

ภาคผนวก ค. รายงานการวิจัยที่ไม่ได้ส่งตีพิมพ์

(non-published research report)

17. ปรากฏการณ์สมบัติพีทีซี เทอร์โมอิเล็กทริก กรองแรงดันไฟฟ้า  
 วาริสเตอร์ ความจุ-แรงดันและแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ของสาร  
 $BaTiO_3+0.05Nb_2O_5$ ,  $BaTiO_3+0.1Nb_2O_5$ ,  $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$ ,  
 $Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$ ,  $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$  และ  $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$  (2547)

**ปรากฏการณ์สมบัติพีซี เทอร์โมอิเล็กทริก กรองแรงดันไฟฟ้า วารีเตอร์**

ความจุ-แรงดันและแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ของสาร  $BaTiO_3+0.05Nb_2O_5$ ,  $BaTiO_3+0.1Nb_2O_5$ ,  $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$ ,  $Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$ ,  $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$  และ  $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$

ธงชัย พันธุ์เมธาฤทธิ์ จิราภรณ์ ศรีพรหม ฉวีวรรณ ชูจันทร์ และ นันธิดา สุทธิราษฎร์

สารตัวอย่างที่เตรียมมีส่วนผสม คือ สารที่ 1 :  $BaTiO_3 + 0.05Nb_2O_5$  สารที่ 2 :  $BaTiO_3 + 0.10Nb_2O_5$  สารที่ 3 :  $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$  สารที่ 4 :  $Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$  สารที่ 5 :  $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$  และสารที่ 6 :  $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$  เมื่อวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง  $25-200^\circ C$  ของสารพบว่าสารที่ 2 แสดงสมบัติพีซีในช่วง  $25-75^\circ C$  มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นบวก ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $+5.6\%/^\circ C$  สารที่ 3 แสดงสมบัติพีซีในช่วง  $25-80^\circ C$  โดยมีค่า  $\alpha$  เท่ากับ  $+21.08\%/^\circ C$  สารที่ 4 แสดงสมบัติพีซีในช่วง  $25-80^\circ C$  โดยมีค่า  $\alpha$  เท่ากับ  $9.75\%/^\circ C$  สารที่ 5 แสดงสมบัติพีซีในช่วง  $25-85^\circ C$  โดยมีค่า  $\alpha = 130.58\%/^\circ C$  และสารที่ 6 แสดงสมบัติพีซีในช่วง  $27-140^\circ C$  โดยมีค่า  $\alpha = 8.52\%/^\circ C$  ปรากฏการณ์พีซี ที่เกิดขึ้นมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้เป็นหัววัดอุณหภูมิ เมื่อวัดสมบัติเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าสารที่ 3, 5 และ 6 เป็นสารชนิด n ส่วนสารที่ 4 เป็นสารชนิด p สารที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 สามารถกรองแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง 120-225 kHz, 80-225 kHz, 150-400 kHz, 100-200 kHz, 150-250 kHz และ 150-280 kHz ตามลำดับ ผลการวัดการกรองแรงดันไฟฟ้ามีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์การกรองแรงดันไฟฟ้าสูงผ่าน สารที่ 2 แสดงสมบัติวารีเตอร์โดยมีแฉกกำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้นเท่ากับ 17.8 และมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินในวงจร ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ไฟฟ้ากับความถี่ของสารที่ 1 สามารถวัดได้และพบว่าความถี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของอิมพีแดนซ์ของสารที่ขึ้นความถี่พบว่าสารแสดงการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าและการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ ดังนั้นสารจึงสามารถนำประยุกต์ใช้เป็นหัววัดความถี่ ช่วงความถี่ที่วัดของสารที่ 1, 3, 4, 5 และ 6 คือ 2.7 kHz - 22.7 kHz, 1 kHz - 11 kHz, 1 kHz - 13 kHz, 1 kHz - 19 kHz และ 1 kHz - 13 kHz ตามลำดับ

**คำสำคัญ** ปรากฏการณ์สมบัติพีซี เทอร์โมอิเล็กทริก กรองแรงดันไฟฟ้า วารีเตอร์ ความจุ-แรงดัน และแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่

PTC, Thermoelectric, voltage filtering, varistor, capacitance-voltage and voltage-to-frequency conversion effect of  $\text{BaTiO}_3 + 0.05\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{BaTiO}_3 + 0.1\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $(\text{Sr}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.4}\text{Ti}_{0.3}\text{Y}_{0.3})\text{O}_3$ ,  $(\text{Ba}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$  and  $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{O}_3$  materials

Thongchai Panmatarith<sup>\*</sup>, Chiraporn Sriprom<sup>\*</sup>, Chaweewun Chokhun<sup>\*</sup> and Nanthida Sutthirawuth<sup>\*\*</sup>

The composition of prepared samples were sample 1 :  $\text{BaTiO}_3 + 0.05\text{Nb}_2\text{O}_5$ , sample 2 :  $\text{BaTiO}_3 + 0.10\text{Nb}_2\text{O}_5$ , sample 3 :  $(\text{Sr}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$ , sample 4 :  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.3}\text{Y}_{0.3})\text{O}_3$ , sample 5 :  $(\text{Ba}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$  and sample 6 :  $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{O}_3$ . When the resistance-temperature dependence of these samples were measured at 25–200 °C, the sample 2 showed PTC property at 25-75 °C and the positive temperature coefficient of resistance ( $\alpha$ ) was +5.6 %/°C, the sample 3 showed PTC property at 25-80 °C and  $\alpha$  was + 21.08%/°C, the sample 4 showed PTC property at 25-80 °C and  $\alpha$  was 9.75 %/°C, the sample 5 showed PTC property at 25-85 °C and  $\alpha$  was 130.58 %/°C and the sample 6 showed PTC property at 27-140 °C and  $\alpha$  was 8.52 %/°C. PTC effect will be used as temperature sensor. When thermoelectric effect of the samples were measured, the sample 3, 5 and 6 were n-type materials, but the sample 4 was p-type material. The sample 1, 2, 3, 4, 5 and 6 can filter the electric voltage at 120-225 kHz, 80-225 kHz, 150-400 kHz, 100-200 kHz, 150-250 kHz and 150-280 kHz, respectively. The electric voltage filtering 's results will be used as high voltage filter (HPF). The sample 2 showed varistor property and the non-linearity exponent value was and will be used as over-voltage protection device. The capacitance-voltage relation of the sample 1 was measured and showed that the capacitance will increased as the electric voltage increasing. When considered the impedance-frequency dependence, all samples showed frequency-to-voltage conversion and voltage-to-frequency conversion. So, the all samples can be used as the frequency sensor. Operating frequency of the sample 1, 3, 4, 5 and 6 were 2.7 kHz - 22.7 kHz, 1 kHz - 11 kHz, 1 kHz - 13 kHz, 1 kHz - 19 kHz and 1 kHz - 13 kHz, respectively.

**Key words:** PTC, Thermoelectric, voltage filtering, varistor, capacitance-voltage and voltage-to-frequency conversion effect

---

Department of Physics<sup>\*</sup>, Materials Science Field<sup>\*\*</sup>, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai 90112, Thailand.

## บทนำ

เนื่องจากสารเซรามิกที่เตรียมขึ้นส่วนใหญ่ไม่ได้นำมาประยุกต์ใช้เท่าที่ควร จึงคิดที่จะศึกษาสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก (ferroelectric ceramics) สารกลุ่มนี้แสดงสมบัติของการเก็บประจุไฟฟ้า (capacitive property) และสมบัติพีทีซี (PTC property or positive temperature coefficient) ผลที่ได้จากการศึกษาจะนำไปใช้ใน ห้องปฏิบัติการและในชีวิตประจำวัน การประยุกต์ใช้ของสารกลุ่มนี้ได้แก่ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) อุปกรณ์การกรองแรงดันไฟฟ้าความถี่สูงผ่าน (high pass filter) และอุปกรณ์เลื่อนเฟส (phase shifter) อุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน (overcurrent controller) และ หัววัดรังสีอินฟราเรด (infrared sensor)<sup>(1)</sup> BaTiO<sub>3</sub> เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และนำไปสู่การทำตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง<sup>(1)</sup> ไฟฟ้าเฟอร์โรเกิดจากทิศทางขานกันของโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole moment) บริเวณที่มีโพลาริเซชัน (polarization) ทิศทางเดียวเรียกว่า โดเมน (domain) BaTiO<sub>3</sub> มีโครงสร้างผลึกแบบเพอ-รอฟสไกต์ (perovskite structure) โดเมนจะโคขึ้นเมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าแรงสูง หลังจากที่ทำผ่านการ โพลิง (poling) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) จะเพิ่มขึ้น การมีโพลาริเซชันค้างในสารเนื่องจากผลของการ โพลิงสามารถพิจารณาได้จาก วงการด้านเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric hysteresis loop)<sup>(2)</sup>

เทอร์มิสเตอร์แบบพีทีซี คือ ตัวต้านทานที่มีความต้านทานเพิ่มขึ้นในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นบวก (positive temperature coefficient of resistance) หรือค่า  $\alpha$  ของเทอร์มิสเตอร์แบบนี้จะมีมาก<sup>(2)</sup> ค่า  $\alpha$  หรือ PTCR มีค่าเกี่ยวข้องกับจุดคูรีของเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric curie point) หรือ อุณหภูมิคูรี (Curie temperature,  $T_c$ ) อุณหภูมิคูรีมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งเป็นอุณหภูมิย้ายเฟอร์โรอิเล็กทริกมาเป็นพาราอิเล็กทริก (ferroelectric-paraelectric transition temperature) อุณหภูมิคูรีเกี่ยวข้องกับ โครงสร้างจุลภาค (microstructure)<sup>(1)</sup> ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์แบบพีทีซีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไปเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงของ โครงผลึก (lattice) และการเปลี่ยนแปลงสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ (electronic properties) ที่ขอบเขตของเกรน (grain boundary) ซึ่งมีผลทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มในช่วงอุณหภูมิแคบๆ ปรากฏการณ์พีทีซี (PTC effect) เกิดจากความต้านทานในบริเวณขอบเขตเกรนซึ่งจะเพิ่มอย่างเอกไปเนนเชิงตามอุณหภูมิที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิคูรี BaTiO<sub>3</sub> เป็นสารกึ่งตัวนำแบบเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric semiconductor) และแสดงปรากฏการณ์ PTC อุณหภูมิคูรีของ BaTiO<sub>3</sub> มีค่า 120-130 °C อุณหภูมิคูรีมีค่าเปลี่ยนแปลงตามตัวโด๊ป (dopant) การเติมตัวโด๊ปลงไปทำให้ความสูงของกำแพงกั้นที่ขอบเขตเกรนเปลี่ยนแปลง พฤติกรรมพีทีซีก็จะเปลี่ยนแปลง  $\alpha$  มีค่าคงที่ตามการ

$$\alpha = (1/\rho)(d\rho/dT) = (1/\rho_1)(\rho_2 - \rho_1)/(T_2 - T_1)$$

เมื่อ  $\rho_1$  และ  $\rho_2$  เป็นความต้านทานที่อุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_2$ , ตามลำดับ สภาพการนำไฟฟ้าของสารเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนและไอออนบวก-ลบของอะตอมและเกี่ยวข้องกับช่องว่างแถบพลังงานของสาร สารที่ใช้ทำตัวเก็บประจุและเทอร์มิสเตอร์แบบพีทีซี ได้แก่ BaTiO<sub>3</sub>+0.01La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (BLT), BaTiO<sub>3</sub>+0.01Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaTiO<sub>3</sub>+0.10Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, BaTiO<sub>3</sub>+0.01Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> และ BaTiO<sub>3</sub>+0.01Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นต้น

J.L.Zhang<sup>(3)</sup> ได้เตรียม  $Ba_{0.5}Zr_{0.5}TiO_3$  ทดสอบการเก็บและคายประจุไฟฟ้า Liqin Zhou<sup>(4)</sup> ในประเทศจีน ได้เตรียม ตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น  $Sr_{0.7}Ba_{0.3}TiO_3$  วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) และตัวประกอบการสูญเสีย (dissipation factor) ที่สัมพันธ์กับความถี่ (frequency)

S. kazaoui<sup>(5)</sup> ได้เตรียม  $Ba(Ti_{0.8}Zr_{0.2})O_3$  วัดความจุ ตัวประกอบการสูญเสีย สภาพความอ่อนไหวทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับ อุณหภูมิและความถี่ P. Padmini<sup>(6)</sup> ได้เตรียม  $BaTiO_3 + 0.3 \text{ at}\%Nb_2O_5$ ;  $BaTiO_3 + 0.3 \text{ at}\%Nb_2O_5 + 0.2 \text{ at}\%Bi_2O_3$

แล้ววัดความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานไฟฟ้ากับปริมาณของตัวได๊ปและอุณหภูมิ Homg -Yi Chang<sup>(7)</sup> ได้เตรียม  $(Sr_{0.2}Ba_{0.8})TiO_3$  ทดสอบสารเพื่อแสดงปรากฏการณ์ PTC (PTC effect) แล้ววัดอุณหภูมิคูรี ( $T_c$ ) N.S.Han<sup>(8)</sup> ได้เตรียม n-  $BaTiO_3$  ศึกษาปรากฏการณ์พีทีซี วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์พีทีซี เทอร์โมอิเล็กตริก กรองแรงดันไฟฟ้า วาริสเตอร์ ความจุ-แรงดัน และ แปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ที่เกิดขึ้นในสาร  $BaTiO_3+0.05Nb_2O_5$ ,  $BaTiO_3+0.1Nb_2O_5$ ,  $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$ ,

$Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$ ,  $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$  และ  $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$

