บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อให้ทราบหลักการเชิงฟิสิกส์ของเทอร์มิสเตอร์ ระบบการเชื่อมต่อโดยใช้คอมพิวเตอร์ เทอร์โมคับเปิล และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องตามกฎของแบรกก์ สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย เริ่มจากการเตรียมสารตัวอย่าง ศึกษาลักษณะของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง XRD วัดสมบัติเชิงกายภาพเช่น ความหนา (L) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของสารทั้ง 3 สูตร การทดสอบสมบัติเชิงฟิสิกส์ของสารตัวอย่างได้แก่ ทดสอบเสถียรภาพทางไฟฟ้าและทดสอบปรากฏการณ์ NTC หลังจากนั้นได้กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานที่เป็นลบ ค่าดัชนีความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ และหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ สุดท้ายกล่าวถึงวิธีการสร้างระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิโดยใช้คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุ

3.1.1 สารตัวอย่าง ได้แก่ MnO_2 (manganese oxide), NiO (nickel oxide) และ Fe_2O_3 (iron oxide) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.5 %

3.1.2 โพลิไวนิลแอลกฮอล์ (polyvinyl alcohol , PVA)

3.1.3 น้ำกลั่น

3.1.4 กระดาษทราย (SiC grinding paper) ยี่ห้อ Buehler ใช้สำหรับขัดผิวหน้าสารตัวอย่าง

3.1.5 กาวเงิน (silver paste) ยี่ห้อ CW2400,ITW Chemtronics ใช้สำหรับติดขั้วไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าของสารตัวอย่างกับลวดทองแดง

3.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อเตรียมสารตัวอย่าง ทดสอบสมบัติเชิงฟิสิกส์ และการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิ สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ส่วนใหญ่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และบางส่วนสามารถจัดซื้อมาได้ในประเทศ มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมสารตัวอย่าง

3.2.1.1 เครื่องชั่งสารแบบตัวเลข สำหรับชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่าง

3.2.1.2 ครกบดสาร สำหรับบดผสมสารให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

3.2.1.3 เบ้าอัดสารสำหรับกำหนดรูปร่างของสารตัวอย่างให้มีลักษณะเป็นรูปจาน

3.2.1.4 เครื่องอัดสารระบบไฮดรอลิก สำหรับอัดสารเป็นก้อนรูปจาน

3.2.1.5 เตาหลอมไฟฟ้าที่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (FCR-13A-R/M) และใช้คู่ควบความร้อนชนิด K (model JB-35) สำหรับเผาสารตัวอย่าง

3.2.1.6 ไมโครมิเตอร์ (micrometer) ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร สำหรับวัดขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลางของสารตัวอย่าง

3.2.1.7 เครื่องรังสีเอกซ์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (x-ray diffractometer, Phillips PW3710) สำหรับ วิเคราะห์โครงสร้างและตรวจสอบเฟสของสารตัวอย่าง

3.2.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดเสถียรภาพทางไฟฟ้า

3.2.2.1 เครื่องมัลติมิเตอร์ (Fluke 45 Dual Display Multimeter) สำหรับวัดความต้านทาน

3.2.2.2 นาฬิกาจับเวลา

3.2.3 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบปรากฏการณ์ NTC

3.2.3.1 เตาไฟฟ้า สำหรับให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง ในช่วงอุณหภูมิ 25 ^{0}C ถึง 200 ^{0}C

3.2.3.2 เตาหลอมไฟฟ้า สำหรับให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง ในช่วงอุณหภูมิ 25 ^{0}C ถึง 900 ^{0}C

3.2.3.3 เครื่องมัลติมิเตอร์ (Fluke 45 dual display multimeter) ใช้สำหรับวัดความต้านทาน

3.2.3.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ (union 305 thermometer) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ

3.2.3.5 ตัวจับพร้อมขาตั้งเพื่อยึดก้อนสารซึ่งสามารถปรับระดับความสูงให้เหมาะสมกับเตาไฟฟ้า

3.2.3.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิใช้สำหรับวัดและควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ทดลองซึ่งสามารถกำหนดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิตามต้องการให้คงที่ได้ตลอดการทดลอง

3.2.3.7 หัววัดอุณหภูมิ (LM335) เป็นหัววัดที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง –10 ^{0}C ถึง 100 ^{0}C สำหรับวัดอุณหภูมิ

