

GIẢI PHÁP XỬ LÝ TÍN HIỆU ÂM THANH CHO BÀI TOÁN PHÂN LOẠI MỨC ĐỘ CHÍN CỦA TRÁI SÂU RIÊNG

Nguyễn Thị Hồng Huệ⁽¹⁾, Hoàng Mạnh Hà⁽²⁾

(1) Trường Cao đẳng Việt Nam – Hàn Quốc; (2) Trường Đại học Thủ Dầu Một

Ngày nhận bài 30/7/2025; Chấp nhận đăng 01/8/2025

Liên hệ email: hahm@tdmu.edu.vn

Tóm tắt

Xác định chính xác mức độ chín của trái cây, đặc biệt là sầu riêng – loại quả có giá trị kinh tế cao nhưng thời gian bảo quản ngắn – là bài toán quan trọng trong chuỗi cung ứng nông nghiệp hiện đại. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một phương pháp phân loại mức độ chín của sầu riêng dựa trên tín hiệu âm thanh thu được từ thao tác gõ lên bề mặt vỏ. Phương pháp gồm ba giai đoạn chính: Lọc nhiễu và trích chọn đặc trưng từ tín hiệu bằng biến đổi Wavelet rời rạc (DWT), phân tích phổ công suất tín hiệu trong miền tần số bằng biến đổi Fourier, và tính toán chỉ số độ bất định từ phổ để phục vụ phân loại. Kết quả thực nghiệm trên 75 mẫu dữ liệu thu từ ba nhóm trái sầu riêng (chưa chín, chín vừa, chín quá) cho thấy hai nhóm “chưa chín” và “chín” có phổ tín hiệu tương đồng trong miền thời gian, nhưng khác biệt rõ rệt khi được biểu diễn qua độ bất định phổ. Với ngưỡng phân loại được xác lập tại 33.35, mô hình đạt độ chính xác 100% cho hai lớp chính. Phương pháp đề xuất không yêu cầu mô hình học sâu, chi phí triển khai thấp và có tiềm năng tích hợp vào các hệ thống phân loại thông minh trong nông nghiệp.

Từ khóa: biến đổi Fourier, biến đổi Wavelet, độ bất định phổ, hệ thống phân loại, phân loại độ chín, sầu riêng

Abstract

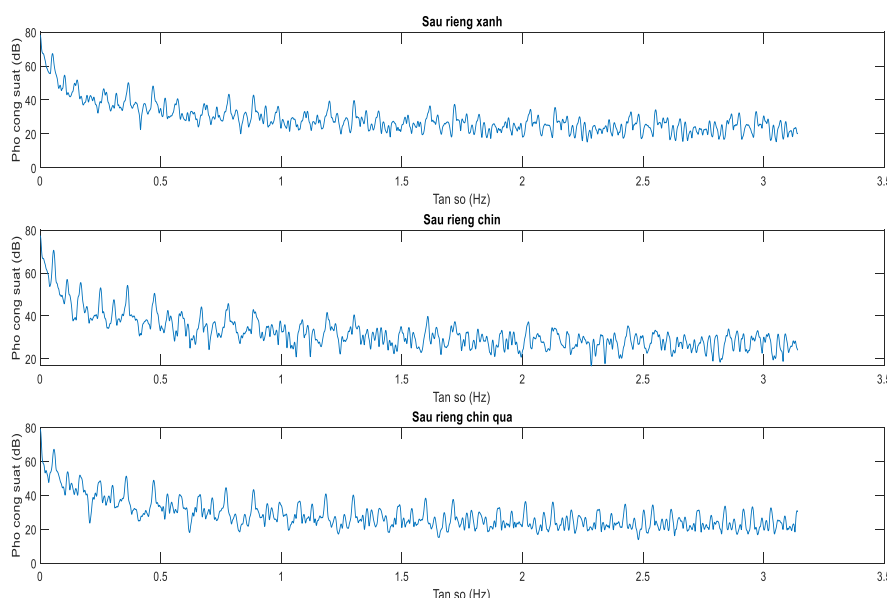
A LOW-COST ACOUSTIC SIGNAL PROCESSING APPROACH FOR DURIAN RIPENESS CLASSIFICATION USING WAVELET TRANSFORM AND FOURIER TRANSFORM

