



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและการจัดสร้างเครื่องมือวัดเพื่อใช้ประกอบการศึกษาอิทธิพล
ทางความร้อนต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ

Design and construction of apparatus for study of temperature
effects on dielectric properties of materials

จัดทำโดย

ผศ. ดร. นราธิป วิทยาการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ
2557

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ : การออกแบบและการจัดสร้างเครื่องมือวัดเพื่อใช้ประกอบการศึกษาอิทธิพล
ทางความร้อนต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ

ประจำปีงบประมาณ : 2557

1. ชื่อหัวหน้าโครงการ

ผศ. ดร. นราธิป วิทยากร

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. ระยะเวลาดำเนินงาน 2 ปี: 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือสำหรับวัดสมบัติไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิขนาดเล็กเพื่อใช้ประกอบการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุภายใต้อิทธิพลทางความร้อน โดยค่าที่สามารถวัดออกมาได้นั้นจะประกอบไปด้วยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) เทียบกับอุณหภูมิ จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องมือ รวมไปถึงศึกษาอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิที่เหมาะสมในงานใช้งาน พบว่า เครื่องวัดสมบัติไดอิเล็กทริกนี้สามารถใช้งานได้จริงและให้ผลการวัดที่ถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ที่อัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 และ 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที ซึ่งเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้เป็นอุปกรณ์เสริมในการแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลทางความร้อนต่อสมบัติต่างๆของวัสดุ เช่น การนำไฟฟ้า สมบัติเพียโซอิเล็กทริก สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก รวมทั้งใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนภาคปฏิบัติของนักศึกษาสาขาเคมีอุตสาหกรรม-วัสดุศาสตร์ ทั้งในระดับปริญญาตรีและ ระดับบัณฑิตศึกษาต่อไป

คำสำคัญ : เครื่องวัดสมบัติไดอิเล็กทริก

Research Title: Design and construction of apparatus for study of temperature effects on dielectric properties

Researcher : Asst. Prof. Dr. Naratip Vittayakorn

Faculty : Science

Department : Chemistry

ABSTRACT

The apparatus for study of temperature effects on dielectric properties of materials have been successfully fabrication. It can provide high precision of dielectric permittivity or dielectric constant and dielectric loss as temperature dependent. The heating and cooling rate was studied. It was found that the highest precision has occurred at 1 and 5 degree Celsius per minute. It's interesting to note that this apparatus also provides the effect of temperature on conductivity, piezoelectric properties, ferroelectric properties, and also used as the Instruction media for bachelor and graduate study.

Keywords : sonochemical , tetragonal scheelite

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เงินทุนสนับสนุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 สำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวัสดุขั้นสูงของคณะวิทยาศาสตร์ ที่ใช้เป็นสถานที่สำหรับงานวิจัย อีกทั้งขอขอบคุณภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับการเขียนโปรแกรมและการต่อวงจรไฟฟ้าของเครื่องมือ และสุดท้ายขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยทุกคนที่ช่วยเหลือ ที่มีความสามัคคีกัน ร่วมกันคิดวิเคราะห์ แก้ไขปัญหาและช่วยกันทำการทดลอง กันจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีตลอดมา



ผศ. ดร. นราธิป วิทยากร

หัวหน้าโครงการวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สมบัติของวัสดุ	4
2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริก	5
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	10
บทที่ 4 ผลการวิจัย	11
4.1 ความก้าวหน้าของการจัดสร้างชุดวัดสมบัติทางไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิขนาดเล็ก	11
4.2 การใช้งานโปรแกรมและหน้าจอสแสดงผล	25
4.3 ผลของการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกจากชุดวัดไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้น	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	44
5.1 สรุปผลการวิจัย	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
เอกสารอ้างอิง	45
ข้อมูลประวัตินักวิจัย	46



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การขึ้นลงของอุณหภูมิเพื่อทดสอบความแม่นยำของอุณหภูมิภายในเตาและค่าที่อ่านได้	14
4.2 แสดงผลการทดสอบอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิระหว่างค่าจากโปรแกรมและค่าที่วัดจริงจากเครื่องไดอิเล็กทริก	16
4.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_c) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity (ϵ_r)) ระหว่างวัสดุ PZ-NN05 มาตรฐานจากแหล่งอ้างอิง และจากตัวอย่าง PZ-NN05 ที่วัดได้จากเครื่องไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ	29
4.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_c) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity (ϵ_r)) ระหว่างวัสดุ PZ-PNN06 มาตรฐานจากแหล่งอ้างอิง และจากตัวอย่าง PZ-NN05 ที่วัดได้จากเครื่องไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ	30

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงอุปกรณ์ชุดวัดที่สามารถวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุได้ที่อุณหภูมิสูงของบริษัท Probostat ประเทศนอร์เวย์	1
2.1 ลักษณะของวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นสารไม่มีขั้ว เมื่อมีสนามไฟฟ้าทำให้เกิด dipole moment	4
2.2 ลักษณะมุมเฟสในตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติ	6
2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของ BaTiO ₃	7
2.4 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃	8
2.5 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิก (1-x)PNN-xPZT	8
2.6 แสดงชุดวัดค่าความจุไฟฟ้าอย่างง่ายที่สามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้	9
2.7 แสดงชุดวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับเตาให้ความร้อนอุณหภูมิสูงและสามารถควบคุมบรรยากาศการวัดได้	9
4.1 แสดงชุดจับชิ้นงานเซรามิก	11
4.2 แสดงการจัดสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผา	12
4.3 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าและชุดควบคุมและอุปกรณ์อ่านอุณหภูมิ	12
4.4 แสดงการสร้างเตาเผาแบบท่อโดยใช้ชุดควบคุมโครม	13
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการขึ้นลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา	15
4.6 การติดตั้งเตาเผาแบบท่อเข้ากับส่วนจับชิ้นงาน	16
4.7 การติดตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเข้ากับแผงวงจรการใช้งานจริง	17
4.8 (ก) ตัวจับชิ้นงานแบบเก่า และ (ข) ตัวจับชิ้นงานแบบใหม่ที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว	18
4.10 ลักษณะของชุดเตาให้ความร้อนซึ่งผ่านการปิดป้องกันการสูญเสียออกของความร้อนด้วยแผ่นอะลูมินาและสำลี	19

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ลักษณะภายนอกของชุดเตาให้ความร้อนที่ผ่านการปิดทับทั้งสี่ด้านด้วยแผ่นเหล็ก	20
4.12 ชุดจับชิ้นงานรูปทรงแบบท่อที่ผ่านการปรับปรุงให้เหมาะสมกับขนาดของชุดเตาให้ความร้อนขนาดเล็ก	20
4.13 (ก) ลักษณะภายในทางด้านข้างของการประกอบชุดจับชิ้นงานแบบท่อเข้ากับชุดเชื่อมต่อกับเครื่อง LCR meter	21
4.13 (ข) ลักษณะภายในจากรูปถ่ายด้านบนของชุดเชื่อมต่อกับเครื่อง LCR meter	21
4.14 (ก) แสดงลักษณะการประกอบชุดเตาให้ความร้อน ชุดจับชิ้นงานและชุดเชื่อมต่อเครื่อง LCR meter เข้าด้วยกันโดยใช้สายพานและแท่งเหล็กเพื่อเป็นรางเลื่อน	22
4.14 (ข) ลักษณะภายนอกเมื่อเคลื่อนชุดเตาให้ความร้อนเข้าหาชุดจับชิ้นงาน	22
4.15 (ก) การประกอบชุดเตาให้ความร้อนพร้อมชุดจับชิ้นงานและชุดเชื่อมต่อเครื่อง LCR meter เข้ากับฐานของชุดวัดไดอิเล็กทริก	23
4.15 (ข) หน้าจอแสดงผลสำหรับชุดควบคุมอุณหภูมิและแผงวงจรไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างชุดควบคุมอุณหภูมิกับเตาให้ความร้อน	24
4.16 ส่วนประกอบของชุดวัดไดอิเล็กทริกที่เสร็จสมบูรณ์	25
4.17 แสดงสัญลักษณ์ของโปรแกรม High Temp. บนหน้าจอแสดงผล	26
4.18 หน้าจอแสดงผลเมื่อเข้าโปรแกรม High Temp. และพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องป้อนลงในโปรแกรมก่อนการวัดชิ้นงาน	27
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก และอุณหภูมิของสารตัวอย่างมาตรฐาน PZ-NN โดยทำการวัดที่อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 5 10 และ 20 °C/นาที	28
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก และอุณหภูมิของสารตัวอย่างมาตรฐาน PZ-PNN โดยทำการวัดที่อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 5 10 และ 20 °C ต่อนาที	29

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ (1-x)(0.94Bi _{0.5} Na _{0.5} TiO ₃ - 0.06BaTiO ₃)-xBaSnO ₃)	31
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ (1-x)(0.94Bi _{0.5} Na _{0.5} TiO ₃ - 0.06BaTiO ₃)-xCaSnO ₃)	32
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ Ba(Zr _{0.2} Ti _{0.8})O ₃ -50 (Ba _{0.7} Ca _{0.3})TiO ₃ ที่เวลาการเผาอบ (Annealing) (a) ไม่เผาอบ (No annealing) (b) 12 (c) 24 (d) 48 (e) 100 ชั่วโมง	33
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $Ba_{0.825+x}Ca_{0.175-x}Ti_{(1-x)}Sn_xO_3$	34
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสกับสัดส่วนองค์ประกอบ x ของเซรามิกในระบบ $Ba_{0.825+x}Ca_{0.175-x}Ti_{(1-x)}Sn_xO_3$	35
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับ อุณหภูมิของเซรามิก 0.87BT-(0.13-x)BZ-xCT	36
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ (1-x)KNN-xBZnN	38
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ (1-x)KNN - xBMnN	39
4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ ของเซรามิกในระบบ 0.9BaTiO ₃ - (1-x)(Bi _{0.5} Na _{0.5})TiO ₃ - xBi(Mg _{0.5} Ti _{0.5})O ₃	40
4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของ เซรามิกในระบบ (0.95-y)BaTiO ₃ - 0.05CaTiO ₃ - yBaZrO ₃	41
4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับ อุณหภูมิของเซรามิกในระบบ(0.975-y)BaTiO ₃ - 0.025SrTiO ₃ - yBaSnO ₃	42

นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

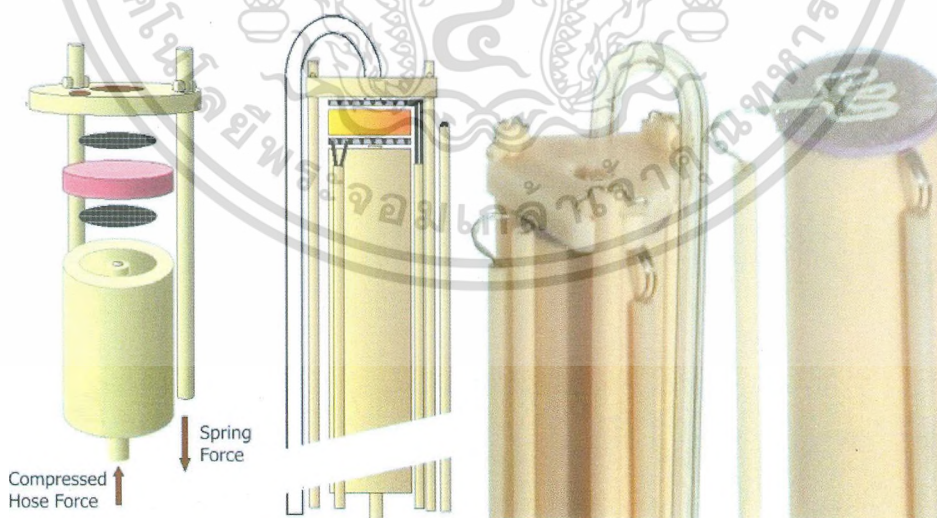
รูปที่	หน้า
4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(0.95-x)\text{BaTiO}_3 - 0.05\text{CaTiO}_3 - x\text{BaSnO}_3$	43



บทที่ 1 บทนำ

1.1ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นและใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ มนุษย์เราใช้งานอุปกรณ์เหล่านี้ตั้งแต่ตื่นนอนจนถึงเข้านอน มีการแข่งขันและพัฒนาเครื่องใช้ไฟฟ้ารุ่นใหม่ๆอยู่ตลอดเวลา และมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่ๆที่ตอบสนองความต้องการของมนุษย์เกิดขึ้นมากมายการพัฒนาส่วนใหญ่จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ ลดขนาดให้มีขนาดเล็ก กะทัดรัด และน้ำหนักเบายิ่งขึ้น โดยเมื่อพิจารณาในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิดมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าและจ่ายประจุไฟฟ้าที่เก็บไว้ให้แก่วงจรอิเล็กทรอนิกส์อยู่ เรียก ตัวเก็บประจุ ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับวัสดุไดอิเล็กทริกที่นำมาใช้ โดยหากวัสดุไดอิเล็กทริกมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง ตัวเก็บประจุชนิดนั้นก็จะสามารถประจุไฟฟ้าได้สูงตามไปด้วย และยังสามารถลดขนาดของตัวเก็บประจุลงได้ด้วยเช่นกัน ยิ่งไปกว่านั้น วัสดุไดอิเล็กทริกที่พยายามพัฒนานั้นอยู่ในปัจจุบันนั้นไม่เพียงต้องการให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงเท่านั้น แต่ยังต้องการให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุนั้นไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิด้วย เพื่อให้ประสิทธิภาพของเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นมีเสถียรภาพแนวทางในการพัฒนาจึงมุ่งเน้นการศึกษาหาวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงและค่าไดอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ การวัดสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริกจึงมีความสำคัญ โดยอุปกรณ์ที่นิยมใช้วัดได้แก่เครื่อง LCR meter โดยเครื่องมือดังกล่าวสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้า (C) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และ ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ได้และหากมีความจำเป็นต้องวัดค่าต่างๆเหล่านี้เทียบกับอุณหภูมินักวิจัยมีความจำเป็นต้องต่อเครื่อง LCR meter เข้ากับชุดวัด และต่อพ่วงเข้ากับเตาเผาอุณหภูมิสูงหากต้องการวัดค่าที่อุณหภูมิสูง โดยอุปกรณ์ชุดวัดดังกล่าวมีราคาสูงมากประมาณ 2 ล้านบาท และจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยลักษณะของชุดวัดแสดงดังรูปที่ 1.1 และหากต้องการวัดที่อุณหภูมิต่ำมีความจำเป็นต้องต่อพ่วงเข้ากับตู้ควบคุมอุณหภูมิที่มีระบบหล่อเย็นด้วย ไนโตรเจนเหลวซึ่งจะมีราคาสูงกว่านี้มาก



รูปที่ 1.1 แสดงอุปกรณ์ชุดวัดที่สามารถวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุได้ที่อุณหภูมิสูงของ บริษัท Probostat ประเทศนอร์เวย์

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้จึงเห็นได้ว่าอุปกรณ์ดังกล่าวมีประโยชน์และชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการที่จะฝึกฝนให้นักศึกษาในสาขาวิศวกรรมมีความเข้าใจในหลักการพื้นฐานและมีความคุ้นเคยกับเครื่องมือดังกล่าว เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมของนักศึกษาในการทำงานวิจัยและยังเป็นการพัฒนาคุณภาพของบัณฑิตที่จะจบการศึกษาออกไป ซึ่งอาจได้ทำงานในภาครัฐหรือภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในอนาคตจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นประกอบกับภาวะการขาดแคลนอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบการเรียนการสอนเกี่ยวกับเรื่อง สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ: สมบัติไดอิเล็กทริก ทั้งในภาคบรรยายและภาคปฏิบัติของกระบวนวิชา ปฏิบัติการทางวัสดุศาสตร์ และ วัสดุไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ในระดับปริญญาตรี และ กระบวนวิชา วัสดุไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งาน ในระดับปริญญาโท คณะผู้วิจัยมีความประสงค์ที่จะสร้างชุดวัดนี้ขึ้นมาเอง เพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้พื้นฐานให้กับหน่วยงานและบุคลากรของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และเพื่อใช้ในการสาธิตให้นักศึกษาได้เห็นถึงอิทธิพลทางความร้อนที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่ง สมบัติไดอิเล็กทริกและการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก สำหรับประกอบการศึกษาภาคปฏิบัติของนักศึกษาสาขาเคมีอุตสาหกรรม-วัสดุศาสตร์ ทั้งในระดับปริญญาตรีและ ระดับบัณฑิตศึกษาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อออกแบบจัดสร้างชุดวัดสมบัติทางไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิขนาดเล็กเพื่อใช้ประกอบการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุภายใต้อิทธิพลทางความร้อน และสามารถใช้เป็นอุปกรณ์สาธิตในการแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลทางความร้อนต่อสมบัติต่างๆของวัสดุ เช่น การนำไฟฟ้า สมบัติเพียโซอิเล็กทริก สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วย รวมทั้งใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนภาคปฏิบัติของนักศึกษาสาขาเคมีอุตสาหกรรม - วัสดุศาสตร์ ทั้งในระดับปริญญาตรีและ ระดับบัณฑิตศึกษาต่อไป

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ออกแบบจัดสร้างชุดวัดสมบัติทางไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิขนาดเล็กเพื่อใช้ประกอบการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุภายใต้อิทธิพลทางความร้อนโดยชุดวัดดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง อุณหภูมิห้อง ถึง $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงความถี่ $100\text{ Hz} - 1\text{ MHz}$
2. ชุดวัดสามารถต่อเข้ากับเครื่อง LCR meter เพื่อวัดสมบัติไดอิเล็กทริก รวมถึง ค่าการสูญเสียทางความร้อนได้ โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิได้
3. ออกแบบจัดสร้างซอฟต์แวร์เพื่อใช้ควบคุมชุดวัดดังกล่าว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดวัดสมบัติทางไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิขนาดเล็กเพื่อใช้ในการประกอบการเรียนการสอนภาคปฏิบัติของนักศึกษาสาขาเคมีอุตสาหกรรม วัสดุศาสตร์ ทั้งในระดับปริญญาตรีและระดับบัณฑิตศึกษา
2. ได้เครื่องมือเพื่อใช้ในการสาธิตอิทธิพลทางความร้อนที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ
3. ได้สร้างองค์ความรู้พื้นฐานให้แก่หน่วยงานและบุคลากรของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ได้เตรียมความพร้อมและความคุ้นเคยให้แก่นักศึกษาและบุคลากรในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าให้มีความเข้าใจในหลักการชุดวัดสมบัติทางไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันทั้งในสายงานวิจัยและพัฒนา และในภาคอุตสาหกรรม
5. ได้ชุดวัดสมบัติทางไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิขนาดเล็กเพื่อใช้ในการให้บริการแก่ อาจารย์ นักศึกษา และ ภาคอุตสาหกรรม

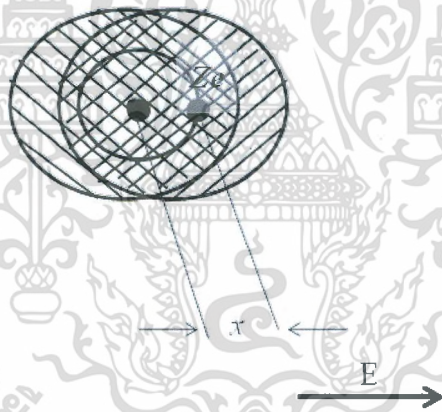


ในเอกสารที่ส่งจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. สมบัติของวัสดุ

สมบัติของวัสดุ หมายถึง การที่วัสดุตอบสนองอย่างใดอย่างหนึ่งออกมาเมื่อได้รับการกระตุ้นจากภายนอก โดยสามารถแบ่งสมบัติของวัสดุตามสิ่งกระตุ้นได้ออกเป็น 6 สมบัติด้วยกันคือ สมบัติทางแสง สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติแม่เหล็ก และ สมบัติการเสื่อมสภาพ โดยสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดจะเป็นการตอบสนองต่อสิ่งเร้าแต่ละแบบ โดยในงานวิจัยนี้ขอกล่าวถึงสมบัติไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นสมบัติทางไฟฟ้าชนิดหนึ่ง และเป็นสมบัติที่สำคัญที่จะบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุที่สามารถจะกักเก็บประจุไฟฟ้า วัสดุของแข็งทุกชนิดนั้นประกอบด้วยส่วนย่อย คือ อะตอม ซึ่งภายในอะตอมปกติจะประกอบด้วยกลุ่มโปรตอน และกลุ่มอิเล็กตรอน มีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกันและอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวของอะตอม และ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากกระทำกับอะตอมหรือโมเลกุลจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนาม และกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นอะตอมหรือโมเลกุลของสารต่างก็ก่อตัวเป็นโมเลกุลขั้วคู่ (dipole moment) เล็กๆ ขึ้นในทิศทางเดียวกันตามทิศสนามไฟฟ้า วัสดุไดอิเล็กทริกประเภทนี้เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecule) [1] ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นสารไม่มีขั้ว เมื่อมีสนามไฟฟ้าทำให้เกิด dipole moment

วัสดุไดอิเล็กทริกบางชนิดที่โมเลกุลก่อตัวเป็นขั้วคู่อยู่แล้ว แต่ทิศทางของขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole) ขึ้นอยู่กับทิศทางไม่เป็นระเบียบ (random) และเมื่อแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากกระทำ จะทำให้ขั้วคู่เล็กๆ เหล่านี้เรียงตัวกันในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) และเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าขั้วคู่ถาวร (permanent dipole) มีวัสดุบางอย่างที่โมเลกุลสามารถเรียงตัวกันตัวเอง โดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก และขั้วคู่ถาวรนั้นสามารถถูกบังคับได้ด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก เรียกวัสดุชนิดนี้ว่า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric materials) เช่น แบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) เป็นต้น ลักษณะของการที่โมเลกุลขั้วคู่ของวัสดุไดอิเล็กทริกก่อตัวเป็นคู่เล็กๆ แล้วจัดเรียงตัวกันในสนามไฟฟ้า เรียกว่าโพลาไรเซชัน (polarization) โดยกำหนดให้โพลาไรเซชันเป็นจำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ต่อหน่วยปริมาตร ถ้า N เป็นจำนวนโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตรและทุกๆ โมเลกุลมีขั้วโมเลกุลขั้วคู่เป็น \vec{p} ดังนั้นจะได้โพลาไรเซชันเป็น \vec{P} [1, 2] เช่น

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{P} = N \vec{p} \quad (1)$$

และเมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกถูกโพลาไรซ์ สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปโดยพิจารณาจากสมการ (2)

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2)$$

โดยที่ \vec{D} คือ Electric displacement vector

\vec{E} คือ สนามไฟฟ้าในตัวกลาง

ϵ_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} F/m

สมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารไดอิเล็กทริก คือ มีสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าหรือความซาบซึมทางไฟฟ้า X (electric susceptibility) กำหนดได้ด้วยสมการ (3)

$$\vec{P} = \epsilon_0 X \vec{E} \quad (3)$$

ในสุญญากาศไม่เกิดโพลาไรเซชัน ($\vec{P} = 0$) ดังนั้น X จึงเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้น \vec{D} จะขึ้นอยู่กับสนามภายนอกเท่านั้น ถ้าสนามไฟฟ้าภายนอกเป็น \vec{E}_0 ดังนั้นสนามไดอิเล็กทริกจะเป็น

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0 \quad (4)$$

จากสมการ 3 และ 4 จะได้สมการดังนี้

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 X \vec{E} \quad (5)$$

$$= \epsilon_0 (1+X) \vec{E}$$

$$= \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$$

เราเรียกเทอม (1+X) หรือ ϵ_r ว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant) อาจเขียนสมการที่ 5 ได้ดังนี้

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (6)$$

โดย ϵ_r เรียกว่า สภาพยอมของสารไดอิเล็กทริก

สารไดอิเล็กทริกเป็นฉนวนที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุเพื่อกันหรือให้แรงดันสูงขึ้นกว่าก๊าซรวมทั้งอากาศด้วย โดยมีค่าคงที่เป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สารไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุสุญญากาศ ดังสมการ

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (7)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น ϵ_r

