

PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG IOT GIÁM SÁT NHIỆT ĐỘ, ĐỘ ẨM VÀ HÀNH TRÌNH VẬN CHUYỂN TRONG CONTAINER LẠNH PHỤC VỤ ĐÀO TẠO LOGISTICS 4.0

DEVELOPMENT OF AN IOT-BASED SYSTEM FOR MONITORING TEMPERATURE, HUMIDITY, AND TRANSPORT ROUTES IN REFRIGERATED CONTAINERS FOR LOGISTICS 4.0 EDUCATION

Hồ Đức Tuấn¹, Huỳnh Lê Trường Phát²

1. Trường Kỹ thuật Và Công Nghệ, Trường Đại học Nha Trang

2. Học viên Cao học chuyên ngành Quản lý cảng và logistics,

Trường Đại học Giao thông Vận tải TP.HCM

Tác giả liên hệ: Hồ Đức Tuấn, Email: : tuanhdt@ntu.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/05/2026; Ngày phản biện thông qua: 20/07/2026 ; Ngày duyệt đăng: 30/09/2026

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất và phát triển hệ thống Internet of Things (IoT) theo cách tiếp cận hệ thống thực - ảo (Cyber-Physical System - CPS) nhằm giám sát theo thời gian thực nhiệt độ, độ ẩm và vị trí trong vận chuyển container lạnh, phục vụ đào tạo logistics và hỗ trợ nghiên cứu ứng dụng trong quản lý chuỗi cung ứng lạnh đối với các nhóm hàng nhạy cảm với nhiệt độ. Hệ thống được thiết kế theo hướng chi phí thấp, phù hợp với các mô hình thực hành và nghiên cứu ứng dụng trong đào tạo kỹ thuật. Thiết bị thu thập dữ liệu sử dụng vi điều khiển ESP32, tích hợp đầu dò nhiệt độ - độ ẩm sử dụng cảm biến SHT40 và mô-đun định vị GPS NEO-6M. Dữ liệu được truyền qua mạng 4G LTE sử dụng mô-đun ML307R-DL hoặc kết nối Wi-Fi đến máy chủ đám mây với chu kỳ cập nhật mặc định 60 giây. Mô hình container lạnh tỷ lệ 1:5 được chế tạo với lớp cách nhiệt PU, đạt nhiệt độ ổn định ở mức thấp nhất khoảng 6 °C, phù hợp với mục tiêu kiểm chứng hệ thống ở quy mô thực nghiệm nhỏ. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định với độ trễ truyền dữ liệu 200-300 ms, tỷ lệ mất gói tin dưới 1% và thời lượng pin khoảng 8 giờ khi vận hành liên tục ở chế độ tải cao với chu kỳ truyền dữ liệu 6 giây/lần. Nghiên cứu góp phần xây dựng mô hình giám sát chuỗi lạnh trực quan, nhấn mạnh mục tiêu kiểm chứng kiến trúc IoT-CPS và hỗ trợ đào tạo theo định hướng Problem-Based Learning (PBL) trong bối cảnh Logistics 4.0.

Từ khóa: Internet of Things (IoT), container lạnh, chuỗi cung ứng lạnh, giám sát hành trình, Cyber-Physical System (CPS), Logistics 4.0.

ABSTRACT

This study proposes and develops an Internet of Things (IoT) system based on a Cyber-Physical System (CPS) approach for real-time monitoring of temperature, humidity, and location in refrigerated container transportation, supporting logistics training and applied research in cold chain management for temperature-sensitive goods. The system is designed as a low-cost solution suitable for practical training models and applied research in technical education. The data acquisition device is built around an ESP32 microcontroller and integrates a temperature-humidity probe based on an SHT40 sensing element and a NEO-6M GPS module. Data are transmitted to a cloud server via a 4G LTE network using an ML307R-DL module or via Wi-Fi, with a default update interval of 60 seconds. A 1:5-scale refrigerated container model was fabricated with polyurethane (PU) insulation and achieved a minimum temperature of approximately 6°C, which is appropriate for small-scale system verification. Experimental results indicate stable system operation, with data transmission latency of 200-300 ms, packet loss of less than 1%, and battery life of approximately 8 hours under high-load continuous operation with a 6-second data-transmission interval. The study contributes to the development of a visual cold chain monitoring model, emphasizing verification of the IoT-CPS architecture and supporting Problem-Based Learning (PBL) for Logistics 4.0-oriented education.

Keywords: Internet of Things (IoT), refrigerated container, cold chain supply chain, route monitoring, Cyber-Physical System (CPS), Logistics 4.0.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh thương mại các nhóm hàng nhạy cảm với nhiệt độ như thực phẩm, thủy sản, nông sản tươi sống, dược phẩm và sinh phẩm ngày càng gia tăng, chuỗi cung ứng lạnh trở thành hạ tầng logistics quan trọng nhằm duy trì chất lượng hàng hóa, kéo dài thời hạn sử dụng, giảm tổn thất sau thu hoạch và hỗ trợ yêu cầu an toàn, truy xuất nguồn gốc. Chuỗi cung ứng lạnh được hiểu là hệ thống có khả năng kiểm soát và duy trì nhiệt độ, độ ẩm phù hợp trong toàn bộ quá trình chế biến, lưu trữ, vận chuyển, phân phối và tiêu thụ đối với các nhóm hàng dễ hư hỏng như rau quả, thủy sản, thịt, sữa, dược phẩm và sinh phẩm [1], [2]. Tại Việt Nam, nhu cầu phát triển logistics lạnh ngày càng cấp thiết do Việt Nam là quốc gia có thể mạnh xuất khẩu nông sản và thủy sản, nhưng tỷ lệ tổn thất sau thu hoạch vẫn còn cao, một phần đáng kể xuất phát từ hạn chế trong bảo quản, vận chuyển lạnh và kết nối giữa các tác nhân trong chuỗi [3].

Các nghiên cứu trong nước đã chỉ ra rằng chuỗi cung ứng lạnh tại Việt Nam tuy đã được quan tâm nhưng mức độ áp dụng vẫn chưa đồng đều. Bùi Thị Bích Liên [3] cho rằng phần lớn doanh nghiệp sản xuất, xuất khẩu nông sản vẫn chưa hình thành đầy đủ tư duy “từ nông trại đến bàn ăn” trong việc sử dụng chuỗi lạnh; việc tìm kiếm nhà cung cấp dịch vụ logistics lạnh uy tín vẫn còn gặp nhiều khó khăn, trong khi thị trường kho lạnh, xe lạnh và container lạnh vẫn còn phân mảnh. Nghiên cứu này cũng cho thấy thị trường logistics lạnh Việt Nam chủ yếu phục vụ cho thực phẩm, nhưng nhiều kho lạnh tự đầu tư quy mô nhỏ có tiêu chuẩn bảo quản và quản lý chưa chuyên nghiệp. Đây là bằng chứng cho thấy nhu cầu logistics lạnh không chỉ nằm ở mở rộng hạ tầng mà còn ở quản trị, tiêu chuẩn hóa và ứng dụng công nghệ giám sát.

Ở cấp độ địa phương, Trần Thị Thắm và

cộng sự [1] khảo sát 212 đối tượng trong chuỗi cung ứng nông sản tại thành phố Cần Thơ, bao gồm nhà cung cấp, nhà phân phối, nhà bán lẻ, doanh nghiệp chế biến và công ty logistics. Kết quả cho thấy chuỗi lạnh nông sản mới chỉ được áp dụng bước đầu; trong nhóm nhà cung cấp, 78,5% chưa biết về chuỗi lạnh, 83% không bảo quản sau thu hoạch và 90,7% vẫn sử dụng phương tiện vận chuyển thông thường. Điều này phản ánh rõ khoảng cách giữa nhu cầu bảo quản lạnh và năng lực triển khai thực tế, đặc biệt ở các hộ sản xuất nhỏ, thương lái và các kênh phân phối truyền thống.

Bên cạnh nông sản, thủy sản là nhóm hàng có yêu cầu nghiêm ngặt hơn về việc duy trì nhiệt độ và truy xuất nguồn gốc. Nghiên cứu về phát triển chuỗi cung ứng lạnh thủy sản tại Đồng bằng sông Cửu Long cho thấy khu vực này đóng góp trên 60% tổng sản lượng thủy sản cả nước, nhưng hạ tầng kho lạnh, vận tải lạnh và trung tâm logistics chuyên dụng còn thiếu đồng bộ; tổn thất sau thu hoạch có thể lên tới 25–30%, đặc biệt trong mùa thu hoạch cao điểm [4]. Nghiên cứu cũng ghi nhận rằng các doanh nghiệp lớn đã bắt đầu ứng dụng IoT, blockchain, GPS/Telemetry, WMS, TMS và ERP, nhưng doanh nghiệp nhỏ và hợp tác xã vẫn khó tiếp cận do chi phí đầu tư cao, thiếu vốn, thiếu nhân lực kỹ thuật và thiếu nền tảng dữ liệu dùng chung.