#### วิธีการทดลอง

##### 1. การเตรียมสารตัวอย่าง ตรวจสอบเฟส วัดขนาดและทำขั้วไฟฟ้า

เตรียมสารตัวอย่างด้วยวิธีเทคนิคเซรามิกมาตรฐาน (standard ceramic techniques) ทำได้โดยเริ่มจากการ เลือกสูตรของสาร สารที่ 1 :  $BaTiO_3+0.05Nb_2O_5$ , สารที่ 2 :  $BaTiO_3+0.1Nb_2O_5$ , สารที่ 3 :  $(Sr_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$ , สารที่ 4 :  $Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.3}Y_{0.3})O_3$ , สารที่ 5 :  $(Ba_{0.5}Pb_{0.5})TiO_3$  และ สารที่ 6 :  $Ba(Ti_{0.8}Sn_{0.2})O_3$  จัดหาผงของสาร (sample powder) ( $BaCO_3$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $SrCO_3$ ,  $PbO$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $Y_2O_3$ ,  $SnO_2$ ) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% แล้วคำนวณน้ำหนักจาก สูตรที่เลือกไว้ ชั่งผงของสาร (weigh) ที่คำนวณได้ด้วยเครื่องชั่ง ผสมผงของสาร (mix) ด้วยครกหรือโกร่ง (mortar) แล้วผสมอีกครั้งโดยการนำผงของสารใส่กระป๋องพลาสติก (plastic can) และหมุนผสมสารด้วยเครื่องหมุนผสมสาร (mixer) หยกโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ผสมน้ำกลั่น (distilled water) ลงไปผสมกับผงของสารเพื่อให้ผงของสาร เกิดการเกาะตัวเป็นกลุ่ม (granulation) นำผงของสารใส่แม่อัด (press mold) และนำแม่อัดคดคั้งที่เครื่องอัดสาร (Rilk 25 tons) อัดทั้งหมด 3 ก้อน ค่อยหนึ่งสูตรนำไปวางไว้ในประมาณหนึ่งวันเพื่อลดความชื้น (humidity) ของสาร นำก้อนสาร ไปวางไว้ในเตาหลอม (furnace) ที่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (FCR-13A-R/M) เตา (fire) โดยเผา 2 ครั้ง สารที่ 1, 2 และ 6 อัดเป็นก้อน เมาครั้งที่ 1 ที่  $1200^\circ C$  บดเป็นผง อัดเป็นก้อน เมาครั้งที่ 2 ที่  $1200^\circ C$  สารที่ 3, 4 และ 5 อัดเป็นก้อน เมาครั้งที่ 1 ที่  $850^\circ C$  บดเป็นผง อัดเป็นก้อน เมาครั้งที่ 2 ที่  $1200^\circ C$  สาเหตุที่เผาครั้งที่ 1 ที่  $850^\circ C$  เพราะ  $PbO$  มีจุด หลอมเหลวที่  $888^\circ C$  และเผาครั้งที่ 2 ที่  $1200^\circ C$  เพื่อให้อะตอมเคลื่อนที่รวมตัวกันเป็นโครงสร้างผลึก การเผาทั้งสอง ครั้งจะใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (temperature increasing rate) ของเตา  $5^\circ C/min$  และเวลาขึ้นไฟ (soaking time) 1 ชั่วโมง ในที่สุดก็จะได้ก้อนสารที่ผ่านการเผา ตรวจสอบเฟสของสารตัวอย่างด้วยเครื่อง XRD (X-ray diffractometer) (Phillip PW1730) วัดความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของสารตัวอย่างด้วยไมโครมิเตอร์ (micrometer) นำสารตัวอย่าง นี้ไปทำขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน (silver paste) ซึ่งทำได้โดยการทาผิวหน้าของสารด้วยกาวเงินพร้อมกับวางขั้วไฟฟ้าบนแล้วทา ทับ ค่อยจากนั้นอบให้ร้อนด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า  $120^\circ C$  เป็นเวลาประมาณ 20 นาที

## 2. การวัดสมบัติพีทีซี

จัดเตรียมอุปกรณ์โดยการใช้ตัวจับพร้อมขาตั้งยึดก่อนสารที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 ที่ทำด้วยถ้วยแก้วเงินและหัววัดอุณหภูมิให้อยู่เหนือเตาไฟฟ้าประมาณ 0.5 cm เพื่อให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิไม่สูงมากนักซึ่งสะดวกต่อการวัด วัสดุความต้านทาน (R) ด้วยเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (Fluke 45 Dual Display Multimeter) และวัดอุณหภูมิ (T) ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ (AVD M890C) โดยให้ก่อนสารอยู่ในระดับเดียวกัน หลังจากนั้นให้เพิ่มอุณหภูมิของสารอย่างช้า ๆ ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C – 200 °C บันทึกความต้านทานไฟฟ้าและอุณหภูมิตั้งในตารางแล้วเขียนกราฟ R vs T

## 3. การวัดเทอร์โมอิเล็กทริก

จัดชุดการทดลองทำนองเดียวกับการทดลองปรากฏการณ์ PTC แต่เปลี่ยนสเกลของมัลติมิเตอร์เป็นแรงดันไฟตรง ทดลองกับสารที่ 3, 4, 5 และ 6 โดยเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 25-80 °C, 25-200 °C, 25-70 °C และ 25-45 °C บันทึกความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริก (V) กับ อุณหภูมิ (T) พล็อตกราฟ V vs T

## 4. การวัดการกรองแรงดันไฟฟ้า

จ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปร่างจากรีโอดำนิคสัญญาณไฟฟ้า (5 MHz Signal generator) โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารที่ 1, 2, 3, 4, 5 หรือ 6 และวัดความถี่ บันทึกแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร (V) ที่ความถี่ (f) ต่างๆ

## 5. การวัดควาริตเซอร์

จ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าหม้อแปลงไฟฟ้า 220 V-1300 V โดยการปรับด้วยแอมมิเตอร์ วัดกระแสไฟฟ้า (I) ที่ไหลผ่านสารและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร (V) และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V ของสารที่ 2

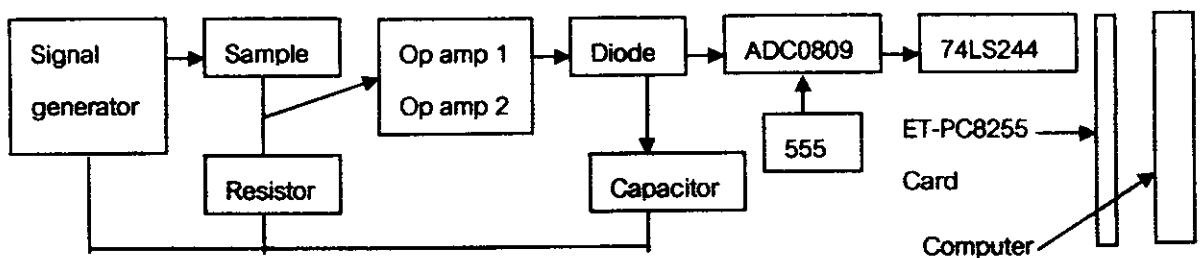
## 6. การวัดความจุ-แรงดัน

เปิดเครื่อง 4140  $\mu$ PA Meter / DC Voltage Source ไปที่ตำแหน่ง ON เลือกปุ่ม C-V เลือก  $V_A$  ตั้ง Parameter ดังนี้ Start V = 2.2 , Stop V = 10 และ Step V = 0.2, dv/dt = 0.1, Step delay time = 5 ทดลองเฉพาะสารที่ 1 BaTiO<sub>3</sub> + 0.05Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> เนื่องจากสารสูตรนี้มีความจุต่ำ เครื่องสามารถวัดค่าได้ ส่วนสารสูตรอื่นมีความจุสูง เครื่องแสดงโหลดเกิน (over load) วัดไม่ได้ บันทึกค่า C และ V เขียนกราฟ C vs V ของสาร

## 7. การวัดการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่

ประกอบอุปกรณ์ลงบนโปรโตบอร์ดโดยอาศัยวงจรเชื่อมต่อกับไดโอดที่ได้อธิบายไว้ดังรูปที่ 1 หลังจากนั้นก็ป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในวงจร ตรวจสอบให้ได้ว่าวงจรใช้ได้ เมื่อเราปรับที่ VR 10 k $\Omega$  การติดคัมของ LED จะเปลี่ยนไปมา เขียนโปรแกรมเอาต์พุตด้วยภาษาเทอร์โบปาสคาล เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าออกทางพอร์ต B เป็นการตรวจสอบเพื่อให้ทราบว่าจะจูนที่คอปี่ขึ้นใช้งานได้ สังเกตจากได้จากการติดคัมของ LED ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากคอมพิวเตอร์เป็น 5 V LED จะติด แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากคอมพิวเตอร์เป็น 0 V LED จะดับ การนำแรงดันไฟฟ้าออกนอกคอมพิวเตอร์จะใช้คำสั่ง Port[PB]:=0 สำหรับ 0 V และ Port[PB]:=255 สำหรับ 5 V เขียนโปรแกรมอินพุตด้วยภาษาเทอร์โบปาสคาล เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถอ่านหรือรับแรงดันไฟฟ้าจากวงจรเชื่อมต่อ แรงดันไฟฟ้าที่ปรับ

ได้ด้วย VR  $10\text{ k}\Omega$  ถูกป้อนเข้าทางขา 26 ( $I_0$ ) ของ ADC0809 แรงดันไฟฟ้าที่นี้เรียกว่า แรงดันอนาลอก ADC0809 จะทำหน้าที่แปลงแรงดันอนาลอก (AV) เป็นแรงดันดิจิทัล (DV) วงจร IC555 จะทำหน้าที่ผลิตแรงดันรูปสี่เหลี่ยมแล้วส่งเข้าขา 10 ของ ADC0809 เพื่อให้ IC ตัวนี้ ทำงาน แรงดันดิจิทัลขนาด 8 บิต ถูกส่งผ่าน 74LS244 ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ใช้ LED 8 ตัว อ่านหรือแสดงแรงดันดิจิทัลที่ขาทุกขา ของ 74LS244 แรงดันดิจิทัล 8 บิต ซึ่งก็คือ D7,D6,D5,D4,D2,D1,D0 นี้จะถูกส่งผ่าน ET-PC8255 Card โดยผ่านทางพอร์ต A ของ IC8255 แล้วถูกส่งต่อเข้าไปในแรม (RAM) การนำแรงดันไฟฟ้าจากวงจรเชื่อมต่อเข้าไปในคอมพิวเตอร์จะใช้คำสั่ง  $DV:=Port[PA]$  ใช้คำสั่ง `writeln('')` ให้เครื่องแสดงค่าของ DV, AV หรือ f บนจอ ทำการปรับเทียบค่า (calibrate) เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่อ่านความถี่โดยใช้ตารางที่เตรียมได้เป็นหัวข้อซึ่งทำได้โดยเริ่มจากป้อนแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าเข้าไปในวงจรที่ประกอบด้วยตารางที่เตรียมได้ซึ่งค่อนข้างกับความต้านทาน  $\times\text{ k}\Omega$  และขยายแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับความถี่ แปลงเป็นไฟฟ้าตรงด้วยไดโอดแล้วป้อนเข้าขา 26 ( $I_0$ ) ของ ADC0809 เพื่อแปลง AV เป็น DV ส่งผ่าน 74LS244 และ ET-PC8255 Card เข้าไปใน RAM สั่งให้แสดงค่า DV บนจอ แปลง DV เป็น AV ด้วยคำสั่ง  $AV:=(5/255)*DV$  สั่งให้แสดงค่า AV บนจอ เพิ่มความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยการอ่านความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า (true) และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร (AV) บนจอคอมพิวเตอร์ในช่วงความถี่หนึ่ง นำค่า AV กับ true ไปเขียนกราฟและแสดงสมการ  $true = f_n(AV)$  ด้วย EXCEL เขียนสมการความสัมพันธ์ของ true vs AV ลงในโปรแกรมควบคุมการวัด หลังจากนั้นก็สั่งให้โปรแกรม ทำงานแล้วอ่านความถี่จากเครื่องจริง (true) กับความถี่จากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ตารางที่เตรียมได้เป็นหัวข้อ (true) นำค่าทั้งสองไปเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่า เมื่อถึงขั้นตอนนี้ก็จะเสร็จสิ้นการปรับเทียบค่า เราจะได้เครื่องวัดความถี่ที่แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์และใช้ตารางที่เตรียมได้เป็นหัวข้อ



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์สำหรับให้คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่อ่านความถี่ของแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ตารางที่เตรียมได้ (ตารางที่ 3, 4, 5 และ 6) เป็นหัวข้อ

### โปรแกรมที่ให้คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่อ่านความถี่ของแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ตารางที่เตรียมได้เป็นหัวข้อ

Program Frequency\_Sensor\_Testing;

uses crt;

var i, j, x, y, DV : integer;

```

    AV, f      : real;
const PA      = $0304;
    Pcontrol = $0307;
begin
    clrscr;
    port[Pcontrol] := $90;
    gotoxy(23,2); writeln('FREQUENCY
MEASUREMENT');
    gotoxy(23,3); writeln('_____');
    DV:=0; AV:=0; f:=0;
    for i := 1 to 100 do
    begin
        for j := 1 to 255 do
        begin
            DV := port[PA];
            AV := (5/255)*DV;
            gotoxy(26,14); writeln('Analog Voltage (AV) = ',AV:3:3, ' V');
            delay(1)
            f := (?*AV*AV) - (?*AV)+ ?;
            gotoxy(20,20);
            writeln('*****');
            gotoxy(17,22); writeln('Measure Frequency = ',f:3:2, ' C');
            delay(1);
            gotoxy(15,24);
            writeln('>>*****<<<');
            delay(500);
        end;
    end;
end;
end.

