

ĐẠI HỌC HUẾ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC

LÊ ĐẠI VƯƠNG

**NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VÀ CÁC TÍNH CHẤT VẬT LÝ CỦA HỆ
GÓM ĐA THÀNH PHẦN TRÊN CƠ SỞ PZT VÀ CÁC VẬT LIỆU
SẮT ĐIỆN CHUYỂN PHA NHÒE**

Chuyên ngành: Vật lý Chất rắn
Mã số: 62.44.01.04

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

Huế, 2014

Công trình được hoàn thành tại: Trường đại học Khoa học – Đại học Huế

Người hướng dẫn khoa học: PGS. TS. Phan Đình Giở

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ tại Hội đồng chấm luận án cấp Đại học Huế họp tại: Đại học Huế

Vào hồi..... giờ.....ngày.....tháng.....năm.....

MỞ ĐẦU

Đã hơn 50 năm nay, vật liệu sắt điện là một vật liệu quan trọng được các nhà khoa học vật liệu trên thế giới chú trọng nghiên cứu cả cơ bản lẫn ứng dụng. Nguyên nhân là do trong chúng tồn tại nhiều hiệu ứng vật lý quan trọng như: hiệu ứng sắt điện, áp điện, quang điện, quang phi tuyến, hỏa điện, v.v. Các vật liệu này có khả năng ứng dụng để chế tạo các loại tụ điện, các bộ nhớ dung lượng lớn, biến tử siêu âm công suất nhỏ, vừa và cao dùng trong y học, sinh học, hóa học, dược học, biến thể áp điện [3], [5], [35], [36], [81].

Vật liệu chính và quan trọng nhất trong các ứng dụng thường có cấu trúc perovskite ABO_3 . Đó là các hệ dung dịch rắn hai thành phần $PbTiO_3$ – $PbZrO_3$ (PZT), PZT pha các loại tạp mềm, cứng khác nhau như La, Ce, Nd, Nb, Ta, ... và Mn, Fe, Cr, Sb, In... Nhiều nghiên cứu cho thấy rằng: khi pha một số tạp chất vào vật liệu có cấu trúc perovskite ABO_3 thì ta sẽ thu được vật liệu perovskite có cấu trúc phức hợp $(A^iA^{j'}...A^n)BO_3$ hay $A(B^iB^{j'}...B^n)O_3$, đồng thời các tính chất sắt điện, áp điện hoàn toàn thay đổi theo hướng có lợi [3], [5], [16], [18], [30], [31], [37], [56], [57], [76], [81]. Vật liệu có cấu trúc phức nói trên gọi là vật liệu sắt điện relaxor. Các đặc trưng của vật liệu sắt điện chuyển pha nhòe là hằng số điện môi lớn, vùng dịch chuyển pha sắt điện-thuận điện mở rộng trong một khoảng nhiệt độ nên thường được gọi là *chuyển pha nhòe* (diffuse phase transition, DPT). Các tính chất điện môi phụ thuộc mạnh vào tần số của trường ngoài, tức có sự hồi phục điện môi (dielectric relaxation). Ngoài ra ở trên nhiệt độ Curie vài chục độ vẫn còn có phân cực tự phát và đường trễ [5], [58], [81].

Gần đây, các nhà khoa học vật liệu trên thế giới chú trọng nghiên cứu và ứng dụng các hệ vật liệu đa thành phần, đặc biệt là các nhóm vật liệu kết hợp giữa PZT và các sắt điện chuyển pha nhòe như: $Pb(Zr,Ti)O_3$ – $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PZT–PZN) [23], [24], [30], [31], [35], [42], [90]; $Pb(Zr,Ti)O_3$ – $(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PZT–PMnN) [4], [15], [52]; $Pb(Zr,Ti)O_3$ – $Pb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})O_3$ (PZT–PMS) [5], [60], [80], [83]; $Pb(Zr,Ti)O_3$ – $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ – $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PZT–PZN–PMN) [13]; $Pb(Zr,Ti)O_3$ – $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ – $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PZT–PZN–PMnN) [29], [34], [64], [84], [87] do chúng đáp ứng các yêu cầu ứng dụng chế tạo biến tử công