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ (ϵ_0) คือ

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (8)$$

และจากความสัมพันธ์ $C = Q/V$ สำหรับกรณีที่ไม่มีการไดอิเล็กทริกจะได้ว่า

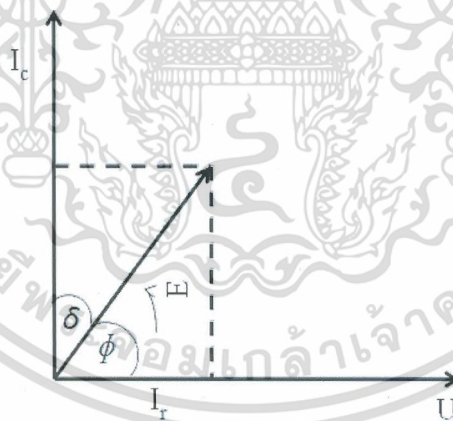
$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (9)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก
 d คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก

สำหรับตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r จะได้ว่า

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (10)$$

ถ้าป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสหน้าหน้าความต่างศักย์ เป็นมุม 90 องศา แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กทริกมีความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา [3] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะมุมเฟสในตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติ

ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเฉลี่ยเป็น

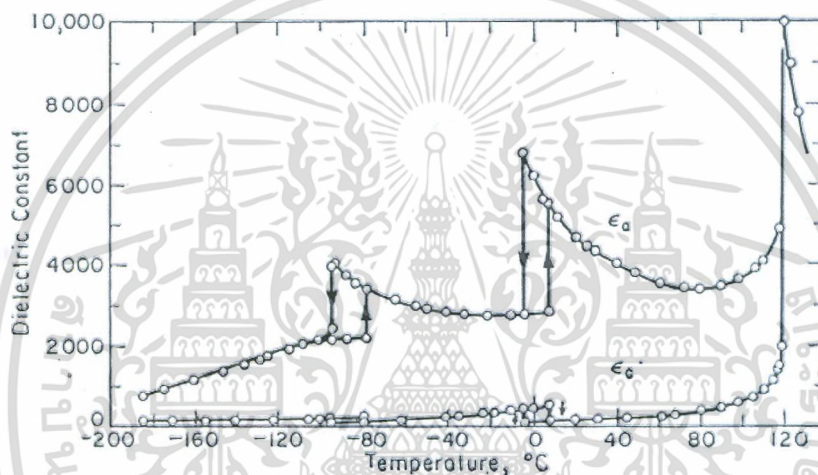
$$P_d = \frac{1}{2}(V_c \tan \delta) = \frac{1}{2}(V^2 \omega C \tan \delta) \quad (11)$$

โดยที่ $\tan \delta$ เรียกว่า การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent)

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริก

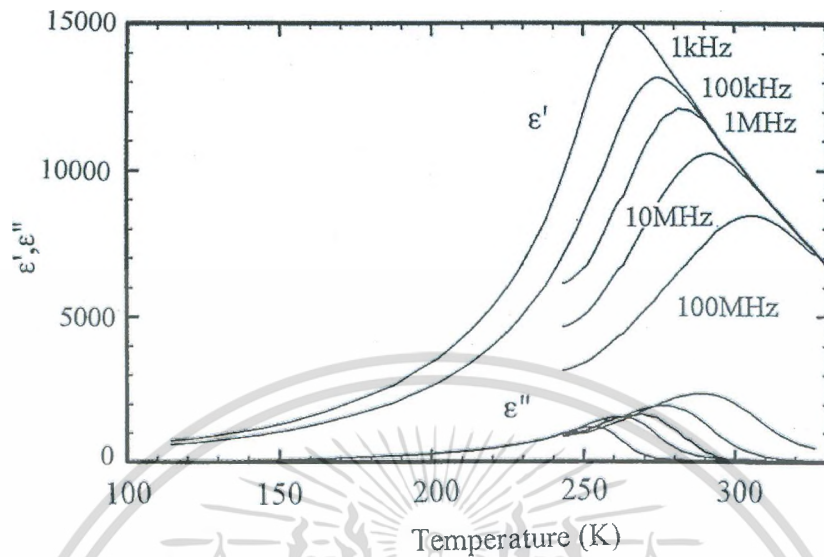
โดยปกติแล้ววัสดุไดอิเล็กทริกส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมตัวเก็บประจุนั้นจะแสดงพฤติกรรมของค่าไดอิเล็กทริกแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าไดอิเล็กทริกค่อนข้างสูง รวมไปถึงค่าการสูญเสียทางความร้อนทางไดอิเล็กทริกเช่นเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลต่อนำไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเช่น เซรามิก BaTiO_3 ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่นิยมใช้ในตัวเก็บประจุแบบเซรามิก (ceramic capacitor) โดย BaTiO_3 ที่ปราศจากสารเจือปนนั้นจะแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของ BaTiO_3 [1, 4]

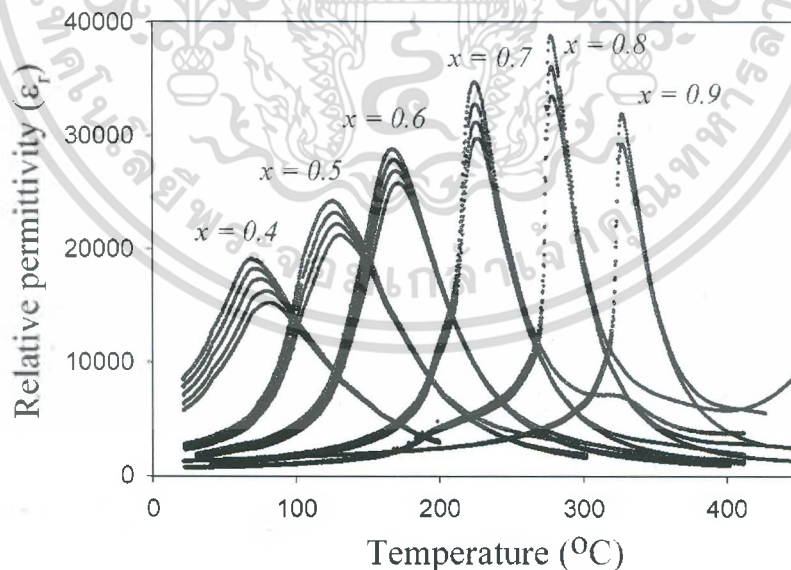
โดยจากรูปที่ 2.3 แสดงการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของผลึกเดี่ยว BaTiO_3 จะเห็นได้ว่าผลึกเดี่ยว BaTiO_3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิที่ไม่เป็นเส้นตรง โดยจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่ ช่วงอุณหภูมิ ประมาณ -90°C , 0°C และ 125°C ซึ่งอุณหภูมิทั้ง 3 จะเป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ BaTiO_3 โดยเปลี่ยนจาก รอมโบฮีดรอล เป็น ออโทรอมบิก เททระโกนอล และ คิวบิก ตามลำดับ จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าไม่เฉพาะค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ค่าการสูญเสียก็เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิเช่นเดียวกัน นอกเหนือจากนี้วัสดุไดอิเล็กทริกบางชนิดนั้นยังแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความถี่ที่ได้รับ เช่น เซรามิกในกลุ่ม รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก ดังแสดงดังรูปที่ 2.4

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$

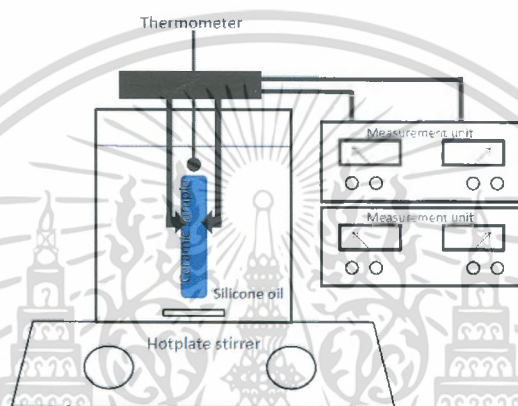
หากทำการเปรียบเทียบรูปที่ 3 และ 4 จะเห็นได้ว่าเซรามิก PMN ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีฐานพิคกว้างกว่า และแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิสูงกว่าเซรามิก BT โดยเซรามิกที่ยกตัวอย่างประกอบทั้ง 2 ชนิดเป็นเซรามิกที่นิยมนำมาทำเป็นตัวเก็บประจุในปัจจุบัน โดยแนวทางในการพัฒนาจะเป็นลักษณะของการปรับปรุงสมบัติไดอิเล็กทริก และควบคุมอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส โดยการเจือหรือทำสารละลายของแข็ง ดังแสดงรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิก $(1-x)\text{PNN}-x\text{PZT}$

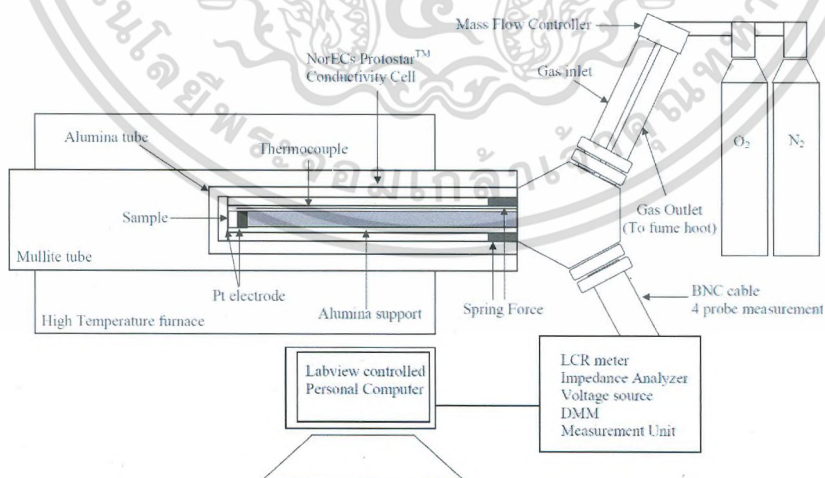
ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 แสดงการควบคุมสมบัติไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสโดยการควบคุมปริมาณสารเจือจากที่เติบล่าจะเห็นได้ว่าการทราบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟสในวัสดุไดอิเล็กทริกมีความสำคัญอย่างมากในการเข้าใจ ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของวัสดุ ซึ่งจะเป็พื้นฐานในการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุไดอิเล็กทริก ปัจจุบันในงานการเรียนการสอน ชุดวัดไดอิเล็กทริกสำหรับการเรียนการสอนวัสดุศาสตร์ จะถูกประกอบขึ้นอย่างง่ายตามอุปกรณ์ที่มี ดังรูปที่ 2.6 โดยเป็นการวัดค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิ โดยแช่เซรามิกในซิลิโคนเหลวแล้วให้ความร้อนแก่ซิลิโคนเหลวผ่านเตาไฟฟ้า (Hotplate) ทำให้สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัดไม่เกิน 150 °C และการควบคุมอุณหภูมิทำได้ยากมาก ส่งผลให้ค่าที่วัดออกมาได้เกิดความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 2.6 แสดงชุดวัดค่าความจุไฟฟ้าอย่างง่ายที่สามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้

การที่จะได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำนั้นจำเป็นต้องมีชุดวัดที่มีประสิทธิภาพ โดยระบบชุดวัดที่มีประสิทธิภาพนั้นแสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งมีประสิทธิภาพที่สูง แต่มีราคาสูง



รูปที่ 2.7 แสดงชุดวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับเตาให้ความร้อนอุณหภูมิสูงและสามารถควบคุมบรรยากาศการวัดได้

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องจัดซื้ออุปกรณ์ที่จำเป็น
2. ออกแบบชุดยึดจับชิ้นงานโดยใช้แรงกลจากชุดสปริงค์เป็นตัวยึด
3. ทำต้นแบบ(case mold) ด้วยปูนปลาสเตอร์ สำหรับชุดยึดจับชิ้นงาน
4. หล่อแบบ working mold สำหรับชุดจับชิ้นงาน
5. หล่อแบบชิ้นงานด้วยน้ำสลิปอลูมิน่าความบริสุทธิ์สูงจาก working mold
6. เผาชุดยึดจับชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง
7. ทดสอบความแข็งแรงของชุดยึดจับชิ้นงาน
8. ติดตั้งสายตัวนำ (ลวดแพลตินัม) และ ขั้วไฟฟ้า (แพลตินัม) เข้ากับชุดยึดจับชิ้นงาน
9. ทดสอบการนำไฟฟ้าของชุดยึดจับชิ้นงาน
10. ออกแบบเตาเผาให้ความร้อน
11. สร้างชุดเตาเผาให้ความร้อน ใช้ขดลวดไฟฟ้าแบบ โมลิบดีนัม
12. ติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิ และติดตั้งเทอร์โมคัปเบิลเพื่อวัดอุณหภูมิ
13. ทดสอบชุดควบคุมอุณหภูมิ และ ตรวจสอบความถูกต้องของอุณหภูมิ
14. ติดตั้งชุดยึดจับชิ้นงานเข้ากับเตาเผาควบคุมอุณหภูมิ
15. ทดสอบความสามารถในการทำความร้อนของชุดยึดจับชิ้นงาน
16. เชื่อมต่อชุดวัดเข้ากับเครื่อง LCR meter
17. ทดลองวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจากตัวอย่างที่ทราบค่า และ ทดลองวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ
18. ตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดหากมี
19. ออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับชุดวัดให้ทำการวัดต่อเนื่องโดยสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ในการวัดได้
20. ทดสอบซอฟต์แวร์และแก้ไขหากมีข้อผิดพลาด

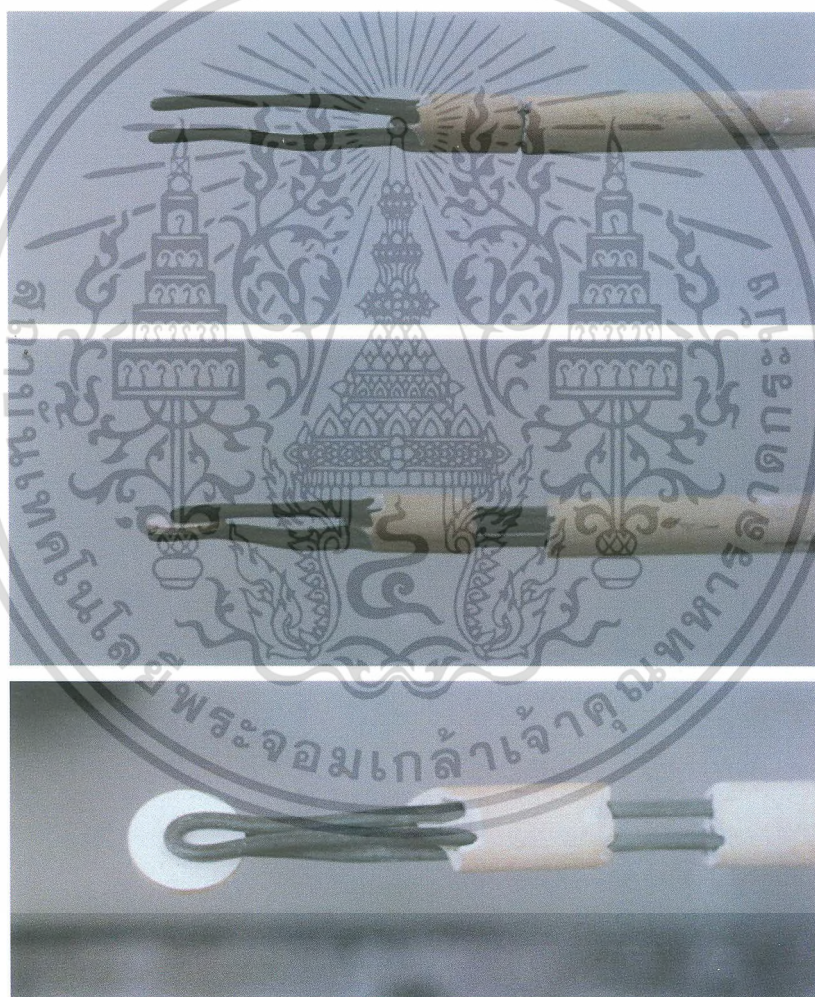
เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในบทนี้จะรายงานถึงการจัดสร้างชุดวัดสมบัติทางไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิขนาดเล็ก ซึ่งจะแสดงให้เห็นเป็นขั้นตอนผ่านการบรรยายทางรูปภาพ ในหัวข้อที่ 4.1 การใช้งานโปรแกรมและหน้าจอแสดงผลในหัวข้อที่ 4.2 และแสดงผลของการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกจากชุดวัดไดอิเล็กทริกที่จัดทำขึ้น ในหัวข้อที่ 4.3

4.1 ขั้นตอนและความก้าวหน้าของการจัดสร้างชุดวัดสมบัติทางไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิขนาดเล็ก

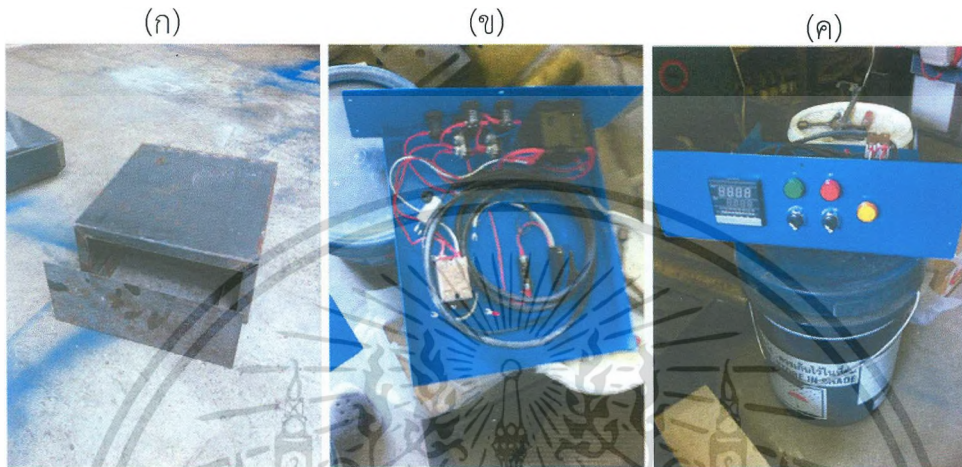
1. ออกแบบจัดสร้างชุดจับชิ้นงาน เพื่อเป็นที่ยึดชิ้นงานไว้ขณะทำการวัด แสดงดังรูปที่ 4.1



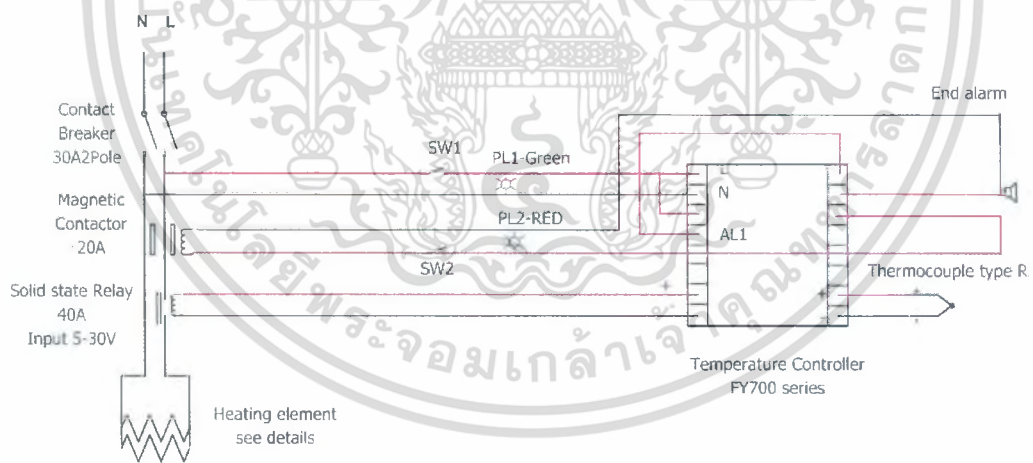
รูปที่ 4.1 แสดงชุดจับชิ้นงานเซรามิก

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จัดสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิ โดยให้โครงสร้างหลักเป็นเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) และทำการเชื่อมต่อสายไฟกับชุดโปรแกรมควบคุมและชุดแจ้งสถานะของเตาดังรูปที่ 4.2 (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยแสดงการต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์การอ่านอุณหภูมิในลักษณะของแผนภาพดังรูปที่ 4.3



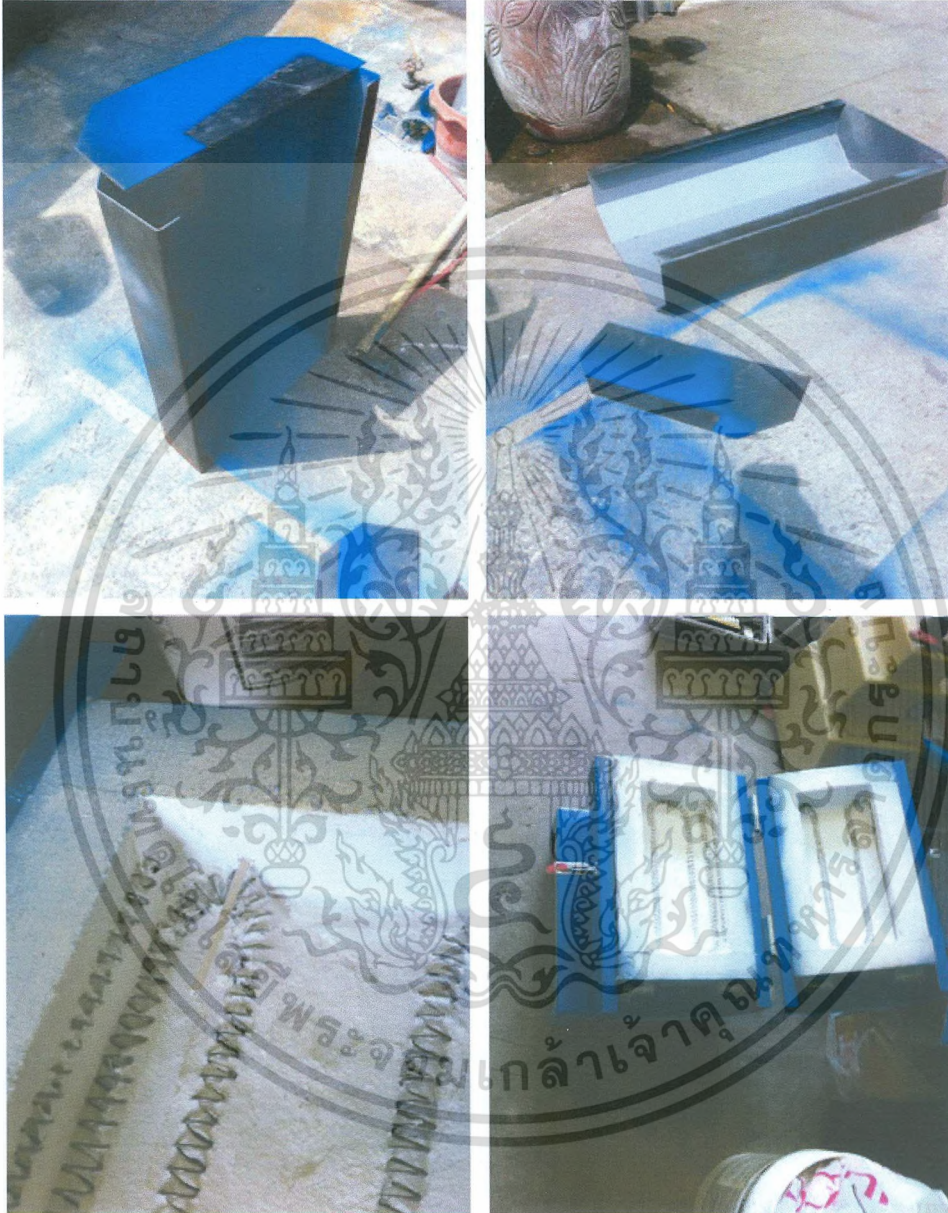
รูปที่ 4.2 แสดงการจัดสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผา



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าและชุดควบคุมและอุปกรณ์อ่านอุณหภูมิ

