

พฤติกรรมเชิงกลระดับจุลภาคของเซรามิก  $(1-x)\text{Sr}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-x\text{BiFeO}_3$ Microscale Mechanical Properties of  $(1-x)\text{Sr}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-x\text{BiFeO}_3$  Ceramicsรตบงกช แสนจุ่ม<sup>1\*</sup> ยิงยศ ทิพย์ศรีราช<sup>2</sup> ฐิติ หมอรักษา<sup>2</sup> และ กมลภัสสร มั่นศิลป์<sup>1</sup><sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี 131 หมู่ที่ 10 ตำบลพลวง อำเภอเขาคิชฌกูฏ จันทบุรี 22210

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี 131 หมู่ที่ 10 ตำบลพลวง อำเภอเขาคิชฌกูฏ จันทบุรี 22210

Ratabongkot Sanjoom<sup>1\*</sup> Yingyos Thipsrirach<sup>2</sup> Thiti Mhoraksa<sup>2</sup> and Kamonpad Mansilp<sup>1</sup><sup>1</sup>Department of Integrated Engineering, Faculty of Integrated Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus, 131 Moo 10, Pluang Subdistrict, Khao Khitchakut District, Chanthaburi 22210<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Integrated Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus, 131 Moo 10, Pluang Subdistrict, Khao Khitchakut District, Chanthaburi 22210

\*Corresponding author Email: ratabongkot\_sa@rmutto.ac.th

(Received: June 13, 2025; Revise: June 27, 2025; Accepted: June 27, 2025)

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมเชิงกลระดับจุลภาคและโครงสร้างผลึกของเซรามิกระบบ  $(1-x)\text{Sr}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-x\text{BiFeO}_3$  ( $x = 0.00, 0.01, 0.05, 0.10$ ) ที่เตรียมด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าเซรามิกมีโครงสร้างเฟสแบบเพอโรฟสไกต์ระบบออร์โธรอมบิกปรากฏอย่างบริสุทธิ์ที่  $x \leq 0.05$  ในขณะที่  $x = 0.10$  นั้นมีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้น จากนั้นตรวจสอบความหนาแน่นด้วยวิธีอาร์คิมิดีสพบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก  $4.28 \text{ g/cm}^3$  ( $x = 0.00$ ) เป็น  $5.53 \text{ g/cm}^3$  ( $x = 0.10$ ) และตรวจสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิก พบว่าค่าความแข็งให้ค่าสูงสุด  $4.80 \text{ GPa}$  ที่  $x = 0.05$  จากนั้นมีค่าลดลงเหลือ  $3.04 \text{ GPa}$  ที่  $x = 0.10$  เนื่องจากการเกิดเฟสแปลกปลอมและความพรุนในโครงสร้างระดับจุลภาคจึงทำให้ขีดจำกัดการเติม  $\text{BiFeO}_3$  อยู่ที่  $x \leq 0.05$  เพื่อป้องกันการเกิดเฟสแปลกปลอมและความพรุนที่ลดทอนสมบัติเชิงกล เซรามิกที่ได้นี้จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์แปลงพลังงานจืด เช่น เซอร์แรงกดจุลภาคและไมโครแอคทูเอเตอร์ที่ต้องการความทนทานสูงระดับจุลภาค

**คำหลัก** เซรามิกเพอโรฟสไกต์ ความแข็งระดับจุลภาค และอุปกรณ์แปลงพลังงานจืด

## Abstract

This study investigates the micro-scale mechanical behavior and crystal structure of  $(1-x)\text{Sr}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-x\text{BiFeO}_3$  ceramics ( $x = 0.00, 0.01, 0.05, 0.10$ ) synthesized via solid-state reaction. X-ray diffraction analysis confirmed a pure orthorhombic perovskite phase for  $x \leq 0.05$ , whereas the  $x = 0.10$

composition exhibited a secondary phase. Archimedes density measurements showed an increase from 4.28 g/cm<sup>3</sup> ( $x = 0.00$ ) to 5.53 g/cm<sup>3</sup> ( $x = 0.10$ ). Vickers microhardness testing revealed a maximum hardness of 4.80 GPa at  $x = 0.05$ , which decreased to 3.04 GPa at  $x = 0.10$  due to secondary phase formation and microstructural porosity. The BiFeO<sub>3</sub> content should be limited to  $x \leq 0.05$  to prevent the emergence of undesirable secondary phases and porosity that compromise mechanical performance. Ceramics with optimized BiFeO<sub>3</sub> loading are therefore well suited for micro energy harvesting devices, microscale pressure sensors, and micro-actuators requiring high durability at the microscale.