```



## ผลการทดลอง

## 1. ผลการเตรียมสารตัวอย่าง ขนาดของสารและตรวจสอบเฟส

ผลการเตรียมสารตัวอย่าง ขนาดของสารและตรวจสอบเฟสแสดงดังตารางที่ 1

ชื่อสาร	สูตรของสารผสมของสาร	สูตรของสารจาก XRD	สีของสาร	L (mm)	d (mm)
1	$\text{BaTiO}_3 + 0.05\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{BaTiO}_3$	สีขาว เหลือง อ่อนๆ	2.35	12.45
2	$\text{BaTiO}_3 + 0.10\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{BaTiO}_3$ และ $\text{Ba}_3\text{Nb}_{3.2}\text{Ti}_5\text{O}_{21}$	สีขาว เหลือง อ่อนๆ	2.95	12.32
3	$0.5\text{SrCO}_3 + 0.5\text{PbO} + \text{TiO}_2$	$(\text{Sr}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$	สีเหลือง	3.27	13.80
4	$\text{PbO} + 0.5\text{ZrO}_2 + 0.3\text{TiO}_2 + 0.15\text{Y}_2\text{O}_3$	$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.3}\text{Y}_{0.3})\text{O}_3$	สีเทาน้ำเหลือง	2.80	12.39
5	$0.5\text{BaCO}_3 + 0.5\text{PbO} + \text{TiO}_2$	$(\text{Ba}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$	สีขาวเหลือง อ่อน	2.56	13.30
6	$0.8\text{BaCO}_3 + 0.2\text{SnO}_2 + \text{TiO}_2$	$\text{Ba}(\text{Ti}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{O}_3$	สีขาวเหลือง อ่อนๆ	2.73	13.04

ตารางที่ 1 สูตรของสารผสมของสาร สูตรของสารที่ได้ สี ความหนา (L) และเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) ของสาร

## 2. ผลการวัดสมบัติพีซี

ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง  $25-200^\circ\text{C}$  ของสารแสดงดังรูปที่ 2

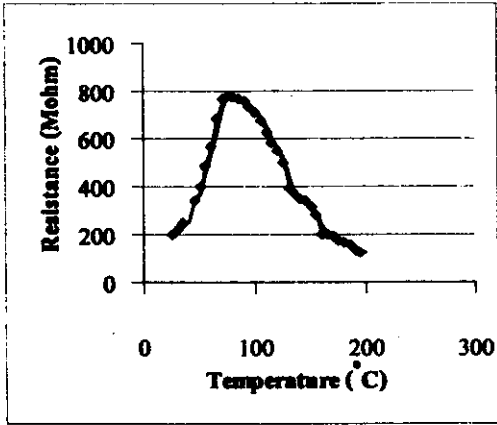
สารที่ 2 มีความต้านทานเพิ่มขึ้นในช่วง  $25-75^\circ\text{C}$  แต่หลังจากอุณหภูมิ  $75^\circ\text{C}$  ความต้านทานลดลง สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นบวก ( $\alpha$ ) มีค่า  $+5.6\%/^\circ\text{C}$

สารที่ 3 มีความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง  $25-80^\circ\text{C}$  แต่หลังจากอุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  ความต้านทานมีค่าลดลง  $\alpha$  สำหรับปรากฏการณ์ PTC มีค่า  $+21.08\%/^\circ\text{C}$  และ  $\alpha$  สำหรับปรากฏการณ์ NTC มีค่า  $-0.746\%/^\circ\text{C}$

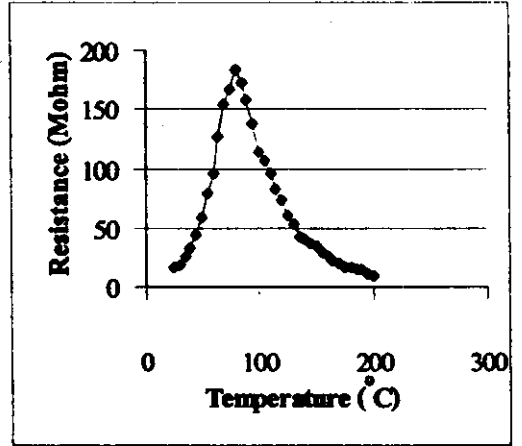
สารที่ 4 มีความต้านทานเพิ่มขึ้นในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในช่วง  $25-80^\circ\text{C}$   $\alpha$  มีค่า  $9.75\%/^\circ\text{C}$

สารที่ 5 มีความต้านทานเพิ่มขึ้นในช่วง  $25-85^\circ\text{C}$  โดยมีค่า  $\alpha = 130.58\%/^\circ\text{C}$  และความต้านทานมีค่าลดลงในช่วง  $80-150^\circ\text{C}$  โดยมีค่า  $\alpha = -1.62\%/^\circ\text{C}$

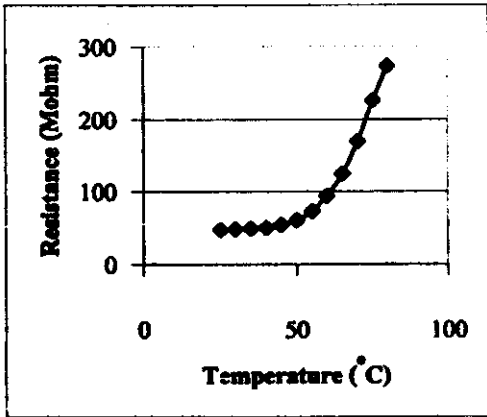
สารที่ 6 มีความต้านทานเพิ่มขึ้นในช่วง  $27-140^\circ\text{C}$  โดยมีค่า  $\alpha = 8.52\%/^\circ\text{C}$  และความต้านทานมีค่าลดลงในช่วง  $140-200^\circ\text{C}$  โดยมีค่า  $\alpha = -1.70\%/^\circ\text{C}$



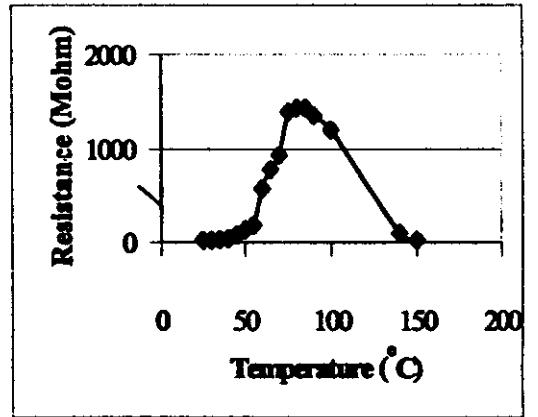
ก. สารที่ 2



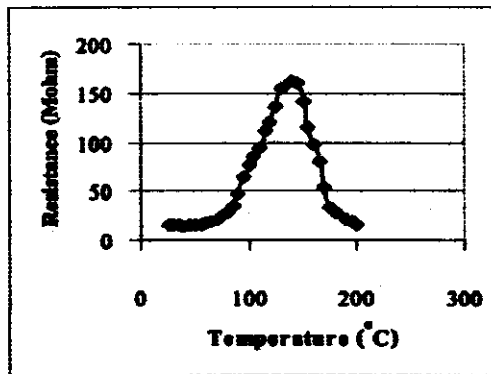
ข. สารที่ 3



ค. สารที่ 4



ง. สารที่ 5



จ. สารที่ 6

รูปที่ 2 ความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิของสารที่ 2, 3, 4, 5 และ 6

### 3. ผลการวัดเทอร์โมอิเล็กทริก

ผลการวัดเทอร์โมอิเล็กทริกแสดงดังรูปที่ 3

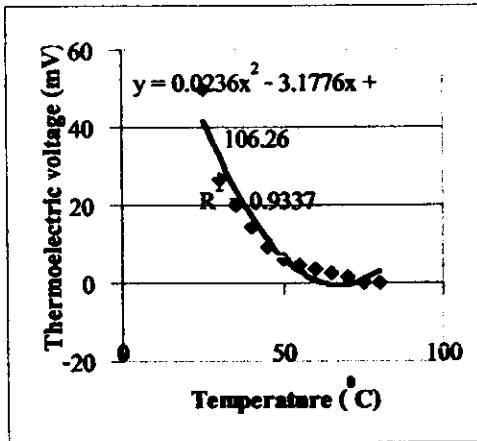
สารที่ 3 มีแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนจากบวกไปเป็นลบ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริก (V) กับอุณหภูมิ (T) สอดคล้องตามสมการ

$$V = 0.0236T^2 - 3.1776T + 106.26$$

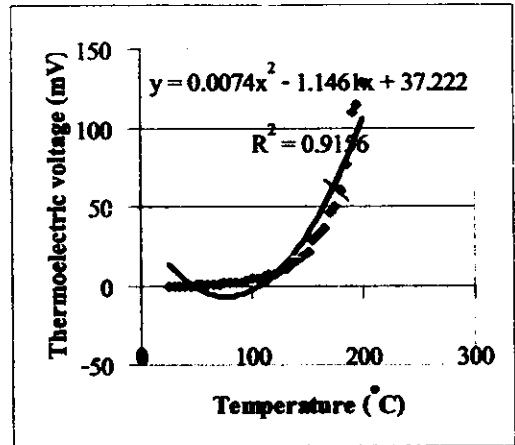
สารที่ 4 มีแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนจากลบไปเป็นบวก โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริก (V) กับอุณหภูมิ (T) สอดคล้องตามสมการ

$$V = 0.0074T^2 - 1.1461T + 37.222$$

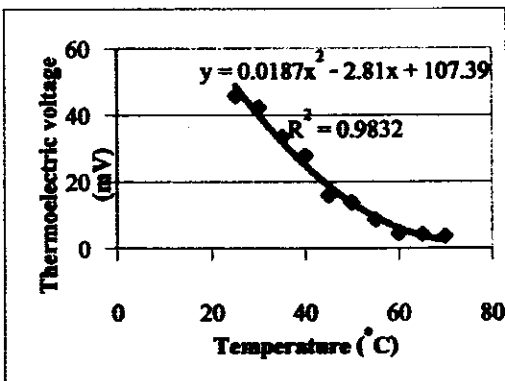
สารที่ 5 และ 6 มีแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนจากบวกไปเป็นลบ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริก (V) กับอุณหภูมิ (T) สอดคล้องตามสมการ  $V = 0.0187T^2 - 2.81T + 107.39$  และ  $V = 0.0155T^2 - 2.0754T + 52.655$  ตามลำดับ



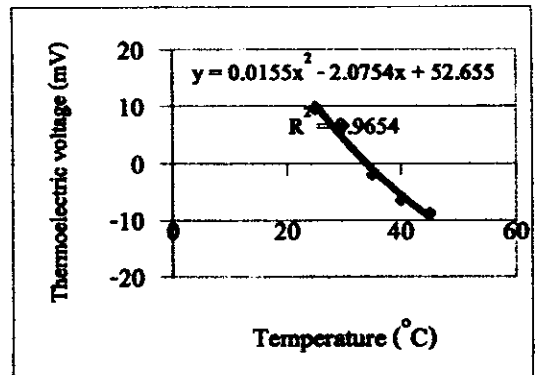
สารที่ 3



สารที่ 4



สารที่ 5



สารที่ 6

รูปที่ 3 แรงดันเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่างๆของสารที่ 3, 4, 5 และ 6

4. ผลการวิเคราะห์การกรองแรงดันไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์การกรองแรงดันไฟฟ้าตามแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาช่วงของความถี่ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานมีค่ามากที่สุดจะทราบผลดังนี้

สารที่ 1 สามารถกรองแรงดันไฟฟ้าในช่วง 120-225 kHz ได้ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่สอดคล้องตามสมการ  $V = 8 \times 10^{-6} f^2 + 0.003f - 0.0027$

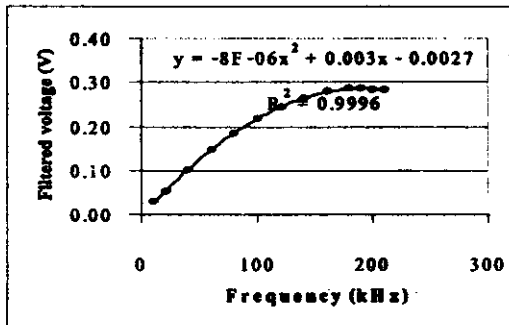
สารที่ 2 สามารถกรองแรงดันไฟฟ้าในช่วง 80-225 kHz ได้ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่สอดคล้องตามสมการ  $V = -6 \times 10^{-6} f^2 + 0.0022f + 0.0034$

สารที่ 3 สามารถกรองแรงดันไฟฟ้าในช่วง 150-400 kHz ได้ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่สอดคล้องตามสมการ  $V = -5 \times 10^{-6} f^2 + 0.0031f + 0.2906$

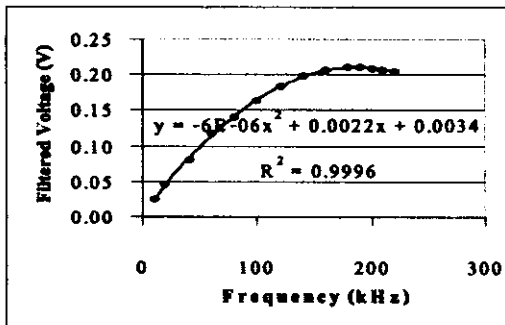
สารที่ 4 สามารถกรองแรงดันไฟฟ้าในช่วง 100-200 kHz ได้ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่สอดคล้องตามสมการ  $V = -0.0071f^2 + 2.3607f + 22.497$

สารที่ 5 สามารถกรองแรงดันไฟฟ้าในช่วง 150-250 kHz ได้ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่สอดคล้องตามสมการ  $V = -0.0052(f)^2 + 2.9798(f) + 59.538$

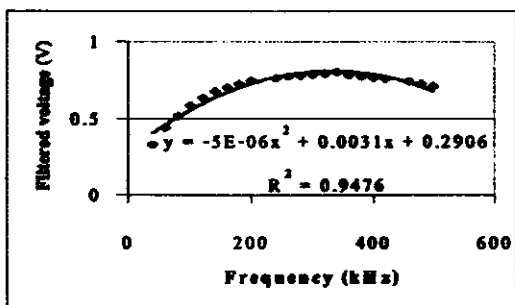
สารที่ 6 สามารถกรองแรงดันไฟฟ้าในช่วง 150-280 kHz ได้ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่สอดคล้องตามสมการ  $V = -0.0055(f)^2 + 2.8948(f) + 124.54$



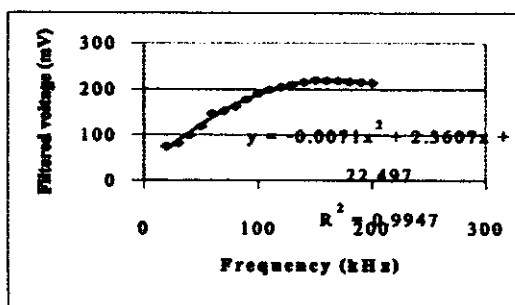
สารที่ 1



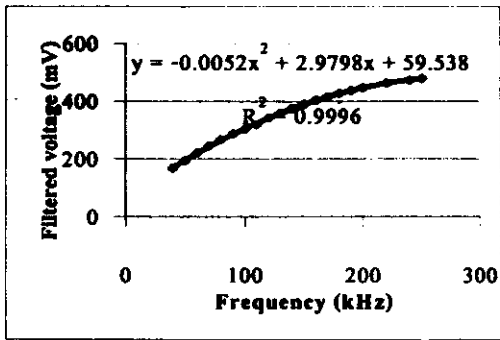
สารที่ 2



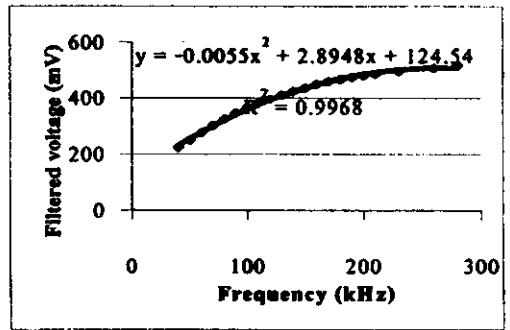
สารที่ 3



สารที่ 4



สารที่ 5

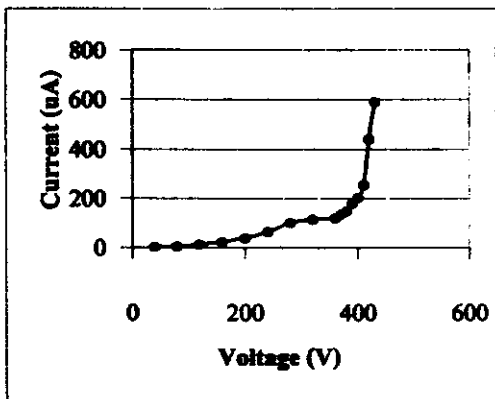


สารที่ 6

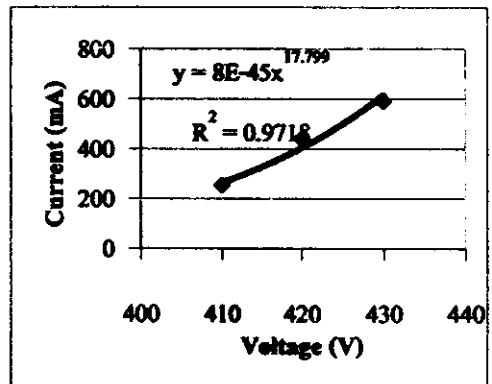
รูปที่ 4 การกรองแรงดันความถี่สูงผ่านของสารที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6

5. ผลการวัดควาริสเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารกับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารที่ 2 การหาเลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 5 เลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีค่า 17.8



ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร

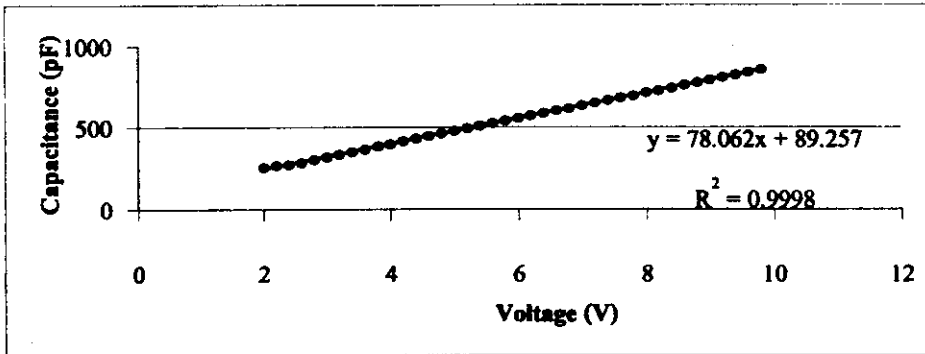


ข. การหาเลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้น

รูปที่ 5 ผลการทดสอบสมบัติควาริสเตอร์ของสารที่ 2

## 6. ผลการวัดความจุ-แรงดัน

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า (C) กับแรงดันไฟฟ้า (V) แสดงดังรูป 6 จากกราฟเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพบว่าสารที่ 1 จะมีค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังสมการ  $C = 78.062V + 89.257$  ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสารที่ 1

## 7. ผลการวัดการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่จากเครื่องจริง (true) กับแรงดันไฟฟ้าที่คกคร่อมสาร (AV) ของสารที่ 1, 3, 4, 5 และ 6 แสดงในรูปที่ 7 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่จากเครื่องจริง (true) กับแรงดันไฟฟ้าที่คกคร่อมสาร (AV) ของสาร มีดังนี้

สารที่ 1 :  $f = 2.56(AV)^2 - 1.4827(AV) + 2.7187$  ในช่วง

ความถี่ 2.7 kHz ถึง 22.7 kHz

สารที่ 3 :  $f = 0.2317(AV)^2 + 1.0026(AV) + 0.2359$  ในช่วง

ความถี่ 1 kHz ถึง 11 kHz

สารที่ 4 :  $f = 1.5805(AV)^2 + 1.5602(AV) - 0.4192$  ในช่วง

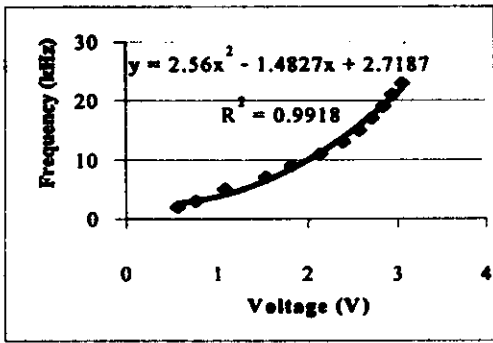
ความถี่ 1 kHz ถึง 13 kHz

สารที่ 5 :  $f = 0.7905(AV)^2 + 0.7351(AV) + 0.572$  ในช่วง

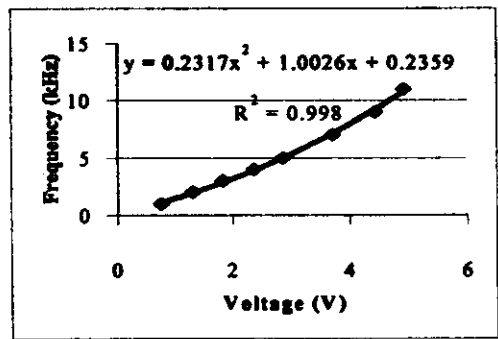
ความถี่ 1 kHz ถึง 19 kHz

สารที่ 6 :  $f = 0.8488(AV)^2 + 0.9500(AV) - 0.1612$  ในช่วง

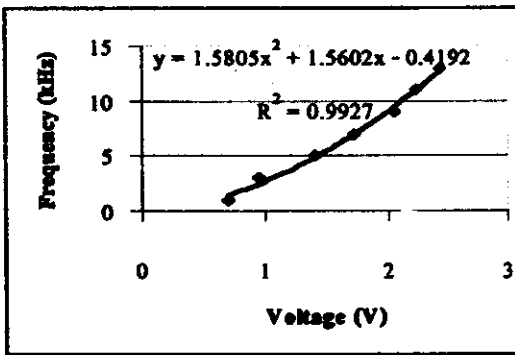
ความถี่ 1 kHz ถึง 13 kHz



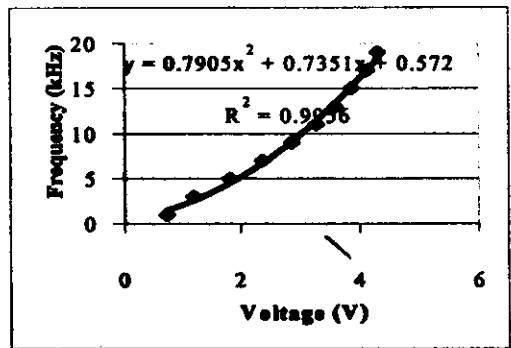
ตารางที่ 1



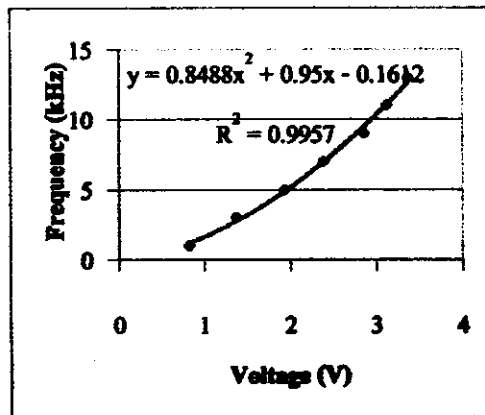
ตารางที่ 3



ตารางที่ 4



ตารางที่ 5



ตารางที่ 6

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่อ่านได้จากเครื่องวัดจริง (true) กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร (AV) ของสารที่ 1, 3, 4, 5 และ 6

ทำการปรับเทียบ (calibration) ตารางที่ 1, 3, 4, 5 และ 6 ที่เตรียมได้เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดความถี่ เมื่อเปรียบเทียบกับความแตกต่างระหว่างความถี่จากเครื่องจริง ( $f_{true}$ ) กับ ความถี่จากเครื่องสร้าง ( $f_{measure}$ ) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 8 ผลปรากฏว่าสารแสดงการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า (frequency-to-voltage conversion) และการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ (voltage-to-frequency conversion) และสามารถนำไปทำเป็นหัววัดความถี่ (frequency sensor)

ช่วงความถี่ที่วัดได้มีดังนี้

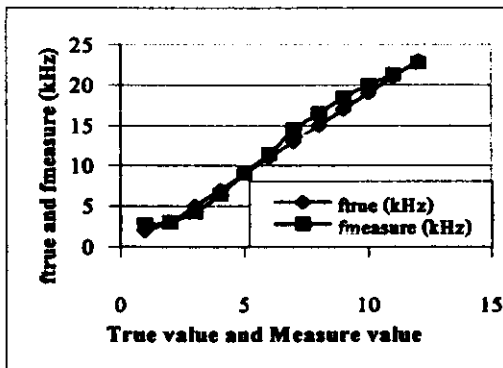
ตารางที่ 1 : 2.7 kHz ถึง 22.7 kHz

ตารางที่ 3 : 1 kHz ถึง 11 kHz

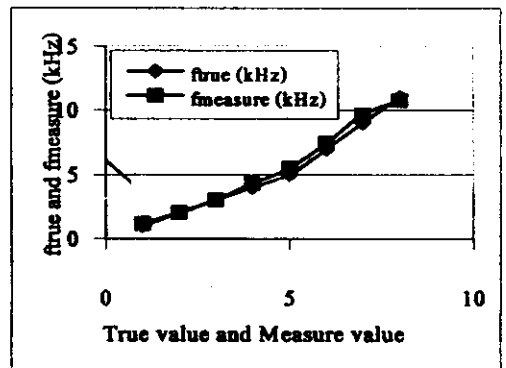
ตารางที่ 4 : 1 kHz ถึง 13 kHz

ตารางที่ 5 : 1 kHz ถึง 19 kHz

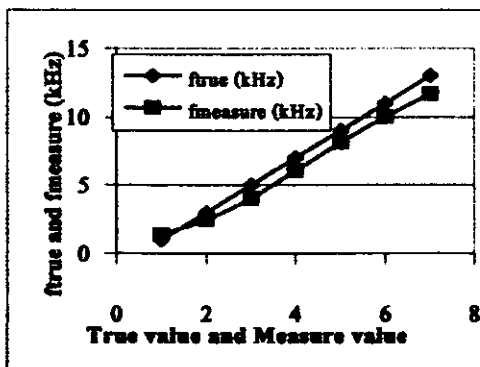
ตารางที่ 6 : 1 kHz ถึง 13 kHz



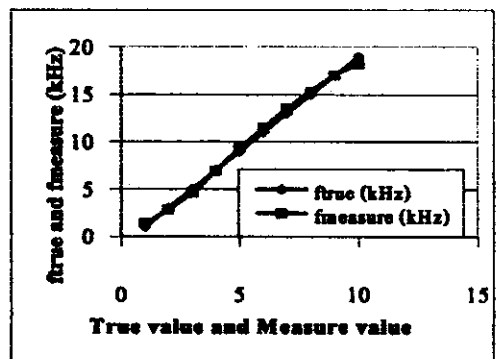
ตารางที่ 1



ตารางที่ 3

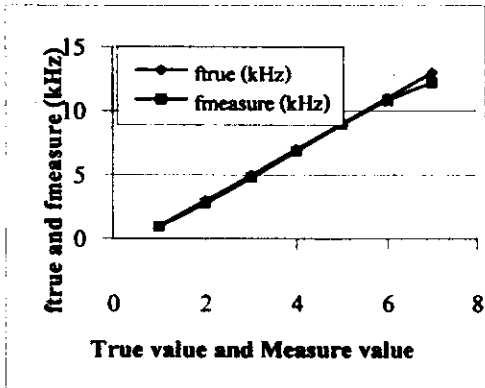


ตารางที่ 4



ตารางที่ 5





สารที่ 6

รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความถี่ที่อ่านได้จากเครื่องจริง (ftrue) กับความถี่ที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ (fmeasure) ของสารที่ 1, 3, 4, 5 และ 6

#### วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

สารตัวอย่างที่เตรียมได้มีส่วนผสม 6 แบบเหมือนกัน (ตารางที่ 1) เมื่อตรวจสอบเฟสพบว่าได้ผลดังนี้

สารที่ 1 ส่วนผสม  $\text{BaTiO}_3 + 0.05\text{Nb}_2\text{O}_5$  ภายถ่ายพบ  $\text{BaTiO}_3$  ไม่พบ  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  เนื่องจากเติมลงไปน้อย

สารที่ 2 ส่วนผสม  $\text{BaTiO}_3 + 0.10\text{Nb}_2\text{O}_5$  ภายถ่ายพบสาร 2 เฟส คือ  $\text{BaTiO}_3$  และ  $\text{Ba}_3\text{Nb}_{3.2}\text{Ti}_5\text{O}_{21}$  แสดงว่า  $\text{BaTiO}_3$  รวมตัวกับ  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  โดยที่  $\text{BaTiO}_3$  เหลือ เนื่องจากเติม  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงพบ  $\text{Ba}_3\text{Nb}_{3.2}\text{Ti}_5\text{O}_{21}$

สารที่ 3 ส่วนผสม  $0.5\text{SrCO}_3 + 0.5\text{PbO} + \text{TiO}_2$  ภายถ่ายพบว่าตำแหน่งของพีคของระนาบคล้ายกับ  $\text{SrTiO}_3$  หรือ  $\text{PbTiO}_3$  แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลของ  $(\text{Sr}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$  ในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นสารที่เตรียมได้น่าจะเป็น  $(\text{Sr}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$

สารที่ 4 ส่วนผสม  $\text{PbO} + 0.5\text{ZrO}_2 + 0.3\text{TiO}_2 + 0.15\text{Y}_2\text{O}_3$  ภายถ่ายพบว่าตำแหน่งของพีคของระนาบคล้ายกับ  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลของ  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.3}\text{Y}_{0.3})\text{O}_3$  ในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นสารที่เตรียมได้น่าจะเป็น  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.3}\text{Y}_{0.3})\text{O}_3$  ที่เพิ่มเข้าไปทำให้ตำแหน่งของพีคเลื่อนไปเล็กน้อย

สารที่ 5 ส่วนผสม  $0.5\text{BaCO}_3 + 0.5\text{PbO} + \text{TiO}_2$  ภายถ่ายพบว่าตำแหน่งของพีคของระนาบคล้ายกับ  $\text{BaTiO}_3$  หรือ  $\text{PbTiO}_3$  แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลของ  $(\text{Ba}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$  ในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นสารที่เตรียมได้น่าจะเป็น  $(\text{Ba}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$