suất, biến thế áp điện, mô tơ siêu âm... Đây là loại vật liệu có các tính chất như tổn hao điện môi tanδ thấp; hằng số điện môi ε lớn; hệ số phẩm chất Q_m lớn và hệ số liên kết điện cơ k_p lớn [3], [5], [29], [34], [64], [84], [87]. Trong các nhóm vật liệu trên, hiện nay các hệ vật liệu PZT-PZN và PZT-PMnN đang được nhiều nhà khoa học trong nước và thế giới quan tâm nghiên cứu nhiều [15], [23], [24], 29], [34], [64], [84], [87].

Các công trình nghiên cứu gần đây đã chứng tỏ, sự kết hợp hai hệ PZT-PZN và PZT-PMnN là một phương pháp hữu hiệu nhằm tạo thành một hệ vật liệu bốn thành phần vừa có tính chất điện cơ tốt (Q_m lớn), tổn hao điện môi bé, tính chất áp điện tốt (k_p lớn), tính sắt điện tốt (P_r lớn) và hằng số điện môi cao [29], [34], [64], [75], [84], [87] phù hợp với nhiều ứng dụng trong lĩnh vực siêu âm công suất, biến thế áp điện, mô tơ siêu âm.

Tuy nhiên, nhiệt độ thiêu kết của hệ đa thành phần trên cơ sở PZT này khá cao (≥ 1150 °C) [29], [34], [64] do đó PbO dễ dàng bay hơi trong quá trình thiêu kết làm giảm tính chất của gốm và ảnh hưởng đến môi trường. Hiện nay việc nghiên cứu chế tạo gốm thiêu kết ở nhiệt độ thấp, đồng thời nâng cao hoặc không làm giảm các tính chất điện môi, áp điện của hệ gốm đang là mối quan tâm của các nhà chế tạo vật liệu gốm trong nước và trên thế giới, đây là vấn đề có tính thời sự và cấp thiết. Có nhiều phương pháp đã được thực hiện để giảm nhiệt độ thiêu kết như: phương pháp nung hai giai đoạn [5]; phương pháp ép nóng[3], [5], [32]; nghiền năng lượng cao [5], [51]; thiêu kết pha lỏng [13], [15], [26], [23], [33], [35], [41], [53]; dùng bột siêu mịn (hạt nanô) [2], [17], [22]. Trong đó, thiêu kết pha lỏng bằng cách thêm vào hệ nền các chất chảy có nhiệt độ nóng chảy thấp như Li_2CO_3 (735 °C), Bi_2O_3 (820 °C), B_2O_3 (450 °C), $CuO-PbO$ (790 °C) được sử dụng nhiều nhất vì nó hiệu quả, đơn giản và rẻ tiền. Các chất chảy này hình thành pha lỏng ở nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ thiêu kết truyền thống và tạo ra được một vật liệu đồng nhất được thiêu kết ở nhiệt độ thấp [16], [23], [44], [75], [80].

Như vậy, hệ gốm PZT – PZN – PMnN là đối tượng nghiên cứu mới đầy hấp dẫn trên phương diện nghiên cứu cơ bản lẫn nghiên cứu ứng dụng. Từ thực tế trên, chúng tôi lựa chọn đề tài luận án là ***“Nghiên cứu chế tạo và các tính chất vật lý của hệ gốm đa thành phần trên cơ sở PZT và các vật liệu sắt điện chuyển pha nhòe”***.

