บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

1.1.1 ความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย

อิเล็กทรอนิกส์เซรามิกส์ (electronic ceramics) มีหลายชนิด ตัวอย่างเช่น สารให้ความร้อน (heating element) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าเป็นความร้อน ใช้ทำเป็นสารให้ความร้อนในเตาอบและเตาเผา เทอร์มิสเตอร์แบบเอ็นทีซี (NTC thermistor) ทำหน้าที่แปลงอุณหภูมิเป็นความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลง ใช้ทำหัววัดอุณหภูมิ (temperature sensor) และ สวิทช์ความร้อน (thermal switch) เทอร์มิสเตอร์แบบพีทีซี (PTC thermistor) ทำหน้าที่แปลงอุณหภูมิเป็นความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ใช้ทำหัววัดอุณหภูมิ อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน (overcurrent protector) และ อุปกรณ์ป้องกันอุณหภูมิเกิน (overtemperature protector) ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบ กรองแรงดันความถี่สูงผ่าน (high pass filtering) และ แปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า (frequency to voltage conversion) เซรามิกส์เหล่านี้มีความสำคัญต่อจุดลาหกรรมของประเทศ

1.1.2 ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้มีการเรียนการสอนเกี่ยวกับวัสดุศาสตร์มาหลายปีแล้ว แต่วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดสอบสารยังไม่สมบูรณ์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องจัดเตรียมชุดทดสอบวัสดุสำหรับบริการนักศึกษาและต้องการค้นหาสมบัติเชิงฟิสิกส์ที่แปลกใหม่ด้วย การเรียนการสอนส่วนใหญ่หนักไปทางด้านทฤษฎี จึงมีความต้องการที่จะแสดงทฤษฎีที่เรียนออกมาให้เป็นรูปธรรมที่สามารถปฏิบัติได้โดยอาศัยงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้กันในประเทศล้วนแต่ซื้อมาจากต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยนี้น่าจะช่วยแก้ปัญหาซึ่งจะลดการนำเข้าทางด้านเทคโนโลยี สูตรของสารที่จะเตรียมมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ขาดสารเคมี สมบัติเชิงฟิสิกส์ที่ค้นได้จากการสารวิจัยมีเป็นจำนวนมาก แต่กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ไม่มาก จึงมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดสอบ สิ่งที่มีความจำเป็นต้องทำในขณะนี้คือ การเตรียมและทดสอบสารแล้วประยุกต์เป็นอุปกรณ์

1.2 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 สารให้ความร้อน

สารให้ความร้อน (heating element) เป็นสารที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ดี อุปกรณ์ให้ความร้อนใช้ทำขดลวดของเตาหลอม (furnace element) เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าพบว่าสามารถแบ่งอุปกรณ์ให้ความร้อนเป็น 2 กลุ่ม ด้วยกัน ดังนี้ (Moulson และ Herbert, 1990)

1) อุปกรณ์ให้ความร้อนที่มีความต้านทานต่ำ(lowly resistive element) ซึ่งต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันต่ำ (low voltage power supply)
2) อุปกรณ์ให้ความร้อนที่มีความต้านทานสูง (highly resistive element) ซึ่งต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง (high voltage power supply)

ตัวอย่างของสารให้ความร้อน อาทิเช่น SiC (1650 °C), $MoSi_2$ (1500 °C), $LaCrO_3$ (1500 °C), ZrO_2 (1800 °C) และ SnO_2+ $0.01Sb_2O_3$

กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสารให้ความร้อนมีดังนี้

Das Gupta (1996) ในประเทศแคนาดา ได้รายงานว่าถึงสารที่ใช้ทำสารให้ความร้อนซึ่งได้แก่ $MoSi_2$, SiC, graphite และ $BaTiO_3$

Reznikov (1997) ได้สร้างตัวควบคุมอุณหภูมิที่โปรแกรมได้จากไมโครโปรเซสเซอร์ สำหรับใช้งานกับเตาหลอมไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

Kaliyugavaraden (1997) ในประเทศอินเดีย ได้พัฒนาตัวควบคุมอุณหภูมิของสารให้ความร้อนที่โปรแกรมได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้หัววัด RTD (temperature dependent resistor)

Pelissier (1998) ในประเทศฝรั่งเศสได้ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพการนำความร้อนของสารให้ความร้อนที่ทำมาจากซิลิกอนคาร์ไบด์

Ogawa (1998) ในประเทศญี่ปุ่น ได้สร้างฟิล์มบาง $BaTiO_3$ แล้วประยุกต์ใช้เป็นแผ่นความร้อนที่สามารถให้ความร้อนสม่ำเสมอ

Ciefi (2000) ในประเทศอิตาลี ได้ออกแบบเตาอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิเสถียรภาพสูง

Hayashi (2001) ในประเทศญี่ปุ่น ได้เตรียมฟิล์มบางของ $LaCrO_3$-Ca โดยมีขั้วเป็น Pt และหาลักษณะสมบัติการให้ความร้อน (heating characteristics) ความต้านทานของฟิล์มบางให้ความร้อนมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ และ อุณหภูมิให้ความร้อนสูงสุด 1100 °C

Meier (2001) ในประเทศอังกฤษ ได้ศึกษาสารให้ความร้อนที่ทำมาจากเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC ซึ่งสามารถทำงานที่อุณหภูมิเกือบคงที่

1.2.2 เทอร์มิสเตอร์แบบเอ็นทีซี

เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC มีความต้านทานไฟฟ้าลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เทอร์มิสเตอร์แบบนี้จะมี NTCR สูง NTCR ย่อมาจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ (negative temperature coefficient of resistance) หรือ ค่า α (Moulson และ Herbert, 1990) ความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ที่มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไปเกิดจากผลของลักษณะสมบัติอินทรินซิค(intrinsic characteristics)

สารที่ใช้ทำเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ลักษณะสมบัติเชิงไฟฟ้าของหัววัดถูกกำหนดโดยสูตรเป็น $\rho = RA/L$ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (material resistivity) R เป็นความต้านทาน (resistance) A เป็นพื้นที่ยังผล (effective area) และ L เป็นความหนาของสาร สภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังสมการ

$$\rho(T) = \rho_\alpha \exp(B/T)$$

เมื่อ $\rho(T)$ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ T ใด ρ_α เป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และ B เป็นค่าคงที่ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ใช้ไปเพื่อให้อิเล็กตรอนนำกระแส เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของสมการบนจะได้ค่า α ซึ่งเป็น NTCR value

$$\alpha = (1/\rho)(d\rho/dT) = (1/\rho_{T_{room}})(\rho_2-\rho_1)/(T_2-T_1)$$

เมื่อ ρ_1 และ ρ_2 เป็นความต้านทานที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2 ตามลำดับ T_{room} เป็นอุณหภูมิห้อง สภาพการนำ

ไฟฟ้าของสารเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนและไอออนบวก-ไอออนลบของอะตอมและเกี่ยวข้องกับช่องว่างแถบพลังงานของสาร

ตัวอย่างสูตรของสารสำหรับเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ได้แก่ Fe_3O_4-$ZnCr_2O_4$, Fe_3O_4-$MgCr_2O_4$, $(NiMn)_3O_4$, $(NiMnCo)_3O_4$, $(NiMnFeCo)_3O_4$, $(Fe,Ti)_2O_3$, 0.56MnO + 0.08CoO + 0.16NiO + 0.20CuO, และ $Mn_xCo_{3-x}O_4$ (Buchanan, 1991) เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC สามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นหัววัดอุณหภูมิ (temperature sensor), หัววัดการไหลของความร้อน (heat flow sensor), หัววัดการแผ่รังสี (radiation sensing sensor), หัววัดสุญญากาศ (vacuum gauge), หัววัดความดัน (pressure gauge) และหัววัดการชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensation sensor)

กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC มีดังนี้

Soliman (1993) ในประเทศอียิปต์ ได้ศึกษาเทอร์มิสเตอร์ในทางการค้าซึ่งเตรียมมาจากส่วนผสมของ NiO, Mn_2O_3 และ Co_2O_3 แล้ววัดความต้านทานของสารที่อุณหภูมิต่างๆ

Martinez Sarrion (1995) ในประเทศสเปน ได้เตรียม $Fe_{2.16}Mn_{0.21}Ni_{0.61}O_4$ ซึ่งเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC สารสูตรนี้อยู่ในกลุ่มเพอร์โรฟ์ วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ส่วนผสมต่างๆ ศึกษาเสถียรภาพทางไฟฟ้า (electrical stability) โดยการวัดการแปรค่าความต้านทานกับเวลา

Fruhwirth (1997) ในประเทศออสเตรีย ได้รายงานว่าขั้วไฟฟ้าที่ทำจาก Ag สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C และได้ทำการวัดพบว่าเกิดชั้นกำแพง (barrier layers) ระหว่างขั้ว Ag กับ เซรามิกส์แบบ NTC

Dziedzic (1997) ในประเทศโปแลนด์ ได้บรรยายเกี่ยวกับหัววัดอุณหภูมิแบบฟิล์มบางที่ทำงานโดยอาศัยหลักของความต้านทาน จากสาร $Mn_{1.8}Co_{0.9}Ni_{0.35}Ru_{0.25}O_4/RuO_2$/glass ซึ่งสามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 400 °C

Adalbert Feltz (2000) ในประเทศออสเตรีย ได้เตรียมสาร $Fe_xNi_yMn_{1-x-y}O_4$ เพื่อใช้งานเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ที่อุณหภูมิสูง

Chanel (2000) ในประเทศฝรั่งเศส ได้เตรียมสาร $Mn_{2.23-x}Ni_{0.66}Zn_xO_4$ ศึกษาสมบัติ NTC สำหรับประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

Hosseini (2000) ในประเทศอิหร่าน ได้ศึกษาผลของ Ni ที่มีต่อสมบัติไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ที่สร้างมาจากส่วนผสมของ $(Ni_xMn_yCo_z)O_4$

Wenzhong Lu ในประเทศจีน ได้เตรียม $Ba(Sn,Sb)O_3$+Bi_2O_3 ได้วัดสภาพการนำไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ พบว่าสารแสดงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่เป็นลบแบบเชิงเส้นในช่วง 0-250 °C และสามารถปรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ Bi_2O_3

Lawton (2000) ในประเทศสหรัฐ ได้สร้างระบบควบคุมแบบหลายวงเพื่อสร้างเสถียรภาพของอุณหภูมิ ทำได้โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายไปยังตัวให้ความร้อนแบบขดลวด (coil heater) และใช้เทอร์มิสเตอร์ที่ต่อวงจรในรูปของ DC bridges เพื่อให้เกิดสัญญาณป้อนกลับ (feedback signals)

Schmidt (2001) ในประเทศอังกฤษ ได้ทำเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC แบบฟิล์มบางจากวัสดุ $NiMn_2O_4$ ได้วัดความต้านทานไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและพบว่ากลไกการนำไฟฟ้าสอดคล้องกับแบบจำลอง-โฮปปิ้ง (hopping model)

Basu (2001) ในประเทศอังกฤษ ได้ศึกษาลักษณะสมบัติ NTC ของเซรามิกส์ที่ทำมาจาก Bi_2O_3 ที่ถูกเติมด้วย TiO_2, Ta_2O_5 และ WO_3 ในช่วงอุณหภูมิ 100-700 °C

Jansak (2001) ในประเทศสโลวาเกียได้พบว่าหัววัดอุณหภูมิที่ทำงานโดยอาศัยหลักการของความจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุที่ผลิตใช้งานในทางการค้ามีความไวมากในย่านไนโตรเจนเหลว

Dipika Saha (2002) ในประเทศอินเดีย ได้เตรียม $(Mn_xFe_{1-x})_2O_3$ และวัด NTC sensitivity index (β)

Gutierrez (2002) ในประเทศสเปน ได้เตรียมสาร $YNi_xMn_{1-x}O_3$ พบว่าสารแสดงพฤติกรรมกึ่งการนำไฟฟ้าและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC

1.2.3 เทอร์มิสเตอร์แบบพีทีซี

ในปี 1833 ฟาราเดย์ (Faraday) ได้ค้นพบและรายงานเกี่ยวกับพฤติกรรมกึ่งการนำไฟฟ้า (semiconducting behaviour) ของ Ag_2S ต่อมาในปี1940 ได้มีผู้นำหัววัดอุณหภูมิที่ทำมาจากเซรามิกส์ไปใช้ในทางการค้าและมีการผลิตเป็นอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวางในปี 1950-1960 (Moulson และ Herbert, 1990)

เทอร์มิสเตอร์ คือ ตัวต้านทานที่มีความต้านทานเปลี่ยนแปลงในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไป เทอร์มิสเตอร์เป็นตัวต้านทานที่ไวต่อความร้อน (thermally sensitive resistor) ซึ่งมีชื่อย่อเป็น TSR เทอร์มิสเตอร์ที่จะศึกษานี้เป็นแบบ PTC เทอร์มิสเตอร์แบบ PTC มีชื่อเรียกอย่างอื่น อาทิเช่น ตัวต้านทานแบบ PTC (PTC resistor)และตัวต้านทานอุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature resistor) เทอร์มิสเตอร์แบบนี้จะมี PTCR สูง P TCR ย่อมาจากสัมประสิทธ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นบวก (positive temperature coefficient of resistance)หรือค่า α (Buchanan, 1991) ค่า PTCR มีความเกี่ยวข้องกับจุดคูรีของเฟอร์โรอิเล็กตริก (ferroelectric Curie point) หรืออุณหภูมิ (Curie temperature, T_c) อุณหภูมิคูรีมีชื่อเรียกอย่างอื่นเป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนย้ายเฟอร์โรอิเล็กตริกมาเป็นพาราอิเล็กตริก (ferroelectric-paraelectric transition temperature) อุณหภูมิคูรีเกี่ยวข้องกับโครงสร้างจุลภาค (microstructure)

ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไปเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงของโครงผลึกและของการเปลี่ยนแปลงสมบัติอิเล็กทรอนิกส์(electronic properties)ที่ขอบเขตของเกรนซึ่งส่งผลทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มในช่วงอุณหภูมิแคบๆ PTC effect เกิดจากความต้านทานในบริเวณขอบเขตของเกรน (grain boundary region) ซึ่งจะเพิ่มขึ้นแบบเอกโปเนนเชียลตามอุณหภูมิที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิคูรี ปรากฏการณ์นี้เป็นผลจากการลดลงอย่างรวดเร็วของสภาพซ่อนไหวทางไฟฟ้าเหนืออุณหภูมิคูรี รายละเอียดของการเกิดปรากฏการณ์ PTC สามารถอธิบายได้ดังนี้ สถานะผู้รับอิเล็กตรอน (electron acceptor states) ในขอบเขตของเกรน (grain boundary)และสถานะผู้ให้ที่ถูกไอออไนซ์ (ionized donor states) ทำให้เกิดชั้นสองชั้นทางไฟฟ้า (electrical double layer) อิเล็กตรอนในแถบการนำ (conduction band electrons) ภายในเกรน (grain) จะเคลื่อนที่ไปที่ขอบเขตของเกรน ปรากฏการณ์

PTC สามารถนำไปประยุกต์เป็นหัววัดอุณหภูมิ (temperature sensor) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของความต้านทานเหนือจุดคูรี

$BaTiO_3$ เป็นสารกึ่งตัวนำแบบเฟอร์โรอิเล็กตริก (ferroelectric semiconductor) และแสดงปรากฏการณ์ PTC อุณหภูมิคูรีของ $BaTiO_3$ มีค่า 120-130 °C อุณหภูมิคูรีมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของตัวโด๊ป การเติมตัวโด๊ปลงไปผสมกับ $BaTiO_3$ ทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม PTC ก็จะเปลี่ยนแปลง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารแสดงดังสมการ

$$\varepsilon_r = C / (T-\theta)$$

ลักษณะสมบัติเชิงไฟฟ้าของหัววัดถูกกำหนดโดยสูตร $\rho = RA/L$ ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (material resistivity) R เป็นความต้านทาน (resistance) A เป็นพื้นที่ยังผล (effective area) และ L เป็นความหนาของสาร α ซึ่งเป็น PTCR value แสดงดังสมการ

$$\alpha = (1/\rho)(d\rho/dT)$$

สภาพการนำไฟฟ้าของสารเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนและไอออนบวก-ไอออนลบของอะตอมและเกี่ยวข้องกับช่องว่างแถบพลังงานของสาร

สาร ที่ใช้ทำ PTC thermistor ได้แก่ $BaTiO_3 + 0.01La_2O_3$ (BLT), $BaTiO_3 + 0.01 Y_2O_3$ $BaTiO_3 + 0.01Nb_2O_5$, $BaTiO_3 + 0.01Ta_2O_3$ และ $BaTiO_3 + 0.01Sb_2O_3$

เทอร์มิสเตอร์แบบ PTC สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดังนี้

หัววัดอุณหภูมิ (temperature sensor) ตัวทำความร้อนอุณหภูมิคงที่ (constant temperature heater หรือ PTC heater) ตัวทำอากาศร้อนสำหรับเป่าผม (honeycomb air heater หรือ hair dryer) ตัวทำเป็นไอของน้ำมันในรถยนต์ (auto fuel evaporator) อุปกรณ์จำกัดกระแสไฟฟ้า (current limiter) อุปกรณ์ตั้งเวลาในวงจร (circuit timer) หัววัดสำหรับป้องกันมอเตอร์ (sensor for motor protection) อุปกรณ์ช่วยสตาร์ต-มอเตอร์ (motor start assist) และวัสดุอุณหภูมิสูง (high temperature material)

กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC มีดังนี้

Klaus Dostert (1983) ได้รายงานว่าเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC สามารถทำงานในลักษณะของเทอร์โมสตัท และประยุกต์ใช้งานสำหรับวัดการไหลของความร้อนและปริมาณความร้อน

Issa (1992) ได้เตรียม $BaTiO_3$+0.4 mol%Ho_2O_3 วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ตัวประกอบการสูญเสียที่ขึ้นกับความถี่และอุณหภูมิคูรี เพื่อศึกษา PTCR effect

Masalu Miyayama (1992) ในประเทศญี่ปุ่น ได้เตรียม $(Ba_{1-x}Sr_x)(Nb_{0.003}Ti_{0.997})O_3$ + 1 mol% TiO_2 + 0.07 mol% MnO (x=0, 0.2) ทำขั้วด้วยกาวเงิน วัดความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆและประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดรังสีอินฟราเรด

Padmini (1994) ในประเทศอินเดีย ได้เตรียม $BaTiO_3$ + 0.3 at% Nb_2O_5 ;$BaTiO_3$ + 0.3 at% Nb_2O_5 + 0.2 at% Bi_2O_3 วัดความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับปริมาณของตัวโด๊ปและความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิ

Horng-Yi Chang (1997) ในประเทศไต้หวัน ได้เตรียม $(Sr_{0.2}Ba_{0.8})TiO_3$ ทดสอบสารเพื่อแสดง PTC effect และวัดอุณหภูมิคูรี (T_c)

Wang (1997) ในประเทศจีน ได้เตรียม $(Sr,Pb)TiO_3$ วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ วัดอุณหภูมิคูรี และคำนวณค่า PTCR หรือ α

Shibagaki (1997) ในประเทศญี่ปุ่น ได้เตรียม Ca-doped $SrTiO_3$ capacitor วัดค่า α

Xue (1997) ในประเทศจีน ได้เตรียม MnO-doped $BaTiO_3$ โดยใช้สาร Al_2O_3,SiO_2 เป็นสารช่วยซินเตอริง พบว่าประสิทธิภาพ PTC ของสารมีค่าสูงสุด

Igor (1999) ในประเทศสโลเวเนีย ได้พบ PTCR effect ใน TiO_2-doped $BaNb_2O_6$ พบว่าสารแสดง PTCR effect ในช่วง 70-300 °C

Al-Shahran (2000)ในประเทศซาอุดิอราเบีย ได้เตรียม Ho-doped $BaTiO_3$ ceramics พบว่าอุณหภูมิคูรี อยู่ที่ 110 °C

He (2000) ในประเทศสิงกะโปร์ ได้รายงานถึงการนำ PTC effect ที่ถูกพบในสาร Cr/$(Ba,Pb)TiO_3$ ไปประยุกต์ใช้ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน (overcurrent protection) ได้ใช้ structural model อธิบาย PTC effect

Meier (2001) ในประเทศอังกฤษ ได้พบว่าเทอร์มิสเตอร์แบบ PTC สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ป้องกันอุณหภูมิเกิน (overtemperature protectors)

Jingchang (2002) ในประเทศจีน ได้เตรียม(Y, Mn) co-doped $Sr_{0.5}Pb_{0.5}TiO_3$ thermistors แล้วศึกษา PTCR effect

1.2.4 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

การค้นพบไฟฟ้าเฟอร์โรใน $BaTiO_3$ ในปี 1940 นำไปสู่การทำตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง (Moulson และ Herbert, 1990) ไฟฟ้าเฟอร์โรเกิดจากทิศทางขนานกันของโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้า บริเวณที่มีโพลาไรเซชันทิศทางเดียว เรียกว่า โดเมน (domain) $BaTiO_3$ มีโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกต์ (perovskite structure) โดเมนจะโตขึ้นเมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าแรงสูง หลังจากที่สารผ่านการโพลิงพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้น การมีโพลาไรเซชันค้างในสารเนื่องจากผลของโพลิงสามารถพิจารณาได้จากวงการล้าเฟอร์โรอิเล็กตริก (Buchanan, 1991)

ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor หรือ condenser) ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า (charge) และคายประจุไฟฟ้า (discharge) ตัวเก็บประจุมีหลายชนิด ได้แก่ ตัวเก็บประจุแบบกระดาษ ตัวเก็บประจุแบบพลาสติก (polyester, polycarbonate และ polystyrene) ตัวเก็บประจุแบบไมกา ตัวเก็บประจุแบบไมลาร์ ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกส์ ($BaTiO_3$) และ ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโตรไลติก

โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ประกอบด้วยแผ่นตัวนำขนานสองแผ่นที่มีไดอิเล็กตริก (dielectrics)คั่นกลาง การเก็บประจุไฟฟ้า คือ การที่ประจุไฟฟ้าเข้าไปในตัวเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นตามเวลา กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุลดลงตามเวลาและความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามเวลา ส่วนการคายประจุไฟฟ้า คือ การที่ประจุไฟฟ้าออกจากตัวเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุจะลดลงตามเวลา กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุลดลงตามเวลาและความต้านทานไฟฟ้าลดลงตามเวลา

ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า (C) กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, ε_r) แสดงดังสมการ

$$C = \varepsilon A/L = \varepsilon_0 \varepsilon_r A/L \; ; \; \varepsilon_r = 1+\chi_e$$

เมื่อเมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัด (cross section area) d เป็นเส้นผ่าศูนย์กลาง (diameter) ของสาร L เป็นความหนา (thickness) ของสาร และ χ_e เป็นสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้า (electric susceptibility)

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า (charge) และ คายประจุไฟฟ้า (discharge) ตัวเก็บประจุที่ใช้ทดลองเป็นแบบเซรามิกส์และแบบอิเล็กโตรไลติก

การเก็บประจุไฟฟ้า คือ การที่ประจุไฟฟ้าเข้าไปในตัวเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นตามเวลา กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุลดลงตามเวลาและความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามเวลา แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น

การคายประจุไฟฟ้า คือ การที่ประจุไฟฟ้าออกจากตัวเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุจะลดลงตามเวลา กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุลดลงตามเวลาและความต้านทานไฟฟ้าลดลงตามเวลา แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลง

กลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า มีดังนี้

Zhang (1992) ในประเทศจีน ได้เตรียม $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ ทดสอบการเก็บและคายประจุไฟฟ้า

Liqin Zhou (1992) ในประเทศจีน ได้เตรียมตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น $Sr_{0.7}Ba_{0.3}TiO_3$ วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและตัวประกอบการสูญเสียที่สัมพันธ์กับความถี่

Cheng-Fu Yang (1992) ในประเทศไต้หวัน ได้เตรียม $(Ba_{1-x}Sr_x)(Ti_{0.9}Zr_{0.1})O_3$ วัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิต่างๆ

Wanklyn (1992) ในประเทศอินเดีย ได้เตรียม $Eu_2Ti_2O_7$ ศึกษาสมบัติการขนย้ายทางไฟฟ้า วัดสภาพการนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและกำลังไฟฟ้าความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

Manling BaO (1993) ในประเทศจีน ได้เตรียม $Ba(Ti,Sn)O_3$ วัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิต่างๆ

Kazaoui (1993) ในประเทศฝรั่งเศส ได้เตรียม $Ba(Ti_{0.8}Zr_{0.2})O_3$ วัดความจุ ตัวประกอบการสูญเสียและสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและความถี่

Iguchi (1993) ในประเทศเกาหลี ได้เตรียม $(Sr_{1-3x/2}La_x)(Ti_{1-y}Mn_y)O_3$ ทำขั้ว วัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิต่างๆ

Kazuhide Abe (1994) ในประเทศญี่ปุ่น ได้เตรียมฟิล์มบาง $(Ba_{0.24}Sr_{0.76})TiO_3$ วัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับสนามไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดทางไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่างๆ

Ho-Gi Kim (1994) ในประเทศเกาหลี ได้เตรียม $BaTiO_3$ thick film เผาซินเตอร์วิงแบบไมโครเวฟ(microwave sintering) วัดความพรุน

Alles (1995) ในประเทศอุรุกวัย ได้เตรียม $BaTiO_3$ วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในขณะที่ได้รับความเครียด

Shail Upadhyay (1997) ในประเทศอินเดีย ได้เตรียม $BaSnO_3$ วัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่และอุณหภูมิต่างๆ สารนี้สามารถนำไปใช้ทำอุปกรณ์ไดอิเล็กตริก (dielectric device)

Dimos (1998) ในประเทศสหรัฐ ได้ศึกษา $(Ba,Sr)TiO_3$ ที่ความถี่สูงสำหรับประยุกต์ใช้เป็น decoupling capacitors และ tunable microwave capacitors

Sowlati (1998) ในประเทศแคนาดา ได้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับใช้งานในวงจรออสซิลเลเตอร์

Seon Yong (1999) ในประเทศเกาหลี ได้ศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสาร $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ สำหรับทำตัวเก็บประจุไฟฟ้า

Ki Hyun Yoon (2001) ในประเทศเกาหลีใต้ ได้ศึกษากระแสการรั่วและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสาร $(Ba_{0.5}Sr_{0.5})TiO_3$ ที่ถูกเติมด้วย Mg ในปริมาณต่างๆ

Henneth (2002) ในประเทศฮ่องกง ได้ศึกษา bandpass filter ที่มี center frequency 44 MHz และ bandwidth 6 MHz สำหรับ digital video application

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.3.1 วัตถุประสงค์สำหรับสารให้ความร้อน

เพื่อเตรียมก้อนสารรูปจานจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผงแล้วแล้วตรวจสอบเฟสของสารด้วยเครื่อง XRD

เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายกับอุณหภูมิของสารให้ความร้อน

เพื่อสร้างระบบการแสดงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเวลาของสารให้ความร้อนด้วยคอมพิวเตอร์

เพื่อสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิของสารให้ความร้อนด้วยคอมพิวเตอร์

1.3.2 วัตถุประสงค์สำหรับเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC

เพื่อเตรียมก้อนสารรูปจานจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผงแล้วแล้วตรวจสอบเฟสของสารด้วยเครื่อง XRD

เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางไฟฟ้า(ΔR vs Δt)

เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ NTC และหาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบหรือค่าความไวของเทอร์มิสเตอร์ทั้งในย่านสูงกว่าหรือต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

เพื่อสร้างระบบการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยคอมพิวเตอร์

เพื่อทดสอบเป็นหัววัดอุณหภูมิที่แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

เพื่อทดสอบเป็นหัววัดสัญญาณป้อนกลับ(feedback signal sensor)ในระบบควบคุมอุณหภูมิเกินทั้งในย่านสูงกว่าหรือต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

เพื่อประยุกต์เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ให้ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ความเย็น

1.3.3 วัตถุประสงค์สำหรับเทอร์มิสเตอร์แบบบ PTC

เพื่อเตรียมก้อนสารรูปจานจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผงแล้วแล้วตรวจสอบเฟสของสารด้วยเครื่อง XRD

เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ PTC หาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นบวกหรือค่าความไวของเทอร์มิสเตอร์พร้อมทั้งหาอุณหภูมิเปลี่ยนเฟส (T_c)

เพื่อทดสอบเป็นหัววัดอุณหภูมิ (temperature sensor) โดยอาศัยปรากฏการณ์ PTC ด้วยคอมพิวเตอร์

1.3.4 วัตถุประสงค์สำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้า

เพื่อเตรียมก้อนสารรูปจานจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผงแล้วแล้วตรวจสอบเฟสของสารด้วยเครื่อง XRD

เพื่อทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้าตรงและสนามไฟฟ้าสลับ

เพื่อทดสอบเป็นอุปกรณ์กรองแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงผ่าน (high pass filter)

เพื่อทดสอบเป็นอุปกรณ์การเลื่อนเฟส (phase shifter)

เพื่อทดสอบการเก็บและคายประจุด้วยคอมพิวเตอร์

เพื่อนำตัวเก็บประจุไปใช้งานในวงจรออสซิลเลเตอร์

เพื่อทดสอบสมบัติวาริสเตอร์

เพื่อทดสอบสมบัติความจุ-แรงดัน

เพื่อทดสอบการแยกแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากแรงดันไฟฟ้าความถี่ผสมระหว่างความถี่ต่ำกับความถี่สูง

เพื่อทดสอบเป็นตัวเก็บประจุความถี่สูง

เพื่อทดสอบผลของสนามไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของสารจาก PTC ไปเป็น NTC

เพื่อทดสอบสมบัติการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าและการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ของสาร

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

คลอบคลุมตั้งแต่การเตรียมก้อนสาร ตรวจสอบเฟสของก้อนสารด้วยเครื่อง XRD วัดสมบัติเชิงฟิสิกส์ของก้อนสารตลอดจนการประยุกต์ใช้ สมบัติเชิงฟิสิกส์ที่จะวัดหนักไปทางด้านไฟฟ้าและความร้อน การเตรียมก้อนสารรูปจานเตรียมจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผงจะใช้วิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน สารที่เตรียมมี 4 ชนิด (5 สูตร) สูตรของส่วนผสมของสารที่จะศึกษา มีดังนี้

heating element : $ZnO+0.01Nb_2O_5$, $ZnO+0.02TiO_2$

NTC thermistor : $NiMn_2O_4$, $Fe_2O_3+Nb_2O_5$, $SnO_2+Fe_2O_3$, $MgFe_2O_4+Fe_2O_3$, $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$, $LaCoO_3$

PTC thermistor : $BaTiO_3+0.9ZrO_2$, $BaTiO_3+0.01Nb_2O_5$, $BaTiO_3+0.05Nb_2O_5$, $BaTiO_3+0.1Nb_2O_5$, $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$, $Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$, $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$, $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$, $Bi_2O_3+Fe_2O_3$, ZrO_2+MnO_2, SnO_2+2CoO, $SnO_2+Cr_2O_3$

capacitor : $BaTiO_3+0.1SrCO_3$, $BaTiO_3+0.9ZrO_2$, $BaTiO_3+0.01Dy_2O_3$, $BaTiO_3+0.01Nb_2O_5$, $BaTiO_3+0.05Nb_2O_5$, $BaTiO_3+0.1Nb_2O_5$, $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$, $Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$, $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$ และ $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$, $(Ba_{0.9}La_{0.1})TiO_3$, $(Ba_{0.5}Zn_{0.5})TiO_3$

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยโดยสรุป

1.5.1 ออกแบบการวิจัย (research design)

เตรียมก้อนสารจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นสำหรับสารให้ความร้อน เทอร์มิสเตอร์แบบNTC เทอร์มิสเตอร์แบบ PTC และ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะใช้วิธีการเดียวกัน คือ วิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐานขั้นตอนการเตรียมก้อนสารเริ่มจากเลือกสูตร คำนวณน้ำหนัก ชั่งน้ำหนัก ผสมสาร อัดเป็นก้อน และ เผาสาร โดยใช้อุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม ส่วนอัตราการเพิ่มอุณหภูมิใช้ 5 °ซ / นาที เวลายืนไฟใช้ 1 ชั่วโมง สารแต่ละสูตรจะเตรียม 3 ก้อน แต่นำไปชี้บ่งลักษณะด้วยเครื่อง XRD เพียงก้อนเดียว ดูสีของก้อนสารที่ผ่านการเผา วัดขนาดด้วยไมโครมิเตอร์และทำขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน การวัดสมบัติเชิงฟิสิกส์จะวัดจากสารทั้ง 1 ก้อน แต่ละก้อนวัด 2 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

จัดเตรียม ซ่อมและ/หรือสร้างเตาหลอมไฟฟ้าและระบบควบคุมอุณหภูมิ เตาหลอมสำเร็จรูปมีอยู่แล้ว แต่มีการเตรียมขดลวดสำรองและสร้างเตาพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิสำรองไว้ วิธีการสร้างทำได้โดยการพันขดลวดนำขดลวดไปสอดไว้ในช่องของฉนวน นำไปติดตั้งในโครงเตา ใส่ฉนวนความร้อนเข้าไป ประกอบแผงวงจรควบคุมอุณหภูมิ ขดลวดและหัววัดอุณหภูมิ ปล่อยแรงดันไฟฟ้าเข้าไปแล้วทดลองการใช้งาน

จัดเตรียมแผงวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์และเขียนโปรแกรมสำหรับการวัดและควบคุมทั่วไปโดยให้สามารถอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้า อุณหภูมิ และวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าเหล่านั้นทำได้โดยการประกอบวงจรการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลพร้อมกับบัฟเฟอร์ลงบนโปรโตบอร์ดแล้วทดสอบจนใช้ได้ นำแผงวงจรที่ทำได้ประกอบเข้ากับ Interface card และคอมพิวเตอร์ทางสลอต เขียนโปรแกรมแล้วทดสอบจนใช้ได้ แผงวงจรนี้จะนำไปใช้ทดสอบสารต่อไป

1.5.1.1 สารให้ความร้อน

หาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายกับอุณหภูมิของสารให้ความร้อนทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านสาร วัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิของสาร (T) คำนวณกำลังไฟฟ้า (P) พลอตกราฟ T vs P

สร้างระบบการแสดงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเวลาของสารให้ความร้อนด้วยคอมพิวเตอร์ทำได้โดยใช้แผงวงจรและโปรแกรมที่ได้สร้างไว้ก่อนหน้านี้มาปรับปรุง เลือกหัววัดอุณหภูมิที่เหมาะสม ปรับเกลที่ใช้วัดอุณหภูมิ ตรวจสอบการวัดเวลาอีกครั้ง หลังจากนั้นนำหัววัดแตะผิวหน้าของสาร ทำสารให้ร้อน สั่ง RUN โปรแกรม ให้คอมพิวเตอร์แสดงกราฟอุณหภูมิในช่วงเวลาหนึ่ง ทดลองวัดแล้วพิมพ์กราฟทางเครื่องพิมพ์

สร้างระบบควบคุมอุณหภูมิของสารให้ความร้อนด้วยคอมพิวเตอร์ทำได้โดยใช้แผงวงจรที่ได้ทำไว้ เขียนโปรแกรมให้จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านสารเป็นจังหวะและให้ตัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโดยอาศัยการทำงานของวงจรสวิทช์และโซลิดสเตทรีเลย์

