บทที่ 4 วิเคราะห์ผลวิจัย

4.1 วิเคราะห์ผลการเตรียมสารตัวอย่าง

การพิจารณาดูว่าอุณหภูมิที่ใช้เผาสารมีความเหมาะสมหรือไม่นั้นมีความยุ่งยากเนื่องจากเตาหลอมทำอุณหภูมิได้จำกัด ทำได้เพียง 1100-1200 °C เท่านั้น ไม่สามารถเลือกตั้งอุณหภูมิได้หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามการเตรียมสารครั้งนี้เป็นการเพิ่มประสบการณ์ของผู้ทดลอง ผลการทดลองครั้งนี้จะเป็นข้อมูลสำหรับนำไปแก้ไขสำหรับการทำวิจัยครั้งถัดไป สารบางสารที่ผ่านการเผาบางสูตรมีลักษณะเปราะก็จะนำมาบด อัดและเผาซ้ำ

4.2 วิเคราะห์ผลการตรวจสอบเฟส

การถ่ายภาพผลึกด้วยรังสีเอกซ์หรือเทคนิค XRD เป็นวิธีการตรวจสอบเฟสของสาร สิ่งที่ได้จากภาพถ่าย XRD คือ สูตรเคมีของสาร ค่าคงที่ของโครงผลึก ระยะห่างระหว่างระนาบขนานที่ถัดกัน ระบบผลึกและแพทเทิร์น XRD (ภาพถ่ายXRD ดูในภาคผนวก)

ส่วนผสม $ZnO+0.01Nb_2O_5$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 3 เฟส คือ $ZnNb_2O_6$, ZnO และ Nb_2O_5 ZnO กับ Nb_2O_5 เกิดการรวมตัวเป็น $ZnNb_2O_6$ มี ZnO และ Nb_2O_5 ไม่รวมตัว

ส่วนผสม $ZnO+0.02TiO_2$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ ZnO และ $ZnTiO_4$ $ZnO+0.02TiO_2$ เกิดการรวมตัวเป็น $ZnTiO_4$ และมี ZnO เหลือ

ส่วนผสม $NiO+MnO_2$ รวมตัวกันกลายเป็นสารเฟสเดียว คือ $NiMn_2O_4$

ส่วนผสม $Fe_2O_3+Nb_2O_5$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสารเฟสเดียว คือ $FeNbO_4$

ส่วนผสม $SnO_2+Fe_2O_3$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ SnO_2 และ Fe_2O_3 สารทั้งสองไม่รวมกัน

ส่วนผสม $MgCO_3+Fe_2O_3$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ $MgFe_2O_4$ และ xFe_2O_3 xFe_2O_3 เป็นส่วนที่เหลือหลังการรวมตัว

ส่วนผสม $0.2MnO_2+0.8NiO+Fe_2O_3$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 3 เฟส คือ Fe_3O_4, $NiFe_2O_4$ และ $NiMn_2O_4$ (สูตรที่ต้องการ คือ $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$)

ส่วนผสม $0.5La_2O_3+CoO$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสารเฟสเดียว คือ $LaCoO_3$

ส่วนผสม Ho_2O_3+CuO เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ Ho_2O_3 และ $Cu_2Ho_2O_5$

ส่วนผสม $Bi_2O_3+Fe_2O_3$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ $BiFeO_3$ และ $Bi_2Fe_4O_9$

ส่วนผสม ZrO_2+MnO_2 เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ ZrO_2 และ Mn_3O_4 MnO_2 กลายเป็น Mn_3O_4 เนื่องจากผลของความร้อน

ส่วนผสม SnO_2+2CoO เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ $SnCo_2O_4$ และ SnO_2

ส่วนผสม $SnO_2+Cr_2O_3$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ SnO_2 และ Cr_2O_3

ส่วนผสม $BaTiO_3+0.1SrCO_3$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ $BaTiO_3$ และ $0.1SrCO_3$

ส่วนผสม $BaTiO_3+0.9ZrO_2$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ $BaTiO_3$ และ $0.9ZrO_2$

ส่วนผสม $BaTiO_3+0.01Dy_2O_3$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ $BaTiO_3$ และ $0.01Dy_2O_3$

ส่วนผสม $BaTiO_3+0.01Nb_2O_5$ เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ $BaTiO_3$ และ $0.01Nb_2O_5$

ส่วนผสม $BaTiO_3$+0.05Nb_2O_5 เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ $BaTiO_3$ และ 0.05Nb_2O_5

ส่วนผสม $BaTiO_3$+0.1Nb_2O_5 เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 2 เฟส คือ $BaTiO_3$ และ 0.1Nb_2O_5

ส่วนผสม 0.5$SrCO_3$+0.5PbO เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 1 เฟส คือ $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$

ส่วนผสม PbO+0.4ZrO_2+0.3TiO_2+0.15Y_2O_3 เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 1 เฟส คือ $Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$

ส่วนผสม 0.5$BaCO_3$+0.5PbO เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 1 เฟส คือ $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$

ส่วนผสม $BaCO_3$+0.2SnO_2+0.8TiO_2 เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 1 เฟส คือ $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$

ส่วนผสม 0.9$BaCO_3$+0.05La_2O_3+TiO_2 เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 1 เฟส คือ $(Ba_{0.9}La_{0.1})TiO_3$

ส่วนผสม 0.5$BaCO_3$+0.5ZnO+TiO_2 เมื่อผ่านการเผาพบเฟสของสาร 1 เฟส คือ $(Ba_{0.5}Zn_{0.5})TiO_3$

กรณีที่เกี่ยวกับข้อผิดพลาด เช่น ไม่ได้เฟสของสารตามที่ต้องการ หรือมีสิ่งเจือปน สิ่งเหล่านี้ล้วนแต่ยังมีข้อบกพร่องเกี่ยวกับการชั่งและอุณหภูมิการเผาสารที่เหมาะสม ความบกพร่องเหล่านี้จะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการทำวิจัยครั้งถัดไป

4.3 วิเคราะห์ผลการจัดเตรียมแผงวงจรเชื่อมต่อและเขียนโปรแกรมสำหรับการวัดและควบคุมทั่วไป

การทดสอบขั้นต้นพบว่าระบบการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นเองซึ่งประกอบด้วยแผงวงจรเชื่อมต่อที่ประกอบลงบนโปรโตบอร์ด ET-PC 8255 Card และคอมพิวเตอร์นี้สามารถวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้า แต่จากการทดลองเพิ่มเติมพบว่าระบบที่สร้างขึ้นนี้สามารถวัดกำลังไฟฟ้า เวลา อุณหภูมิ ประจุไฟฟ้า โพลาไรเซชัน สนามแม่เหล็ก ความเข้มแสง

ระบบนี้สามารถแสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสองปริมาณ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้ากับเวลา กระแสไฟฟ้ากับเวลา ความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา อุณหภูมิกับเวลา ประจุไฟฟ้ากับเวลา สนามแม่เหล็กกับเวลา ความเข้มแสงกับเวลา เสถียรภาพทางไฟฟ้ากับเวลา แรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ความต้านทานกับอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้ากับความเข้มแสง ความต้านทานไฟฟ้ากับความเข้มแสง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ความต้านทานกับแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากระบบนี้สามารถทั้งงานได้ทั้ง input และ output ดังนั้นจึงได้นำไปวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมไฟฟ้าในช่วง 25-1100 °C (รูป 3.8.4)

ระบบเชื่อมต่อนี้สามารถนำไปทดสอบสมบัติเชิงฟิสิกส์หรือปรากฏการณ์ต่างของอิเล็กโตรเซรามิกส์และสารกึ่งตัวนำได้ เช่น สมบัตินำไฟฟ้า สมบัติเอ็นทีซี สมบัติเทอร์โมอิเล็กตริก สมบัติให้ความร้อน สมบัติวาริสเตอร์ สมบัติพีทีซี สมบัติการกรองแรงดันไฟฟ้า ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์นำไฟฟ้าด้วยแสง สมบัติการเรียงกระแสของไดโอด ปรากฏการ์โฟโตโวลเตอิค เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามระบบเชื่อมต่อในขณะนี้ยังไม่สามารถวัดสัญญาณไฟฟ้าความถี่สูงเนื่องจากยังไม่ชำนาญทางด้านการเขียนโปรแกรมเพียงพอ ในอนาคตมีความต้องการให้ระบบนี้แสดงวงการล้าไฟฟ้าเฟอร์โร P-E และวงการล้าแม่เหล็กเฟอร์โร B-H ด้วย ระบบนี้จัดเป็นการควบคุมคอมพิวเตอร์และการเก็บให้ได้ข้อมูล (computer control and data acquisition) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานในด้านอื่นๆได้โดยจะขึ้นกับผู้ใช้

4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบสารให้ความร้อน

4.4.1 วิเคราะห์ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายกับอุณหภูมิของสารให้ความร้อนที่ทำได้

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $ZnO+0.01Nb_2O_5$ (รูป 3.4.1) เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้แก่สาร อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้น แต่สารมีความต้านทานลดลงในขณะร้อน แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่สารลดลงเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าลดลง สาเหตุที่แรงดันไฟฟ้าลดลงเกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้หรือจ่ายไม่เพียงพอ สารให้ความร้อนที่ทดลองมีความหนาประมาณ 2-3 mm และเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 mm แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ต่ำกว่า 220 V กระแสไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 100 mA มีความยุ่งยากที่จะเปรียบเทียบการใช้ไฟฟ้าระหว่างสารให้ความร้อนเซรามิกส์ที่เตรียมขึ้นกับสารให้ความร้อนโลหะของเตาไฟฟ้าหรือเตาหลอมไฟฟ้าซึ่งใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 V กระแสไฟฟ้าประมาณ 4-6 A เนื่องจากเตาไฟฟ้ามีขนาดใหญ่กว่า

4.4.2 วิเคราะห์ผลการวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาของสารให้ความร้อนด้วยคอมพิวเตอร์

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $ZnO+0.02TiO_2$ (รูป 3.4.2) การแสดงอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาของสารให้ความร้อนบนจอคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะตรวจสอบความสามารถในการแปลงไฟฟ้าเป็นความร้อน ผลการทดลองพบว่าสารร้อนขึ้นเร็วในขณะที่ได้รับไฟฟ้าซึ่งแสดงว่าสารสูตรที่ทดลองสามารถแปลงไฟฟ้าเป็นความร้อนได้ดี สารแสดงสมบัติให้ความร้อน ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดลองทำมาจากกาวเงิน ยังไม่ได้จัดหาขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

4.4.3 วิเคราะห์ผลการควบคุมอุณหภูมิของสารให้ความร้อนให้คงที่

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $YCrO_3$ เริ่มจากการจ่ายไฟฟ้าให้สารให้ความร้อนที่เตรียมได้แล้วใช้ LM335 วัดและควบคุมอุณหภูมิ ใช้คำสั่ง output ควบคุมการทำงานของวงจรรับรีเลย์เพื่อควบคุมสวิทช์ของรีเลย์สำหรับเปิดและปิดการจ่ายไฟฟ้าให้สารให้ความร้อน ในอัตราที่เหมาะสม ใช้คำสั่ง input รับแรงดันไฟฟ้าจากหัววัดอุณหภูมิที่ผ่านแผงวงจรเชื่องต่อ และ ET-PC8255 Card แล้วเข้าคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่เขียนขึ้นนี้จะควบคุมอุณหภูมิของสารให้ความร้อนให้คงที่ได้โดยใช้อัตราการจ่ายไฟฟ้าให้สารในอัตราที่เหมาะ (รูป 3.4.3)

แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีอุปสรรคเกี่ยวกับขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม สารให้ความร้อนที่เตรียมขึ้นยังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งสามารถใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติวัสดุศาสตร์ หรือโซลิดสเตทฟิสิกส์เท่านั้น

4.5 วิเคราะห์การทดสอบเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC

4.5.1 วิเคราะห์ผลการวัดเสถียรภาพทางไฟฟ้าเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟ (รูปที่ 3.5.1) ของสาร $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ พบว่าความต้านทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วก็มีค่าค่อนข้างคงที่แสดงว่าสารมีค่าความต้านทานค่อนข้างแน่นอนหรือไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ในระที่อุณหภูมิคงที่หรือไม่ได้รับสิ่งกระตุ้นจากภายนอก ถ้าสารนี้แสดงสมบัติเอ็นทีซีด้วย สารนี้ก็จะมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทำหัววัดอุณหภูมิ การที่สารที่เตรียมได้มีความต้านทานที่ไม่ขึ้นกับเวลาแสดงว่าสารมีเสถียรภาพทางไฟฟ้าดี

4.5.2 วิเคราะห์ผลการวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC โดยใช้โอห์มมิเตอร์และเครื่องวัดอุณหภูมิ

ความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของสาร $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ ที่ใช้วิธีโอห์มมิเตอร์ และเครื่องวัดอุณหภูมิ (รูปที่ 3.5.2) สอดคล้องตามสมการ $R = 333.94e^{-0.0296T}$ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบ (α) ที่ใช้วิธีโอห์มมิเตอร์ และเครื่องวัดอุณหภูมิ มีค่า $\alpha = -1.10$ %/°C

4.5.3 วิเคราะห์ผลการวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ด้วยคอมพิวเตอร์

ความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิที่ได้โดยวิธีที่ใช้คอมพิวเตอร์ (รูปที่ 3.5.3) ของสาร $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ สอดคล้องตามสมการ $R= 410.91e^{-0.03281}$ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบ (α) มีค่า α = –1.16 %/°C เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบระหว่างสารที่เตรียมกับเทอร์มิสเตอร์เชิงการค้าหรือสารในวารสารวิจัยได้ผลดังตารางที่ 4.5.3

ตารางที่ 4.5.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบระหว่างสารที่เตรียมกับเทอร์มิสเตอร์เชิงการค้าหรือสารในวารสารวิจัย

Sample formula	α (%/°C)
$ZnO+0.01Nb_2O_5$	-0.58
$SnO_2+Fe_2O_3$	-0.85
$MgCO_3 + Fe_2O_3$	-1.04
$Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$	-1.16
$FeNbO_4$	-1.03
$MnO+0.4CuO$	-2.10
commercial thermistor	-2.60
รายงานของ Buchanan (1991)	-1.00 ถึง -6.00

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบของสารที่เตรียมกับเทอร์มิสเตอร์สูตรอื่นๆ เทอร์มิสเตอร์เชิงการค้าหรือเทอร์มิสเตอร์ในวารสารวิจัยปรากฏว่าได้ผลใกล้เคียงกัน

4.5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิด้วยคอมพิวเตอร์

พิจารณาค่าคลาดเคลื่อนการวัดของหัววัดอุณหภูมิที่ทำได้ของสาร $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ ซึ่งก็คือ เปอร์เซนต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจริงกับอุณหภูมิที่วัดโดยใช้คอมพิวเตอร์เฉลี่ยของระบบการวัดอุณหภูมิในช่วง 25 °C ถึง 170 °C มีค่าประมาณ –2.51% ถึง + 1.63%

4.5.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิด้วยคอมพิวเตอร์

4.5.5.1 ย่านอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$

อุณหภูมิที่ตั้ง = 100 °C

อุณหภูมิเฉลี่ยที่คอมพิวเตอร์ควบคุมได้ = 99.27-101.23 °C

แสดงว่าเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC สามารถทำหน้าที่เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิด้วยคอมพิวเตอร์ในย่านสูงกว่าอุณหภูมิห้องได้

สารที่เตรียมได้ทำงานในลักษณะที่เป็นหัววัดสัญญาณป้อนกลับในระบบควบคุมอุณหภูมิเกินในย่านอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องได้

4.5.5.2 ย่านอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$

เมื่อตั้งอุณหภูมิ 0 °C พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่คอมพิวเตอร์ควบคุมได้อยู่ในช่วง 0.72 ถึง 0.45 °C

เมื่อตั้งอุณหภูมิ -20 °C พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่คอมพิวเตอร์ควบคุมได้อยู่ในช่วง -25.13 ถึง -23.67 °C

เมื่อตั้งอุณหภูมิ -50 °C พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่คอมพิวเตอร์ควบคุมได้อยู่ในช่วง -50.86 ถึง -50.37 °C

แสดงว่าเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC สามารถทำหน้าที่เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิด้วยคอมพิวเตอร์ในย่านต่ำกว่าอุณหภูมิห้องได้

สารที่เตรียมได้ทำงานในลักษณะที่เป็นหัววัดสัญญาณป้อนกลับในระบบควบคุมอุณหภูมิเกินในย่านอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องได้

4.5.6 วิเคราะห์ผลการประยุกต์ของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ให้ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ความเย็น

เมื่อเลื่อนสาร $LaCoO_3$ เข้าหาไนโตรเจนเหลวเพื่อลดอุณหภูมิของสาร ความต้านทานของสารเพิ่มขึ้น วงจรรีเลย์จะเปลี่ยนสถานะการทำงาน เกิดการปิดปิดสวิทช์ เป็นการแสดงให้เห็นว่าสารนี้สามารถทำหน้าที่เป็นสวิทช์ความเย็นได้

4.6 วิเคราะห์การทดสอบเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC

4.6.1 วิเคราะห์ผลการวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC

สารที่ 1 : $Bi_2O_3+Fe_2O_3$ มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นบวก (α) เท่ากับ +183.24 %/°C ความต้านทานสูงสุดไฟฟ้ามีค่า 22.24 MΩ ที่ 110 °C อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสมีค่า 60 °C (รูป 3.6.1ก)

สารที่ 2 : ZrO_2+MnO_2 มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นบวก (α) เท่ากับ +7.08 %/°C ความต้านทานไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 9.08 MΩ ที่ 130 °C อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสมีค่า 90 °C (รูป 3.6.1ข)

ความต้านทานไฟฟ้าสูงสุดของสาร $Bi_2O_3+Fe_2O_3$ มีค่ามากกว่าสาร ZrO_2+MnO_2 อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของสาร $Bi_2O_3+Fe_2O_3$ มีค่าน้อยกว่า ZrO_2+MnO_2 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นบวก (α)ของสาร $Bi_2O_3+Fe_2O_3$ มีค่ามากกว่าสาร ZrO_2+MnO_2 แสดงว่าสารของสาร $Bi_2O_3+Fe_2O_3$ มีค่าความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิมากกว่าสาร ZrO_2+MnO_2

ผลเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นบวกระหว่างสารที่เตรียมกับสารในวารสารวิจัยแสดงดังตารางที่ 4.6.1

ตารางที่ 4.6.1 ผลเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นบวกระหว่างสารที่เตรียมกับสารในวารสารวิจัย

Sample formula	α value (%/°C)
$Ho_2O_3+Cu_2Ho_2O_5$	+64.38
$BaTiO_3+0.01Dy_2O_3$	+1.52
$BaTiO_3 + 0.10Nb_2O_5$	+5.6
$(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$	+ 21.08
$Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$	+9.75
$(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$	+130.58
$Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$	+8.52
$Bi_2O_3+Fe_2O_3$	+183.24
ZrO_2+MnO_2	+7.08
SnO_2+2CoO	+18.2
$SnO_2+Cr_2O_3$	+28.6
$BaTiO_3$ (Buchanan)	+10 ถึง +100

สาเหตุที่ความต้านทานเพิ่มขึ้นคาดว่าเกิดจากขอบเขตของเกรนจับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลดลง กระแสไฟฟ้าลดลง ความต้านทานไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นในลักษณะแบบเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในสารกลุ่ม $BaTiO_3$ ที่รายงานโดย Buchanan[2] ปรากฏการณ์พีทีซีเหล่านี้มีความสอดคล้องกับที่รายงานโดย Padmini, Horng-Yi Chang และ Nari[6,7,8] แต่ความต้านทานที่ลดลงเกี่ยวข้องกับโครงสร้างแถบพลังงาน ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจะย้ายจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ มีอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้น จำนวนอิเล็กตรอน (สารชนิด n) หรือจำนวนโฮล (สารชนิด p) ที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความต้านทานจึงมีค่าลดลง ปรากฏการณ์ พีทีซีที่เกิดขึ้นมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้เป็นหัววัดอุณหภูมิ

4.6.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบของเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC ให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ

การจัดเตรียมเพื่อทดสอบของเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC ให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมินั้นมีความยุ่งยากประการหนึ่ง คือ การที่สารมีความต้านทานสูง (รูป 3.6.2.2) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านสารแล้วพบว่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่อ่านบนจอคอมพิวเตอร์จะมีการสั่นเล็กน้อยเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารมีค่าน้อย แต่อย่างไรก็ตามก็แก้ไขได้คร่าวๆโดยใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบอิเล็กโตรไลติกขนาดความจุ 1 μF ย่านอุณหภูมิที่สาร $Bi_2O_3+Fe_2O_3$ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นหัววัดอุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 65 °C ส่วนย่านอุณหภูมิที่สาร ZrO_2+MnO_2 สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นหัววัดอุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 85 °C สาเหตุที่แสดงการประยุกต์เป็นหัววัดอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิที่แถบๆเพราะเป็นย่าน PTC ซึ่งความต้านทานเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการ

ประยุกต์นี้เพิ่งจำลองทำเป็นครั้งแรก ช่วงอุณหภูมิการทำงานของหัววัดจะแคบ สารมีความต้านทานสูงซึ่งยากต่อการติดตั้งหัววัด การทดสอบในกรณีนี้ยังต้องมีการพัฒนาต่อไป

4.7 วิเคราะห์การทดสอบตัวเก็บประจุไฟฟ้า

4.7.1 วิเคราะห์ผลการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้าสลับ

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $BaTiO_3$+0.01Dy_2O_3 (รูป 3.7.1) การที่อิมพีแดนซ์ของสารลดลงในขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้นเป็นการแสดงให้เห็นว่าสารแสดงสมบัติการกรองแรงดันไฟฟ้าความถี่สูง การที่ความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้นแสดงว่าสารยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านตัวมันได้มากที่ความถี่สูง ความจุไฟฟ้าของสารที่ความถี่แต่ละค่าสามารถนำไปใช้ออกแบบวงจรในกรณีที่นำสารไปทำเป็นอุปกรณ์ใช้งานที่ความถี่เหล่านั้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 100 kHz พบว่าตัวประกอบการสูญเสียมีค่าน้อยและตัวประกอบคุณภาพมีค่ามาก พลังงานไฟฟ้ามีการสูญเสียน้อยที่ความถี่สูง(100 kHz)เป็นการแสดงให้เห็นว่าสารมีแนวโน้มนำใช้งานได้ที่ความถี่ย่านนี้ ตัวประกอบคุณภาพใช้พิจารณาคุณภาพของสารที่ความถี่แต่ละค่า สมบัติไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้าสลับนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบสำหรับกรณีที่ให้สารอยู่ในวงจรไฟสลับที่ความถี่ต่างๆ เช่น ใช้ทำเป็นอุปกรณ์กรองแรงดันความถี่สูงผ่าน อุปกรณ์การเลื่อนเฟส ตัวเก็บประจุไฟฟ้าความถี่สูงและอุปกรณ์แปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น

4.7.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบทดสอบอุปกรณ์กรองแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงผ่าน

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $BaTiO_3$+0.01Dy_2O_3 (รูป 3.7.2) สารสามารถกรองแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง 50 kHz ถึง 100 kHz ได้ดี สารสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กรองแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงผ่าน

4.7.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบการเลื่อนเฟสของสาร

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $BaTiO_3$+0.01Dy_2O_3 (รูปที่ 3.7.3) ภาพของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารที่เตรียมได้ปรากฏขึ้นตามหลังภาพของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานกับเป็นการแสดงให้เห็นว่าสารทำหน้าที่เลื่อนเฟสของแรงดันไฟฟ้าได้ สารสามารถนำไปทำเป็นอุปกรณ์เลื่อนเฟสในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

4.7.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบการเก็บประจุและคายประจุไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์

สารที่ 1 เป็น $Ba_{0.9}La_{0.1}TiO_3$ สารที่ 2 เป็น $(Ba_{0.5}Zn_{0.5})TiO_3$ (รูป 3.7.4) เมื่อพิจารณาภาพที่แสดงการเก็บและคายประจุของสารที่เตรียมได้ของสารทั้งสองที่เห็นบนจอคอมพิวเตอร์พบว่าช่วงเวลาการเก็บประจุจะน้อยกว่าช่วงเวลาการคายประจุ ลักษณะดังกล่าวเป็นการแสดงถึงสารสามารถนำไปประยุกต์เป็นสารไดอิเล็กตริกในตัวเก็บประจุไฟฟ้า

4.7.5 วิเคราะห์ผลการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้าไปใช้ในวงจรออสซิลเลเตอร์

เมื่อพิจารณาภาพของแรงดันไฟฟ้าบนจอออสซิลโลสโคปเมื่อใช้สารที่เตรียมได้และใช้ตัวเก็บประจุเชิงการค้าในวงจรออสซิลเลเตอร์ (รูป 3.7.5) พบว่าสารที่เตรียมได้สามารถทำให้วงจรออสซิลเลเตอร์สร้างแรงดันไฟฟ้าได้ในลักษระเดียวกันกับที่ใช้ตัวเก็บประจุเชิงการค้า แต่ต่างกันที่ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่วงจรสร้างได้

4.7.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติวาริสเตอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $BaTiO_3$ + 0.10Nb_2O_5 (รูป 3.7.6) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารกับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมพบว่าคล้ายกันกับของวาริสเตอร์ เลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้นของสารมีค่า 17.8 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าของวาริวเตอร์เชิงการค้าที่มีค่าอย่างน้อย 30

4.7.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

สารที่ทดสอบ คือ สารที่ 1 เป็น $Ba_{0.9}La_{0.1}TiO_3$ สารที่ 2 เป็น $(Ba_{0.5}Zn_{0.5})TiO_3$ (รูป 3.7.7) เมื่อพิจารณาเส้นกราฟพบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารเพิ่มขึ้น ความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะดังกล่าวแสดงถึงสมบัติเก็บประจุไฟฟ้า ดังนั้นสารจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า

4.7.8 วิเคราะห์ผลการทดสอบการแยกแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากแรงดันไฟฟ้าความถี่ผสมระหว่างความถี่ต่ำกับความถี่สูง

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $BaTiO_3$+0.01Dy_2O_3 (รูป 3.7.8) เมื่อสังเกตภาพที่ได้พบว่าแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงจะผ่านได้ดีตามเส้นทางที่มีสารที่เตรียมได้ต่ออยู่ ส่วนแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำจะผ่านได้ดีตามเส้นทางที่มีตัวต้านทานไฟฟ้าค่าคงที่ต่ออยู่ สารจึงสามารถแยกแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากแรงดันไฟฟ้าความถี่ผสมระหว่างความถี่ต่ำกับความถี่สูงได้ ดังนั้นสารมีแนวโน้มพัฒนาต่อไปเพื่อให้ทำหน้าที่แยกความถี่ของภาพออกจากความถี่ของเสียงในเครื่องรับโทรทัศน์

4.7.9 วิเคราะห์การทดสอบเป็นตัวเก็บประจุความถี่สูง

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $BaTiO_3$+0.01Dy_2O_3 (รูป 3.7.9) เนื่องจากสารสามารถกรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบที่ความถี่ประมาณ 500 kHz ดังนั้นสารจึงทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบในแหล่งจ่ายไฟฟ้าความถี่สูง

4.7.10 วิเคราะห์ผลการทดสอบผลของสนามไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของตัวเก็บประจุ

สารที่ทดลองมีมูตรเป็น $BaTiO_3$+0.01Nb_2O_5 (รูปที่ 3.7.10) เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่าสารแสดงสมบัติพีทีซีก่อนโพลิงและแสดงสมบัติเอ็นทีซีหลังโพลิง ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าแรงสูงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของสารจาก PTC ไปเป็น NTC ได้พบโดยบังเอิญในขณะทดลองเกี่ยวกับการทำโพลิงซึ่งต้องการผลเพื่อนำไปใช้กับสารเพียโซอิเล็กตริก ส่วนการประยุกต์ใช้นั้นยังต้องศึกษาต่อไป

4.7.11 วิเคราะห์ผลการทดสอบการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่

สารที่ทดลองมีสูตรเป็น $Ba_{0.9}La_{0.1}TiO_3$ และ $(Ba_{0.5}Zn_{0.5})TiO_3$ (รูป 3.7.11.2) พิจารณาผลการทดสอบสมบัติการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าและการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ของสาร ผลการทดลองเกี่ยวกับการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่มีแนวโน้มนไปประยุกต์ทำเป็นหัววัดความถี่สำหรับวัดความถี่ของแรงดันไฟฟ้า

4.8 วิเคราะห์ผลการจัดเตรียมเตาหลอม

ผลการจัดเตรียมเตาหลอมและระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมที่เคยแสดงในรูปที่ 3.8.4 เมื่อแผงวงจรเชื่อมต่อและ ET-PC8255 Card กับ เตาหลอม ทำการควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมให้มีความร้อนขึ้นเรื่อย เมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น จนถึงอุณหภูมิจะสูงขึ้นจนถึง 1100 C^0 แล้วอุณหภูมิจะคงที่ คือจะขึ้นไปถึง 1100 C^0 แล้วลดลงมาเป็น 1095C^0 เป็นอย่างนี้เรื่อยๆ เมื่อนำสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลามาพิจารณา พบว่าความชันของเส้นกราฟ คือ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเตาหลอม ระบบเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่เรียนขึ้นสามารถควบคุมและวัดอุณหภูมิได้ อุณหภูมิสูงสุดที่เตาทำได้ คือ

1100 °C เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาสอดคล้องตามสมการ T = 9.5463t+154.5 พบว่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเตาหลอมที่ทดลองได้มีค่า 9.54 °C/min

แต่อย่างไรก็ตามการจัดเตรียมเตาหลอมโดยเน้นใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานนั้นยังเป็นเพียงความพยายามที่จะทำ ไม่ใช่มืออาชีพ ผู้ทดลองยังต้องหาประสบการณ์เพิ่ม ยังต้องมีการพัฒนาต่อไป ผลที่ได้คิดว่าสามารถนำไปเตรียมสารได้ถ้าไม่มีเตาหลอมสำเร็จรูปอยู่