát môi trường đã bước đầu chứng minh được hiệu quả trong việc thu thập dữ liệu, truyền thông tin và hỗ trợ giám sát thời gian thực, một số hạn chế kỹ thuật vẫn tồn tại, ảnh hưởng đến tính bền vững và khả năng mở rộng trong các ứng dụng thực tế quy mô lớn. Trước hết, độ bền và khả năng vận hành dài hạn của hệ thống chưa được kiểm chứng đầy đủ, khi các thử nghiệm hiện tại mới chỉ được triển khai trong khoảng thời gian ngắn (dưới một tuần). Điều này chưa đủ để đánh giá hiệu quả hoạt động liên tục trong môi trường ngoài trời, nơi chịu tác động thường xuyên của các yếu tố như nhiệt độ, độ ẩm và điều kiện thời tiết biến đổi. Bên cạnh đó, các cảm biến tích hợp chưa được trang bị lớp bảo vệ đạt tiêu chuẩn IP (Ingress Protection), khiến chúng dễ bị ảnh hưởng bởi bụi bẩn và hơi ẩm trong không khí, từ đó có thể làm suy giảm độ chính xác sau một thời gian vận hành.

Ngoài ra, hệ thống hiện vẫn phụ thuộc vào nguồn năng lượng giới hạn từ pin sạc và chưa được tích hợp các giải pháp năng lượng tái tạo như pin mặt trời. Điều này làm suy giảm thời gian hoạt động liên tục và hạn chế tính linh hoạt của thiết bị trong các điều kiện triển khai thực tế, đặc biệt là tại những khu vực xa trung tâm hoặc không có sẵn nguồn điện. Bên cạnh đó, trong các khu vực thiếu kết nối Wi-Fi hoặc có tín hiệu không ổn định, quá trình truyền dữ liệu cảm biến có thể bị gián đoạn, ảnh hưởng đến khả năng giám sát thời gian thực.

Về mặt hiệu năng thời gian thực và khả năng mở rộng, hệ thống hiện tại mới chỉ đáp ứng các yêu cầu giám sát môi trường cơ bản, chưa được tối ưu cho các tình huống khẩn cấp như rò rỉ khí độc, hỏa hoạn hoặc cháy nổ, những tình huống đòi hỏi cơ chế phát hiện và phản hồi tức thời. Việc thiếu các thuật toán xử lý tín hiệu nhanh và cơ chế cảnh báo sớm làm hạn chế khả năng ứng dụng của hệ thống trong các kịch bản có yêu cầu an toàn cao. Ngoài ra, chưa có thử nghiệm đánh giá hiệu năng khi triển khai đồng

thời nhiều robot hoặc trạm đo, trong khi đây là yếu tố then chốt đối với việc mở rộng hệ thống giám sát ở quy mô lớn, chẳng hạn như tại các khu công nghiệp, vùng nông thôn rộng lớn hoặc khu vực có địa hình phức tạp.

Bên cạnh đó, giao diện người dùng và năng lực phân tích dữ liệu hiện còn đơn giản khi ứng dụng chủ yếu hiển thị dữ liệu cảm biến thông qua biểu đồ thời gian thực và các chỉ số thô, chưa tích hợp các công cụ phân tích nâng cao, điều này phần nào hạn chế hiệu quả hỗ trợ ra quyết định trong các tình huống cần xử lý nhanh hoặc phân tích dữ liệu phức tạp; để khắc phục, nghiên cứu cần triển khai các mô hình dự đoán như hồi quy tuyến tính (linear regression), SVM (support vector machine) và KNN (k-nearest neighbors), đồng thời định hướng mở rộng sang các kỹ thuật học máy nâng cao hơn như mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) hoặc học sâu (deep learning) nhằm phát hiện bất thường, đánh giá rủi ro và dự báo xu hướng biến động môi trường, từ đó nâng cao giá trị khoa học và tính ứng dụng của hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Aboughaly, M., & Fattah, I. R. (2023). Environmental analysis, monitoring, and process control strategy for reduction of greenhouse gaseous emissions in thermochemical reactions. *Atmosphere*, 14(4), 655. <https://doi.org/10.3390/atmos14040655>

Angelini, F., Angelini, P., Angiolini, C., Bagella, S., Bonomo, F., Caccianiga, M., Della Santina, C., Gigante, D., Hutter, M., & Nanayakkara, T. (2023). Robotic monitoring of habitats: The natural intelligence approach. *IEEE Access*, 11, 72575-72591. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3294276>

El-Khozondar, H. J., Mtair, S. Y., Qoffa, K. O., Qasem, O. I., Munyarawi, A. H., Nassar, Y. F., Bayoumi, E. H., & Abd El, A. A. E. B. (2024). A smart energy monitoring system using ESP32 microcontroller. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 9, 100666. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100666>

