

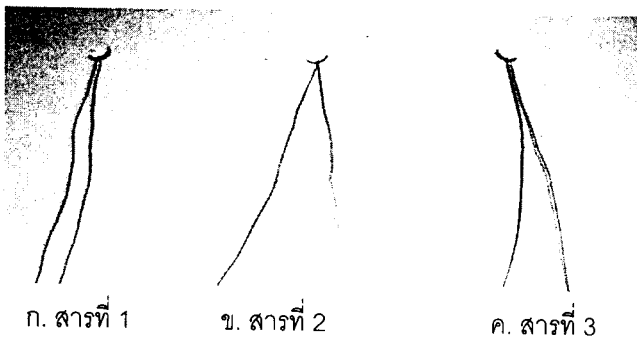
## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงวัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงผลและการวิเคราะห์ผลงานวิจัยซึ่งประกอบด้วยผลการเตรียมก้อนสาร  $Mn_xNi_yFe_2O_4$  จากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผง ผลการศึกษาลักษณะของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง XRD ผลการวัดสมบัติเชิงกายภาพ ผลการทดสอบเสถียรภาพทางไฟฟ้า ผลการทดสอบปรากฏการณ์ NTC รวมทั้งผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ ค่าดัชนีความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิและหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ สุดท้ายกล่าวถึงผลจากการสร้างระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิโดยใช้คอมพิวเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิ มีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ผลจากการเตรียมก้อนสาร $Mn_xNi_yFe_2O_4$ จากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผง

จากการเตรียมสารตัวอย่าง  $Mn_xNi_yFe_2O_4$  โดยวิธีเทคนิคเซรามิกมาตรฐานนั้นได้ก้อนสารรูปจานแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงก้อนสารตัวอย่างที่เตรียมได้เมื่อผ่านการทำซ้ำด้วยกาวยเงิน

จากการเตรียมสารตัวอย่างจะได้สูตรทั่วไปของส่วนผสมของสารที่ใช้เตรียมเป็น  $Mn_xNi_yFe_2O_4$  โดยที่  $x$  และ  $y$  เป็นอัตราส่วนผสมของสารทั้ง 3 สูตร ดังนี้

สารที่ 1 :  $x = 0.2$  และ  $y = 0.8$  มีสูตรเป็น  $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$

สารที่ 2 :  $x = 0.5$  และ  $y = 0.5$  มีสูตรเป็น  $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$

สารที่ 3 :  $x = 0.8$  และ  $y = 0.2$  มีสูตรเป็น  $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$

หลังจากนั้นสังเกตลักษณะของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ทั้ง 3 สูตร พบว่า ก่อนเผาสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร มีสีน้ำตาล และหลังจากผ่านการเผาสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร มีสีดำ

กระบวนการเตรียมสารทุกๆขั้นตอนนั้นต้องทำอย่างระมัดระวังมากที่สุด ตั้งแต่การเลือกสูตร เลือกสัดส่วนผสมของสารตัวอย่างซึ่งการแปรค่าความต้านทานจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณนิกเคิล(Ni) นั่นคือถ้าปริมาณนิกเคิล(Ni) มีค่าน้อย จะส่งผลให้ค่าความต้านทานของสารตัวอย่างมีค่าสูง (Martinez Sarrion, 1995)

สำหรับการคำนวณน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักต้องใช้ความละเอียดและรอบคอบมากๆ แม้แต่การผสมผงของสารในครกบดต้องพยายามให้ผงของสารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดคือ  $MnO_2$ , NiO และ  $Fe_2O_3$  กระจายอย่างสม่ำเสมอ

การหดยดโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ก็มีผลต่อการจับตัวกันเป็นก้อนของสารตัวอย่างต้องคำนึงถึงปริมาณของ PVA ที่หดยดลงไปด้วยเพราะถ้าหดยด PVA มากเกินไปจะทำให้อัดสารไม่เป็นก้อนและมีความชื้นสะสมภายในก้อนสาร

สำหรับกระบวนการอัดก้อนสารด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก ต้องใช้แรงดันในการอัดก้อนสารประมาณ 5 ตัน ถ้าใช้แรงดันในการอัดมากกว่านี้จะทำให้ได้ก้อนสารที่มีรอยแตก ในทำนองเดียวกันถ้าใช้แรงดันในการอัดน้อยกว่านี้จะไม่ได้สารรูปแผ่นจานตามที่ต้องการ

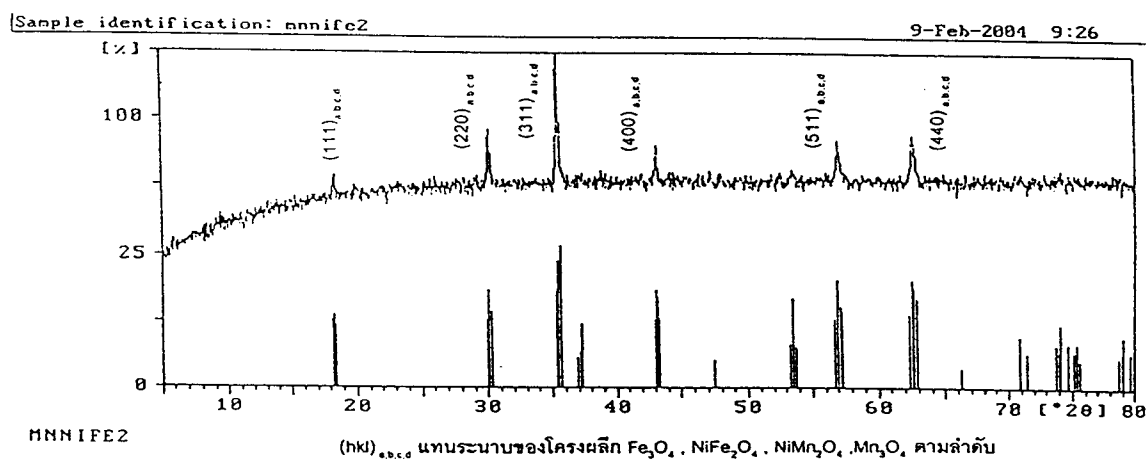
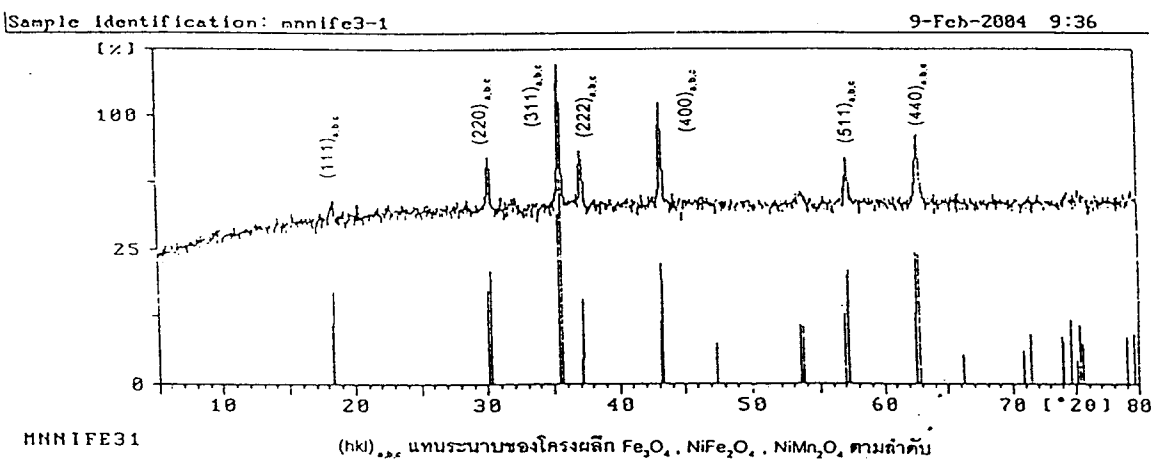
กระบวนการที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือการเผาสารในเตาหลอม (furnace) ซึ่งความร้อนจากการเผาทำให้น้ำและสารอินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำหายไป มีรูพรุนเกิดขึ้นบ้างแต่ไม่มีผลต่อการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของก้อนสาร แต่ผลของความร้อนจากการเผาทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่เข้าหากันจนกระทั่งเกิดการหลอมรวมตัวของสารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด กลายเป็นก้อนสารสูตรใหม่ที่มีเนื้อแน่น แข็ง ซึ่งอุณหภูมิการเผามีผลต่อสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารโดยที่ก้อนสารมีการหดตัวหลังจากผ่านการเผาซึ่งสังเกตได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของสารที่ลดลง

ในขณะเดียวกันการเลือกอุณหภูมิที่จะใช้เผาว่าจะเผากี่ครั้งและที่อุณหภูมิเท่าไรก็ขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของสารตั้งต้น สำหรับสารตัวอย่างสูตรนี้ทำการเผาสาร 2 ครั้ง ครั้งแรกเผาที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}C$  ปิดเตาปล่อยให้เย็น แล้วเผาครั้งที่ 2 เผาที่อุณหภูมิ  $1200^{\circ}C$  สาเหตุที่ต้องทำการเผาสาร 2 ครั้งเนื่องจากการเผาครั้งแรกเพื่อให้อะตอมของ  $MnO_2$ , NiO และ  $Fe_2O_3$  ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของสารตัวอย่างเกิดการรวมตัวกัน แต่อุณหภูมิที่ใช้เผาในครั้งแรกนี้ต้องไม่เกิน  $535^{\circ}C$  ซึ่งเป็นจุดหลอมเหลวของ  $MnO_2$  สำหรับการเผาครั้งที่ 2 เผาที่  $1200^{\circ}C$  เพื่อให้อะตอมของสารตั้งต้นทั้ง 3 มีการยึดเหนี่ยวกันมากขึ้นส่งผลให้เกิดการกระตุ้นให้อะตอมเกิดการแพร่เข้าหากันมากขึ้น (Buchanan, 1991) สำหรับสิ่งที่นักวัสดุศาสตร์ต้องการจากการเตรียมสารนั้น คือต้องการสาร

ตัวอย่างที่มีเฟสเดียวแต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากมากที่จะเตรียมให้มีลักษณะเป็นเฟสเดียว ซึ่งวิธีการเตรียมสารตัวอย่างจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผงโดยใช้วิธีเทคนิคเซรามิกมาตรฐานนี้เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก สะดวกต่อการเตรียม และเป็นที่ยอมรับกันแพร่หลาย