3.2.3.8 แผงวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ ที่ประกอบด้วยตัวต้านทานขนาดต่างๆ, ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ, LED, IC 555, OP Amp741, IC ADC0809, IC 74LS244, โปรโตรบอร์ด (photoboard) และ ET-PC8255 Card

3.2.3.9 คอมพิวเตอร์ (Computer) รุ่น 80386SX ทำหน้าที่คำนวณและแสดงผลออกทางหน้าจอ

3.2.4 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิ

3.2.4.1 เตาไฟฟ้า สำหรับให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างในช่วง 25 ^{0}C ถึง 200^{0}C

3.2.4.2 เตาหลอมไฟฟ้า สำหรับให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง ในช่วงอุณหภูมิ 25 ^{0}C ถึง 900^{0}C

3.2.4.3 ไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) สำหรับให้ความเย็นแก่สารตัวอย่าง

3.2.4.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ (union 305 thermometer) สำหรับวัดอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้โดยใช้คอมพิวเตอร์

3.2.4.5 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ เช่น ตัวต้านทานขนาดต่างๆ, ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ, LED,IC 555, OP Amp741, IC ADC0809, IC 74LS244, โปรโตรบอร์ด (photoboard) ,ET-PC8255 Card, ออฟโตคอฟเปล่อร์ (optocoupler) 4N27, วงจรขับรีเลย์ (relay drive circuit) ,โซลิดสเตทรีเลย์ (solid state relay) , สเตปปิ้งมอเตอร์(stepping motor),สเตปปิ้งมอเตอร์บอร์ด (stepping motor board) และแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

3.2.4.6 เครื่องมัลติมิเตอร์ (multimeter) สำหรับทดสอบระบบการทำงานของวงจรเชื่อมต่อ

3.2.4.7 คอมพิวเตอร์ (computer) รุ่น 80386SX

3.3 วิธีการวิจัย

3.3.1 เตรียมก้อนสาร $Mn_xNi_yFe_2O_4$ จากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผง

การเตรียมสารตัวอย่าง $Mn_xNi_yFe_2O_4$ โดยวิธีเทคนิคเซรามิกมาตรฐาน (standard ceramic techniques) เป็นวิธีการที่รายงานโดยบูชานัน (Buchanan,1991) เริ่มจากเลือกสูตรและสัดส่วนผสมของสารตัวอย่าง จากสารตั้งต้น $xMnO_2$,yNiO และ Fe_2O_3 โดยที่ x และ y จะเป็นอัตราส่วนผสม 3 แบบ ดังนี้ สารที่ 1 : x = 0.2 และ y = 0.8 , สารที่ 2 : x = 0.5 และ y = 0.5 และสารที่ 3 : x = 0.8 และ y = 0.2

คำนวณน้ำหนัก ชั่งผงของสารด้วยเครื่องชั่ง ผสมสารด้วยโกร่ง นำผงของสารใส่กระป๋องพลาสติกหมุนผสมสารด้วยเครื่องหมุนเพื่อให้ผงของสารเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หยดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ผสมน้ำกลั่น10%โดยน้ำหนัก เพื่อช่วยให้ผงของสารสามารถจับตัวกันเป็นก้อนซึ่งสะดวกต่อการอัดเป็นก้อน บดให้เปียกสม่ำเสมอ อัดผงของสารที่เตรียมได้เป็นก้อนโดยกระบวนการอัดแบบแห้ง (dry pressing) ซึ่งทำได้โดยนำผงของสารใส่เบ้าอัด (mould) เพื่อกำหนดรูปร่างของสารให้มีรูปร่างเป็นแผ่นรูปจาน (disc shape) ด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกซึ่งใช้แรงดันในการอัดก้อนสารประมาณ 5 ตัน หลังจากนั้นถอดก้อนสารออกจากเบ้าอัด นำไปผึ่งแห้งหนึ่งคืน

นำก้อนสารทั้ง 3 สูตรวางในเตาหลอม (furnace) ที่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (FCR-13A-R/M) และใช้คู่ควบความร้อนชนิด K (model JB-35) ทำการเผา 2 ครั้ง ครั้งแรกเผาที่อุณหภูมิ 500 ^{0}C ปิดเตาปล่อยเตาให้เย็น และเผาครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 1200 ^{0}C