Essamlali, I., Nhaila, H., & El Khaili, M. (2024). Supervised machine learning approaches for predicting key pollutants and for the sustainable enhancement of urban air quality: A systematic review. *Sustainability*, 16(3), 976. <https://doi.org/10.3390/su16030976>

Halder, S., & Afsari, K. (2023). Robots in inspection and monitoring of buildings and infrastructure: A systematic review. *Applied Sciences*, 13(4), 2304. <https://doi.org/10.3390/app13042304>

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phát triển một hệ thống robot di động giám sát môi trường đa tham số với khả năng thu thập và truyền dữ liệu theo thời gian thực thông qua giao tiếp không dây. Robot được tích hợp các cảm biến đo nhiệt độ, độ ẩm, khí gas, bụi mịn, ánh sáng và cảm biến chuyển động, cho phép theo dõi toàn diện các yếu tố môi trường. Giao diện giám sát được xây dựng trên nền tảng web và ứng dụng di động, hỗ trợ hiển thị dữ liệu dạng biểu đồ và số liệu tức thời. Qua các thử nghiệm trong nhà và ngoài trời, hệ thống cho thấy độ ổn định cao và khả năng ghi nhận dữ liệu chính xác, phục vụ hiệu quả cho các hoạt động giám sát môi trường liên tục. Tuy nhiên, robot vẫn tồn tại một số hạn chế như thời lượng hoạt động phụ thuộc vào pin, chưa tích hợp giải pháp năng lượng tái tạo, giao diện phân tích dữ liệu còn đơn giản, chưa áp dụng các kỹ thuật như học máy để phát hiện bất thường. Mặc dù vậy, hệ thống có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong giám sát chất lượng không khí ở đô thị, khu công nghiệp, nông nghiệp thông minh và các vùng sinh thái nhạy cảm.

Imam, M., Adam, S., Dev, S., & Nesa, N. (2024). Air quality monitoring using statistical learning models for sustainable environment. *Intelligent Systems with Applications*, 22, 200333. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200333>

Junaedy, A., Masuta, H., Sawai, K., Motoyoshi, T., & Takagi, N. (2023). Real-Time 3D Map Building in a Mobile Robot System with Low-Bandwidth Communication. *Robotics*, 12(6), 157. <https://doi.org/10.3390/robotics12060157>

Kwe, N. B., & Priyadarshini, R. (2024). Emerging trends in mobile robots. *Robotics and Smart Autonomous Systems*, 77-117. <https://doi.org/10.1201/9781003537083-4>

Luperto, M., Monroy, J., Moreno, F.-A., Lunardini, F., Renoux, J., Krpic, A., Galindo, C., Ferrante, S., Basilico, N., & Gonzalez-Jimenez, J. (2023). Seeking at-home long-term autonomy of assistive mobile robots through the integration with an IoT-based monitoring system. *Robotics and Autonomous Systems*, 161, 104346. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104346>

Mahammed, C., Butt, T., & Al-Mhdawi, M. (2025). Emerging technologies in health and safety management: current perspectives and future prospects. *Research Companion to Innovation in Construction*, 300-321. <https://doi.org/10.4337/9781035326594.00024>

Nazarov, D., Sulimin, V., & Shvedov, V. (2024). Advancing environmental stewardship: The role

- of automation in enhanced environmental monitoring. *E3S Web of Conferences*
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454205005>
- Saxena, V. (2025). Water quality, air pollution, and climate change: investigating the environmental impacts of industrialization and urbanization. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(2), 73.
<https://doi.org/10.1007/s11270-024-07702-4>
- Siddique, A., Ahmed, H., Atiq, S., Ashraf, M., Raza, A., & Aslam, Z. (2024). Enhancing Crop Yield Through IoT-Based Precision Agriculture: An Optimized Multi-Parameter System for Solar-Powered Tunnel Farming. 2024 3rd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Control, and Telecommunication Engineering (EECTE) <https://doi.org/10.1109/EECTE63967.2024.10823752>
- Tahir, B. F., Rasool, S. S., & Rao, N. R. (2024). Air pollution monitoring, and modelling: An overview. *Environmental Forensics*, 25(5), 309-336.
<https://doi.org/10.1080/15275922.2023.2297437>
- Verma, S., Kameswari, Y. L., & Kumar, S. (2024). A review on environmental parameters monitoring systems for power generation estimation from renewable energy systems. *BioNanoScience*, 14(4), 3864-3888.
<https://doi.org/10.1007/s12668-024-01358-4>
- Zhang, R., Wang, Z., Li, X., She, Z., & Wang, B. (2023). Water quality sampling and multi-parameter monitoring system based on multi-rotor UAV implementation. *Water*, 15(11), 2129.
<https://doi.org/10.3390/w15112129>