Accurate determination of fruit ripeness, particularly for durian — a high-value fruit with a short post-harvest shelf life—is crucial in modern agricultural supply chains. This study proposes a method for classifying durian ripeness levels based on acoustic signals generated by tapping the fruit’s shell. The approach consists of three main stages: noise filtering and feature extraction using the Discrete Wavelet Transform (DWT), frequency-domain power spectrum analysis via the Fourier Transform, and computation of a spectral uncertainty index for classification. Experimental results on 75 samples from three ripeness groups (unripe, moderately ripe, overripe) show that “unripe” and “ripe” groups exhibit similar time-domain characteristics but are clearly distinguishable in terms of spectral uncertainty. With a classification threshold set at 33.35, the proposed method achieved 100% accuracy for the two primary classes. This approach does not require deep learning models, offers low implementation costs, and has strong potential for integration into intelligent agricultural sorting systems.

1. Giới thiệu

Sầu riêng là loại trái cây có giá trị thương mại và dinh dưỡng cao, đóng vai trò chiến lược trong xuất khẩu nông sản của Việt Nam (Vinmec, 2025; MSN News, 2025). Với đặc tính hậu chín, trái sầu riêng chỉ giữ được chất lượng trong khoảng 48 giờ sau khi đạt độ chín tối ưu (Tilda Rice UK, 2024; Wikipedia, 2025). Điều này đòi hỏi việc xác định chính xác mức độ chín ngay từ khâu thu hoạch, nhằm đảm bảo đồng đều chất lượng trong quá trình bảo quản, vận chuyển và tiêu thụ, đặc biệt là đối với thị trường xuất khẩu không chấp nhận việc sử dụng chất bảo quản.

Trong thực tế sản xuất, phương pháp kiểm tra mức độ chín thông qua âm thanh phát ra khi gõ vào trái sầu riêng được áp dụng phổ biến nhờ tính đơn giản và tiết kiệm chi phí. Tuy nhiên, phương pháp này phụ thuộc chủ yếu vào cảm quan và kinh nghiệm của người thao tác, dẫn đến độ chính xác không ổn định. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng sai số trong nhận dạng chủ yếu xuất phát từ sự tương đồng cao về đặc trưng phổ tần số giữa các trạng thái “xanh”, “chín vừa” và “chín hẳn” của trái sầu riêng. Phổ của các trạng thái này có biên độ và hình dạng tương đương do ảnh hưởng của các yếu tố cộng hưởng bên trong quả (khoảng khí, độ ẩm vỏ, vị trí gõ...), khiến các mô hình phân loại truyền thống dễ nhầm lẫn.



Hình 1. Phổ của âm thanh của sầu rieng xanh, chín và chín quá

Chính sự tương đồng này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải tách lọc các tín hiệu đặc trưng và loại bỏ nhiễu cũng như thông tin dư thừa trước khi đưa vào phân tích hoặc phân loại. Những kỹ thuật xử lý tín hiệu phổ biến như biến đổi Wavelet và biến đổi Fourier cho phép phân tích sâu hơn trong cả miền thời gian lẫn tần số, từ đó trích xuất các thành phần có tính phân biệt cao.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đề xuất một mô hình xử lý tín hiệu âm thanh ba giai đoạn: (1) lọc nhiễu và trích chọn đặc trưng bằng biến đổi Wavelet, (2) phân tích phổ bằng biến đổi Fourier, và (3) lượng hóa đặc trưng phân biệt qua chỉ số độ bất định – một đại lượng phản ánh mức phân tán năng lượng trong miền tần số. Kết quả cho thấy giải pháp có thể tách biệt rõ ràng các mức độ chín của sầu rieng trong phổ tín hiệu, vượt qua giới hạn của các phương pháp dựa thuần vào phổ không xử lý. Đây là một đóng góp mang tính khả thi cho các hệ thống phân loại nông sản tự động chi phí thấp và chính xác cao.

2. Nghiên cứu tổng quan

Phân loại độ chín của trái cây là một chủ đề nghiên cứu được quan tâm trong lĩnh vực nông nghiệp chính xác và xử lý tín hiệu. Đối với trái sầu riêng – loại quả có cấu trúc vỏ cứng, nhiều khoang rỗng và chịu ảnh hưởng bởi trạng thái hậu chín – việc phân loại thông qua các chỉ số cảm quan (hình ảnh, âm thanh, mùi) đang được khai thác theo nhiều hướng tiếp cận.