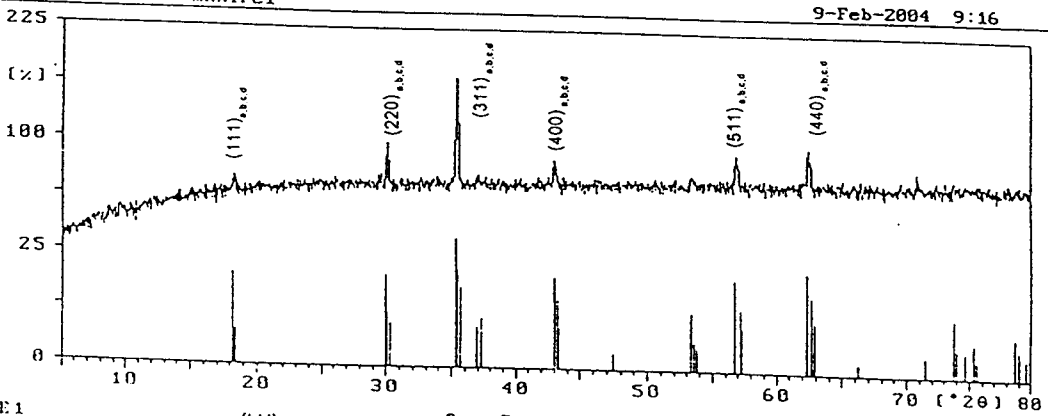
#### 4.2 ผลการศึกษาลักษณะของสารตัวอย่างด้วยเครื่อง XRD

จากการนำสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร ที่ผ่านการเผา ไปวิเคราะห์ลักษณะของสารด้วยเครื่อง XRD (X-ray diffractometer) เพื่อดูเฟส (phase) ของสาร และศึกษาเฟสของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ทำให้ได้แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.2



Sample identification: mnnife1

9-Feb-2004 9:16



MNNIFE1

130162

11110

100325

(hkl)<sub>abcd</sub> แทนระนาบของโครงสร้าง Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> . NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> . NiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> . Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ตามลำดับ(ค): สารที่ 3 (Mn<sub>0.8</sub>Ni<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)

รูปที่ 4.2 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารทั้ง 3 สูตร

จากรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถวิเคราะห์หา  
ระนาบของโครงสร้างจากระนาบของอะตอมที่ขนานกันซึ่งเกิดจากเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่  
สอดคล้องตามกฎของแบรกก์ สามารถสรุปรายละเอียดที่ได้จากการถ่ายภาพ XRD ได้ดังนี้

## 1) เฟสของสาร

สารที่ 1 (Mn<sub>0.2</sub>Ni<sub>0.8</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) : พบเฟสของ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> และ NiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> แต่ไม่พบ Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

สารที่ 2 (Mn<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) : พบเฟสของ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> และ Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

สารที่ 3 (Mn<sub>0.8</sub>Ni<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) : พบเฟสของ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> และ Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

## 2) ระบบผลึก

สารที่ 1 (Mn<sub>0.2</sub>Ni<sub>0.8</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) : ระบบผลึกแบบ cubic system

สารที่ 2 (Mn<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) : ระบบผลึกแบบ cubic system

สารที่ 3 (Mn<sub>0.8</sub>Ni<sub>0.2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) : ระบบผลึกแบบ cubic system

## 3) ระนาบของโครงสร้าง

กำหนดให้ (hkl)<sub>a</sub> แทนระนาบของโครงสร้าง Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

(hkl)<sub>b</sub> แทนระนาบของโครงสร้าง NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

(hkl)<sub>c</sub> แทนระนาบของโครงสร้าง NiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

(hkl)<sub>d</sub> แทนระนาบของโครงสร้าง Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ ) : ระนาบของโครงผลึกมีดังนี้

(111)<sub>a</sub>, (220)<sub>a</sub>, (311)<sub>a</sub>, (222)<sub>a</sub>, (400)<sub>a</sub>, (511)<sub>a</sub> และ (440)<sub>a</sub>

(111)<sub>b</sub>, (220)<sub>b</sub>, (311)<sub>b</sub>, (222)<sub>b</sub>, (400)<sub>b</sub>, (511)<sub>b</sub> และ (440)<sub>b</sub>

(111)<sub>c</sub>, (220)<sub>c</sub>, (311)<sub>c</sub>, (222)<sub>c</sub>, (400)<sub>c</sub>, (511)<sub>c</sub> และ (440)<sub>c</sub>

สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ ) : ระนาบของโครงผลึกมีดังนี้

(111)<sub>a</sub>, (220)<sub>a</sub>, (311)<sub>a</sub>, (400)<sub>a</sub>, (511)<sub>a</sub> และ (440)<sub>a</sub>

(111)<sub>b</sub>, (220)<sub>b</sub>, (311)<sub>b</sub>, (400)<sub>b</sub>, (511)<sub>b</sub> และ (440)<sub>b</sub>

(111)<sub>c</sub>, (220)<sub>c</sub>, (311)<sub>c</sub>, (400)<sub>c</sub>, (511)<sub>c</sub> และ (440)<sub>c</sub>

(111)<sub>d</sub>, (220)<sub>d</sub>, (311)<sub>d</sub>, (400)<sub>d</sub>, (511)<sub>d</sub> และ (440)<sub>d</sub>

สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ ) : ระนาบของโครงผลึกมีดังนี้

(111)<sub>a</sub>, (220)<sub>a</sub>, (311)<sub>a</sub>, (400)<sub>a</sub>, (511)<sub>a</sub> และ (440)<sub>a</sub>

(111)<sub>b</sub>, (220)<sub>b</sub>, (311)<sub>b</sub>, (400)<sub>b</sub>, (511)<sub>b</sub> และ (440)<sub>b</sub>

(111)<sub>c</sub>, (220)<sub>c</sub>, (311)<sub>c</sub>, (400)<sub>c</sub>, (511)<sub>c</sub> และ (440)<sub>c</sub>

(111)<sub>d</sub>, (220)<sub>d</sub>, (311)<sub>d</sub>, (400)<sub>d</sub>, (511)<sub>d</sub> และ (440)<sub>d</sub>

### 4.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพของสารตัวอย่าง

จากการวัดความต้านทาน (R) ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้มัลติมิเตอร์ ,วัดความหนา (L) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) โดยใช้ไมโครมิเตอร์ พร้อมทั้งคำนวณสภาพต้านทาน (ρ) โดยใช้สูตร  $R = \frac{\rho L}{A}$  โดยที่  $A = \frac{\pi d^2}{4}$  ซึ่ง A คือพื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่างและคำนวณสภาพการนำ (σ) โดยใช้สูตร  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  ของสารทั้ง 3 สูตร แสดงดังตารางที่ 4.1

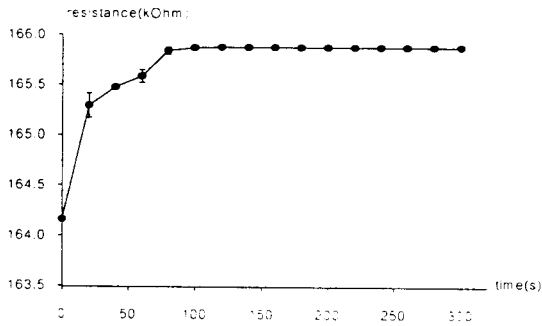
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพของสารตัวอย่าง

สารตัวอย่าง	สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )	สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )	สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )
ความหนา (L)	$1.88 \pm 0.01$ mm	$2.74 \pm 0.01$ mm	$3.72 \pm 0.01$ mm
เส้นผ่านศูนย์กลาง (d)	$12.98 \pm 0.01$ mm	$12.98 \pm 0.01$ mm	$12.98 \pm 0.01$ mm
ความต้านทาน (R)	$167 \pm 0.10$ kΩ	$5.44 \pm 0.10$ MΩ	$17.44 \pm 0.10$ MΩ
สภาพต้านทาน (ρ)	$1.17 \times 10^4$ Ωm	$2.62 \times 10^5$ Ωm	$6.19 \times 10^5$ Ωm
สภาพการนำ (σ)	$8.54 \times 10^{-5}$ (Ωm) <sup>-1</sup>	$3.81 \times 10^{-6}$ (Ωm) <sup>-1</sup>	$1.62 \times 10^{-6}$ (Ωm) <sup>-1</sup>

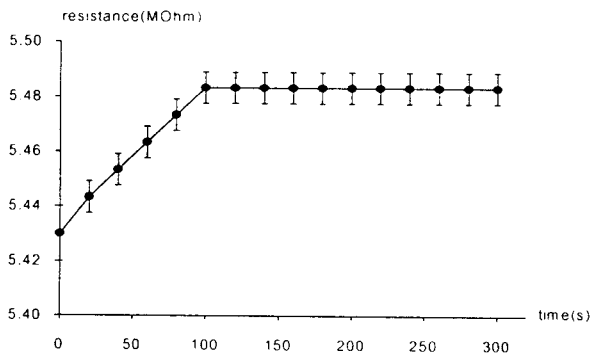
#### 4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงฟิสิกส์ของสารตัวอย่าง

##### 4.4.1 ผลการทดสอบเสถียรภาพทางไฟฟ้า

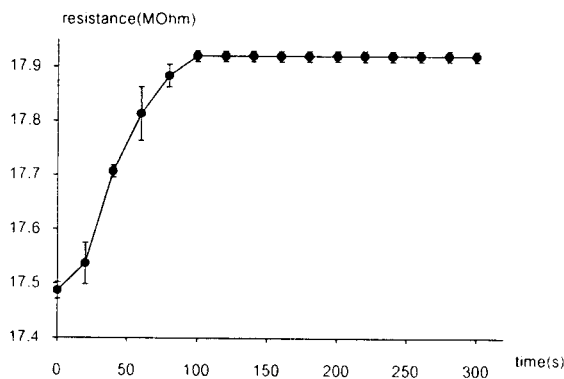
จากการทดสอบเสถียรภาพทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่อเวลาผ่านไปที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.3



(ก): สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )



(ข): สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )



(ค): สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน (R) และเวลา (t)