**Keywords:** Perovskite Ceramics, Vickers Microhardness, and Micro Energy Harvesting

## 1. บทนำ

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา วัสดุเซรามิกเชิงหน้าที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในสาขาอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ เซ็นเซอร์ และระบบจัดการพลังงาน โดยเฉพาะวัสดุเซรามิกในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ ซึ่งมีความยืดหยุ่นในการปรับแต่งสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติแม่เหล็ก และสมบัติเชิงกลได้ ผ่านการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค [1–3] หนึ่งในวัสดุที่มีแนวโน้มในการพัฒนาเพื่อการประยุกต์ดังกล่าวคือ เซรามิกในระบบ Sr(Fe<sub>0.5</sub>Nb<sub>0.5</sub>)O<sub>3</sub> (SFN) [2] แม้ว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก SFN จะได้รับการศึกษากันอย่างกว้างขวาง แต่สมบัติเชิงกลโดยเฉพาะในระดับจุลภาคกลับยังมีข้อมูลจำกัด โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของเซรามิก SFN นั้นไม่พบว่ามีค่าจากการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ [2–3] ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเลือกใช้วัสดุในอุปกรณ์ที่ต้องเผชิญแรงทางกล เช่น อุปกรณ์แปลงพลังงาน, ตัวกระตุ้น, และวัสดุในโครงสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น [4–8] การศึกษาค่าความแข็งแรงระดับจุลภาค (Microhardness) แบบวิกเกอร์ จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการประเมินความทนทานของวัสดุภายใต้โหลดขนาดเล็ก และใช้ในการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของวัสดุในระดับโครงสร้าง เซรามิก  $(1-x)\text{Sr}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-x\text{BiFeO}_3$  ( $(1-x)\text{SFN}-x\text{BFO}$ ) มีแนวโน้มที่จะนำไปใช้ในระบบพลังงานอัจฉริยะ เช่น ตัวเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือน และตัวแปลงสัญญาณที่ใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวนทางกลสูง อีกทั้งยังสามารถปรับแต่งองค์ประกอบเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้านได้ การเข้าใจพฤติกรรมเชิงกลในระดับจุลภาคจึงเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบวัสดุเพื่อตอบโจทย์ทางวิศวกรรมอย่างยั่งยืน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาลักษณะเชิงกลระดับจุลภาคของเซรามิก  $(1-x)\text{SFN}-x\text{BFO}$  โดยประเมินค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ เพื่อตรวจสอบผลการเติมขององค์ประกอบ BFO ต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล เพื่อปูทางสู่การประยุกต์ใช้ในงานด้านพลังงานและอุปกรณ์อัจฉริยะในอนาคต

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

ในการทดลองนี้ได้เตรียมเซรามิกสตรอนเชียมไอรอนไนโอเบต สูตร  $(1-x)\text{Sr}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-x\text{BiFeO}_3$  ในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ  $x = 0.00 - 0.10$  โดยโมล สังเคราะห์ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยสารตั้งต้นคือ สตรอนเชียมคาร์บอเนต (SrCO<sub>3</sub>, 98.0%, Aldrich) ไอรอนออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 99.0%, Aldrich) ไนโอเบียมออกไซด์ (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 99.9%, Aldrich) และบิสมาทออกไซด์ (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 99.9%, Aldrich) ทำการบดผสมเปียกโดยใช้ลูกบดเซอริโคเนียเป็นตัวบดและใช้เอทานอลเป็นตัวช่วยกระจายตัวของอนุภาคเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมที่บดละเอียดแล้วมาทำให้แห้งแล้วคั่วขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง แล้วนำมาเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 100 °C/นาที่ นำผงผลึก  $(1-x)\text{SFN}-x\text{BFO}$