Về khía cạnh quản trị rủi ro, Trần Thị Thắm, Huỳnh Tấn Phong và Lê Minh Luật [2] đã đề xuất mô hình tích hợp SCOR và DEMATEL nhằm nhận diện và đánh giá rủi ro trong chuỗi cung ứng lạnh nông sản tại Cần Thơ. Nghiên cứu xác định 16 rủi ro trong các khâu hoạch định, nguồn lực, sản xuất, giao hàng và thu hồi; trong đó, rủi ro tăng chi phí vận hành có mức độ quan trọng cao nhất. Các rủi ro như nhiệt độ kho hàng duy trì kém, nhiệt độ vận chuyển và giao nhận không ổn định, hàng hóa hư hỏng trong quá trình phân phối và đứt gãy hệ thống

phân phối cho thấy nhu cầu cấp thiết phải có hệ thống giám sát dữ liệu nhiệt độ, độ ẩm và trạng thái vận hành theo thời gian thực [2].

Một hướng nghiên cứu trong nước khác tập trung vào việc tối ưu hóa vận hành kho lạnh. Đào Trung Quân, Nguyễn Mai Linh và Phạm Thị Mai Phương [5] đề xuất ứng dụng thuật toán FCFS kết hợp Branch and Bound để lập lịch đơn hàng và phân công ca làm trong kho lạnh. Nghiên cứu nhấn mạnh rằng công nghệ mới hiện chủ yếu phổ biến ở các kho lớn, trong khi các kho lạnh nhỏ vẫn quản lý thủ công, gặp khó khăn trong việc lập lịch, điều phối nhân lực và xử lý ùn tắc tại khu vực chờ. Đây là vấn đề quan trọng vì tần suất mở cửa kho, thời gian làm hàng kéo dài và việc lập lịch kém có thể làm tăng tiêu thụ năng lượng, ảnh hưởng đến sự ổn định nhiệt độ và chất lượng hàng hóa [5].

Ở góc độ lựa chọn nhà cung cấp dịch vụ logistics lạnh bền vững, Mai Văn Thành [6] đã sử dụng phương pháp SWARA tích hợp lý thuyết số mờ để xác định 18 yếu tố ảnh hưởng đến quyết định lựa chọn nhà cung cấp tại Việt Nam. Kết quả cho thấy các nhóm yếu tố kinh tế, xã hội, môi trường và công nghệ – dịch vụ đều có ảnh hưởng đáng kể; trong đó, yếu tố “khả năng tích hợp hệ thống số của khách hàng” được bổ sung từ thực tiễn, phản ánh vai trò ngày càng quan trọng của chuyển đổi số, tích hợp dữ liệu và năng lực kết nối hệ thống trong chuỗi lạnh [6].

Trên nền tảng đó, nhiều hướng nghiên cứu đã được phát triển nhằm nâng cao hiệu quả giám sát và quản trị chuỗi lạnh. Một nhóm nghiên cứu tập trung vào mạng cảm biến không dây (Wireless Sensor Network – WSN) và Internet of Things (IoT) nhằm thu thập dữ liệu môi trường theo thời gian thực phục vụ kiểm soát nhiệt độ, độ ẩm và chất lượng sản phẩm trong suốt quá trình vận chuyển và lưu trữ. Qi và cộng sự (2014) đã xây dựng hệ thống hỗ trợ ra quyết định dựa trên WSN nhằm dự

báo hạn sử dụng sản phẩm và tối ưu chiến lược xuất kho theo nguyên tắc “least shelf-life first out” [7]. Xiao và cộng sự (2016) tiếp tục mở rộng hướng tiếp cận này bằng cách kết hợp compressed sensing với WSN nhằm nâng cao hiệu quả truyền dữ liệu và giảm chi phí giám sát đối với các sản phẩm thủy sản đông lạnh [8]. Đến giai đoạn sau, Tsang và cộng sự (2017, 2018) đã phát triển các hệ thống giám sát chuỗi lạnh dựa trên IoT với khả năng theo dõi hàng hóa theo thời gian thực, cảnh báo rủi ro và hỗ trợ vận hành thông minh, cho thấy xu hướng chuyển dịch từ “giám sát dữ liệu” sang “quản trị rủi ro chủ động” trong logistics lạnh [9], [10].

Song song với đó, nhiều nghiên cứu tổng quan gần đây cho thấy lĩnh vực chuỗi lạnh đang phát triển theo hướng tích hợp đa công nghệ như RFID, WSN, IoT, điện toán đám mây, trí tuệ nhân tạo và phân tích dữ liệu lớn. Badia-Melis và cộng sự (2018) đã tổng hợp các xu hướng mới trong giám sát chuỗi lạnh và chỉ ra rằng thách thức lớn nhất hiện nay không còn nằm ở khả năng đo lường nhiệt độ mà ở việc tối ưu hóa vận hành, khả năng chia sẻ dữ liệu và khả năng khai thác dữ liệu phục vụ ra quyết định [11]. Zhao và cộng sự (2018), khi đánh giá thực trạng hệ thống chuỗi lạnh tại Trung Quốc, cũng nhấn mạnh khoảng cách đáng kể giữa nhu cầu logistics lạnh và mức độ sẵn sàng công nghệ ở các quốc gia đang phát triển [12]. Gần đây hơn, Konovalenko và cộng sự (2021) đã đề xuất mô hình dự báo nhiệt độ theo thời gian thực dựa trên định luật làm nguội Newton nhằm nâng cao độ chính xác trong việc kiểm soát nhiệt độ chuỗi lạnh [13]. Trong khi đó, Jiang và cộng sự (2023) ứng dụng thuật toán K-Means++ kết hợp mạng LSTM học sâu để dự báo môi trường vận chuyển nông sản lạnh với độ chính xác cao [14]. Các công trình này cho thấy xu hướng chuyển đổi mạnh mẽ từ hệ thống giám sát phản ứng (reactive monitoring) sang hệ thống giám sát dự báo thông minh

(predictive monitoring) trong quản lý logistics lạnh.

Ngoài bài toán giám sát, nhiều nghiên cứu gần đây còn mở rộng sang truy xuất nguồn gốc và minh bạch dữ liệu chuỗi lạnh. Ahmad và Bailey (2021) tổng quan về vai trò của blockchain trong truy xuất thực phẩm và cho rằng blockchain có tiềm năng nâng cao tính minh bạch, độ tin cậy cũng như khả năng xác thực dữ liệu cảm biến trong chuỗi lạnh [15]. Tương tự, Shamsuzzoha và cộng sự (2024) đã đề xuất hệ thống blockchain phục vụ truy xuất nguồn gốc trong ngành thủy sản bền vững, nhấn mạnh vai trò của truy xuất minh bạch trong xuất khẩu thủy sản và đáp ứng các yêu cầu của tiêu chuẩn quốc tế [16]. Đồng thời, Jara Ochoa và cộng sự (2023) đã chứng minh ưu thế tiết kiệm năng lượng của giao thức MQTT so với HTTP trong giám sát vận chuyển lạnh trong thời gian dài, qua đó mở ra hướng thiết kế các hệ thống IoT chi phí thấp, tiêu thụ điện năng thấp nhưng vẫn bảo đảm khả năng truyền dữ liệu liên tục theo thời gian thực [17].

Tuy nhiên, khi đối chiếu với bối cảnh Việt Nam, có thể nhận thấy một số khe hở đáng chú ý trong nghiên cứu. Thứ nhất, các nghiên cứu trong nước hiện chủ yếu tập trung vào khảo sát thực trạng, đánh giá nhu cầu, nhận diện rủi ro, lựa chọn nhà cung cấp hoặc tối ưu lập lịch kho lạnh; trong khi các mô hình IoT thực nghiệm tích hợp đầy đủ cảm biến, truyền dữ liệu, lưu trữ cơ sở dữ liệu, dashboard giám sát và cảnh báo thời gian thực cho container lạnh vẫn còn hạn chế. Thứ hai, nhiều nghiên cứu đề cập đến vai trò của IoT, WMS, GPS, blockchain hoặc truy xuất nguồn gốc, nhưng chưa đi sâu vào việc thiết kế một kiến trúc IoT chi phí thấp, có khả năng triển khai thử nghiệm trong điều kiện doanh nghiệp vừa và nhỏ hoặc tại cơ sở đào tạo. Thứ ba, các công trình quốc tế thường hướng đến hệ thống thương mại hoặc mô hình thuật toán phức tạp, trong khi nhu cầu tại Việt

Nam đòi hỏi các giải pháp dễ triển khai, trực quan, có thể phục vụ cả giám sát thực tế lẫn đào tạo nguồn nhân lực logistics lạnh. Thứ tư, còn thiếu các mô hình học cụ thể – ảo theo hướng Cyber-Physical System phục vụ đào tạo Problem-Based Learning trong lĩnh vực logistics lạnh, container lạnh và quản lý chuỗi cung ứng số.