สารที่ 6 ส่วนผสม  $0.8\text{BaCO}_3 + 0.2\text{SnO}_2 + \text{TiO}_2$  ภายถ่ายพบว่าตำแหน่งของพีคของระนาบคล้ายกับ  $\text{BaTiO}_3$  แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลของ  $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{O}_3$  ในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นสารที่เตรียมได้น่าจะเป็น  $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.8}\text{Sn}_{0.2})\text{O}_3$  Sn ที่เพิ่มเข้าไปทำให้พีคเลื่อนไปเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาผลการวัดความต้านทาน ไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิหรือสมบัติพีซีไอในช่วง 25–200 °C ของสาร พบว่าสารที่ 2 มีความต้านทานเพิ่มขึ้นหรือแสดงสมบัติพีซีไอในช่วง 25–75 °C แต่หลังจากอุณหภูมิ 75 °C ความต้านทานลดลง โดยมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นบวก ( $\alpha$ ) เท่ากับ +5.6 %/°C สารที่ 3 มีความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นหรือแสดงสมบัติพีซีไอในช่วง 25–80 °C แต่หลังจากอุณหภูมิ 80 °C ความต้านทานลดลง โดยมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นบวก ( $\alpha$ ) เท่ากับ + 21.08%/°C สารที่ 4 มีความต้านทานเพิ่มขึ้นในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในช่วง 25–80 °C สารแสดงสมบัติพีซีไอโดยมี  $\alpha$  เท่ากับ 9.75 %/°C สารที่ 5 มีความต้านทานเพิ่มขึ้นในช่วง 25–85 °C โดยมีค่า  $\alpha = 130.58$  %/°C และความต้านทานมีค่าลดลงในช่วง 80–150 °C สารที่ 6 มีความต้านทานเพิ่มขึ้นในช่วง 27–140 °C โดยมีค่า  $\alpha = 8.52$  %/°C และความต้านทานมีค่าลดลงในช่วง 140–200 °C สาเหตุที่ความต้านทานเพิ่มขึ้นคาดว่าเกิดจากขอบเขตของเกรนจับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลดลง กระแสไฟฟ้าลดลง ความต้านทานไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นในลักษณะแบบเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในสารกลุ่ม BaTiO<sub>3</sub> ที่รายงานโดย Buchanan<sup>(2)</sup> ปรากฏการณ์พีซีไอเหล่านี้มีความสอดคล้องกับที่รายงานโดย Padmini, Homg-Yi Chang และ Nan<sup>(6,7,8)</sup> แต่ความต้านทานที่ลดลงเกี่ยวข้องกับโครงสร้างแถบพลังงาน ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนจะย้ายจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ มีอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้น จำนวนอิเล็กตรอน (สารชนิด n) หรือจำนวนโฮล (สารชนิด p) ที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความต้านทานจึงมีค่าลดลง ปรากฏการณ์ พีซีไอที่เกิดขึ้นมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้เป็นหัววัดอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาผลการวัดเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าสารที่ 3, 5 และ 6 มีแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงจากบวกไปเป็นลบ สารจึงเป็นชนิด n ดังนั้นพหุคูณไฟฟ้ามีประจุลบซึ่งก็คืออิเล็กตรอน สารที่ 4 มีแรงดันเทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงจากลบไปเป็นบวก สารจึงเป็นชนิด p พหุคูณไฟฟ้ามีประจุบวก พหุคูณไฟฟ้าเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับกรณนำไฟฟ้าของสาร

เมื่อพิจารณาผลการวัดการกรองแรงดันไฟฟ้าพบว่าสารที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 สามารถกรองแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง 120–225 kHz, 80–225 kHz, 150–400 kHz, 100–200 kHz, 150–250 kHz และ 150–280 kHz ตามลำดับ อิมพีแดนซ์ที่มีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารหรือตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับสาร แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ขึ้นกับความถี่ทำให้สารสามารถทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้าได้ ผลการวัดการกรองแรงดันไฟฟ้ามีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กรองแรงดันไฟฟ้าสูงผ่านและอุปกรณ์วัดความถี่ของแรงดันไฟฟ้า ปรากฏการณ์ที่อิมพีแดนซ์ของสารขึ้นกับความถี่นี้แสดงว่าสารแสดงพฤติกรรมเป็นไดอิเล็กทริกซึ่งมีความสอดคล้องกับที่รายงานโดย Ligin -Zhou และ Kazaoui<sup>(4,5)</sup> เนื่องจากเหตุทั้งสองได้วัดความจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับความถี่และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับความถี่ซึ่งเป็นสมบัติของ ไดอิเล็กทริก ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการวัดวีริเตเตอร์พบว่าสารที่ 2 แสดงความผันผวนระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารกับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารเป็นแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีผลจูงกำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้นเท่ากับ 17.8 ดังนั้นสารนี้มีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดัน ไฟฟ้าเกิน ในวงจร

เมื่อพิจารณาผลของการวัดความจุ-แรงดันพบว่าสารที่ 1 แสดงสมบัตินี้ จากกราฟเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วนสารอื่นวัดไม่ได้เนื่องจากความจุเกิน เครื่องวัดไม่สามารถอ่านได้ การที่ความจุไฟฟ้าขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าก็เกี่ยวข้องกับกระบวนการเก็บและคายประจุไฟฟ้าของสารซึ่งสอดคล้องกับงานที่ทำโดย Zhang<sup>(3)</sup> เนื่องจากเขาได้วัดกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสำหรับกรณีการเก็บและคายประจุซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับความสามารถของการเก็บประจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป

เมื่อพิจารณาผลการวัดการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่พบว่าอิมพีแดนซ์ของสารที่ขึ้นความถี่ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารเปลี่ยนแปลงในขณะที่ความถี่เปลี่ยนแปลง เมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างความถี่จากเครื่องจริง (true) กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสาร (AV) ของสารที่ 1, 3, 4, 5 และ 6 ในช่วงความถี่ที่ต้องการศึกษาก็ให้นำสมการความสัมพันธ์นี้ใส่ลงในโปรแกรมแล้ว เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความถี่จากเครื่องจริง (true) กับความถี่จากเครื่องสร้าง (fmeasure) ผลปรากฏว่าสารแสดงการแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้า (frequency-to-voltage conversion) และการแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ (voltage-to-frequency conversion) สารสามารถนำไปทำเป็นหัววัดความถี่ (frequency sensor) ช่วงความถี่ที่วัดของสารที่ 1, 3, 4, 5 และ 6 คือ 2.7 kHz - 22.7 kHz, 1 kHz - 11 kHz, 1 kHz - 13 kHz, 1 kHz - 19 kHz และ 1 kHz - 13 kHz ตามลำดับ ยังไม่มีผู้รายงานเกี่ยวกับการประยุกต์สารทั้ง 5 สูตร ให้ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์วัดความถี่ แต่อย่างไรก็ตามงานที่ทำได้ยิ่งจะต้องมีการพัฒนาต่อไปอีก

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนโครงการทางฟิสิกส์ ทุนทำงานแลกเปลี่ยนมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ ประจำปี 2546 และทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2547 และได้ใช้เครื่องมือจากห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุและหน่วยเครื่องมือกลางคณะวิทยาศาสตร์

#### เอกสารอ้างอิง

1. Moulson, A.J. and Herbert, J.M. 1990. *Electroceramics*. Chapman & Hall. London.
2. Buchanan Relva, C. 1991. *Ceramic materials for electronics*. 2<sup>nd</sup> ed., Mercel Dekker Inc. New York.
3. Zhang J. L. 1992. Electrical conduction of  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$  ceramics under d.c. voltage. *J. Mater. Sci. Lett.*, (11) : 294-295.
4. Liqin Zhou. 1992. Preparation and properties of Sr-Ba-TiO<sub>3</sub>-based multilayer boundary-layer capacitors. *J. Mater. Sci. Lett.* (11) : 1134-1136.
5. Kazaoui, S. 1993. Dielectric relaxation in  $(BaTi_{0.9}Zr_{0.2})O_3$  ceramics prepared from sol-gel and solid state reaction powders. *J. of Mater. Sci.* (28) : 1211-1219.
6. Padmini, P., and Kutty, T. R. N. 1994. Influence of  $Bi^{3+}$  ions in enhancing the magnitude of positive temperature coefficients of resistance in n-BaTiO<sub>3</sub> ceramics. *J of Mater. Sci. : Mater. in Elect.* (5) : 203-209.

7. Horng-Yi Chang., Kuo-Shung Liu, and I-Nan Lin. 1995. Electrical characteristics of  $(\text{Sr}_{0.2}\text{Ba}_{0.8})\text{TiO}_3$  positive temperature coefficient of resistivity materials prepared by microwave sintering. J. of Appl. Phys. (78) : 423-427.
8. Hari, N. S., Padmini, P., and Kutty, T. R. N. 1997. Complex impedance analyses of n-BaTiO<sub>3</sub> ceramics showing positive temperature coefficient of resistance. J. of Mater. : Mater. in Elect. (8) : 15-22

18. การเตรียมสาร  $\text{LaCoO}_3$  ทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิ  
ในช่วง-133 ถึง  $135^\circ\text{C}$  และประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์ความเย็น (2547)

การเตรียมสาร  $\text{LaCoO}_3$  ทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิ  
ในช่วง-133 ถึง  $135^\circ\text{C}$  และประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์ความเย็น  
 $\text{LaCoO}_3$  material preparation, temperature response test  
at  $-133$  to  $135^\circ\text{C}$  range and used as cool switch

ธงชัย พันธุ์เมธาฤทธิ  
Thongchai Panmatarith

จิราภรณ์ ศรีพรหม  
Chirapom Sriprom

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University

### บทคัดย่อ

ได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับปรากฏการณ์สัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่เป็นลบของ  $\text{LaCoO}_3$  ในช่วงอุณหภูมิ  $-133$ - $135^\circ\text{C}$  ผลการทดลองสมบัติเชิงทรีที่ตีเลิศในช่วงอุณหภูมิ  $-133$  ถึง  $-120^\circ\text{C}$  โดยมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $-56462.8\ \%/^\circ\text{C}$  อัตราส่วนของความต้านทานที่  $-133^\circ\text{C}$  กับความต้านทานที่  $23^\circ\text{C}$  มีค่าประมาณ 341,091.5 เท่า ได้ทดสอบสวิตช์ความเย็นที่ทำมาจากวัสดุนี้เป็นครั้งแรก ช่วงเวลาการทำงานของสวิตช์นี้มีค่าประมาณ 11.34 วินาที

### Abstract

The negative temperature coefficient effect of  $\text{LaCoO}_3$  had been investigated in the temperature range  $-133$ - $135^\circ\text{C}$ . This sample showed the excellent negative temperature coefficient property from  $-133$  to  $-120^\circ\text{C}$  with the measured high negative temperature coefficient of resistance ( $\alpha$ ) about  $-56462.8\ \%/^\circ\text{C}$ . The resistance ratio between  $-133^\circ\text{C}$  and  $23^\circ\text{C}$  was 341,091.5. The cool switch made from this material was tested for the first time. The switching operation time of this switch was about 11.34 s.

## คำนำ

ในปี 1833 ฟาราเดย์ (Faraday) ได้ค้นพบและรายงานเกี่ยวกับพฤติกรรมกึ่งการนำไฟฟ้าของ  $Ag_2S$  หัววัดอุณหภูมิที่ทำมาจากเซรามิกส์ที่ใช้ในทางการค้าเริ่มในปี 1940 และมีการผลิตเป็นอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวางในระหว่างปี 1950-1960

เทอร์มิสเตอร์ (thermistor) คือ ตัวต้านทานที่มีความต้านทานเปลี่ยนแปลงในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เทอร์มิสเตอร์เป็นตัวต้านทานที่ไวต่อความร้อน (thermally sensitive resistor) ซึ่งมีชื่อย่อเป็น TSR เทอร์มิสเตอร์ที่จะศึกษานี้เป็นแบบ NTC (negative temperature coefficient) เทอร์มิสเตอร์แบบนี้จะมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ [(negative temperature coefficient of resistance ( $\alpha$ )] สูง<sup>1</sup> ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ที่มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกิดจากผลของลักษณะสมบัติอินทรีนซิก (intrinsic characteristics)

สารที่ไว้ทำเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งลักษณะสมบัติเชิงไฟฟ้าของหัววัดเกี่ยวข้องกับ  $\rho = RAL$  เมื่อ  $\rho$  เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (material resistivity)  $R$  เป็นความต้านทานไฟฟ้า (resistance)  $A$  เป็นพื้นที่ขั้วผล (effective area) และ  $L$  เป็นความหนาของสาร ค่า  $\alpha$  สอดคล้องตามสมการ  $\alpha = (1/R)(dR/dT)$  สภาพการนำไฟฟ้าของสารเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนและโฮลบนวง-ลบของอะตอม และเกี่ยวข้องกับช่องว่างแถบพลังงานของสาร<sup>1</sup>

ตัวอย่างสารที่ใช้เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ได้แก่  $Fe_3O_4-ZnCr_2O_4$ ,  $Fe_3O_4-MgCr_2O_4$ ,  $(NiMn)_3O_4$ ,  $(NiMnCo)_3O_4$ ,  $(NiMnFeCo)_3O_4$ ,  $(Fe,Ti)_2O_3$ ,  $Mn_xCo_{3-x}O_4$  และ  $0.56MnO + 0.08CoO + 0.16NiO + 0.20CuO$  เป็นต้น<sup>2</sup>

เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC สามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นหัววัดอุณหภูมิ (temperature sensor), หัววัดการไหลของความร้อน (heat flow sensor), หัววัดการแผ่รังสี (radiation sensing sensor), หัววัดสุญญากาศ (vacuum gauge), หัววัดความดัน (pressure gauge) และหัววัดการชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensation sensor)<sup>2</sup>

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ได้มีการศึกษาโดยนักวิจัยกลุ่มต่างๆ ดังนี้ Soliman (1993) ในประเทศอียิปต์ ได้ศึกษาเทอร์มิสเตอร์ในทางการค้าซึ่งเตรียมมาจากส่วนผสมของ  $NiO$ ,  $Mn_2O_3$  และ  $Co_2O_3$  แล้ววัดความต้านทานของสารที่อุณหภูมิต่างๆ<sup>3</sup> Martinez Samion (1995) ในประเทศสเปน ได้เตรียม  $Fe_{2.19}Mn_{0.21}Ni_{0.61}O_4$  ซึ่งเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC สารชนิดนี้อยู่ในกลุ่มเฟอร์ไรต์ วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ส่วนผสมต่างๆ ศึกษาเสถียรภาพทางไฟฟ้า (electrical stability) โดยการวัดการแปรค่าความต้านทานกับเวลา<sup>4</sup> Fruhwirth (1997) ในประเทศออสเตรีย ได้รายงานว่าหัววัดไฟฟ้าที่ทำจาก  $Ag$  สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $500^\circ C$  และได้ทำการวัดพบว่าเกิดชั้นกั้นกำแพง (barrier layers) ระหว่างหัว  $Ag$  กับ เซรามิกส์แบบ NTC<sup>5</sup>