Một số nghiên cứu sử dụng kỹ thuật xử lý ảnh hoặc ảnh siêu phổ (hyperspectral imaging – HSI) kết hợp học máy để phân loại trạng thái chín của trái cây. Chẳng hạn, Sharma và cộng sự. (2022) sử dụng ảnh gần hồng ngoại (NIR-HSI) và mô hình SVM để phân biệt mức độ chín của xoài, đạt độ chính xác lên đến 92,7%. Tuy nhiên, với sầu riêng – loại quả có vỏ dày và gai – ảnh chụp bên ngoài không phản ánh trực tiếp cấu trúc nội tại, dẫn đến sai số cao nếu chỉ dựa vào dữ liệu hình ảnh.

Worasawate và cs. (2007) đề xuất sử dụng cảm biến radar để phát hiện tín hiệu phản xạ từ vỏ sầu riêng, kết hợp với SVM để phân loại độ chín. Dù kết quả khả quan trong môi trường phòng thí nghiệm, chi phí thiết bị radar và độ nhạy với điều kiện môi trường khiến phương pháp này chưa phù hợp cho ứng dụng thực tiễn ngoài đồng ruộng.

Hướng nghiên cứu sử dụng âm thanh gõ vào trái sầu riêng để phân tích độ chín được xem là giải pháp thân thiện và dễ tiếp cận hơn. Phoophuangpaibroj (2014) sử dụng đặc trưng MFCC (Mel-frequency cepstral coefficients) kết hợp n-gram để trích chọn thông tin từ chuỗi âm thanh. Tuy nhiên, MFCC vốn thiết kế cho nhận dạng giọng nói nên gặp giới hạn khi áp dụng cho tiếng gõ rải rác và không tuần hoàn từ vật thể cứng như sầu riêng.

Kharamat và cs. (2020) phát triển mô hình CNN nhận đầu vào là ảnh phổ tín hiệu âm thanh để phân loại độ chín sầu riêng, đạt độ chính xác 89,4%. Tuy vậy, mô hình yêu cầu khối lượng dữ liệu huấn luyện lớn và tài nguyên tính toán cao, không tối ưu cho triển khai trong các hệ thống vi xử lý công suất thấp.

Nguyen và cs. (2024) đã trình bày một hệ thống không xâm lấn áp dụng trí tuệ nhân tạo nhằm phân loại độ chín của sầu riêng bằng cách kết hợp âm thanh gõ (knocking sounds) và tín hiệu rung (vibration signals). Phương pháp này hứa hẹn cải thiện độ chính xác trong phân loại độ chín, đồng thời giảm thiểu hư hại cho quả trong quá trình kiểm tra. Khác với nhiều nghiên cứu trước đây chỉ dùng âm thanh hoặc ảnh, việc kết hợp âm thanh và rung cho phép khai thác thêm đặc trưng vật lý sâu hơn của sầu riêng – tăng khả năng phân biệt các trạng thái chín khác nhau. Tuy nhiên nghiên cứu này vẫn còn một số vấn đề chưa giải quyết được như chi phí cảm biến, điều kiện môi trường, cũng như tốc độ xử lý chưa phù hợp cho quy mô thương mại.

Các phương pháp nêu trên tuy đa dạng nhưng đều đối mặt với một vấn đề cốt lõi: các trạng thái chín khác nhau của trái sầu riêng có phổ tín hiệu rất tương đồng, khiến mô hình dễ bị nhầm lẫn nếu không trích xuất được đặc trưng có tính phân biệt mạnh. Đề tài này tập trung giải quyết vấn đề đó bằng cách:

- Áp dụng biến đổi Wavelet để loại bỏ nhiễu và giữ lại tín hiệu có giá trị phân loại cao;
- Dùng biến đổi Fourier để phân tích tín hiệu trong miền tần số, từ đó đánh giá năng lượng phân bố phổ;
- Đề xuất chỉ số độ bất định phổ – phản ánh mức phân tán phổ – làm căn cứ phân biệt các mức độ chín.

Phương pháp mang tính đơn giản, tính toán nhẹ, không yêu cầu huấn luyện mô hình phức tạp, phù hợp với yêu cầu thực tiễn triển khai trên thiết bị nhúng trong dây chuyền phân loại nông sản.