Từ các khe hở nêu trên, nghiên cứu này đề xuất phát triển hệ thống IoT giám sát container lạnh theo hướng chi phí hợp lý, trực quan và có khả năng ứng dụng trong đào tạo. Hệ thống hướng đến việc tích hợp cảm biến đo nhiệt độ – độ ẩm, truyền dữ liệu qua mạng không dây/di động, lưu trữ dữ liệu trên nền tảng cơ sở dữ liệu, trực quan hóa bằng Web Dashboard và cảnh báo các trạng thái bất thường. Trọng tâm của nghiên cứu là kiểm chứng kiến trúc IoT-CPS trên mô hình thực nghiệm quy mô nhỏ, không nhằm thay thế hay mô phỏng đầy đủ năng lực vận hành của container lạnh thương mại. Cách tiếp cận này tạo nền tảng thực nghiệm giúp sinh viên ngành logistics, hàng hải và kỹ thuật tiếp cận trực tiếp công nghệ IoT trong bối cảnh Logistics 4.0.

II. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

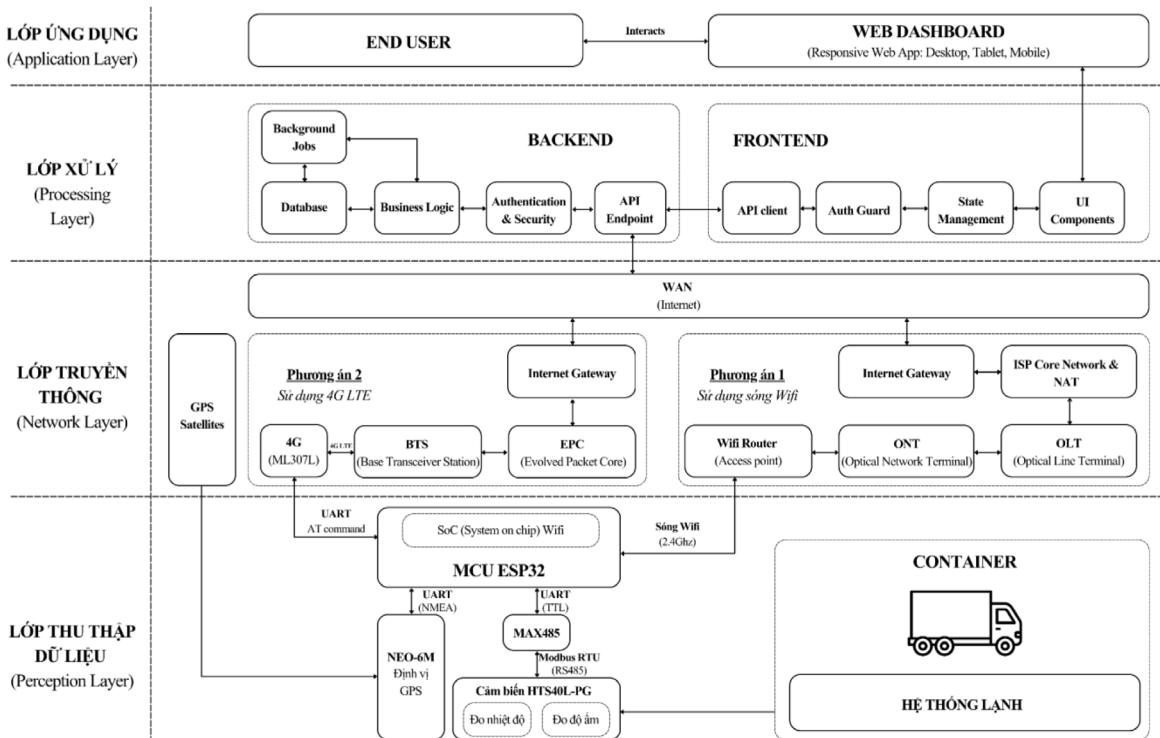
2.1. Kiến trúc tổng thể hệ thống (Tiếp cận theo hệ thống thực - ảo CPS)

Nghiên cứu được phát triển theo hướng bottom-up nhằm xây dựng hệ thống giám sát container lạnh từ lớp thiết bị biên (Edge Devices) đến nền tảng quản trị dữ liệu tập trung trên đám mây (Cloud Platform). Thay vì kế thừa nguyên bản các nền tảng IoT sẵn có, nghiên cứu chủ động đề xuất mô hình IoT bốn lớp dựa trên các yêu cầu triển khai thực tế và đối chiếu với các hướng tiếp cận IoT đã được áp dụng trong giám sát chuỗi lạnh [9], [10].

Dưới góc độ đào tạo, hệ thống được định hướng như một mô hình Cyber-Physical System (CPS), đóng vai trò nền tảng thực hành phục vụ

phương pháp Problem-Based Learning (PBL) trong đào tạo logistics và chuỗi cung ứng lạnh. Về mặt kỹ thuật, kiến trúc tổng thể được tổ chức thành bốn lớp liên kết chặt chẽ gồm: (i) lớp thu thập dữ liệu (Perception Layer) thực hiện đo lường tọa độ và các thông số vi khí hậu thông qua hệ thống cảm biến; (ii) lớp truyền thông (Network Layer) đảm nhiệm truyền dữ

liệu từ thiết bị biên lên máy chủ thông qua mạng viễn thông di động; (iii) lớp xử lý dữ liệu (Processing Layer) thực hiện xác thực, đồng bộ và lưu trữ dữ liệu tập trung; và (iv) lớp ứng dụng (Application Layer) hỗ trợ trực quan hóa dữ liệu và cung cấp giao diện quản trị đa nền tảng theo thời gian thực.



Hình 1. Sơ đồ khối kiến trúc hệ thống giám sát container lạnh theo tiếp cận CPS

2.2. Thiết kế và chế tạo phần cứng IoT

Tại lớp thu thập dữ liệu, thiết bị IoT Node được thiết kế với trung tâm xử lý là vi điều khiển ESP32 nhằm đảm bảo khả năng xử lý dữ liệu và truyền thông không dây theo thời gian thực. Để đáp ứng điều kiện nhiệt độ thấp và độ ẩm cao trong container lạnh, hệ thống sử dụng đầu dò nhiệt độ - độ ẩm công nghiệp có lớp bảo vệ IP67; phần tử đo lõi thuộc họ SHT4x/SHT40 của Sensirion AG [18]. Đầu dò được kết nối với ESP32 thông qua mạch chuyển đổi MAX485 sử dụng giao thức RS485/Modbus

RTU theo cơ chế truyền tín hiệu vi sai nhằm nâng cao khả năng chống nhiễu điện từ và duy trì độ ổn định của tín hiệu truyền dẫn. Kết quả hiệu chuẩn thực nghiệm cho thấy sai số đo nhiệt độ của hệ thống được duy trì trong khoảng $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