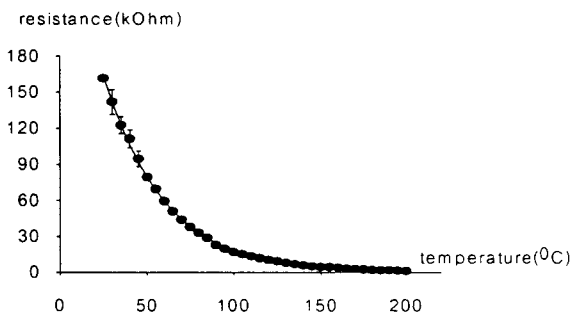
จากรูปที่ 4.3 พบว่าสารทั้ง 3 สูตร มีความต้านทานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกประมาณ 100 วินาที หลังจากนั้นความต้านทานของสารค่อนข้างคงที่ ในขณะที่อุณหภูมิคงที่ แสดงว่าสารตัวอย่างมีเสถียรภาพทางไฟฟ้าดี เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นหัววัดอุณหภูมิ

#### 4.4.2 ผลการทดสอบปรากฏการณ์ NTC

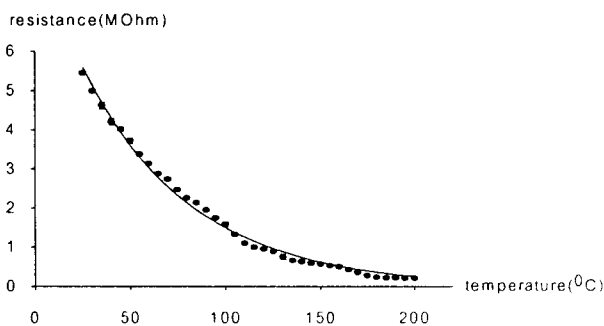
จากการทดสอบปรากฏการณ์ NTC ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบสมบัติของสารตัวอย่างก่อนที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิ เพราะสารตัวอย่างที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิได้นั้นต้องมีคุณสมบัติเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ผลที่ได้จากการทดสอบปรากฏการณ์ NTC ทั้ง 3 วิธีมีดังนี้

##### 4.4.2.1 ผลการทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีที่ 1

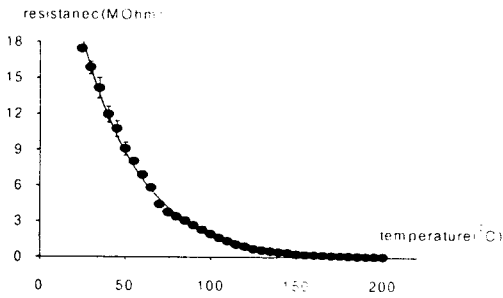
จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 200 °C ของสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร ดังรูปที่ 4.4



(ก): สารที่ 1 ( $\text{Mn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ )



(ข): สารที่ 2 ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ )



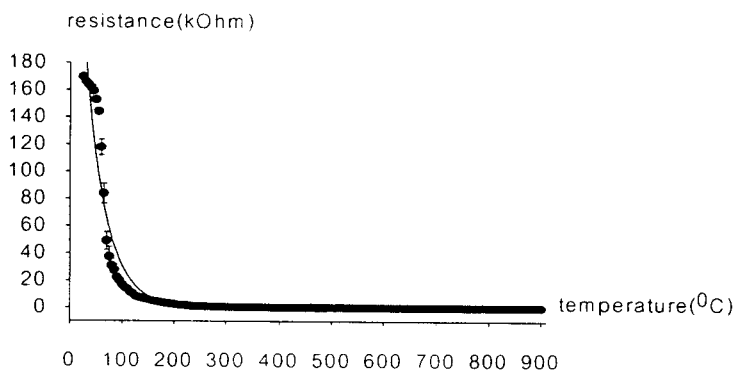
(ค): สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน (R) และอุณหภูมิ (T) โดยใช้วิธีที่ 1

จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความต้านทานของสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงว่าสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร แสดงปรากฏการณ์ NTC

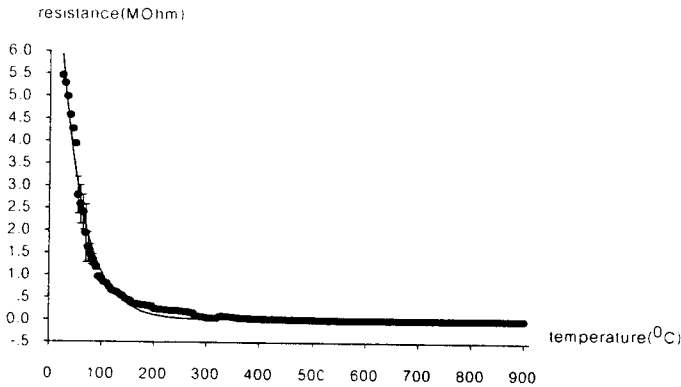
#### 4.4.2.2 ผลการทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีที่ 2

การทดสอบวิธีนี้ได้ใช้มัลติมิเตอร์วัดความต้านทานและอ่านอุณหภูมิจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 900 °C ของสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร ดังรูปที่ 4.5

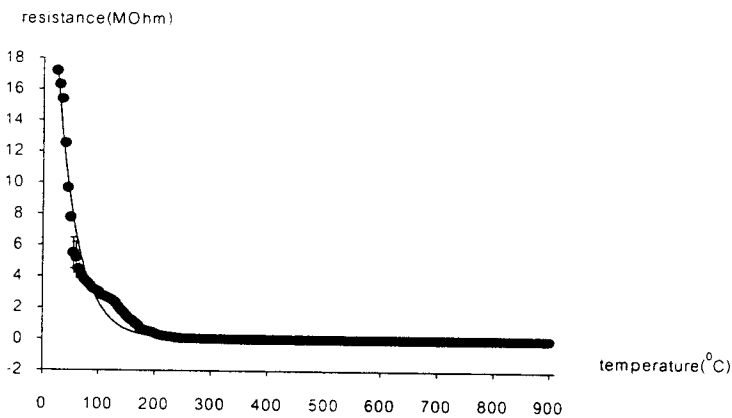


(ก): สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )





(ข): สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )



(ค): สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )

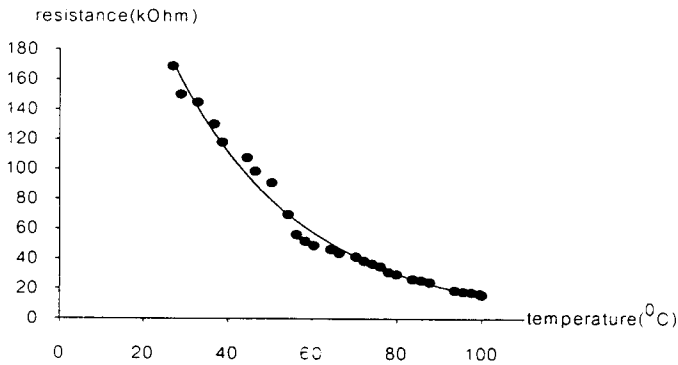
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน (R) และอุณหภูมิ (T) โดยใช้วิธีที่ 2

จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความต้านทานของสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงว่าสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรแสดงปรากฏการณ์ NTC ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 400 °C สารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรแสดงปรากฏการณ์ NTC ได้ดีกว่าในช่วง 400 °C ถึง 900 °C เพราะค่าความต้านทานในช่วง 400 °C ถึง 900 °C เปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับการลดลงของค่าความต้านทานในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 400 °C

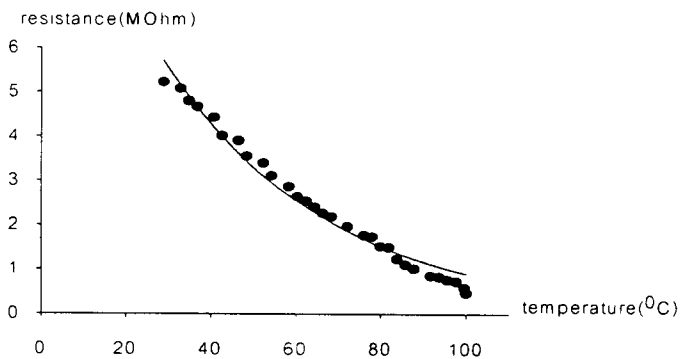
#### 4.4.2.3 ผลการทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีที่ 3

ผลการใช้แผงวงจรเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยการสร้างระบบการวัดความต้านทานของสารตัวอย่างที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลจากการสร้างระบบการอ่าน

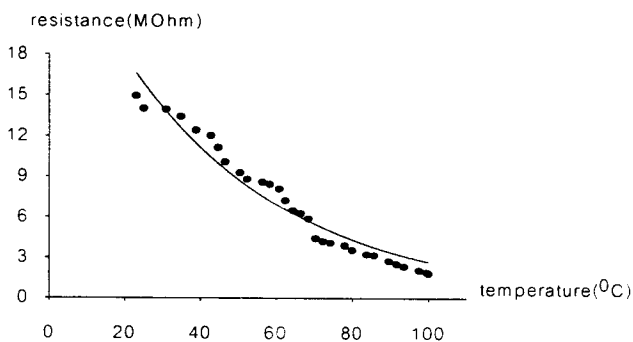
ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิโดยใช้โปรแกรมชีกมาพลอตซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6



(ก): สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )



(ข): สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )

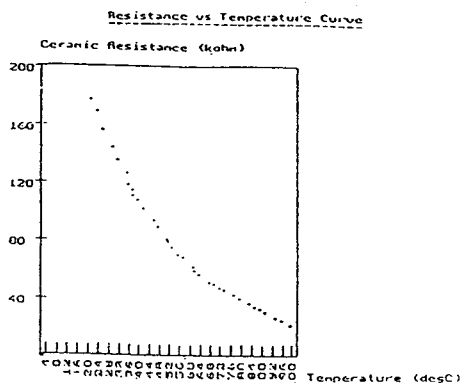


(ค): สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )

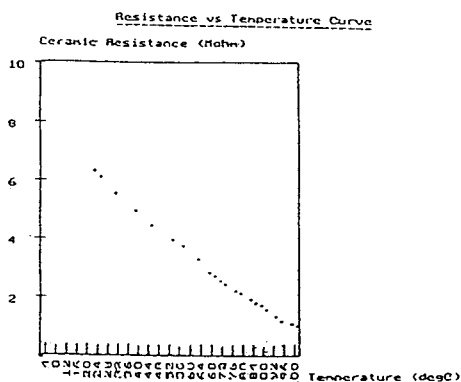
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน (R) และอุณหภูมิ (T) โดยใช้วิธีที่ 3