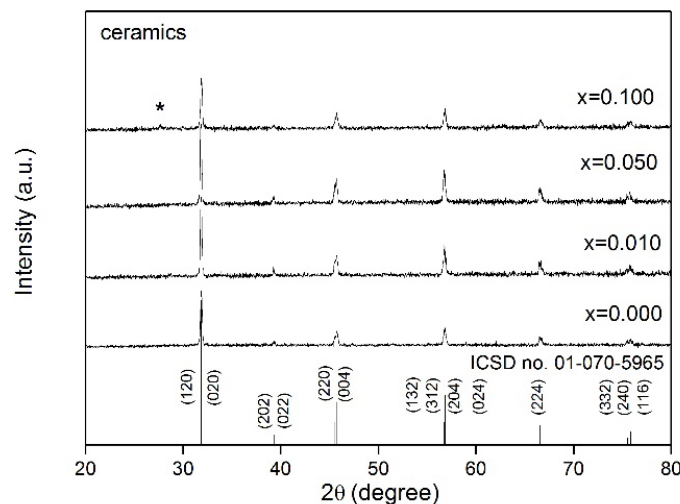
ที่เผาแคลไซน์ มาผสมกับโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งเป็นสารยึดเหนี่ยวความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อผสมเสร็จแล้ว นำสารที่ได้ไปอัดขึ้นรูปให้เป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 mm และหนาประมาณ 1.5 mm โดยใช้เครื่องอัดระบบไฮดรอลิกด้วยความดันขนาด 40 MPa เป็นเวลานาน 25–30 วินาที นำเม็ดที่อัดขึ้นรูปไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 100 °C/ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดเซรามิกที่เผาซินเตอร์แล้ว มาวิเคราะห์การก่อเกิดเฟสโดยใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หาค่าความหนาแน่นของเซรามิกที่เตรียมได้โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีส

สำหรับการตรวจสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์นั้นนำเซรามิกมาทำการขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้ผิวหน้าทั้งสองด้านอยู่ในระนาบ จากนั้นเลือกผิวหน้าด้านหนึ่งที่เรียบสม่ำเสมอไปขัดให้เกิดเงาเป็นกระจกโดยใช้ผงขัดเพชร ทำการขัดขึ้นงานบนเครื่องขัดสาร เมื่อได้ชิ้นงานที่เงาเป็นกระจกแล้วนำไปอบให้แห้ง เพื่อนำมาทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์โดยใช้เครื่องวัดค่าความแข็งระดับจุลภาค (microhardness tester) โดยการกดด้วยโหลดขนาด 300 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที ซึ่งการหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1)

$$H_v = (1854.4) \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

โดยที่  $H_v$  คือ ค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์ (GPa)  $P$  คือ โหลดที่ให้แก่วัสดุ (N) และ  $d$  คือ ค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกด ( $\mu\text{m}$ )