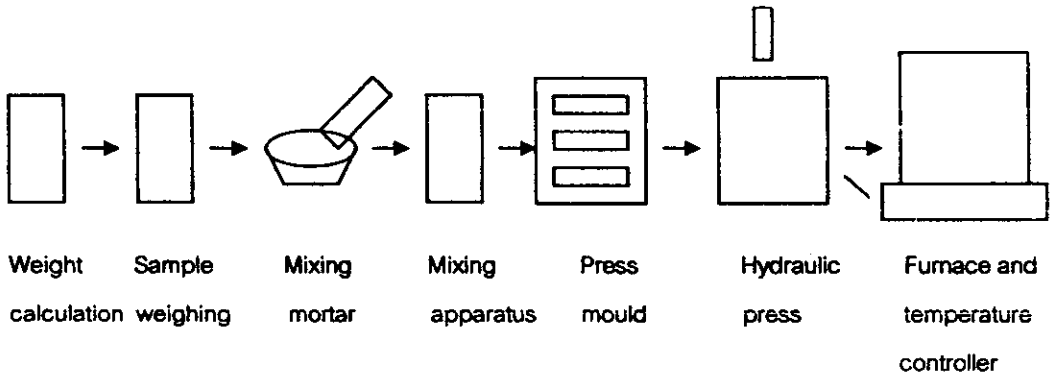
- Dziedzic (1997) ในประเทศโปแลนด์ ได้บรรยายเกี่ยวกับหัววัดอุณหภูมิแบบฟิล์มบางที่ทำงานโดยอาศัยหลักของความต้านทาน จากสาร  $Mn_{1.6}Co_{0.8}Ni_{0.35}Ru_{0.25}O_4/RuO_2/glass$  ซึ่งสามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิห้องถึง  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>6</sup>
- Adalbert Feltz (2000) ในประเทศออสเตรีย ได้เตรียมสาร  $Fe_xNi_yMn_{1-x-y}O_4$  เพื่อใช้งานเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ที่อุณหภูมิสูง<sup>7</sup>
- Chanel (2000) ในประเทศฝรั่งเศส ได้เตรียมสาร  $Mn_{2.23-x}Ni_{0.66}Zn_xO_4$  ศึกษาสมบัติ NTC สำหรับประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม<sup>8</sup>
- Hosseini (2000) ในประเทศอิหร่าน<sup>9</sup> ได้ศึกษาผลของ Ni ที่มีต่อสมบัติไฟฟ้าของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ที่สร้างมาจากส่วนผสมของ  $(Ni_xMn_yCo_z)O_4$
- Wenzhong Lu ในประเทศจีน ได้เตรียม  $Ba(Sn,Sb)O_3+Bi_2O_3$  ได้วัดสภาพการนำไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ<sup>10</sup> พบว่าสารแสดงสมบัติอุณหภูมิที่เป็นลบแบบเชิงเส้นในช่วง  $0-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  และสามารถปรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ  $Bi_2O_3$
- Lawton (2000) ในประเทศสหรัฐ ได้สร้างระบบควบคุมแบบหลายวงเพื่อสร้างเสถียรภาพของอุณหภูมิ ทำได้โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายไปยังตัวให้ความร้อนแบบขดลวด (coil heater) และใช้เทอร์มิสเตอร์ที่ต่อวงจรในรูปของบริดจ์ไฟฟ้าตรง (DC bridge) เพื่อให้เกิดสัญญาณป้อนกลับ (feedback signals)<sup>11</sup>
- Schmidt (2001) ในประเทศอังกฤษ ได้ทำเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC แบบฟิล์มบางจากวัสดุ  $NiMn_2O_4$  ได้วัดความต้านทานไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและพบว่ากลไกการนำไฟฟ้าสอดคล้องกับแบบจำลองฮอปป์นิง (hopping model)<sup>12</sup>
- Basu (2001) ในประเทศอังกฤษ<sup>13</sup> ได้ศึกษาลักษณะสมบัติ NTC ของเซรามิกส์ที่ทำมาจาก  $Bi_2O_3$  ที่ถูกเติมด้วย  $TiO_2$ ,  $Ta_2O_5$  และ  $WO_3$  ในช่วงอุณหภูมิ  $100-700\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Jansak (2001) ในประเทศไลวาเกียได้พบว่าหัววัดอุณหภูมิที่ทำงานโดยอาศัยหลักการของความจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุที่ผลิตใช้งานในทางการค้ามีความไวมากในย่านไมโครเจนเทล<sup>14</sup>
- Dipika Saha (2002) ในประเทศอินเดีย ได้เตรียม  $(Mn_xFe_{1-x})_2O_3$  และวัดดัชนีความไวแบบเอ็นทีซี [NTC sensitivity index ( $\beta$ )]<sup>15</sup>
- Gutierrez (2002) ในประเทศสเปน ได้เตรียมสาร  $YNi_xMn_{1-x}O_3$  พบว่าสารแสดงพฤติกรรมกึ่งการนำไฟฟ้าและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC<sup>16</sup>
- จากการตรวจเอกสารพบว่าไม่มีผู้ทดลองเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ในเชิงประยุกต์น้อยมาก ผู้เขียนได้พบโดยบังเอิญว่าสาร  $LaCoO_3$  มีความไวต่ออุณหภูมิมากโดยเฉพาะในย่านความเย็นต่ำ ในขณะที่กำลังสอนปฏิบัติการวัสดุศาสตร์ (332-351) เทอม 1 ปี 2547 ยังไม่มีผู้ใดศึกษาการใช้งานเป็นสวิตช์ความเย็น ดังนั้นจึงได้เลือกศึกษาสารตัวนี้
- วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมก้อนสาร  $LaCoO_3$  โดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน ทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิในช่วง  $-133$  ถึง  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  คำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบของสาร ทดสอบการประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์ความเย็น



## อุปกรณ์และวิธีการ

### 1. การเตรียมก้อนสารตัวอย่าง ตรวจสอบเฟสและทำขั้วไฟฟ้า

เตรียมสารโดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน (standard ceramic techniques) ซึ่งเป็นวิธีการที่รายงานโดย บูชานัน (Buchanan)<sup>2</sup> (รูปที่ 1) วัสดุเริ่มต้นที่ใช้เป็นผง  $\text{La}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CoO}$  ซึ่งมีความบริสุทธิ์ 99.5% คำนวณน้ำหนักโดยใช้ส่วนผสม  $\text{LaCoO}_3$  ซึ่งผงของสาร ผสมสารโดยการคนในครก นำผงใส่กระป๋องพลาสติกแล้ววางในเครื่องหมุนผสมสาร หมุนผสมเป็นเวลา 5 นาที หยดสารยัดเหนียว PVA (polyvinyl alcohol) ผสมน้ำกลั่นเพื่อสะดวกในการอัดเป็นก้อน นำผงของสารใส่ในบ่้อัด อัดเป็นก้อนด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (RIIK 25 tons) นำสารใส่เตาหลอมไฟฟ้า (furnace) ที่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (FCR-13A-R/M) และใช้เทอร์มิคอปเปิลชนิด R โดยทำการเผาสองครั้ง เเผ่ที่ 1 ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ ในอากาศ นำมาบดเป็นผงแล้วอัดเป็นก้อน เเผ่ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ ในอากาศ โดยในแต่ละครั้งใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °ซ/นาที และ อุณหภูมิเย็นไฟ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นโดยการปิดเตา



รูปที่ 1. ขั้นตอนการเตรียมก้อนสารโดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน

นำก้อนสารที่ผ่านการเผาไปถ่ายด้วยเครื่อง XRD (X-ray diffractometer) (Philips PW3710) (รูปที่ 2) เพื่อดูเฟส (phase) ของสาร แอนโนตรของหลอดทำมาจาก Cu ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ กระแสในหลอดรังสีเอกซ์ 30 มิลลิแอมแปร์ มุมแบรกก์ที่ทำการถ่าย 2 $\theta$  อยู่ในช่วง 10.010° ถึง 49.990° และความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ ( $\lambda_{\text{Cu}}$ ) เป็น 1.54056 อังสตรอม ทำหิ้วของก้อนสารที่เตรียมได้ด้วยกาวยิน (CW2400, ITW Chemtronics) แล้ววางลงบนผิวหน้าของสารและขบด้วยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิ 120 °ซ เป็นเวลา 10 นาที ขารองอุปกรณ์ทำมาจากลวดไทเทเนียม

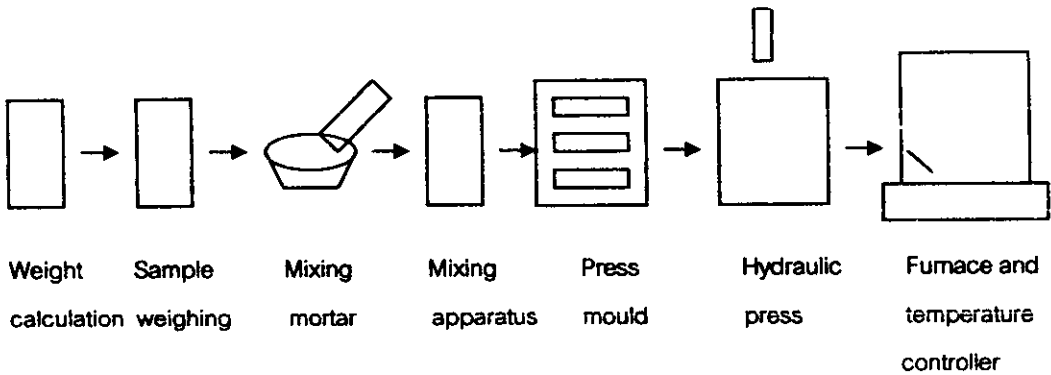


รูปที่ 2. การจัดเครื่องมือเพื่อตรวจสอบเฟสของสารด้วยเครื่อง XRD

## อุปกรณ์และวิธีการ

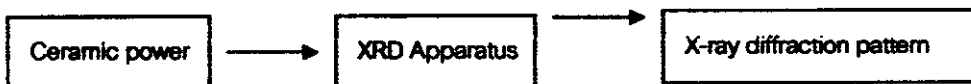
### 1. การเตรียมก้อนสารตัวอย่าง ตรวจสอบเฟสและทำซีวไฟฟ้า

เตรียมสารโดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน (standard ceramic techniques) ซึ่งเป็นวิธีการที่รายงานโดย บูรานัน (Buchanan)<sup>2</sup> (รูปที่ 1) วัสดุเริ่มต้นที่ใช้เป็นผง  $\text{La}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CoO}$  ซึ่งมีความบริสุทธิ์ 99.5% คำนวณน้ำหนักโดยใช้ส่วนผสม  $\text{LaCoO}_3$  ซึ่งผงของสาร ผสมสารโดยการคนในครก นำผงใส่กระป๋องพลาสติกแล้ววางในเครื่องหมุนผสมสาร หมุนผสมเป็นเวลา 5 นาที หยดสารยึดเหนี่ยว PVA (polyvinyl alcohol) ผสมน้ำกัณฑ์เพื่อสะดวกในการอัดเป็นก้อน นำผงของสารใส่ในแม่อัด อัดเป็นก้อนด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (RIIK 25 tons) นำสารใส่เตาหลอมไฟฟ้า (furnace) ที่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (FCR-13A-R/M) และใช้เทอร์โมคอปเปิลชนิด R โดยทำการเผาสองครั้ง เผาที่ 1 ที่อุณหภูมิ 1200 °C ในอากาศ นำมาบดเป็นผงแล้วอัดเป็นก้อน เผาครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 1200 °C ในอากาศ โดยในแต่ละครั้งใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C/นาที และ อุณหภูมิขึ้นไฟ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นโดยการปิดเตา



รูปที่ 1. ขั้นตอนการเตรียมก้อนสารโดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน

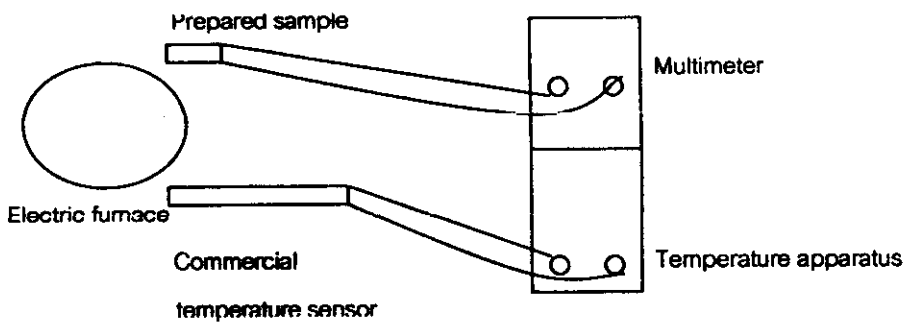
นำก้อนสารที่ผ่านการเผาไปถ่ายด้วยเครื่อง XRD (X-ray diffractometer) (Philips PW3710) (รูปที่ 2) เพื่อดูเฟส (phase) ของสาร แอนโนตรของหลอดที่มาจาก Cu ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ กระแสในหลอดรังสีเอกซ์ 30 มิลลิแอมแปร์ มุมแบรกก์ที่ทำการถ่าย 2 $\theta$  อยู่ในช่วง 10.010° ถึง 49.990° และความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ ( $\lambda_{\text{Cu}}$ ) เป็น 1.54056 อังสตรอม ทำซีวของก้อนสารที่เตรียมได้ด้วยกาเวิน (CW2400, ITW Chemtronics) แล้วทาฉนวนผิวหน้าของสารและอบด้วยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที สารของอุปกรณ์ที่มาจากหลอดโทรทัศน์



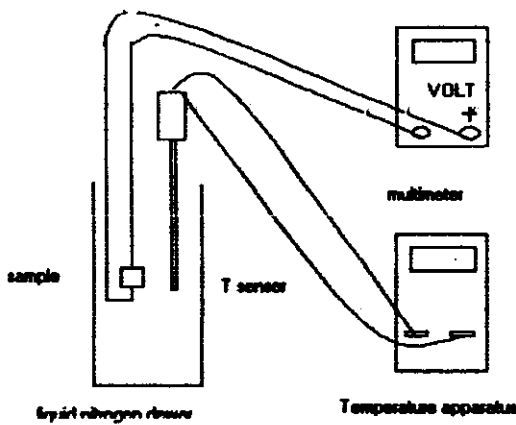
รูปที่ 2. การจัดเครื่องมือเพื่อตรวจสอบเฟสของสารด้วยเครื่อง XRD

