

ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ THIÊU KẾT ĐẾN CẤU TRÚC, VI CẤU TRÚC VÀ MỘT SỐ TÍNH CHẤT VẬT LÝ CỦA GỐM ÁP ĐIỆN $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})_{0,970}\text{Nb}_{0,024}\text{Sb}_{0,006}\text{O}_3$

Dụng Thị Hoài Trang*, Trần Thành Văn, Lê Trần Uyên Tú, Võ Thanh Tùng

Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế, Huế, Việt Nam

* Tác giả liên hệ Dụng Thị Hoài Trang <dtthtrang@hueuni.edu.vn>

(Ngày nhận bài: 05-02-2026; Hoàn thành phản biện: 12-05-2026; Ngày chấp nhận đăng: 25-09-2026)

Tóm tắt. Gốm áp điện $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})_{0,970}\text{Nb}_{0,024}\text{Sb}_{0,006}\text{O}_3$ (PZTNS) được chế tạo bằng phương pháp phản ứng pha rắn. Ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến cấu trúc, vi cấu trúc và một số tính chất vật lý của gốm PZTNS được khảo sát trong bài báo này. Cấu trúc và vi cấu trúc của gốm được nghiên cứu bằng nhiễu xạ tia X và ảnh hiển vi điện tử quét; tính chất điện môi và áp điện được khảo sát thông qua thiết bị RLC Hioki 3532 và Impedance HP 4193A; tính chất sắt điện được xác định bằng phương pháp Sawyer-Tower. Các mẫu gốm sau khi chế tạo được thiêu kết ở 1050, 1100, 1150 và 1200 °C trong 2 giờ. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng tất cả các mẫu gốm đều có cấu trúc perovskit điển hình. Ở nhiệt độ thiêu kết tối ưu là 1100 °C trong 2 giờ, gốm thu được có cấu trúc khá đồng đều, các hạt xếp chặt vào nhau và có các thông số tối ưu: khối lượng riêng đạt 7,82 g/cm³; hệ số áp điện d_{33} có giá trị 508 pC/N; hệ số liên kết điện cơ k_p và k_t có giá trị lần lượt là 0,64 và 0,53; hệ số phẩm chất cơ học Q_m là 85. Với những kết quả đạt được, gốm áp điện PZTNS là vật liệu tiềm năng cho các ứng dụng trong các thiết bị siêu âm và thủy âm trong tương lai.

Từ khóa: áp điện, nhiệt độ thiêu kết, PZT pha tạp, sắt điện

Effect of sintering temperature on structure, microstructure and some physical properties of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})_{0,970}\text{Nb}_{0,024}\text{Sb}_{0,006}\text{O}_3$ piezoelectric ceramics

Dung Thi Hoai Trang*, Tran Thanh Van, Le Tran Uyen Tu, Vo Thanh Tung

University of Sciences, Hue University, Hue, Vietnam

* Correspondence to Dung Thi Hoai Trang <dtthtrang@hueuni.edu.vn>

(Received: 05 February 2026; Revised: 12 June 2026; Accepted: 25 September 2026)

Abstract. $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})_{0,970}\text{Nb}_{0,024}\text{Sb}_{0,006}\text{O}_3$ (PZTNS) piezoelectric ceramics were fabricated with the conventional solid-state reaction method. In this paper, the effects of sintering temperatures on the structure, microstructure, and physical properties of PZTNS ceramics were investigated. Crystal structure and microstructure were analysed by means of X-ray diffraction and scanning electron microscopy. Dielectric and piezoelectric properties were measured with a Hioki 3532 RLC meter and an HP 4193A impedance analyser, while ferroelectric properties were characterised with the Sawyer-Tower method. The ceramics were sintered at 1050, 1100, 1150, and 1200 °C for 2 h. The results show that all samples exhibited a typical perovskite structure. At the optimal sintering temperature of

1100 °C and sintering time of 2 h, the ceramics displayed a relatively uniform microstructure with densely packed grains and achieved optimal properties: a density of 7.82 g/cm³, a piezoelectric coefficient d_{33} of 508 pC/N, electromechanical coupling factors k_p and k_t of 0.64 and 0.53, respectively, and a mechanical quality factor Q_m of 85. With these characteristic parameters, PZTNS ceramics are promising candidates for future ultrasonic and hydroacoustic device applications.

Keywords: PZTNS ceramics, ferroelectric, piezoelectric, sintering temperature

1 Mở đầu

Trong những năm gần đây, vật liệu áp điện không chỉ đã thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học trong và ngoài nước do yêu cầu hạn chế sử dụng các nguyên tố độc hại đối với môi trường và sức khỏe con người. Nhiều hệ vật liệu trên nền KNN ((K,Na)NbO₃) [1, 2] và BNKT (Bi(Na_{1-x}Ti_x)O₃) [3, 4] đã được nghiên cứu nhằm thay thế các vật liệu áp điện truyền thống trên nền chì. Mặc dù đạt được nhiều kết quả khả quan nhưng các vật liệu không chì vẫn còn có một số hạn chế về hệ số áp điện, độ ổn định nhiệt và khả năng ứng dụng thực tiễn so với vật liệu chứa chì. Vì vậy, các vật liệu áp điện trên nền chì đặc biệt là hệ PZT vẫn giữ vai trò quan trọng nhờ có tính chất áp điện vượt trội và hiệu suất hoạt động cao. Vật liệu áp điện trên nền chì (PZT) được ứng dụng rộng rãi trong các bộ chuyển đổi [5, 6], bộ truyền động [7, 8] và các thiết bị siêu âm [9, 10] vì nó có các hiệu ứng áp điện, sắt điện và quang điện đặc trưng. Hơn nữa, vật liệu PZT với cấu trúc perovskit đặc biệt do khả năng chuyển đổi giữa pha mặt thoi và pha tứ giác làm cho nó có những tính chất nổi trội hơn. Các tính chất điện của gốm trên nền PZT có thể được cải thiện hơn nữa để đáp ứng yêu cầu về ứng dụng bằng cách thay đổi thành phần của nó thông qua việc pha các loại tạp vào vật liệu trên nền PZT tại vị trí A và B [11]. Các nghiên cứu cho thấy rằng khi pha các loại tạp “cứng” vào vật liệu PZT thì gốm thu được có nhiệt độ T_c cao nhưng hệ số áp điện d_{33} lại thấp; ngược lại, gốm pha tạp “mềm” có d_{33} cao nhưng T_c lại thấp. Do đó, việc tìm ra gốm đồng thời có hệ số áp điện cao và nhiệt độ T_c cao đáp ứng yêu cầu ứng dụng là vấn đề hết sức cần thiết.

Một số công trình nghiên cứu của các nhà khoa học cho thấy rằng việc đồng pha tạp vào vật liệu trên nền PZT sẽ cải thiện được tính chất áp điện và nhiệt độ T_c của gốm. Hệ gốm áp điện [Pb_{0,995}Sr_{0,02}][(Zr_xTi_{1-x})_{0,975}Al_{0,005}Nb_{0,02}]O₃ có hệ số áp điện $d_{33} = 494$ pC/N, hệ số liên kết điện cơ $k_p = 0,66$ và $T_c = 343$ °C [12]. Khi đồng pha tạp Nb và Sb vào vật liệu trên nền PZT, gốm thu được có hệ số áp điện $d_{33} = 554$ pC/N, hệ số $k_p = 0,645$ và hệ số phẩm chất $Q_m = 540$ [13].

Mặt khác, trong quá trình chế tạo gốm, nhiều thông số có thể ảnh hưởng đến cấu trúc, vi cấu trúc cũng như một số tính chất vật lý của gốm như nhiệt độ thiêu kết, thời gian ủ thiêu kết, thời gian phân cực, nhiệt độ phân cực và điện trường phân cực. Chúng tôi nhận thấy rằng, trong số đó, nhiệt độ thiêu kết là một thông số rất quan trọng. Ở nhiệt độ thiêu kết tối ưu, gốm tạo ra có khối lượng riêng cao, cấu trúc ổn định, đồng nhất, dẫn đến tính chất áp điện, sắt điện được cải thiện.

Trong bài báo này, chúng tôi đồng pha tạp Nb và Sb vào vật liệu trên nền PZT với mục đích tạo ra gốm có hệ số áp điện cũng như nhiệt độ T_c cao và tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến cấu trúc, vi cấu trúc cũng như một số tính chất vật lý của gốm áp điện trên cơ sở PZT đồng pha tạp Nb và Sb. Hy vọng gốm áp điện tạo ra ở nhiệt độ thiêu kết tối ưu có các tính chất điện đặc trưng đáp ứng yêu cầu ứng dụng cho các thiết bị siêu âm và thủy âm trong tương lai.

2 Thực nghiệm

Gốm áp điện được chế tạo theo công thức chung là Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})_{0,970}Nb_{0,024}Sb_{0,006}O₃ (PZTNS)

bằng phương pháp phản ứng pha rắn. Nguyên liệu ban đầu là các oxit PbO , ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 và Sb_2O_3 với độ tinh khiết 99,8% của hãng Daejung, Hàn Quốc, được cân theo hợp thức mong muốn và nghiền trộn với ethanol trong 20 giờ bằng máy nghiền bi năng lượng cao. Hỗn hợp bột được sấy khô và ép nung sơ bộ ở 850°C trong 2 giờ. Mẫu sau khi sơ bộ được nghiền lần hai với ethanol trong 20 giờ, sau đó sấy khô và ép nung thiêu kết. Mẫu được ép với khuôn có đường kính 13 mm dưới áp lực nén 1000 kg/cm^2 và thiêu kết ở 1050, 1100, 1150 và 1200°C trong 2 giờ (tương ứng với các ký hiệu mẫu M1050, M1100, M1150 và M1200).

Khối lượng riêng của gốm được xác định bằng phương pháp Archimedes. Cấu trúc và vi cấu trúc được phân tích bằng nhiễu xạ tia X (XRD) và ảnh hiển vi điện tử quét (SEM). Các tính chất điện môi và áp điện được khảo sát bằng thiết bị RLC HIOKI 3532 và Impedance HP 4193A. Các tính chất sắt điện được đánh giá thông qua việc đo đường trễ sắt điện bằng phương pháp Sawyer-Tower.

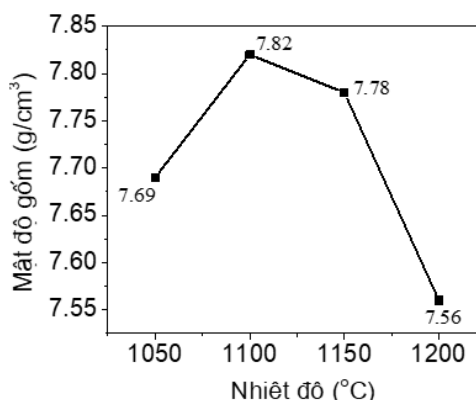
3 Kết quả và thảo luận

3.1 Khối lượng riêng của gốm

Khối lượng riêng của các mẫu PZTNS được xác định bằng phương pháp Archimedes. Sự phụ thuộc của khối lượng riêng của gốm vào nhiệt độ thiêu kết của các mẫu gốm khi thiêu kết ở 1050, 1100, 1150 và 1200°C trong 2 giờ được mô tả trên Hình 1.

Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng khi tăng dần nhiệt độ thiêu kết từ 1050 đến 1200°C , khối lượng riêng của các mẫu gốm PZTNS tăng dần và đạt giá trị lớn nhất khi thiêu kết tại 1100°C ứng với giá trị là $7,82\text{ g/cm}^3$, khi tiếp tục tăng nhiệt độ thiêu kết trên 1100°C thì khối lượng riêng của gốm giảm dần. Điều này có thể là do khối lượng riêng của gốm ban đầu tăng theo nhiệt độ do quá trình khuếch tán vật chất làm tăng độ xếp chặt và

giảm số lượng lỗ trống. Tuy nhiên, khi nhiệt độ nung vượt quá nhiệt độ tối ưu, khối lượng riêng của gốm bắt đầu giảm do hiện tượng bay hơi PbO xảy ra mạnh ở nhiệt độ cao. Sự mất thành phần PbO làm xuất hiện các lỗ khuyết chì và làm tăng số lượng lỗ trống trong vật liệu. Đồng thời, sự phát triển cỡ hạt ở nhiệt độ cao có thể làm các lỗ trống bị giữ lại bên trong hạt làm giảm độ xếp chặt của gốm. Quá trình này dẫn đến sự gia tăng lỗ trống và làm cho khối lượng riêng của vật liệu giảm dần theo nhiệt độ thiêu kết. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Boutarfaia và cộng sự [14]. Nhóm tác giả cũng cho rằng khối lượng riêng của gốm đạt giá trị cực đại ở nhiệt độ tối ưu và giảm khi nhiệt độ tiếp tục tăng do tốc độ bay hơi PbO lớn hơn tốc độ tái ngưng tụ.



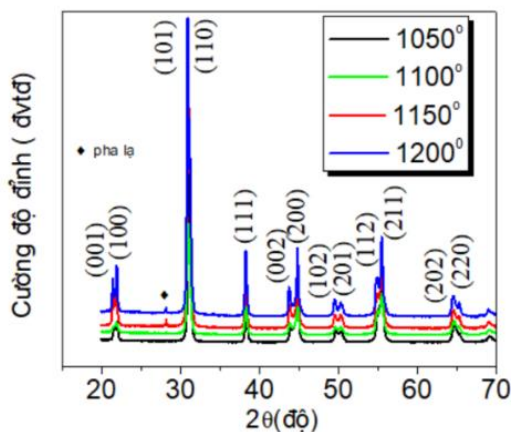
Hình 1. Sự phụ thuộc về khối lượng riêng của các mẫu gốm PZTNS vào nhiệt độ thiêu kết

3.2 Cấu trúc và vi cấu trúc

Cấu trúc tinh thể của vật liệu được phân tích thông qua giản đồ nhiễu xạ tia X đo trên thiết bị D8-Advanced BRUKER AXS. Giản đồ nhiễu xạ của các mẫu gốm PZTNS thiêu kết ở các nhiệt độ khác nhau được trình bày trên Hình 2.

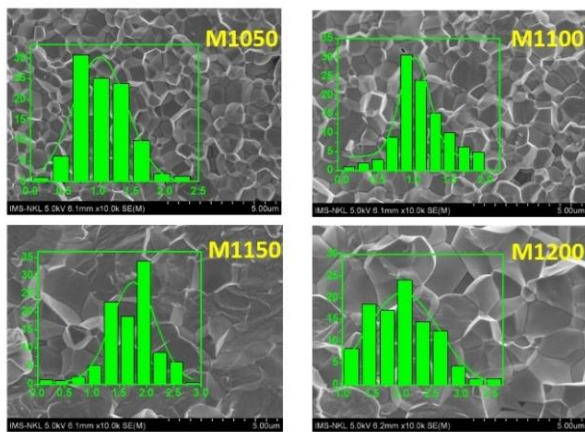
Giản đồ nhiễu xạ cho thấy tất cả các mẫu gốm PZTNS đều có cấu trúc perovskit điển hình trong khoảng góc 2θ từ 20° đến 70° . Các đỉnh đặc trưng của pha perovskit vẫn được duy trì khi tăng nhiệt độ nung; điều này cho thấy Nb và Sb đã hòa tan hoàn toàn vào mạng tinh thể mà không làm

phá hủy cấu trúc chính. Tuy nhiên, sự xuất hiện pha lạ trong cấu trúc khi thiêu kết ở nhiệt độ trên 1100 °C là do sự bay hơi của PbO hoặc sự mất cân bằng thành phần. Điều này tương đồng với kết quả của Mahajan và cộng sự; nhóm tác giả cũng cho rằng khi thiêu kết ở nhiệt độ cao, khối lượng riêng của gốm giảm do sự bay hơi của chì, dẫn đến sự hình thành các pha không mong muốn trong cấu trúc của gốm [15].



Hình 2. Giảm nhiễu xạ của gốm PZTNS ở các nhiệt độ khác nhau

Ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến vi cấu trúc của các mẫu gốm PZTNS được trình bày trên Hình 3.

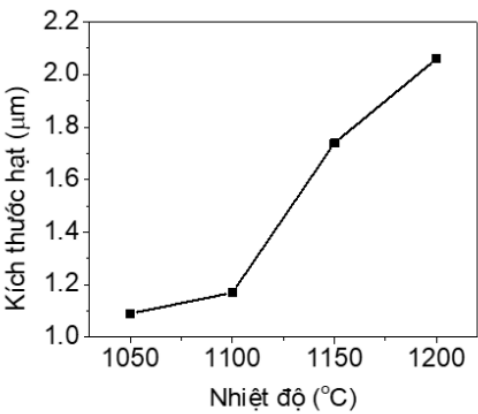


Hình 3. Ảnh SEM của các mẫu gốm PZTNS thiêu kết ở các nhiệt độ khác nhau

Ảnh SEM cho thấy khi tăng nhiệt độ từ 1050 đến 1150 °C, kích thước hạt tăng dần và cấu trúc gốm trở nên đồng đều, xếp chặt hơn. Khi

thiêu kết ở nhiệt độ trên 1100 °C, hiện tượng phát triển cỡ hạt bắt đầu xuất hiện, làm một số hạt lớn lên bất thường do đó xuất hiện các lỗ trống bên trong cấu trúc. Kết quả này hoàn toàn tương đồng với kết quả nghiên cứu về khối lượng riêng và cấu trúc của gốm; khi thiêu kết ở nhiệt độ trên 1100 °C, trong thành phần gốm có sự xuất hiện của pha lạ và khối lượng riêng của gốm giảm dần.

Từ ảnh SEM, chúng tôi tính kích thước hạt trung bình của các mẫu gốm PZTNS và sự phụ thuộc của kích thước hạt vào nhiệt độ thiêu kết của các mẫu gốm được trình bày trên Hình 4. Đồ thị cho thấy rằng khi nhiệt độ thiêu kết tăng thì kích thước hạt tăng dần. Kích thước hạt trung bình của các mẫu gốm có giá trị nằm trong khoảng từ 1,09 μm đến 2,06 μm. Điều này có thể là do quá trình khuếch tán vật chất và sự phát triển cỡ hạt diễn ra mạnh khi nhiệt độ tăng. Ở nhiệt độ cao, nhiệt năng cung cấp cho các ion trong mạng tinh thể tăng, làm cho tốc độ khuếch tán qua biên hạt tăng lên. Quá trình này dẫn đến sự dịch chuyển biên hạt và phát triển kích thước hạt. Mahajan và cộng sự cũng cho rằng kích thước của hạt gốm tăng khi nhiệt độ thiêu kết tăng [15].



Hình 4. Ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến kích thước hạt

Từ những kết quả nghiên cứu ban đầu về ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến cấu trúc, vi cấu trúc và khối lượng riêng của gốm, chúng tôi dự đoán nhiệt độ thiêu kết tối ưu cho hệ gốm trên nền PZT pha tạp Nb và Sb là 1100 °C. Từ đó,

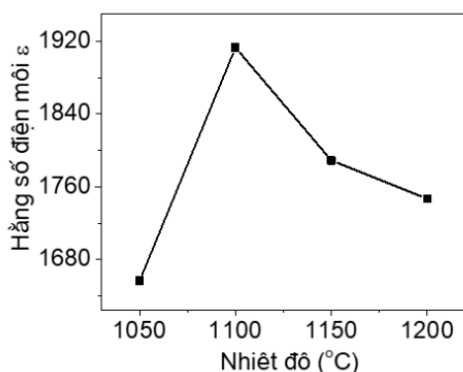
chúng tôi tiếp tục khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến tính chất điện môi, áp điện và sắt điện của hệ gốm PZTNS.

3.3 Tính chất điện môi

Hằng số điện môi tại nhiệt độ phòng được xác định theo công thức:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 \cdot t}{C_s \cdot S}$$

trong đó t là bề dày mẫu; S là diện tích của mẫu; C_s là điện dung; $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ F/m. Giá trị điện dung C_s của mẫu được đo trên thiết bị HIOKI 3235-50 LCR tại tần số 1 kHz. Sự phụ thuộc của hằng số điện môi vào nhiệt độ thiêu kết của các mẫu gốm PZTNS ở nhiệt độ phòng được trình bày trên Hình 5.



Hình 5. Hằng số điện môi của các mẫu gốm M1050, M1100, M1150 và M1200 tại nhiệt độ phòng

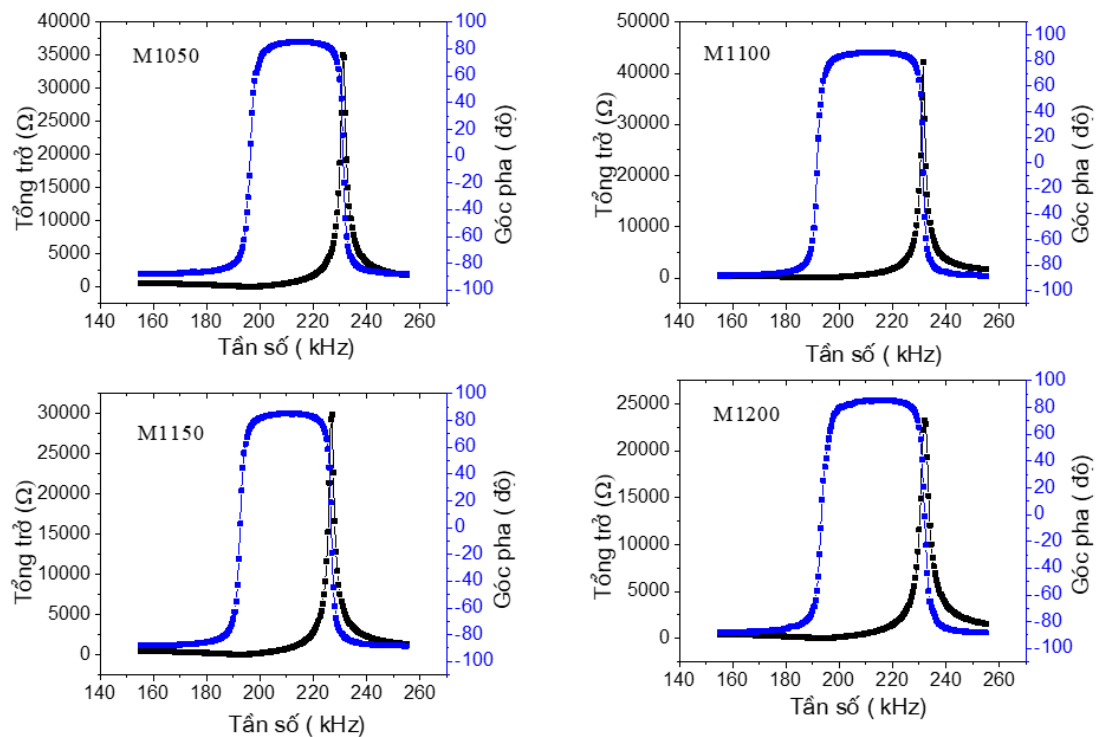
Giá trị hằng số điện môi của gốm PZTNS tại nhiệt độ phòng nằm trong khoảng từ 1657 đến 1913. Khi nhiệt độ thiêu kết tăng dần, hằng số điện môi tăng theo nhiệt độ thiêu kết và đạt giá trị lớn nhất tại 1100 °C với giá trị tương ứng là 1913. Khi tiếp tục tăng nhiệt độ trên 1100 °C thì hằng số điện môi giảm dần. Trong gốm áp điện nền PZT, các ion Nb^{5+} và Sb^{3+} thay thế vào vị trí B trong cấu

trúc perovskit làm thay đổi sự phân bố điện tích và khuyết tật trong mạng tinh thể. Sự pha tạp Nb có tác dụng làm giảm hàm lượng lỗ khuyết oxy, từ đó tăng khả năng dịch chuyển vách domain dưới tác dụng của điện trường. Sự kết hợp giữa cấu trúc perovskit ổn định, khối lượng riêng của gốm cao và khả năng chuyển động domain tốt làm cho hằng số điện môi ở nhiệt độ phòng tăng lên đáng kể. Tuy nhiên, nếu nhiệt độ nung quá cao, sự phát triển cỡ hạt và bay hơi PbO có thể làm tăng số lượng lỗ trống và hình thành pha phụ, làm cho hằng số điện môi giảm trở lại. Sự cải thiện về tính chất điện môi liên quan đến độ linh động của các vách domain cũng như sự thay đổi về khối lượng riêng gốm của gốm PZTNS tương tự như kết quả của một số tác giả [16, 17].

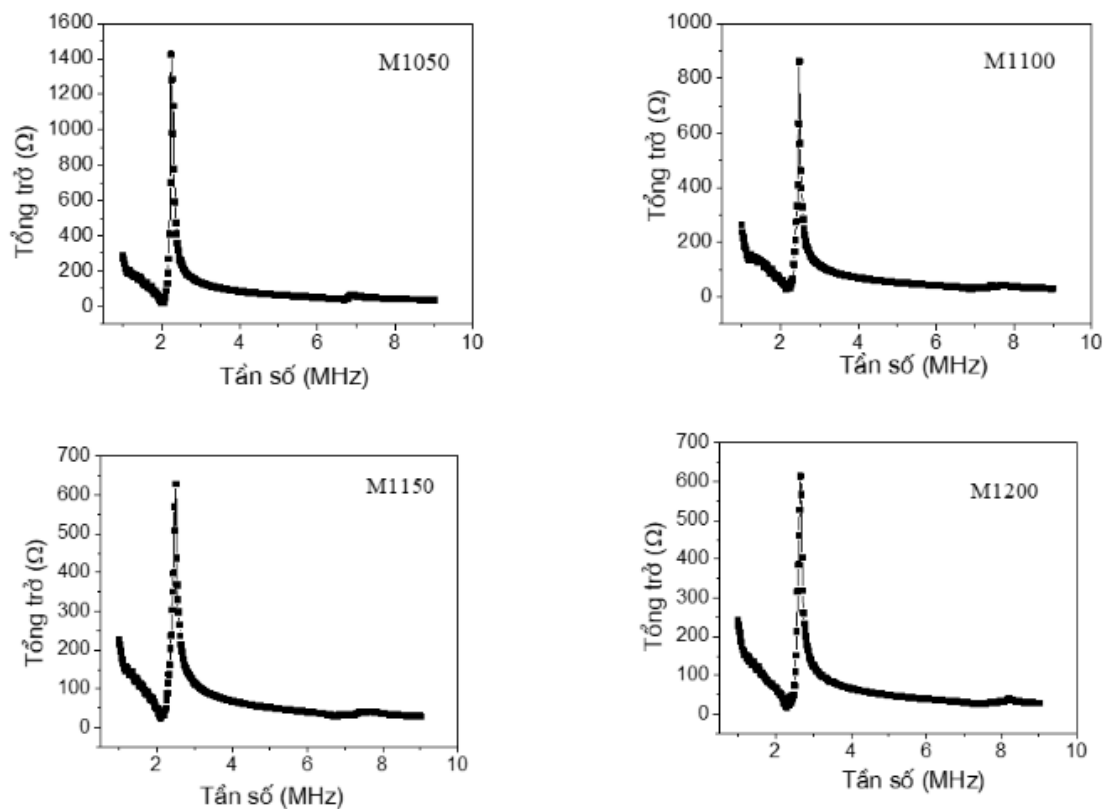
3.4 Tính chất áp điện

Để nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến tính chất áp điện của các mẫu gốm PZTNS, chúng tôi tiến hành khảo sát phổ cộng hưởng dao động theo phương bán kính và theo phương bề dày của các mẫu như mô tả trên Hình 6 và Hình 7.

Từ phổ cộng hưởng dao động theo phương bán kính và theo phương bề dày của các mẫu gốm PZTNS theo các nhiệt độ thiêu kết khác nhau, chúng tôi xác định được tổng trở Z ứng với tần số cộng hưởng và phản cộng hưởng. Trên cơ sở các chuẩn áp điện IRE 61 và IRE 87, hệ số liên kết điện cơ trung bình theo phương bán kính k_p và phương bề dày k_t đã được xác định. Chúng tôi cũng đã xác định được hệ số áp điện trung bình d_{33} và hệ số phẩm chất trung bình Q_m của các mẫu gốm PZTNS như trình bày trong Bảng 1 và sự phụ thuộc của chúng vào nhiệt độ thiêu kết được trình bày trên Hình 8 và Hình 9



Hình 6. Phổ cộng hưởng dao động theo phương bán kính của các mẫu M1050, M1100, M1150 và M1200

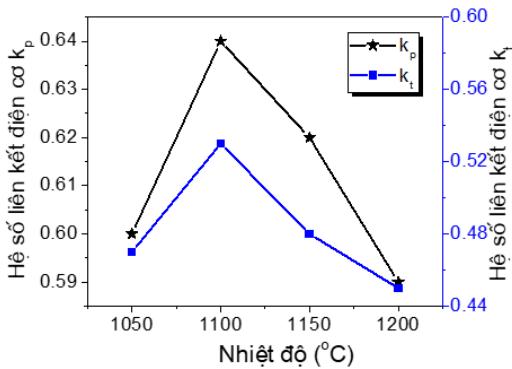


Hình 7. Phổ cộng hưởng dao động theo phương bề dày của gốm PZTNS theo nhiệt độ thiêu kết

Bảng 1. Một số thông số áp điện của gốm PZTNS theo nhiệt độ thiêu kết

Mẫu	k_p	k_t	d_{33} (pC/N)	Q_m
M1050	0,60	0,47	466	79
M1100	0,64	0,53	508	85
M1150	0,62	0,48	483	82
M1200	0,59	0,45	448	75

Đồ thị trên Hình 8 và Hình 9 cho thấy rằng hệ số liên kết điện cơ k_p , hệ số liên kết điện cơ k_t , hệ số áp điện d_{33} và hệ số phẩm chất Q_m thay đổi theo nhiệt độ thiêu kết. Khi tăng nhiệt độ thiêu kết từ 1050 đến 1100 °C, các hệ số k_p , k_t , d_{33} và Q_m tăng theo nhiệt độ thiêu kết và đạt giá trị cực đại



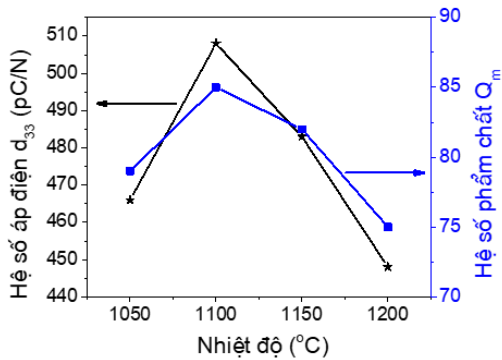
Hình 8. Sự phụ thuộc của hệ số liên kết điện cơ k_p và k_t vào nhiệt độ thiêu kết của các mẫu gốm PZTNS

3.5 Tính chất sắt điện

Ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến tính chất sắt điện của các mẫu gốm PZTNS khảo sát bằng phương pháp mạch Sawyer-Tower. Hình ảnh đường trễ sắt điện của các mẫu gốm theo các nhiệt độ khác nhau được mô tả trên Hình 10. Từ đường trễ, giá trị của độ phân cực dư P_r và điện trường kháng E_c được xác định và sự phụ thuộc của chúng vào nhiệt độ thiêu kết được trình bày trên Hình 11.

Kết quả cho thấy rằng khi nhiệt độ thiêu kết tăng từ 1050 đến 1100 °C, độ phân cực dư P_r của các mẫu tăng và đạt giá trị lớn nhất tại 1100 °C trong khi đó điện trường kháng E_c lại

tại 1100 °C tương ứng với các giá trị là 0,64, 0,53, 508 pC/N và 85. Khi tiếp tục tăng nhiệt độ thiêu kết thì giá trị của chúng giảm dần. Khi nhiệt độ thiêu kết tăng đến 1100 °C, kích thước hạt tăng và độ khít chặt của gốm được cải thiện làm giảm độ xoắn và tăng khả năng phân cực của vật liệu. Sự pha tạp giúp các vách domain dịch chuyển dễ dàng hơn dưới tác dụng của điện trường ngoài, do đó làm tăng độ phân cực dư và nâng cao hệ số áp điện của gốm. Giá trị hệ số áp điện của gốm đang nghiên cứu cao hơn giá trị hệ số áp điện của Zhou và cộng sự. Nhóm tác giả cho rằng gốm áp điện Pb(Sb_{1/2}Ni_{1/2})-PbTiO₃-PbZrO₃ có hệ số áp điện d_{33} với giá trị cỡ 449 pC/N [18].

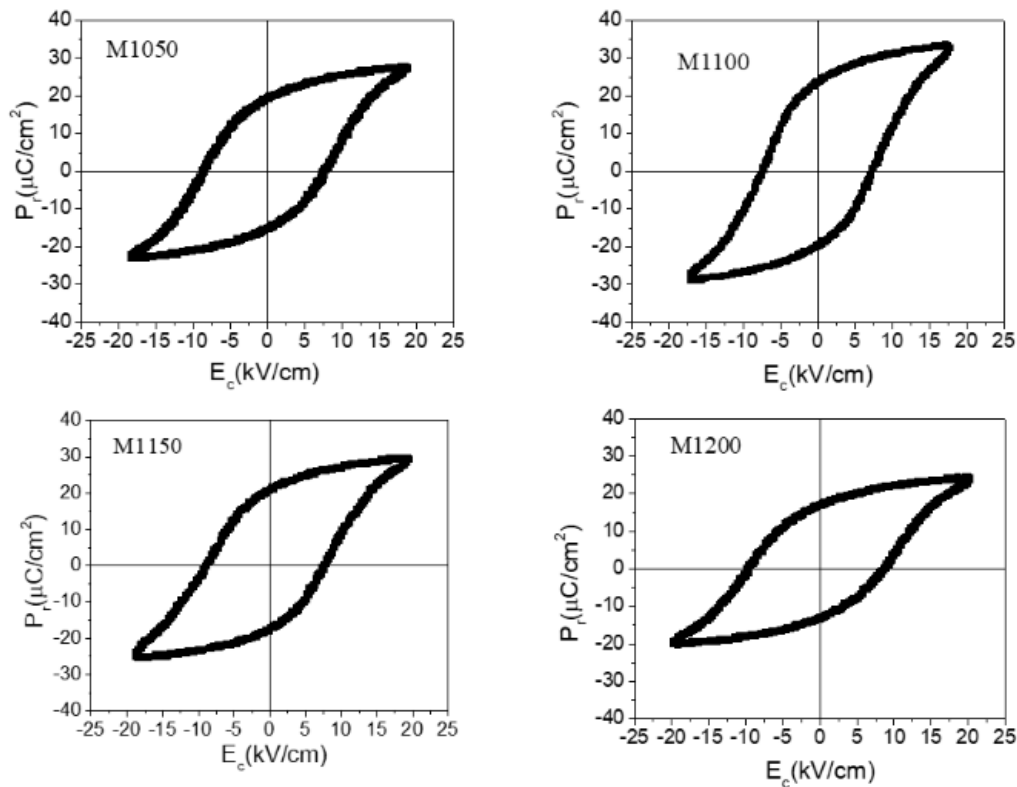


Hình 9. Sự phụ thuộc của hệ số áp điện d_{33} và Q_m vào nhiệt độ thiêu kết của các mẫu gốm PZTNS

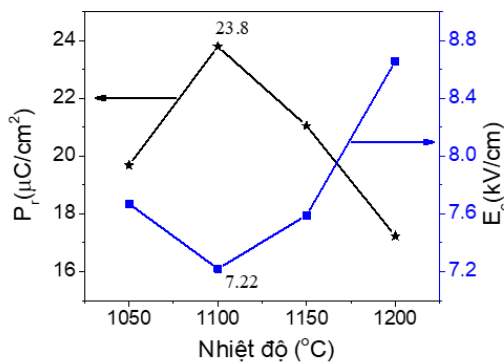
giảm và có giá trị nhỏ nhất, với các giá trị tương ứng là 23,8 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ và 7,22 kV/cm. Khi nhiệt độ thiêu kết tăng dần thì độ phân cực dư giảm dần và điện trường kháng tăng dần. Sự pha tạp Nb và Sb vào nền PZT làm thay đổi trạng thái khuyết tật và sự chuyển động của vách domain. Nb⁵⁺ là pha tạp donor nên làm giảm hàm lượng lỗ khuyết oxy trong mạng tinh thể, từ đó giảm sự ghim giữ vách domain và giúp domain đảo chiều dễ dàng hơn dưới tác dụng của điện trường ngoài. Vì vậy, độ phân cực dư P_r tăng lên khi nhiệt độ thiêu kết đạt giá trị tối ưu do cấu trúc trở nên khít chặt, kích thước hạt tăng và khả năng định hướng domain tốt hơn. Đồng thời, sự giảm ghim giữ domain làm điện trường kháng E_c giảm vì quá trình đảo chiều

phân cực xảy ra dễ hơn. Khi nhiệt độ thiêu kết quá cao, hiện tượng bay hơi PbO và phát triển cỡ hạt làm tăng độ xốp và tạo pha phụ, dẫn đến giảm độ phân cực dư và làm cho điện trường

kháng tăng trở lại do sự cản trở chuyển động của vách domain. Mahmoud và cộng sự cũng công bố các kết quả tương tự [19].



Hình 10. Đường trễ sắt điện của gốm PZTNS theo nhiệt độ thiêu kết



Hình 11. Sự phụ thuộc vào nhiệt độ thiêu kết của độ phân cực dư và điện trường kháng của gốm PZTNS

Để có cái nhìn tổng quan hơn về các tính chất của gốm PZTNS trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành so sánh một số thông số của chúng với các thông số của một số nghiên cứu khác trên nền gốm PZT như hệ gốm $0,06\text{Pb}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3 - 0,04\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3 +$

$1,5 \text{ mol\% Nb}_2\text{O}_5$ (PZT-PNS) [19]; $0,1\%$ kl $\text{Sb}_2\text{O}_3 + 0,3\%$ kl $\text{MnCO}_3 + (\text{Pb}_{0,92}\text{Sr}_{0,08})(\text{Zr}_{0,533}\text{Ti}_{0,443}\text{Nb}_{0,024})\text{O}_3$ (PSZTN) [13]; $\text{Pb}_{0,99}\text{Nb}_{0,02}[(\text{Sn}_{0,30}\text{Zr}_{0,70})_{0,52}\text{Ti}_{0,48}]_{0,98}\text{O}_3 + \text{Sb}$ (PNSZT) [20]; $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})_{0,05}\text{Zr}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$ (PMS-PZT) [21]; $x\text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0,54}\text{Ti}_{0,46})\text{O}_3$ (PSN-PZT) [18] và được liệt kê trong Bảng 2.

Bảng 2. So sánh một số thông số áp điện của các hệ gốm trên nền PZT

Gốm	k_p	d_{33} (pC/N)	Q_m	Tài liệu
PZTNS	0,64	508	85	Bài báo
PZT-PNS	–	452	–	[19]
PSZTN	0,64	554	–	[13]
PNSZT	0,63	530	–	[20]
PMS-PZT	0,57	330	–	[21]
PSN-PZT	0,69	449	65	[18]

Như vậy, ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến khối lượng riêng của gốm, cấu trúc, vi cấu trúc và một số tính chất vật lý của gốm PZTNS đã được khảo sát. Từ các kết quả nghiên cứu, chúng tôi kết luận rằng nhiệt độ thiêu kết tối ưu cho hệ gốm trên nền PZT đồng pha tạp Nb và Sb là 1100 °C. Tại nhiệt độ này, gốm thu được có các thông số tối ưu.

4 Kết luận

Gốm áp điện $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})_{0,970}\text{Nb}_{0,024}\text{Sb}_{0,006}\text{O}_3$ được chế tạo thành công bằng phương pháp truyền thống. Gốm PZTNS thu được có cấu trúc perovskit điển hình. Khi thiêu kết tại 1100 °C, gốm chế tạo có các thông số tối ưu, khối lượng riêng của gốm có giá trị 7,82 g/cm³; hệ số liên kết điện cơ k_p và k_t có giá trị tương ứng là 0,64 và 0,53; hệ số áp điện d_{33} và hệ số phẩm chất Q_m có giá trị lần lượt là 508 pC/N và 85; giá trị của hằng số điện môi tại nhiệt độ phòng là 1913; độ phân cực dư P_r và điện trường kháng E_c có giá trị tương ứng là 23,8 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ và 7,22 kV/cm. Với các tính chất đặc trưng này, chúng tôi hy vọng rằng gốm PZTNS đáp ứng yêu cầu ứng dụng cho các thiết bị siêu âm và thủy âm trong tương lai.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ cấp Đại học Huế mã số ĐHH2025-01-230 đã tài trợ kinh phí cho công trình này.

Tài liệu tham khảo

1. Chaliha C, Singh HS, Kumar P, Maisnam M. Lead-free KNN-based ceramics for electrocaloric and pyroelectric applications. *Ceramics International*. 2026;52(10, Part A):14706-22.
2. Vuong LD, Cuong NX, Lich NQ, Nhat ND, Hieu LD, Nha VQ, et al. The effect of BaZrO₃ content on

the structure, microstructure, and electrical properties of (K, Na) NbO₃ based lead-free ceramics. *Applied Physics A*. 2025;131(5):383.

3. Niu J, Wei Y, Deng Y, Jin C, Guan C, Dong S, et al. Record high-temperature piezoelectric performance in BNKT-based single crystals via local heterostructure design. *Journal of Materials Science & Technology*. 2026;271:147-56.
4. Hu Y, Zhang H, Wang Z, Shen J, Zhou J, Chen W. Ferroelectric-order-dominated doping effects in Fe, Nb co-doped $\text{Bi}_{1/2}(\text{Na}_{0.8}\text{K}_{0.2})_{1/2}\text{TiO}_3$ piezoelectric ceramics. *Ceramics International*. 2026;52(10, Part A):14853-8.
5. Huang J, Yao M, Yao X. A novel approach to improving the electromechanical properties of PZT-based piezoelectric ceramics via a grain coating modification strategy. *Ceramics International*. 2021;47(11):16294-302.
6. Chamankar N, Khajavi R, Yousefi AA, Rashidi A, Golestanifard F. A flexible piezoelectric pressure sensor based on PVDF nanocomposite fibers doped with PZT particles for energy harvesting applications. *Ceramics International*. 2020;46(12):19669-81.
7. Kim E-J, Lee T-G, Kim DS, Kim S-W, Yee Y-J, Han SH, et al. Textured $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ - $\text{Pb}[(\text{Zn,Ni})_{1/3}\text{Nb}_{2/3}]\text{O}_3$ multilayer ceramics and their application to piezoelectric actuators. *Applied Materials Today*. 2020;20:100695.
8. Hou L, Huan Y, Zheng M, Liu Y, Wang C, Wang X, et al. 3D vertically aligned microchannel structure to enhance piezoelectric energy harvesting performance of PZT/PVDF and CNTs piezoelectric composites. *Journal of Materiomics*. 2024;10(5):1063-70.
9. Lee HJ, Zhang S, Luo J, Shrout TR. Thickness-dependent properties of relaxor - PbTiO_3 ferroelectrics for ultrasonic transducers. *Advanced Functional Materials*. 2010;20(18):3154-62.
10. Li R, Zeng Y, Sun X-x, Li C, Li R, Zheng T, et al. Multidimensional synergy-induced high piezoelectricity and reliability KNN piezoceramics for high-frequency ultrasonic transducers. *Science China Materials*. 2023;66(2):686-95.
11. Uchino K, editor. *Advanced Piezoelectric Materials (Second Edition)*. Kidlington: Woodhead Publishing; 2017.
12. Heywang W, Lubitz K, Wersing W, editors. *Piezoelectricity: Evolution and Future of a*

- Technology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2008.
13. Fei X, Lin X, Wang C, Li W, Yu F, Yang C, et al. Sb₂O₃-modified lead zirconate titanate piezoelectric ceramics with enhancing piezoelectricity and low loss. *Journal of the American Ceramic Society*. 2023;106(1):501-12.
 14. Boutarfaia A. Investigations of co-existence region in lead zirconate-titanate solid solutions: X-ray diffraction studies. *Ceramics International*. 2000;26(6):583-7.
 15. Mahajan S, Thakur O, Prakash C. Effect of sintering temperature on structural and piezoelectric properties of PNN-PZT ceramics. *Defence Science Journal*. 2007;57(1):23-28.
 16. Vuong LD, Van Thinh N, On DV, Tung VT. Improved piezoelectric properties of the Fe₂O₃-modified 0.97PSLZT - (0.03-*x*)BMT - *x*PMS for high-power piezoelectric applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2025;36(4):284.
 17. Yang C, Du J, Chen Y, Li Y, Yan J, Wang L, et al. Effect of Zr/Ti Ratio on the Structure and Electrical Properties of 0.7PbZr_{1-x}Ti_xO₃-0.3Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ Piezoelectric Ceramics. *Journal of Electronic Materials*. 2024;53(5):2275-86.
 18. Zhuo Z, Ling Z, Liu Y. Phase composition and piezoelectric properties of Pb (Sb_{1/2}Nb_{1/2})-PbTiO₃-PbZrO₃ ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2018;29(11):9524-30.
 19. Mahmoud M, Gao X, Xie X, Xie A, Tian A, Jiang X, et al. Enhanced ferroelectric and piezoelectric response in Nb doped PZT-PNS ceramics near the MPB for ultrasonic applications. *Ceramics International*. 2026;52(12, Part A):19214-24.
 20. Yan Y, Zhang D, Zhang M, Liu Y, Zhao M, Li Z. Influence of Sb doping on structure, domain size, and piezoelectric properties of Pb_{0.99}Nb_{0.02}[(Sn_{0.30}Zr_{0.70})_{0.52}Ti_{0.48}]_{0.98}O₃ ceramics. *Ceramics International*. 2020;46(11, Part B):19639-45.
 21. Li R, Zhou Z, Shen Z, Li Y, Xia X, Shi X, et al. The influence of Zr/Ti variation and defect dipoles on the piezoelectric properties of PMS-PZT ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2025;36(8):492.