Mục tiêu của luận án là: (i) Chế tạo và nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,47}\text{Ti}_{0,53})\text{O}_3$ (PZT) đến cấu trúc, vi cấu trúc và các tính chất vật lý của hệ: $x\text{Pb}(\text{Zr}_{0,47}\text{Ti}_{0,53})\text{O}_3 - (0,925-x)\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0,075\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$. (ii) Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số Zr/Ti trong PZT đến cấu trúc và các tính chất của hệ PZT-PZN-PMnN, xác định thành phần vật liệu có các tính chất tối ưu và các đặc trưng chuyển pha nhờ của vật liệu. (iii) Nghiên cứu các tính chất vật lý của hệ PZT-PZN-PMnN pha tạp Fe_2O_3 . (iv) Nghiên cứu vai trò của CuO đến hoạt động thiêu kết và các tính chất vật lý của gốm PZT-PZN-PMnN.

Đối tượng nghiên cứu: Đối tượng chính được chọn để nghiên cứu trong luận án này là hệ gốm đa thành phần PZT-PZN-PMnN và PZT- PZN-PMnN pha tạp (Fe_2O_3 và CuO). Đây là các vật liệu được chúng tôi chế tạo tại phòng thí nghiệm.

Phương pháp nghiên cứu: Phương pháp thực nghiệm.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn: Luận án là một đề tài nghiên cứu khoa học cơ bản có định hướng ứng dụng. Các nghiên cứu có tính hệ thống về các tính chất điện môi, sắt điện, áp điện sẽ đóng góp thêm những hiểu biết về các tính chất vật lý của các vật liệu gốm sắt điện đa thành phần trên cơ sở PZT và các vật liệu sắt điện chuyển pha nhờ: $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ và $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$. Các kết quả đạt được của luận án sẽ mở ra triển vọng về việc chế tạo các vật liệu gốm điện tử ở nước ta hiện nay, đặc biệt tính khả thi trong ứng dụng vật liệu gốm đã chế tạo cho lĩnh vực siêu âm công suất.

Bố cục của luận án: Luận án được trình bày trong bốn chương bao gồm 118 trang.

Chương 1. TỔNG QUAN LÝ THUYẾT CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Chương 1 trình bày tổng quan lý thuyết về các vấn đề nghiên cứu trong luận án, làm cơ sở nghiên cứu cũng như giải thích các kết quả khảo sát tính chất vật lý của hệ vật liệu như chuyển pha sắt điện, đường trễ sắt điện và đômen sắt điện. Từ tổng quan các kết quả nghiên cứu về hệ vật liệu gốm sắt điện trên cơ sở PZT, chúng tôi đã rút ra một số nhận xét về các kết quả đã đạt được cũng như một số vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu bổ sung trên các hệ vật liệu PZT-PZN và hệ PZT-PMnN. Bên cạnh đó, phổ tán xạ Raman cũng được giới thiệu nhằm làm cơ sở nghiên cứu cho các kết quả thực nghiệm ở các phần sau của luận án.

Chương 2. TỔNG HỢP VẬT LIỆU, CẤU TRÚC VÀ VI CẤU TRÚC CỦA HỆ GỒM PZT – PZN – PMnN

2.1. Tổng hợp hệ vật liệu PZT – PZN – PMnN

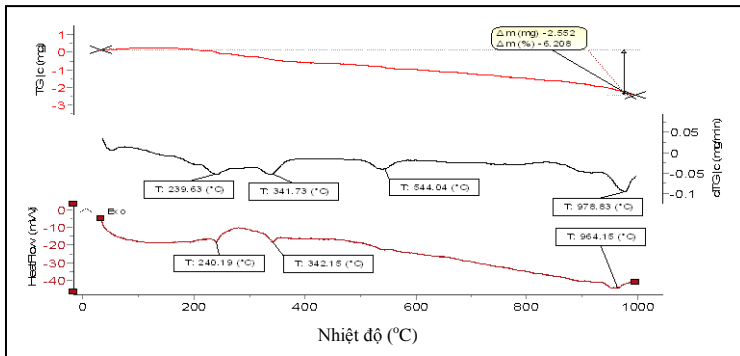
Hệ gồm PZT – PZN – PMnN được chế tạo bằng công nghệ gốm truyền thống kết hợp với phương pháp BO gồm các nhóm mẫu sau:

Nhóm 1: $x\text{Pb}(\text{Zr}_{0,47}\text{Ti}_{0,53})\text{O}_3 - (0,925-x)\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0,075\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0,7\%$ kl Li_2CO_3 ($0,65 \leq x \leq 0,9$); (Ký hiệu nhóm mẫu MP: MP65, MP70, MP75, MP80, MP85 và MP90). (2.1)

Nhóm 2: $0,8\text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3 - 0,125\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0,075\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0,7\%$ kl Li_2CO_3 ($0,46 \leq y \leq 0,51$); (Ký hiệu nhóm mẫu MZ: MZ46, MZ47, MZ48, MZ49, MZ50 và MZ51). (2.2)

Nhóm 3: $0,8\text{Pb}(\text{Zr}_{0,48}\text{Ti}_{0,52})\text{O}_3 - 0,125\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0,075\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + 0,7\%$ kl $\text{Li}_2\text{CO}_3 + z\%$ kl Fe_2O_3 ($0,0 \leq z \leq 0,35$); (Ký hiệu nhóm mẫu MF: MF0, MF1, MF2, MF3, MF4, MF5 và MF6). (2.3)

Nhóm 4: $0,8\text{Pb}(\text{Zr}_{0,48}\text{Ti}_{0,52})\text{O}_3 - 0,125\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0,075\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 + w\%$ kl CuO ($0,0 \leq w \leq 0,175$); (Ký hiệu nhóm mẫu MC: MC0, MC1, MC2, MC3, MC4, MC5 và MC6). (2.4)



Hình 2.1. *Giản đồ phân tích nhiệt DTA và TGA của hợp chất $(\text{Zn},\text{Mn})\text{Nb}_2(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_6$*

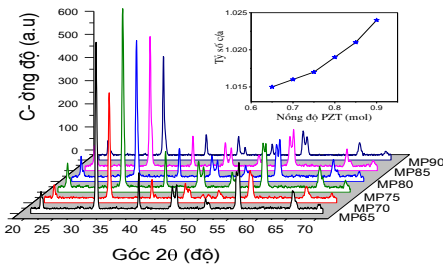
Quy trình tổng hợp hệ gốm PZT-PZN-PMnN bằng phương pháp gốm truyền thống kết hợp với phương pháp BO gồm hai giai đoạn: (i) Chế tạo hợp chất $(\text{Zn},\text{Mn})\text{Nb}_2(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_6$ (BO) [33], [51]. Trộn các ôxít ZrO_2 , TiO_2 , ZnO , Nb_2O_5 , MnO_2 và Fe_2O_3 nghiền trong 20 giờ và nung ở nhiệt độ $1100\text{ }^\circ\text{C}$ trong 2 giờ. Theo giản đồ phân tích nhiệt trọng lượng TGA và nhiệt vi sai DTA của hợp chất $(\text{Zn},\text{Mn})\text{Nb}_2(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_6$ trong Hình 2.1, các phản ứng xảy ra ở xung

quanh nhiệt độ 978 °C. Tuy nhiên, trong phân tích TGA và DTA, mẫu được gia nhiệt với tốc độ 10°C/phút và không có thời gian lưu nhiệt, vì vậy, đối với mẫu có khối lượng lớn, nếu tổng hợp ở nhiệt độ ứng với đỉnh tỏa nhiệt là chưa đủ để phản ứng pha rắn xảy ra hoàn toàn [4]. Thực tế để có hỗn hợp (Zn,Mn)Nb₂(Zr,Ti)O₆ với chất lượng tốt phải chọn nhiệt độ nung là 1100 °C [33]. (ii) Hợp chất (Zn,Mn)Nb₂(Zr,Ti)O₆ vừa tổng hợp được trộn với PbO theo đúng hợp thức. Nghiền hỗn hợp trong 20 giờ, nung sơ bộ ở nhiệt độ 850 °C trong 2 giờ để hình thành hợp thức có cấu trúc perovskite. Hợp chất sau khi nung sơ bộ tiếp tục được trộn với 0,7 % kl Li₂CO₃ và được nghiền lần hai trong 20 giờ, sau đó ép thành các mẫu dạng đĩa, đường kính 12 mm, dày 1,5 mm dưới áp lực 2 tấn/cm² và nung thiêu kết ở nhiệt độ 950 °C, ủ 2 giờ có mặt của bột phủ PbZrO₃ + 10 % kl ZrO₂ để thu được các mẫu gồm PZT- PZN-PMnN. Trong đó, các ôxít phối liệu ban đầu đều có độ tinh khiết trên 99 %.