3.3.2 การศึกษาลักษณะของสารตัวอย่างด้วยเครื่อง XRD

นำสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร ที่ผ่านการเผาไปวิเคราะห์ลักษณะของสารด้วยเครื่อง XRD (X-ray difractometer) (Philips PW3710) เพื่อดูเฟส (phase) ของสาร แอโนดของหลอดรังสีเอกซ์ทำมาจากทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มีค่า 40 kV กระแสไฟฟ้าในหลอดรังสีเอกซ์มีค่า 30 mA มุมแบรกก์ที่ทำให้การถ่าย 2θ อยู่ในช่วง 5.025^0 ถึง 79.975^0 และความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ ($\lambda_{\alpha 1}$) มีค่า 1.54056 A^0 และจากการศึกษาเฟสของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง XRD ทำให้ได้แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction pattern) ในขณะเดียวกันก็สามารถหาระนาบของโครงผลึกจากระนาบของอะตอมที่ขนานกันซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่สอดคล้องตามกฎของแบรกก์

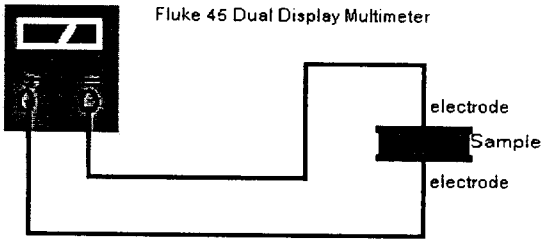
3.3.3 ทดสอบสมบัติเชิงกายภาพของสารตัวอย่าง

วัดความหนา (L) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของสารทั้ง 3 สูตรโดยใช้ไมโครมิเตอร์ สร้างขั้วของสารทั้ง 3 สูตรด้วยกาวเงิน (CW2400,ITW Chemtronics) โดยทาลงบนผิวหน้าของสาร วางเส้นลวดแล้วทาทับอีกชั้น นำไปอบด้วยเตาไฟฟ้าเป็นเวลาประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นวัดความต้านทาน (R) ที่อุณหภูมิห้อง (25 ^{0}C) ด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ คำนวณสภาพต้านทาน (ρ) และสภาพการนำ (σ) ของสารทั้ง 3 สูตร

3.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงฟิสิกส์ของสารตัวอย่าง

3.3.4.1 การทดสอบเสถียรภาพทางไฟฟ้า

การทดสอบเสถียรภาพทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างทั้ง 3 สูตรเพื่อดูว่าสารตัวอย่างสามารถนำมาทำเป็นหัววัดอุณหภูมิได้หรือไม่เพราะสารตัวอย่างที่สามารถนำมาทำเป็นหัววัดอุณหภูมิได้นั้นต้องมีค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลามากนักในขณะที่อุณหภูมิคงที่ (Martinez Serrion,1995) ซึ่งได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1 แล้วทำการวัดความต้านทาน (R) ที่เวลา (t) ต่างๆ ด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ (Fluke 45 Dual Display Multimeter) 3 ครั้ง เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับเวลาของสารทั้ง 3 สูตรโดยใช้โปรแกรมซิกมาพลอต



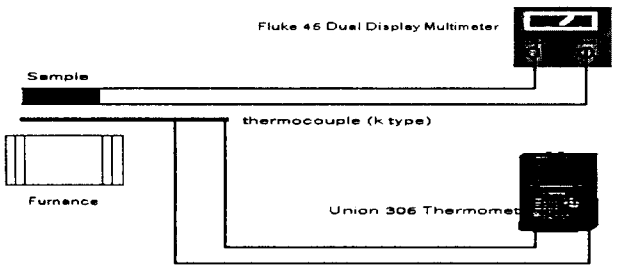
รูปที่ 3.1 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อวัดเสถียรภาพทางไฟฟ้า

3.3.4.2 การทดสอบปรากฏการณ์ NTC

การทดสอบปรากฏการณ์ NTC เป็นวิธีการตรวจสอบสมบัติของสารตัวอย่างก่อนที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิ เพราะสารตัวอย่างที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิได้นั้นต้องมีสมบัติเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC นั่นคือความต้านทานของสารตัวอย่างต้องมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับโครงงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทดสอบปรากฏการณ์ NTC 3 วิธีดังนี้

ก. การทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีที่ 1

ใช้เตาไฟฟ้าที่ไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิ อ่านอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์และความต้านทานด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ การทดสอบเริ่มจาก การจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.2