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ออกแบบ และจัดสร้างเตาเผา อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้ 1200°C โดยใช้ไส้เตาเป็นขดลวดนิโครม และ ออกแบบเตาให้เป็นลักษณะแบบเตาท่อที่ทำจากเซรามิก แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการสร้างเตาเผาแบบท่อโดยใช้ขดลวดนิโครม

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการทดสอบการขึ้นลงอุณหภูมิในแต่ละช่วงของเตา แสดงผลดังตารางที่ 4.1

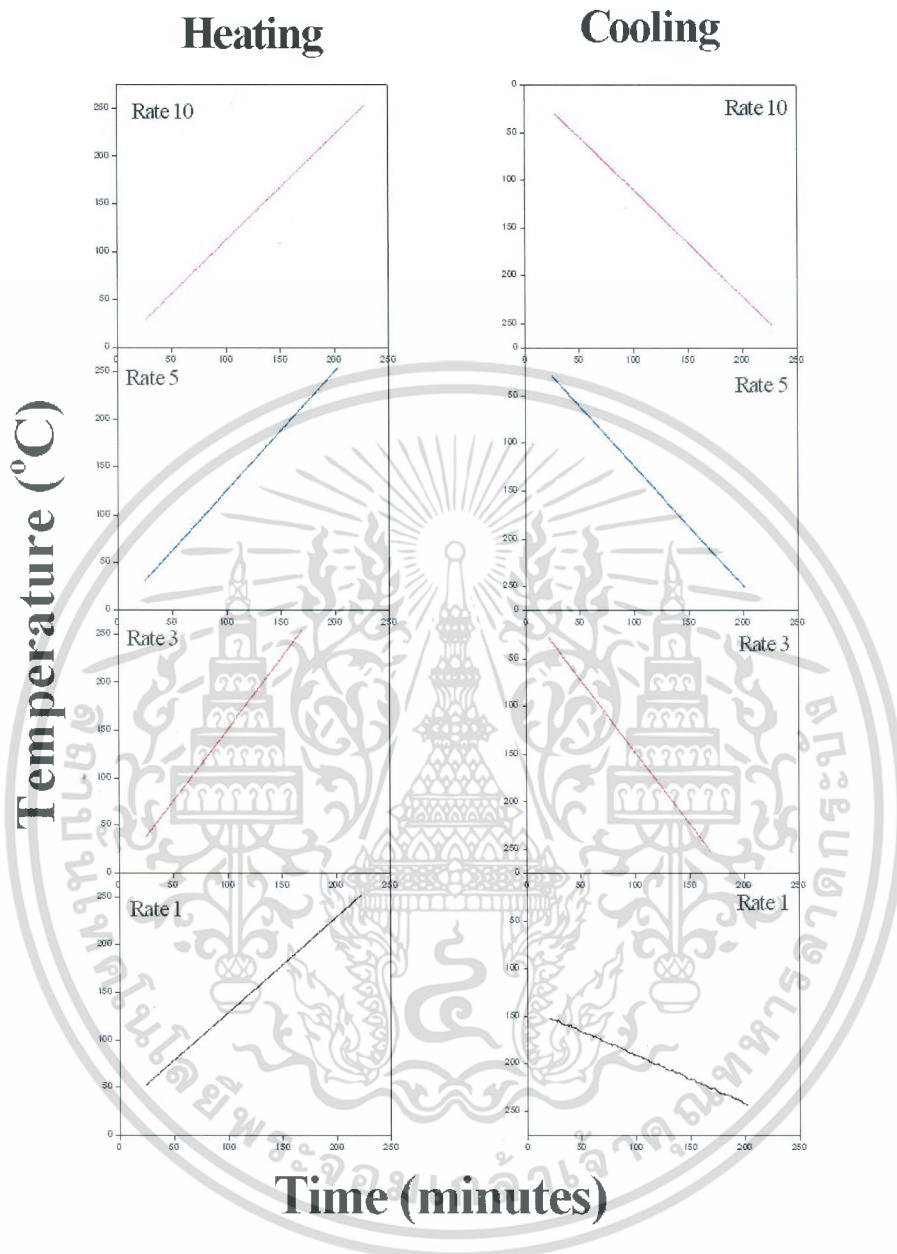
ตารางที่ 4.1 แสดงการขึ้นลงของอุณหภูมิเพื่อทดสอบความแม่นยำของอุณหภูมิภายในเตาและค่าที่อ่านได้

ค่าที่อ่าน	เวลาที่อ่าน	อุณหภูมิของเตา	อุณหภูมิในท่อ	note
295	15 : 01	295	295	
400	15 : 06	550	400	
450	15 : 09	610	450	
500	15 : 10	691	500	
550	15 : 11	710	550	
600	15 : 13	755	600	
650	15 : 14	800	650	
700	15 : 15	839	700	
750	15 : 16	880	750	
800	15 : 17	923	800	
850	15 : 19	968	850	
900	15 : 20	1010	900	
950	15 : 22	1053	950	
1000	15 : 24	1095	1000	
1050	15 : 28	1100	1050	output 10-20%
1100	15 : 50	1100	1067	Out 10-20%

5. ทำการตรวจสอบผลของอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกโดยทดสอบดังนี้

- i. อัตราการขึ้นลง $1^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$
 - ii. อัตราการขึ้นลง $3^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$
 - iii. อัตราการขึ้นลง $5^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$
 - iv. อัตราการขึ้นลง $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$
- โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.5

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการขึ้นลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา

ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ตั้งไว้ผ่านโปรแกรม สรุปออกมาเป็นค่าความผิดพลาดแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเมื่อพิจารณาตามค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้แล้ว พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการตั้งค่าอัตราการขึ้นและลงของอุณหภูมิอยู่ในช่วงอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 และ 3 °C ต่อ นาที

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทรัพย์สินใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิระหว่างค่าจากโปรแกรมและค่าที่วัดได้จริงจากเครื่องได้อิเล็กทริก

ค่าจากโปรแกรม (°C/นาที)	ค่าที่ได้จากการวัด			
	อัตราการขึ้นของอุณหภูมิ	ความผิดพลาด (%)	อัตราการลงของอุณหภูมิ	ความผิดพลาด (%)
1	1.00	0.00	0.85	17.65
3	2.55	17.65	2.50	20.00
5	2.45	104.08	2.27	120.26
10	2.41	314.94	2.12	371.69

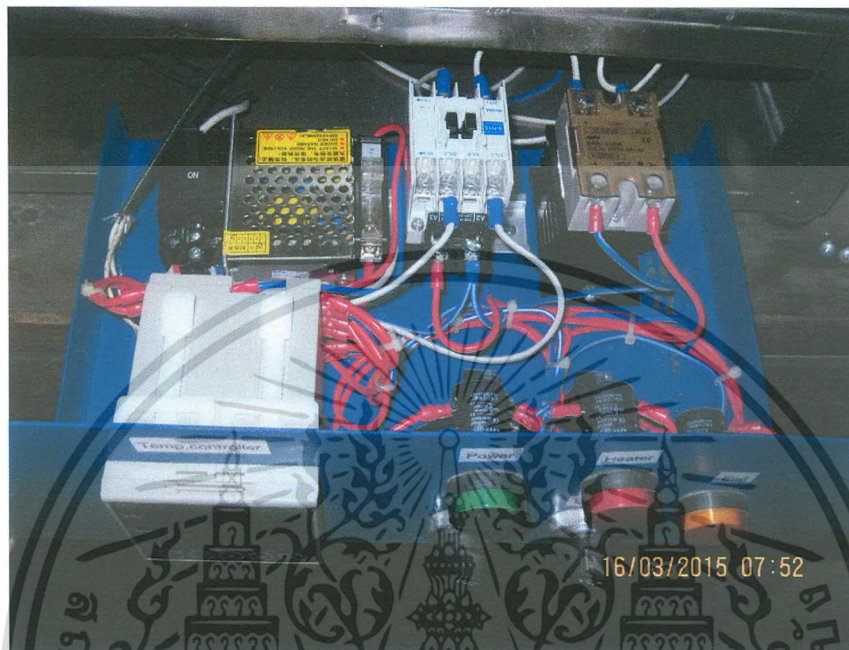
6. ทำการตรวจสอบระยะที่เหมาะสมที่จะวางชิ้นงานโดยวัดห่างจากขอบปลายต่อเข้าไป ทุกๆ 10 cm
7. ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมชุดวัด LCR meter
8. ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ
9. ติดตั้งเตาเผาแบบท่อที่ผ่านการทดสอบตามหัวข้อที่ 4 และ 5 แล้วเข้ากับส่วนจับชิ้นงาน แสดงการติดตั้งดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การติดตั้งเตาเผาแบบท่อเข้ากับส่วนจับชิ้นงาน

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ทำการติดตั้งชุดโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเข้ากับแผงวงจรไฟฟ้าสำหรับการใช้งานจริง พร้อมเชื่อมต่อกับ ส่วนปิด-เปิดการใช้งานและส่วนแสดงสถานะของเครื่องมือ แสดงดังรูปที่ 4.7



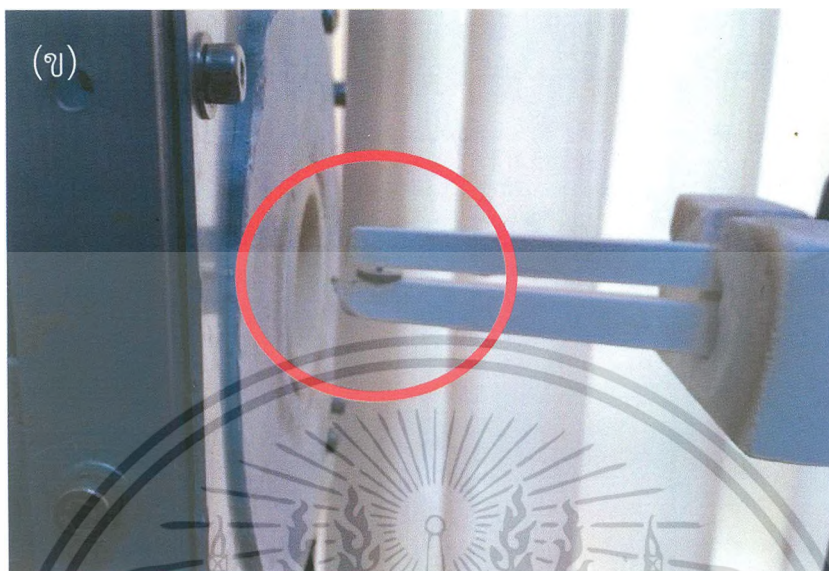
รูปที่ 4.7 การติดตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเข้ากับแผงวงจรการใช้งานจริง

11. ทำการปรับปรุงชุดจับชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเพื่อหลีกเลี่ยงพร้อมกบลดภาวะของการกัดอัดและบิ่นแน่นชิ้นงานของตัวจับแบบเก่า แสดงการเปรียบเทียบตัวจับชิ้นงานแบบเก่าและตัวจับชิ้นงานแบบใหม่ดังรูปที่ 4.8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

(ก)



ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทรัพย์สินใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (ก) ตัวจับชิ้นงานแบบเก่า และ (ข) ตัวจับชิ้นงานแบบใหม่ที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว

12. ปรับปรุงโปรแกรมควบคุมชุดวัด LCR meter และจอแสดงผล ซึ่งแสดงหน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จพร้อมใช้งาน ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงหน้าต่างโปรแกรมควบคุมชุดวัด LCR meter บนจอแสดงผล

การนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

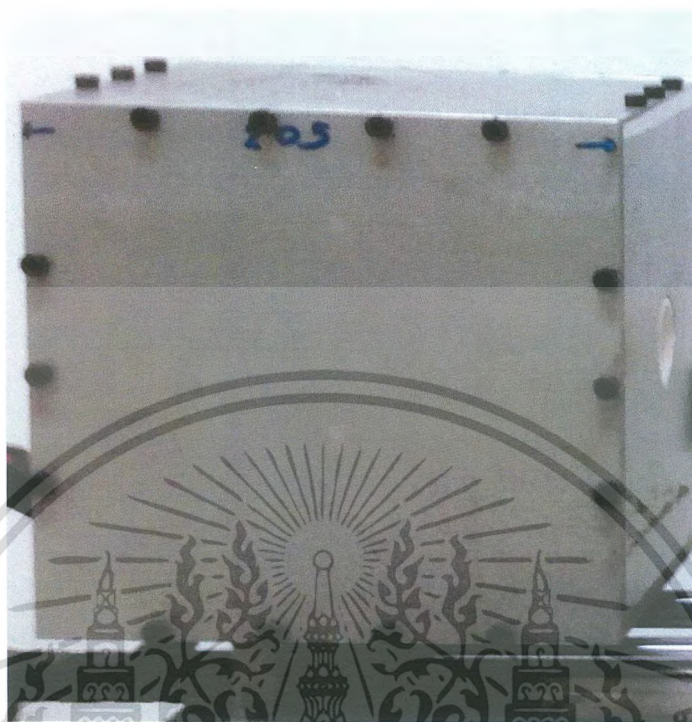
13. ทำการปรับปรุงชุดเตาให้ความร้อน

เนื่องจากชุดเตาให้ความร้อนแบบท่อที่ทำการสร้างสร้างขึ้นเดิม (รูปที่ 4.6) เมื่อพิจารณาจากการนำไปใช้งานจริงหลายครั้ง พบปัญหาในการใช้งาน แบ่งเป็น 2 ประเด็น กล่าวคือ ในส่วนของฝาครอบเตาซึ่งออกแบบเป็นรูปทรงกระบอกอาจพบการสูญเสียออกของความร้อนในขณะวัด เนื่องมาจากรอยต่อของขอบที่ทับกันไม่สนิทพอดี ทำให้อุณหภูมิภายในเตาที่วัดได้กับที่ตั้งไว้ในชุดควบคุมไม่เท่ากัน อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในส่วนของผลการวัดได้ อีกทั้ง ชุดเตาให้ความร้อนในรูปแบบเดิมนั้นมีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น จะทำให้ประสบปัญหาในส่วนของขั้นตอนในการขนย้าย รวมไปถึงความไม่สวยงามของรูปลักษณ์ภายนอก ดังนั้น คณะวิจัยจึงได้ทำการแก้ไขและปรับปรุงชุดเตาให้ความร้อนโดยเริ่มจากการลดขนาดของชุดเตาให้ความร้อนลงให้มีขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งาน และพยายามป้องกันการสูญเสียออกของความร้อนขณะทำการวัด โดยย่อขนาดตัวเตาให้ความร้อนชนิดท่อให้มีขนาดเล็กลงแล้วบรรจุเข้าไปในกล่องสี่เหลี่ยมที่ทำจากอะลูมินา ทำการปิดล็อกให้สนิท จากนั้นนำมาประกบด้วยแผ่นอะลูมินาแผ่นใหญ่ที่ปลายทั้งสองด้าน เพิ่มเติมด้วยการใส่สำลีเพื่อเป็นการควบคุมสภาวะสภาวะทางความร้อนและอุณหภูมิให้คงที่ขณะทำการวัด แสดงส่วนของชุดเตาแบบปรับปรุงใหม่ในรูปที่ 10 จากนั้นทำการปรับปรุงในส่วนของรอยต่อขอบให้มีความมิดชิดและแนบสนิทพอดี โดยทำส่วนฝาครอบของชุดเตาให้เป็นแผ่นเหล็กรูปทรงสี่เหลี่ยมทดแทนรูปทรงกระบอกตามแบบเดิม แล้วยึดกันไว้ด้วยน็อตเกลียวด้านละ 14 ตัว เป็นการป้องกันการสูญเสียออกของความร้อนในขั้นสุดท้าย แสดงรูปลักษณ์ภายนอกของชุดเตาให้ความร้อนที่ผ่านการปิดด้วยแผ่นเหล็กแล้วตั้งรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 ลักษณะของชุดเตาให้ความร้อนซึ่งผ่านการปิดป้องกันการสูญเสียออกของความร้อนด้วยแผ่นอะลูมินาและอะลูมินาไฟเบอร์

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ลักษณะภายนอกของชุดเตาให้ความร้อนที่ผ่านการปิดทับทั้งสี่ด้านด้วยแผ่นเหล็ก

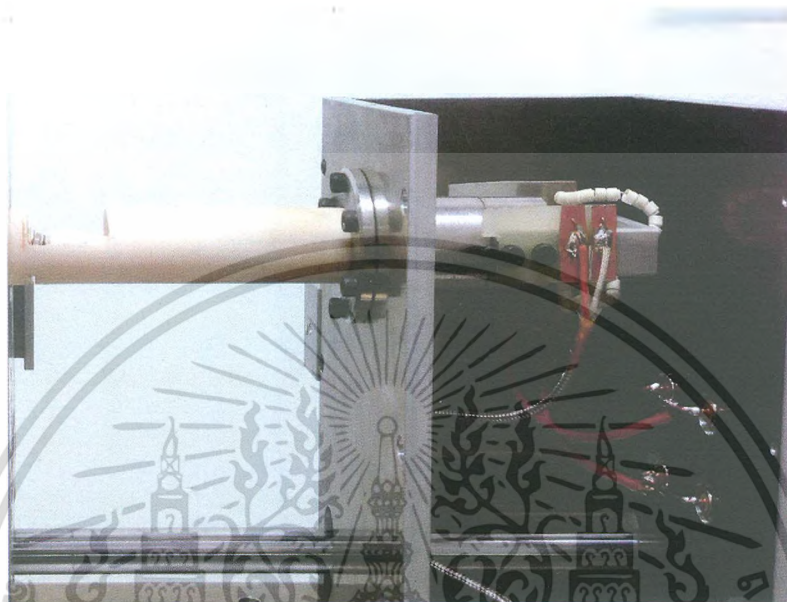
14. ทำชุดจับชิ้นงานขึ้นใหม่ให้มีขนาดและรูปทรงเหมาะสมกับชุดเตาให้ความร้อน โดยภายนอกมีลักษณะเป็นท่อรูปทรงกระบอก ภายในเป็นช่องโพร่งและมีแท่งอะลูมินาสำหรับยึดชิ้นงานให้ติดแน่นขณะทำการวัด แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ชุดจับชิ้นงานรูปทรงแบบท่อที่ผ่านการปรับปรุงให้เหมาะสมกับขนาดของชุดเตาให้ความร้อนขนาดเล็ก

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ทำการประกอบชุดจับตัวอย่างแบบท่อเข้ากับชุดเชื่อมต่อเข้ากับเครื่อง LCR meter แสดงลักษณะภายในทางด้านข้างและด้านบน หลังจากผ่านการประกอบเข้ากันเรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



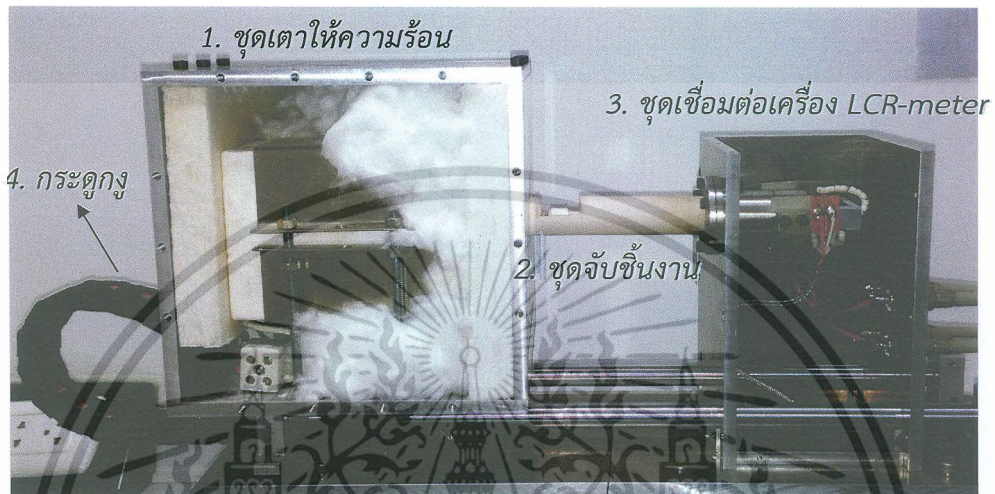
รูปที่ 4.13 (ก) ลักษณะภายในทางด้านข้างของการประกอบชุดจับชิ้นงานแบบท่อเข้ากับชุดเชื่อมต่อกับเครื่อง LCR meter



รูปที่ 4.13 (ข) ลักษณะภายในจากรูปถ่ายด้านบนของชุดเชื่อมต่อกับเครื่อง LCR meter

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. ทำการประกอบชุดเตาให้ความร้อน (จากข้อ 4.13) ชุดจับชิ้นงานและชุดเชื่อมต่อเครื่อง LCR meter (จากข้อ 4.14 และ 4.15) เข้ากับชุดสายพานและแท่งเหล็กเพื่อใช้เป็นรางเลื่อน เพื่อให้ชุดเตาให้ความร้อนสามารถเคลื่อนที่เข้าหาและปิดชุดจับชิ้นงานได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) และแสดงลักษณะภายนอกเมื่อเลื่อนชุดเตาให้ความร้อนเข้าหาชุดจับชิ้นงานดังรูปที่ 4.14 (ข)



รูปที่ 4.14 (ก) แสดงลักษณะการประกอบชุดเตาให้ความร้อน ชุดจับชิ้นงานและชุดเชื่อมต่อเครื่อง LCR meter เข้าด้วยกันโดยใช้สายพานและแท่งเหล็กเพื่อเป็นรางเลื่อน



รูปที่ 4.14 (ข) ลักษณะภายนอกเมื่อเคลื่อนชุดเตาให้ความร้อนเข้าหาชุดจับชิ้นงาน

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. ประกอบชุดเตาให้ความร้อนพร้อมชุดจับชิ้นงาน และชุดเชื่อมต่อเครื่อง LCR meter (จากข้อที่ 4.14) เข้ากับฐานของชุดวัดไดอิเล็กทริก โดยด้านในฐานของชุดวัดไดอิเล็กทริกนี้จะประกอบไปด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control) คอมพิวเตอร์และจอแสดงผล แสดงดังรูปที่ 4.15 (ก) โดยหน้าจอแสดงผลสำหรับชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control) ถูกนำไปติดตั้งไว้ทางด้านหลังของเครื่อง แสดงดังรูปที่ 4.15 (ข)



รูปที่ 4.15 (ก) การประกอบชุดเตาให้ความร้อนพร้อมชุดจับชิ้นงานและชุดเชื่อมต่อเครื่อง LCR meter เข้ากับฐานของชุดวัดไดอิเล็กทริก

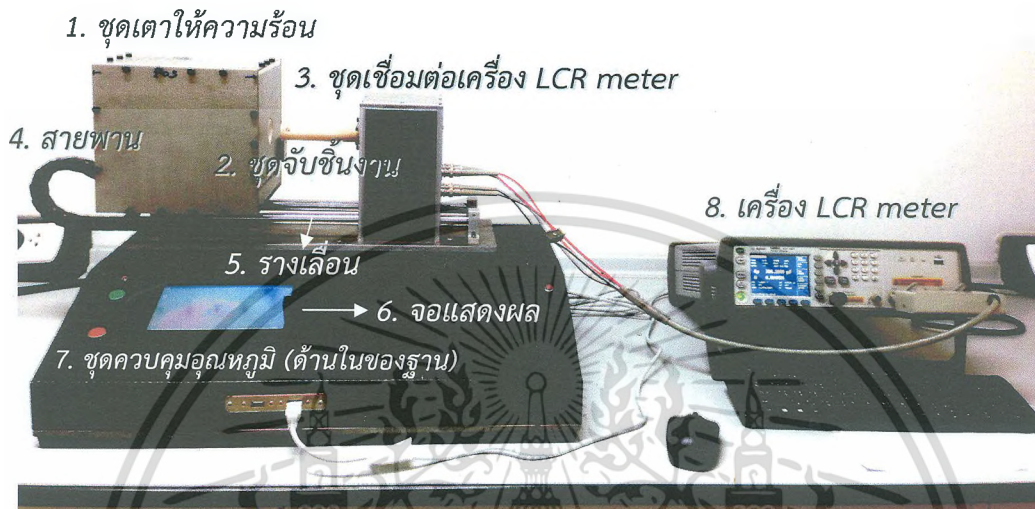
ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 (ข) หน้าจอแสดงผลสำหรับชุดควบคุมอุณหภูมิและแผงวงจรไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างชุดควบคุมอุณหภูมิกับเตาให้ความร้อน