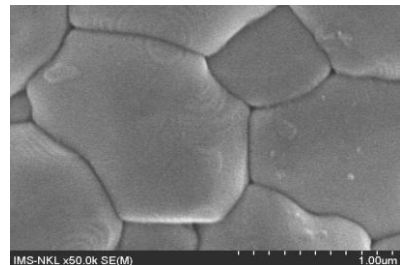
2.2. Cấu trúc và vi cấu trúc của hệ vật liệu PZT – PZN – PMnN

2.2.1. Cấu trúc và vi cấu trúc của nhóm vật liệu MP

Kết quả phân tích nhiễu xạ tia X (Hình 2.6) cho thấy, tất cả các mẫu đều có pha perovskite với cấu trúc tứ giác. Khi tăng nồng độ PZT, tính tứ giác c/a của mẫu tăng (hình chèn trong Hình 2.6). Theo giản đồ pha của PbZrO₃–PbTiO₃, tại nhiệt độ phòng Pb(Zr_{0,47}Ti_{0,53})O₃ có cấu trúc tứ giác (P4mm) [24], [25], trong khi Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ có cấu trúc giả lập phương (PC), [34], [60] và Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ có cấu trúc mặt thoi (R3m) [3], [24], [25], [29]. Vì vậy khi tăng nồng độ Pb(Zr_{0,47}Ti_{0,53})O₃ trong hệ gồm PZT- PZN-PMnN, tính tứ giác của gốm gia tăng.



Hình 2.6. Phổ nhiễu xạ tia X của các mẫu thuộc nhóm mẫu MP

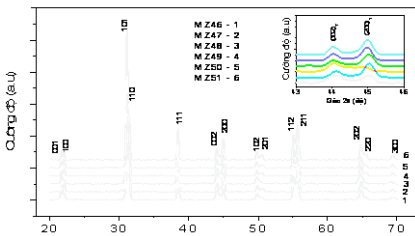


Hình 2.8. Ảnh hiển vi điện tử quét của mẫu MP80

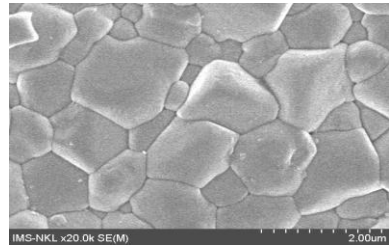
Từ kết quả phân tích ảnh SEM cho thấy các mẫu thuộc nhóm mẫu MP có mật độ hạt khá dày đặc, độ xếp chặt cao (Hình 2.8). Ứng với nồng độ PZT là 0,8 mol, kích thước hạt trung bình của gốm là lớn nhất ($\sim 1,04 \mu\text{m}$) và mật độ cao nhất ($7,81 \text{ g/cm}^3$). Các mẫu gốm có kích thước hạt và mật độ gốm lớn sẽ có các tính chất điện nổi bật so với các mẫu còn lại trong nhóm mẫu MP (điều này sẽ được chứng minh từ các kết quả nghiên cứu tính chất của gốm trong chương 3).

2.2.2. Cấu trúc và vi cấu trúc của nhóm vật liệu MZ

Từ các kết quả phân tích nhiễu xạ tia X (Hình 2.10) cho thấy, tất cả các mẫu đều có pha perovskite với cấu trúc tứ giác. Để làm rõ ảnh hưởng của tỉ số Zr/Ti đến sự thay đổi cấu trúc của vật liệu, chúng tôi đã tiến hành phân tích nhiễu xạ tia X với góc 2θ trong khoảng từ 43° đến 46° (hình chèn trong Hình 2.10). Sự phân tách của các đỉnh $(002)_T$ và $(200)_T$ chứng tỏ rằng các nhóm mẫu MZ có pha sắt điện tứ giác. Khi nồng độ Zr tăng (đồng thời nồng độ Ti giảm) kích thước hạt, độ xếp chặt tăng nên mật độ gốm tăng. Khi tỷ số Zr/Ti = 48/52 kích thước hạt, độ xếp chặt, mật độ gốm đạt giá trị lớn nhất (Hình 2.12) và sau đó giảm. Sự gia tăng mật độ, kích thước hạt chính là nguyên nhân làm gia tăng các tính chất điện môi, áp điện và sắt điện của vật liệu [81] (sẽ được trình bày trong chương tiếp theo).

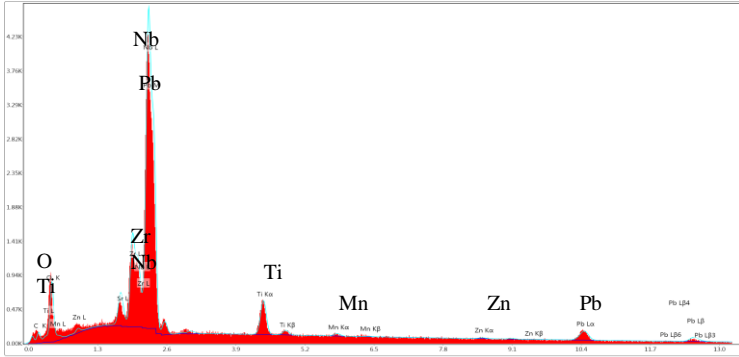


Hình 2.10. Phổ nhiễu xạ tia X của các mẫu thuộc nhóm mẫu MZ



Hình 2.12. Ảnh hiển vi điện tử quét của mẫu MZ48

Để xác định các thành phần hóa học của gốm PZT-PZN-PMnN, phổ EDS của mẫu MZ48 (Zr/Ti = 48/52) đã được phân tích và kết quả cho ở Hình 2.14. Các nguyên tố Pb, Zr, Ti, Nb, Zn và Mn đã được xác định trên mẫu gốm. Điều đó chứng tỏ quy trình công nghệ mà chúng tôi lựa chọn để chế tạo hệ gốm PZT – PZN – PMnN là hợp lý.



Hình 2.14. Phổ EDS của gốm PZT–PZN–PMnN

Chương 3 . NGHIÊN CỨU CÁC TÍNH CHẤT ĐIỆN MÔI, SẮT ĐIỆN VÀ ÁP ĐIỆN CỦA HỆ GỐM PZT –PZN– PMnN

3.1. Tính chất điện môi của hệ vật liệu PZT- PZN-PMnN

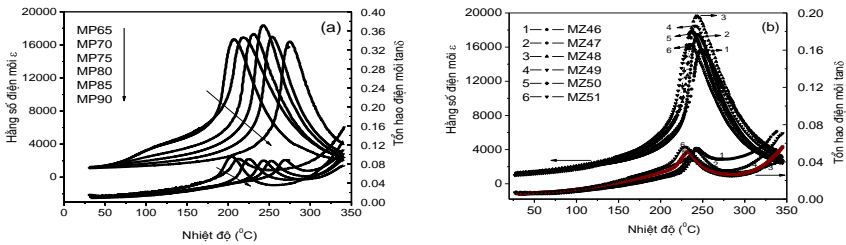
3.1.1. Hằng số điện môi của các nhóm mẫu MP, MZ ở nhiệt độ phòng

