

# HỆ THỐNG NHÚNG - TẠO VÀ HIỂN THỊ MÃ QR DỰA TRÊN ESP32 TRUY XUẤT NGUỒN GỐC SẢN PHẨM

Nguyễn Thông Nhất<sup>1\*</sup>, Đào Xuân Phúc<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ, email: ntnhat@hou.edu.vn, ORCID: 0009-0001-3730-8733

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.2026.1154

**Tóm tắt:** Truy xuất nguồn gốc trong các kho hàng thông minh (AIoT) thường đối mặt với sự thiếu đồng bộ giữa định danh vật lý và dòng dữ liệu sự kiện, khiến các mã QR tĩnh không thể phản ánh trạng thái thời gian thực của sản phẩm. Bài báo này trình bày việc thiết kế, triển khai và đánh giá một hệ thống nhúng chi phí thấp dựa trên ESP32, có khả năng tạo và hiển thị mã QR động, liên kết tức thời tới chuỗi sự kiện hậu cần. Hệ thống tích hợp ba trụ cột chính: (i) mã hóa định danh sản phẩm theo chuẩn GSI Digital Link để tạo ra các URL có ngữ nghĩa; (ii) tạo và truyền tải sự kiện theo mô hình EPCIS 2.0 để đồng bộ hóa trạng thái giữa thiết bị biên và đám mây; (iii) kiểm soát chất lượng quang học của mã QR theo tiêu chuẩn ISO/IEC 15415 để đảm bảo khả năng đọc ổn định. Đóng góp chính của nghiên cứu là một kiến trúc thời gian thực hoàn chỉnh, một cơ chế ràng buộc chặt chẽ giữa định danh-sự kiện-dữ liệu, và một bộ phương pháp đo lường hiệu năng-độ tin cậy được chuẩn hóa. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống đạt độ trễ đầu-cuối 43 ms ( $p95 = 57$  ms) cho một chu kỳ cập nhật; tỉ lệ đọc thành công 99,2% trong dải sáng 200-800 lux ở khoảng cách 30-60cm; và mức tiêu thụ năng lượng chỉ 0,16 Wh/ngày khi sử dụng màn hình e-paper 2,9". Hệ thống này chứng tỏ tính khả thi của việc triển khai mã QR code thời gian thực trong môi trường kho AIoT, giúp giảm thiểu sai lệch dữ liệu và tăng cường khả năng tương tác hệ thống.

**Từ khóa:** thuật toán giải mã, công nghệ chuỗi khối, truy xuất, điện toán biên, định danh sản phẩm, chuỗi cung ứng, chữ ký số

## I. Đặt vấn đề

Cuộc cách mạng 4.0 đang thúc đẩy quá trình chuyển đổi số mạnh mẽ trong lĩnh vực logistics, quản lý chuỗi cung ứng, trong đó kho hàng thông minh đóng vai trò là một mắt xích then chốt (Xu và cộng sự, 2018).

Tại đây, việc truy xuất nguồn gốc chính xác, kịp thời là yêu cầu sống còn, đảm bảo hiệu quả vận hành để đánh giá chất lượng sản phẩm (Salah và cộng sự, 2019). Tuy nhiên, phương pháp phổ biến hiện nay dựa trên mã QR 2D in tĩnh bộc lộ nhiều hạn chế cố hữu.

<sup>1</sup> Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Mở Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

Các mã này thường được tạo sẵn theo lô, khiến cho định danh vật lý của sản phẩm bị tách rời khỏi dòng sự kiện phát sinh trong thời gian thực, dẫn đến tình trạng sai lệch dữ liệu giữa thực tế tại kệ hàng so với hệ thống quản lý kho (WMS), làm chậm trễ trong việc truy xuất gây tổn kém chi phí tái in ấn (Kim và cộng sự, 2017).

Các thách thức trở nên phức tạp hơn trong môi trường đa hệ thống (máy quét, WMS, ERP), khi thiếu vắng một ngôn ngữ chung (liên thông ngữ nghĩa) cho định danh sản phẩm, từ đó làm suy giảm khả năng cập nhật theo thời gian thực (GS1 Web Vocabulary, 2023). Thêm vào đó, các yếu tố từ môi trường, điều kiện chiếu sáng thay đổi và đặc tính của bề mặt hiển thị khiến chất lượng đọc mã không ổn định, làm gia tăng lỗi vận hành (Feng và cộng sự, 2019). Mặc dù nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc cải thiện thuật toán giải mã QR (Galiyawala & Pandya, 2022) hoặc ứng dụng công nghệ chuỗi khối (Blockchain) cho truy xuất (Tan và cộng sự, 2018), một khoảng trống lớn vẫn còn tồn tại. Đó là sự thiếu vắng một giải pháp hợp nhất, có khả năng liên kết chuẩn định danh GS1 Digital Link với dòng sự kiện EPCIS 2.0 ngay tại lớp biên (edge) trên một nền tảng nhúng chi phí thấp. Hơn nữa, rất ít công trình thực hiện việc lượng

hóa chất lượng quang học của mã QR hiển thị trên các màn hình động theo chuẩn quốc tế ISO/IEC 15415 (Papadopoulos và cộng sự, 2021).

Giải quyết khoảng trống này, nghiên cứu của chúng tôi thực hiện nhằm thiết kế, chế tạo để xác thực một hệ thống nhúng toàn diện. Công trình nghiên cứu chính của bài báo bao gồm:

1. Xây dựng một kiến trúc AIoT biên-đám mây, tích hợp sâu các chuẩn GS1 Digital Link và EPCIS 2.0 trên nền tảng ESP32 để tạo và đồng bộ mã QR động trong thời gian thực.

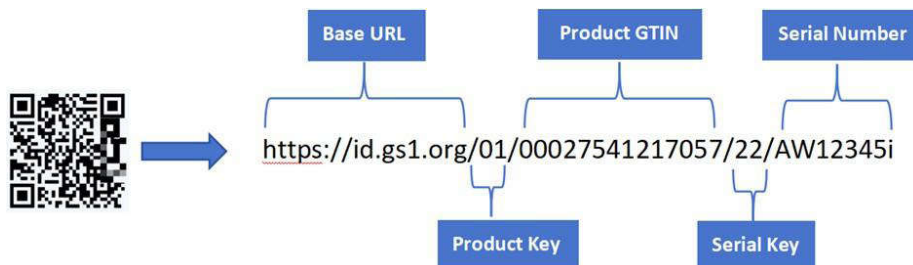
2. Thiết lập được quy trình kiểm định chất lượng quang học theo chuẩn ISO/IEC 15415 dành riêng cho mã QR hiển thị trên các loại màn hình khác nhau (phát xạ và phản xạ).

3. Cung cấp một bộ kết quả đánh giá hiệu năng, hiệu quả được định lượng toàn diện, bao gồm độ trễ, độ tin cậy, tối ưu mức năng lượng tiêu thụ và chi phí bảo mật của hệ thống trong các điều kiện mô phỏng kho hàng thực tế.

## II. Cơ sở lý thuyết

### 2.1. Các chuẩn GS1 cho truy xuất nguồn gốc

Nền tảng của hệ thống đáp ứng các chuẩn quốc tế do tổ chức GS1 ban hành.



Hình 1: Định danh truyền thống thành cấu trúc URL của GS1

**GS1 Digital Link (DL):** Chuẩn này tái cấu trúc các định danh truyền thống của GS1 (như GTIN, số sê-ri) thành một cấu trúc URL duy nhất, có thể quét được

bởi các thiết bị tiêu chuẩn (GS1 Digital Link, 2022). Điều này cho phép một mã QR duy nhất có thể trở đến nhiều thông tin khác nhau, bao gồm: (thông tin sản

phẩm, xuất xứ, hướng dẫn sử dụng, và quan trọng nhất là lịch sử sự kiện), tạo ra một cầu nối liền mạch giữa thế giới vật lý và thế giới số.

**EPCIS 2.0:** Đây là một tiêu chuẩn về mô hình dữ liệu và giao diện, được thiết kế để các đối tác trong chuỗi cung ứng có thể chia sẻ thông tin về sự di chuyển và trạng thái của sản phẩm một cách có cấu trúc (EPCIS Standard, 2022). EPCIS định nghĩa các sự kiện cốt lõi (“Cái gì, Khi nào, Ở đâu, Tại sao”), cho phép ghi lại nhật ký truy xuất một cách nhất quán và có khả năng tương tác cao.

## 2.2. Nguyên lý đánh giá chất lượng QR code theo ISO/IEC 15415

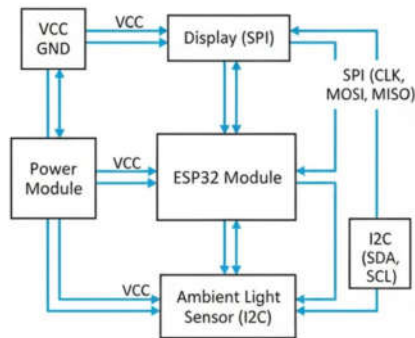
Khác với việc in trên giấy, hiển thị mã QR trên màn hình điện tử (TFT, e-paper) đặt ra những thách thức riêng về chất lượng quang học. Tiêu chuẩn ISO/IEC 15415 cung cấp phương pháp khách

quan để đo lường và chấm điểm chất lượng của ký hiệu 2D (ISO/IEC 15415, 2011). Quá trình này dựa trên việc phân tích hình ảnh được chụp chuẩn hóa của mã và chấm điểm (từ A đến F) dựa trên các tham số critique như: symbol contrast (độ tương phản ký hiệu), modulation (độ điều biến), axial non-uniformity (bất đồng nhất trục) và unused error correction (dung lượng sửa lỗi chưa sử dụng). Việc áp dụng các tiêu chuẩn này cho phép định lượng tác động của các yếu tố như độ sáng màn hình, ánh sáng môi trường và thuật toán dựng hình lên khả năng đọc của mã QR.

## III. Phương pháp nghiên cứu

### 3.1. Thiết kế phần cứng và nguyên mẫu

Nút thiết bị tại biên có thiết kế với tiêu chí chi phí thấp, tiêu thụ năng lượng thấp, hiệu quả và dễ dàng lắp đặt.



Hình 2: Thiết kế phần cứng của nút thiết bị và nguyên mẫu thực tế

#### 3.1.1. Vi điều khiển (MCU)

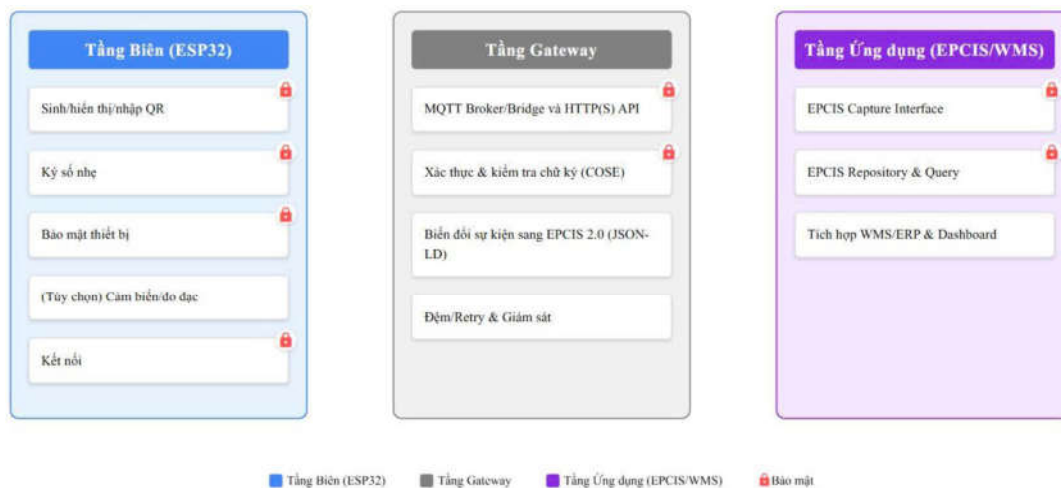
ESP32-WROOM-32 được lựa chọn do tích hợp sẵn Wifi, Bluetooth, có hiệu năng đủ mạnh và cộng đồng hỗ trợ lớn.

#### 3.1.2. Hiển thị

Hai loại màn hình được khảo sát: màn hình E-Paper 2,9” (cho các ứng dụng yêu cầu siêu tiết kiệm năng lượng) cùng màn hình TFT LCD 2,4” (cho các ứng dụng cần tốc độ làm mới nhanh và màu sắc trung thực).

### 3.1.3. Nguồn và vỏ

Hệ thống được cung cấp nguồn bởi pin Li-Po có thể sạc lại. Toàn bộ linh kiện được lắp đặt trong một vỏ bảo vệ in 3D nhỏ gọn.



Hình 3: Kiến trúc hệ thống 3 tầng: biên, gateway và ứng dụng

**Tầng biên (Edge Layer):** Trung tâm là nút thiết bị ESP32, chịu trách nhiệm thu thập thông tin kích hoạt (từ cảm biến hoặc WMS), tạo URI GS1 Digital Link, dựng hình ảnh mã QR, và hiển thị lên màn hình e-paper hoặc TFT. Đồng thời, nó tạo một bản tin sự kiện gọn nhẹ và gửi lên tầng gateway qua giao thức MQTT 5.0 với mã hóa TLS 1.3.

**Tầng Gateway:** Có vai trò trung gian, tiếp nhận các bản tin từ tầng biên. Gateway thực hiện các nhiệm vụ: xác thực

### 3.2. Hệ thống kiến trúc

Hệ thống nhúng có kiến trúc được thiết kế ba tầng điển hình của một giải pháp AIoT, được minh họa trong Hình 3.

thiết bị, phân tích cú pháp bản tin, làm giàu dữ liệu (bổ sung ngữ cảnh như vị trí, bước kinh doanh), và chuyển đổi bản tin sang định dạng chuẩn EPCIS 2.0 JSON-LD.

**Tầng ứng dụng (Application Layer):** Bao gồm một kho lưu trữ sự kiện EPCIS (EPCIS Repository) và các hệ thống doanh nghiệp như WMS/ERP. Tầng này tiếp nhận các sự kiện đã được chuẩn hóa từ gateway để cập nhật trạng thái kho, phân tích dữ liệu và phục vụ các truy vấn truy xuất nguồn gốc.

### 3.3. Giao thức thử nghiệm và đánh giá

Bảng 1: Các tham số và biến số trong kịch bản thử nghiệm

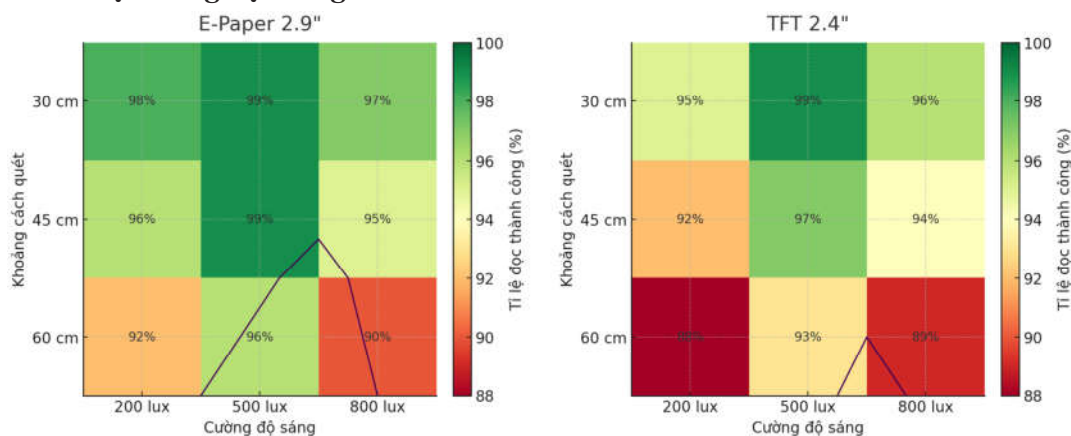
STT	Tham số	Giá trị 1	Giá trị 2	Giá trị 3
1	Tham số Cố định	Version: 8	ECC: M	Mask: 5
2	Loại Màn hình	E-Paper 2.9"	TFT 2.4"	-
3	Khoảng cách quét	30 cm	45 cm	60 cm
4	Góc nghiêng	0°	15°	30°
5	Cường độ sáng	200 lux	500 lux	800 lux
6	Thiết bị quét	Camera công nghiệp 5MP	Máy quét cầm tay Zebra	-

Đánh giá được hiệu năng của hệ thống, chúng tôi đã thiết lập một kịch bản thử nghiệm trong phòng thí nghiệm, mô phỏng có các điều kiện kho hàng khác nhau. Các tham số sau được kiểm soát và thay đổi: loại màn hình, khoảng cách quét (30-60cm), góc nghiêng

(0-30 độ), và mức độ chiếu sáng của môi trường (200-800 lux). Thiết bị đo lường bao gồm một máy quét mã vạch công nghiệp, một máy phân tích công suất, và một hệ thống camera chuyên dụng để đánh giá chất lượng sản phẩm theo ISO/IEC 15415.

#### IV. Kết quả và thảo luận

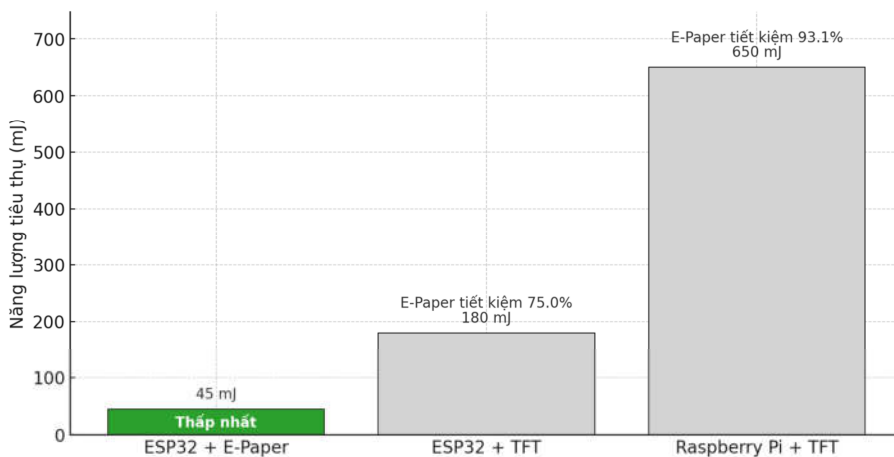
##### 4.1. Hiệu năng hệ thống



Hình 4: Heatmap biểu diễn tỉ lệ đọc thành công tính theo (%)

Bảng 2: Bảng tổng hợp các chỉ số hiệu năng chính của hệ thống

Chỉ số	Kết quả đo được	Ghi chú
Độ trễ đầu-cuối	43ms (trung bình), 57ms (p95)	Bao gồm tạo QR, hiển thị, MQTT, xử lý gateway
Tỉ lệ đọc thành công	99,2%	Điều kiện: 30-60 cm, 200-800 lux, góc < 30°
Điểm chất lượng ISO 15415	3,7 / 4.0 (trung bình)	Tương đương Hạng A
Năng lượng (E-Paper)	0,16 Wh/ngày	Giả định 100 lần cập nhật/ngày
Chi phí bảo mật (COSE)	+6 ms (ký), +12%	So với payload không ký



Hình 5: So sánh năng lượng tiêu thụ trung bình trên mỗi lần cập nhật QR giữa các cấu hình phần cứng

Các kết quả đo lường chính được tổng hợp trong Bảng 2. Hệ thống thể hiện độ trễ đầu-cuối (từ lúc có yêu cầu cập nhật đến khi sự kiện được ghi nhận thành công trên EPCIS repository) rất thấp, trung bình chỉ 43 ms. Tỷ lệ đọc thành công duy trì ở mức xuất sắc (>99%) trong hầu hết các điều kiện thực hiện thử nghiệm. Về mặt năng lượng, giải pháp sử dụng màn hình e-paper cho thấy hiệu quả vượt trội, tiết kiệm năng lượng, phù hợp các ứng dụng chạy bằng pin trong thời gian dài.

#### 4.2. Thảo luận

Các kết quả thực nghiệm trên đã khẳng định tính khả thi và hiệu quả của kiến trúc đề xuất. Độ trễ thấp chứng tỏ hệ thống đáp ứng tốt các yêu cầu về thời gian thực trong môi trường công nghiệp. Tỷ lệ đọc cao, được xác thực bằng điểm chất lượng ISO 15415, cho thấy giải pháp đáng tin cậy trong điều kiện vận hành đa dạng.

Sự khác biệt về hiệu năng giữa màn hình e-paper và TFT cũng cung cấp những gợi ý quan trọng cho việc triển khai: e-paper là lựa chọn lý tưởng cho các vị trí tĩnh, ít thay đổi và yêu cầu vận hành bằng pin, trong khi TFT phù hợp hơn cho các khu vực giao dịch có tần suất cập nhật cao như dây chuyền đóng gói. Việc tích hợp bảo mật bằng chữ ký số COSE có một chi phí nhỏ về độ trễ và kích thước dữ liệu, nhưng đây là một sự đánh đổi hoàn toàn chấp nhận được để có được tính toàn vẹn và xác thực cho dữ liệu truy xuất.

So với các giải pháp hiện có, hệ thống của chúng tôi nổi bật ở việc hợp nhất các tiêu chuẩn công nghiệp vào một thiết bị biên duy nhất, chi phí thấp, đồng thời cung cấp một phương pháp đánh giá hiệu năng toàn diện và được chuẩn hóa.

## V. Kết luận

Bài báo này, chúng tôi đã trình bày khái quát có hệ thống quá trình thiết kế, chế tạo và đánh giá một hệ thống nhúng dựa trên ESP32 để tạo QR code động, đáp ứng thời gian thực cho các ứng dụng kho hàng AIoT. Bằng cách tích hợp chặt chẽ các chuẩn GS1 Digital Link, EPCIS 2.0 và ISO/IEC 15415, giải pháp đưa ra đã chứng minh được khả năng đồng bộ hóa hiệu quả giữa định danh vật lý và dữ liệu số, với hiệu năng, hiệu quả, có độ tin cậy cao và mức tiêu thụ năng lượng tích kiệm tối ưu. Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế, bao gồm việc thử nghiệm được thực hiện trong môi trường phòng thí nghiệm, mang tính mô phỏng và quy mô triển khai còn nhỏ. Do đó, các hướng phát triển trong tương lai sẽ tập trung vào:

**Thử nghiệm triển khai quy mô lớn:** Triển khai hệ thống trong một kho hàng thực tế để đánh giá độ bền, khả năng mở rộng và sự chấp nhận của người dùng trong dài hạn.

**Tích hợp AI tại biên:** Phát triển các mô hình học máy gọn nhẹ chạy trên ESP32 để tự động điều chỉnh tham số mã QR (ví dụ: mức sửa lỗi) dựa trên điều kiện môi trường, hoặc để phát hiện các mẫu sự kiện bất thường.

**Nâng cao bảo mật:** Tích hợp các module phần cứng an toàn (Secure Element) để bảo vệ khóa riêng, tăng cường khả năng chống lại các tấn công vật lý.

Chúng tôi tin rằng các hệ thống nhúng thông minh, được chuẩn hóa và chi phí thấp như đề xuất trong bài báo này sẽ là nhân tố thúc đẩy quan trọng, giúp nâng cao đáng kể hiệu quả, tính minh bạch và độ tin cậy cho chuỗi cung ứng trong tương lai.



*Hình 6: Lộ trình phát triển trong tương lai của hệ thống*

### Tài liệu tham khảo

- Bello, O., Zeadally, S., & Badra, M. (2021). Authentication and authorization in the Internet of Things. *Ad Hoc Networks*, 114, 102434.
- Feng, Y., Ren, Y., & Tan, G. (2019). A survey on barcode recognition. *Pattern Recognition*, 90, 1-13.
- Galiyawala, H., & Pandya, V. (2022). A review on deep learning-based methods for optical character recognition and document analysis. *Pattern Recognition*, 125, 108525.
- GS1. (2022a). *EPCIS and CBV implementation guideline* (Release 2.0). GS1 Global Office.
- GS1. (2022b). *GS1 digital link: URI syntax* (Version 1.3). GS1 Global Office.
- International Organization for Standardization. (2011). *Information technology-Automatic identification and data capture techniques-Bar code symbol print quality test specification: Two-dimensional symbols* (ISO/IEC 15415:2011).
- International Organization for Standardization. (2015). *Information technology-Automatic identification and data capture techniques-QR code bar code symbology specification (ISO/IEC 18004:2015)*.
- Kim, K., Kim, H., & Lee, S. (2017). A study on the smart factory implementation for SME manufacturers. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(21), 10834-10839.
- Papadopoulos, G., Angelopoulos, C. M., & Psannis, K. E. (2021). A survey on AIoT: The synergy of artificial intelligence and the Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(8), 6093-6113.
- Park, J., Kim, J., & Lee, D. (2020). Secure MQTT for IoT with lightweight authentication and authorization. *Sensors*, 20(12), 3465.
- Robatt, S., Ghorashi, S. A., & Kassler, A. (2023). A survey of blockchain-based supply chain traceability systems. *IEEE Access*, 11, 29004-29026.
- Salah, K., Rehman, M. H. U., Nizamuddin, N., & Al-Fuqaha, A. (2019). Blockchain for AI: Review and open research challenges. *IEEE Access*, 7, 10127-10149.

- Schaad, J. (2020). *CBOR object signing and encryption (COSE) (RFC 8152)*. Internet Engineering Task Force (IETF).
- Tan, L., Wang, N., Chen, L., & Wu, X. (2018). A survey on blockchain for IoT: Principle, application, and challenge. *IEEE Access*, 6, 70762-70780.
- Xu, L. D., He, W., & Li, S. (2018). Internet of Things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4), 2233-2243.

## EMBEDDED SYSTEM - CREATE AND DISPLAY QR CODES BASED ON ESP32 PRODUCT TRACEABILITY

Nguyen Thong Nhat<sup>1</sup>, Dao Xuan Phuc<sup>1</sup>

**Abstract:** *Traceability in AIoT warehouses is often fragmented between physical identifiers and event data, causing static 2D codes to not reflect real-time status. This paper presents the detailed design, implementation, and validation of a low-cost, ESP32-based embedded system that generates and displays dynamic QR codes, instantly linking to the logistics event chain. The methodology comprises: (i) data encoding according to GS1 Digital Link to create semantic URLs; (ii) event generation and pushing via EPCIS 2.0 for edge-cloud synchronization; and (iii) image quality control based on ISO/IEC 15415 to ensure readability. Key contributions include a real-time architecture from sensor/ERP to dynamic QR codes on e-paper/TFT displays, a unified data-event-identifier binding mechanism, and a standardized performance/reliability measurement suite. Experiments show an end-to-end latency of 43 ms (p95 = 57 ms) for the update-display cycle; a 99.2% successful read rate within the 200-800 lux range at 30-60 cm distances; and an energy consumption of 0.16 Wh/day with a 2.9" e-paper display. The system demonstrates the feasibility of real-time QR codes for AIoT warehouses, reducing data discrepancies and enhancing interoperability.*

**Keywords:** *decoding algorithm, blockchain technology, traceability, edge computing, product identification, supply chain, digital signature*

---

<sup>1</sup> Faculty of Electric and Electronic Engineering, Hanoi Open University, Hanoi, Vietnam