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. ทำการประกอบส่วนประกอบทั้งหมดจากข้อที่ 4.17 เข้ากับเครื่อง LCR meter ได้ชุดวัดไดอิเล็กทริกที่สมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 4.16

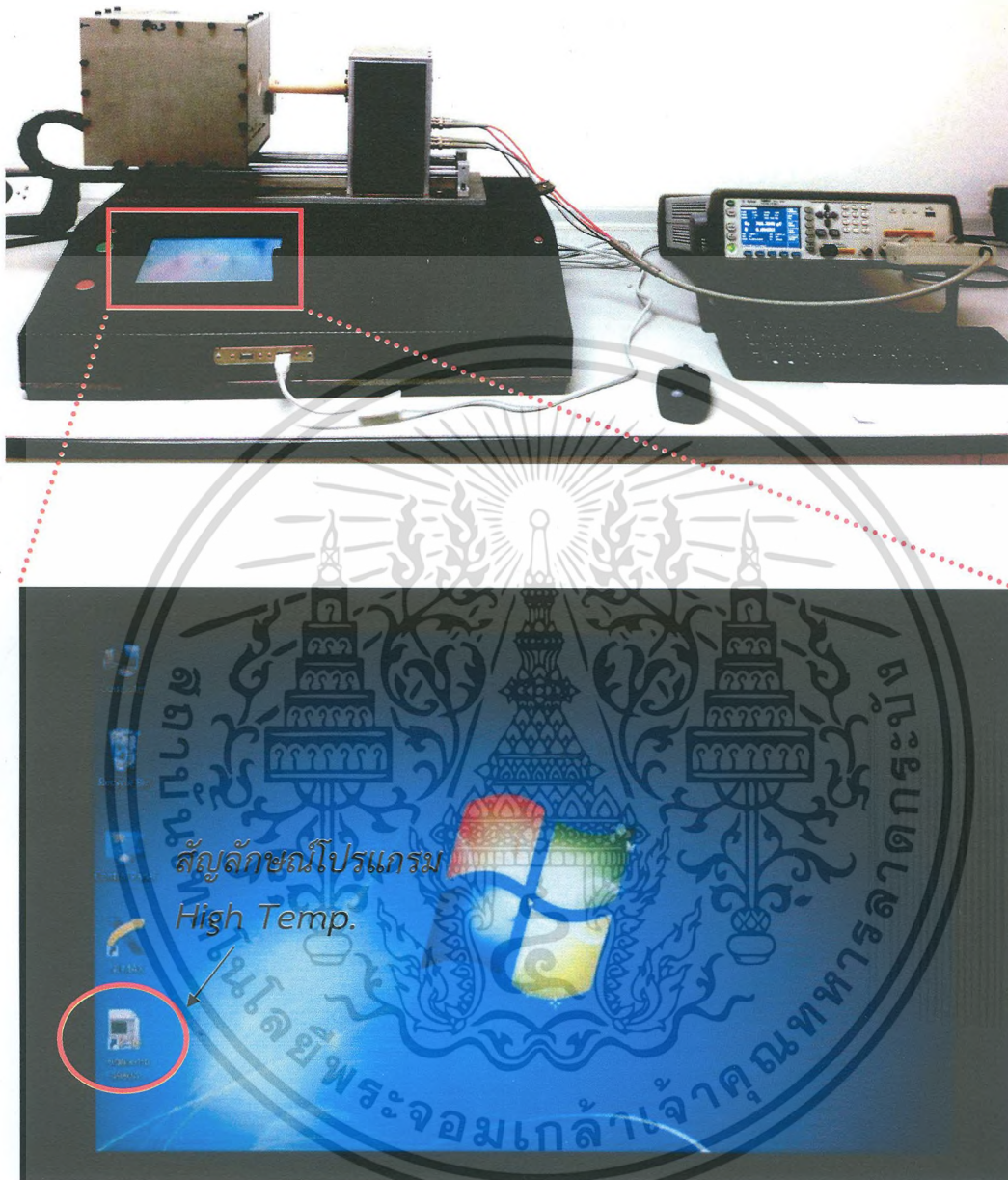


รูปที่ 4.16 ส่วนประกอบของชุดวัดไดอิเล็กทริกที่เสร็จสมบูรณ์

4.2 การใช้งานโปรแกรมและหน้าจอแสดงผล

ในส่วนของการวัดชิ้นงาน จะต้องทำการวัดผ่านโปรแกรมสั่งงาน ซึ่งจะปรากฏขึ้นบนหน้าจอแสดงผลเมื่อเราทำการเปิดคอมพิวเตอร์ ซึ่งในที่นี้จะใช้โปรแกรมที่มีชื่อว่า High Temp. มีลักษณะสัญลักษณ์เป็นรูปกระดาษพับมุ่ม (วงกลมสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 4.17

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



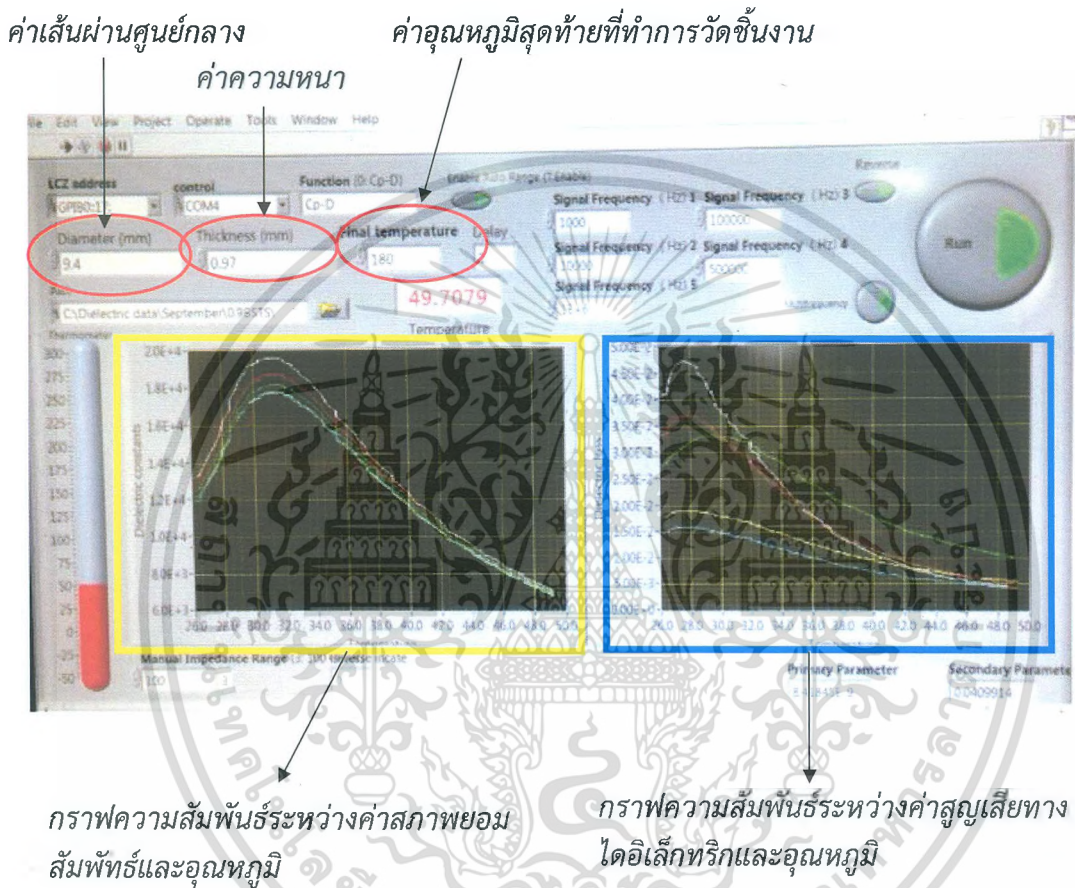
รูปที่ 4.17 แสดงสัญลักษณ์ของโปรแกรม High Temp. บนหน้าจอแสดงผล

จากนั้นเมื่อทำการเข้าโปรแกรมไปแล้วจะพบกับหน้าจอการใช้งานจริงของโปรแกรม ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ผู้ใช้งานต้องทราบข้อมูลที่แม่นยำ และป้อนลงไปในโปรแกรมก่อนทำการวัดชิ้นงาน ดังนี้

1. ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (diameter; mm)
2. ค่าความหนาของชิ้นงาน (Thickness; mm)
3. ค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่จะทำการวัด (Final Temperature; °C)

การนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทรัพย์สินใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงลักษณะหน้าจอแสดงผลและพารามิเตอร์ที่สำคัญดังกล่าวของโปรแกรมในการใช้งานจริงดังรูปที่ 18 และเมื่อทำการวัดชิ้นงานจริง หน้าจอแสดงผลจะปรากฏกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Dielectric permittivity) กับอุณหภูมิ (กรอบสีเขียว) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) กับอุณหภูมิ (กรอบสีฟ้า) ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 หน้าจอแสดงผลเมื่อเข้าโปรแกรม High Temp. และพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องป้อนลงในโปรแกรมก่อนการวัดชิ้นงาน

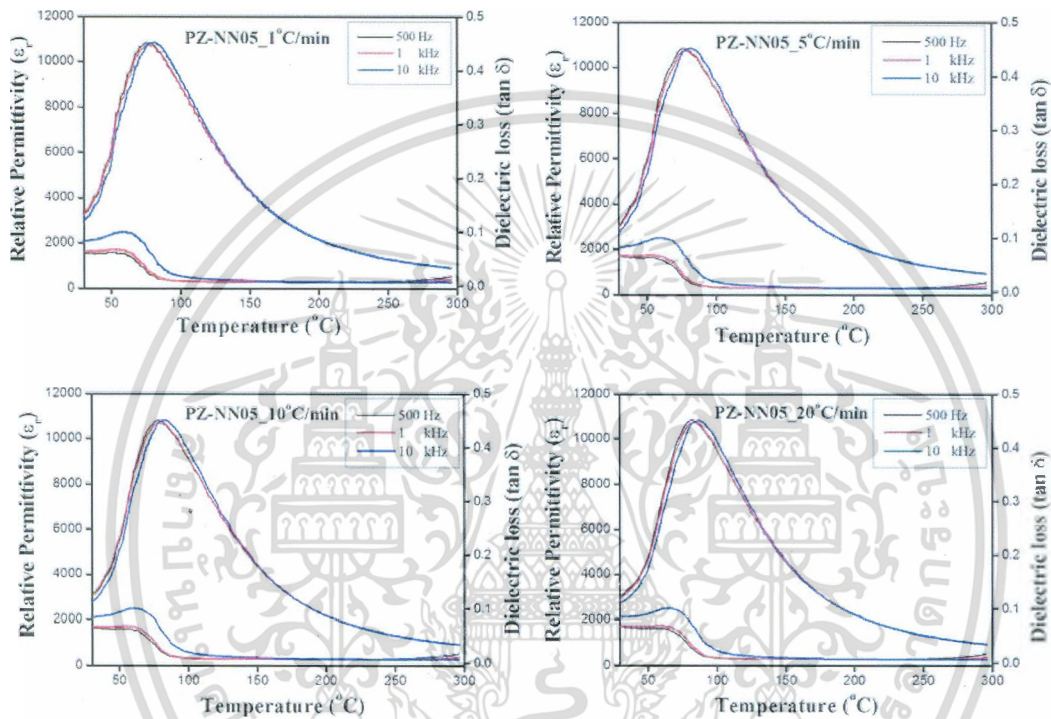
4.3 ผลของการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกจากชุดวัดไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้น

เมื่อคณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างเครื่องวัดไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิขนาดเล็กนี้อย่างสมบูรณ์แล้ว คณะนักวิจัยได้ทำการทดสอบความแม่นยำของค่าที่ได้จากการวัดชิ้นงานผ่านเครื่องที่สร้างขึ้นนี้แล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากชิ้นงานมาตรฐาน ได้ผลเรียงตามลำดับ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มั่วว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 $(1-x)\text{PbZrO}_3$ - $(x)\text{NiNbO}_3$; PZ-NN ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.05$

ทำการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวอย่างมาตรฐาน PZ-NN โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 5 10 และ 20 °C/นาที พบว่าพิกัดแสดงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ แสดงผลดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิของสารตัวอย่างมาตรฐาน PZ-NN โดยทำการวัดที่อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 5 10 และ 20 °C/นาที

จากนั้นนำผลอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_c) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity (ϵ_r)) ที่วัดได้จากเครื่องวัดไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นมาทำการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของเซรามิกในระบบ PZ-NN แสดงผลดังตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 และ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ฉะนั้นในการวัดครั้งนี้ การตั้งค่าอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิไว้ที่ 1 และ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นค่าที่ให้ผลได้ถูกต้องและแม่นยำมากกว่าการตั้งค่าอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิไว้ที่ 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

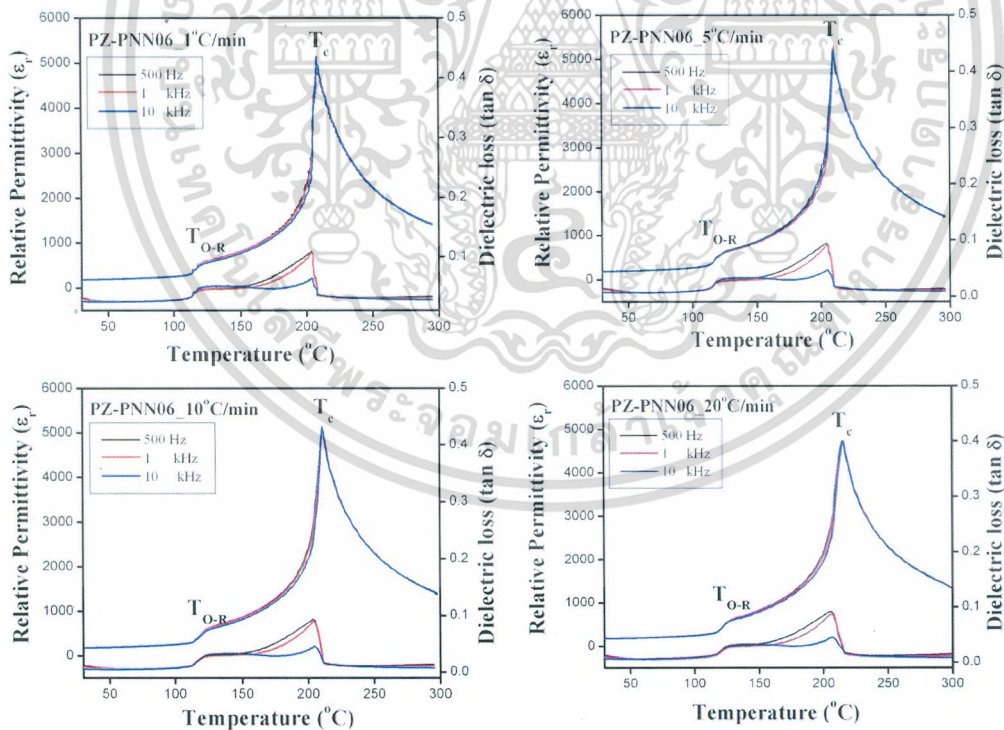
ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_c) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity (ϵ_r)) ระหว่างวัสดุ PZ-NN05 มาตรฐานจากแหล่งอ้างอิง และจากตัวอย่าง PZ-NN05 ที่วัดได้จากเครื่องไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ

Samples: conditions	Curie temperature (T_c)	%error	Relative permittivity (ϵ_r)	%error
PZ-NN05 (reference)	79.1	-	10,966	-
PZ-NN05 : 1°C/min	78.9	0.25	10,813	1.41
PZ-NN05 : 5°C/min	79.2	0.13	10,757	1.94
PZ-NN05 : 10°C/min	80.6	1.86	10,700	2.49
PZ-NN05 : 20°C/min	84.4	6.28	10,676	2.72

4.3.2 (1-x)PbZrO₃-(x)Pb(Ni_{1/2}Nb_{1/2})O₃; PZ-PNN ที่สัดส่วนองค์ประกอบ x = 0.06

ทำการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของตัวอย่างมาตรฐาน PZ-PNN โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 5 10 และ 20 °C/นาที พบว่าพิกแสดงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ แสดงผลดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิของสารตัวอย่างมาตรฐาน PZ-PNN โดยทำการวัดที่อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 5 10 และ 20 °C ต่อ นาที

กสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำผลอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (T_{O-R}) อุณหภูมิคูรี (T_c) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity (ϵ_r)) ที่วัดได้จากเครื่องวัดไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นมาทำการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของเซรามิกในระบบ PZ-PNN แสดงผลดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าที่ได้จากอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิเท่ากับ 1 และ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ฉะนั้นจากผลการวัดชิ้นงาน PZ-PNN ที่ได้ นั้น แสดงลักษณะผลการวัดที่มีแนวโน้มเป็นไปในลักษณะเดียวกับการวัดชิ้นงานเซรามิก PZ-NN โดยการตั้งค่าอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิไว้ที่ 1 และ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นค่าที่ให้ผลได้ถูกต้องและแม่นยำมากกว่าการตั้งค่าอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิไว้ที่ 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_c) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity (ϵ_r)) ระหว่างวัสดุ PZ-PNN06 มาตรฐานจากแหล่งอ้างอิง และจากตัวอย่าง PZ-NN05 ที่วัดได้จากเครื่องวัดไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ

Samples: conditions	T_{O-R}	%error	T_c	%error	ϵ_r	%error
PZ-PNN06 (reference)	120.9	-	208.1	-	5272	-
PZ-PNN06 : 1 °C/min	121.2	0.25	208.7	0.28	5268	0.08
PZ-PNN06 : 5 °C/min	121.5	0.49	208.9	0.38	5264	0.15
PZ-PNN06 : 10 °C/min	125.7	3.81	211.6	1.65	5108	3.21
PZ-PNN06 : 20 °C/min	127.2	4.95	215.4	3.39	4700	12.17

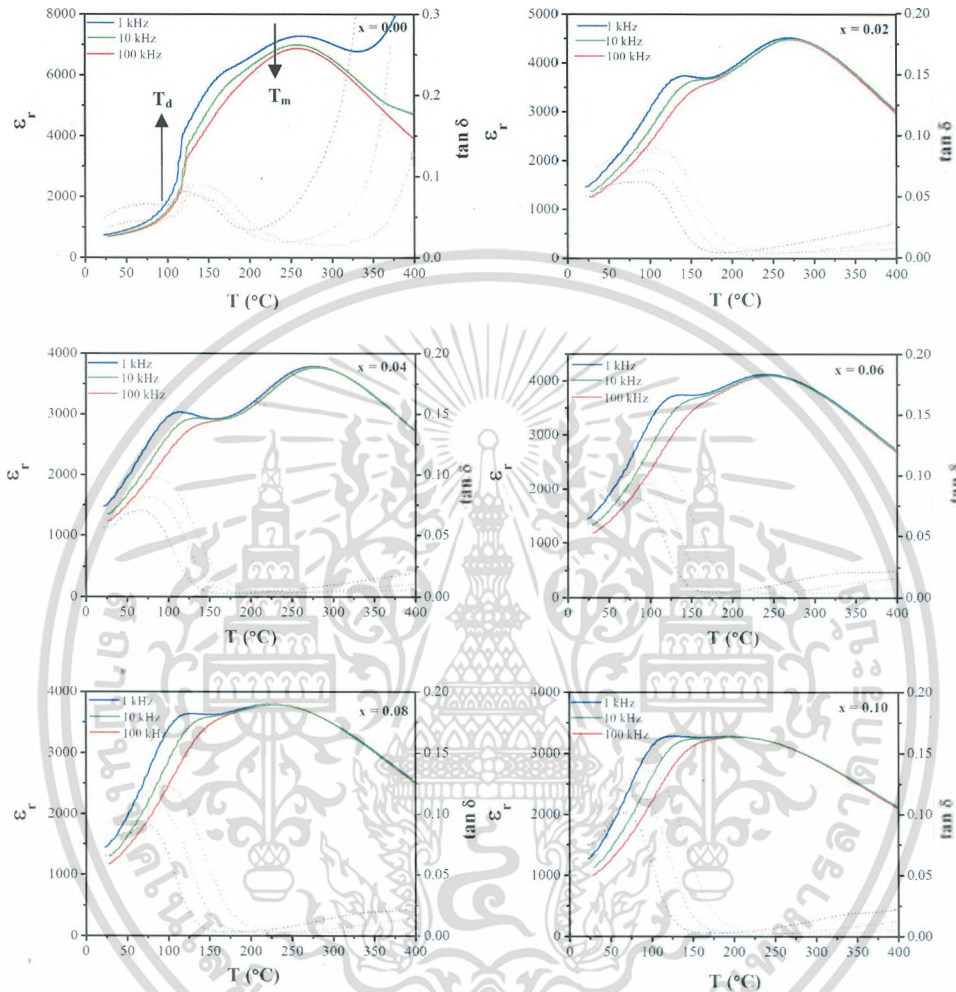
จากการทดสอบการวัดชิ้นงานเซรามิกเทียบกับค่ามาตรฐานเบื้องต้นทำให้ทราบว่า เครื่องวัดไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นมาในงานวิจัยนี้สามารถใช้งานได้จริง ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการวัดชิ้นงานอื่นๆ เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาและพัฒนางานวิจัย

4.3.3 ผลการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกของเซรามิกในระบบ $(1-x)(0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3 - 0.06\text{BaTiO}_3) - x\text{BaSnO}_3$

ได้ทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ 1 10 และ 100 kHz แสดงดังรูปที่ 4.21 เมื่อพิจารณาเซรามิกที่สัดส่วน $x= 0.00$ พบว่ามีพิกที่แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสสองบริเวณคือ บริเวณที่โพลาริเซชันเข้าใกล้ศูนย์ (depolarization temperature ; T_d) คืออุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟอโรอิเล็กทริก (ferroelectric phase) ไปเป็นแอนติเฟอโรอิเล็กทริก (antiferroelectric phase) อีกจุดหนึ่งคืออุณหภูมิที่มีค่าโพลาริเซชันสูงที่สุด (maximum temperature ; T_m) ซึ่งเป็นพิกการเปลี่ยนแปลงเฟสจากแอนติเฟอโรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก (paraelectric phase) ที่สัดส่วน $x= 0.00$ มีค่า T_d และ T_m อยู่ที่ประมาณ 110 และ 252 °C ตามลำดับ ซึ่งที่สัดส่วน $x= 0.02$ ค่าอุณหภูมิ T_d นี้จะลดลงเหลือแต่อุณหภูมิ T_m ที่เพิ่มขึ้นเป็น 260 °C โดยเมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมทินออกไซด์

สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(BaSnO₃) เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนองค์ประกอบที่สัดส่วน $x = 0.04-0.10$ พบว่าพีคการเปลี่ยนแปลงเฟส T_m ค่อยๆเลื่อนตำแหน่งไปทางด้านที่อุณหภูมิต่ำลง