โดยให้คอมพิวเตอร์อ่านความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิ

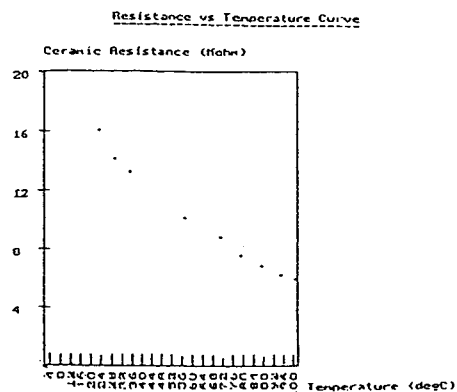
สำหรับส่วนที่ 2 เป็นผลจากการให้คอมพิวเตอร์แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.7



(ก): สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )



(ข): สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )



(ค): สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน (R) และอุณหภูมิ (T) โดยใช้วิธีที่ 3 โดยให้คอมพิวเตอร์พิมพ์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ

#### 4.4.2.4 ผลการวิเคราะห์ค่า $\alpha$ , B และ R(T)

##### ก. ผลการวิเคราะห์ค่า $\alpha$

วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบ ( $\alpha$ ) ของสารทั้ง 3 สูตรโดยอาศัยข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิในรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7 ซึ่งได้จากการทดสอบปรากฏการณ์ NTC ทั้ง 3 วิธี ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่า  $\alpha$  ของสารทั้ง 3 สูตรนั้น ได้ทำการพิจารณาเปรียบเทียบในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ผลการวิเคราะห์ค่า  $\alpha$  ของสารทั้ง 3 สูตรในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 100 °C แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $\alpha$  ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 100 °C

วิธีการทดสอบ ปรากฏการณ์ NTC	ผลการคำนวณค่า $\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )			
	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3	
			R vs T-data	R vs T-graph <sup>5</sup>
สารที่ 1 (Mn <sub>0.2</sub> Ni <sub>0.8</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	-0.0290 ± 0.0004	-0.0239 ± 0.0036	-0.0328 ± 0.0009	-0.0145
สารที่ 2 (Mn <sub>0.5</sub> Ni <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	-0.0158 ± 0.0002	-0.0236 ± 0.0014	-0.0259 ± 0.0008	-0.0136
สารที่ 3 (Mn <sub>0.8</sub> Ni <sub>0.2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	-0.0288 ± 0.0007	-0.0311 ± 0.0020	-0.0236 ± 0.0012	-0.0100

2) ผลการวิเคราะห์ค่า  $\alpha$  ของสารทั้ง 3 สูตรในช่วงอุณหภูมิ 100 °C ถึง 200 °C มีข้อจำกัดในแง่ของวิธีการทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยที่วิธีการทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีที่ 3 นั้นได้ใช้ LM335 เป็นหัววัดอุณหภูมิ ซึ่ง LM335 เป็นหัววัดอุณหภูมิที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -10 °C ถึง 100 °C (จิติ หนูแก้ว, 2534) และถ้าเลือกใช้หัววัดชนิดอื่นๆ จะเป็นการยากในการออกแบบระบบการวัด ดังนั้นการทดสอบปรากฏการณ์ NTC

<sup>5</sup> ได้หาค่า  $\alpha$  โดยการพิจารณาจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้า (R) กับอุณหภูมิ (T) โดยอาศัย

$$\text{สมการ } \alpha = \frac{1}{R_1} \left( \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \right) \text{ (Moulson และ Herbert, 1990)}$$

ในช่วงอุณหภูมิ 100 °C ถึง 200 °C จะเหลือวิธีการทดสอบปรากฏการณ์ NTC เพียง 2 วิธี คือวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่า  $\alpha$  ของสารทั้ง 3 สูตรในช่วงอุณหภูมิ 100 °C ถึง 200 °C แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่า  $\alpha$  ในช่วงอุณหภูมิ 100 °C ถึง 200 °C

วิธีการทดสอบ ปรากฏการณ์ NTC	ผลการคำนวณค่า $\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	
	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2
สารที่ 1 (Mn <sub>0.2</sub> Ni <sub>0.8</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	-0.0258 ± 0.0003	-0.0206 ± 0.0007
สารที่ 2 (Mn <sub>0.5</sub> Ni <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	-0.0206 ± 0.0008	-0.0130 ± 0.0004
สารที่ 3 (Mn <sub>0.8</sub> Ni <sub>0.2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	-0.0378 ± 0.0004	-0.0175 ± 0.0011

3) ผลการวิเคราะห์ค่า  $\alpha$  ของสารทั้ง 3 สูตรในช่วงอุณหภูมิ 200 °C ถึง 400 °C มีข้อจำกัดอยู่ที่ว่า การทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีที่ 1 เตาไฟฟ้าที่เป็นแหล่งให้ความร้อนสามารถให้ความร้อนได้ประมาณ 200 °C และการทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีที่ 3 ก็มีข้อจำกัดเกี่ยวกับหัววัดอุณหภูมิที่ใช้ ดังนั้นการวิเคราะห์ค่า  $\alpha$  ในช่วงอุณหภูมิ 200 °C ถึง 400 °C จะเหลือวิธีการทดสอบเพียง 1 วิธี คือวิธีที่ 2 เท่านั้น ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่า  $\alpha$  ในช่วงอุณหภูมิ 200 °C ถึง 400 °C

วิธีการทดสอบ ปรากฏการณ์ NTC	ผลการคำนวณค่า $\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )
	วิธีที่ 2
สารที่ 1 (Mn <sub>0.2</sub> Ni <sub>0.8</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	-0.0159 ± 0.0005
สารที่ 2 (Mn <sub>0.5</sub> Ni <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	-0.0112 ± 0.0008
สารที่ 3 (Mn <sub>0.8</sub> Ni <sub>0.2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	-0.0310 ± 0.007

ถึงแม้ว่าการทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีนี้จะทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 900 °C ก็จริง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400 °C ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงน้อย นั่นคือในช่วง 400 °C ถึง 900 °C สารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรสามารถแสดงปรากฏการณ์ NTC ได้น้อย จึงไม่วิเคราะห์ค่า  $\alpha$  ในช่วงอุณหภูมิ 400 °C ถึง 900 °C

จากวิธีการทดสอบปรากฏการณ์ NTC ทั้ง 3 วิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัด แต่สิ่งที่ต้องการจากการทำวิจัยก็คือ ต้องการใช้วิธีการทดสอบปรากฏการณ์ NTC หลายๆวิธี เพื่อให้เข้าใจหลักการเชิงฟิสิกส์มากยิ่งขึ้น

### ข. ผลการวิเคราะห์ค่า B

ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (B) ของสารทั้ง 3 สูตรนั้น ได้ทำการพิจารณาเปรียบเทียบในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ผลการวิเคราะห์ค่า B ของสารทั้ง 3 สูตรในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 100 °C แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า B ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 100 °C

วิธีการทดสอบ ปรากฏการณ์ NTC	ผลการคำนวณค่า B(K)			
	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3	
			R vs T-data	R vs T-graph
สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )	$51.43 \pm 5.34$	$42.57 \pm 6.24$	$64.48 \pm 4.78$	47.75
สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )	$32.18 \pm 3.26$	$41.40 \pm 9.96$	$59.84 \pm 5.25$	42.46
สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )	$50.70 \pm 5.77$	$52.68 \pm 5.83$	$39.62 \pm 4.63$	30.16

2) ผลการวิเคราะห์ค่า B ของสารทั้ง 3 สูตรในช่วงอุณหภูมิ 100 °C ถึง 200 °C แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่า B ในช่วงอุณหภูมิ 100 °C ถึง 200 °C

วิธีการทดสอบ ปรากฏการณ์ NTC	ผลการคำนวณค่า B(K)	
	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2
สารที่ 1( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )	$413.46 \pm 7.79$	$348.68 \pm 8.43$
สารที่ 2( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )	$350.02 \pm 4.86$	$233.85 \pm 8.03$
สารที่ 3( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )	$558.22 \pm 9.24$	$293.40 \pm 7.39$

3) ผลการวิเคราะห์ค่า B ของสารทั้ง 3 สูตรในช่วงอุณหภูมิ 200 °C ถึง 400 °C แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ค่า B ในช่วงอุณหภูมิ 200 °C ถึง 400 °C

วิธีการทดสอบ	ผลการคำนวณค่า B(K)
	วิธีที่ 2
สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )	996.22 ± 10.94
สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )	731.30 ± 7.53
สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )	1626.62 ± 8.54

จากตารางที่ 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, และ 4.7 ต้องการแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรนั้นมีค่าขึ้นอยู่กับค่า  $\alpha$  และค่า B นั่นคือวัสดุที่สมบัติเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ชนิดใดก็ตามที่มีค่า  $\alpha$  และ B มาก แสดงว่าวัสดุนั้นมีความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่า  $\alpha$  และ B น้อย อย่างไรก็ตามการเลือกช่วงอุณหภูมิในการพิจารณาค่า  $\alpha$  และ B นั้นก็มีผลอีกเช่นกัน เพราะในแต่ละช่วงอุณหภูมิมียค่า  $\alpha$  และ B ไม่เท่ากัน ซึ่งก็เป็นสมบัติเฉพาะของสารตัวอย่างชนิดนี้ แต่ไม่ใช่ประเด็นสำคัญ เพราะการนำสารตัวอย่างชนิดนี้ไปใช้งานนั้นสามารถเลือกใช้งานได้เป็นช่วงอุณหภูมิ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการออกแบบว่าจะนำสารตัวอย่างชนิดนี้ไปใช้งานในแง่ใด และจากผลการวิเคราะห์ค่า  $\alpha$  และ B พบว่าสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรมีความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิได้ดี เพราะค่า  $\alpha$  อยู่ในช่วง  $-0.06$  °C<sup>-1</sup> ถึง  $-0.01$  °C<sup>-1</sup> (Buchanan,1991)

#### ค. ผลการวิเคราะห์ค่า R(T)

ผลการวิเคราะห์หาสมการทั่วไปของค่าความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิมีรายละเอียดดังนี้

1) สมการที่แสดงความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 100 °C

$$\text{สารที่ 1 (Mn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4) \text{ ทดสอบด้วยวิธีที่ 1: } R = 339.3597 e^{-0.0290T}$$

$$\text{ทดสอบด้วยวิธีที่ 2: } R = 374.2831 e^{-0.0239T}$$

$$\text{ทดสอบด้วยวิธีที่ 3: } R = 415.5729 e^{-0.0328T} \quad (R \text{ vs } T\text{-data})$$

$$R = R_{\alpha} e^{-0.0145T} \quad (R \text{ vs } T\text{-graph})$$

สารที่ 2 ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ทดสอบด้วยวิธีที่ 1:  $R = 8.0582 e^{-0.0158 T}$   
 ทดสอบด้วยวิธีที่ 2:  $R = 10.8883 e^{-0.0236 T}$   
 ทดสอบด้วยวิธีที่ 3:  $R = 12.1009 e^{-0.0259 T}$  (R vs T-data)  
 $R = R_\alpha e^{-0.0136 T}$  (R vs T-graph)

สารที่ 3 ( $\text{Mn}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ทดสอบด้วยวิธีที่ 1:  $R = 37.4040 e^{-0.0288 T}$   
 ทดสอบด้วยวิธีที่ 2:  $R = 39.9845 e^{-0.0311 T}$   
 ทดสอบด้วยวิธีที่ 3:  $R = 28.6712 e^{-0.0236 T}$  (R vs T-data)  
 $R = R_\alpha e^{-0.0100 T}$  (R vs T-graph)

2) สมการที่แสดงความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  ถึง  $200^\circ\text{C}$

สารที่ 1 ( $\text{Mn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ทดสอบด้วยวิธีที่ 1:  $R = 227.2771 e^{-0.0258 T}$   
 ทดสอบด้วยวิธีที่ 2:  $R = 125.7751 e^{-0.0206 T}$

สารที่ 2 ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ทดสอบด้วยวิธีที่ 1:  $R = 11.5445 e^{-0.0206 T}$   
 ทดสอบด้วยวิธีที่ 2:  $R = 3.2763 e^{-0.0130 T}$

สารที่ 3 ( $\text{Mn}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ทดสอบด้วยวิธีที่ 1:  $R = 84.8747 e^{-0.0378 T}$   
 ทดสอบด้วยวิธีที่ 2:  $R = 19.2858 e^{-0.0175 T}$

3) สมการที่แสดงความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  ถึง  $400^\circ\text{C}$

สารที่ 1 ( $\text{Mn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ทดสอบด้วยวิธีที่ 2:  $R = 54.9015 e^{-0.0159 T}$

สารที่ 2 ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ทดสอบด้วยวิธีที่ 2:  $R = 2.6354 e^{-0.0112 T}$

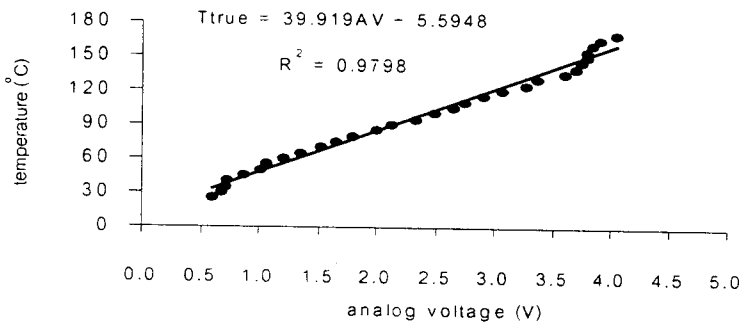
สารที่ 3 ( $\text{Mn}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ทดสอบด้วยวิธีที่ 2:  $R = 172.1723 e^{-0.0310 T}$



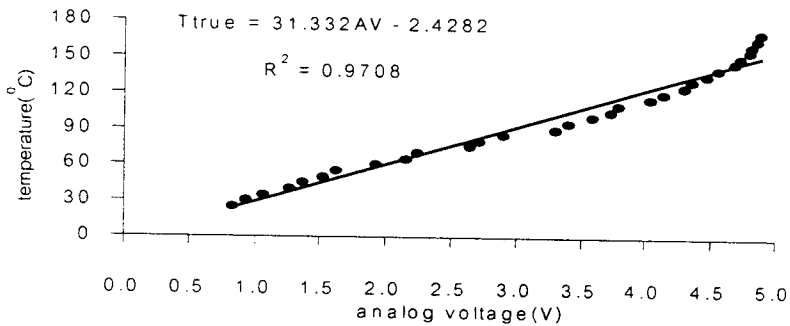
#### 4.4.3 ผลการแสดงผลของการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร

##### 4.4.3.1 ผลการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ

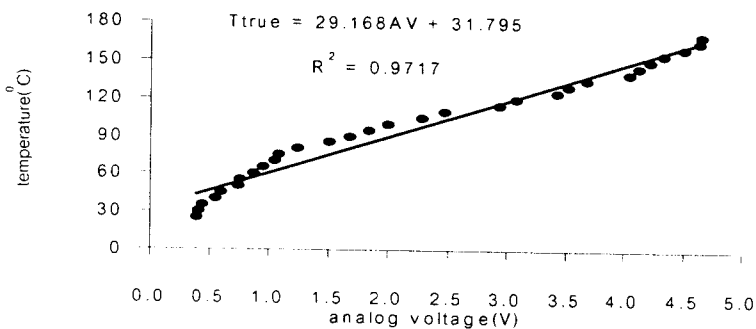
ผลการปรับเทียบเครื่องมือเพื่อให้สารตัวอย่างทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารซึ่งเป็นแรงดันอนาล็อก (AV) แสดงดังรูปที่ 4.8



(ก): สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )



(ข): สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )



(ค): สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )

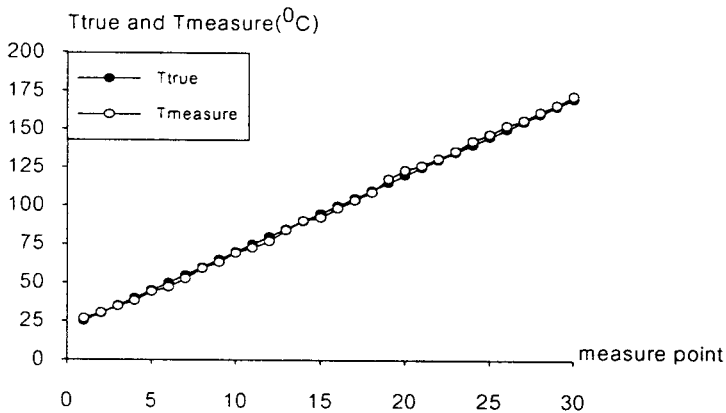
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ttrue กับ AV ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 170 °C

จากรูปที่ 4.8 สามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสาร(AV)ได้แสดงดังตารางที่ 4.8

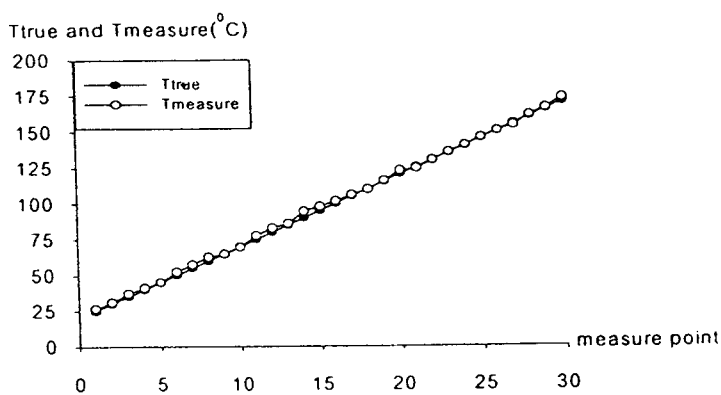
ตาราง 4.8 สรุปสมการที่ใช้ในการเปรียบเทียบเครื่องมือ

สูตรของสาร	สมการ : $T_{true} = f(AV)$
สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )	$T_{true} = 39.919 \cdot AV + 5.5948$
สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )	$T_{true} = 31.332 \cdot AV - 2.4282$
สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )	$T_{true} = 29.168 \cdot AV + 31.795$

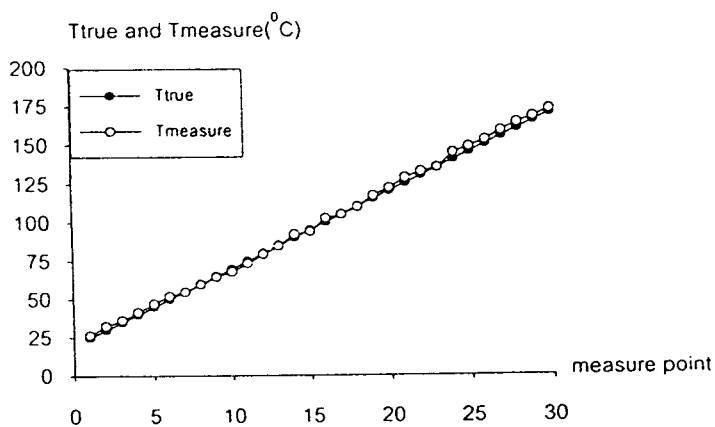
จากตารางที่ 4.8 เป็นสมการที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบสารที่เตรียมได้ทั้ง 3 สูตรให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ ในการหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_{true}$  กับ AV ต้องทำการหาหลายๆ ครั้ง และเลือกครั้งที่ดีที่สุดเพื่อให้สารทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิได้แม่นยำ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ ( $T_{true}$ ) กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ ( $T_{measure}$ ) แสดงดังรูปที่ 4.9



(ก): สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )



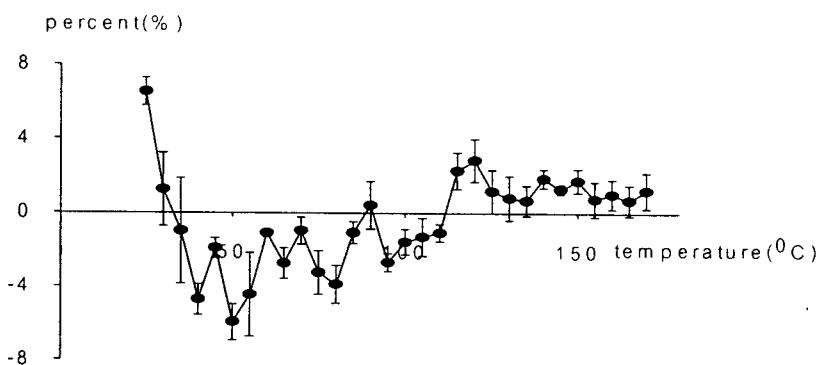
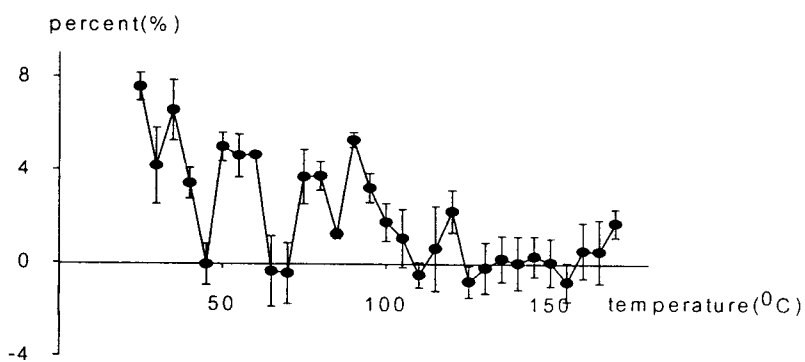
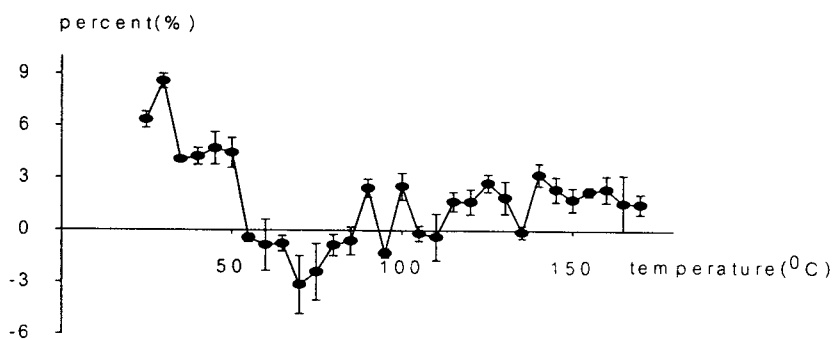
(ข): สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )



(ค): สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )

รูปที่ 4.9 แสดงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ (Tmeasure) ในช่วง 25 °C ถึง 170 °C

จากรูปที่ 4.9 พบว่า สารทั้ง 3 สูตรสามารถนำไปทำเป็นหัววัดอุณหภูมิได้และเมื่อพิจารณาความแม่นยำในการวัดของเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์กับคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 4.10

(ก):สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )(ข):สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )(ค):สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )

รูปที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์(True) กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ (Tmeasure) ในช่วง  $25^{\circ}$ C ถึง  $170^{\circ}$ C

จากรูปที่ 4.10 สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure เฉลี่ยได้โดยใช้สูตร

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

โดยที่  $X_i$  คือค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจริงกับอุณหภูมิที่วัดโดยใช้คอมพิวเตอร์

$\bar{X}$  คือค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจริงกับอุณหภูมิที่วัดโดยใช้คอมพิวเตอร์เฉลี่ย

$N$  คือจำนวนข้อมูลที่พิจารณา

จากการหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์(Tmeasure) เฉลี่ยได้ค่าดังตารางที่ 4.9

ตาราง 4.9 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ (Tmeasure)

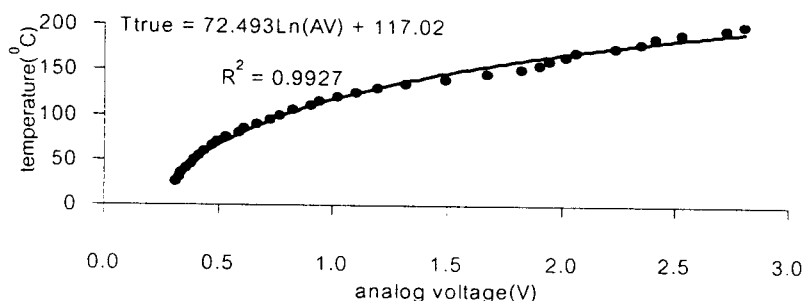
สูตรของสาร	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure
สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )	-2.51 ± 1.56 % ถึง +1.63 ± 1.46 %
สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )	-0.40 ± 0.29 % ถึง +2.82 ± 2.16 %
สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )	-0.99 ± 0.91 % ถึง +3.18 ± 1.64 %

#### 4.4.3.2 ผลการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิ

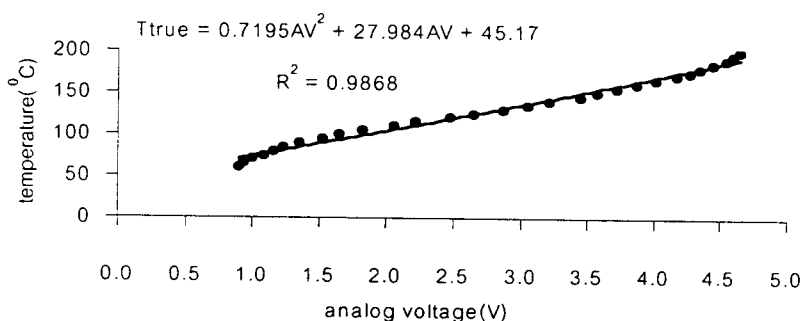
สิ่งทีงานวิจัยนี้ต้องการเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานสารตัวอย่างก็คือ การสร้างระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิโดยใช้สารที่เตรียมได้เป็นหัววัดซึ่งระบบการวัดแบบนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นที่จะศึกษาและสร้างระบบการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้สามารถใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมในอนาคตได้ สำหรับผลการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า (25 °C ถึง 200 °C) , เตาอบไฟฟ้า (25 °C ถึง 900 °C) และของไนโตรเจนเหลว (-50 °C ถึง 20 °C) โดยใช้สารตัวอย่างเป็นหัววัด มีรายละเอียดดังนี้

### ก. ผลการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า

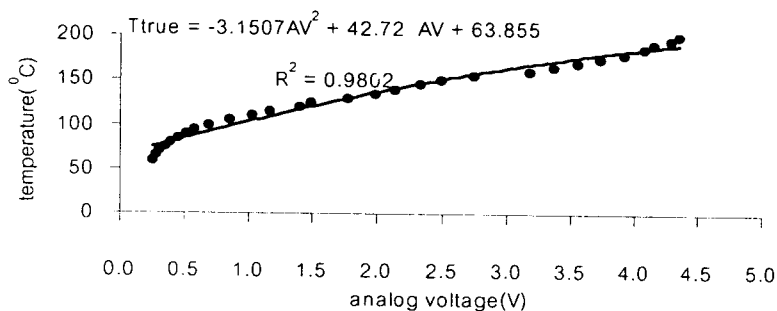
ผลการปรับเทียบเครื่องมือเพื่อให้สารตัวอย่างทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (True) กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสาร(AV) ดังรูปที่ 4.11



(ก): สารที่ 1 ( $\text{Mn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 200 °C



(ข): สารที่ 2 ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) : สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 60 °C ถึง 200 °C



(ค): สารที่ 3 ( $\text{Mn}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) : สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 60 °C ถึง 200 °C

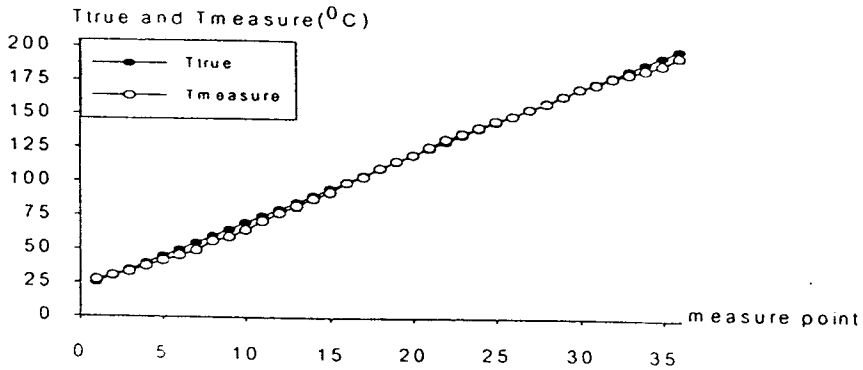
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์(True) กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร(AV) เมื่อใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร มีจุดเริ่มต้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร (AV) ไม่เท่ากันเพราะค่าความต้านทานของสารที่อุณหภูมิห้องของสารทั้ง 3 สูตรไม่เท่ากันซึ่งมีผลต่อการออกแบบระบบการควบคุม ซึ่งสารที่ 1 มีค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำ(ในหน่วยกิโลโอห์ม) เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของสารที่ 2 และ 3 ซึ่งมีค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้องสูง (ในหน่วยเมกกะโอห์ม) จึงส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันตกคร่อมสารในสารที่ 1 มีความสม่ำเสมอทุกช่วงอุณหภูมิ ดังนั้นสารที่ 1 จึงวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 200 °C สำหรับสารที่ 2 และสารที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันตกคร่อมสารในช่วงแรก(25 °C ถึง 55 °C) มีความไม่สม่ำเสมอ จึงเลือกทดลองตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 60 °C ถึง 200 °C ดังนั้นจากรูปที่ 4.11 สามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสาร(AV)ได้แสดงดังตารางที่ 4.10

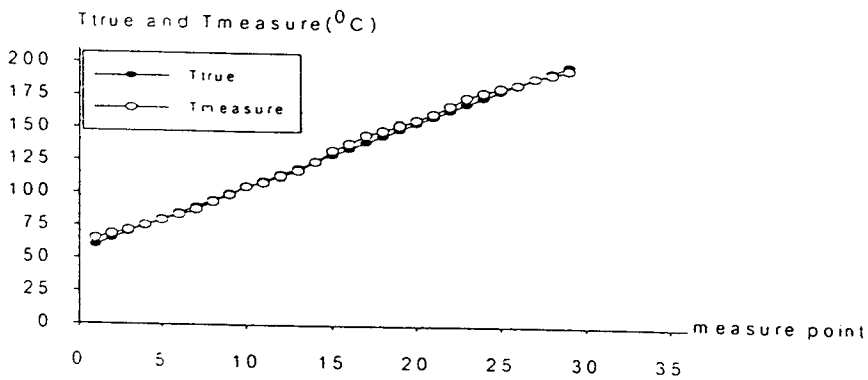
ตาราง 4.10 สรุปสมการที่ใช้ในการปรับเทียบเครื่องมือ

สูตรของสาร	สมการ : $T_{true} = f(AV)$
สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )	$T_{true} = 72.493 \ln(AV) + 117.02$
สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )	$T_{true} = 0.7195(AV)^2 + 27.984(AV) + 45.17$
สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )	$T_{true} = -3.1507(AV)^2 + 42.72(AV) + 63.855$

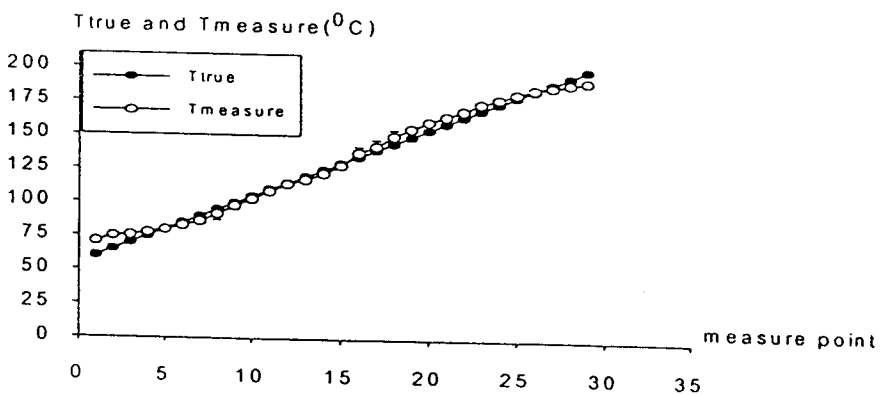
จากสมการในตารางที่ 4.10 เป็นสมการที่ใช้สำหรับปรับเทียบสารที่เตรียมได้ทั้ง 3 สูตรให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ ซึ่งทำการทดลองในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 4.4.3.1 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์(Ttrue) กับ อุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ (Tmeasure) แสดงดังรูปที่ 4.12



(ก): สารที่ 1 ( $\text{Mn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  ถึง  $200^\circ\text{C}$



(ข): สารที่ 2 ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  ถึง  $200^\circ\text{C}$

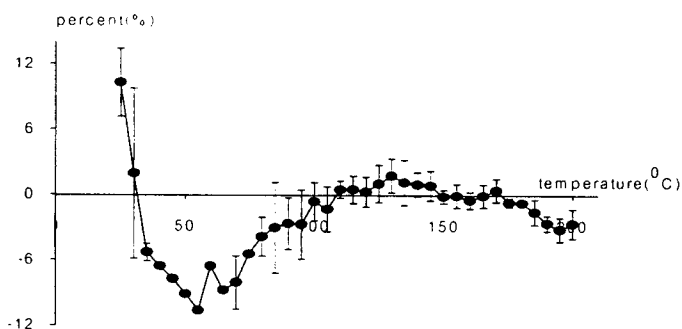


(ค): สารที่ 3 ( $\text{Mn}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  ถึง  $200^\circ\text{C}$

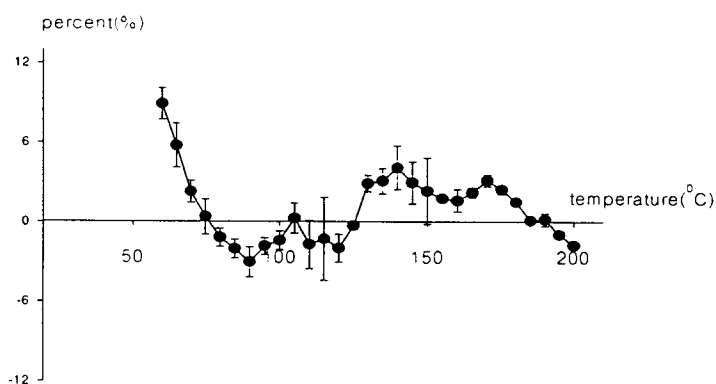
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับ อุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ (Tmeasure) เมื่อใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิ



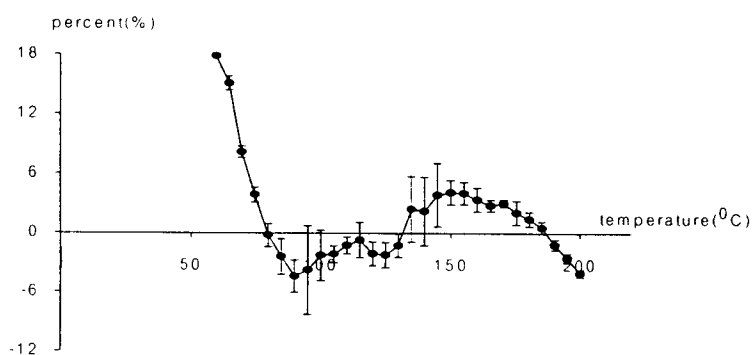
พิจารณาความแม่นยำในการวัดของเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์(Ttrue)กับคอมพิวเตอร์ (Tmeasure) ดังรูปที่ 4.13



(ก):สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ ) สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 200 °C



(ข):สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ ) สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 60 °C ถึง 200 °C



(ค):สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ ) สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 60 °C ถึง 200 °C

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure

เมื่อใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 200 °C

จากรูปที่ 4.13 สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง  $T_{true}$  กับ  $T_{measure}$  เฉลี่ยได้ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 4.4.3.1 ดังตารางที่ 4.11

ตาราง 4.11 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ ( $T_{true}$ ) กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ ( $T_{measure}$ )

สูตรของสาร	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง $T_{true}$ กับ $T_{measure}$
สารที่ 1 ( $Mn_{0.2}Ni_{0.8}Fe_2O_4$ )	$-3.64 \pm 3.20$ % ถึง $+2.84 \pm 1.90$ %
สารที่ 2 ( $Mn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ )	$-1.58 \pm 0.67$ % ถึง $+2.56 \pm 2.08$ %
สารที่ 3 ( $Mn_{0.8}Ni_{0.2}Fe_2O_4$ )	$-2.05 \pm 1.21$ % ถึง $+4.99 \pm 4.82$ %

หลังจากนำสารตัวอย่างมาทดสอบให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ ก็ทำการทดสอบให้ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิโดยการนำระบบการจ่ายไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าไปใช้งาน เริ่มจากเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ เข้าโปรแกรม เปิดสวิทช์ไฟเลี้ยงที่เข้าขดลวดของเตาไฟฟ้า สั่งรัน (RUN) ตั้งอุณหภูมิที่จะทำการควบคุม แล้ว Enter ระบบจะทำงานทันที ระบบที่สร้างขึ้นนี้มีแนวโน้มนำไปใช้กำหนดอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มขึ้นสำหรับใช้วัดปริมาณทางฟิสิกส์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิได้ ตัวอย่างภาพบนจอคอมพิวเตอร์ที่แสดงรายละเอียดต่างๆ ในขณะทำงาน ดังรูปที่ 4.14

## FURNACE TEMPERATURE CONTROLLER FOR CERAMICS

Setting Temperature=200 °C

OVER START

Reading Temperature

Digital Voltage = 95

Analog Voltage = 1.86 V

Measure Temperature =200 °C

รูปที่ 4.14 แสดงภาพบนจอคอมพิวเตอร์ในขณะใช้งาน

ระบบการทดสอบสารตัวอย่างให้ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิจะประกอบด้วยสารที่เตรียมทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่อ่านอุณหภูมิ วงจรขั้วรีเลย์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของโซลิดสเตทรีเลย์เพื่อจ่ายไฟฟ้าหรือหยุดจ่ายไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของเตาไฟฟ้า หลังจากที่สั่งรัน (RUN) โปรแกรม พบว่าคอมพิวเตอร์จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดเป็นจังหวะสลับกัน เตาจะร้อนขึ้นเรื่อยๆ เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ คอมพิวเตอร์ก็จะควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าให้คงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง ผลจากการทดลองเฉลี่ยเพื่อให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้สารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร เป็นหัววัดอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 4.12, 4.13 และ 4.14

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดลองให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าของสารที่ 1

Setting Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ttrue ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperature control or Tmeasure ( $^{\circ}\text{C}$ )
100	$100.7 \pm 4.1$	$100.25 \pm 0.99$
125	$126.3 \pm 2.2$	$124.60 \pm 0.73$
150	$151.5 \pm 2.5$	$149.83 \pm 0.72$
175	$176.5 \pm 3.6$	$174.73 \pm 1.01$
200	$211.0 \pm 8.1$	$199.45 \pm 0.83$

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดลองให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าของสารที่ 2

Setting Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ttrue ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperature control or Tmeasure ( $^{\circ}\text{C}$ )
100	$91.8 \pm 7.2$	$102.6 \pm 3.92$
125	$118.8 \pm 3.1$	$125.18 \pm 1.69$
150	$151.7 \pm 3.0$	$150.5 \pm 1.93$
175	$176.5 \pm 2.36$	$175.57 \pm 1.04$
200	$207.3 \pm 10.01$	$199.60 \pm 0.78$

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดลองให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าของสารที่ 3

Setting Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ttrue( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperature control or Tmeasure ( $^{\circ}\text{C}$ )
100	$99.3 \pm 5.4$	$104.87 \pm 3.56$
125	$125.0 \pm 3.4$	$126.2 \pm 1.41$
150	$151.5 \pm 3.9$	$150.15 \pm 0.63$
175	$174.5 \pm 4.2$	$175.13 \pm 0.41$
200	$20.2 \pm 5.5$	$199.58 \pm 1.02$

จากตารางที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 พบว่าสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรสามารถนำไปทำหน้าที่เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าได้

#### ข. ผลการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้า

เป็นที่ทราบแล้วว่าการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้านี้เป็นการควบคุมอุณหภูมิคงที่ โดยการเลือกอุณหภูมิที่อุณหภูมิสูงสุดเพียงค่าเดียวที่ความสามารถของสารในแต่ละสูตรที่จะทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิได้ สำหรับวิธีการปรับเทียบเครื่องมือเพื่อให้คอมพิวเตอร์อ่านอุณหภูมินั้นทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิไปที่อุณหภูมิสูงสุดโดยอ่านอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์(Ttrue)และสังเกตแรงดันอนาลอกที่คอมพิวเตอร์อ่านได้ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร(AV) ว่ามีค่าเป็นเท่าไรและนำมาคำนวณ  $T_{\text{true}} = b(AV)$  โดยที่ b เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการแก้สมการ ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์(Ttrue)กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสาร(AV) ของสารทั้ง 3 สูตรแสดงดังตารางที่ 4.15