1.5.1.2 เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC

วัดเสถียรภาพทางไฟฟ้า (ΔR vs Δt) ทำได้โดยวัดความต้านทานไฟฟ้าของสารที่เวลาต่างๆในขณะที่อุณหภูมิของสารคงที่ สาเหตุที่ต้องวัดเพราะว่าความต้านทานไฟฟ้าสารที่ใช้ทำหัววัดอุณหภูมิจะต้องไม่เปลี่ยนตามเวลาในขณะที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยน

วัดความต้านทานไฟฟ้า (R) ที่ขึ้นกับอุณหภูมิทำได้ (T) โดยนำสารไปปรับความร้อน วัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ทำตาราง R vs T พลอตกราฟ R vs T หาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบหรือค่าความไวของเทอร์มิสเตอร์ทั้งในย่านสูงกว่าหรือต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจากสูตรโดยอาศัยข้อมูลของความชันของกราฟ (สารที่ใช้ทำเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC จะต้องมีความต้านทานไฟฟ้าจะต้องลดลงอย่างเร็วในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น)

สร้างระบบการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยคอมพิวเตอร์ทำได้โดยใช้แผงวงจรสำหรับอ่านค่าความต้านทานไฟฟ้าและอุณหภูมิ

ทดสอบหัววัดอุณหภูมิที่แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ทำได้โดยใช้แผงวงจรที่สร้างขึ้นและเขียนโปรแกรมการปรับเทียบค่า (calibration) โดยอาศัยเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงการค้า เขียนโปรแกรมอ่านค่าอุณหภูมิ ระบบการวัดมีการดัดแปลงหรือปรับปรุงในขณะที่ทดลองเรื่องนี้

ทดสอบหัววัดสัญญาณป้อนกลับ (feedback signal sensor) ในระบบควบคุมอุณหภูมิเกินในย่านสูงกว่าอุณหภูมิห้องสามารถทดสอบโดยให้คอมพิวเตอร์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าผ่านโซลิดสเตทรีเลย์เข้าเตาไฟฟ้า หัววัดอุณหภูมิจะสร้างสัญญาณป้อนกลับมายังคอมพิวเตอร์ ถ้าอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าเกิน ขนาดของสัญญาณป้อนกลับจะมีค่าเพียงพอทำให้โซลิดสเตทรีเลย์หยุดทำงาน สำหรับในย่านต่ำกว่าอุณหภูมิ มีการทดลองทำนองเดียวกัน แต่ใช้แผงวงจรสำหรับขับสเตปปิ้งมอเตอร์ประกอบกัน

เพื่อประยุกต์เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ให้ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ความเย็นทำได้โดยจัดเตรียมวงจรสวิทช์แล้วเลื่อนสารเข้าหาไนโตรเจนเหลว วัดอุณหภูมิและดูการทำงานของสวิทช์

1.5.1.3 **เทอร์มิสเตอร์แบบบ PTC**

ทดสอบปรากฏการณ์ PTC ทำได้โดยการวัด R vs T ในช่วงอุณหภูมิที่เกิดปรากฏการณ์นี้ พลอตกราฟแล้ว หาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นบวกหรือค่าความไวของเทอร์มิสเตอร์และอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสจากเส้นกราฟ

ทดสอบเป็นหัววัดอุณหภูมิโดยอาศัยปรากฏการณ์พีทีซีทำได้โดยให้แผงวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิและใช้เครื่องวัดอุณหภูมิในทางการค้าเป็นตัวปรับเทียบ

1.5.1.4 **ตัวเก็บประจุไฟฟ้า**

วัดสมบัติไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้าตรงทำได้โดยการวัดความจุไฟฟ้าแล้วคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้า ส่วนในสนามไฟฟ้าสลับปริมาณที่จะวัดได้แก่ Z, G, C, D, Q ,ε_r และ χ_e เมื่อ Z เป็นอิมพีแดนซ์ (impedance) G เป็นความนำไฟฟ้า (conductance) C เป็นความจุไฟฟ้า (capacitance) D เป็นตัวประกอบการสูญเสีย (dissipation factor) Q เป็นตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) ε_r เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) และχ_e เป็นสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้า (electric susceptibility)

ทดสอบอุปกรณ์กรองแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงผ่าน (high pass filter)ทำได้โดยอาศัยผลของอิมพีแดนซ์ของสารที่ลดลงในขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้น ปล่อยแรงดันไฟฟ้าจากซิกแนลเยเนอเรเตอร์แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม (V_L) ตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับสารที่ความถี่ (f) ต่างๆ พลอตกราฟของ V_L vs f นำกราฟมาพิจารณาดูย่านความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่สารยอมให้ผ่านได้ง่าย

ทดสอบอุปกรณ์การเลื่อนเฟสทำได้โดยการใช้ออสซิลโลสโคปแสดงภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานกับสารที่เตรียมแล้วเปรียบเทียบตำแหน่งเฟสของแรงดันไฟฟ้า

การสร้างระบบการแสดงการเก็บและคายประจุด้วยคอมพิวเตอร์ทำได้โดยใช้แผงวงจรเชื่อมต่อเขียนโปรแกรมที่แสดงแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งเกี่ยวข้องกับการเก็บประจุไฟฟ้าและการคายประจุไฟฟ้า

นำสารที่เตรียมได้ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรออสซิลเลเตอร์ทำได้โดยนำสารที่เตรียมติดตั้งแทนที่ตำแหน่งของตัวเก็บประจุเชิงการค้าในวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ IC555 แล้วแสดงภาพของแรงดันไฟฟ้าด้วยออสซิลโลสโคปและสั่งพิมพ์ภาพ

ทดสอบสมบัติวาริสเตอร์ทำได้โดยการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน หาค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นจากเส้นกราฟ

ทดสอบสมบัติความจุ-แรงดันทำได้โดยการวัดความจุที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า

ทดสอบการแยกแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากแรงดันไฟฟ้าความถี่ผสมระหว่างความถี่ต่ำกับความถี่สูงเพื่อทดสอบเป็นตัวเก็บประจุความถี่สูงทำได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าผสมระหว่างความถี่ต่ำกับความถี่สูงผ่านตัวต้านทานและสารที่เตรียมได้แล้วพิจารณาดูว่าความถี่ต่ำกับสูงผ่านไปทางเส้นทางใดดีกว่า

ทดสอบผลของสนามไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของสารจาก PTC ไปเป็น NTC ทำได้โดยการวัดความสัมพันธ์ของความต้านทานกับอุณหภูมิทั้งกรณีก่อนและหลังปล่อยสนามไฟฟ้าแรงสูงไปที่สาร

ทดสอบสมบัติการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าและการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ของสารทำได้โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าไปยังสาร แปลงแรงดันไฟฟ้าสลับที่ตกคร่อมสารเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ส่งผ่านแผงวงจรเชื่อมต่อแล้วเข้าคอมพิวเตอร์ เขียนโปรแกรม สั่งแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่

ให้คอมพิวเตอร์อ่านความถี่ ปรับเทียบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณทางการค้า

1.5.2 ขั้นตอนและวิธีการเก็บข้อมูล

บันทึกอุณหภูมิที่ใช้เผาสาร อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ เวลายืนไฟ ขนาดและสีของสารทั้งหมด

บันทึกเฟสของสารที่ได้จากเครื่อง XRD

บันทึกขนาดของลวดเตาหลอมที่ใช้และอุณหภูมิที่เตาหลอมที่สร้างทำได้

สั่งพิมพ์วงจรสำหรับ Computer control and data acquisition และโปรแกรมควบคุมการวัดต่างๆ

1.5.2.1 สารให้ความร้อน

บันทึกความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายกับอุณหภูมิของสารให้ความร้อน

พิมพ์กราฟอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเวลาของสารให้ความร้อนด้วยคอมพิวเตอร์

บันทึกกราฟที่แสดงอุณหภูมิที่ถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์พร้อมทั้งโปรแกรมที่ใช้

1.5.2.2 เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC

บันทึกกราฟที่แสดงเสถียรภาพทางไฟฟ้า(ΔR vs Δt)

เขียนกราฟความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ (กราฟ R vs T) บันทึกสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบหรือค่าความไวของเทอร์มิสเตอร์ทั้งในย่านสูงกว่าหรือต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

พิมพ์กราฟความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยคอมพิวเตอร์

รวบรวมวงจรที่ใช้ทดสอบหัววัดอุณหภูมิด้วยโปรแกรมโปรเทลและบันทึกกราฟเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิจากเครื่องจริง

บันทึกอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าที่ควบคุมไม่ให้เกินที่ได้จากผลการทดสอบหัววัดสัญญาณป้อนกลับในระบบควบคุมอุณหภูมิเกิน

1.5.2.3 **เทอร์มิสเตอร์แบบ PTC**

บันทึกวัดกราฟ R vs T ในช่วงอุณหภูมิที่เกิดปรากฏการณ์ PTC

บันทึกสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นบวกหรือค่าความไวของเทอร์มิสเตอร์

บันทึกอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสของสาร

บันทึกผลของการให้ทำหน้าที่หัววัดอุณหภูมิ

1.5.2.4 **ตัวเก็บประจุไฟฟ้า**

บันทึก Z, G, C, D, Q ,ε_r และ χ_e vs f

บันทึกกราฟของ V_L vs f ที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์กรองแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงผ่าน และ ย่านความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่สารยอมให้ผ่านได้ง่าย

บันทึกภาพของสัญญาณไฟฟ้าที่แสดงถึงสารทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์การเลื่อนเฟส

รวบรวมวงจรเชื่อมต่อและโปรแกรมต่างๆและบันทึกภาพที่แสดงการเก็บและคายประจุของสารที่เตรียมได้ที่เห็นบนจอคอมพิวเตอร์

พิมพ์ภาพของแรงดันไฟฟ้าบนจอออสซิลโลสโคปสำหรับกรณีที่นำสารไปใช้งานในวงจรออสซิลเลเตอร์

บันทึกกราฟกระแส-แรงดันของวาริสเตอร์

บันทึกกราฟสมบัติความจุ-แรงดัน

บันทึกกราฟการแยกแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากแรงดันไฟฟ้าความถี่ผสมระหว่างความถี่ต่ำกับความถี่สูง

บันทึกภาพการทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุความถี่สูง

บันทึกผลของสนามไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของสารจาก PTC ไปเป็น NTC

บันทึกการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าและการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ของสาร

1.5.3 **ขั้นตอนและวิธีการในการวิเคราะห์ข้อมูล**

พิจารณาดูว่าอุณหภูมิที่ใช้เผาสารเหมาะสมหรือไม่

นำภาพถ่าย XRD มาวิเคราะห์ดูเฟสของสาร ชี้บอกชื่อระนาบลงไปใน XRD patterns

พิจารณาดูว่าวงจรสำหรับ Computer control and data acquisition สามารถใช้งานได้ในกรณีใดบ้าง

1.5.3.1 **สารให้ความร้อน**

เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสารให้ความร้อนที่ทำมาจากเซรามิกส์กับลวดโลหะในแง่ของกำลังไฟฟ้าที่ใช้

1.5.3.2 **เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC**

เปรียบเทียบเสถียรภาพทางไฟฟ้าของสารที่เตรียมกับสารชนิดอื่นที่ไม่ใช่เทอร์มิสเตอร์

เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบระหว่างสารที่เตรียมกับเทอร์มิสเตอร์เชิงการค้าหรือสารในวารสารวิจัย

พิจารณาค่าคลาดเคลื่อนการวัดของหัววัดอุณหภูมิที่ทำได้

เปรียบเทียบผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิระหว่างวิธีธรรมดากับวิธีที่ใช้คอมพิวเตอร์

พิจารณาผลการทำงานของหัววัดสัญญาณป้อนกลับในระบบควบคุมอุณหภูมิเตาเผา

1.5.3.3 **เทอร์มิสเตอร์แบบ PTC**

พิจารณาช่วงที่เกิดปรากฏการณ์ PTC และ NTC (กราฟ R vs T)

เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นบวกระหว่างสารที่เตรียมกับสารในวารสารวิจัย

เปรียบเทียบอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสระหว่างสารที่เตรียมกับสารในวารสารวิจัย

พิจารณาผลของการทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ

1.5.3.4 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

เปรียบเทียบค่า Z, G, C, D, Q ,ε_r และ χ_e vs f ระหว่างสารที่เตรียมกับตัวเก็บประจุเชิงการค้า

เปรียบเทียบย่านความถี่ที่กรองผ่านระหว่างสารที่เตรียมกับตัวเก็บประจุเชิงการค้า

เปรียบเทียบการทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เลื่อนเฟสระหว่างสารที่เตรียมกับตัวเก็บประจุเชิงการค้า

เปรียบเทียบผลของเส้นกราฟการเก็บและคายประจุไฟฟ้าระหว่างวิธีที่ใช้ดอมพิวเตอร์กับวิธีใช้มัลติมิเตอร์

เปรียบเทียบรูปร่างของสัญญาณไฟฟ้าที่วงจรออสซิลเลเตอร์สร้างได้ระหว่างกรณีใช้สารที่เตรียมกับตัวเก็บประจุเชิงการค้า

เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างกรณีใช้สารที่เตรียมกับตัวเก็บประจุเชิงการค้า

เปรียบเทียบสมบัติความจุ-แรงดันระหว่างกรณีใช้สารที่เตรียมกับตัวเก็บประจุเชิงการค้า

เปรียบเทียบการแยกแรงดันไฟฟ้าความถี่ต่ำออกจากแรงดันไฟฟ้าความถี่ผสมระหว่างความถี่ต่ำกับความถี่สูงระหว่างกรณีใช้สารที่เตรียมกับตัวเก็บประจุเชิงการค้า

เปรียบเทียบการทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุความถี่สูงระหว่างกรณีใช้สารที่เตรียมกับตัวเก็บประจุเชิงการค้า

พิจารณาผลของสนามไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของสารจาก PTC ไปเป็น NTC

พิจารณาผลการทดสอบสมบัติการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าและการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ของสาร

1.6 ทฤษฎีและ/หรือแนวทางความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

1.6.1 สารทำความร้อน

งานวิจัยที่ทำ เลือกสูตร $ZnO+0.01Nb_2O_5$ และ $ZnO+0.02TiO_2$ แล้ววัด อุณหภูมิ กับ กำลังไฟฟ้า

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สารทำความร้อนทำมาจากสารสูตรต่างๆดังนี้

SiC, $MoSi_2$, $LaCrO_3$, ZrO_2 , $SnO_2+0.01Sb_2O_3$,$BaTiO_3$ (Moulson และ Herbert, 1990) PTC $BaTiO_3$ thin films (Ogawa, 1998) และ $LaCrO_3$ thin films (Hayashi, S. 2001) ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ทำ

1.6.2 เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC

งานวิจัยที่ทำ เลือกสูตร $NiMn_2O_4$, $SnO_2+Fe_2O_3$, $Fe_2O_3+Nb_2O_5$, $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$, $LaCoO_3$ แล้ววัดความต้านทานของสารที่อุณหภูมิต่างๆ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เทอร์มิสเตอร์แบบเอ็นทีซีทำมาจากสารสูตรต่างดังนี้

ส่วนผสมของ NiO, Mn_2O_3 และ Co_2O_3 (Soliman, 1993) ; $Fe_{2.1s}Mn_{0.21}Ni_{0.81}O_4$ (Martinez Sarrion, 1995) $LaNi_{0.6}Co_{0.4}O_3$ (Fruhwirth, 1997) ; $Fe_xNi_yMn_{1-x-y}O_4$ (Adalbert, 2000) ; NiZn manganite ceramics (Chanel, 2000) ; Mn-Co-Ni thermistors (Hosseini, 2000) ; Bi-doped $Ba(Sn,Sb)O_3$ (Wenzhong, 2000) ; $(Mn_xFe_{1-x})_2O_3$ (Dipika Saha, 2002) และ $Y(Mn, Ni)O_3$ (Gutierrez, 2002) วัดความต้านทานของสารที่อุณหภูมิต่างๆ

1.6.3 เทอร์มิสเตอร์แบบ PTC

งานวิจัยที่ทำ เลือกสูตร $BaTiO_3$+0.9ZrO_2, $BaTiO_3$+0.01Nb_2O_5, $BaTiO_3$+0.05Nb_2O_5, $BaTiO_3$+0.1Nb_2O_5, $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$,$Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$, $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$, $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$, Bi_2O_3+Fe_2O_3, ZrO_2+MnO_2, SnO_2+2CoO, SnO_2+Cr_2O_3 แล้ววัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สาร ที่ใช้ทำ PTC thermistor มีดังนี้

$BaTiO_3$ + 0.01La_2O_3 (BLT) , $BaTiO_3$ + 0.01 Y_2O_3 ,$BaTiO_3$ + 0.01Nb_2O_5 , $BaTiO_3$ + 0.01Ta_2O_3 และ $BaTiO_3$ + 0.01Sb_2O_3 , $BaTiO_3$ + 0.3 at% Nb_2O_5 ;$BaTiO_3$ + 0.3 at% Nb_2O_5 + 0.2 at% Bi_2O_3 (Buchanan, 1991) ; $(Sr_{0.2}Ba_{0.8})TiO_3$ (Horng-Yi Chang, 1995) ; strontium-lead titanate PTCR ceramics (Wang, 1997) ; Ca-doped $SrTiO_3$ (Shibagaki, 1997) ; BaO-Nb_2O_5-TiO_2 system (Igor Z, 1999) ; Ho-doped $BaTiO_3$ (Al-Shahran, 2000) ; Cr/(Ba,Pb)TiO_3 (He, 2000) ;(Y, Mn) co-doped $Sr_{0.5}Pb_{0.5}TiO_3$ (Jingchang, 2002) แล้ววัดความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับปริมาณของตัวโด๊ปและความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิซึ่งคล้ายกับงานวิจัยที่ทำ

1.6.4 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

งานวิจัยที่ทำ เลือกสูตร $BaTiO_3$+0.1$SrCO_3$, $BaTiO_3$+0.9ZrO_2, $BaTiO_3$+0.01Dy_2O_3, $BaTiO_3$+0.01Nb_2O_5, $BaTiO_3$+0.05Nb_2O_5, $BaTiO_3$+0.1Nb_2O_5, $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$, $Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$, $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$ และ $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$, $(Ba_{0.9}La_{0.1})TiO_3$, $(Ba_{0.5}Zn_{0.5})TiO_3$ แล้ววัดการเก็บ-คายประจุและการกรองแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงผ่าน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สารที่ใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีดังนี้

$Ba(Ti,Sn)O_3$ (Manling BaO, 1993) ; $BaTiO_3$ (Alles, 1995) ; $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ (Zhang, 1992) ; $Ba(Ti_{0.8}Zr_{0.2})TiO_3$ (Kazuoui, 1993) ; $(Ba_{0.24}Sr_{0.76})TiO_3$ (Kazuhide, 1994) แล้ววัดวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย

ได้สารเคมี อุปกรณ์สำหรับเตรียมสาร ค่าถ่าย XRD อุปกรณ์สำหรับออกแบบแผงวงจรสำหรับทดสอบสาร สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ สมบัติเชิงฟิสิกส์ของสารที่วัดได้จะโยงไปสู่การประยุกต์ใช้ เกิดการพัฒนาห้องปฏิบัติการไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีนักวิจัยเพิ่มขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1.7.2 เป็นสมมุติฐานการวิจัยในขั้นตอนต่อไป

งานที่ทำจะนำไปสู่การเลือกสูตรของสารได้ถูกต้อง ทราบสมบัติของสาร เกิดแนวความคิดที่จะนำสมบัติที่พบไปประยุกต์ใช้ต่อไป ประสบการณ์ที่ได้จากงานวิจัยปัจจุบันจะนำไปสู่การเลือกหัวข้องานวิจัยเรื่องถัดไป เกิดแนวความคิดที่จะนำสารที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้สำหรับการทำปฏิบัติการฟิสิกส์ เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ในอนาคต

1.7.3 บริการความรู้แก่ประชาชน

รายงานการวิจัยเป็นข้อมูลที่บริการความรู้ การเรียนการสอนถือว่าเป็นการบริการความรู้

1.7.4 เป็นบริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เกิดความเข้าใจและนำวิชาการทางด้านนี้ประยุกต์ใช้ทางด้านธุรกิจ

1.7.5 นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

เป็นการปูพื้นฐานสำหรับนักศึกษาที่จะไปทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมสารให้ความร้อน เทอร์มิสเตอร์แบบเอ็นทีซี เทอร์มิสเตอร์แบบพีทีซี และตัวเก็บประจุไฟฟ้าซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่จะนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ เนื่องจากการผลิตจริงต้องทราบวิธีการเตรียมวัตถุดิบจากแร่และต้องมีเครื่องมือที่ครบถ้วน

1.7.6 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

ก่อนจะผลิตอุปกรณ์จะต้องเรียนรู้ก่อน เมื่อจะผลิตอุปกรณ์ต้องใช้เวลาในการทดลองนานและต้องทำอย่างต่อเนื่อง เมื่อทราบวิธีการผลิตจึงจะไปสู่ขั้นตอนเพิ่มประสิทธิภาพ งานวิจัยที่จะทำยังอยู่ในขั้นตอนพยายามที่จะผลิตเท่านั้น ถ้าจะผลิตให้ได้จริงจะต้องใช้คนและงบประมาณที่เพียงพอ เทคโนโลยีการผลิตได้จากการเรียนรู้อย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพในการเรียนการสอนและผลิตนักศึกษาที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากการทำงานวิจัยนี้จะโยงไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพ

1.7.7 เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย

เป็นประโยชน์ต่อการเรียนรู้และวิจัยของนักศึกษา อาจารย์และนักอุตสาหกรรม