2. การวัดสมบัติเชิงทฤษฎีของสารในช่วงอุณหภูมิ -133 ถึง 135 °ซ

จัดชุดทดลองสำหรับวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง 23 ถึง 135 °ซ (รูปที่ 3) เพิ่มอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า ใช้มัลติมิเตอร์ (Fluke 45 Dual Display Multimeter) วัดความต้านทานไฟฟ้าของสารที่เตรียมได้และใช้วัดเครื่องวัดอุณหภูมิ (AVD M890C<sup>+</sup>) วัดอุณหภูมิ นำผลใส่ในตาราง พล็อตกราฟและแสดงผลการด้วย EXCEL (ได้วัดของเทอร์มิสเตอร์ที่ชื่อมาเพื่อใช้เปรียบเทียบด้วย) คำนวณและเปรียบเทียบค่า  $\alpha$  ของเทอร์มิสเตอร์ที่เตรียมได้กับเทอร์มิสเตอร์ที่ใช้ในทางการค้า ส่วนการวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง -133 ถึง 23 °ซ มีการทดลองในทำนองเดียวกัน แต่เปลี่ยนเตาไฟฟ้าเป็นไนโตรเจนเหลว (รูปที่ 4)



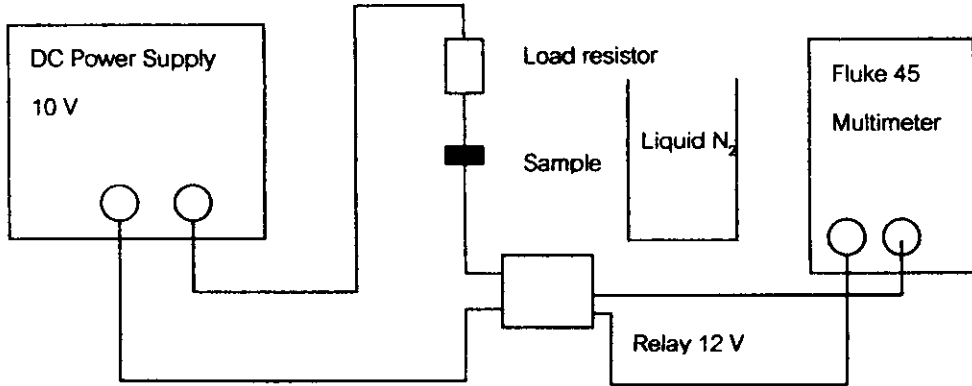
รูปที่ 3. การวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง 23 ถึง 135 °ซ



รูปที่ 4. การวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง -133 ถึง 23 °ซ

### 3. การทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์ความเย็น

จัดเครื่องมือตามรูปที่ 5 ป้อนแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานโหลด 200 โอห์ม สารที่เตรียมได้และขดลวดของรีเลย์ ทำการรุ่มสารลงในไนโตรเจนเหลว สังเกตผลที่เกิดขึ้นโดยการฟังเสียงของรีเลย์ ใช้มัลติมิเตอร์วัดความต้านทานของสวิตช์ตัว 3 กับ 5 ของรีเลย์เพื่อดูการเปิดปิดสวิตช์ในขณะที่สารได้รับอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว



รูปที่ 5. การทดสอบสารที่เตรียมได้ให้ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ความเย็น

### ผลการทดลอง

#### ผลการเตรียมก้อนสารตัวอย่าง ตรวจสอบเฟสและทำซีวไฟฟ้า

ได้ก้อนสารตัวอย่างรูปจานที่มีความหนา 2.53 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร สารมีสีดำ สารที่เตรียมมีสูตรของส่วนผสมเป็น  $0.5\text{La}_2\text{O}_3 + \text{CoO}$  เมื่อพิจารณาภาพถ่าย XRD พบว่าสารมีเฟสเป็น  $\text{LaCoO}_3$  (รูปที่ 6) โครงสร้างผลึกของสารอยู่ในระบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral system) ระนาบของผลึกที่พบได้แก่ (012), (110), (104), (202), (006) และ (024)

#### ผลการวัดสมบัติเย็นที่ซีของสารในช่วงอุณหภูมิ $-133$ ถึง $135$ °ซ

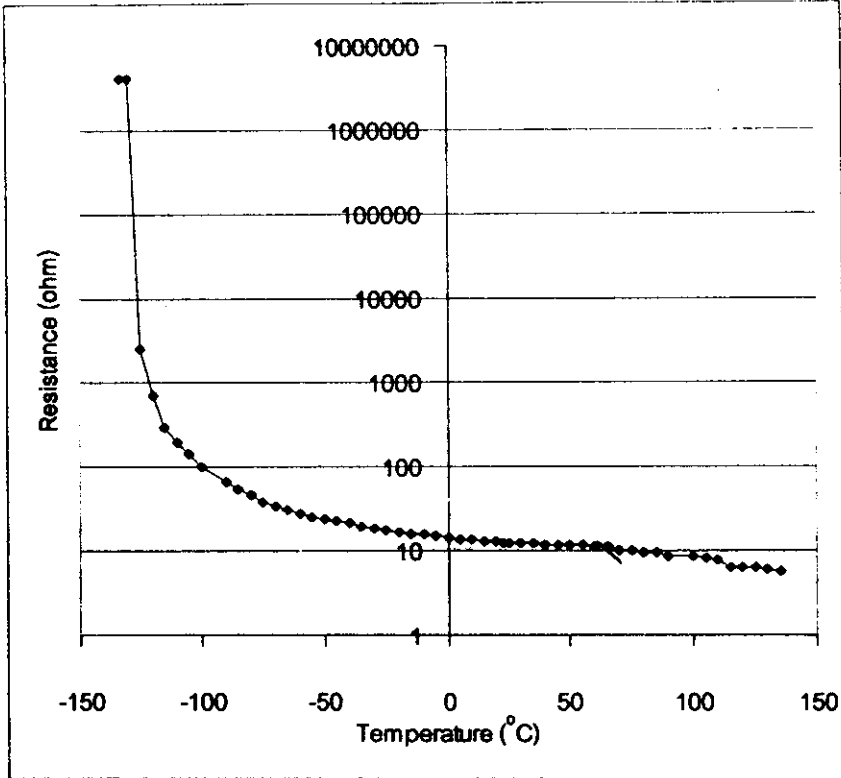
ความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิของสารที่เตรียมแสดงดังรูปที่ 6 จากรูปพบว่าความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือในทางกลับกันความต้านทานของสารมีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิลดลง

#### ผลการทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์ความเย็น

การทำงานเป็นสวิตช์ความเย็นมีสองจังหวะดังนี้

จังหวะที่ 1 : ที่อุณหภูมิห้อง ( $23$  °ซ) สารมีความต้านทาน 12.46 โอห์ม กระแสไหลในวงจรมีค่าสูง ขดลวดของรีเลย์ มีอำนาจแม่เหล็ก ความต้านทานที่มัลติมิเตอร์อ่านได้มีค่าสูง (สวิตช์ 3 ไม่ต่อกับ 5)

จังหวัดที่ 2 : จุ่มสารลงในไนโตรเจนเหลว ( $-133^{\circ}\text{C}$ ) สารมีความต้านทาน 4.25 เมกกะโหลม กระแสไหลในวงจร มีค่าต่ำ ราคาลดของรีเลย์ไม่มีอำนาจแม่เหล็ก ความต้านทานที่มีเตอร์อ่านได้มีค่าต่ำ (สวิตช์ 3 ต่อกับ 5) ได้ยินเสียงการตัดต่อสวิตช์จึงแสดงให้เห็นว่าสารสามารถทำงานเป็นสวิตช์ความเย็นได้ ช่วงเวลาดังแต่ก่อนและไนโตรเจนเหลว (12.46 โหลม) จนกระทั่งและไนโตรเจนเหลว (4.25 เมกกะโหลม) มีค่าเท่ากับ 11.34 วินาที



รูปที่ 6. ความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิสำหรับ  $\text{LaCoO}_3$

### วิเคราะห์และสรุป

สารที่เตรียมได้มีเฟสเดียวโดยมีสูตรเป็น  $\text{LaCoO}_3$  สารแสดงสมบัติเซ็นทีซีเนื่องจากมีความต้านทานลดลงในขณะที่ยุณหภูมิเพิ่มขึ้น สารมีลักษณะเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบเอ็นทีซี

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ ( $\alpha$ ) ของเทอร์มิสเตอร์แบบเอ็นทีซีที่เตรียมได้ในย่านอุณหภูมิต่างๆมีค่าดังต่อไปนี้

-133 ถึง  $-120^{\circ}\text{C}$  :  $\alpha = -58462.8 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$

-120 ถึง  $-100^{\circ}\text{C}$  :  $\alpha = -26.152 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$

-100 ถึง - 50 °ซ :  $\alpha = -5.696 \text{ \%}^{\circ}\text{ซ}$

- 50 ถึง 23 °ซ :  $\alpha = -1.22 \text{ \%}^{\circ}\text{ซ}$

23 ถึง 135 °ซ :  $\alpha = -0.0515 \text{ \%}^{\circ}\text{ซ}$

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ ( $\alpha$ ) ของเทอร์มิสเตอร์ที่ไปในทางการค้า (ผู้เขียนวัดเอง) มีค่า

23 ถึง 112 °ซ :  $\alpha = -0.977 \text{ \%}^{\circ}\text{ซ}$

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ ( $\alpha$ ) ที่ได้รับรายงานโดยบุชานัน (Buchanan)<sup>2</sup>

25 ถึง 300 °ซ :  $\alpha = -1 \text{ ถึง } -6 \text{ \%}^{\circ}\text{ซ}$

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ ( $\alpha$ ) ของตัวต้านทานค่าคงที่ (20 กิโลโห์ม) (ผู้เขียนวัดเอง) มีค่า

-133 ถึง 23 °ซ :  $\alpha = -0.029 \text{ \%}^{\circ}\text{ซ}$

เมื่อพิจารณาผลที่ได้เราจะเห็นได้ว่าสารที่เตรียมได้มีค่า  $\alpha$  ลดลง เมื่ออุณหภูมิยิ่งต่ำลง ค่า  $\alpha$  มากที่สุดในช่วง

-133 ถึง -120 °ซ  $\alpha$  ในช่วงอุณหภูมิมีค่ามากกว่าของเทอร์มิสเตอร์ที่ไปในทางการค้า ของที่ได้รับรายงาน

โดยบุชานัน ส่วนค่า  $\alpha$  ของตัวต้านทานค่าคงที่มีค่าต่ำที่สุดซึ่งไม่วิเคราะห์ถึงความแม่นยำ ดังนั้นสารจึงเหมาะสมที่

จะนำไปประยุกต์ใช้ในช่วงอุณหภูมิต่ำได้ดีมาก

เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของสารที่เตรียมได้มีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นสารที่เตรียมได้นี้แสดงสมบัติของเซรามิกกึ่งตัวนำ (semiconducting ceramics) และมีความเกี่ยวข้องกับช่องว่างพลังงานของสาร สาเหตุที่ความต้านทานไฟฟ้าลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกิดจากอิเล็กตรอนย้ายจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ<sup>3</sup> พาหะไฟฟ้าที่เป็นอิเล็กตรอนมีจำนวนเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลเพิ่มขึ้น ความต้านทานของสารจึงมีค่าลดลง

เนื่องจากสารมีความไวต่อการตอบสนองต่ออุณหภูมิมาก สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $-56462.8 \text{ \%}^{\circ}\text{ซ}$  ในช่วงอุณหภูมิ -133 ถึง -120 °ซ อัตราส่วนของความต้านทานที่ -133 °ซ กับความต้านทานที่ 23 °ซ มีค่าประมาณ 341,091.5 เท่า ซึ่งสูงมากๆ ดังนั้นจึงได้นำไปทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์ความเย็น ผลปรากฏว่าสารที่เตรียมได้สามารถเปิดปิดสวิตช์ได้ในขณะที่ได้รับไนโตรเจนเหลว ช่วงเวลาตั้งแต่ก่อนและไนโตรเจนเหลว (12.46 โหห์ม) จนกระทั่งและไนโตรเจนเหลว (4.25 เมกกะโหห์ม) มีค่าเท่ากับ 11.34 วินาที

ลักษณะเฉพาะของสวิตช์ความเย็นที่ทำมาจากสาร  $\text{LaCoO}_3$  มีดังนี้

- 1) มีเสถียรภาพทางไฟฟ้า (electrical stability,  $\Delta R/\Delta t$ ) ดี
- 2) มีความไวต่อการตอบสนองความเย็นโดยมีค่า  $\alpha = -56462.8 \text{ \%}^{\circ}\text{ซ}$  (-133 ถึง -120 °ซ) ซึ่งสูงมาก
- 3) สามารถเปิดปิดวงจรได้ในขณะที่ได้รับไนโตรเจนเหลว
- 4) ไม่แสดงสมบัติของไดอิเล็กตริก
- 5) ไม่ตอบสนองต่อแสง
- 6) ไม่ตอบสนองต่อความชื้นเมื่อได้หุ้มสารนี้

นอกจากนี้การศึกษาวัดคุณสมบัติที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่เป็นลบซึ่งมีค่าสูงมากในสาร  $\text{LaCoO}_3$  และการประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์ความเย็นนี้ยังไม่ได้มีรายงานในบทความวิจัยใดๆ ผู้เขียนได้พบเป็นครั้งแรกที่ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ. หาดใหญ่

## คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนโครงการทางฟิสิกส์และทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2547 ผ่านทาง PSU และ NRCT และได้ใช้เครื่องมือจากห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุและขอขอบคุณ น.ส. ผุสดี มุหะหมัด ที่ได้ช่วยตรวจสอบเฟสของสารโดยใช้เครื่องมือที่หน่วยเครื่องมือกลางคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

## เอกสารอ้างอิง

1. Moulson, A.J. and Herbert, J.M. Electroceramics. Chapman & Hall, London, 1990.
2. Buchanan Relva, C. Ceramic materials for electronics. second edition. Mercel Dekker Inc., New York, 1991.
3. Soliman, F. A. S. Radiation effects on non-linear resistances. *J. Mater. Sci. : Mater. In Elect.*, 4, 293-300, 1993.
4. Martinez Sarrion, M. L., Preparation and characterization of NTC thermistors based on  $\text{Fe-Mn-Ni-O}_4$ . *J. Mater. Sci.*, 30, 2610-2615, 1995.
5. Fruhwirth, O. Investigation of electrical behaviour of  $\text{LaNi}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{O}_3$  on perovskite NTC ceramics. *Key Engineering Materials.*, 132, 1345-1348, 1997.
6. Dziedzic, A. Thick-film resistive temperature sensors. *Measurement Science & Technology.*, 8, 78-85, 1997.
7. Adalbert Feltz. Spinel forming ceramics of the system  $\text{Fe}_x\text{Ni}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_4$  for high temperature NTC thermistor applications. *Journal of European Ceramic Society.*, 20, 2353-2366, 2000.
8. Chanel, C. Microstructure and electrical properties of NiZn manganite ceramics. *International Journal of Inorganic Materials.*, 2, 241-247, 2000.
9. Hosseini, M. The effect of cation composition on the electrical properties and aging of Mn-Co-Ni thermistors. *Ceramics International.*, 26, 245-249, 2000.
10. Wenzhong Lu. Novel thermistor of Bi-doped  $\text{Ba}(\text{Sn,Sb})\text{O}_3$  with linear negative temperature coefficient. *Sensors and Actuators A: Physical.*, 80, 38-41, 2000.