ตาราง 4.15 สรุปสมการที่ใช้ในการปรับเทียบเครื่องมือ

สูตรของสาร	สมการ : Ttrue =f(AV)
สารที่ 1 ( $\text{Mn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ )	$T_{\text{true}} = 187 \cdot AV$
สารที่ 2 ( $\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ )	$T_{\text{true}} = 185 \cdot AV$
สารที่ 3 ( $\text{Mn}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ )	$T_{\text{true}} = 168 \cdot AV$

นำสมการในตารางที่ 4.15 พิมพ์ลงในโปรแกรม และผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ (Tmeasure) โดยการสังเกตค่า Ttrue และ Tmeasure ที่อุณหภูมิสูงสุด ผลปรากฏว่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร สามารถนำมาทำเป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าได้ ซึ่งภาพตัวอย่างบนจอคอมพิวเตอร์ขณะที่คอมพิวเตอร์ทำการควบคุมอุณหภูมิกำลังที่แสดงดังรูปที่ 4.15

## FURNACE TEMPERATURE CONTROLLER FOR CERAMICS

Setting Temperature=800 °C

OVER START

Reading Temperature

Digital Voltage = 243

Analog Voltage = 4.765 V

Oven Temperature =800.47 °C

Measure Temperature =800.4 °C

รูปที่ 4.15 แสดงภาพบนจอคอมพิวเตอร์ในขณะที่ใช้งาน

ระบบการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิจะเหมือนในหัวข้อ 4.4.3.2(ก) แต่ผลการควบคุมอุณหภูมิได้บันทึกผลการทดลองเฉพาะอุณหภูมิสูงสุดที่ความสามารถของสารตัวอย่างที่จะทำได้ซึ่งผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิของสารทั้ง 3 สูตร แสดงดังตารางที่ 4.16, 4.17 และ 4.18

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดลองให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าของสารที่ 1 สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 800 °C

ตัวแปรที่ทำการบันทึก	ค่าเฉลี่ย
Digital Voltage	243
Analog Voltage(V)	4.755 ± 0.02
Oven temperature(°C)	800.47 ± 0.00
Tmeasure (°C)	798.75 ± 1.65
Ttrue (°C)	800.5 ± 4.9

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดลองให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าของสารที่ 2 สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 800 °C

ตัวแปรที่ทำการบันทึก	ค่าเฉลี่ย
Digital Voltage	221
Analog Voltage(V)	4.324 ± 0.187
Oven temperature(°C)	801.67 ± 0.00
Tmeasure (°C)	798.70 ± 4.86
Ttrue (°C)	794.5 ± 5.5

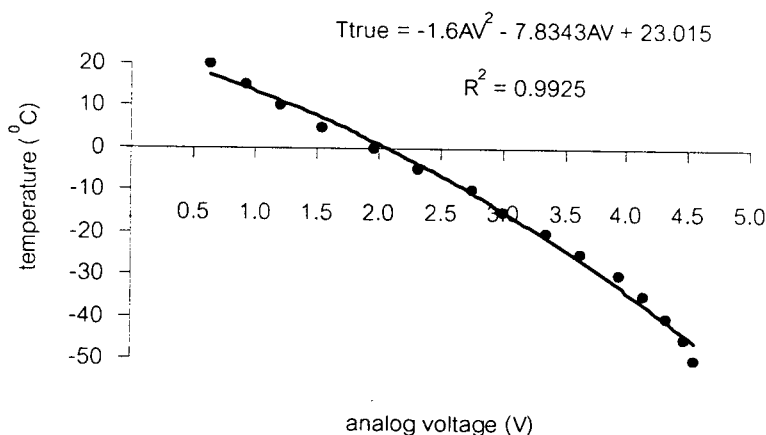
ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดลองให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าของสารที่ 3 สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุด 900 °C

ตัวแปรที่ทำการบันทึก	ค่าเฉลี่ย
Digital Voltage	246
Analog Voltage(V)	4.821 ± 0.135
Oven temperature(°C)	900.61 ± 0.56
Tmeasure (°C)	899.80 ± 1.90
Ttrue (°C)	894.8 ± 5.2

จากตารางที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 แสดงว่าสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรสามารถทำหน้าที่เป็น หัววัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้าได้ แต่ผลการควบคุมของสารทั้ง 3 สูตรแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความสามารถของสารตัวอย่างแต่ละสูตร

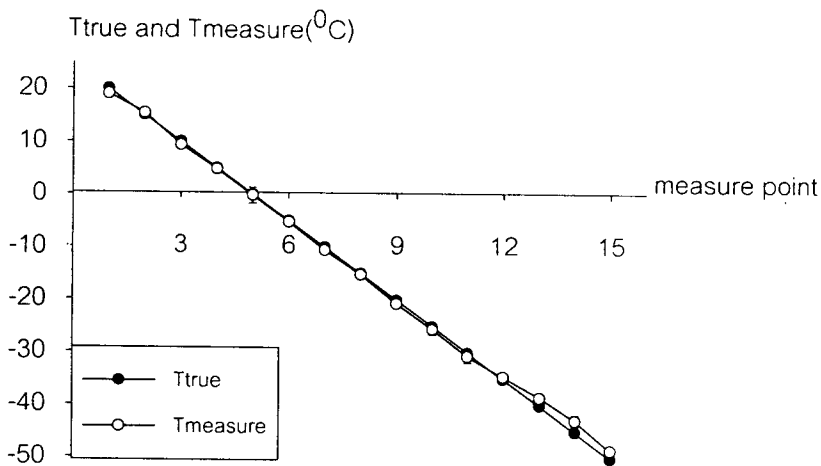
### ค. ผลการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว

ผลการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ซึ่งผลการปรับเทียบเครื่องมือ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสารซึ่งเป็นแรงดันอนาล็อก (AV) ได้ทำการทดลองเฉพาะสารที่ 1 เนื่องจากสมบัติของสารตัวอย่างที่เป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC นั้น เมื่ออุณหภูมิลดลง ค่าความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่ 2 และสารที่ 3 มีค่าความต้านทานที่อุณหภูมิห้องสูงจึงเป็นเรื่องยากที่จะทำการออกแบบระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิในย่านไนโตรเจนเหลว สำหรับผลการปรับเทียบเครื่องมือของสารสูตรที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.16



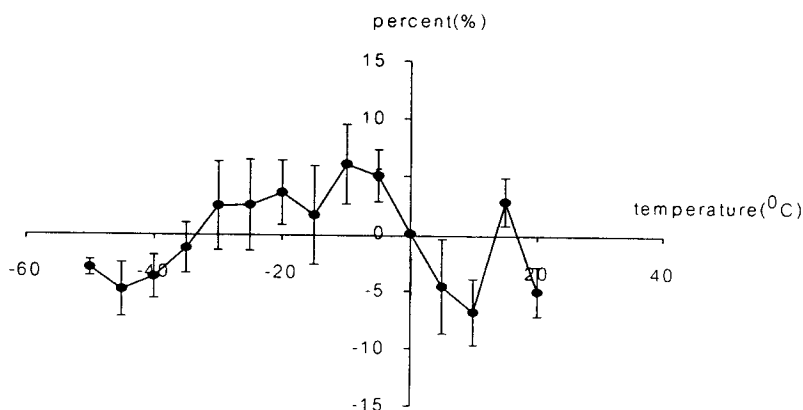
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสาร (AV) ของสารสูตรที่ 1 เมื่อใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 20 °C

จากรูปที่ 4.16 สามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสาร (AV) ของสารสูตรที่ 1 คือ  $T_{true} = -1.6AV^2 - 7.8343AV + 23.015$  และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับอุณหภูมิที่อ่านได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ (Tmeasure) แสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับอุณหภูมิที่อ่านได้โดยใช้คอมพิวเตอร์(Tmeasure) ของสารที่ 1 เมื่อใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ  $-50^{\circ}\text{C}$  ถึง  $20^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.17 พบว่าสารสูตรที่ 1 สามารถนำไปทำเป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิในช่วง  $-50^{\circ}\text{C}$  ถึง  $20^{\circ}\text{C}$  ได้ และเมื่อพิจารณาความแม่นยำในการวัดของเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ กับคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure ของสารที่ 1 เมื่อใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ  $-50^{\circ}\text{C}$  ถึง  $20^{\circ}\text{C}$



จากรูปที่ 4.18 สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์(Ttrue) กับอุณหภูมิที่อ่านได้โดยใช้คอมพิวเตอร์(Tmeasure) เฉลี่ยของสารที่ 1 ได้  $-4.24 \pm 1.60 \%$  ถึง  $+2.94 \pm 1.77 \%$

หลังจากนำสารตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ มาทดสอบให้ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิ ทำการตั้งอุณหภูมิที่จะทำการควบคุม แล้ว Enter ระบบจะทำงานทันที ซึ่งตัวอย่างภาพบนจอคอมพิวเตอร์ที่แสดงรายละเอียดต่างๆ ในขณะที่ทำงานจะเหมือนกับรูปที่ 4.14 สำหรับระบบการทดสอบสารตัวอย่างให้ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมินั้นประกอบด้วยสารตัวอย่างที่เตรียมได้จะทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่อ่านอุณหภูมิ สเตปปีงมอเตอร์ทำหน้าที่เลื่อนตำแหน่งของสารตัวอย่างที่ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิเพื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จะวัด สารตัวอย่างจะเย็นลงเรื่อยๆ เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้คอมพิวเตอร์ก็จะควบคุมอุณหภูมิกงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งผลการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้สารสูตรที่ 1 เป็นหัววัดแสดงดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดลองให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิกงที่ในย่านไนโตรเจนเหลว

Setting Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ttrue( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperature control or Tmeasure ( $^{\circ}\text{C}$ )
0	$1.5 \pm 0.25$	$0.45 \pm 0.08$
-20	$-24.6 \pm 0.7$	$-24.6 \pm 1.08$
-50	$-51.9 \pm 0.9$	$-50.61 \pm 0.40$

จากผลการทดสอบการวัดและควบคุมอุณหภูมิในย่านที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องนี้คาดว่ามีความแม่นยำนำไปใช้ในการทดสอบสมบัติ NTC ของวัสดุชนิดต่างๆต่อไปในอนาคต