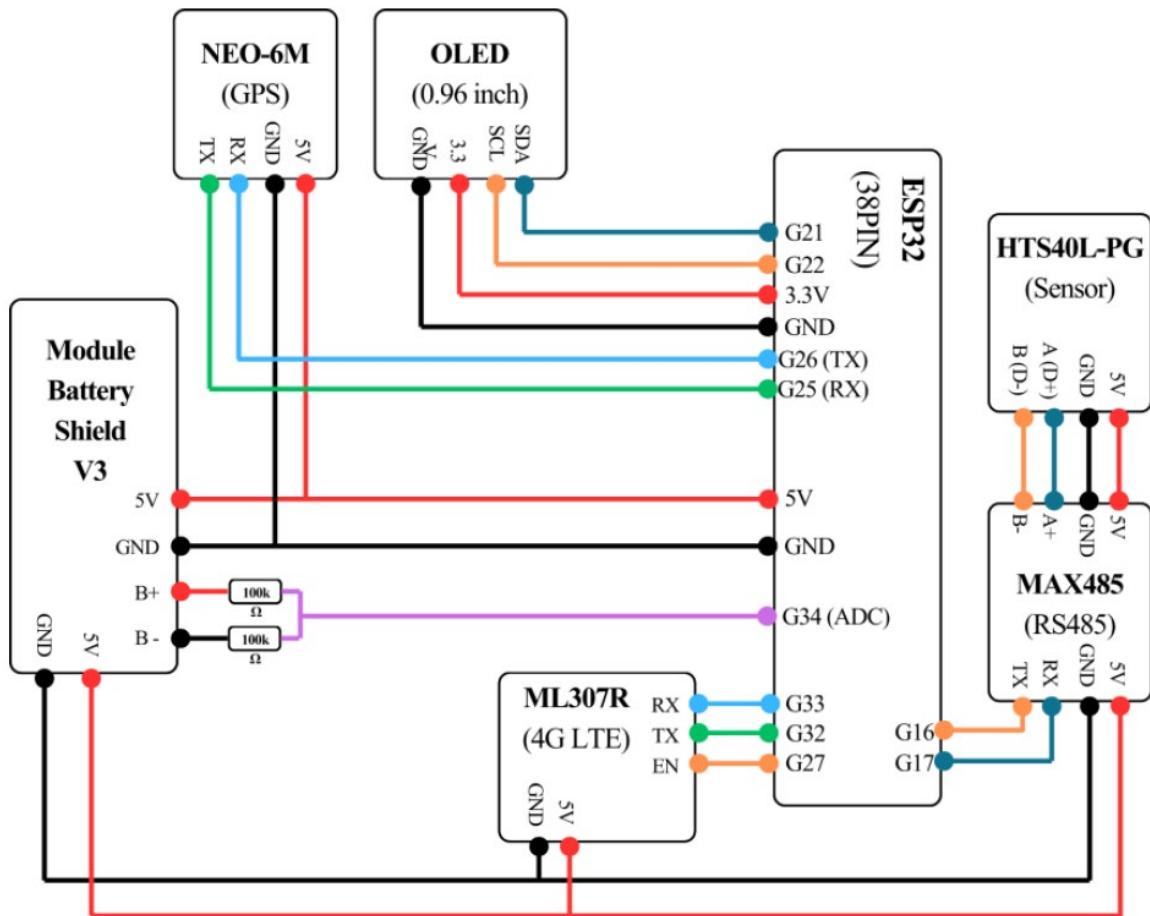
Song song với chức năng giám sát vi khí hậu, hệ thống tích hợp mô-đun định vị GPS NEO-6M của u-blox AG [19] nhằm theo dõi hành trình vận chuyển với sai số định vị khoảng 2,5 m trong điều kiện thu tín hiệu thuận lợi. Dữ liệu sau khi được xử lý và đóng gói được truyền

về máy chủ thông qua hạ tầng Internet sử dụng mô-đun truyền thông 4G LTE ML307R-DL [20]. Để đáp ứng yêu cầu vận hành linh hoạt trong quá trình vận tải, toàn bộ hệ thống phần cứng được cấp nguồn bởi mạch Battery Shield

V3, kết hợp hai pin lithium-ion 18650 mắc song song với tổng dung lượng khoảng 6000 mAh, cho phép hệ thống hoạt động liên tục trong khoảng 8 giờ ở chế độ tải cao, với chu kỳ truyền dữ liệu 6 giây/lần.

Bảng 1. Cấu hình phần cứng chính của IoT Node

Thành phần	Chức năng	Thông số/nguồn tham chiếu
ESP32	Xử lý dữ liệu tại biên	Vi điều khiển tích hợp Wi-Fi/Bluetooth
Đầu dò SHT40	Đo nhiệt độ và độ ẩm	Phần tử cảm biến SHT4x/SHT40; sai số hệ thống thực nghiệm $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ [18]
GPS NEO-6M	Định vị hành trình	Sai số định vị khoảng 2,5 m trong điều kiện thuận lợi [19]
ML307R-DL	Truyền dữ liệu 4G LTE	LTE Cat.1, tài liệu kỹ thuật ML307R-DL [20]
Pin 18650 x 2	Cấp nguồn di động	Tổng dung lượng khoảng 6000 mAh; vận hành khoảng 8 giờ trong điều kiện hoạt động ở mức tải cao (truyền dữ liệu liên tục).



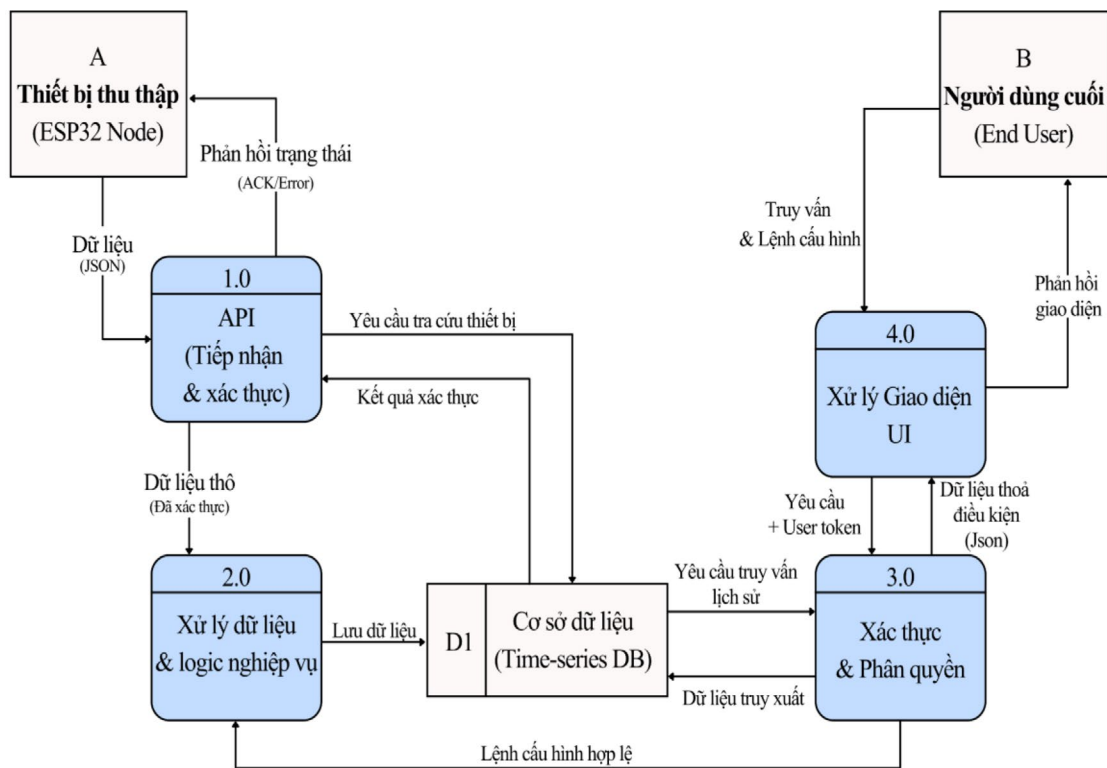
Hình 2. Sơ đồ kết nối phần cứng của thiết bị thu thập dữ liệu (IoT Node)

2.3. Thiết kế phần mềm và cấu trúc cơ sở dữ liệu

Hệ thống phần mềm được triển khai theo kiến trúc Client-Server nhằm hỗ trợ giám sát và quản trị dữ liệu theo thời gian thực trong chuỗi vận chuyển container lạnh. Tại lớp truyền tải dữ liệu, theo kết quả nghiên cứu của Jara Ochoa và cộng sự [17], HTTP POST tiêu tốn nhiều năng lượng hơn MQTT do thiết bị phải lập lại kết nối TCP. Dù vậy, nghiên cứu vẫn chọn HTTP POST để đơn giản hóa quá trình tích hợp Web API theo kiến trúc RESTful và phù hợp với mục tiêu đào tạo sinh viên.

Lược đồ cơ sở dữ liệu được tối ưu cho dữ liệu chuỗi thời gian (time-series data), đáp ứng yêu cầu lưu vết, truy xuất và phân tích dữ liệu vận hành; đồng thời có thể tham chiếu đến các yêu cầu lưu giữ hồ sơ truy xuất trong FDA FSMA 204 [21].

Ở phía máy khách (Frontend), hệ thống được phát triển dựa trên kiến trúc Single-Page Application (SPA), cung cấp Web Dashboard đa nền tảng nhằm trực quan hóa dữ liệu nhiệt độ theo thời gian thực và hiển thị bản đồ hành trình vận chuyển số hóa của container lưu trữ lạnh.