### 3. ผลการวิจัย

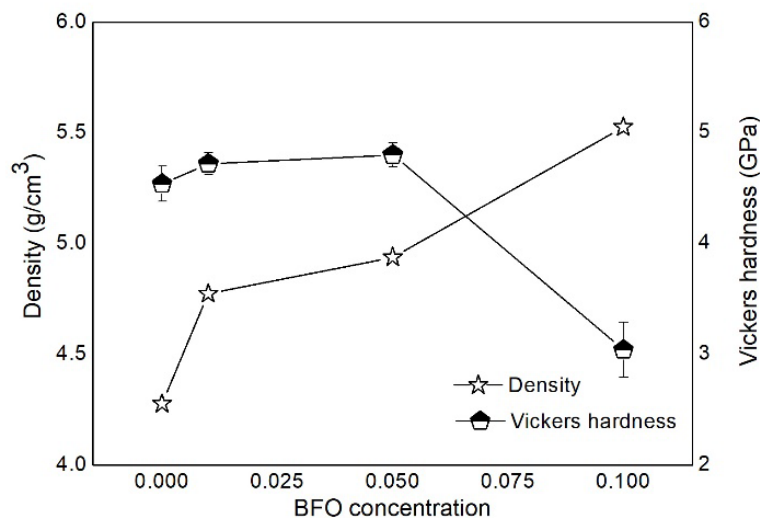


รูปที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก (1-x)SFN-xBFO

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของเซรามิกระบบ (1-x)SFN-xBFO แสดงไว้ในรูปที่ 1 พบว่าทุกฟิสิกส์ที่ตรวจวัดได้มีเฟสเป็นเพอรอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างอยู่ในระบบออร์โธรอมบิก ซึ่งสอดคล้องกับฐานข้อมูล ICSD หมายเลข 01-070-5965 ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับรายงานของ Lui และคณะ [9] ที่ศึกษาวัสดุในระบบเดียวกัน โดยพบว่าในเซรามิกที่มีค่าปริมาณความ

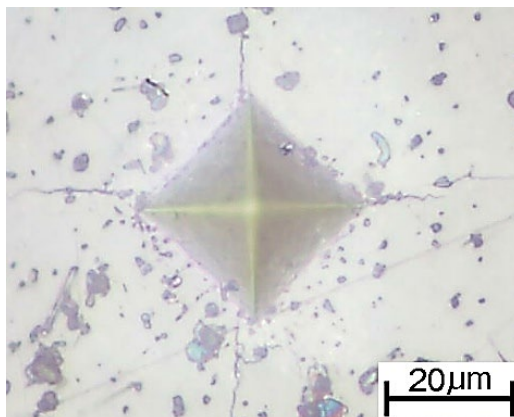
เข้มข้นของ BFO เท่ากับ  $x = 0.00$  และ  $x = 0.05$  ยังคงแสดงเฉพาะเฟสเพอร์อฟสไกต์บริสุทธิ์เท่านั้น อย่างไรก็ตาม สำหรับเซรามิกที่มีค่าปริมาณความเข้มข้นของ BFO เท่ากับ  $x = 0.10$  พบพีครองที่ตำแหน่ง  $2\theta \approx 28^\circ$  (แสดงด้วยสัญลักษณ์ \*) ซึ่งระบุว่า เป็นเฟสแปลกปลอมของสารประกอบ  $\text{SrNb}_2\text{O}_6$  ตามข้อมูลจาก ICSD หมายเลข 00-028-1244 แสดงให้เห็นว่าการเติม BFO ในสัดส่วนที่สูงขึ้นอาจนำไปสู่การแยกตัวของเฟสหรือเกิดเฟสทุติยภูมิที่ไม่ต้องการในระบบ

นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณ BFO ส่งผลให้พีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ทั้งหมดมีแนวโน้มเลื่อนไปทางมุม  $2\theta$  ที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับเซรามิกที่ไม่มีการเติม BFO ( $x = 0.00$ ) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากการขยายตัวของระยะพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึกหรือเกิดการเพิ่มขึ้นของระยะระหว่างระนาบผลึก (d-spacing) อันเนื่องมาจากการแทนที่ไอออนในโครงสร้างด้วยไอออนจาก  $\text{BiFeO}_3$  ซึ่งมีขนาดไอออนิกแตกต่างกัน ส่งผลต่อปริมาตรของเซลล์หน่วยและเป็นสาเหตุให้พีค XRD เลื่อนไปในทิศทางมุมต่ำตามหลักของสมการ Bragg [10]



รูปที่ 2 ความหนาแน่นและความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิก (1-x)SFN-xBFO

จากรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิกระบบ (1-x)SFN-xBFO พบว่าเมื่อปริมาณความเข้มข้นของ BFO เพิ่มขึ้น ตั้งแต่  $x = 0.00$  ถึง  $x = 0.10$  ความหนาแน่นของเซรามิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $4.28 - 5.53 \text{ g/cm}^3$  แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นผลสอดคล้องกับการแทนที่ขององค์ประกอบของ  $\text{Bi}^{3+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  ที่มีขนาดและน้ำหนักของอะตอมมากกว่าในตำแหน่ง A-site และ B-site ส่งผลให้โครงสร้างผลึกมีความหนาแน่นมากขึ้น ในส่วนของค่าความแข็งแบบวิกเกอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 4.54 GPa ( $x = 0.00$ ) เป็น 4.72 GPa ( $x = 0.01$ ) และ 4.80 GPa ( $x = 0.05$ ) พบว่าค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นที่เป็นระบบเพอร์อฟสไกต์เหมือนกัน [11-12] และเมื่อ  $x = 0.10$  นั้น พบว่าค่าความแข็งแบบวิกเกอร์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเหลือ 3.04 GPa ซึ่งค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ที่ลดลงสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่พบเฟสแปลกปลอมของสารประกอบ  $\text{SrNb}_2\text{O}_6$  ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้โครงสร้างผลึกไม่ต่อเนื่องและเกิดความเปราะ (แสดงรอยกุดดังรูปที่ 3) ส่งผลให้ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของรอยกดแบบวิกเกอร์ของเซรามิก (1-x)SFN-xBFO โดยใช้แรงกด 300 กรัม กำลังขยาย 400 เท่า ที่มีลักษณะรอยแตกแยกตรงมุมทั้ง 4

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ ) ที่ความถี่ 1 kHz วัดที่อุณหภูมิห้อง มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1824 ( $x = 0.00$ ) เป็น 1955 ( $x = 0.01$ ) และให้ค่าสูงสุดที่ 2287 ( $x = 0.05$ ) จากนั้นค่าลดลงเหลือ 454 ( $x = 0.10$ ) ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดเฟสแปลกปลอมและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเมื่อเติม BFO ในปริมาณสูงเกินไป แสดงให้เห็นว่าการเติม BFO ในปริมาณที่เหมาะสม (ไม่เกิน  $x = 0.05$ ) สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติไฟฟ้าของเซรามิกได้โดยไม่ก่อให้เกิดเฟสทุติยภูมิที่ไม่พึงประสงค์

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก (1-x)SFN-xBFO

| เซรามิก | ความหนาแน่น<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | ขนาดเกรนเฉลี่ย<br>( $\mu\text{m}$ ) | ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์<br>(GPa) | ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $\epsilon_r$ )<br>ที่อุณหภูมิห้อง @1kHz |
|---------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 0.00    | 4.28                               | 1.06                                | $4.54 \pm 0.16$                 | 1824                                                           |
| 0.01    | 4.77                               | 1.12                                | $4.72 \pm 0.10$                 | 1955                                                           |
| 0.05    | 4.94                               | 1.36                                | $4.80 \pm 0.11$                 | 2287                                                           |
| 0.10    | 5.53                               | 4.62                                | $3.04 \pm 0.25$                 | 454                                                            |

#### 4. สรุป

จากผลการวิจัยที่ได้พบว่าเซรามิกระบบ (1-x)SFN-xBFO ทั้งหมดแสดงลักษณะโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบออร์โทโรมบิก และลักษณะการเลี้ยวของพีค XRD ไปทางมุมที่ต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณ BFO นั้น สะท้อนถึงการขยายตัวของระยะ d-spacing ซึ่งสอดคล้องกับการแทนที่ของอะตอม  $\text{Bi}^{3+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  ที่มีน้ำหนักอะตอมมากกว่าเข้าไปในโครงสร้าง

ทางด้านสมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่  $4.28 \text{ g/cm}^3$  ( $x=0.00$ ) เป็น  $5.53 \text{ g/cm}^3$  ( $x=0.10$ ) เนื่องจากการยึดตัวของผลึกแน่นขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ( $H_v$ ) เพิ่มขึ้นจาก  $4.54 \text{ GPa}$  ( $x=0.00$ ) เป็น  $4.80 \text{ GPa}$  ( $x=0.05$ ) และมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเหลือเพียง  $3.04 \text{ GPa}$  ที่  $x=0.10$  รวมไปถึงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 kHz มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 2287 ที่  $x = 0.05$  และลดลงเหลือ 454 ที่  $x = 0.10$  ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดเฟสรองและการแตกพรุนของโครงสร้าง ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเติม BFO ในสัดส่วนไม่เกิน 5% โดยโมล จะช่วยยกระดับสมบัติ

เชิงกลและไฟฟ้าของเซรามิกโดยไม่ก่อให้เกิดเฟสทุติยภูมิที่ลดทอนความแข็งแรงของเซรามิกได้ เซรามิกที่ได้นี้จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์แปลงพลังงานจิว์ เช่น เซอร์แรงกดระดับจุลภาค และไมโครแอคทูเอเตอร์ที่ต้องการความทนทานสูงระดับจุลภาค เนื่องจากมีค่าความเหนียวแตกหักและความทนทานต่อความล้าสูง ควบคู่กับค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เสถียรในช่วงอุณหภูมิกว้าง จึงยืดอายุการใช้งานและรักษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้คงที่ได้ยาวนานยิ่งขึ้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เงินงบประมาณรายได้ปี พ.ศ. 2567 ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Wang, H. J. Li, L. L. Zhang, Y. F. Wen, and Y. P. Pu, “Effects of Barium Substitution on the Dielectric Properties of  $\text{Sr}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$  Ceramics,” *The Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 26, pp. 134–138, 2015.
- [2] C. Kruea-In, W. Udsah, S. Eitssayeam, K. Pengpat, and G. Rujijanagul, “Influence of Processing Temperature on Properties of  $\text{Sr}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$  High Dielectric Ceramics,” *Ferroelectrics*, vol. 456, pp. 128–133, 2013.
- [3] T. Phatungthane and G. Rujijanagul, “Dielectric Properties of Modified  $\text{SrFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$  Ceramics Prepared by a Solid-State Reaction Technique,” *Ferroelectrics*, vol. 454, pp. 23–28, 2013.
- [4] W. Tian, Z. Ling, W. Yu, and J. Shi, “A Review of MEMS Scale Piezoelectric Energy Harvester,” *Applied Sciences*, vol. 8, p. 645, 2018.
- [5] V. T. Srikar and S. M. Spearing, “A Critical Review of Microscale Mechanical Testing Methods Used in the Design of Microelectromechanical Systems,” *Experimental Mechanics*, vol. 43, pp. 238–247, 2003.
- [6] W. Guo, Y. Lu, C. Zhang, and Z. Yue, “Low-Temperature Dielectric Relaxation and Microwave-Terahertz Dielectric Response of  $\text{Ca-Sm-Ti-O}$  Perovskite Ceramics,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 45, p. 117287, 2025.
- [7] X. Zhang, X. Zhang, J. Zhang, S. Ma, Y. Liu, and Z. Yue, “Defect Relaxation and Microwave Dielectric Response of  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{La}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$  Hexagonal Perovskite Ceramics with 5-Layer Shifted Structure,” *Journal of Power Sources*, vol. 632, p. 236384, 2025.
- [8] C. Ma, R. Zhang, G. Zhang, H. Du, J. Liu, R. Liang, and Z. Wang, “Structural Evolution and Energy Storage Properties of  $\text{Bi}(\text{Zn}_{0.5}\text{Zr}_{0.5})\text{O}_3$  Modified  $\text{BaTiO}_3$ -Based Relaxation Ferroelectric Ceramics,” *Journal of Energy Storage*, vol. 72, p. 108374, 2023.
- [9] Y. Y. Liu, X. M. Chen, X. Q. Liu, and L. Li, “Giant Dielectric Response and Relaxor Behaviors Induced by Charge and Defect Ordering in  $\text{Sr}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$  Ceramics,” *Applied Physics Letters*, vol. 90, p. 192905, 2007.

- [10] F. Aguesse, A. K. Axelsson, P. Reinhard, V. Tileli, J. L. Rupp, and N. M. Alford, “High-Temperature Conductivity Evaluation of Nb Doped SrTiO<sub>3</sub> Thin Films: Influence of Strain and Growth Mechanism,” *Thin Solid Films*, vol. 539, pp. 384–390, 2013.
- [11] R. Yimnirun, E. Meechoowas, S. Ananta, and T. Tunkasiri, “Mechanical Properties of xPMN-(1-x) PZT Ceramic Systems,” *CMU. Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 147–154, 2004.
- [12] F. Wang, X. Li, Q. Xu, N. Chen, H. Chen, Y. Cheng, and J. Zhu, “Influence of Acceptor–Donor Codoping on the Structure, Electrical Properties, and Hardness of CaBi<sub>2</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>-Based Ceramics,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 910, p. 164853, 2022.