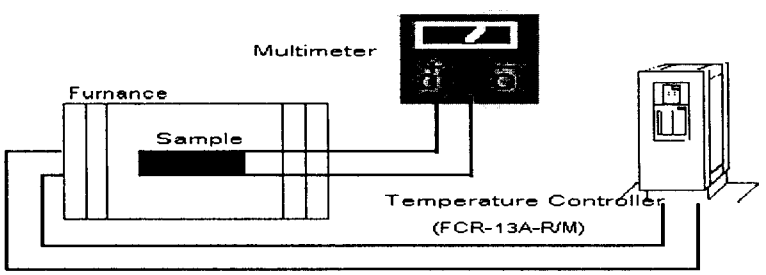


รูปที่ 3.2 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบปรากฏการณ์ NTC วิธีที่ 1

จากรูปที่ 3.2 ขณะที่จัดอุปกรณ์การทดลองต้องใช้ตัวจับพร้อมขาตั้งยึดก้อนสารที่ทำขั้วด้วยกาวเงินแล้วจัดให้หัววัดอุณหภูมิอยู่เหนือเตาไฟฟ้า 1 เซนติเมตร เพื่อให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิไม่สูงมากและสะดวกต่อการวัดความต้านทาน(R) ด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ (Fluke 45 dual display multimeter) และอุณหภูมิ (T) ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ (union 305 thermometer) โดยที่ก้อนสารกับหัววัดอยู่ที่ระดับเดียวกัน ทำการเพิ่มอุณหภูมิของสารอย่างช้าๆ บันทึกความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ ทุกๆ 5 ^{0}C จนถึง 200 ^{0}C ทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของสารทั้ง 3 สูตรโดยใช้โปรแกรมซิกมาพลอต

ข. การทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีที่ 2

ใช้เตาไฟฟ้าที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิ อ่านอุณหภูมิจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความต้านทานจากมัลติมิเตอร์ การทดสอบเริ่มจากจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.3



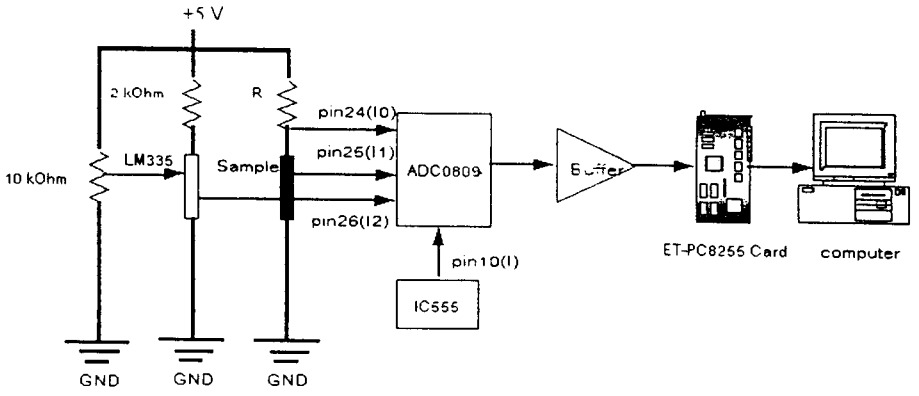
รูปที่ 3.3 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อทดสอบปรากฏการณ์ NTC วิธีที่ 2

จากรูปที่ 3.3 เป็นการทดสอบปรากฏการณ์ NTC ในช่วงอุณหภูมิสูงเพื่อตรวจสอบความสามารถของสารตัวอย่างว่า สามารถแสดงปรากฏการณ์ NTC ในช่วงอุณหภูมิสูงได้หรือไม่ ซึ่งถ้าสารตัวอย่างสามารถแสดงปรากฏการณ์ NTC ในช่วงอุณหภูมิสูงได้ คาดว่าน่าจะนำสารตัวอย่างไปทำเป็นหัววัดอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิสูงได้เช่นกัน และใช้เครื่องมัลติมิเตอร์ (multimeter) วัดความต้านทาน(R) และอ่านอุณหภูมิจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (T) ทุกๆ 5 ^{0}C ตั้งแต่ 25 ^{0}C จนถึง 900 ^{0}C ทำการทดลอง 3 ครั้ง เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของสารทั้ง 3 สูตรโดยใช้โปรแกรมซิกมาพลอต

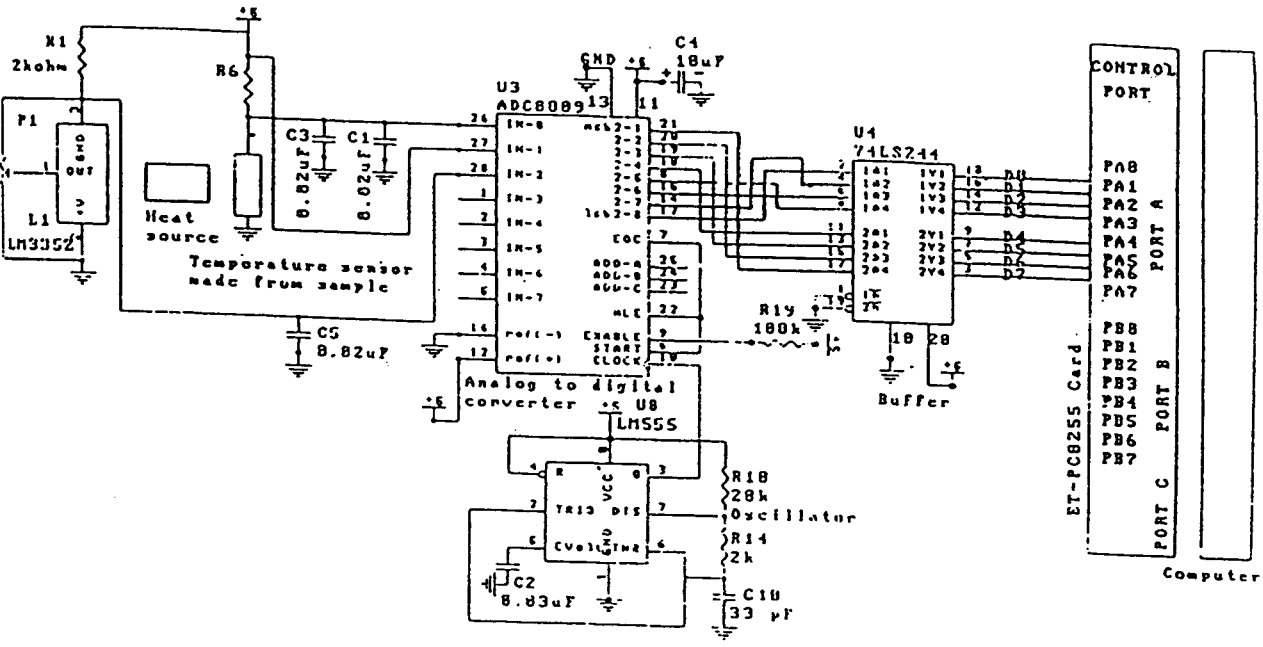
ค. การทดสอบปรากฏการณ์ NTC โดยใช้วิธีที่ 3

ใช้แผงวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ โดยการสร้างระบบการวัดความต้านทานของสารที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และให้คอมพิวเตอร์แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ มีวิธีการทดสอบดังนี้

1) ออกแบบระบบการทดสอบเพื่อให้คอมพิวเตอร์แสดงความต้านทานของสารที่ขึ้นกับอุณหภูมิดังรูปที่ 3.4 พร้อมทั้งศึกษารายละเอียดของวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.5 และประกอบวงจรลงบนโปรโตบอร์ด หลังจากนั้นทดสอบวงจรจนทำงานได้ โดยการป้อนแรงดันจากตัวต้านทานขนาด 10 kΩ (V_R) ปรับและสังเกตการติดดับของ LED นำวงจรที่ต่อลงบนโปรโตบอร์ดเสร็จแล้วเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยผ่าน ET-PC8255 Card



รูปที่ 3.4 แสดงระบบการทำงานสำหรับให้คอมพิวเตอร์แสดงความต้านทานของสารตัวอย่างที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