11. Lawton, K.M. A high-stability air temperature control system. *Precision Engineering.*, 24, 174-182, 2000.
12. Schmidt, R. Preparation and performance of thick film NTC thermistors. *Key Engineering Materials.*, 206-213, 1417-1420, 2001.
13. Basu, A. NTC characteristics of bismuth based ceramic at high temperature. *International Journal of Inorganic Materials.*, 3, 1219-1221, 2001.
14. Jansak, L. Capacitance temperature sensor for the liquid nitrogen region. *Cryogenics.*, 41, 607-608, 2001.
15. Dipika Saha, A. Preparation of bixbyite phase  $(\text{Mn}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{O}_3$  for NTC thermistor applications. *Materials Letters.*, 55, 403-406, 2002.
16. Gutierrez, D. Crystal structure, electrical conductivity and Seebeck coefficient of  $\text{Y}(\text{Mn}, \text{Ni})\text{O}_3$  solid solution. *Journal of European Ceramic Society.*, 22, 567-572, 2002.



**19. การแสดงเส้นโค้งประจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  
ด้วยคอมพิวเตอร์ (2548)**

# การแสดงให้เห็นโค้งประจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์

รศ. ธงชัย พันธุ์เมธาฤทธิ และคุณ จิราภรณ์ ศรีพรหม  
ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

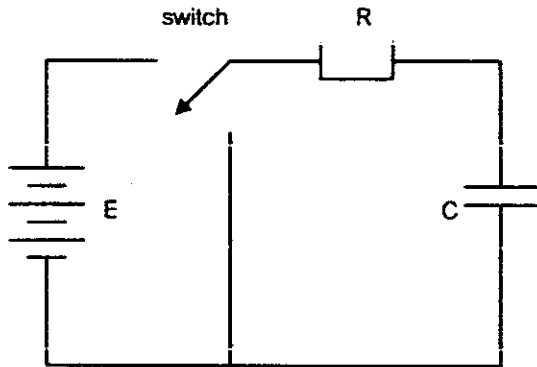
## โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ประกอบด้วยแผ่นตัวนำขนานสองแผ่น (two parallel conducting plate) ที่มีไดอิเล็กตริกคั่นกลาง การเก็บประจุไฟฟ้า คือ การที่ประจุไฟฟ้า (electric charge) เข้าไปในตัวเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นตามเวลา กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุลดลงตามเวลาและควมต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามเวลา ส่วนการคายประจุไฟฟ้า คือ การที่ประจุไฟฟ้าออกจากตัวเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุจะลดลงตามเวลา กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุลดลงตามเวลาและความต้านทานไฟฟ้าลดลงตามเวลา

การค้นพบไฟฟ้าเฟอร์โร (ferroelectricity) ใน  $\text{BaTiO}_3$  ในปี ค.ศ. 1940 นำไปสู่การทำตัวเก็บประจุที่มีการเก็บประจุไฟฟ้า

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง (high dielectric constant capacitor) ไฟฟ้าเฟอร์โรเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้าซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับความสมมาตรของผลึก (crystal symmetry) ไฟฟ้าเฟอร์โรเกิดจากทิศทางขนานกันของโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole moment) บริเวณที่มีโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง (spontaneously polarized region) ที่มีโพลาไรเซชันทิศทางเดียวเรียกว่า โดเมน (domain) ความสัมพันธ์ของการจัดเรียงตัวของโดเมนหนึ่งกับอีกโดเมนหนึ่งถูกควบคุมโดยความสมมาตรของผลึก วัสดุในกลุ่ม  $\text{BaTiO}_3$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกต์ ใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบเซรามิกส์ (ceramic capacitor)

เมื่อต่อตัวเก็บประจุ (C) เป็นวงจรกับตัวต้านทาน (R) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า E ดังรูปที่ 1



รูปที่ 2 การเก็บและการคายประจุไฟฟ้า

ถ้าสวิตช์ S ไปที่ 1 จะได้ว่า ณ เวลา  $t$  โดๆ ประจุไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุสามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ  $q = q_0(1 - e^{-t/RC})$ .....(1)

$q_0 = EC$ .....(2)

เมื่อ  $q_0$  เป็นประจุไฟฟ้าสูงสุดบนตัวเก็บประจุไฟฟ้า ค่า RC มีหน่วยเป็นเวลา เรียกว่า ค่าคงที่เวลาของวงจร RC ถ้า  $t = RC$  จะได้

$q = 0.63q_0$ .....(3)

**การคายประจุไฟฟ้า**

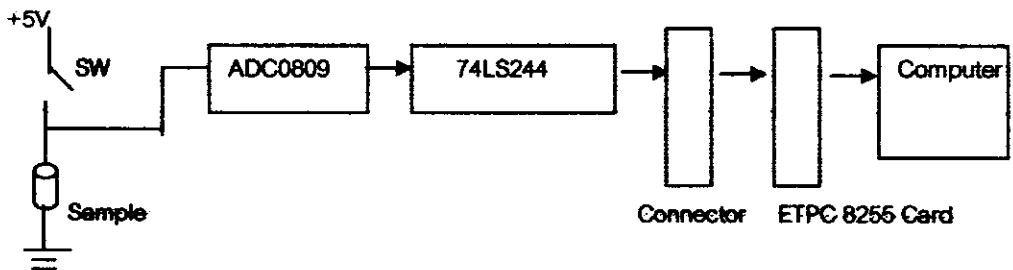
เมื่อสวิตช์ S ไปที่ 1 จนกระทั่งประจุไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุมีค่าสูงสุด ( $q_0$ ) (หรือ  $V_0$ ) มีค่าสูงสุด = E ถ้าสวิตช์ S ไปที่ 2 (รูปที่ 2) ตัวเก็บประจุจะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R ทำให้ประจุไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุลดลง ประจุไฟฟ้าที่เหลือบนตัวเก็บประจุ ( $q$ ) ณ เวลา  $t$  โดๆ เขียนเป็นสมการได้ คือ

$q = q_0(e^{-t/RC})$ .....(6)

และความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุ ( $V_c$ ) ที่เวลา

เมื่อพิจารณาจากการทดสอบการเก็บและคายประจุไฟฟ้าของสาร  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$  (Zhang, 1992) ก็ได้ ชาติยเทคนิคการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์จากประสบการณ์และเอกสารทั่วไป (George C. Barney, 1988) มา คัดแปลง แล้วเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมสำหรับแสดงเส้นโค้งประจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วย คอมพิวเตอร์ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เขียนบล็อกไดอะแกรม (รูปที่ 2) ประกอบวงจรและทดสอบจนใช้ได้



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมสำหรับให้คอมพิวเตอร์แสดงเส้นโค้งประจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลา ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์

นั่นคือ ค่าคงที่เวลาของวงจร RC คือเวลาที่ตัวเก็บ ประจุไฟฟ้าใช้ในการเก็บประจุจนเก็บประจุไฟฟ้าได้ถึง 63% ของค่าสูงสุด

สำหรับกระแสไฟฟ้า (I) ในวงจรที่ไหลผ่าน C และความต่างศักย์ตกคร่อม C ( $V_c$ ) ณ เวลา  $t$  โดๆ เมื่อ สับสวิตช์ S มีความสัมพันธ์ดังสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ

$I = (E/R)e^{-t/RC}$ .....(4)

$V_c = E(1 - e^{-t/RC})$ .....(5)

$t$  โดๆ เขียนเป็นสมการได้ คือ

$V_c = E(e^{-t/RC})$ .....(7)

ถ้า  $t = RC$  จะได้ว่า  $V_c$  เท่ากับ 37% ของค่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดตกคร่อมตัวเก็บประจุ

วัตถุประสงค์เพื่อการแสดงเส้นโค้งประจุ ไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วย คอมพิวเตอร์

2) เขียนโปรแกรมภาษาเทอร์โบปาสคาลเพื่อควบคุมการอ่านแรงดันไฟฟ้า พร้อมทั้งทดสอบจนใช้งานได้

```
Program Charge_vs_Time_Graph_for_Capacitor;
```

```
uses crt, graph;
```

```
var
```

```
    grdrv , grmode , grrror : integer;
```

```
    ch : char;
```

```
const PA      = $0304;
```

```
    Pcontrol = $0307;
```

```
Procedure axis;
```

```
var p , q : integer;
```

```
    tex : string;
```

```
begin
```

```
    grdrv:= detect; initgraph (grdrv , grmode , 'c:\tp\ bgi'); setgraphmode (grmode);
```

```
    line (50,50,50,305); line (50,305,600,305); line (50,50,600,50); line (600,50,600,305)
```

```
    settextstyle (defaultfont, horizdir, 0);
```

```
    for p := 50 to 600 do
```

```
        begin
```

```
            if p mod 32 = 0 then
```

```
                begin
```

```
                    line (p+18,295,p+18,305); str( round (p/32-1), tex); outtextxy (p+18,320,tex);
```

```
                end;
```

```
            end;
```

```
        settextstyle(defaultfont, horizdir, 0);
```

```
        for q:=50 to 305 do
```

```
            begin
```

```
                line(45,q,55,q) ; str(((305-q) mod 5)+1)*100,tex); outtextxy(20,q,tex);
```

```
            end;
```

```
        end;
```

```
end;
```

```
procedure plot;
```

```
var i , j , x , y , DV : integer;
```

```
    AV, V, C, q : real;
```

```

begin
  outtextby (235,10,'CHARGE VS TIME CURVE');
  outtextby (235,18,'_____');
  outtextby (50,30, 'Charge (pC)');
  outtextby (540,340, 'Time (s)');
  outtextby (48,303,'');
  begin
    port[Pcontrol] := $90; C:=100; {pF}
    for j := 0 to 550 do
      begin
        DV := port[PA];
        AV := (5/255)*DV;
        V:=AV;
        q:=C*V; {pC}
        x :=j+50; y:= 305-round((255/500)*q);
        lineto (x,y);
        delay (30);
      end;
    end;
  readin;
  closegraph;
  end;
begin {main}
  repeat
    axis;
    plot;
    ch := readkey;
    until ord (ch) = 27;
end.

```

3) ตั้งให้คอมพิวเตอร์ทำงานตามโปรแกรม (RUN) ทดสอบการรับและคายประจุไฟฟ้าโดยการเปิด-ปิดสวิทช์ [สามารถทำงานเป็นตัวกับระบบไมโครอินทิเกรต (0.1  $\mu\text{F}$ ) และ ( $\text{Sr}_{0.9}\text{Pb}_{0.1}\text{TiO}_3$  ที่เปลี่ยนตัวเอง) และบันทึกข้อมูลการที่เตรียมได้จะถูกป้อนเข้าที่ไอซี ADC0809 ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันที่นำออกให้เป็นแรงดันดิจิทัล ไอซี

74LS244 จะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ แรงดันไฟฟ้าที่จริงเป็นแรงดันอนาล็อกจะเคลื่อนที่ผ่าน ET-PC8255 Card ผ่านสลอตไปยังแรม ใช้คำสั่งให้คอมพิวเตอร์แสดงแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารที่ขึ้นกับเวลาบนจอ เส้นโค้งประจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 3

ก. ตัวเก็บประจุแบบไมกาเชิงการค้ำ (0.1  $\mu\text{F}$ )

ข. ตัวเก็บประจุที่มีเซรามิกส์ ( $\text{Sr}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}$ ) $\text{TiO}_3$  เป็นไดอิเล็กตริก

รูปที่ 3 เส้นโค้งประจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์

สารตัวอย่างที่ใช้ทดลองเป็นตัวเก็บประจุแบบไมกาเชิงการค้ำ (0.1  $\mu\text{F}$ ) และเซรามิกส์ ( $\text{Sr}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}$ ) $\text{TiO}_3$  ที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ได้ประกอบวงจร ทดสอบวงจร เขียนโปรแกรม ทดสอบโปรแกรม ปรากฏว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถแสดงเส้นโค้งประจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ ได้นำระบบนี้ไปใช้ใน ห้องปฏิบัติการ ลักษณะ (specification) ของระบบมีดังนี้

เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้	: 80386 หรือรุ่นอื่นๆ
การ์ดที่ใช้	: ET-PC 8255 card
วงจรเชื่อมต่อ	: ใช้ ADC 0809, 74LS244
แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง	: 0-5 V
สารที่ใช้ทดลอง	: ตัวเก็บประจุแบบไมกาเชิงการค้ำ (0.1 $\mu\text{F}$ ) และ ( $\text{Sr}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}$ ) $\text{TiO}_3$
โปรแกรมที่ใช้	: ภาษาเทอร์โบปาสคาล

อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้น้ำหรือได้ในประเทศ (ร้านจำหน่าย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่บ้านหม้อ) ส่วนเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับทดสอบก็มีอยู่ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ไว้ก็มีอยู่ทั่วไป ใช้งานได้ตั้งแต่รุ่น 80286 จนถึง 80586 การเขียนโปรแกรมก็สามารถ

ดัดแปลงได้ขึ้นอยู่กับเทคนิคการเขียนแต่ละคน ระบบนี้คาดว่าพอจะนำไปใช้แสดงเส้นโค้งประจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์ในระดับห้องปฏิบัติการได้

### คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนโครงการทางฟิสิกส์และทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2547 ผ่านทาง PSU และ NRCT และได้ใช้เครื่องมือจากห้องปฏิบัติการ

ฟิสิกส์วัสดุและขอขอบคุณ น.ส. มุสดี มุนะหมัด ที่ได้ช่วยตรวจสอบเฟสของสารโดยใช้เครื่องมือที่หน่วยเครื่องมือกลางคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

### เอกสารอ้างอิง

Moulson, A.J. and Herbert, J.M. *Electroceramics*. Chapman & Hall, London, 1990.  
 Buchanan Relva, C. *Ceramic materials for electronics*. second edition. Mercei Dekker Inc., New York, 1991.  
 George C. Barney, 1988, *Intelligent*

*Instrumentation*, 2<sup>nd</sup> edition, Prentice Hall, New ork/London/Sydney/Toronto/Tokyo.  
 Zhang J. L. 1992. Electrical conduction of  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$  ceramics under d.c. voltage. *J. Mater. Sci. Lett.*, 11, 294-295.

**19. การจัดเตรียมเตาหลอมและระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอม**