



## Evaluation of fruit quality using electrochemical impedance spectroscopy

### Article info

#### Type of article:

Original research paper

#### DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.4.204-216>

#### \*Corresponding author:

Email address:

[quynhnhu8604@gmail.com](mailto:quynhnhu8604@gmail.com)

**Received:** 22/08/2025

**Received in Revised Form:**

31/05/2026

**Accepted:** 03/06/2026

Nguyen Phan Kien, Vu Thanh Binh, Nguyen Ba Duc, Bui Quoc Binh,  
Nguyen Quynh Nhu\*

School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam.

**Abstract:** Mango is a widely consumed fruit in Vietnam. However, the abuse of the fungicide carbendazim for mango preservation has become prevalent, posing negative impacts on human health, the environment, and export potential. This study proposes an electrochemical impedance spectroscopy (EIS) system based on the voltage divider method for the rapid detection of carbendazim residues. The system comprises four main modules: a sine-wave generation module, an amplitude measurement module, a phase measurement module, and a sample testing electrode, operating within a frequency range of 100 Hz to 200 kHz. The experimental results demonstrate that the proposed method can effectively distinguish between treated and untreated mango samples through their impedance characteristics, thereby establishing a database for identification. The developed system offers distinct advantages, including low cost, non-destructive testing, and the capability to operate under ambient environmental conditions, contributing to enhanced efficiency in food safety management.

**Keywords:** Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), impedance, Carbendazim, measuring electrode.



**Thông tin bài viết**

**Dạng bài viết:**

Bài báo nghiên cứu

**DOI:**

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.4.204-216>

**\*Tác giả liên hệ:**

Địa chỉ Email:

[quynhnhu8604@gmail.com](mailto:quynhnhu8604@gmail.com)

**Ngày nộp bài:** 22/08/2025

**Ngày nộp bài sửa:** 31/05/2026

**Ngày chấp nhận:** 03/06/2026

## Phân tích chất lượng trái cây bằng phương pháp phổ trở kháng điện hóa

Nguyễn Phan Kiên, Vũ Thanh Bình, Nguyễn Bá Đức, Bùi Quốc Bình, Nguyễn Quỳnh Như\*

Trường Điện-Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội, thành phố Hà Nội, Việt Nam.

**Tóm tắt:** Xoài là loại trái cây được tiêu thụ phổ biến tại Việt Nam. Tuy nhiên, việc lạm dụng thuốc chống nấm carbendazim để bảo quản xoài đang trở nên phổ biến, tác động tiêu cực đến sức khỏe, môi trường và khả năng xuất khẩu. Nghiên cứu này đề xuất một hệ thống đo phổ trở kháng điện hóa theo phương pháp đo phân áp nhằm phát hiện nhanh dư lượng carbendazim. Hệ thống gồm bốn khối chính: khối tạo xung hình sine, khối đo biên độ, khối đo pha và điện cực đo mẫu, hoạt động trong dải tần 100 Hz – 200 kHz. Kết quả cho thấy phương pháp có thể phân biệt mẫu xoài có và không có hóa chất thông qua đặc trưng trở kháng, từ đó xây dựng cơ sở dữ liệu nhận dạng. Hệ thống có ưu điểm chi phí thấp, không phá hủy mẫu và có thể triển khai trong điều kiện môi trường thông thường, góp phần nâng cao hiệu quả quản lý vấn đề an toàn thực phẩm.

**Từ khóa:** phổ trở kháng điện hóa (EIS), trở kháng, carbendazim, điện cực đo.

### 1. Giới thiệu

Trong thời gian gần đây, tình trạng lạm dụng thuốc bảo vệ thực vật tại Việt Nam đã gây ra nhiều hệ lụy nghiêm trọng tới sức khỏe người tiêu dùng và uy tín thương mại nông sản. Việc sử dụng sai mục đích một số loại hóa chất bảo vệ thực vật làm phát sinh nhiều vấn đề xã hội và y tế. Đặc biệt, Ủy ban Châu Âu (EC) đã ban hành Quy định số 2024/3153, áp dụng biện pháp kiểm soát nghiêm ngặt đối với một số nông sản nhập khẩu từ Việt Nam do phát hiện dư lượng thuốc bảo vệ thực vật vượt ngưỡng, trong đó có carbendazim [1].

Xoài là loại trái cây phổ biến, có giá trị kinh tế cao và được tiêu thụ rộng rãi trên thị trường quốc tế [2, 3]. Tuy nhiên, do đặc tính dễ bị sâu bệnh và thời gian bảo quản ngắn, loại quả này thường được xử lý bằng thuốc bảo vệ thực vật, làm tăng

nguy cơ tồn dư hóa chất. Một trong những hoạt chất được sử dụng rộng rãi là carbendazim (Methyl-2-benzimidazole-carbamate), thuộc nhóm benzimidazole, có khả năng diệt nấm mạnh. Tuy nhiên, nó đã được WHO và EPA cảnh báo về khả năng gây rối loạn nội tiết, tổn thương DNA và tăng nguy cơ ung thư khi tích tụ trong thực phẩm [4, 5, 6]. Thực tế, carbendazim trong trái cây đã được ghi nhận vượt ngưỡng an toàn tại nhiều quốc gia [7]. Điều này không chỉ làm ảnh hưởng tới sức khỏe người tiêu dùng mà còn tạo rào cản thương mại khi nhiều lô hàng nông sản không đạt chuẩn bị trả về, gây thiệt hại lớn cho doanh nghiệp. Do đó, việc phát triển các phương pháp phát hiện carbendazim nhanh, chính xác, chi phí thấp và không phá hủy mẫu là yêu cầu cấp thiết trong thời điểm hiện tại. Hiện nay, các phương pháp phân tích truyền thống như sắc ký lỏng hiệu năng cao (High-performance

Liquid Chromatography - HPLC), sắc khí ký ghép khối phổ (Gas Chromatography - Mass Spectrometry - GC-MS), quang phổ tử ngoại – khả kiến (Ultraviolet - Visible Spectrophotometry UV-Vis) hay các kỹ thuật phổ khác cho độ chính xác cao nhưng đòi hỏi quy trình xử lý mẫu phức tạp, chi phí lớn và khó áp dụng diện rộng [8, 9, 10, 11]. Trong bối cảnh đó, phổ trở kháng điện hóa (Electrochemical Impedance Spectroscopy – EIS) nổi lên như một giải pháp triển vọng. Kỹ thuật cho phép đánh giá sự thay đổi đặc tính điện của vật liệu sinh học bằng cách đo sự thay đổi trở kháng dưới tác động của tín hiệu điện xoay chiều, giúp nhận diện sự khác biệt giữa mẫu sạch và mẫu có tồn dư carbendazim. So với các phương pháp truyền thống, EIS có ưu điểm nổi bật là không phá hủy mẫu, chi phí thấp, thao tác đơn giản, thời gian phân tích nhanh và độ nhạy cao [12-19].

Đa phần các phương pháp EIS được nghiên cứu tại thời điểm hiện tại đang sử dụng các hệ thống phân tích trở kháng để bàn hoặc bộ khuếch đại lock-in [22, 23, 24] có chi phí cao, cồng kềnh, đồng thời đòi hỏi người thực hiện phải có chuyên môn nhất định mới có thể sử dụng, từ đó dẫn đến việc khó triển khai tại điều kiện thực tế - nơi các yếu tố nhanh, gọn, rẻ được ưu tiên hàng đầu. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành phát triển hệ thống EIS di động sử dụng vi điều khiển ESP32 và mô đun tạo tín hiệu AD9850. Hệ thống sử dụng mạch phân áp và mạch bắt điểm không nhằm đảm bảo độ chính xác của kết quả, đồng thời giảm độ phức tạp của hệ thống, giúp dễ dàng hơn trong việc phân tích xoài trước và sau khi xử lý bằng carbendazim. Số liệu được dùng để xây dựng cơ sở dữ liệu đặc trưng, hỗ trợ nhận diện nhanh tình trạng tồn dư thuốc bảo vệ thực vật trong trái cây.

## 2. Cơ sở lý thuyết

### 2.1. Nguyên lý đo phổ trở kháng

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành thí nghiệm phân tích ảnh hưởng của thuốc bảo vệ thực vật carbendazim đối với các mẫu xoài để theo

dõi phổ trở kháng của quả từ dải tần thấp đến cao. Trong các nghiên cứu sử dụng để phân tích chất lượng mẫu hoa quả, có thể thấy phương pháp sử dụng phân tích phổ trở kháng điện (EIS) là đơn giản và đem đến hiệu quả tốt để phân tích chất lượng mẫu. Nguyên lý phân tích các đặc tính thông qua việc kích thích mẫu bằng các tín hiệu điện xoay chiều ở các tần số khác nhau và đo các tín hiệu phản hồi. Từ đó nghiên cứu, phân tích số liệu cùng tính ổn định của các phép đo thu được từ điện cực có gắn điện trở. Sau đó tiến hành xác định các nguyên nhân khác gây ra ảnh hưởng dẫn đến khác biệt trước và sau khi tắm [20, 21].

Nhóm sử dụng tín hiệu hình sine có tần số cao đi qua mẫu. Khi nâng dần đến tín hiệu có tần số rất cao, nó sẽ làm tăng tính thấm của màng sinh chất, từ đó làm giảm trở kháng vốn phụ thuộc nhiều vào độ cách điện của màng sinh chất. Trên thực tế, màng sinh chất về mặt cấu tạo là một lớp kép phospholipid có tính cách điện [22, 23]. Cấu trúc này giống với cấu trúc của tụ điện. Theo công thức (1) tính  $Z_C$ , ta có:

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1)$$

Trong đó,  $f$  là tần số của tín hiệu đầu vào, khi đạt giá trị vô cùng lớn,  $Z_C$  sẽ tiến về 0. Lúc này, khả năng cách điện của màng sinh chất sẽ gần như bằng không, giá trị trở kháng của quả sẽ chỉ còn phụ thuộc vào độ dẫn điện của bào tương [24]. Sau khi thu được số liệu, phân tích tính trở kháng thu được theo thời gian từ hệ thống mạch đo trở kháng, từ đó rút ra kết luận về trạng thái của quả, ta sẽ phân biệt được trở kháng của quả tắm và chưa tắm carbendazim. Một số yếu tố có thể ảnh hưởng tới sai số phép đo như: tác động của diện tích tiếp xúc giữa vỏ quả và kim điện cực, tính ổn định của điện cực với mẫu thí nghiệm, sự oxy hóa, kém tiếp xúc giữa các mối nối, tính tối ưu của vật liệu,...

Ngoài các yếu tố kể trên, tính không đồng nhất của vỏ quả và thịt quả cũng cần được lưu ý. Từ các vấn đề nêu trên, nhóm đã đưa ra các phương án để có thể cho ra kết quả đầu ra tối ưu

nhất.

## 2.2. Phương pháp phân áp

Phương pháp phân áp được lựa chọn làm cơ sở để đo trở kháng điện hoá trong EIS [12]. Phương pháp cho phép xác định trở kháng mẫu bằng cách đo điện áp rơi trên một điện trở chuẩn mắc nối tiếp với mẫu thử. Giá trị trở kháng của mẫu sau đó được suy ra từ tỉ lệ giữa tín hiệu áp đặt và điện áp đo được. Việc sử dụng phân áp trong nghiên cứu EIS có một vài ưu điểm so với cấu hình khuếch đại hoặc cầu cân bằng. Thứ nhất, phương pháp này có cấu trúc mạch đơn giản, dễ triển khai và không yêu cầu các thành phần phức tạp – yếu tố các phương pháp EIS hiện tại thường mắc phải. Thứ hai, phương pháp này phù hợp với dải tần rộng, từ vài Hz đến hàng trăm kHz, đặc biệt thích hợp với các mẫu thí nghiệm như hoa quả, nơi đặc tính điện trở- điện dung có thể thay đổi đáng kể theo tần số [13, 14].

Ngoài ra, việc áp dụng phân áp có thể đảm bảo tính ổn định trong điều kiện đo ngoài phòng thí nghiệm, nơi các yếu tố môi trường như nhiệt độ, độ ẩm có thể ảnh hưởng đến kết quả của phép đo [14]. Đối với mục tiêu phân tích chất lượng hoa quả, trở kháng thường nằm trong khoảng từ vài trăm ohm đến vài kOhm, phù hợp với vùng tuyến tính của phương pháp phân áp và đảm bảo độ nhạy cao trong phân tích đồ thị Nyquist và Bode. [15].

## 2.3. Thiết kế mạch phân áp

Mạch phân áp được thiết kế với điện trở tham chiếu R mắc nối tiếp với mẫu cần đo. Một tín hiệu xoay chiều  $V_{in}$  có biên độ và tần số xác định được đưa vào hai đầu mạch. Điện áp  $V_{out}$  được đo tại nút nối giữa R và mẫu. phân áp được thiết kế với điện trở tham chiếu R mắc nối tiếp với mẫu cần đo. Một tín hiệu xoay chiều  $V_{in}$  có biên độ và tần số xác định được đưa vào hai đầu mạch, điện áp  $V_{out}$  được đo tại nút nối giữa R và mẫu. Trở kháng của mẫu được tính theo công thức (2):

$$Z = R \cdot \frac{V_{in}}{V_{out}} - 1 \quad (2)$$

Công thức mạch phân áp được xây dựng từ mạch tương đương của hai phần tử mắc nối tiếp, trong đó tổng trở của mạch bằng  $Z+R$ . Khi mẫu có tính chất điện hóa, đặc biệt là dung kháng, trở kháng Z không chỉ phụ thuộc vào biên độ mà còn phụ thuộc vào tần số kích thích. Tín hiệu kích thích có dạng hình sin, quét trong z dải tần 100 Hz – 200 kHz. Quá trình phát và thu tín hiệu được điều khiển bởi vi điều khiển ESP32, với ADC tích hợp để ghi nhận đồng thời  $V_{in}$  và  $V_{out}$ . Từ dữ liệu thu được, hệ thống xác định độ lệch biên độ và pha, qua đó xây dựng các đồ thị Nyquist và Bode. Điện trở tham chiếu được chọn là 1 kΩ nhằm tối ưu độ nhạy và độ tuyến tính của phép đo.

## 2.4. Chuẩn bị hóa chất và mẫu đo

Thí nghiệm sử dụng dung dịch carbendazim 500 g/L. Đối tượng thử nghiệm là xoài có khối lượng 350–400 g/quả, tất cả đều tươi, không dập nát và được làm sạch trước khi đo.

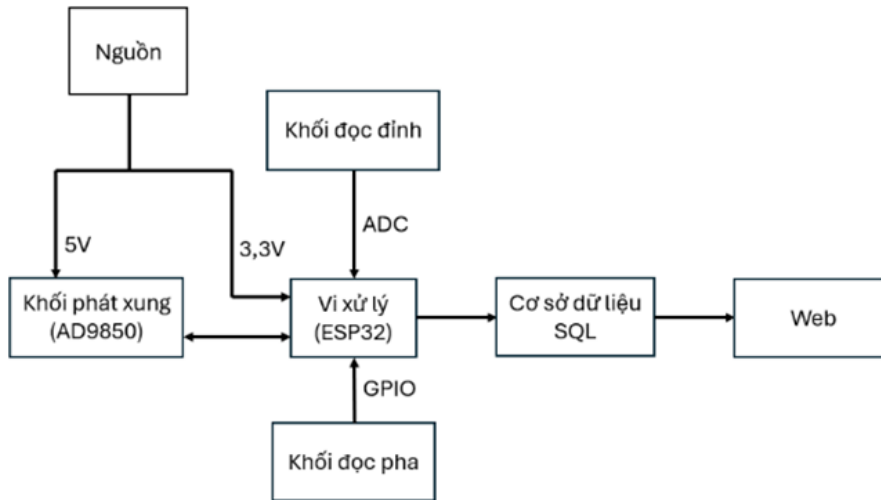
## 2.5. Phương pháp đo

Quả được đo trước và sau khi xử lý bằng cách ngâm dung dịch carbendazim 10% trong 1 giờ, để khô tự nhiên 30 phút. Các phép đo tiến hành trên hai nhóm mẫu (đối chứng và xử lý), tại ba vị trí (đầu, thân, đuôi), lặp lại ba lần trong dải tần 100 Hz – 200 kHz. Kim đo được thay mới sau mỗi quả để giảm sai số và hạn chế oxy hóa điện cực.

## 2.6. Phân tích trở kháng của quả hoàn chỉnh

### 2.6.1. Hệ thống đo dư lượng carbendazim

Hệ thống đo dư lượng carbendazim sử dụng vi xử lý ESP32 làm bộ xử lý trung tâm. Dữ liệu trở kháng thu được sẽ được lưu trực tiếp qua máy chủ đẩy vào cơ sở dữ liệu SQL, cho phép lưu trữ theo dõi và phân tích trạng thái của mẫu, sau đó dữ liệu được đẩy lên trang web và được đối chiếu cùng cơ sở dữ liệu được dán nhãn được thu thập để phân loại quả tẩm và quả chưa tẩm. Hệ thống có bốn khối chính, bao gồm: khối phát xung sine tín hiệu, khối đọc đỉnh, khối đọc pha và điện cực đo mẫu (Hình 1)



Hình 1. Sơ đồ khối của hệ thống

**2.6.2. Khối phát xung sine tín hiệu**

Có vai trò chính trong việc tạo ra tín hiệu cho phép đo. Nhóm sử dụng mô đun AD9850 nhằm đảm bảo độ chính xác và tính ổn định của tín hiệu đầu vào. Tần số của tín hiệu đầu vào dao động từ khoảng 100 Hz – 200 kHz.

**2.6.3. Khối đọc đỉnh**

Tín hiệu hình sin khi được phát từ khối phát xung sẽ truyền qua mẫu thử. Mạch thu sẽ ghi nhận mức biên độ của tín hiệu đầu ra. Hệ thống thu biên độ được thiết kế là một mạch nối tiếp sử dụng diode và tụ điện. Giá trị điện áp sau đó được bộ chuyển đổi tương tự số (ADC) tích hợp trong ESP32 đọc và xử lý, từ đó cho biết mức biên độ của tín hiệu đầu ra.

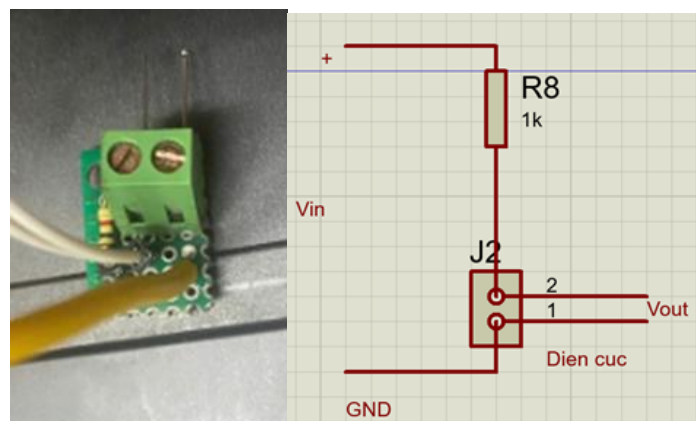
**2.6.4. Khối đọc pha**

Việc xác định độ lệch pha giữa tín hiệu kích thích và tín hiệu thu được từ mẫu là một yếu tố

quan trọng để phân tích phổ trở kháng. Nhóm sử dụng mạch bắt điểm không để đo thông số này. Cả tín hiệu vào và ra đều được xử lý qua mạch bắt điểm không (zero – crossing detectors). Khối sử dụng mạch chỉnh lưu cầu Schottky 1N5817, optocoupler HCNR201 và công tắc cách ly nhằm tránh nhiễu động kết quả đo. Vi xử lý sẽ sử dụng timer nội bộ để xác định khoảng thời gian chênh lệch giữa hai lần xuất hiện điểm không tương ứng. Từ sự chênh lệch thời gian này mà ta có thể tính toán được góc lệch pha giữa hai tín hiệu.

**2.6.5. Điện cực đầu đọc**

Điện cực đầu đọc được thiết kế dựa trên mạch phân áp qua một con trở nối với cặp kim. Các kim được cố định, có chiều dài 1 cm và đặt cách nhau 0,5 cm (Hình 2). Từ các giá trị thu được, ta có thể tính toán ra được giá trị trở kháng của quả tại thời điểm đo.



Hình 2. Đầu đọc điện cực kim

**2.6.6. Cơ sở dữ liệu và hiển thị kết quả**

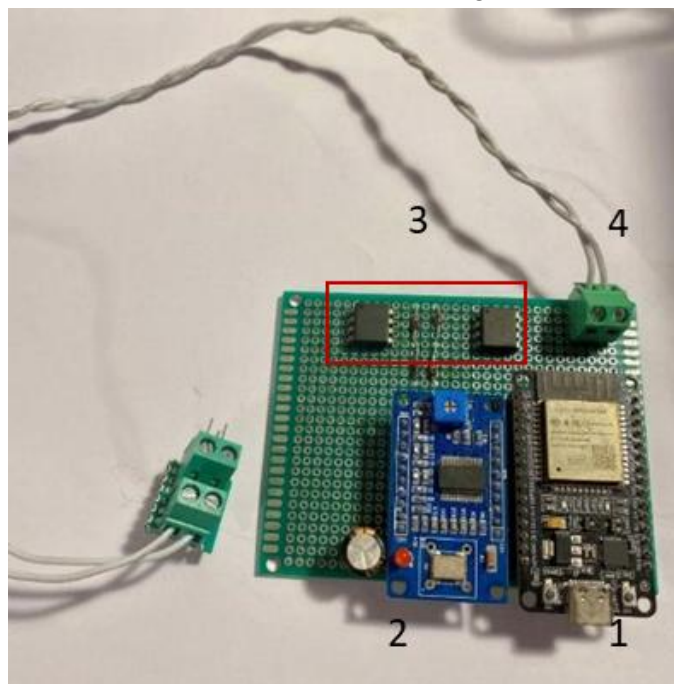
Hệ thống đo ESP32 (Hình 3) là một vi xử lý IoT có giao thức mạng, dữ liệu được đẩy lên máy chủ và lưu trữ trong cơ sở dữ liệu SQL. Web sẽ lấy dữ liệu từ cơ sở dữ liệu đối chiếu với các cơ sở dữ liệu tham chiếu được gán nhãn, thu thập để đưa ra kết quả.

**3. Quy trình xử lý số liệu**

Chọn dải tần từ 100Hz - 200kHz, đo theo kích bản sau: 3 vị trí đầu, thân, đuôi ở mỗi quả, không rút kim, mỗi vị trí đo liên tục 3 lượt, thay kim sau mỗi quả được đo. Bước nhảy khi chạy dải tần lần lượt là: 100Hz (từ 100-1kHz); 1kHz (từ 1-10kHz); 10kHz (từ 10-100kHz); 50kHz (từ 100-200kHz).

Hệ thống đo thực nghiệm được tích hợp trên cấu trúc bo mạch thử nghiệm phối hợp các khối chức năng xử lý và điều hòa tín hiệu (Hình 3). Cấu trúc phần cứng của hệ thống bao gồm bốn thành phần cốt lõi được định vị cụ thể như sau: Khối vi

điều khiển trung tâm (1): Sử dụng mô đun SoC ESP32 đặt ở phía bên phải bo mạch, đóng vai trò thu thập dữ liệu từ mạch đo, thực hiện các thuật toán xử lý số liệu và điều khiển truyền thông. Mô đun đo pha chuyên dụng (2): Là mạch chức năng AD8302 đặt ở vị trí trung tâm, chịu trách nhiệm tiếp nhận và so sánh pha giữa các kênh tín hiệu đầu vào để chuyển đổi thành đại lượng điện áp tương ứng. Khối điều hòa tín hiệu (3): Được bố trí ở phía cấp tín hiệu đầu vào (phía trên bo mạch) bao gồm các vi mạch khuếch đại thuật toán cấu hình DIP-8 phối hợp cùng mạng điện trở phân áp, thực hiện chuẩn hóa biên độ và phối hợp trở kháng trước khi đưa vào mô đun đo. Khối kết nối và phụ trợ (4): Gồm hệ thống các khối đầu nối phân bố ở rìa bo mạch (phía bên trái và phía trên bên phải) đảm nhận chức năng giao tiếp vật lý để cấp nguồn nuôi ổn định và dẫn truyền các kênh tín hiệu cần đo vào hệ thống.



**Hình 3.** Cấu trúc phần cứng hệ thống đo thực nghiệm: (1) Vi điều khiển ESP32; (2) Mô đun đo pha AD8302; (3) Khối điều hòa tín hiệu; (4) Khối giao tiếp nguồn và tín hiệu.

*Xử lý số liệu:*

Trước tiên, hệ thống sẽ lần lượt thu hai lần tín hiệu các chân digital đọc được qua mỗi lần “bắt điểm không” của mạch để ta có được hai giá trị thời gian. Trong đó, hiệu của chúng chính là thời gian trễ pha của quả so với hệ thống, dưới tần số cố

định, độ lệch pha được tính toán qua công thức (3):

$$|\Theta| = 2\pi f \cdot |t_1 - t_2| \tag{3}$$

Trong đó:

|\Theta|: Giá trị độ lệch pha (rad)

f: Tần số (600kHz)

t<sub>1</sub>: Giá trị thời gian bắt điểm không tham

chiều ( $\mu s$ )

$t_2$ : Giá trị thời gian bắt điểm không tín hiệu phản hồi của quả ( $\mu s$ )

Song song với đó, tín hiệu hệ thống và tín hiệu của quả đi qua mạch đọc đỉnh để lấy giá trị đỉnh của tín hiệu. Để giảm nhiễu và loại bỏ các giá trị bất thường (outliers) trong chuỗi tín hiệu thu được từ ADC, nhóm sử dụng bộ lọc trung vị với cửa sổ 30 mẫu. Cụ thể, tại mỗi thời điểm  $i$ , giá trị đầu ra  $y[i]$  được xác định là giá trị trung vị của 30 mẫu tín hiệu liên tiếp  $x[i], x[i+1], \dots, x[i+28], x[i+29]$ . Công thức tổng quát được tính như sau:

$$y[i] = \text{median} (\{x[k]\}_{k=i-1}^{i+30}) \quad (4)$$

trong đó:

y: Dữ liệu sau khi lọc trung vị

x: Dữ liệu thô

i: Vị trí thứ  $i$  của dữ liệu

Lấy trung bình các giá trị để ra dữ liệu chuẩn cuối cùng. Dựa trên các số liệu thu được như điện áp và độ lệch pha trên mỗi dải tần số tương ứng, từ đó có thể suy ra được kết quả phép đo là trở kháng của mẫu theo dõi bằng công thức phân áp (5) dưới đây:

$$|Z| = R \cdot \frac{V_{out}}{V_{in} - V_{out}} \quad (5)$$

R: điện trở đầu vào (1k $\Omega$ )

$V_{in}$ : điện áp đầu vào của mạch (V)

$V_{out}$ : điện áp đầu ra của mạch (V)

|Z|: trở kháng của mẫu quả ( $\Omega$ )

### 3.1. Với Oscilloscope

#### 3.1.1. Kích bản đo Oscilloscope

Các phép đo được thực hiện trong dải tần 100 Hz – 1 MHz tại ba vị trí (đầu, thân, đuôi quả), mỗi vị trí lặp lại ba lần. Sau mỗi lần đo cho một quả, kim đo được thay mới để tránh sai số. Bước nhảy tần số là 15 Hz. Quá trình đo được thực hiện cẩn thận nhằm hạn chế tác động ngoại vi, đảm bảo độ chính xác và sai số thấp. Oscilloscope được sử dụng để thu nhận tín hiệu kích thích và tín hiệu thu được tại mỗi tần số khảo sát làm cơ sở cho việc

phân tích đặc tính điện giữa các mẫu nghiên cứu.

#### 3.1.2. Xử lý số liệu

$$V_{ch} = V - \frac{V_{max} + V_{min}}{2} \quad (6)$$

trong đó:

$V_{ch}$ : điện áp đã chuẩn hóa

V: điện áp đầu vào/đầu ra

$V_{max}$ : điện áp cực đại

$V_{min}$ : điện áp cực tiểu

"In Phase" (thành phần đồng pha) và "Quadrature" (thành phần vuông pha) được xác định theo công thức số (7) và (8) dưới đây:

$$I = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^n V_i \sin(2\pi f \times t_i) \quad (7)$$

$$Q = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^n V_i \cos(2\pi f \times t_i) \quad (8)$$

trong đó:

N: số mẫu trên 1 tần số

$V_i$ : điện áp tại thời điểm  $t_i$

f: tần số

$t_i$ : thời gian tại thời điểm  $i$

Từ I, Q có thể tính được độ lệch pha qua công thức (9):



$$\varphi = \arctan \frac{Q}{I} \quad (9)$$

Dữ liệu phổ trở kháng được biểu diễn qua đồ thị Nyquist và đồ thị Bode, từ đó giúp ta mô hình hóa được tế bào dưới dạng mạch điện. Kết quả thu được giúp phân biệt giữa xoài chưa chín và xoài chín thông qua sự thay đổi trở kháng dựa trên tần số và thời gian. Nhóm đồng thời tiến hành cải tiến mạch bằng cách sử dụng hệ thống với mục tiêu có thể tự động hóa quá trình thu và phân tích dữ liệu, hạn chế việc thao tác của người dùng để tránh tạo ra sai số trong quá trình đo.

### 4. Kết quả và thảo luận

#### 4.1. Đồ thị của xoài tím và chưa tím tại 4 vị trí

Quy ước của các đường lần lượt như sau: đường màu xanh đại diện cho quả chưa tím carbendazim, lần lượt từ đuôi, lưng, thân, đầu quả. Các đường màu đỏ là quả đã tím carbendazim, lần lượt các màu từ nhạt tới đậm là đầu, lưng, đuôi, thân (Hình 4).

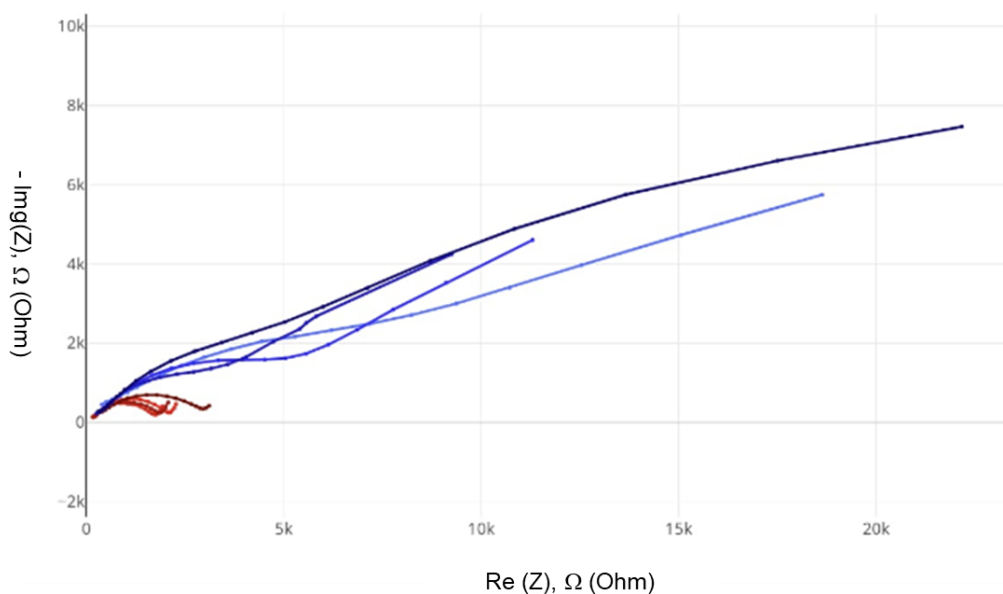
File name	Plot color	Format	Status	Controls
xoaiduoi.csv		BASIC	Loaded	 
xoailung.csv		BASIC	Loaded	 
xoaithan2chuan.csv		BASIC	Loaded	 
xoaidau.csv		BASIC	Loaded	 
Bode0XXD.csv		BASIC	Loaded	 
Bode0XXL.csv		BASIC	Loaded	 
Bode0XXDD.csv		BASIC	Loaded	 
Bode0XXT.csv		BASIC	Loaded	 

**Hình 4.** Bảng các vị trí của quả thể hiện bằng màu của xoài

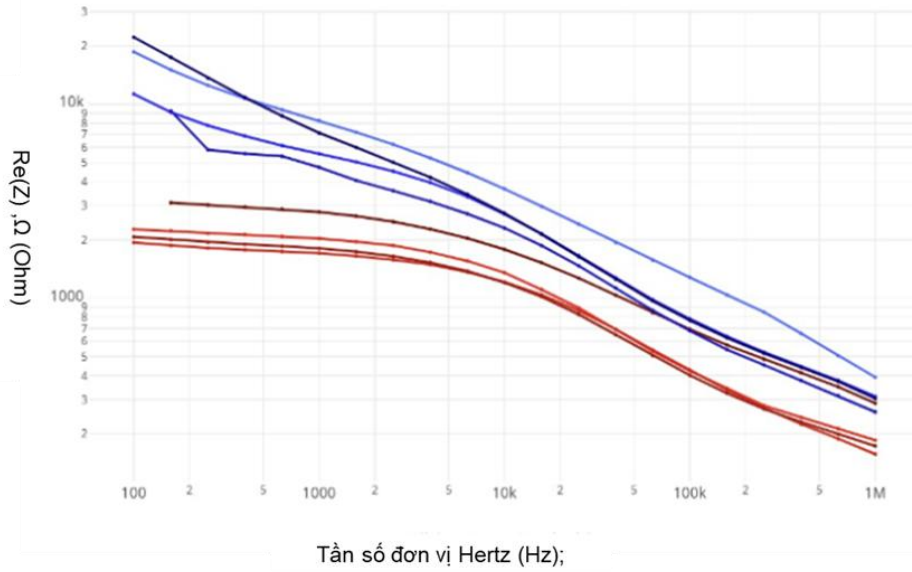
Hình 5 mô tả đồ thị nyquist của xoài tẩm và xoài chưa tẩm carbendazim, kết quả thu được là đường cong của xoài chưa tẩm carbendazim nằm cao hơn và mở rộng hơn so với mẫu đã tẩm. Điều này cho thấy mẫu chưa tẩm có trở kháng tổng lớn hơn.

Hình số 6 mô tả đồ thị BODE trở thực của xoài. Mẫu chưa tẩm duy trì giá trị cao ổn định trong toàn dải tần, còn mẫu đã tẩm giảm rõ rệt khi tần số tăng. Điều này phản ánh tính cách điện của màng sinh chất bị suy giảm do hoá chất làm tăng tính thấm ion.

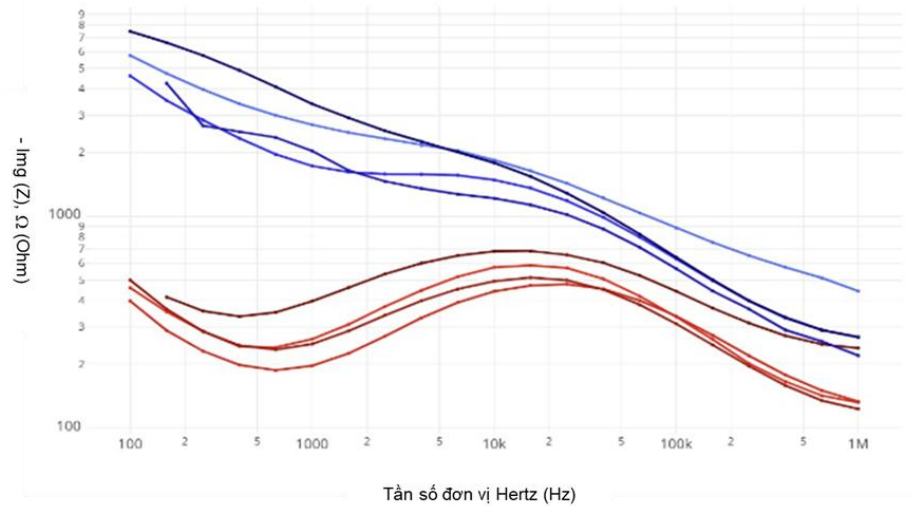
Hình 7 mô tả đồ thị Bode trở ảo của xoài. Xoài đã tẩm có giá trị Im Z nhỏ hơn, cho thấy điện dung tương đương tăng lên, nghĩa là màng tế bào bị tổn thương và dẫn điện tốt hơn. Hình 8 mô tả đồ thị trở kháng của xoài và tổng trở của mẫu giảm khi tẩm carbendazim, điều này khẳng định rằng thuốc làm tăng khả năng dẫn điện nội mô và giảm điện trở toàn phần. Hình 9 mô tả đồ thị pha của xoài. Mẫu đã tẩm có độ lệch pha nhỏ hơn, chứng tỏ đáp ứng điện dung mạnh hơn (năng lượng điện tích truyền qua màng nhanh hơn), phù hợp với hiện tượng màng tế bào mất tính cách điện.



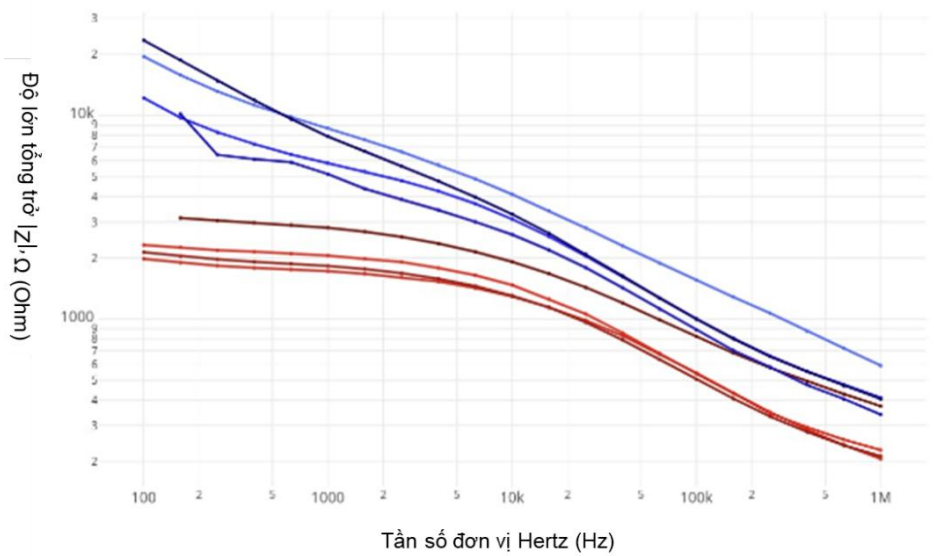
**Hình 5.** Đồ thị Nyquist của xoài tẩm và chưa tẩm



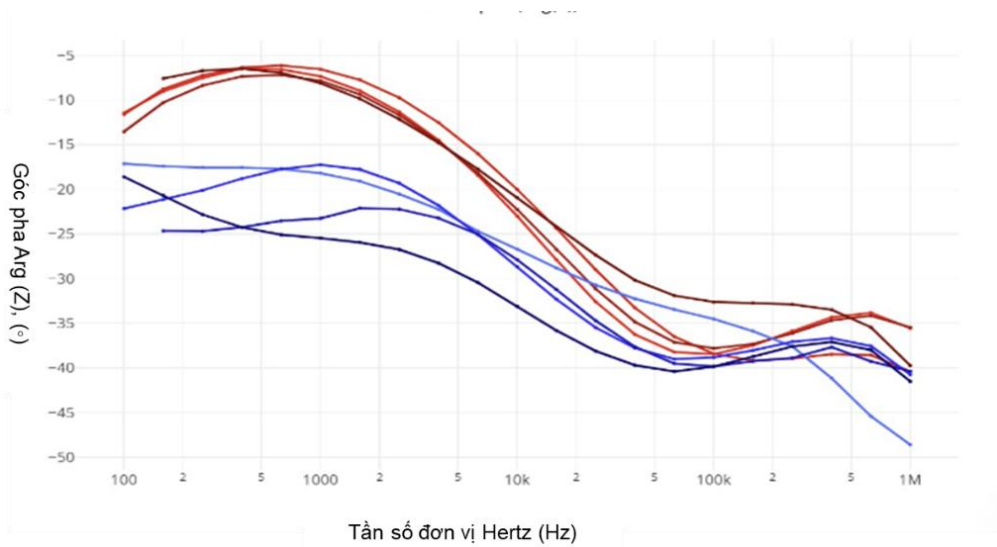
**Hình 6.** Đồ thị Bode trở thực của xoài



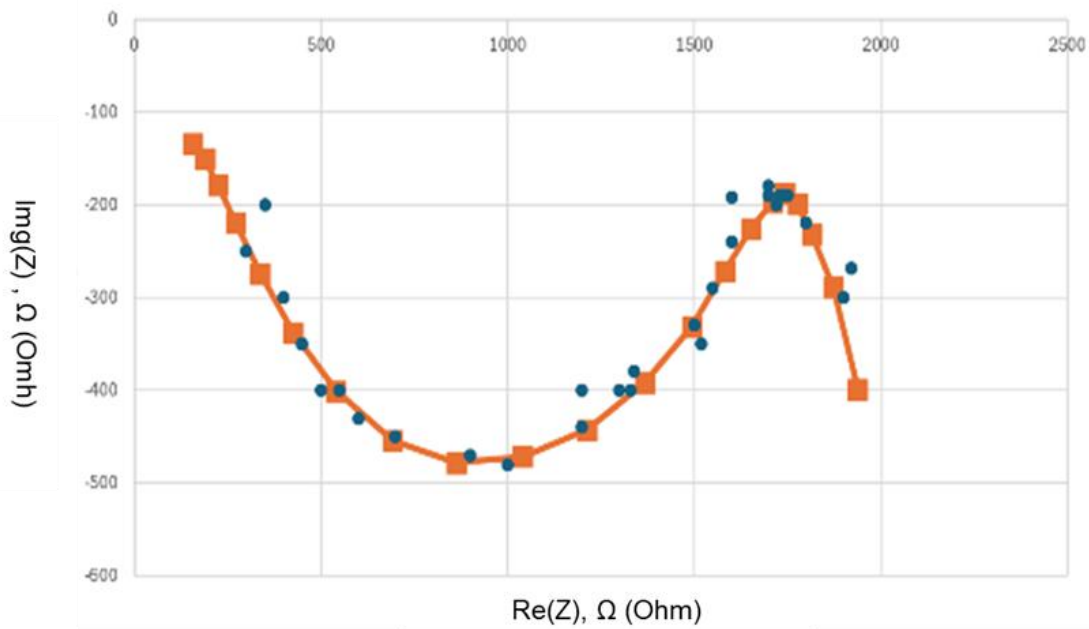
**Hình 7.** Đồ thị Bode trở ảo của xoài



**Hình 8.** Đồ thị Bode trở kháng của xoài



Hình 9. Đồ thị Bode pha của xoài



Hình 10. Đối chiếu giữa hệ thống và oscilloscope với xoài

**4.2. Đối chiếu hệ thống với oscilloscope**

Hình 10 thể hiện so sánh dữ liệu đo của hệ thống (chấm xanh) với dữ liệu chuẩn từ oscilloscope (đường màu cam). Kết quả cho thấy hai đường có xu hướng tương đồng, chứng tỏ hệ thống đạt độ tin cậy cao và đảm bảo tính chính xác trong đo lường. Sai lệch chủ yếu xuất hiện ở các điểm đầu dải tần do giới hạn độ phân giải ADC hoặc nhiễu tín hiệu, nhưng nhìn chung vẫn nằm trong mức chấp nhận được, khẳng định hệ thống có thể áp dụng cho thực tế với khả năng đo ổn định.

Qua xử lý dữ liệu, kết quả cho thấy trở kháng

của quả chưa tẩm duy trì xu hướng cao và ổn định hơn, trong khi quả đã tẩm giảm rõ rệt. Điều này thống nhất với phân tích trên [25], khẳng định rằng xử lý carbendazim làm tăng tính thấm màng sinh chất, dẫn đến giảm điện trở nội mô và suy giảm tổng trở của mẫu. Kết quả này cũng phù hợp với các công bố về ảnh hưởng của độ chín và trạng thái mô quả lên phổ trở kháng điện [18, 22, 23, 24], khi các thay đổi trong cấu trúc mô và tính dẫn ion đều dẫn tới sự dịch chuyển rõ rệt trên đồ thị Nyquist và Bode. So với các phương pháp hóa phân tích như HPLC-UV, phép đo phổ ion di động hoặc UV-Vis [9, 10, 11], phương pháp đề xuất

không nhằm thay thế phép định lượng chuẩn trong phòng thí nghiệm mà hướng tới vai trò sàng lọc nhanh, chi phí thấp và không phá hủy mẫu. Đồng thời, so với các hướng tiếp cận đánh giá chất lượng xoài không phá hủy dựa trên âm học, phổ nhìn thấy/cận hồng ngoại hoặc đánh giá tính chất mô quả [8, 15, 17], phương pháp EIS có ưu thế vượt trội ở khả năng phản ánh trực tiếp biến đổi điện học bên trong mô, đặc biệt là sự thay đổi độ thấm màng tế bào sau xử lý hóa chất.

### 5. Kết luận và định hướng

Như vậy, ta có thể thấy các giá trị định lượng chính đã được đảm bảo và trình bày trong bài. Đồng thời, nghiên cứu đã chứng minh khả năng ứng dụng phương pháp điện hóa trở kháng (EIS) trong phát hiện dư lượng carbendazim trên quả xoài. Kết quả cho thấy sự khác biệt rõ rệt về đặc trưng phổ trở kháng giữa các mẫu có xử lý carbendazim và mẫu đối chứng, đồng thời khẳng định tính khả thi của EIS như một công cụ phân tích nhanh, không phá hủy. Phương pháp này có tiềm năng tích hợp vào các hệ thống giám sát an toàn thực phẩm nhằm hỗ trợ kiểm soát dư lượng thuốc bảo vệ thực vật. Trong thời gian tới, nghiên cứu cần mở rộng trên nhiều giống xoài và các loại trái cây khác, đồng thời tối ưu thuật toán xử lý tín hiệu để nâng cao độ chính xác và khả năng ứng dụng thực tiễn.

### Tài liệu tham khảo

- [1] European Commission. (2024). Commission Implementing Regulation (EU) 2024/3153 of 18 December 2024 amending Implementing Regulation (EU) 2019/1793 on the temporary increase of official controls and emergency measures governing the entry into the Union of certain goods from certain third countries implementing Regulations (EU) 2017/625 and (EC) No 178/2002. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202403153,2024](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202403153,2024) (truy cập 08/06/2025)
- [2] Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn. (2022). Đề án Phát triển cây ăn quả chủ lực toàn quốc đến năm 2025 và 2030. Hà Nội, Việt Nam.
- [3] General Statistic Office of Vietnam. (2019). Statistical YearBook of Vietnam. *Statistical Publishing House*
- [4] X. Xu, K. Yan, J. Xiao, J. Guo, X. Lu, L. Wang, Y. Zhang. (2024). Fluorescence spectroscopy detection of carbendazim residue in cucumber juice based on BC. *Journal of Food Composition and Analysis*, 130, 106157. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106157>
- [5] D. Wang, G. Yang, X. Yun, T. Luo, H. Guo, L. Pan, W. Du, Y. Wang, Q. Wang, P. Wang, Q. Zhang, Y. Li, N. Lin. (2024). Carbendazim residue in plant-based foods in China: Consecutive surveys from 2011 to 2020. *Environmental Science and Ecotechnology*, 17, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100301>
- [6] T. Wang, Z. Wang, G. Liao, X. Li, J. Gu, J. Qiu, Y. Qian. (2025). Carbendazim led to neurological abnormalities by interfering metabolic profiles in zebrafish brain after short-term exposure. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 7, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.12.001>
- [7] B. Hu, I.M.C.M. Rietjens, B. Spenkeliink, N.W. Van den Brink. (2024). Species specific kinetics of imidacloprid and carbendazim in mouse and rat and consequences for biomonitoring. *Computational Toxicology*, 32, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.comtox.2024.100334>
- [8] V.M. Trí, T.T. Hùng, V.H.T. Nguyễn. (2014). Phân tích không phá hủy độ săn chắc trái xoài bằng phương pháp âm thanh (Non-destructive analysis of mango's firmness using acoustic measurement). *Kỷ yếu Hội nghị Toàn quốc lần thứ 7 về Cơ điện tử - VCM-2014*, 330-335.
- [9] B. Phansawan, T. Prapamontol, P. Thavornytikarn, S. Chantara, A. Mangklabruks, C. Santasup. (2015). A sensitive method for determination of carbendazim residue in vegetable samples using HPLC UV and its application in health risk assessment. *Chiang Mai Journal of Science*,

- 42(3), 681–690.
- [10] W. Liu, Y. Chen, F. Liu, X. Yin, J. Cai, Y. Xia, J. Yu, G. Jing, W. Li, W. Liu. (2024). Effect of resolution enhancement using metal ion assisted strategy based on electrospray ionization-ion mobility spectrometry: A case study of carbendazim and thiabendazole in fruits. *Talanta*, 267, 125151. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.125151>
- [11] N. Pourreza, S. Rastegarzadeh, A. Larki. (2015). Determination of fungicide carbendazim in water and soil samples using dispersive liquid–liquid microextraction and microvolume UV–vis spectrophotometry. *Talanta*, 134, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.10.056>
- [12] M. Lebrun, A. Plotto, K. Goodner, M.-N. Ducamp, E. Baldwin. (2008). Discrimination of mango fruit maturity by volatiles using the electronic nose and gas chromatography. *Postharvest Biology and Technology*, 48(1), 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.010>
- [13] S. Tian, H. Xu. (2022). Nondestructive Methods for the Quality Assessment of Fruits and Vegetables Considering Their Physical and Biological Variability. *Food Engineering Reviews*, 14, 380–407. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09300-0>
- [14] P.P. Subedi, K.B. Walsh, G. Owens. (2007). Prediction of mango eating quality at harvest using short-wave near infrared spectrometry. *Postharvest Biology and Technology*, 43(3), 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.09.012>
- [15] S.N. Jha, S. Chopra, A.R.P. Kingsly. (2005). Determination of sweetness of intact mango using visual spectral analysis. *Biosystems Engineering*, 91(2), 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.03.007>
- [16] E.A. Baldwin, J.K. Burns, W. Kazokas, J.K. Brecht, R.D. Hagenmaier, R.J. Bender, E. Pesis. (1999). Effect of two edible coatings with different permeability characteristics on mango (*Mangifera indica* L.) ripening during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 17(3), 215–226. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(99\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(99)00053-8)
- [17] M. Valente, J.Y. Ferrandis. (2003). Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method. *Postharvest Biology and Technology*, 29(2), 219–228. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00252-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00252-1)
- [18] L. Feng, J. Gao, X. Sui, T. Weng, A. Kong. (2024). Effect of fruit ripeness on electrical impedance spectrum parameters. *LWT – Food Science and Technology*, 208, 116751. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116751>
- [19] L. Yang, T. Chen. (2016). A compact signal generation and acquisition circuit for electrochemical impedance spectroscopy. *2016 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, 496–499. <https://doi.org/10.1109/BioCAS.2016.7833781>
- [20] Clean Energy Institute - University of Washington. (2018). Impedance Basics: EIS and NLEIS Wiki. <https://www.cei.washington.edu/wp-content/uploads/2018/05/EIS-and-NLEIS-Wiki.pdf>. (truy cập ngày 22/05/2025)
- [21] Engineering LibreTexts. (2019). Electrochemical Impedance Spectroscopy. [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials\\_Science/Supplemental\\_Môđuns\\_\(Materials\\_Science\)/Insulators/Electrochemical\\_Impedance\\_Spectroscopy](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Môđuns_(Materials_Science)/Insulators/Electrochemical_Impedance_Spectroscopy). (accessed 3rd March 2025).
- [22] M. Van Haeverbeke, B. De Baets, M. Stock. (2023). Plant impedance spectroscopy: a review of modeling approaches and applications. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1187573. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1187573>
- [23] A. Chowdhury, T. K. Bera, D. Ghoshal, B.

- Chakraborty. (2015). Studying the electrical impedance variations in banana ripening using electrical impedance spectroscopy. *Proceedings of the 2015 Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT)*. <https://doi.org/10.1109/C3IT.2015.7060196>
- [24] P. Ibba. (2021). Fruit Quality Evaluation Using Electrical Impedance Spectroscopy. *Free University of Bozen-Bolzano*.
- [25] M. Shahid, B. Ahmed, A. Zaidi, M.S. Khan. (2018). Toxicity of fungicides to *Pisum sativum*: a study of oxidative damage, growth suppression, cellular death and morpho-anatomical changes. *RSC Advances*, 8(67), 38483–38498. <https://doi.org/10.1039/C8RA03923B>