Hằng số điện môi (ϵ) của vật liệu ở nhiệt độ phòng đã được tính từ giá trị điện dung C_s của các nhóm mẫu MP, MZ đo tại tần số 1kHz. Kết quả liệt kê trên Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Các giá trị trung bình của hằng số điện môi ϵ và tổn hao điện môi $\tan\delta$ của các nhóm mẫu MP, MZ ở nhiệt độ phòng tại tần số 1kHz

Mẫu	ϵ	$\tan\delta$	Mẫu	ϵ	$\tan\delta$
MP65	1130 ± 3	0,007	MZ46	1109 ± 4	0,007
MP70	1134 ± 2	0,008	MZ47	1227 ± 2	0,007
MP75	1152 ± 2	0,008	MZ48	1319 ± 2	0,005
MP80	1226 ± 2	0,007	MZ49	1162 ± 2	0,006
MP85	1154 ± 2	0,09	MZ50	1146 ± 3	0,006
MP90	1143 ± 3	0,01	MZ51	758 ± 4	0,007

Đối với nhóm mẫu MP, hằng số điện môi tăng dần khi nồng độ PZT tăng từ 0,65 mol đến 0,80 mol và đạt giá trị cực đại ($\epsilon = 1226$) ứng với nồng độ PZT là 0,8 mol (MP80). Tại nồng độ này, tổn hao điện môi tan δ của mẫu là 0,007. Từ Bảng 3.1 cho thấy hằng số điện môi ϵ của các mẫu MZ nằm trong khoảng từ 758 đến 1319 phụ thuộc vào tỷ số nồng độ Zr/Ti. Khi tỷ số Zr/Ti tăng, hằng số điện môi của mẫu tăng và đạt giá trị cực đại ($\epsilon = 1319$) ứng với tỷ số Zr/Ti là 48/52, sau đó giảm. Trong khi đó, tổn hao điện môi tan δ giảm dần khi tỷ số Zr/Ti tăng và đạt giá trị cực tiểu (tan $\delta = 0,005$) tại tỷ số Zr/Ti là 48/52 (MZ48), sau đó tăng. Sự gia tăng hằng số điện môi theo tỷ số nồng độ Zr/Ti liên quan đến sự gia tăng kích thước hạt và mật độ gồm [81].



Hình 3.1. Sự phụ thuộc của hằng số điện môi và tổn hao điện môi theo nhiệt độ đo tại tần số 1kHz của các nhóm mẫu MP (a) và MZ (b)

Trên Hình 3.1 biểu diễn sự phụ thuộc của hằng số điện môi ϵ và tổn hao điện môi tan δ vào nhiệt độ của các nhóm mẫu MP (Hình 3.1(a)), MZ (Hình 3.1(b)) đo tại tần số 1kHz. Như đã thấy trong Hình 3.1, phổ hằng số điện môi ϵ không có đỉnh cực đại sắc nét và khi nhiệt độ $T > T_m$, quan hệ $\epsilon(T)$ không tuân theo định luật Curie-Weiss như thường thấy ở các vật liệu sắt điện bình thường (PbTiO_3) [1], [3], [81].

Để chứng minh trạng thái chuyển pha nhòe của hệ vật liệu, chúng tôi đã xác định giá trị γ từ đường thẳng $\ln(1/\epsilon - 1/\epsilon_{\max})$ theo $\ln(T - T_m)$. Đồ thị biểu diễn mối liên hệ giữa $\ln(1/\epsilon - 1/\epsilon_{\max})$ và $\ln(T - T_m)$ của các nhóm mẫu MP, MZ được mô tả trong Hình 3.2. Như đã thấy, đối với nhóm mẫu MP, khi hàm lượng PZT tăng, nhiệt độ ứng với giá trị hằng số điện môi cực đại ϵ_{\max} (T_m) tăng từ 206 °C đến 275 °C và ϵ_{\max} tăng đến giá trị lớn nhất là 18371 khi nồng độ PZT là 0,8 mol và sau đó giảm. Sự gia tăng nhiệt độ T_m