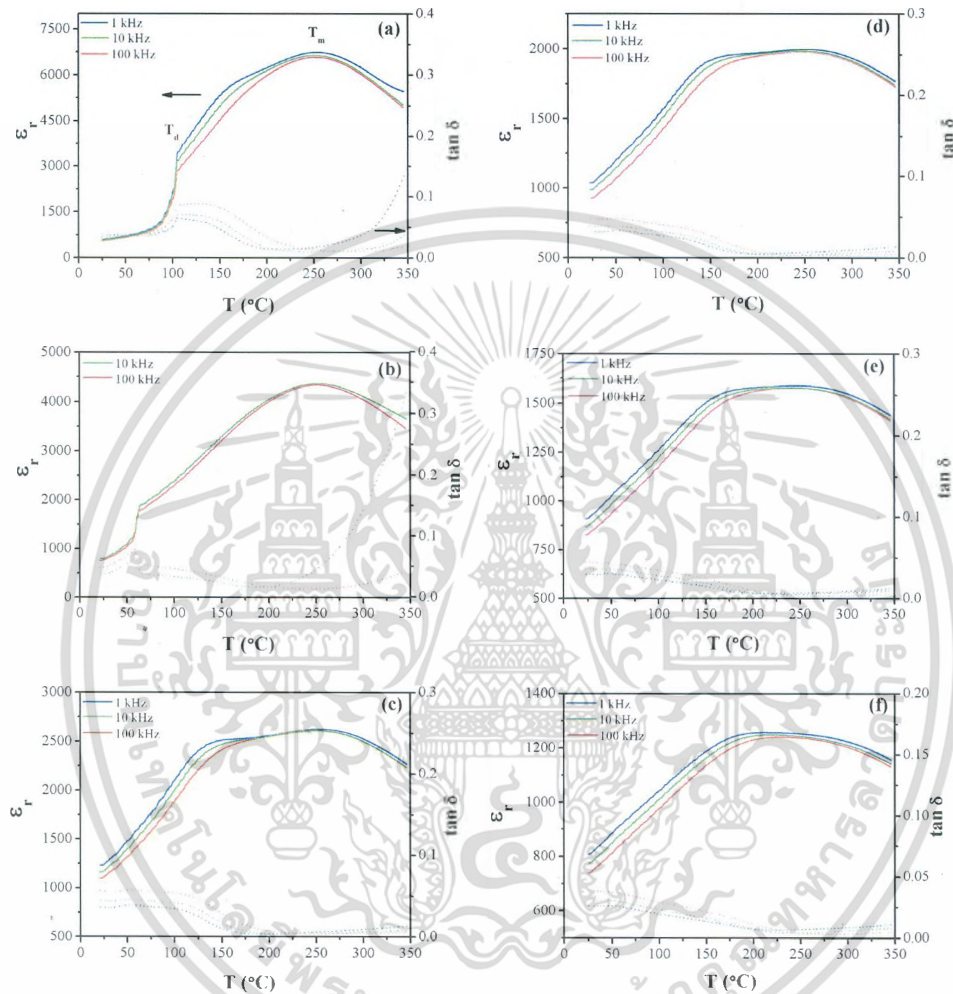
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(1-x)(0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3 - 0.06\text{BaTiO}_3) - x\text{BaSnO}_3$ (1-)

4.3.4 ผลการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกของเซรามิกในระบบ $(1-x)(0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3 - 0.06\text{BaTiO}_3) - x\text{CaSnO}_3$

ได้ทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ 1 10 และ 100 kHz แสดงดังรูปที่ 4.22 เมื่อพิจารณาเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.00$ และ $x = 0.02$ พบว่ามีพีคที่แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสสองบริเวณคือ บริเวณที่โพลาริเซชันเข้าใกล้ศูนย์ (depolarization temperature ; T_d) คืออุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟอโรอิเล็กทริก (ferroelectric phase) ไปเป็นแอนติเฟอโรอิเล็กทริก (anti-ferroelectric phase) อีกจุดหนึ่งคืออุณหภูมิที่มีค่าโพลาริเซชันสูงที่สุด (maximum temperature ; T_m) ซึ่งเป็นพีคการเปลี่ยนแปลงเฟสจากแอนติเฟอโรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก (paraelectric phase) ที่สัดส่วน $x = 0.00$ มีค่า T_d และ T_m อยู่ที่ประมาณ 104 และ 254 °C ตามลำดับ ซึ่ง

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สัดส่วน $x = 0.02$ ค่าทั้งสองนี้จะลดลง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมทินออกไซด์ (CaSnO_3) เพิ่มขึ้นตาม สัดส่วนองค์ประกอบที่สัดส่วน $x = 0.04-0.10$ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสค่อยๆเลื่อนตำแหน่งจากเดิมไป ทางด้านที่อุณหภูมิต่ำลง



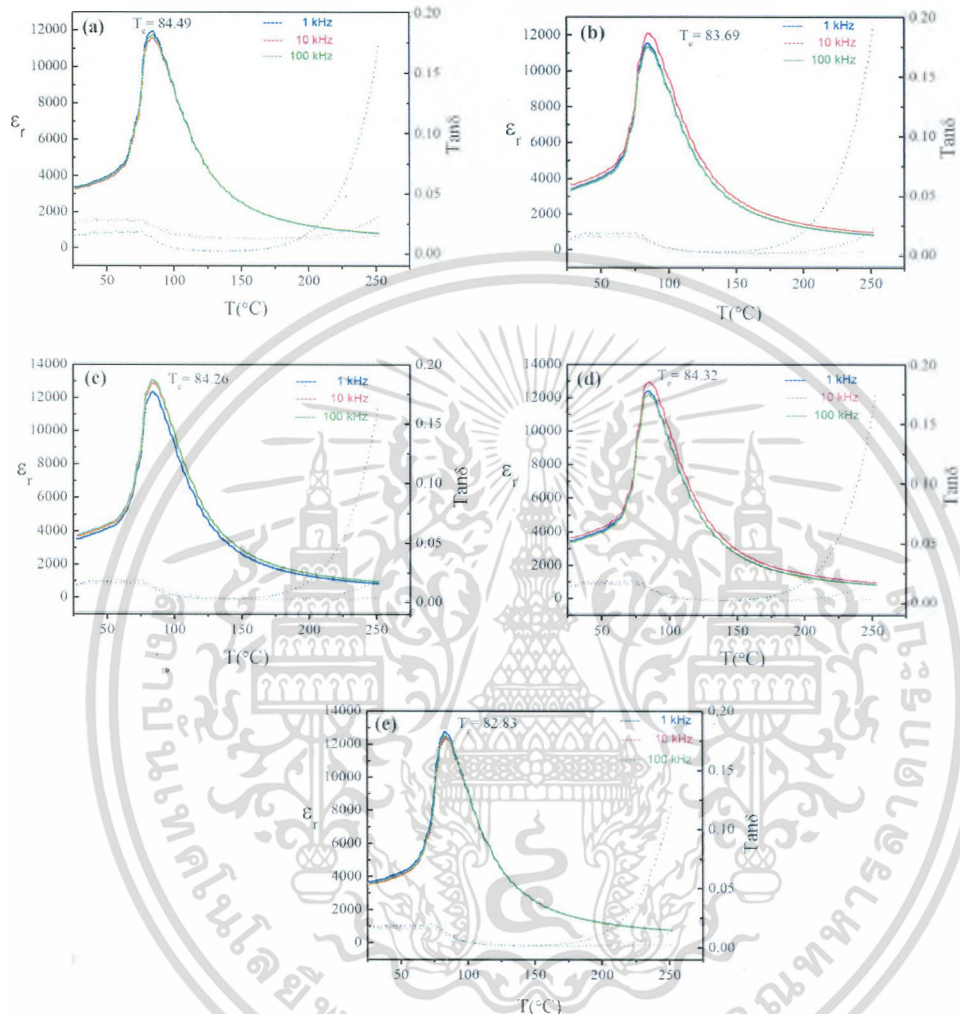
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(1-x)(0.94\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3 - 0.06\text{BaTiO}_3) - x\text{CaSnO}_3$ (1-

4.3.5 ผลการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกของเซรามิกในระบบ $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3 - 50 (\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{TiO}_3$

ได้ทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ 1 10 และ 100 kHz แสดงดังรูปที่ 4.23 เมื่อพิจารณาเซรามิกที่ไม่ได้เผาอบ (Annealing) และที่เวลาการเผาอบ ต่างๆกัน คือ 12 24 48 และ 100 ชั่วโมงพบว่า มีหนึ่งพิกที่แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสหรืออุณหภูมิคูรี ซึ่งคือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก (paraelectric phase) โดยเวลาการเผาอบไม่ได้ส่งผลให้มีการเลื่อนของอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสนี้อย่างมีนัยสำคัญ จากรูปจะเห็นได้ว่ามีอุณหภูมิ อยู่ในช่วง $82-84^\circ\text{C}$ ซึ่งเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการเผาอบ ต่างๆกัน

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทรัพย์สินใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant ; ϵ_r) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 13000



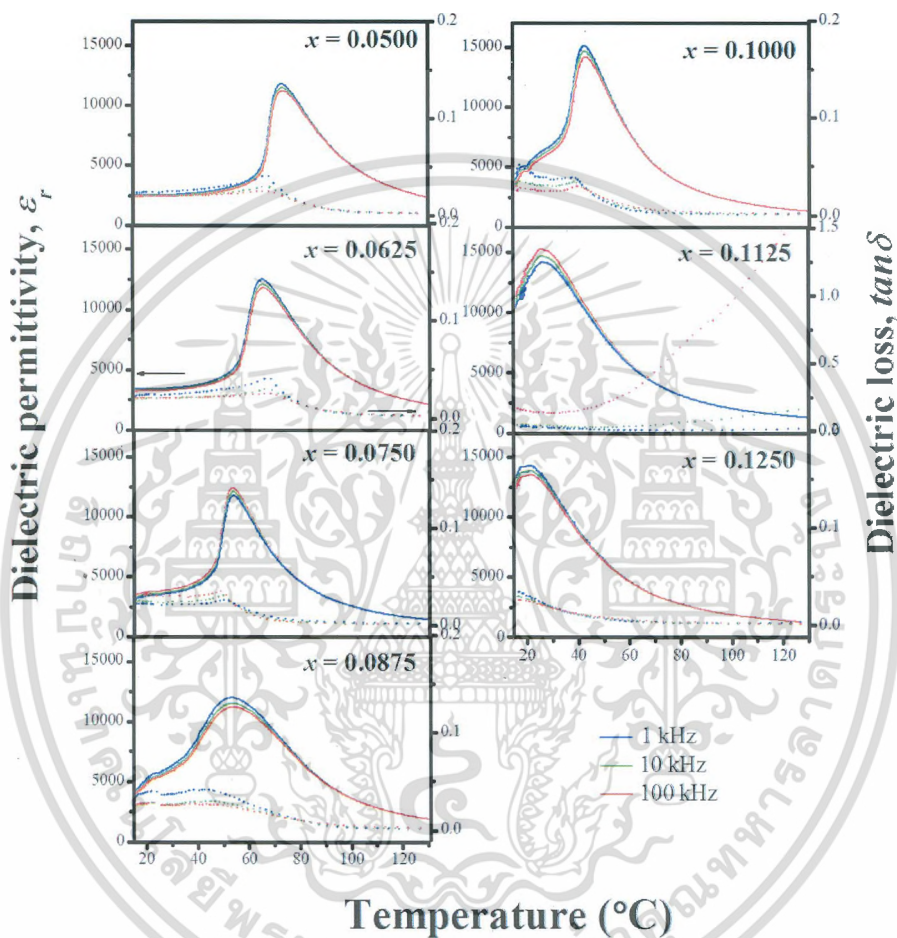
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ -50 $(\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{TiO}_3$ ที่เวลาการเผาอบ (Annealing) (a) ไม่เผาอบ (No annealing) (b) 12 (c) 24 (d) 48 (e) 100 ชั่วโมง

4.3.6 ผลการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกของเซรามิกในระบบ $\text{Ba}_{0.825+x}\text{Ca}_{0.175-x}\text{Ti}_{(1-x)}\text{Sn}_x\text{O}_3$

จากรูปที่ 4.24 ได้ทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ 1 10 และ 100 kHz เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.0500$ และ $x = 0.0625$ จะเห็นได้ว่ามีพีกของอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสเพียงครั้งเดียว จากนั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนองค์ประกอบเป็น $0.0750 \leq x \leq 0.1000$ พบว่ามีพีกการเปลี่ยนแปลงเฟสเพิ่มขึ้นที่บริเวณอุณหภูมิห้อง ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นสัดส่วนองค์ประกอบที่มีเฟสร่วมของเฟสและคาดว่าจะมีการแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น จากนั้น

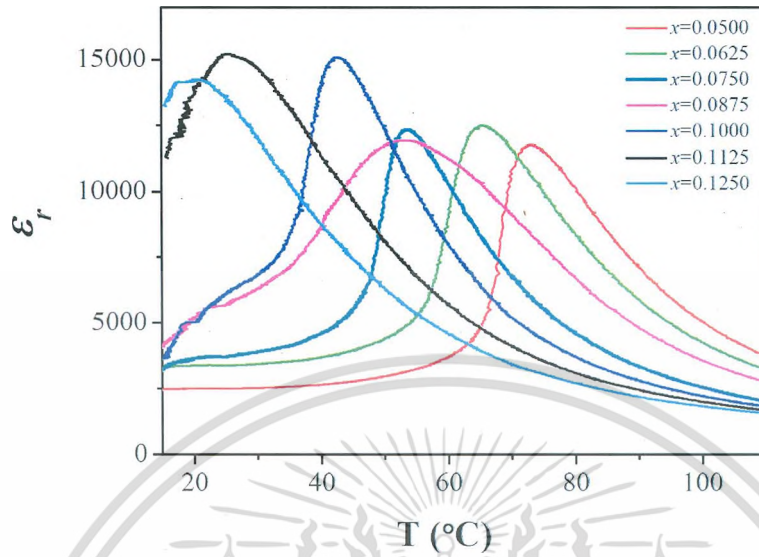
ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็น $x = 0.1125$ และ $x = 0.1250$ พีคของอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสเหลือเพียงพีคเดียว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิคูรีพบว่าค่อยๆลดลงเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ x เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $Ba_{0.825+x}Ca_{0.175-x}Ti_{(1-x)}Sn_xO_3$

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

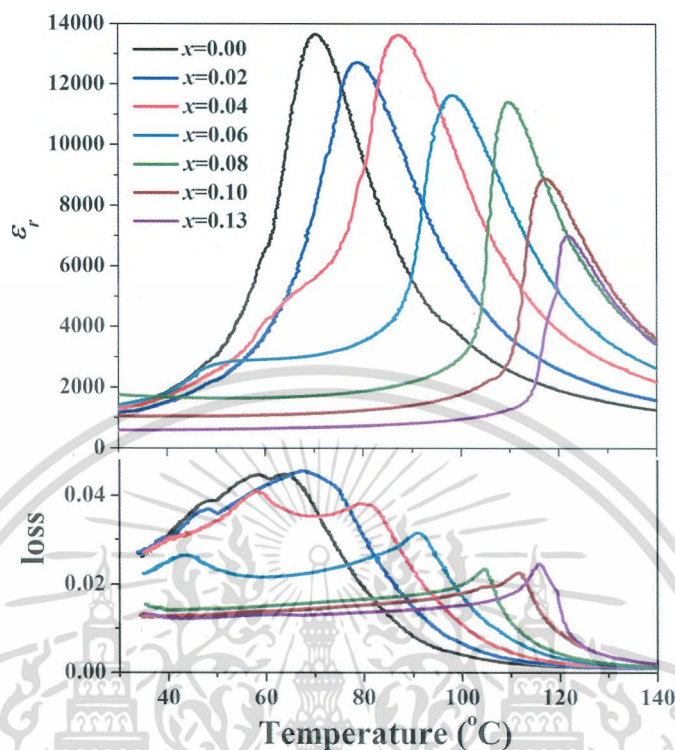


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสกับสัดส่วนองค์ประกอบ x ของเซรามิกในระบบ $Ba_{0.825+x}Ca_{0.175-x}Ti_4-xSn_xO_3$

4.3.7 ผลการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกของเซรามิกในระบบ 0.87BT-(0.13-x)BZ-xCT

จากนั้นได้ทำการวัดสมบัติไดอิเล็กทริก โดยการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ 1, 10 และ 100 kHz ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 160°C แสดงดังรูปที่ 4.26 เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน $x = 0.00$ สามารถตรวจพบช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสที่ 71°C ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเฟสจากเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก รอมโบฮีดรอลไปเป็นเฟสพาราอิลเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก (T_C) และเมื่อปริมาณของ $x = 0.02$ ยังคงมีลักษณะการเปลี่ยนเฟสเหมือนกันกับ $x = 0.00$ อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิ T_C มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 80°C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ x ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ $x = 0.13$ อุณหภูมิ $T_C = 122^\circ\text{C}$ เมื่อพิจารณา $x = 0.04$ พบว่า เริ่มปรากฏการเปลี่ยนเฟสที่สองช่วงอุณหภูมิ คือ 64 และ 89°C ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเฟสจากรอมโบฮีดรอลไปเป็นเทอร์โกนอล (T_{R-T}) และจากเฟสเทอร์โกนอลไปเป็นคิวบิก (T_C) ตามลำดับ และเมื่อปริมาณของ $x = 0.06$ อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส T_{R-T} กลับลดลง เข้าใกล้อุณหภูมิห้อง ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดเป็นเฟสผสม (polymorphic phase transition, PPT) [5, 6] ระหว่างทั้งสองโครงสร้างดังกล่าว และเมื่อสัดส่วนที่ $x = 0.08$ จะไม่ปรากฏ T_{R-T} ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสดังกล่าวลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้องนั่นเอง ดังนั้นที่สัดส่วน $x \geq 0.08$ จึงแสดงโครงสร้างเป็นแบบเทอร์โกนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



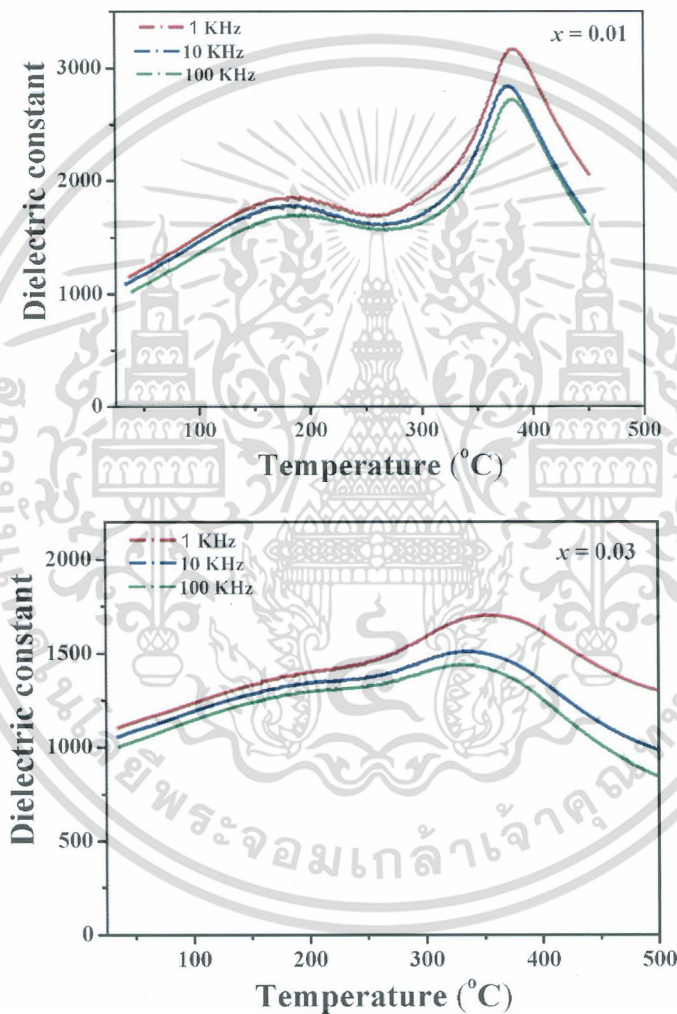
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิก $0.87\text{BT}-(0.13-x)\text{BZ}-x\text{CT}$

4.3.8 ผลการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{KNN}-x\text{BZnN}$

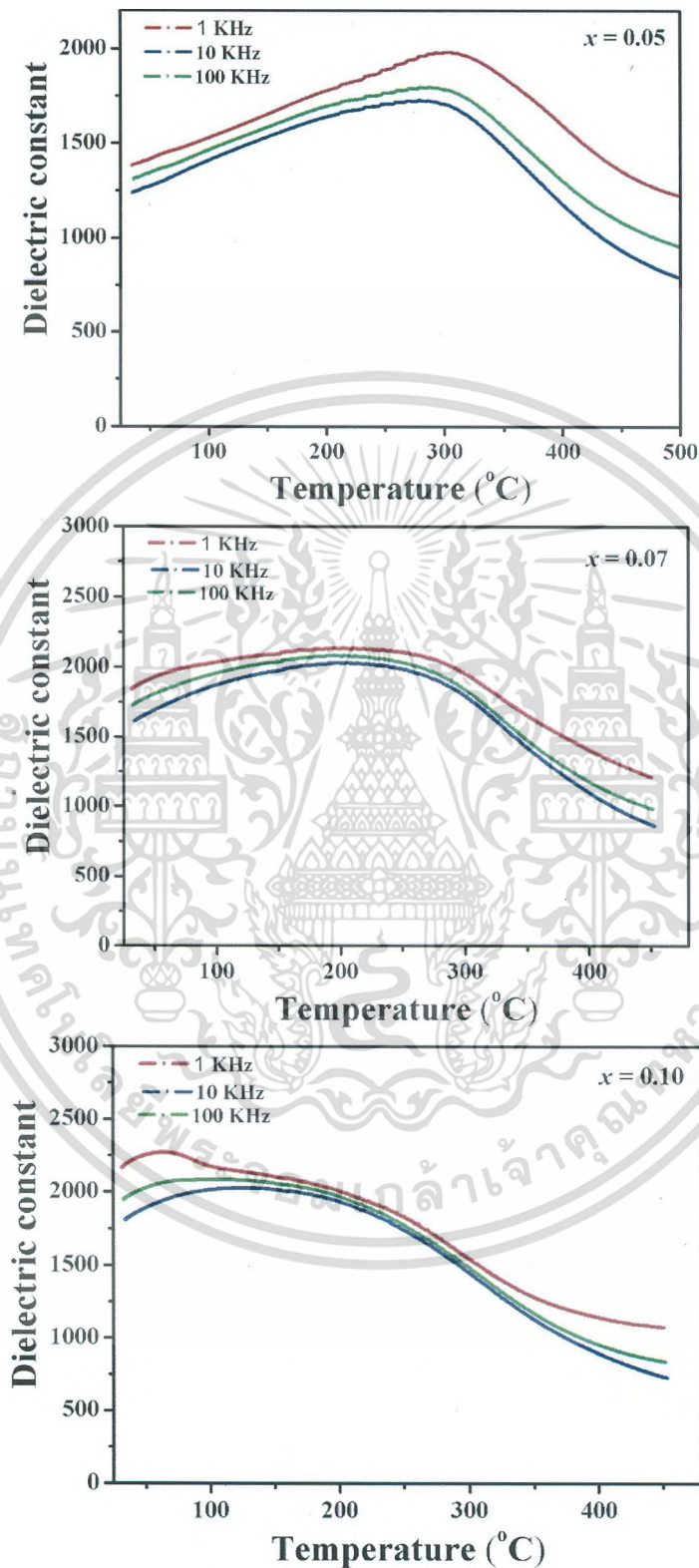
หลังจากนั้นได้ทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เทียบกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ 1, 10 และ 100 KHz ของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{KNN}-x\text{BZnN}$ แสดงดังรูปที่ 4.27 เมื่อพิจารณาเซรามิกที่สัดส่วน $x = 0.01$ พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเกิดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากความเครียดในเซรามิกเพิ่มมากขึ้นและเปลี่ยนโครงสร้างในที่สุด โดยพีคที่ได้มีลักษณะค่อนข้างกว้าง และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเซรามิกมีลักษณะการเปลี่ยนเฟสแบบต่อเนื่อง (Diffuse phase transition) [6] ซึ่งสามารถตรวจพบ การเปลี่ยนเฟสได้สองช่วงอุณหภูมิ คือ ประมาณ 150 และ 382°C ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับในเซรามิก $\text{K}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{NbO}_3$ ที่มีการเปลี่ยนเฟสอยู่สองช่วงอุณหภูมิเช่นเดียวกัน คือ 200 และ 420°C โดยเป็นการเปลี่ยนเฟสจากออร์โธโรมบิกไปเป็นเทระโกนอล (T_{O-T}) และ จากโครงสร้างเทระโกนอลไปเป็นคิวบิก (T_C) ตามลำดับโดยที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้างของเซรามิกจะมีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก ซึ่งสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ $x=0.01$ จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด (ϵ_{max}) เท่ากับ 3200 ที่ 1 KHz อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของ BZnN เพิ่มมากขึ้น เป็น $x=0.03$ ลักษณะของพีคมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด คือเป็นพีคฐานกว้างขึ้น (Broad peak) บ่งบอกถึงลักษณะการเปลี่ยนเฟสแบบต่อเนื่องอย่างเด่นชัด ยิ่งไปกว่านั้น ไม่สามารถตรวจพบอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสในช่วง

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(T_{O-T}) ได้แต่กลับพบเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอลแทนโดยเซรามิกที่ $x=0.03$ สามารถตรวจพบอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสได้ที่ 350°C ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเฟสจากรอมโบฮีดรอลไปเป็นคิวบิก และอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสดังกล่าวมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของ BZnN เพิ่มขึ้น จนกระทั่ง ที่ $x=0.10$ อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะลดต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ส่งผลให้โครงสร้างของเซรามิกที่สัดส่วนนี้มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก จากผลของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกจากออร์โธโรมบิก ($x=0.01$) ไปเป็นรอมโบฮีดรอล ($x=0.03-0.07$) และ เป็นคิวบิก ($x = 0.110$)



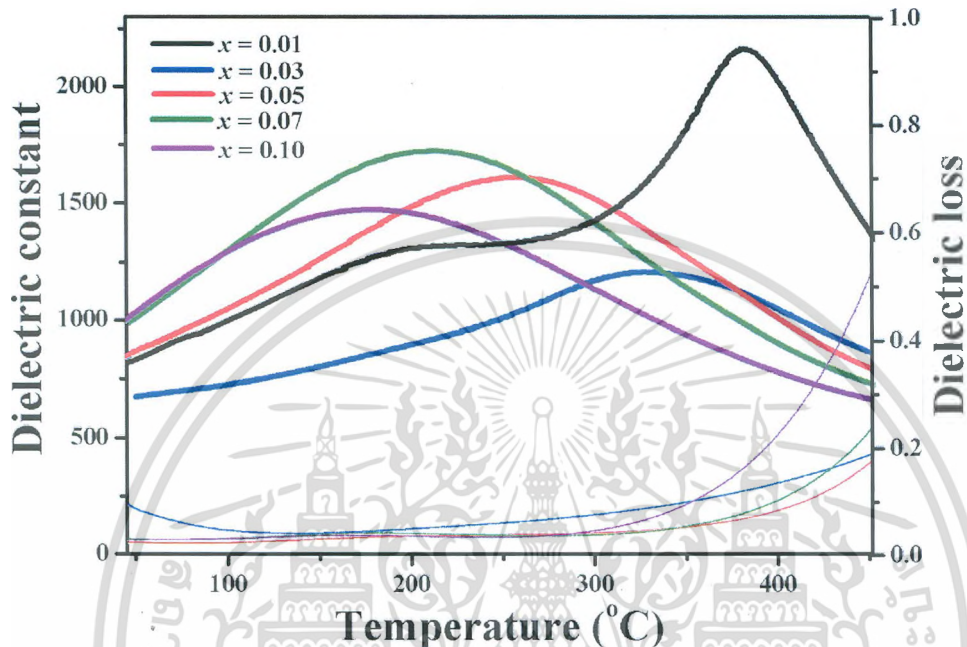
ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{KNN}-x\text{BZnN}$

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.9 ผลการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{KNN} - x\text{BMnN}$



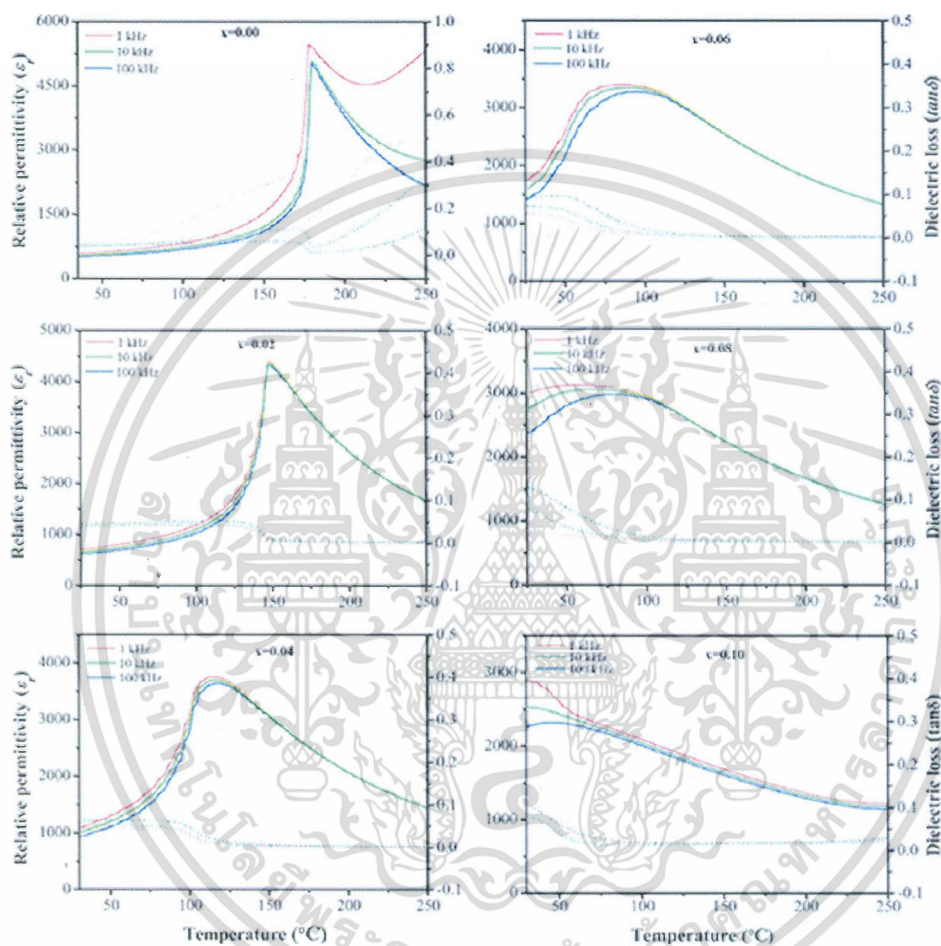
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{KNN} - x\text{BMnN}$

จากนั้นได้ทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิในช่วง $30 - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ความถี่ 10 kHz แสดงดังรูปที่ 4.28 เมื่อพิจารณาที่เซรามิกที่ $x = 0.01$ สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนเฟสได้ 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ 190 และ $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเซรามิก KNN อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสทั้ง 2 ช่วงอุณหภูมิมียุณหภูมิต่ำกว่า KNN ที่ได้มีการรายงานเอาไว้ (200 และ $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ) โดยเป็นการเปลี่ยนเฟสจากออร์โธโรมบิกไปเป็นเทตระโกนอล (T_{O-T}) และ จากโครงสร้างเทตระโกนอลไปเป็นคิวบิก (T_C) ตามลำดับโดยที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้างของเซรามิกจะมีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ $x = 0.01$ จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด เท่ากับ 2300 ที่ 10 kHz อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของ BZnN เพิ่มมากขึ้น เป็น $x = 0.03$ ลักษณะของพีคมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด คือเป็นพีคฐานกว้างขึ้น (Broad peak) บ่งบอกถึงลักษณะการเปลี่ยนเฟสแบบต่อเนื่องอย่างเด่นชัด ยิ่งไปกว่านั้น ไม่สามารถตรวจพบอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสในช่วง (T_{O-T}) ได้แต่กลับพบเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอลแทนโดยเซรามิกที่ $x = 0.03$ สามารถตรวจพบอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสได้ที่ $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเฟสจากรอมโบฮีดรอลไปเป็นคิวบิก และอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสดังกล่าวมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของ BZnN เพิ่มขึ้น จนกระทั่ง ที่ $x = 0.10$ มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสได้ที่ $178\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากผลของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกจากออร์โธโรมบิก ($x = 0.01$) ไปเป็นรอมโบฮีดรอล ($x = 0.03 - 0.10$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ว่ากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.10 ผลการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของระบบ $0.9\text{BaTiO}_3\text{-}(1-x)(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3\text{-}x\text{Bi}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$

ผลของการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ ความถี่ 1 10 และ 100 KHz ของระบบ $0.9\text{BaTiO}_3\text{-}(1-x)(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3\text{-}x\text{Bi}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ แสดงรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $0.9\text{BaTiO}_3\text{-}(1-x)(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3\text{-}x\text{Bi}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$

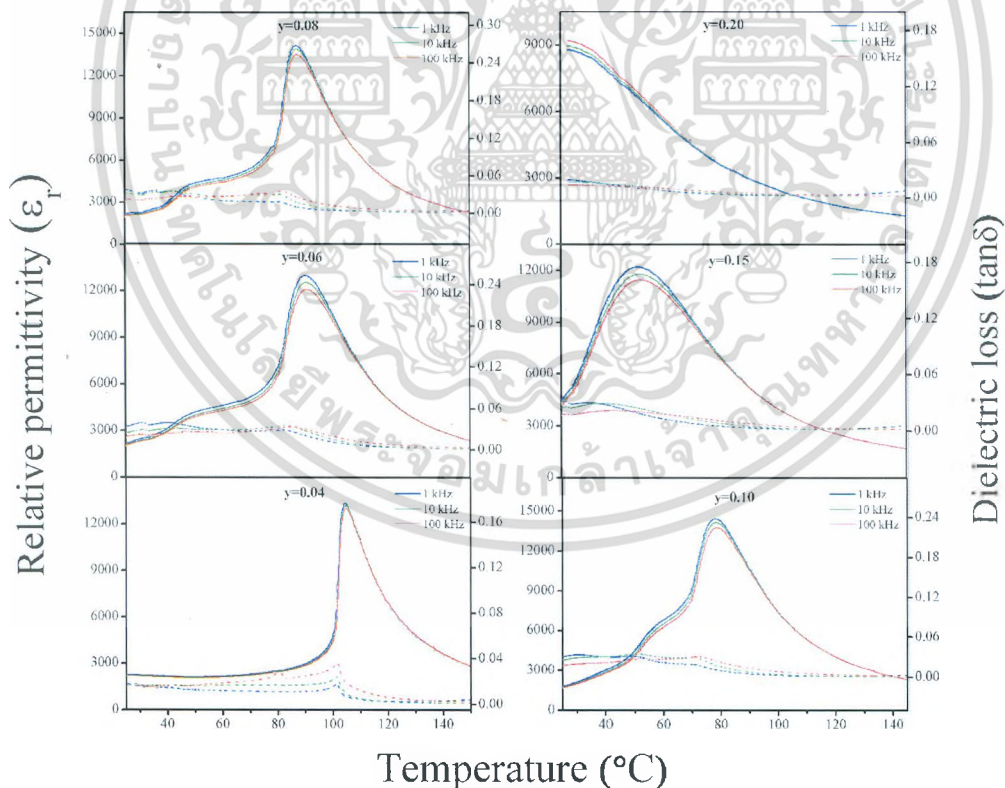
จากรูป 4.29 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.00$ พิกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีลักษณะแหลม (Sharp peak) ที่อุณหภูมิประมาณ 178°C เมื่อถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะเกิดการเปลี่ยนเฟสแบบฉับพลัน ซึ่งเกิดการเปลี่ยนเฟสโครงสร้างเตตระโกนอลที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (FE) ไปเป็นเฟสที่มีโครงสร้างคิวบิกที่มีสมบัติพาราอิเล็กทริก (PE) เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.02$ พบว่าพิกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีลักษณะกว้างแต่ตำแหน่งของพิกไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความถี่เปลี่ยนไป และที่สัดส่วนองค์ประกอบ $0.04 \leq x \leq 0.10$ พิกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีลักษณะค่อนข้างกว้าง และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งเห็นว่า เซรามิกมีลักษณะการเปลี่ยนเฟสแบบต่อเนื่อง (Diffuse phase transition) เมื่อปริมาณของ

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ารณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{Bi}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ มากขึ้น ซึ่งเป็นผลที่เปลี่ยนจากเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ(Normal ferroelectric) ไปเป็นแบบรีแลกเซอร์ (Relaxor ferroelectric) [7] เพื่อเป็นการยืนยันเอกลักษณ์ของพฤติกรรมของรีแลกเซอร์ โดยใช้กฎ Curie – Weiss

4.3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(0.95-y)\text{BaTiO}_3 - 0.05\text{CaTiO}_3 - y\text{BaZrO}_3$

จากนั้นนำเซรามิกวัดสมบัติทางไฟฟ้า จากรูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(0.95-y)\text{BaTiO}_3 - 0.05\text{CaTiO}_3 - y\text{BaZrO}_3$ พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $y = 0.04$ พีกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีลักษณะแหลมเมื่อถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะเกิดการเปลี่ยนเฟสแบบฉับพลันซึ่งเกิดการเปลี่ยนจากเฟสโครงสร้างเตตระโกนอลมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นเฟสโครงสร้างคิวบิกมีสมบัติพาราอิเล็กทริก ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $0.06 \leq y \leq 0.20$ พบพีกไดอิเล็กทริกมีลักษณะค่อนข้างกว้างและค่าไดอิเล็กทริกขึ้นกับความถี่ และที่สัดส่วนองค์ประกอบ $0.06 \leq y \leq 0.10$ พบการเปลี่ยนแปลงเฟสสองครั้ง โดยเป็นการเปลี่ยนจากเฟสโครงสร้างออโรโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอลมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและจากเฟสโครงสร้างเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิกมีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริก



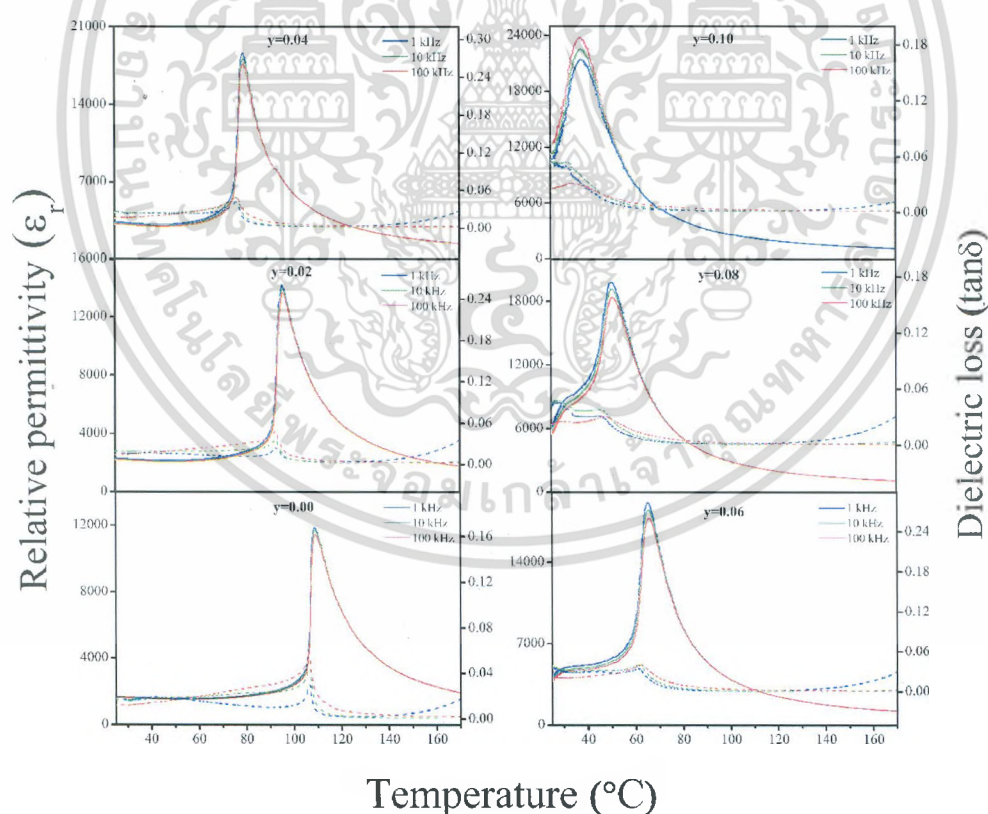
รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(0.95-y)\text{BaTiO}_3 - 0.05\text{CaTiO}_3 - y\text{BaZrO}_3$

สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ว่างกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเป็นกานำเซรามิกไปสมบัตินำไดอิเล็กทริก จากรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(0.975-y)\text{BaTiO}_3 - 0.025\text{SrTiO}_3 - y\text{BaSnO}_3$ พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $0.00 \leq y \leq 0.04$ พิกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีลักษณะแหลมเมื่อถึงอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก เมื่อเจือ BaSnO_3 เพิ่มขึ้นเป็น $0.06 \leq y \leq 0.10$ พิกของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีลักษณะค่อนข้างกว้าง และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าไดอิเล็กทริกจะลดลง และจะเห็นได้ว่าสัดส่วนองค์ประกอบ $0.06 \leq y \leq 0.08$ มีการเปลี่ยนแปลงเฟสสองครั้งด้วยกัน

4.3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(0.975-y)\text{BaTiO}_3 - 0.025\text{SrTiO}_3 - y\text{BaSnO}_3$

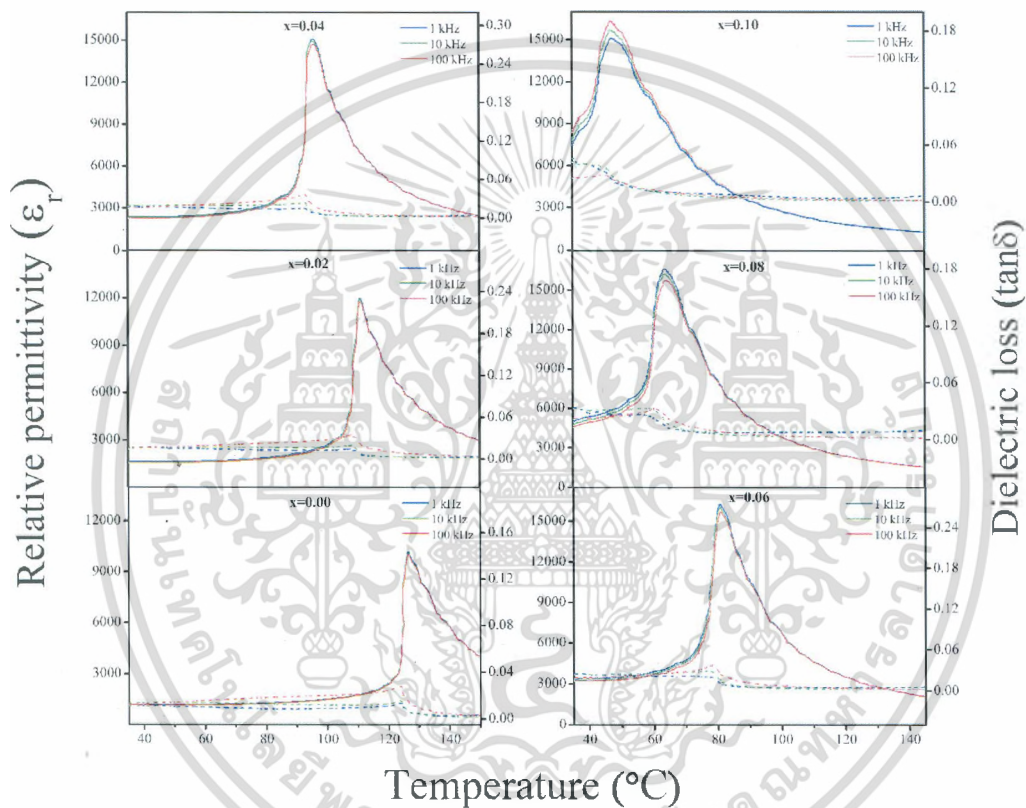
จากรูป 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรีและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับสัดส่วนองค์ประกอบจะเห็นได้ว่าเมื่อเจือ BaSnO_3 เพิ่มขึ้นอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสหรืออุณหภูมิคูรีมีแนวโน้มลดลงในลักษณะที่เป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นยืนยันได้ว่าเซรามิกที่เตรียมนั้นสามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็งได้โดยสมบูรณ์ และพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเจือ BaSnO_3 มากขึ้นและมีค่าไดอิเล็กทริกมากที่สุดประมาณ 24800 ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $y = 0.10$



รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(0.975-y)\text{BaTiO}_3 - 0.025\text{SrTiO}_3 - y\text{BaSnO}_3$

สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การพาณิชย์ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ 10 และ 100 KHz จากรูปที่ 4.32 พบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ $0.00 \leq x \leq 0.06$ พีคของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีลักษณะแหลม (Sharp peak) เมื่อถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะเกิดการเปลี่ยนเฟสแบบฉับพลันซึ่งเกิดการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริก (FE) ไปเป็นพาราอิเล็กทริก (PE) และเมื่อเจือ BaSnO_3 เพิ่มขึ้นที่สัดส่วนองค์ประกอบ $0.08 \leq x \leq 0.10$ พีคของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีลักษณะค่อนข้างกว้างและเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าไดอิเล็กทริกจะลดลง



รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของเซรามิกในระบบ $(0.95-x)\text{BaTiO}_3 - 0.05\text{CaTiO}_3 - x\text{BaSnO}_3$

สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

คณะผู้วิจัยสามารถออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิได้สำเร็จตรงตามระยะเวลาที่กำหนด อันมีส่วนประกอบคือ ชุดเตาให้ความร้อน ชุดควบคุมอุณหภูมิ ชุดจับชิ้นงานต่อเข้ากับชุดต่อเชื่อมเครื่อง LCR meter เครื่อง LCR meter ยี่ห้อ Agilent รุ่น E4980A และจอแสดงผล โดยค่าที่สามารถวัดออกมาได้นั้นจะประกอบไปด้วยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) เทียบกับอุณหภูมิ จากนั้นคณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องมือ รวมไปถึงศึกษาอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัดชิ้นงาน โดยการทดลองวัดสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZ-NN05 และ PZ-PNN06 แล้วนำค่าของอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสและอุณหภูมิคูรีที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากมาตรฐาน พบว่า เครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้จะสามารถตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำโดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ที่อัตราการขึ้น-ลง ของอุณหภูมิเท่ากับ 1 และ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เครื่องวัดสมบัติไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอื่นสืบไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อการวัดที่ได้ผลออกมาอย่างถูกต้องและแม่นยำ ผู้ทำการวัดชิ้นงานควรเตรียมชิ้นงานให้พร้อมและวัดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการวัด เช่น ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm) ค่าความหนา (mm) และค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่จะทำการวัด มาโดยละเอียดและรอบคอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] U. Sukkha, N. Vittayakorn, R. Guo, A.S. Bhalla, Phase transition behavior of Ba(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ modified PbZrO₃ solid solution, *J. Mater. Chem. C* 2 (2014) 2929–2938.
- [2] H. Nagata, T. Takenaka, Additive effects on electrical properties of (Bi_{1/2}Na_{1/2})TiO₃ ferroelectric ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.* 21 (2001) 1299–1302.
- [3] C. Chen, H. Zhuang, X. Zhu, K. Zhou, D. Zhang, Enhancement of relaxor properties by Nb doping in Ba_{0.8}Sr_{0.12}Ca_{0.08}TiO₃ lead-free ferroelectric ceramics, *Ceram. Int.* 41 (2015) 9893–9898.
- [4] A. Paterson, H.T. Wong, Z. Liu, W. Ren, Z.-G. Ye, Synthesis, structure and electric properties of a new lead-free ferroelectric solid solution of (1 - x)BaTiO₃-xBi(Zn_{2/3}Nb_{1/3})O₃, *Ceram. Int.* 41 (Suppl. 1) (2015) S57–S62.
- [5] L. Zhang, M. Zhang, L. Wang, C. Zhou, Z. Zhang, Y. Yao, et al., Phase transitions and the piezoelectricity around morphotropic phase boundary in Ba(Zr_{0.2}Ti_{0.8})O₃-x(Ba_{0.7}Ca_{0.3})TiO₃ lead-free solid solution, *Appl. Phys. Lett.* 105 (2014).
- [6] C. Laulhé, F. Hippert, R. Bellissent, A. Simon, G.J. Cuelló, Local structure in BZT relaxors from neutron pair distribution function analysis, *Phys. Rev. B* 79 (2009) 064104.
- [7] A. Bootchanont, J. Jutimoosik, S. Chandarak, M. Unruan, P. Kidkhunthod, W. Klysubun, et al., Synchrotron X-ray absorption spectroscopy study of local structure transformation behavior in perovskite Ba(Ti, Zr)O₃ system, *J. Alloys Compd.* 616 (2014) 430–435.
- [8] C. Laulhé, F. Hippert, J. Kreisel, M. Maglione, A. Simon, J.L. Hazemann, et al., EXAFS study of lead-free relaxor ferroelectric BaTi_{1-x}Zr_xO₃ at the Zr K edge, *Phys. Rev. B* 74 (2006) 014106

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นาย นราธิป วิทยากร
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Naratip Vittayakorn
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3500100413242
ที่อยู่ 333/133 หมู่บ้านอนาวิลล์ ถนน ฉลองกรุง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์
อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520 e-mail: naratipcmu@yahoo.com
4. ประวัติการศึกษา
 - 4.1 ปริญญาตรีสาขา วัสดุศาสตร์ ปีที่จบ ค.ศ.1999
สถาบันมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย
 - 4.2 ปริญญาโทสาขา วัสดุศาสตร์ ปีที่จบ ค.ศ.2001
สถาบัน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย
 - 4.3 ปริญญาเอกสาขา วัสดุศาสตร์ ปีที่จบ ค.ศ.2005
สถาบัน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย
5. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ
สถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละ
ข้อเสนอการวิจัย

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. Assistant Professor of Material Science (2008-present) Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut' Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, THAILAND
2. Researcher (2008-present) Nanotechnology Research Center, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, THAILAND
3. Visiting scientist (2007) Electroceramic research Laboratory, Faculty of material Science, Department of Mechanical Engineering, Oregon State University, OR, USA
4. Visiting scientist (2003-2005), Electroceramics Laboratory, Materials Science and Engineering Department, Iowa State University IA USA.
5. Assistance Researcher (2000-2002) Chiang Mai University
6. Teaching Assistant (1999-2002) Chiang Mai University
7. Assistant Researcher (1998-1999) Chiang Mai University

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ารณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Reviewer of “Journal of Material Science” “Solid State Science” “Journal of European Ceramic Society” “Phase Transition” “Journal of Physica Scripta” “Journal of Alloy and compound” “Journal of American Ceramic Society” “Ferroelectrics” “Materials Science and Engineering B”

ผลงานวิจัย

บทความทางวิชาการ

1. บทความเรื่อง “การเตรียมผงเซรามิกด้วยวิธีการโซล-เจล” วารสารเพื่อห้องปฏิบัติการ วัสดุ/ทดสอบ วิเคราะห์/วิจัย และ ควบคุมคุณภาพ Lab. Today ฉบับที่ 38 ธันวาคม 2549 หน้า 47-51
2. บทความเรื่อง “เซรามิกนาโนคอมโพสิต” วารสารวิทยาศาสตร์สาครระบั้ง ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม- ธันวาคม 2549 หน้า 67-73
3. บทความเรื่อง “การลดขนาดวัสดุ Comminution of Materials” วารสารเพื่อห้องปฏิบัติการ วัสดุ/ทดสอบ วิเคราะห์/วิจัย และ ควบคุมคุณภาพ Lab. Today ปีที่ 6 ฉบับที่ 40: ธันวาคม 2549 หน้า 49-52

ผลงานตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. N. Vittayakorn, G. Rujijanagul, T. Tunkasiri, X. Tan and D. P. Cann “Perovskite phaseformation and ferroelectric properties of the PNN-PZN-PZT ternary system” Journal of Materials Research, 18: 2882-2889 (2003) Impact Factor 1.395
2. N. Vittayakorn, G. Rujijanagul, T. Tunkasiri, X. Tan and D. P. Cann, “Influence of processing conditions on the phase transition and ferroelectric properties of $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zr_{1/2}Ti_{1/2})O_3$ ceramics” Materials Science and Engineering: B, 108: 258-265 (2004) Impact Factor 1.56
3. D. P. Cann, R. Martin, C.Taylor and N. Vittayakorn “Conductivity anomaly in $CuInGaO_4$ and $CuIn_2Ga_2O_7$ ceramics” Materials letters, 58: 2141-2151 (2004) Impact Factor 2.117
4. N. Vittayakorn, G. Rujijanagul, X. Tan, M. A. Marquardt, and D. P. Cann “The morphotropic phase boundary and dielectric properties of $xPb(Zr_{1/2}Ti_{1/2})O_3$ - $(1-x)Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ binary solid solution” Journal of Applied Physics, 96(9): 5103-5109 (2004) Impact Factor 2.064
5. N. Vittayakorn, S. Uttiya, G. Rujijanagul and D.P. Cann “Dielectric and ferroelectric characteristics of 0.7PZT-0.3PZN ceramics substituted with Sr” Journal of Physics D: Applied Physics, 38(16): 2942-2946 (2005) Impact Factor 2.105

รนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. D. P. Cann, G. Rujijanagul, M. Marquardt, X. Tan and **N. Vittayakorn** "Influence of Processing Conditions on the Morphotropic Phase Boundaries and Ferroelectric Properties of $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ System" Proceeding of the 14th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF-'04), August 2004, 274-277 (2005)
7. X. Zhao, H. He, **N. Vittayakorn** and X. Tan "Influence of Cation Order on the Electric Field-Induced Phase Transition in $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ -Based Relaxor Ferroelectrics" Journal of American ceramic society, 89(1): 202-209 (2006) Impact Factor 2.167
8. **N. Vittayakorn**, G. Rujijanagul, X. Tan, H. He, M.A. Marquardt and D. P. Cann "Dielectric properties and morphotropic phase boundaries in the $x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ pseudo-binary system" Journal of Electroceramic, 16: 141-149 (2006) Impact Factor 2006 = 0.674
9. **N. Vittayakorn**, C. Puchmark, G. Rujijanagul, X. Tan, and D. P. Cann "Piezoelectric properties of $(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ - $x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics prepared by the columbite-(wolframite) precursor method" Current Applied Physics, 6(3): 303-306 (2006) Impact Factor 2006 = 1.74
10. G. Puchmark, G. Rujijanagul, S. Jiansirisomboon, T. Tunkasiri, **N. Vittayakorn**, T. Comyn and S.J. Milne "Mechanical property evaluation of PZT/ Al_2O_3 composites prepared by a simple solid-state mixed oxide method" Current Applied Physics, 6(3): 323-326 (2006) Impact Factor 1.74
11. **N. Vittayakorn** "Synthesis and a crystal structural study of microwave dielectric Zirconium Titanate (ZrTiO_4) powders via a mixed oxide synthesis route" Journal of Ceramic Processing Research, 7(4): 288-291 (2006) Impact factor 2006 = 0.481
12. **N. Vittayakorn**, T. Bongkam and G. Rujijanagul "Phase transition, dielectric and piezoelectric properties of perovskite ($\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x\text{ZrO}_3$) ceramics" Physica B: Condensed Matter, 387(1-2): 415-420 (2006) Impact factor 2006 = 0.856
13. **N. Vittayakorn** "Phase formation and crystal structure of 0.9PZT-0.1PZN powders prepared by columbite precursor" Journal of Applied Science Research, 2(12): 1355-1358 (2006)
14. **N. Vittayakorn**, G. Rujijanagul and D. P. Cann "Investigation of the influence of thermal treatment on dielectric properties in PZT-PZN ceramics" Proceeding of the 15th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF-'06), Sunset Beach, North Carolina, USA July 31 - August 02, 2006
15. **N. Vittayakorn** "Dielectric properties of bismuth doped Barium Titanate (BaTiO_3)

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ceramics” *Journal of Applied Science Research*, 2(12): 1319-1322 (2006)

16. N. Vittayakorn and D. P. Cann “Preparation and ferroelectric properties of pyrochlore free $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ -based solid-solutions ” *Applied Physics A-Materials Science and Processing*, 86(3): 403-408 (2007) Impact factor = 1.76
17. N. Vittayakorn and S. Wirunchit “Perovskite formation, dielectric and ferroelectric properties of PbZrO_3 - $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics via a columbite precursor synthetic route” *Smart Materials and Structures*, 16(3): 851-857 (2007) Impact Factor = 2.094
18. N. Vittayakorn, G. Rujijanagul and D. P. Cann “The improvement in dielectric and ferroelectric performance of PZT-PZN ceramics by thermal treatment” *Current Applied Physics*, 7(5): 582-585 (2007) Impact Factor = 1.74
19. N. Vittayakorn “Effects of strontium on the characteristics of $\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics” *Phase transitions*, 80(8): 813-821 (2007) Impact Factor = 1.006
20. N. Vittayakorn, G. Rujijanagul, D. P. Cann and T. Tunkasiri “The Effect of Post-Sintering Annealing Induced Extrinsic Dielectric Properties in PZT-PZN Ceramics” *Ferroelectrics*, 348: 496-507 (2007) Impact factor = 0.511
21. N. Vittayakorn, G. Rujijanagul and D. P. Cann “Investigation of the influence of thermal treatment on the morphologies, dielectric and ferroelectric properties of PZT-Based Ceramics” *Journal of Alloys and Compounds*, 440(1-2): 259-264 (2007) Impact Factor = 2.134
22. C.-C. Huang, D. P. Cann, X. Tan and N. Vittayakorn “Phase transitions and ferroelectric properties in BiScO_3 - $\text{Bi}(\text{Zn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ - BaTiO_3 solid solutions” *Journal of Applied Physics*, 102(4): 044103 (2007) Impact Factor = 2.064
23. S. Nabunmee, G. Rujijanagul, N. Vittayakorn, and D. P. Cann “Observation of high dielectric constants in $x(\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3)-(0.2-x)\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.8\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ ternary solid solutions” *Journal of Applied Physics*, 102(9): art. no. 094108 (2007) Impact Factor = 2.064
24. N. Vittayakorn and T. Bongkarn “Influence of Strontium Doping on the Ferroelectric and Piezoelectric Properties of Lead Zinc Niobate - Lead Zirconate Titanate Ceramics” *Ferroelectrics*, 358: 54 – 59 (2007) . Impact factor = 0.511

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25. N. Vittayakorn and T. Tunkasiri “Phase Transition and Dielectric Properties of Polycrystalline Lead Zirconate Titanate-Lead Cobalt Niobate” *Physica Scripta*, T129: 199-204 (2007) Impact Factor = 0.982
26. N. Vittayakorn, S. Wirunchit, S. Trisak, R. Muanglua and S. Niemcharoem “Perovskite phase formation, Phase transformations and electrical properties of lead nickel niobate - lead zirconate ceramics” *Ferroelectrics*, 358: 42-48 (2007) Impact factor = 0.511
27. G. Rujjanagul, N. Vittayakorn and T. Bongkarn “Effect of Barium Substitution on Phase Transitions of Lead Barium Zirconate Ceramics Prepared by Solid State Reaction Method” *Ferroelectrics*, 355(1): 84-89 (2007) Impact factor = 0.511
28. D. P. Cann, C.-C. Huang, A. Prasatkhetragarn, and N. Vittayakorn, “Phase Transitions and Dielectric Properties in $\text{NaNbO}_3\text{-Bi}(\text{Zn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ Perovskite Solid Solutions,” *Proceedings of the 13th US-Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics*, Awaji-shima, Japan (2007)
29. W. Koonalintip, S. Wirunchit, S. Trisak, P. Laoratahakul and N. Vittayakorn “Phase formation and morphology of $\text{PbZrO}_3\text{-Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ powders via columbite precursor synthetic route” *Journal of solid mechanics and materials engineering*, 1(4): 519-528 (2007)
30. N. Vittayakorn “Structural, Phase Transition and Ferroelectric Properties of $\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ Ceramic Synthesized by High-temperature Solid-state Reaction Technique” *Journal of Applied Science Research* 3(1) (2007) P.30-33
31. N. Vittayakorn “Synthesis of Perovskite Phase Lead Zirconate-lead Nickel Niobate via Columbite Precursors” *Journal of Applied Science Research* 3(2) (2007) P.119-122
32. S. Wirunchit, and N. Vittayakorn “Structural transformation in antiferroelectric PbZrO_3 – relaxor ferroelectric $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ solid solution system” *Journal of Applied Physics*, 104: 024103 (2008) Impact factor = 2.064
33. G. Rujjanagul and N. Vittayakorn “Influence of fabrication processing on phase transition and electrical properties of $0.8\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3 - 0.2\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics” *Current Applied Physics*, 8(1): 88-92 (2008) Impact Factor 2006 = 1.74
34. A. Prasatkhetragarn, N. Vittayakorn, S. Ananta, R. Yimnirun and D. P. Cann, “Synthesis, dielectric and ferroelectric properties of ceramics in the $(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ารณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (x)Pb(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃ system” Japanese Journal of Applied Physics, 47(2): 998-1002 (2008) Impact factor = 1.108
35. N. Vittayakorn, S. Wirunchit, S. Traisak, R. Yimnirun and G. Rujijanagul “Development of Perovskite and Phase Transition in Lead Colbalt Niobate Modified Lead Zirconate Titanate System” Current Applied Physics, 8(2): 128-133 (2008) Impact Factor 2006 = 1.74
 36. W. Banlue, N. Vittayakorn, C.-C. Huang and D. P. Cann “Dielectric properties of Pb[(1-x)(Zr_{1/2}Ti_{1/2})-x(Zn_{1/3}Ta_{2/3})]O₃ ceramics prepared by columbite and wolframite methods” Journal of Materials Science, 43(12): 4220-4225 (2008) Impact factor = 1.855
 37. S. Wirunchit, P. Laoratanakul and N. Vittayakorn “Physical properties and phase transitions in perovskite Pb[Zr_{1-x}(Ni_{1/3}Nb_{2/3})_x]O₃ (0.0 ≤ x ≤ 0.5)” Journal of Physics D: Applied physics, 41(12): 125406-125413 (2008) Impact Factor = 2.105
 38. S. Wirunchit and N. Vittayakorn “Structural transformation in antiferroelectric PbZrO₃-relaxor ferroelectric Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃ solid solution system” Journal of Applied Physics, 104(2) art. no.024103 (2008) Impact Factor = 2.064
 39. N. Chaiyo and N. Vittayakorn “Effect of calcinations conditions on phase formation of microwave dielectric cobalt niobate (CoNb₂O₆) powders via a mixed oxide synthesis route” Journal of Ceramic Processing Research, 9(4): 381-384 Impact factor = 0.481
 40. M. Unruan, N. Vittayakorn, R. Wongmaneeuang, A. Prasatkhetragarn, S. Ananta and R. Yimnirun, “Synthesis and Properties of Pb(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃ Ceramics” Journal of Alloys and Compounds, 466(1-2): 264-267 (2008) Impact factor = 2.134
 41. W. Banlue and N. Vittayakorn “Ferroelectric phase stabilization, phase transformations and thermal properties in (1-x)PbZrO₃-xPb(Co_{1/3}Nb_{2/3})O₃ solid solution” Applied Physics A Material: Science & Processing, 93(2): 565-569 (2008) Impact Factor = 1.76
 42. S. Nabunmee, N. Vittayakorn, D. P. Cann and G. Rujijanagul “Ferroelectric and Mechanical Properties of PZT-PZN-PNN ceramics” Advance Materials Research, 55-57: 217-220 (2008)
 43. M. Sutapun, R. Muanflua, C.-C. Huang, D. P. Cann, W. C. Vittayakorn and N. Vittayakorn “Influence of Fabrication Processing on Perovskite Phase Formation of KNN-BZT” Advance Materials Research, 55-57: 113-116 (2008)

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

44. S. Wirunchit, P. Laoratanakul and N. Vittayakorn "Effect of Lead Nickel Niobate Substitution on Phase Transitions of Lead Zirconate Ceramics Prepared by the Solid State Reaction Method" *Advance Materials Research*, 55-57: 117-120 (2008)
45. W. Banlue, R. Muanflua, W. C. Vittayakorn and N. Vittayakorn "Synthesis, crystal structures, phase transition characterization and thermal properties of the $(1-x)\text{PbZrO}_3-x\text{Pb}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ solid solution system" *Advance Materials Research*, 55- 57: 121-124 (2008)
46. T. Bongkarn, N. Phungjitt and N. Vittayakorn "Effect of Calcination Temperatures on Microstructure and Phase Formation of $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.25}\text{Ti}_{0.75})\text{O}_3$ Powders" *Advance Materials Research*, 55-57: 205-208 (2008)
47. N. Vittayakorn, N. Chaiyo, R. Muanghlua, A. Ruangphanit and W. C. Vittayakorn "Effect of annealing on the structure and dielectric properties in PZT-PCoN ceramics" *Advance Materials Research*, 55-57: 49-52 (2008)
48. R. Muanghlua, S. Niemchareon, W. C. Vittayakorn and N. Vittayakorn "Effects of Zr/Ti ratio on the structure and ferroelectric properties in PZT-PZN-PMN ceramics near the morphotropic phase boundary" *Advance Materials Research*, 55-57: 125- 128 (2008)
49. N. Chaiyo, R. Muanghlua, A. Ruangphanit and W. C. Vittayakorn and N. Vittayakorn "Synthesis, phase formation and characterization of $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ powders synthesized by solid-state reaction" *Advance Materials Research*, 55-57: 873-876 (2008)
50. M. Unruan, N. Vittayakorn, R. Wongmaneerung, A. Prasakhetragarna, S. Ananta and R. Yimnirun "Fabrication and Electrical Properties of $\text{Pb}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ Ceramics" *Ceramics International*, 35(1): 169-172 (2009) Impact Factor 2006 = 1.471
51. C.-C. Huang, N. Vittayakorn, A. Prasakhetragarn, B. J. Gibbons and D. P. Cann "Phase transitions and dielectric properties in $\text{Bi}(\text{Zn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3-(\text{Na}_{1-x}\text{Li}_x)\text{NbO}_3$ perovskite solid solutions" *Japanese Journal of Applied Physics*, 48(3): 460-466 (2009) Impact Factor: 1.018
52. M. Sutapun, C.-C. Huang, D. P. Cann and N. Vittayakorn "Phase transitional behavior and dielectric properties of lead free $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3 - \text{Bi}(\text{Zn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ ceramics" *Journal of Alloy and Compound*, 479: 462-466 (2009) Impact Factor = 2.134
53. C.-C. Huang, N. Vittayakorn and D. P. Cann "Structure and ferroelectric properties of $\text{Bi}(\text{Zn}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3-(\text{Bi}_{1/2}\text{K}_{1/2})\text{TiO}_3$ perovskite solid solutions" *IEEE Transactions on*

กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, 56(7) art. No 5116856: 1304-1308 (2009) Impact Factor = 1.46
54. W. Qu, X. Tan, N. **Vittayakorn**, S. Wirunchit and M. F. Besser “High temperature phases in the $0.98\text{PbZrO}_3-0.02\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramic” Journal of Applied Physics, 105: 014106 (2009) Impact factor = 2.064
 55. N. **Vittayakorn**, P. Charoonsuk, P. Kasiansin, S. Wirunchit and B. Boonchom “Dielectric properties and phase transitions behaviors in $(1-x)\text{PbZrO}_3-x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ ceramics” Journal of applied Physics, 106: 064104 (2009) Impact factor = 2.064
 56. B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert and N. **Vittayakorn** “A simple route to synthesis new binary cobalt iron cyclotetraphosphate $\text{CoFe}_4\text{O}_{12}$ using aqueous and acetone media” Journal of Alloys and compounds, 486(1-2): 689-692 (2009) Impact Factor = 2.134
 57. N. **Vittayakorn** and W. Banlue “Synthesis, Ferroelectric Phase Stabilization, Phase Transition and Thermal Properties in $(1-x)\text{PbZrO}_3-x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ Solid Solution” Ferroelectrics, 382(1): 110–114 (2009). Impact Factor = 0.511
 58. R. Muanghlua, S. Niemcharoen, W. C. Vittayakorn, N. Tungsitvisetkul, P. Chinwaro, A. Ruangphanit, N. Chaiyo, N. **Vittayakorn** “Preparation and Properties of Lead Free Bismuth Sodium Titanate - Bismuth Zinc Titanate Ceramics” Ferroelectrics, 383(1): 1 – 7 (2009) Impact Factor = 0.511
 59. M. Sutapun and N. **Vittayakorn** “Phase Transition and Dielectric Properties of Lead Free $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3\text{-Bi}(\text{Zn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ Piezoelectric Ceramics” Ferroelectrics, 382(1): 115–121(2009) Impact Factor = 0.511
 60. W. Banlue and N. **Vittayakorn** “Effect of $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ Additions on Phase Structure, Ferroelectric and Dielectric Properties of PbZrO_3 Ceramics” Ferroelectrics, 382(1): 122– 126 (2009) Impact Factor = 0.511
 61. T. Bongkarn, N. Phungjitt and N. **Vittayakorn** “Effect of Firing Temperatures on Phase Formation and Microstructure of $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.3}\text{Ti}_{0.7})\text{O}_3$ Ceramics Prepared via Mixed Oxide Method” Ferroelectrics, 383(1): 65 – 72 (2009) Impact Factor = 0.511
 62. S. Wirunchit, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, W.C. Vittayakorn, P. Laoratanakul and N. **Vittayakorn** “Preparation of lead zirconate - lead nickel niobate ceramics by the reaction sintering process” Ferroelectrics, 380(1): 14-19 (2009) Impact Factor = 0.511

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

63. B. Boonchom, M. Thongkam, S. Kongtaweelert and N. Vittayakorn "Flower-like microparticles and novel superparamagnetic properties of new binary $\text{Co}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ obtained by a rapid solid state route at ambient temperature" *Materials Research Bulletin*, 44(12): 2206-2210 (2009) Impact Factor = 2.145
64. G. Rujijanagul, N. Vittayakorn and S. Nabunmee "Effect of Annealing Time on Electrical and Mechanical Properties of $0.7(\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3) - 0.3(\text{Pb}(\text{Zn}_{1/2}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3)$ Ceramics" *Ferroelectrics*, 384(1): 68-72 (2009) Impact Factor = 0.511
65. W. C. Vittayakorn and N. Vittayakorn "Hysteresis Response of Lead Zirconate — Lead Nickel Niobate Ferroelectric Ceramic Under Compressive Stress" *Ferroelectrics*, 382(1): 1-6 (2009) Impact Factor = 0.511
66. S. Wirunchit and N. Vittayakorn "Crossover from Antiferroelectric to Normal Ferroelectric Behavior in Lead Zirconate — Lead Nickel Niobate Ceramics Prepared by the Reaction Sintering Process" *Ferroelectrics*, 382(1): 135-140 (2009) Impact Factor = 0.511
67. N. Chaiyo, A. Ruangphanit, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, A. Sangseub, S. Taopen, S. Leelapattana, W. C. Vittayakorn, N. Vittayakorn "Synthesis and Morphology Evolution of Lead-Free Piezoelectric $\text{K}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{NbO}_3$ Powder at Low Temperature" *Ferroelectrics*, 383(1): 8-14 (2009) Impact Factor = 0.511
68. N. Phungjitt, P. Panya, T. Bongkarn and N. Vittayakorn "The structural phase and microstructures of perovskite $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ceramics using the combustion route" *Functional Materials Letters*, 2(4): 169-174 (2009) Impact Factor = 2.671
69. B. Boonchom and N. Vittayakorn "Synthesis and ferromagnetic property of new binary copper iron pyrophosphate CuFeP_2O_7 " *Materials Letters*, 64(3): 275-277 (2010) Impact Factor = 2.117
70. B. Boonchom and N. Vittayakorn "Floral-like microarchitectures of cobalt iron cyclotetraphosphate obtained by solid state synthesis" *Powder Technology*, 198(1): 25-28 (2010) Impact Factor = 1.887
71. N. Chaiyo, B. Boonchom and N. Vittayakorn "Solid-state reaction synthesis of sodium niobate (NaNbO_3) powder at low temperature" *Journal of Materials Science*, 45(6): 1443-1447 (2010) Impact Factor = 1.885
72. B. Boonchom and N. Vittayakorn "One-step thermal synthesis of binary manganese iron cyclotetraphosphate $\text{MnFeP}_4\text{O}_{12}$ " *Journal of Materials Science*, 45(6): 1459-1463 (2010) Impact Factor = 1.885

ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

73. B. Boonchom, R. Baitahe, S. Kongtaweelert and N. Vittayakorn "Kinetics and thermodynamics of zinc phosphate hydrate synthesized by a simple route in aqueous and acetone media" *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(8): 3571-3576 (2010) Impact Factor = 2.071
74. P. Phetnoi, S. Niemcharoen, R. Muanghlua, M. Sutapun and N. Vittayakorn "Electrical properties of bismuth potassium titanate-strontium titanate ferroelectric ceramics" *ECTI-CON 2010 - The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, art. no. 5491563: 962-965 (2010)
75. U. Sukkha, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchoma and N. Vittayakorn "Antiferroelectric - ferroelectric phase transition in lead zinc niobate modified lead zirconate ceramics: Crystal studies, microstructure, thermal and electrical properties" *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 100(2): 551-559 (2010) Impact Factor = 1.76
76. B. Boonchom and N. Vittayakorn "Dehydration behavior of synthetic $\text{Al}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ " *Journal of Chemical and Engineering Data*, 55(9): 3307-3311 (2010). Impact Factor = 2.089
77. P. Charoonsuk, S. Wirunchit, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom and N. Vittayakorn "The phase evolution with temperature in 0.94PbZrO_3 - $0.06\text{Pb}(\text{Mg}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ antiferroelectric ceramic" *Journal of Alloys and Compounds*, 506(1): 313-316 (2010) Impact Factor = 2.134
78. B. Boonchom, R. Baitahe, Z. Joungmunkong and N. Vittayakorn "Grass blade-like microparticle $\text{MnPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ prepared by a simple precipitation at room temperature" *Powder Technology*, 203(2): 310-314 (2010) Impact Factor = 1.887
79. N. Phungjitt, P. Panya, N. Vittayakorn and T. Bongkarn "Use of the combustion technique for the preparation of $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.70}\text{Zr}_{0.30})\text{O}_3$ ceramics" *Ferroelectrics*, 403(1): 142-149 (2010) Impact Factor = 0.511
80. B. Boonchom, C. Danvirutai and N. Vittayakorn "A simple synthesis and characterization of binary $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and its final decomposition product $\text{CoFeP}_4\text{O}_{12}$ " *Solid State Sciences*, 13(1): 77-81 (2011) Impact Factor = 1.828
81. N. Chaiyo, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom and N. Vittayakorn "Solution combustion synthesis and characterization of lead-free piezoelectric sodium

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ารณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- niobate (NaNbO_3) powders” *Journal of Alloys and Compounds*, 509(5): 2445-2449 (2011) Impact Factor = 2.134
82. **N. Vittayakorn** and B. Boonchom “Effect of BiAlO_3 modification on the stability of antiferroelectric phase in PbZrO_3 ceramics prepared by conventional solid state reaction” *Journal of Alloys and Compounds*, 509(5): 2304-2310 (2011) Impact Factor = 2.134
83. B. Boonchom and **N. Vittayakorn** “Soft synthesis route and characterization of superparamagnetic $\text{Mn}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and its decomposed product” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(4): 2021-2030 (2011) Impact Factor = 2.071
84. N. Chaiyo, A. Ruangphanit, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom and **N. Vittayakorn** “Synthesis of potassium niobate (KNbO_3) nano-powder by a modified solid-state reaction” *Journal of Materials Science*, 46(6): 1585-1590 (2011) Impact Factor = 1.855
85. R. Muanghlua, S. Niemcharoen, M. Sutapun, B. Boonchom and **N. Vittayakorn** “Phase transition behaviour and electrical properties of lead-free $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3$ - LiNbO_3 - LiSbO_3 piezoelectric ceramics” *Current Applied Physics*, 11(3): 434-437 (2011) Impact Factor = 1.74
86. N. Chaiyo, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom, P. Seeharaj and **N. Vittayakorn** “Non-isothermal kinetics of the thermal decomposition of sodium oxalate $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 107: 1023-1029 (2011) Impact Factor = 1.752
87. U. Sukkha, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom and **N. Vittayakorn** “Effect of $\text{Pb}(\text{Y}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ additions on thermal and electrical properties of PbZrO_3 ceramics” *Ferroelectrics*, 416(1): 8-15 (2011) Impact Factor = 0.511
88. N. Chaiyo, A. Ruangphanit, B. Boonchom and **N. Vittayakorn** “Facile synthesis of lead-free piezoelectric sodium niobate (NaNbO_3) Powders via the solution combustion method” *Ferroelectrics*, 415(1): 75-82 (2011) Impact Factor = 0.511
89. R. Baitahe, **N. Vittayakorn** and B. Boonchom “Study on thermal transformation of $\text{CuHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ obtained by acetone-mediated synthesis at ambient temperature” *Journal of The Thermal Analysis and Calorimetry*, 10.1007/s10973-011-1832-y (2011) Impact Factor = 1.752

รนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

90. T. Kolodiaznyi, H. Sakurai and **N. Vittayakorn** "Spin-flop driven magneto-dielectric effect in $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ " Applied Physics Letters 99 (13), art. no. 132906 (2011)
Impact Factor = 3.82
91. U. Sukkha, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom and **N. Vittayakorn** "Influence of $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ on the Phase Transitions, Electrical, and Thermal Properties of a PbZrO_3 Ceramic" Journal of the American Ceramic Society, 94 (10): 3397-3404 (2011) Impact Factor = 2.167
92. W.C. Vittayakorn, D. Bunjong, R. Muanghlua and **N. Vittayakorn** "Characterization and properties of $\text{BaTi}_3\text{O}_3/\text{MgO}$ nanocomposite ceramics" Journal of Ceramic Processing Research, 12(5) : 493-495 (2011) Impact Factor = 0.481
93. B. Boonchom and **N. Vittayakorn** "Simple fabrication of polyhedral grain-like microparticle $\text{Cu}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and porous structure CuZnP_2O_7 " Ceramics International, 38(1): 411-415 (2012) Impact Factor = 1.471
94. U. Sukkha, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, B. Boonchom, W. Vittayakorn and **N. Vittayakorn** "Effect of $\text{Pb}(\text{Yb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ on phase transition and thermal and electrical properties of PZ-PYbN solid solution on PZ-rich side" Journal of Materials Science, 47(3): 1452-1459 (2012) Impact Factor = 1.855
95. N. Wongpisutpaisan, A. Ruangphanit, **N. Vittayakorn**, W. Pecharapa, W. "Cu-doped TiO_2 nanopowder synthesized by sonochemical process" 2012 International Conference on Enabling Science and Nanotechnology, ESciNano 2012 - Proceedings, art. no. 6149671
96. M. Sutapun, B. Boonchom and **N. Vittayakorn** "Sonochemical synthesis of $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ powders" Advanced Materials Research, 506: 94-97 (2012) Impact Factor = 0.256
97. P. Charoonsuk, W. Vittayakorn, R. Muanghua, B. Boonchom, S. Niumcharoen and **N. Vittayakorn** "Aqueous Co-precipitated Spherical Shape PbZrO_3 Nanopowders : Perovskite Phase Formation" Ceramics International, 39: 107-111 (2013) Impact Factor = 1.789
98. P. Charoonsuk, W. Vittayakorn, B. Boonchom, and **N. Vittayakorn** "Perovskite Phase Formation of Characterized Lead Zirconate (PbZrO_3) Nanoparticles Prepared by The Sono-Assisted Co-Precipitation Method" Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 13: 3529-3534 (2013) Impact Factor = 1.556
99. S. Kahatta, N. Chaiyo, C. Ruttanapun, W. Techitdheera, W. Pecharapa and **N. Vittayakorn** "Microwave-assisted solution combustion synthesis and

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ารณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- characterization of thermoelectric $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$ powder” *Advanced Materials Research*, 802: 84-88 (2013)
100. P. Seeharaj, B. Boonchom, P. Charoonsuk, P-Kim Lohsoontorn and **N. Vittayakorn** “Barium zirconate titanate nanoparticles synthesized by the sonochemical method” *Ceramics International*, 39: 559–562 (2013) Impact Factor = 1.789
 101. N. Wongpisutpaisan, **N. Vittayakorn**, A. Ruangphanit, and W. Pecharapa “Cu-Doped TiO Nanopowders Synthesized by Sonochemical- assisted Process” *Sains Malaysiana*, 42: 175–181 (2013) Impact Factor = 0.052
 102. C. Kahattha, N. Wongpisutpaisan, **N. Vittayakorn** and W. Pecharapa “Physical properties of V-doped TiO₂ nanoparticles synthesized by sonochemical-assisted process” *Ceramics International*, 39: 389-393 (2013) Impact Factor = 1.789
 103. C. Kahattha, **N. Vittayakorn** and W. Pecharapa “Effect of sonication time and calcination temperature on physical properties of Titanium dioxide synthesized via sonochemical-assisted process” *Advanced Materials Research*, 802: 252-256 (2013)
 104. S. Wirunchit, R. Muanghlua, N. Atiwongsangthong, W. Vittayakorn and **N. Vittayakorn** “Nanocrystalline barium zirconium titanate synthesized by the sonochemical process.” *Advanced Materials Research*, 802: 119-123 (2013)
 105. M. Sutapun, R. Muanghua, S. Niemcharoen, W. Vittayakorn, P. Seeharaj and **N. Vittayakorn** “Synthesis, Characterization and Dielectric Properties of $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{P}_2\text{O}_7$ Ceramics” *Advanced Material Research*, 802: 12-16 (2013)
 106. R. Noonuruk, W. Mekprasart, N. Wongpisutpaisan, **N. Vittayakorn** and W. Pecharapa “SnO₂ nanoparticle synthesized by ultrasonic-assisted process” *Advanced Material Research*, 770: 299-302 (2013)
 107. K. Chongsri, N. Wongpisutpaisan, **N. Vittayakorn** and W. Pecharapa “Al - doped ZnO nanoparticles synthesized by sonochemical-assisted method” *Advanced Material Research*, 770: 354-357 (2013)
 108. N. Wongpisutpaisan, **N. Vittayakorn**, A. Ruangphanit, and W. Pecharapa “CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramic synthesized by sonochemical - assisted process” *Integrated Ferroelectrics*, 149(1): 56-60 (2013) Impact Factor = 0.375
 109. N. Chaiyo, R. Muanghlua, Y. Wongprasert, P. Seeharaj and **N. Vittayakorn** “Rapid Synthesis of Potassium Sodium Niobate ($\text{K}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{NbO}_3$) Lead-free Piezoelectric Powder using the Combustion Method” *Integrated Ferroelectric*, 149(1): 128-134 (2013) Impact Factor = 0.375

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
กรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

110. C. Kahattha, N. Wongpisutpaisan, **N. Vittayakorn** and W. Pecharapa “Synthesis of Titanium dioxide/Vanadium oxide nanocomposites via sonochemical and hydrothermal process for energy storage application” *Nanoelectronics Conference (INEC), 2013 IEEE 5th International*, 193-196, (2013)
111. P. Seeharaj, P. Charoonsuk, P. Kim-Lohsoontorn and **N. Vittayakorn** “BaZr_{0.3}Ti_{0.7}O₃ nanoparticles synthesized by glycine-nitrate autocombustion” *Ferroelectrics*, 456(1): 55-62 (2013) Impact Factor = 0.415
112. R. Roongtao, R. Baitahe, **N. Vittayakorn**, P. Seeharaj and W. C. Vittayakorn “Structural and Magnetic Properties of Zn Doped CoFe₂O₄” *Integrated Ferroelectrics*, 148(1): 145-152 (2013) Impact Factor = 0.375
113. P. Charoonsuk, W. Vittayakorn, N. Atiwongsangthong, P. Seeharaj and **N. Vittayakorn** “Synthesis of Monodispersed Perovskite Barium Zirconate (BaZrO₃) by the Sonochemical Method” *Ferroelectrics*, 453(1): 54-61 (2013) Impact Factor = 0.415
114. S. Vuttivong, S. Niemcharoen, P. Seeharaj, W. Vittayakorn and **N. Vittayakorn** “Sonochemical Synthesis of Spherical BaTiO₃ Nanoparticles” *Ferroelectrics*, 457(1): 44-52 (2013) Impact Factor = 0.415
115. P. Seeharaj, S. Wirunchit, P. Charoonsuk, K-Lohsoontorn and **N. Vittayakorn** “Spherical nanocrystalline barium zirconate titanate prepared by co-precipitation in highly aqueous basic solution” *Ferroelectrics*, 455(1): 83-89 (2013) Impact Factor = 0.415
116. C. Nawaril, W. Vittayakorn, R. Muanghua, S. Niemcharoen, J. Prachayawarakorn and **N. Vittayakorn** “The Effect of Thai Glutinous Rice Starch on the Synthesis of Lead Zirconate (PbZrO₃) Nanofibers via the Electrospinning Method” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13: 3700–3704 (2013) Impact Factor = 1.556
117. B. Boonchom, **N. Vittayakorn** “A rapid synthesis of cobalt cyclotetraphosphate Co₂P₄O₁₂ at low temperature” *Ceramics International*, 39: 395–398 (2013) Impact Factor = 1.789
118. C. Wattana wikkam, **N. Vittayakorn** and T. Bongkarn “Low temperature fabrication of lead-free KNN-LS-BS ceramics via the combustion method” *Ceramics International*, 39: 399–403 (2013) Impact Factor = 1.789
119. A. Prasatkhetragarn, A. Arthan, P. Jantaratana, **N. Vittayakorn**, B. Yotburut and R. Yimnirun “Ferroelectromagnetic characteristic of Na-doped 0.75BiFeO₃-

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 0.25BaTiO₃ multiferroic ceramics” *Ceramics International*, 39: 245–248 (2013)
Impact Factor = 1.789
120. P. Charoonsuk and N. Vittayakorn “Perovskite Phase Formation of Monosized Lead Zirconate (PbZrO₃) Nanoparticles Prepared by the Sono-Assisted Co-Precipitation Method” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13: 3529–3534 (2013) Impact Factor = 1.556
 121. R. Sumang, N. Vittayakorn and T. Bongkarna “Crystal structure, microstructure and electrical properties of (1-x-y)Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃-xBi_{0.5}K_{0.5}TiO₃-yBiFeO₃ ceramics near MPB prepared via the combustion technique” *Ceramics International*, 39: 409–413 (2013) Impact Factor = 1.789
 122. A. Prasatkhetragarn, P. Muangkonkad, P. Aommongkol, P. Jantaratana, N. Vittayakorn and R. Yimnirun “Investigation on ferromagnetic and ferroelectric properties of (La,K)-doped BiFeO₃-BaTiO₃ solid solution” *Ceramics International*, 39: 249–252 (2013) Impact Factor = 1.789
 123. C. Nawani, A. Rerkratn, P. Seeharaj and N. Vittayakorn “Characterization and Dielectric Properties of Nanocomposite Made of Lead Zirconate Nanofibers and Polyvinylidene Fluoride Improved with Carbon Nanotubes” *Integrated Ferroelectrics*, 149: 18–24 (2013) Impact Factor = 0.375
 124. N. Chaiyo, B. Muanghlua, Y. Wongprasert, P. Seeharaj and N. Vittayakorn “Combustion Synthesis of Lead-free Piezoelectric Alkali Metal Niobate Family” *Ferroelectrics*, 453: 26–37 (2013) Impact Factor = 0.415
 125. Chanisa Nawani, A. Rerkratn, P. Seeharaj and N. Vittayakorn “Effect of Chemical Treatment on Phase Transition of Lead Zirconate Nanofibers” *Ferroelectrics*, 450: 49–56 (2013) Impact Factor = 0.415
 126. U. Sukkha, W. Vittayakorn, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, A. Karbkaew, P. Seeharaj and N. Vittayakorn “Effect of Pb(Ni_{1/2}W_{1/2})O₃ on the Phase Transition Behavior of PbZrO₃ Ceramic” *Ferroelectrics*, 451: 30–40 (2013) Impact Factor = 0.415
 127. C. Kornphom, P. Bhupajit, N. Vittayakorn and T. Bongkarn “Fabrication of 0.62[0.75PMN-0.25PYbN]-0.38PT Ceramics Using One Step Calcination via Combustion Technique” *Ferroelectrics*, 456: 89–97 (2013) Impact Factor = 0.415
 128. P. Sittiketkorn, A. Laowanidwatana, N. Vittayakorn and T. Bongkarn “Influence of Sintering Temperature on Phase Formation, Microstructure and Dielectric Properties of Calcium and Strontium Doped BNT Ceramics Prepared via Combustion Technique” *Ferroelectrics*, 455: 54–61 (2013) Impact Factor = 0.415

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ารณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

129. R. Sumang, N. **Vittayakorn** and T. Bongkarn “The Effect of Excess PbO on Crystal Structure, Microstructure and Dielectric Properties of $(\text{Pb}_{0.50}\text{Sr}_{0.50})\text{TiO}_3$ Ceramics” *Ferroelectrics*, 456: 98–106 (2013) Impact Factor = 0.415
130. A. Prasatkhetragarn, P. Jantaratana, N. **Vittayakorn**, B. Yotburut and R. Yimnirun “Ferroelectric and Ferromagnetic Properties of K-doped $0.7\text{BiFeO}_3\text{--}0.3\text{BaTiO}_3$ Multiferroic Ceramics” *Ferroelectrics*, 451: 109–115 (2013) Impact Factor = 0.415
131. W. C. Vittayakorn, N. Pulphol, R. Roongtao, R. Muanghlua and N. **Vittayakorn** “The Influence of BMN Addition on the Phase Formation, Microstructure and Dielectric Property of BaTiO_3 Ceramic” *Ferroelectrics*, 451: 15–21 (2013) Impact Factor = 0.415
132. P. Panya, C. Wattanawikkam, A. Laowanidwatana, N. **Vittayakorn** and T. Bongkarn “Optimum Conditions for Fabrication High-Density KNN-LS-BF Ceramics by Combustion Method” *Integrated Ferroelectrics*, 148: 161–170 (2013) Impact Factor = 0.375
133. P. Sittiketkorn, P. Wongtey, N. **Vittayakorn** and T. Bongkarn “The Effect of Firing Temperatures on $(\text{Pb}_{0.75}\text{Ba}_{0.25})(\text{Zr}_{0.70}\text{Ti}_{0.30})\text{O}_3$ Ceramics Prepared via the Combustion Technique” *Integrated Ferroelectrics*, 149: 39–48 (2013) Impact Factor = 0.375
134. W. C. Vittayakorn, N. Pulphol, R. Muanghlua and N. **Vittayakorn** “Fabrication and Properties of $\text{BaTiO}_3\text{--CoFe}_2\text{O}_4$ Nanocomposites” *Integrated Ferroelectrics*, 148: 153–160 (2013) Impact Factor = 0.375
135. C. Nawanil, W. Vittayakorn, J. Prachayawarakorn and N. **Vittayakorn** “Preparation and Dielectric Properties of 3-3 Lead Zirconate/Polyvinylidene Fluoride Nanocomposite” *Ferroelectrics Letters Section*, 40: 94–100 (2013) Impact Factor = 0.613
136. S. Vuttivong and N. **Vittayakorn** “Synthesis and Morphology of KNbO_3 Powders via Hydrothermal Method” *Integrated Ferroelectrics*, 149: 25–31 (2013) Impact Factor = 0.375
137. C. Ruttanapun, B. Boonchom, N. **Vittayakorn**, A. Harnwungmoung and A. Charoenphakdee “Synthesis and Thermoelectric Properties of $\text{Cu}_{0.95}\text{Pt}_{0.05}\text{Fe}_{0.97}\text{Sn}_{0.03}\text{O}_2$ Delafossite-Oxide” *Ferroelectrics*, 453: 75–83 (2013) Impact Factor = 0.415

ารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ารณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

138. R. Baitahe, C. Kongmark, R. Muanghlua, P. Seeharaj and **N. Vittayakorn** "X-ray Absorption Spectroscopy Studies of $\text{Cu}_{(2-x)}\text{Zn}_x\text{P}_2\text{O}_7$ Binary Pyrophosphates" *Ferroelectrics*, 453: 100–105 (2013) Impact Factor = 0.415
139. W.C. Vittayakorn, D. Banjong and **N. Vittayakorn** "Processing and characterizations of $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{BaTiO}_3$ ceramic" *Advanced Materials Research*, 802: 7-11 (2013)
140. N. Pulphol, R. Muanglua, S. Niemcharoen, W. Pecharapa, W.C. Vittayakorn and **N. Vittayakorn** "Magnetoelectric properties of $\text{BaTiO}_3\text{-Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ composites prepared by the conventional mixed oxide method" *Advanced Materials Research*, 802: 22-26 (2013)
141. C. Ruttanapun, S. Kahatta, B. Boonchom, **N. Vittayakorn**, M. Thongkam, S. Kongteweelert, S. Woramongkonchai and P. Chaiyasit "Optical properties of $\text{Cu}_{0.95}\text{Pt}_{0.05}\text{Fe}_{0.97}\text{Sn}_{0.03}\text{O}_2$ for p-type transparent conducting oxide materials" *Advanced Materials Research*, 717: 15-20 (2013)
142. B. Boonchom, C. Ruttanapun, M. Thongkam, P. Chaiyasith, S. Woramongkonchai, S. Kongteweelert, **N. Vittayakorn**. "A new synthesis of BaHPO_4 precipitated by $\text{BaCO}_3\text{-H}_4\text{PO}_4\text{-NaOH}$ system at room temperature" *Advanced Materials Research*, 717: 37-43 (2013)
143. U. Sukkha, W. Vittayakorn, R. Muanghlua, S. Niemcharoen and **N. Vittayakorn** "Effect of A-site and B-site ion replaced with small ions on the intermediate phase in PbZrO_3 ceramic" *Materials Chemistry and Physics*, 143: 1517-1521 (2014) Impact Factor = 2.072
144. U. Sukkha, **N. Vittayakorn**, A. Bhalla and R. Guo "Phase transition behavior of $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ modified PbZrO_3 solid solution" *Journal of Materials Chemistry C*, 2: 2929-2938 (2014) Impact Factor = 6.01
145. R. Baitahe, **N. Vittayakorn** "Phase formation and evolution of Cu:Zn partials in binary metal pyrophosphates $\text{Cu}_{(2-x)}\text{Zn}_x\text{P}_2\text{O}_7$; $x \approx 1$ " *Thermochimica Acta*, 596, 21–28 (2014) Impact Factor = 2.105
146. R. Noonurak, **N. Vittayakorn**, W. Mekprasart, J. Sritharathikhun, W. Pecharapa "Sb-doped SnO_2 nanoparticles synthesized by sonochemical-assisted precipitation process" *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 15, 2564-2566, (2015) Impact Factor = 1.556
147. P. Bhupajit, C. Kornphom, **N. Vittayakorn**, T. Bongkarn "Structural, microstructure and electrical properties of La_2O_3 -doped $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.68}\text{K}_{0.22}\text{Li}_{0.1})_{0.5}\text{TiO}_3$ lead-free piezoelectric ceramics synthesized by the combustion technique" *Ceramics International*, 41, S81-S86, (2015) Impact Factor = 2.086

148. T. Charoonsuk, W. Vittayakorn, **N. Vittayakorn**, P. Seeharaj, S. Maensiri “Sonochemical synthesis of monodispersed perovskite barium zirconate (BaZrO_3) by using an ethanol–water mixed solvent” *Ceramics International*, 41, S87-S94, (2015), Impact Factor = 2.086
149. P. Kamkum, N. Atiwongsangthong, R. Muanghlua, **N. Vittayakorn** “Application of chicken eggshell waste as a starting material for synthesizing calcium niobate ($\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$) powder” *Ceramics International*, 41, S69-S75 (2015), Impact Factor = 2.086
150. N. Chaiyo, D. P. Cann, **N. Vittayakorn**, “Phase transition ferroelectric, and piezoelectric properties of lead-ferroelectric $x\text{BaZrO}_3-(0.25-x)\text{CaTiO}_3-0.75\text{BaTiO}_3$ ” *Ceramics International*, 41, S69-S75 (2015), Impact Factor = 2.086
151. J. Janbua, J. Mayamae, S. Wirunchit, R. Baitahe and **N. Vittayakorn** “Directed synthesis, growth process and optical properties of monodispersed CaWO_4 microspheres via a sonochemical route” *RSC Advances*, 5, 19893–19899 (2015), Impact Factor = 3.840
152. S. Wirunchit, T. Charoonsuk, **N. Vittayakorn** “Facile sonochemical synthesis of near spherical barium zirconate titanate ($\text{BaZr}_{1-y}\text{Ti}_y\text{O}_3$; BZT); perovskite stability and formation mechanism” *RSC Advances*, 5, 38061-38074 (2015), Impact Factor = 3.840
153. M. Suttapan, **N. Vittayakorn** “High Piezoelectric response in the new coexistent phase boundary of $0.87\text{BaTiO}_3-(0.13x)\text{BaZrO}_3-x\text{CaTiO}_3$ ” *Materials and Design*, Accepted (2015), Impact Factor = 3.501