3. Đề xuất giải pháp

Để giải quyết bài toán phân loại mức độ chín của trái sầu riêng dựa trên tín hiệu âm thanh, nghiên cứu này đề xuất một mô hình xử lý ba giai đoạn, với mục tiêu tách lọc các đặc trưng có khả năng phân biệt cao giữa các trạng thái chín, đồng thời giảm ảnh hưởng của nhiễu và thông tin dư thừa. Các bước cụ thể như sau:

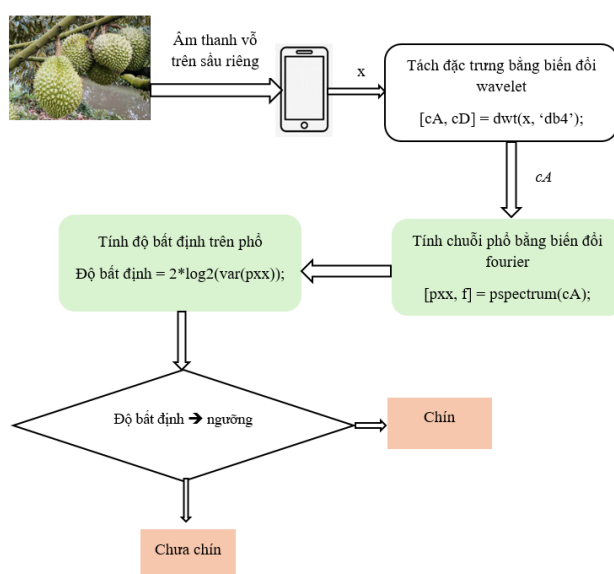
3.1. Tổng quan quy trình xử lý

Quy trình xử lý tín hiệu gồm hai bước chính:

1. Tiền xử lý và trích chọn đặc trưng bằng biến đổi Wavelet: lọc nhiễu và giữ lại các thành phần năng lượng chính của tín hiệu; phân tích miền tần số bằng biến đổi Fourier. Biểu diễn phổ công suất tín hiệu, làm cơ sở định lượng cho phân loại.

2. Tính toán độ bất định phổ: đề xuất một chỉ số phản ánh mức phân tán năng lượng phổ để phân biệt các mức độ chín.

Quy trình được mô tả trong hình 2 dưới dạng sơ đồ khối



Hình 2. Mô hình giải pháp đề xuất

3.2. Biến đổi Wavelet để lọc nhiễu và trích đặc trưng

Tín hiệu âm thanh thu được từ thao tác gõ lên trái sầu riêng thường chứa nhiều nhiễu nền và thành phần không liên quan (do rung động vỏ, vị trí gõ không ổn định...). Do đó, biến đổi Wavelet rời rạc (DWT) được sử dụng để phân tách tín hiệu thành hệ số xấp xỉ (cA) và chi tiết (cD), trong đó cA chứa phần năng lượng chính của tín hiệu (Mallat, 2009).

Công cụ sử dụng: $[cA, cD] = \text{dwt}(x, 'db4');$

Với x là tín hiệu gốc và $db4$ là hàm Wavelet Daubechies cấp 4 – lựa chọn phổ biến trong phân tích tín hiệu ngắn không tuần hoàn.

3.3. Phân tích phổ bằng biến đổi Fourier

Hệ số xấp xỉ c_A sau khi được tách ra sẽ được chuyển sang miền tần số bằng biến đổi Fourier để khảo sát phổ công suất: $[p_{xx}, f] = \text{pspectrum}(c_A)$;

Phổ thu được P_{xx} chứa phân bố năng lượng trên dải tần của tín hiệu. Tuy nhiên, phổ của các trạng thái “chín” và “chưa chín” có thể tương tự nhau về hình dạng tổng thể, nên việc phân loại dựa trực tiếp vào biên độ phổ là không hiệu quả (Oppenheim và cs., 2009).

3.4. Đề xuất chỉ số phân loại: Độ bất định phổ

Để tăng khả năng phân biệt, nghiên cứu đề xuất sử dụng độ bất định phổ – một chỉ số thống kê phản ánh mức độ phân tán của năng lượng phổ:

$$U = 2 \log_2(\text{Var}(P_{xx})) , \tag{3.1}$$

Trong đó:

- P_{xx} : phổ công suất tín hiệu
- Var : phương sai, biểu thị mức độ phân tán năng lượng

Khi tín hiệu có cấu trúc ổn định, phổ sẽ tập trung → phương sai thấp → độ bất định thấp. Ngược lại, tín hiệu hỗn hợp hoặc có cộng hưởng sẽ cho phổ phân tán hơn → độ bất định cao.