Hình 3. Sơ đồ luồng dữ liệu mức 1 (Level 1 DFD) của hệ thống phần mềm

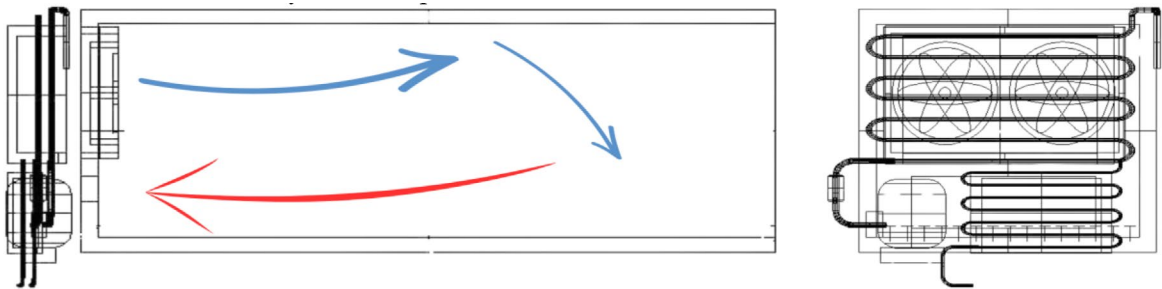
2.4. Thiết kế và gia công mô hình container lạnh

Nhằm mô phỏng một số đặc trưng cơ bản của container lạnh trong điều kiện phòng thí nghiệm, mô hình vật lý được chế tạo theo tỷ lệ 1:5 dựa trên hình dạng và nguyên lý kết cấu của container lạnh 20 feet theo tiêu chuẩn ISO

1496-2 [22], với kích thước tổng thể 1,212 m x 0,488 m x 0,518 m. Về mặt kết cấu, vỏ container được chế tạo bằng vật liệu inox 304 kết hợp với lớp cách nhiệt polyurethane (PU) dày 3 cm nhằm nâng cao khả năng cách nhiệt và hạn chế hiện tượng cầu nhiệt tại các vị trí liên kết.

Hệ thống làm lạnh của mô hình sử dụng máy nén kín (Hermetic Compressor) kết hợp với môi chất lạnh R134A. Quá trình tuần hoàn khí lạnh được thiết kế theo nguyên lý phân phối khí lạnh từ phía trên (Top Air Delivery), tham khảo cấu trúc vận hành của container lạnh thực tế, nhưng được giản lược để phù hợp với mô hình thực nghiệm quy mô nhỏ. Trong quá trình hoạt động, quạt

hướng trục tạo luồng khí lạnh dọc theo phần trần container; luồng khí sau đó khuếch tán xuống không gian chứa hàng nhờ cơ chế đối lưu cưỡng bức, giúp hấp thụ nhiệt từ môi trường bên trong. Cuối cùng, không khí được thu hồi thông qua khe hồi khí bố trí gần mặt sàn và được đưa trở lại dàn bay hơi để tiếp tục chu trình làm lạnh tuần hoàn.



Hình 4. Bản vẽ thiết kế mặt cắt container và nguyên lý luồng khí đối lưu

2.5. Quy trình thu thập, đóng gói JSON và xử lý dữ liệu tại biên

Tại khối vi điều khiển trung tâm, hệ điều hành thời gian thực FreeRTOS được triển khai nhằm quản lý đa nhiệm các quá trình thu thập và xử lý dữ liệu từ các thiết bị ngoại vi. Giải pháp này giúp hạn chế hiện tượng blocking trong quá trình xử lý khi mô-đun truyền thông 4G phải chờ phản hồi từ mạng viễn thông, qua đó nâng cao tính ổn định của hệ thống IoT Node.

Dữ liệu thô thu thập từ cảm biến được xử lý thông qua bộ lọc nhiễu số trước khi tiến hành chuẩn hóa. Để tối ưu băng thông truyền dẫn và giảm chi phí sử dụng mạng di động 4G, các trường dữ liệu được mã hóa dưới dạng Minified JSON nhằm giảm kích thước gói tin truyền tải. Hệ thống được cấu hình với chu kỳ lấy mẫu và truyền dữ liệu mặc định là 60 giây/lần (có thể thay đổi trong cấu hình thiết bị, tốc độ lấy mẫu tối đa 5 giây/

lần), đáp ứng yêu cầu giám sát theo thời gian thực trong quá trình vận chuyển container lạnh.

2.6. Điều kiện thực nghiệm và phương pháp đánh giá

Nhằm kiểm chứng tính khả thi và độ tin cậy của hệ thống IoT-CPS, mô hình được đưa vào vận hành thực nghiệm trong điều kiện nhiệt độ thấp, với nhiệt độ khoảng lạnh khoảng 6 °C. Mức nhiệt này được xác định là điều kiện vận hành của mô hình thực nghiệm quy mô nhỏ, nhằm phục vụ việc đánh giá khả năng thu thập, truyền dẫn và trực quan hóa dữ liệu. Việc thiết lập nhiệt độ thực nghiệm ở mức khoảng 6°C xuất phát từ đặc tính kỹ thuật và giới hạn công suất của mô hình thu nhỏ (máy nén công suất nhỏ, môi chất lạnh R134A); trong điều kiện này, 6°C là nhiệt độ thấp nhất mà hệ thống có thể duy trì ổn định. Về mặt ứng dụng thực tiễn, mức 6°C đại diện cho dải nhiệt độ bảo quản mát tiêu

chuẩn ($2-8^{\circ}\text{C}$), được áp dụng phổ biến trong vận chuyển nông sản tươi, rau quả và dược phẩm. Đồng thời, sự chênh lệch nhiệt độ giữa khoang lạnh và môi trường làm tăng độ ẩm, tạo điều kiện dễ đánh giá độ ổn định của cảm biến. Dữ liệu được cập nhật liên tục trên màn hình cũng giúp hình thành một mô hình trực quan cho người học. Do đó, mức nhiệt này không được xem là ngưỡng đại diện cho toàn bộ điều kiện vận hành của container lạnh thương mại (như các dải đông lạnh sâu) mà phù hợp với mục tiêu của một mô hình học cụ. Nghiên cứu áp dụng phương pháp đánh giá định lượng để phân tích 4 chỉ tiêu kỹ thuật chính của hệ thống IoT.

(1) Sai số đo lường (Measurement Accuracy): Giá trị nhiệt độ thu thập từ đầu dò sử dụng phần tử cảm biến SHT40 [18] và dữ liệu tọa độ từ mô-đun GPS NEO-6M [19] được đối chiếu với các thiết bị đo kiểm chuẩn để đánh giá độ chính xác của hệ thống.

(2) **Độ trễ truyền dẫn (Latency):** Thời gian truyền dữ liệu được xác định bằng khoảng thời gian tính theo mili-giây từ thời điểm thiết bị biên gửi yêu cầu HTTP POST chứa dữ liệu JSON đến khi máy chủ phản hồi với mã trạng thái “200 OK”.

(3) **Tỷ lệ mất gói tin (Packet Loss):** Chỉ tiêu này được xác định dựa trên tỷ lệ phần trăm số gói dữ liệu không nhận được phản hồi hoặc gặp lỗi truyền dẫn trên tổng số lượt truyền dữ liệu ở tầng ứng dụng.

(4) **Thời lượng pin (Battery Lifetime):** Hiệu quả tiêu thụ năng lượng của thiết bị được đánh giá thông qua thời gian vận hành liên tục, tính từ khi pin được sạc đầy đến khi điện áp đạt ngưỡng ngắt nguồn. Trong phép thử báo cáo, thiết bị được vận hành ở chế độ tải cao với chu kỳ lấy mẫu và truyền dữ liệu 6 giây/lần; cấu hình vận hành mặc định của hệ thống là 60 giây/lần.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả chế tạo thực tế thiết bị IoT và mô hình container

Hệ thống giám sát IoT và mô hình container lạnh đã được chế tạo và đưa vào vận hành thực nghiệm nhằm đánh giá khả năng hoạt động của kiến trúc IoT-CPS trong điều kiện nhiệt độ thấp. Khối thiết bị IoT được tích hợp hoàn chỉnh với vi điều khiển ESP32, mô-đun định vị GPS NEO-6M và mô-đun truyền thông 4G LTE ML307R-DL. Toàn bộ cụm thiết bị được bố trí trong hộp kỹ thuật chuyên dụng lắp đặt bên ngoài container nhằm thuận tiện cho quá trình bảo trì và hạn chế ảnh hưởng từ môi trường nhiệt độ thấp bên trong khoang lạnh.

Đầu dò nhiệt độ - độ ẩm sử dụng phần tử cảm biến SHT40 được kết nối với hệ thống thông qua cáp tín hiệu đi xuyên qua lớp cách nhiệt tại vị trí chuyên dụng nhằm giảm thiểu thất thoát nhiệt và duy trì độ ổn định của môi trường lạnh bên trong khoang.

Về mặt cơ khí, mô hình container lạnh tỷ lệ 1:5 được chế tạo bằng vật liệu inox 304 kết hợp với lớp cách nhiệt polyurethane (PU) dày 3 cm. Kết cấu này giúp tăng khả năng cách nhiệt và hạn chế sự truyền nhiệt qua thành vách của container. Hệ thống làm lạnh sử dụng máy nén kín kết hợp với môi chất lạnh R134A, cho phép mô hình đạt nhiệt độ ổn định thấp nhất duy trì khoảng 6°C trong điều kiện thử nghiệm. Đây là mức nhiệt phù hợp với dải nhiệt độ bảo quản mát trong thực tế, đáp ứng tốt mục tiêu kiểm chứng hệ thống giám sát trên mô hình học cụ thực nghiệm quy mô nhỏ.

Kết quả thực nghiệm ban đầu cho thấy mô hình có khả năng vận hành ổn định ở quy mô thử nghiệm, đáp ứng yêu cầu kiểm chứng chức năng giám sát IoT-CPS và phục vụ nghiên cứu, đào tạo trong lĩnh vực logistics lạnh và chuỗi cung ứng lạnh.



Hình 5. Mô hình container lạnh thực tế (trái) và cận cảnh cụm thiết bị IoT (phải)

3.2. Đánh giá độ ổn định và sai số thực nghiệm của các thông số

Để đánh giá độ tin cậy của hệ thống đo lường, mô hình được vận hành liên tục trong điều kiện nhiệt độ thấp, với nhiệt độ khoảng lạnh duy trì ổn định khoảng 6°C . Kết quả thực nghiệm cho thấy đầu dò nhiệt độ - độ ẩm sử dụng phần tử cảm biến SHT40 với lớp bảo vệ IP67 duy trì độ ổn định trong môi trường có độ ẩm cao và xuất hiện hiện tượng ngưng tụ sương, phù hợp với các đặc tính kỹ thuật do Sensirion AG công bố [18]. Nhờ sử dụng giao tiếp vi sai RS485/Modbus RTU, ảnh hưởng của nhiễu điện từ trong quá trình truyền tín hiệu được giảm đáng kể.

Khi đối chiếu với nhiệt kế thủy ngân chuẩn, sai số nhiệt độ của toàn hệ thống dao động trong khoảng $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Mức sai số này được xem là phù hợp trong điều kiện vận hành thực tế. Mặc dù độ chính xác danh định của phần tử cảm biến SHT40 trong môi trường lý tưởng có thể đạt đến $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ [18], sai số thực nghiệm $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ phản ánh ảnh hưởng tổng hợp của các yếu tố vận hành như độ trễ nhiệt của lớp bảo vệ IP67,

hiện tượng đối lưu liên tục của luồng khí lạnh và điều kiện ngưng tụ ẩm bên trong container. Đồng thời, khả năng giám sát liên tục nhiệt độ của hệ thống phù hợp với nguyên tắc theo dõi, kiểm soát nhiệt độ trong quản lý an toàn thực phẩm theo HACCP/Codex Alimentarius Commission [23].

Về khả năng định vị, kết quả thực nghiệm cho thấy mô-đun GPS NEO-6M cần khoảng 5-10 phút để hoàn tất quá trình tải dữ liệu thiên văn (ephemeris data) và xác lập kết nối vệ tinh ban đầu trong trạng thái khởi động lạnh (cold start). Khi chuyển sang chế độ theo dõi liên tục, sai số định vị bán kính đạt khoảng 2,5 m trong điều kiện môi trường lý tưởng, tương đương với thông số do nhà sản xuất công bố [19].

Tuy nhiên, trong điều kiện vận hành thực tế, hệ thống đôi lúc xuất hiện hiện tượng lệch tọa độ với độ sai lệch tối đa khoảng 15 m. Giới hạn này xuất phát từ 2 nguyên nhân kỹ thuật cốt lõi. Thứ nhất là hiện tượng nhiễu đa đường (multipath effect) của các mô-đun định vị sử dụng băng tần đơn L1 [24]. Tín hiệu vệ tinh bị phản xạ qua vật cản, làm kéo dài thời gian lan

truyền sóng và gây sai số trong quá trình tính toán. Thứ hai là ảnh hưởng của nhiễu điện từ, do tính chất thu nhỏ của mô hình học cụ, thiết bị IoT được bố trí gần hệ thống cơ điện. Trong quá trình vận hành, việc đóng/ngắt của các thiết bị máy nén, dàn nóng sinh ra xung nhiễu và dao động điện áp, tác động trực tiếp đến mô-đun NEO-6M vốn không được bọc màng

chống nhiễu chuyên dụng như các thiết bị công nghiệp. Việc phân tích rõ các hiện tượng nhiễu vật lý và cơ điện này cung cấp bài học thực tiễn rất giá trị cho sinh viên khi triển khai hệ thống IoT. Mặc dù vậy, với ứng dụng giám sát quỹ đạo vĩ mô (vận tải liên tỉnh), mức sai số cục bộ này không làm đứt gãy tính liên tục của hành trình tổng thể.

Bảng 2. Tổng hợp chỉ tiêu thực nghiệm chính của hệ thống

Chỉ tiêu	Kết quả ghi nhận	Ý nghĩa đánh giá
Sai số nhiệt độ	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	Phù hợp điều kiện vận hành của mô hình thực nghiệm quy mô nhỏ ở khoảng 6°C
Sai số định vị GPS	Khoảng 2,5 m; drift tối đa khoảng 15 m	Đáp ứng yêu cầu theo dõi quỹ đạo vận chuyển liên tỉnh
Độ trễ truyền dẫn	200-300 ms	Đáp ứng yêu cầu giám sát và cảnh báo trong phạm vi mô hình thực nghiệm
Tỷ lệ mất gói tin	< 1%	Cho thấy truyền dữ liệu ổn định ở tầng ứng dụng
Thời lượng pin	Khoảng 8 giờ	Thiết bị hoạt động trong điều kiện tải cao (truyền dữ liệu liên tục). Phù hợp với các bài thử nghiệm và tình huống mô phỏng vận chuyển ngắn hạn.

3.3. Hiệu suất truyền dẫn và trực quan hóa dữ liệu trên Web Dashboard

Dữ liệu thu thập từ thiết bị IoT được mã hóa dưới định dạng Minified JSON và truyền về máy chủ PostgreSQL với chu kỳ cập nhật 60 giây/lần. Mặc dù hệ thống sử dụng giao thức HTTP POST - yêu cầu quá trình thiết lập kết nối TCP thông qua cơ chế three-way handshake - việc truyền dữ liệu trên hạ tầng mạng 4G LTE Cat.1 sử dụng mô-đun ML307R-DL [20] vẫn cho hiệu năng truyền dẫn ổn định trong quá trình thực nghiệm.

Độ trễ truyền dẫn (Latency)

Thời gian trung bình từ khi thiết bị gửi yêu cầu HTTP POST đến khi nhận phản hồi “200 OK” từ máy chủ được ghi nhận dưới 300 ms. Kết quả này cho thấy hệ thống đáp ứng yêu cầu giám sát và cảnh báo theo thời gian thực trong phạm vi mô hình thực nghiệm và các tình huống đào tạo Logistics 4.0.

Tỷ lệ mất gói tin (Packet Loss)

Nhờ sử dụng cơ chế truyền tải dựa trên giao thức TCP, tỷ lệ mất gói tin ở tầng ứng dụng được duy trì dưới 1%. Điều này cho thấy tính ổn định cao của hệ thống trong điều kiện truyền dữ liệu qua mạng viễn thông di động.

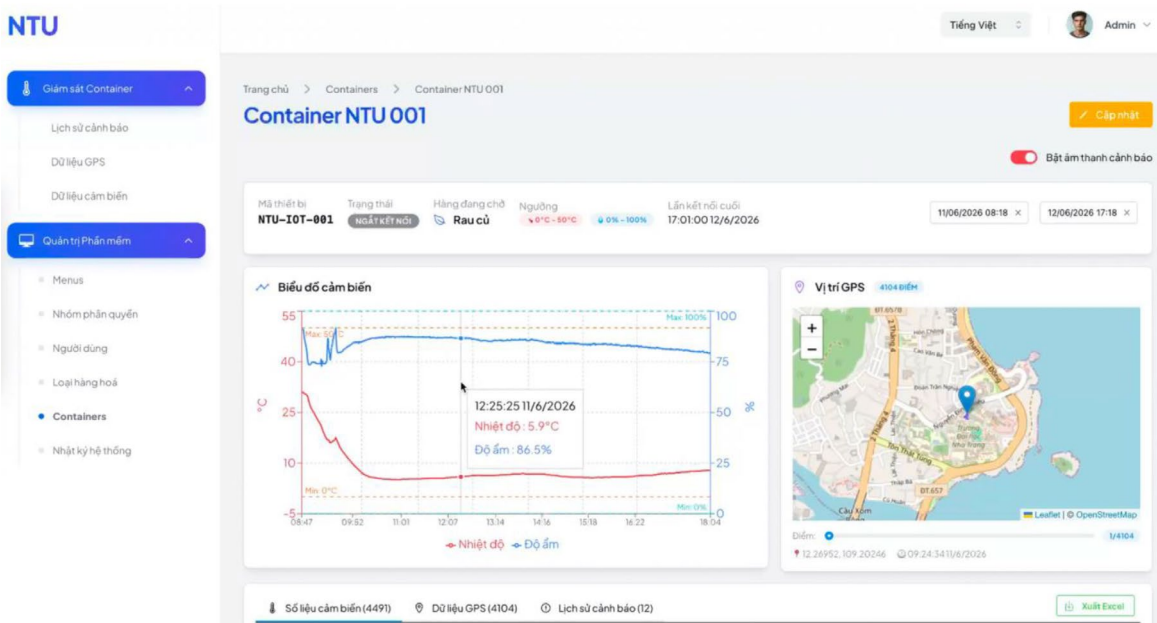
Thời lượng hoạt động của pin (Battery Lifetime)

Thiết bị IoT được cấp nguồn bởi mạch Battery Shield V3, kết hợp 2 pin lithium-ion 18650 mắc song song với tổng dung lượng khoảng 6000 mAh. Trong thử nghiệm đánh giá thời lượng pin, thiết bị được vận hành ở chế độ tải cao với chu kỳ truyền dữ liệu 6 giây/lần; hệ thống duy trì hoạt động liên tục trong khoảng 8 giờ. Kết quả này cho thấy thiết bị có khả năng vận hành độc lập trong các bài thử nghiệm và các tình huống mô phỏng vận chuyển trong thời gian ngắn.

Khả năng trực quan hóa dữ liệu

Tại lớp ứng dụng, Web Dashboard được phát triển theo kiến trúc Single-Page Application (SPA), cho phép trực quan hóa dữ liệu nhiệt độ và độ ẩm theo thời gian thực dưới dạng biểu đồ

chuỗi thời gian, đồng thời cập nhật liên tục quỹ đạo GPS của container lạnh trên nền tảng bản đồ số. Hệ thống hỗ trợ truy cập đa nền tảng trên máy tính cá nhân, máy tính bảng và điện thoại thông minh.



Hình 6. Giao diện trực quan hóa thông số trên Web Dashboard

3.4. Thảo luận về khả năng ứng dụng mô hình làm nền tảng đào tạo liên ngành

Bên cạnh các giá trị kỹ thuật, nghiên cứu còn cung cấp một nền tảng Cyber-Physical System (CPS) phục vụ đào tạo trong lĩnh vực logistics lạnh và các hệ thống IoT ứng dụng. Khác với các phương pháp mô phỏng thuần túy, mô hình thực nghiệm cho phép kết nối trực tiếp giữa môi trường vật lý và hệ thống số hóa, qua đó hỗ trợ triển khai phương pháp Problem-Based Learning (PBL) trong đào tạo Logistics 4.0.

Trên nền tảng hệ thống đã được phát triển, sinh viên khối kỹ thuật có thể tiếp cận và thực hành với các thành phần phần cứng, giao thức truyền thông IoT và kiến trúc hệ thống nhúng, phù hợp với định hướng phát triển kỹ năng số trong bối cảnh Logistics 4.0. Đồng thời, sinh viên thuộc lĩnh vực logistics và chuỗi cung ứng có khả năng khai thác dữ liệu chuỗi thời gian từ

hệ thống để thiết lập ngưỡng an toàn hàng hóa, phân tích điều kiện vận chuyển, tối ưu hóa hành trình và hỗ trợ ra quyết định quản trị rủi ro trong chuỗi lạnh.

Kết quả này cho thấy mô hình đóng vai trò là hệ thống giám sát container lạnh thực nghiệm và là nền tảng đào tạo liên ngành, góp phần hỗ trợ phát triển kỹ năng số và tư duy Logistics 4.0 trong giáo dục đại học. Mô hình không được định vị như một giải pháp thay thế container lạnh thương mại mà là một công cụ kiểm chứng nguyên lý và phục vụ thực hành.

3.5. So sánh hiệu quả chi phí và tính năng với các giải pháp thương mại

Khi đối chiếu với các giải pháp giám sát chuỗi lạnh thương mại hiện nay, tài liệu sản phẩm của Zebra Technologies [25] cho thấy các thiết bị như Zebra ZS300 được phát triển như giải pháp cảm biến thương mại cấp kiện hàng,

đi kèm nền tảng quản lý và dịch vụ hỗ trợ từ nhà cung cấp. Tương tự, các hệ thống giám sát container lạnh như Maersk Remote Container Management (RCM) được phát triển theo kiến trúc proprietary, phụ thuộc vào nền tảng quản trị và hệ sinh thái dịch vụ của nhà cung cấp [26].

So với các giải pháp thương mại này, hệ thống được đề xuất trong nghiên cứu cho thấy tính khả thi kinh tế ở cấp độ mô hình thử nghiệm khi tổng chi phí phần cứng của một IoT Node chỉ dao động trong khoảng 80–120 USD. Bên cạnh yếu tố chi phí, kiến trúc mã nguồn mở của hệ thống cho phép cơ sở đào tạo, nhóm nghiên cứu và doanh nghiệp nhỏ chủ động quản lý dữ liệu vận hành trong các thử nghiệm mà không

phụ thuộc hoàn toàn vào các gói dịch vụ thuê bao (subscription-based services) từ bên thứ ba.

Ngoài ra, khả năng tùy biến kiến trúc phần mềm và phần cứng cũng tạo điều kiện thuận lợi cho hoạt động nghiên cứu, đào tạo và mở rộng hệ thống theo các nhu cầu ứng dụng khác nhau trong lĩnh vực logistics lạnh và chuỗi cung ứng số. Tuy nhiên, hệ thống hiện mới được triển khai ở quy mô mô hình thực nghiệm, đạt nhiệt độ duy trì ổn định thấp nhất khoảng 6°C và chưa được đánh giá trên container lạnh thương mại trong thời gian vận hành dài hạn. Đây sẽ là hướng nghiên cứu tiếp theo nhằm hoàn thiện tính sẵn sàng triển khai thực tế của hệ thống.

Bảng 3. So sánh hệ thống đề xuất với một số giải pháp thương mại

Tiêu chí	Hệ thống đề xuất	Zebra ZS300	Maersk RCM
Mức triển khai	Mô hình mở, phục vụ kiểm chứng IoT-CPS, đào tạo và thử nghiệm quy mô nhỏ	Thiết bị thương mại cấp kiện hàng [25]	Nền tảng thương mại cho container lạnh [26]
Chi phí phần cứng	Khoảng 80-120 USD/IoT Node	Tùy gói thiết bị và dịch vụ	Phụ thuộc hệ sinh thái dịch vụ
Khả năng tùy biến	Cao, kiến trúc mở	Hạn chế theo cấu hình nhà cung cấp	Hạn chế do kiến trúc proprietary
Dữ liệu vận hành	Tự quản trị trên hệ thống của người dùng	Phụ thuộc nền tảng nhà cung cấp	Phụ thuộc nền tảng Maersk
Giá trị đào tạo	Cao, hỗ trợ kiểm chứng IoT-CPS và đào tạo Logistics 4.0 theo PBL	Không định hướng đào tạo	Không định hướng đào tạo

IV. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

4.1. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất và phát triển một hệ thống IoT phục vụ giám sát chuỗi cung ứng lạnh dựa trên mô hình kiến trúc bốn lớp. Hệ thống tích hợp các thành phần phần cứng gồm vi điều khiển ESP32, đầu dò nhiệt độ - độ ẩm sử dụng cảm biến SHT40, mô-đun định vị GPS NEO-6M và mô-đun truyền thông 4G LTE nhằm thu thập dữ liệu vi khí hậu và hành trình vận chuyển theo thời gian thực. Dữ liệu được lưu trữ tập trung trên nền tảng PostgreSQL và được

trực quan hóa thông qua Web Dashboard đa nền tảng, góp phần kiểm chứng kiến trúc giám sát container lạnh theo tiếp cận IoT-CPS ở quy mô thực nghiệm nhỏ.

Kết quả thực nghiệm trên mô hình container lạnh vật lý tỷ lệ 1:5, sử dụng kết cấu inox 304 kết hợp với lớp cách nhiệt polyurethane (PU), cho thấy hệ thống duy trì hoạt động ổn định trong điều kiện nhiệt độ thấp, với nhiệt độ khoang lạnh đạt khoảng 6°C. Các chỉ tiêu kỹ thuật ghi nhận gồm độ trễ truyền dẫn 200-300 ms, tỷ lệ mất gói tin dưới 1% và thời lượng hoạt động

liên tục khoảng 8 giờ trong điều kiện tải cao, với chu kỳ truyền dữ liệu 6 giây/lần thay vì cấu hình mặc định 60 giây/lần. Các kết quả này cho thấy hệ thống đáp ứng yêu cầu kiểm chứng chức năng giám sát thời gian thực trong mô hình thực nghiệm và phục vụ đào tạo Logistics 4.0.

Bên cạnh giá trị kỹ thuật, nghiên cứu còn xây dựng một nền tảng Cyber-Physical System (CPS) phục vụ đào tạo liên ngành trong lĩnh vực logistics và kỹ thuật IoT. Hệ thống hỗ trợ triển khai phương pháp Problem-Based Learning (PBL), tạo điều kiện cho sinh viên tiếp cận đồng thời các nội dung về phần cứng nhúng, truyền thông IoT, xử lý dữ liệu thời gian thực và quản trị chuỗi cung ứng lạnh trong môi trường thực nghiệm trực quan.

4.2. Kiến nghị và hướng phát triển

Để nâng cao khả năng ứng dụng thực tiễn và tiệm cận các tiêu chuẩn công nghiệp, nghiên cứu đề xuất một số hướng phát triển tiếp theo.

Thứ nhất, hệ thống có thể được mở rộng theo hướng tích hợp trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence – AI) và phân tích dữ liệu lớn (Big

Data Analytics) nhằm xây dựng cơ chế bảo trì dự báo (Predictive Maintenance) và cảnh báo sớm rủi ro nhiệt độ trong chuỗi lạnh dựa trên dữ liệu chuỗi thời gian.

Thứ hai, cần triển khai thử nghiệm hệ thống trên các container lạnh đang hoạt động thực tế nhằm đánh giá độ bền cơ học của thiết bị, tính ổn định của truyền thông 4G LTE, khả năng vận hành liên tục dưới tác động của rung động trong vận tải đường bộ và đường biển, cũng như khả năng đáp ứng các dải nhiệt độ vận hành rộng hơn của container lạnh thương mại.

Ngoài ra, nghiên cứu trong tương lai có thể mở rộng sang các hướng như tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ của IoT Node, tích hợp giao thức MQTT cho truyền thông thời gian thực và ứng dụng blockchain nhằm tăng cường khả năng truy xuất nguồn gốc dữ liệu trong chuỗi cung ứng lạnh.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi nguồn ngân sách khoa học và công nghệ của Trường Đại học Nha Trang trong đề tài mã số TR2025-13-64

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Thắm, T. T., Thường, L. M., Nghĩa, L., & Trinh, N. Đ. (2021). Khảo sát thực trạng áp dụng chuỗi cung ứng lạnh nông sản (mật hàng rau, củ, quả) tại thành phố Cần Thơ. *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 57(5), 292–303. <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2021.166>
- [2]. Trần, T. T., Huỳnh, T. P., & Lê, M. L. (2024). Mô hình tích hợp SCOR và DEMATEL để đánh giá rủi ro trong chuỗi cung ứng lạnh nông sản. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 66(10), 1-7. [https://doi.org/10.31276/VJST.66\(10\).01-07](https://doi.org/10.31276/VJST.66(10).01-07)
- [3]. Bùi, T. B. L. (2020). Nhu cầu logistics lạnh đối với hàng nông sản Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông Vận tải*, 35, 96-101.
- [4]. Chu, T. H., Bùi, T. T., Vòng, T. N., & Nguyễn, H. A. V. (2026, February 27). Phát triển chuỗi cung ứng lạnh để nâng cao giá trị thủy sản tại Đồng bằng sông Cửu Long. *Nghiên cứu Kinh tế - Tài chính Online*, 203. <https://nghiencuu.tapchikinhjetaichinh.vn/phat-trien-chuoi-cung-ung-lanh-de-nang-cao-gia-tri-thuy-san-tai-dong-bang-song-cuu-long-149413.html>
- [5]. Đào, T. Q., Nguyễn, M. L., & Phạm, T. M. P. (2025). Ứng dụng thuật toán FCFS và thuật toán nhánh cận trong bài toán lập lịch kho lạnh. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải*, 83, 234-238.
- [6]. Mai, V. T. (2025). Các yếu tố ảnh hưởng đến việc lựa chọn nhà cung cấp dịch vụ logistics chuỗi lạnh bền vững tại Việt Nam. *Tạp chí Công Thương*. <https://tapchicongthuong.vn/cac-yeu-to-anh-huong-den-viec-lua-chon-nha-cung-cap-dich-vu-logistics-chuoi-lanh-ben-vung-tai-viet-nam-306417.htm>
- [7]. Qi, L., Xu, M., Fu, Z., Mira, T., & Zhang, X. (2014). C2SLDS: A WSN-based perishable food shelf-life prediction and LSFO strategy decision support system in cold chain logistics. *Food Control*, 38, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.09.023>
- [8]. Xiao, X., He, Q., Fu, Z., Xu, M., & Zhang, X. (2016). Applying CS and WSN methods for improving efficiency of frozen and chilled aquatic products monitoring system in cold chain logistics. *Food Control*, 60,

- 656-666. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.012>
- [9]. Tsang, Y. P., Choy, K. L., Wu, C. H., Ho, G. T. S., Lam, H. Y., & Koo, P. S. (2017). An IoT-based cargo monitoring system for enhancing operational effectiveness under a cold chain environment. *International Journal of Engineering Business Management*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.1177/1847979017749063>
- [10]. Tsang, Y. P., Choy, K. L., Wu, C. H., Ho, G. T. S., Lam, C. H. Y., & Koo, P. S. (2018). An Internet of Things (IoT)-based risk monitoring system for managing cold supply chain risks. *Industrial Management & Data Systems*, 118(7), 1432-1462. <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2017-0384>
- [11]. Badia-Melis, R., McCarthy, U., Ruiz-García, L., García-Hierro, J., & Robla Villalba, J. I. (2018). New trends in cold chain monitoring applications: A review. *Food Control*, 86, 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.11.022>
- [12]. Zhao, H., Liu, S., Tian, C., Yan, G., & Wang, D. (2018). An overview of current status of cold chain in China. *International Journal of Refrigeration*, 88, 483-495. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.02.024>
- [13]. Konovalenko, I., Ludwig, A., & Leopold, H. (2021). Real-time temperature prediction in a cold supply chain based on Newton's law of cooling. *Decision Support Systems*, 141, 113451. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2020.113451>
- [14]. Jiang, J., Peng, C., Liu, W., Liu, S., Luo, Z., & Chen, N. (2023). Environmental prediction in cold chain transportation of agricultural products based on K-Means++ and LSTM neural network. *Processes*, 11(3), 776. <https://doi.org/10.3390/pr11030776>
- [15]. Ahmad, A., & Bailey, K. (2021). Blockchain in food traceability: A systematic literature review. In *2021 32nd Irish Signals and Systems Conference (ISSC)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISSC52156.2021.9467848>
- [16]. Shamsuzzoha, A., Marttila, J., & Helo, P. (2024). Blockchain-enabled traceability system for the sustainable seafood industry. *Technology Analysis & Strategic Management*, 36(11), 3891-3905. <https://doi.org/10.1080/09537325.2023.2233632>
- [17]. Jara Ochoa, H. J., Peña, R., Ledo Mezquita, Y., González, E., & Camacho-León, S. (2023). Comparative analysis of power consumption between MQTT and HTTP protocols in an IoT platform designed and implemented for remote real-time monitoring of long-term cold chain transport operations. *Sensors*, 23(10), 4896. <https://doi.org/10.3390/s23104896>
- [18]. Sensirion AG. (2025). SHT4x humidity and temperature sensor datasheet. Sensirion AG. <https://sensirion.com/resource/datasheet/sht4x>
- [19]. u-blox AG. (2011). NEO-6 u-blox 6 GPS modules data sheet. u-blox AG. https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf
- [20]. M5Stack. (2026). Unit Cat1-CN: LTE Cat.1 wireless communication unit equipped with the ML307R-DL module. M5Stack Documentation. https://docs.m5stack.com/en/unit/Unit_Cat1-CN
- [21]. U.S. Food and Drug Administration. (2022). Food Traceability Final Rule under the Food Safety Modernization Act (FSMA 204). U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.fda.gov/food/food-safety-modernization-act-fsma/fsma-final-rule-requirements-additional-traceability-records-certain-foods>
- [22]. ISO. (1995). ISO 1496-2: Series 1 freight containers - Specification and testing - Part 2: Thermal containers. International Organization for Standardization.
- [23]. Codex Alimentarius Commission. (2022). General principles of food hygiene CXC 1-1969. Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/en/>
- [24]. Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and applications* (3rd ed.). Artech House.
- [25]. Zebra Technologies Corporation. (2023). Zebra ZS300 electronic sensor for cold chain monitoring: Product specification sheet. Zebra Technologies. <https://www.zebra.com>
- [26]. A.P. Moller - Maersk. (2023). Remote Container Management (RCM): Reefer container digital monitoring platform. Maersk. <https://www.maersk.com>