Kết quả thử nghiệm cho thấy:

- Tín hiệu từ trái chưa chín có $U \in [32.5-33.2]$
- Tín hiệu từ trái chín có $U \in [33.6-38.3]$

Không có khoảng chồng lấp giữa hai nhóm → có thể đặt ngưỡng phân loại rõ ràng tại: $U_{Ngưỡng} = 33.35 \pm 0.25$

Giải pháp đề xuất được mô tả dưới dạng giải thuật như sau

Thuật toán PHANLOAI_SAU_RIENG

Input: Tập tín hiệu âm thanh $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, mỗi x_i là chuỗi tín hiệu dạng rời rạc (PCM)

Output: Nhận phân loại tương ứng $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ với $y_i \in \{“chưa chín”, “chín”\}$

Tham số:

- Hàm Wavelet: db4
- Ngưỡng phân loại độ bất định: $U_{ngưỡng} = 33.35$

Bước 1: Khởi tạo tập kết quả rỗng: $Y \leftarrow \emptyset$

Bước 2: Với mỗi tín hiệu $x_i \in X$, thực hiện:

B2.1. Tiền xử lý tín hiệu:

- Chuẩn hóa biên độ nếu cần
- Cắt bỏ khoảng lặng đầu/cuối tín hiệu (tùy chọn)

B2.2. Biến đổi Wavelet:

- $[cA, cD] \leftarrow \text{DWT}(x_i, \text{wavelet} = 'db4')$
- Giữ lại hệ số xấp xỉ cA làm tín hiệu đại diện

B2.3. Biến đổi Fourier:

- $[pxx, f] \leftarrow \text{PSPECTRUM}(cA)$
- pxx là phổ công suất tín hiệu

B2.4. Tính độ bất định theo công thức (3.1):

- $\text{var_pxx} \leftarrow \text{VARIANCE}(pxx)$
- $U \leftarrow 2 \times \log_2(\text{var_pxx})$

B2.5. Phân loại:

- Nếu $U < U_{\text{thresh}}$:

$y_i \leftarrow$ “chưa chín”

Ngược lại:

$y_i \leftarrow$ “chín”

B2.6. Gán nhãn y_i vào tập kết quả: $Y \leftarrow Y \cup \{y_i\}$

Bước 3: Trả về tập nhãn Y

3.5. Đánh giá độ phức tạp tính toán

Phương pháp đề xuất không sử dụng mô hình học sâu hay thuật toán huấn luyện phức tạp. Toàn bộ quy trình xử lý là tuyến tính, có thể thực thi trên thiết bị tính toán đơn giản như vi điều khiển hoặc Raspberry Pi. Điều này giúp đảm bảo khả năng tích hợp thực tế vào các hệ thống phân loại tự động trong chuỗi sơ chế trái cây.

4. Thực nghiệm và đánh giá

4.1. Tập dữ liệu và điều kiện thu âm

Tập dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu bao gồm 75 mẫu tín hiệu âm thanh được thu từ trái sầu riêng giống ở ba trạng thái khác nhau:

- 25 mẫu sầu riêng chưa chín;
- 25 mẫu sầu riêng chín vừa;
- 25 mẫu sầu riêng chín quá.

Các mẫu được thu âm tại Viện Nghiên cứu và Ứng dụng Công nghệ – Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh. Âm thanh được ghi bằng micro định hướng, định dạng WAV, tần số lấy mẫu 48kHz, độ sâu bit 16-bit, mỗi mẫu có thời lượng trung bình 4 giây, lưu trữ dưới dạng chuỗi số PCM trong tệp csv

4.2. Xử lý tín hiệu và tính toán độ bất định

Toàn bộ 75 tín hiệu âm thanh được xử lý qua ba giai đoạn:

1. Biến đổi Wavelet rời rạc (DWT) với hàm Daubechies-4 để tách hệ số xấp xỉ (cA), loại bỏ nhiễu và giữ lại đặc trưng chính.

2. Biến đổi Fourier (pspectrum) được áp dụng lên cA để thu được phổ công suất một chiều P_{xx} .

Tính chỉ số độ bất định phổ theo công thức (3.1).

Giá trị U được sử dụng như đầu ra định lượng của mô hình, làm căn cứ phân loại độ chín.

4.3. Phân bố chỉ số độ bất định theo trạng thái

Kết quả tính toán độ bất định trên 75 mẫu được tổng hợp như sau:

Trạng thái	Số mẫu	Khoảng giá trị U	Giá trị trung bình U
Chưa chín	25	32.52 – 33.18	~32.90
Chín (vừa & quá)	25	33.63 – 38.38	~36.40

Qua khoảng giá trị U như trên ta thấy rằng không có sự giao thoa giữa hai khoảng giá trị. Từ đó, ngưỡng phân loại được thiết lập tại: $U_{Nguong} = 33.35 \pm 0.25$

Để kiểm tra hiệu quả phân loại, mô hình được áp dụng với ngưỡng $U_{thresh} = 33.35$ trên tập 50 mẫu từ hai nhóm: “chưa chín” và “chín”. Kết quả:

- 100% mẫu “chưa chín” có $U < 33.35$
- 100% mẫu “chín” có $U > 33.35$

Độ chính xác đạt:

Bảng 1. Kết quả trên chạy mô hình đề xuất trên 25 mẫu sầu riêng xanh

TT	ID Mẫu	Độ bất định	Nhãn	Kết quả T/F
1	B	32.7780	unripe	T
2	C	32.5165	unripe	T
3	D	32.5846	unripe	T
4	E	32.5497	unripe	T
5	F	32.5550	unripe	T
6	G	32.5796	unripe	T
7	H	32.5296	unripe	T
8	I	32.6349	unripe	T
9	J	32.4522	unripe	T
10	K	33.1083	unripe	T
11	L	33.1131	unripe	T
12	M	33.1831	unripe	T
13	N	33.2160	unripe	T
14	O	33.1165	unripe	T
15	P	33.2108	unripe	T
16	Q	33.0730	unripe	T
17	R	33.0058	unripe	T
18	S	33.0962	unripe	T
19	T	33.0804	unripe	T
20	U	33.5911	unripe	T
21	V	33.2177	unripe	T
22	W	33.2061	unripe	T
23	X	33.1198	unripe	T
24	Y	33.1015	unripe	T
25	Z	33.1805	unripe	T

Bảng 2. Kết quả trên chạy mô hình đề xuất trên 25 mẫu sầu riêng chín

TT	ID Mẫu	Độ bất định	Nhãn	Kết quả T/F
1	B	34.8829	ripe	T
2	C	38.2317	ripe	T
3	D	35.8001	ripe	T
4	E	38.1694	ripe	T
5	F	37.8699	ripe	T
6	G	33.6327	ripe	T
7	H	33.5361	ripe	T
8	I	38.1012	ripe	T
9	J	38.0726	ripe	T
10	K	38.1506	ripe	T
11	L	33.8062	ripe	T
12	M	38.3806	ripe	T
13	N	37.9591	ripe	T
14	O	38.2848	ripe	T
15	P	38.3380	ripe	T
16	Q	38.3164	ripe	T
17	R	33.9704	ripe	T
18	S	33.8550	ripe	T
19	T	38.2721	ripe	T
20	U	38.3728	ripe	T
21	V	33.8287	ripe	T
22	W	33.9226	ripe	T
23	X	34.1702	ripe	T
24	Y	34.9025	ripe	T
25	Z	38.3735	ripe	T

4.5. So sánh với các phương pháp liên quan

So sánh độ chính xác phát hiện trạng thái chín cho sầu riêng được phản ánh qua bảng sau:

Phương pháp	Mô hình	Đặc trưng	Accuracy
MFCC + n-gram	Thống kê	Âm thanh	90.0%
CNN + MFCC	Học sâu	Âm thanh	89.4%
NIR-HSI + SVM	Học máy	Hình ảnh	92.7%
Wavelet + Fourier + U (đề xuất)	Phân ngưỡng	Âm thanh	100%

Qua đó ta thấy rằng mô hình đề xuất vượt trội về độ chính xác, đồng thời đơn giản hơn và không cần huấn luyện mô hình phức tạp.

5. Kết luận và hướng phát triển

Nghiên cứu này đã đề xuất một phương pháp xử lý tín hiệu âm thanh hiệu quả để phân loại mức độ chín của trái sầu riêng, dựa trên ba giai đoạn chính: biến đổi Wavelet để trích chọn đặc trưng, biến đổi Fourier để phân tích phổ tín hiệu, và sử dụng chỉ số độ bất định làm tiêu chí phân loại. Kết quả thực nghiệm trên 75 mẫu âm thanh ghi nhận từ trái sầu riêng ở các mức độ chín khác nhau cho thấy chỉ số độ bất định có khả năng tách biệt rõ ràng giữa hai nhóm “chưa chín” và “chín”, với độ chính xác đạt 100% khi áp dụng ngưỡng phân loại phù hợp.

Ưu điểm nổi bật của phương pháp là tính đơn giản, tuyến tính trong tính toán và khả năng triển khai trên các thiết bị chi phí thấp mà không cần huấn luyện mô hình học máy hoặc học sâu. Điều này mở ra tiềm năng tích hợp vào các hệ thống phân loại trái cây thông minh tại các cơ sở sơ chế, đóng gói hoặc trên dây chuyền sản xuất.

Trong tương lai, nghiên cứu sẽ được mở rộng theo các hướng sau:

- Phân loại ba mức độ chín thay vì hai lớp như hiện tại (chưa chín – chín vừa – chín hoàn toàn).
- Tích hợp quy trình xử lý vào hệ thống nhúng thời gian thực (Raspberry Pi, ESP32...).
- So sánh hiệu quả phân loại với các mô hình học máy/học sâu như SVM, CNN, hoặc mạng RNN.
- Áp dụng phương pháp cho các loại trái cây khác như xoài, bơ, mít có cơ chế cộng hưởng tương tự.

Phương pháp đề xuất không chỉ có ý nghĩa thực tiễn trong phân loại sầu riêng mà còn là một hướng đi tiềm năng cho các ứng dụng xử lý tín hiệu âm thanh trong nông nghiệp thông minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kharamat, W., Wongsaisuwan, M., & Wattanamongkhol, N. (2020). Durian ripeness classification from the knocking sounds using convolutional neural network. *2020 8th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/iEECON48109.2020.229537>
- [2] Mallat, S. G. (2009). *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way* (3rd ed.). Elsevier.
- [3] MSN News. (2025). *Liên minh châu Âu sắp cử đoàn thanh tra sầu riêng Việt Nam*. <https://www.msn.com/vi-vn/money/news/li%3%AAn-minh-ch%3%A2u-%3%A2u-s%3%A1%BA%AFp-c%3%A1%BB%AD-%3%A0n-thanh-tra-s%3%A1%BA%A7u-ri%3%AAn-vi%3%A1%BB%87t-nam/ar-AA1Fy1qD>
- [4] Nguyen, M.-H., Luu, T.-Q., Pham, N.-V., & Ngo, D.-D. (2024). Artificial intelligence-based non-invasive durian classification using knocking sounds and vibration signals. *Proceedings of the IEEE Conference*, 259-264.
- [5] Oppenheim, A. V., Schaffer, R. W., & Buck, J. R. (2009). *Discrete-Time Signal Processing* (3rd ed.). Prentice Hall.
- [6] Phoophuangpairaj, R. (2014). Durian ripeness striking sound recognition using n-gram models with n-best lists and majority voting. In S. Boonkrong, H. Unger, & P. Meesad (Eds.), *Recent Advances in Information and Communication Technology*, 167-176. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06773-5_18
- [7] Sharma, S., Sumesh, K., & Sirisomboon, P. (2022). Rapid ripening stage classification and dry matter prediction of durian pulp using a pushbroom near-infrared hyperspectral imaging system. *Measurement*, 189, 110464. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110464>
- [8] Tilda Rice UK. (2024). *A guide to durian: What is durian & how does it taste?* <https://www.tilda.com>
- [9] Vinmec (2025). *Giá trị dinh dưỡng từ sầu riêng*. <https://www.vinmec.com/vie/bai-viet/gia-tri-dinh-duong-tu-sau-rieng-vi>.
- [10] Wikipedia (2025). *Durian*.
- [11] Worasawate, D., Ampungart, A., & Krairiksh, M. (2007). Durian maturity identification using radar equation based on support vector classification. *2007 Asia-Pacific Microwave Conference*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/APMC.2007.4554803>