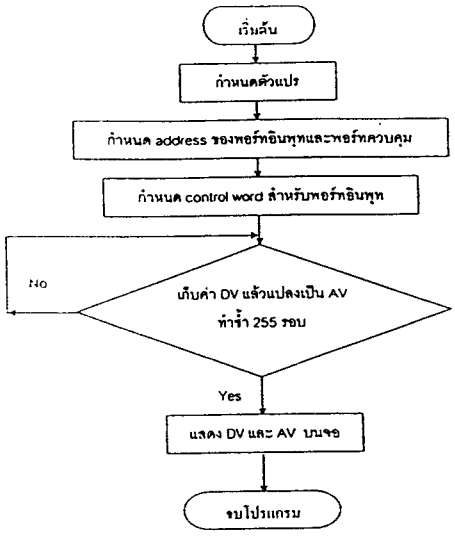


รูปที่ 3.5 วงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์สำหรับให้คอมพิวเตอร์แสดงความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 สามารถอธิบายการทำงานของระบบโดยเริ่มจากแรงดันไฟฟ้าตรง 5 V ไหลผ่านตัวต้านทานซึ่งต่ออนุกรมกับสารตัวอย่าง ทำให้สารตัวอย่างมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนไปยัง ADC0809 ซึ่งมี 3 ชนิดคือ แรงดันตกคร่อมสาร (V_s), แรงดันตกคร่อมระหว่างตัวต้านทานกับสารตัวอย่าง (V_{Ls}) ซึ่ง V_{Ls} จะใช้สำหรับคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสาร (I_s) และแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากหัววัดอุณหภูมิ (V_T) ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า V_s, V_{Ls} และ V_T เข้าทางอินพุท I_0, I_1 และ I_2 ตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าทั้งสามค่าเป็นแรงดันอนาลอก (AV) ส่งแรงดัน AV เข้า ADC0809 ทางขา 24 ,25 และ 26 ตามลำดับ เพื่อแปลงให้เป็นแรงดันดิจิตอล (DV) ที่มีขนาด 8 บิท คือ D_7, D_6, D_5, D_4, D_3, D_2, D_1, D_0 สำหรับไอซี 555 จะทำหน้าที่ผลิตแรงดันรูปสี่เหลี่ยมแล้วส่งเข้าขา 10 ของไอซี ADC0809 เพื่อให้ไอซี ADC0809 ทำงาน และแรงดัน DV นี้จะถูกส่งผ่าน 74LS244 ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัพเฟอร์ (buffer) คั่นระหว่างวงจร ADC0809 กับคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะใช้ LED 8 ตัวชี้บอกแรงดันดิจิตอลทั้ง 8 บิท หลังจากนั้นแรงดัน DV นี้จะผ่าน ET-PC8255 Card ทางพอร์ท A แล้วเข้าไปในหน่วยความจำแรมของคอมพิวเตอร์

2) เขียนโปรแกรมต่างๆ โดยใช้ภาษาเทอร์โบปาสคาล ดังนี้

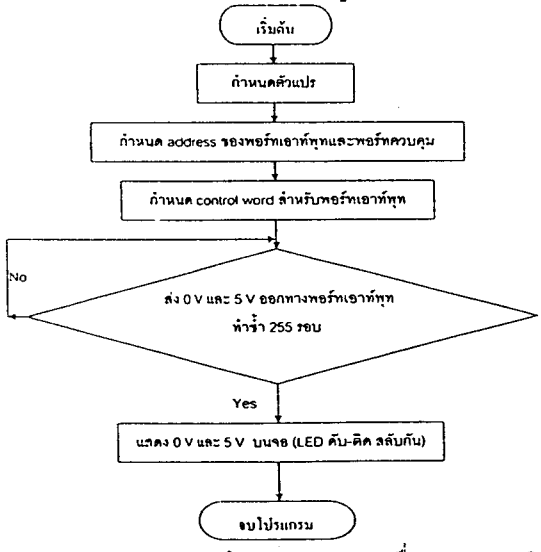
2.1)เขียนโปรแกรมเพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรเชื่อมต่อโดยการนำแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกคอมพิวเตอรเข้าสู่ภายในคอมพิวเตอร์ ดังรายละเอียดในภาคผนวก(โปรแกรมที่ 1) ซึ่งสามารถสรุปหลักการทำงานของโปรแกรมได้ดังโฟว์ชาร์ท (flowchart) รูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โฟว์ชาร์ทที่แสดงการตรวจสอบการทำงานของวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ให้นำแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกคอมพิวเตอร์เข้าสู่ภายในคอมพิวเตอร์

2.2) สั่งรัน (RUN) โปรแกรมที่ 1 และป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ปรับได้ด้วยตัวต้านทาน 10 kΩ (V_R) เข้าทางขา 26 (I_0) ของไอซี ADC0809 และเคลื่อนที่ผ่าน 74LS244 และส่งต่อผ่านพอร์ท A ของ ET-PC8255 Card เข้าไปในหน่วยความจำแรมของคอมพิวเตอร์ และใช้คำสั่ง writeln(' ') แสดงค่า Digital Voltage Input และ Analog Voltage Input บนจอคอมพิวเตอร์

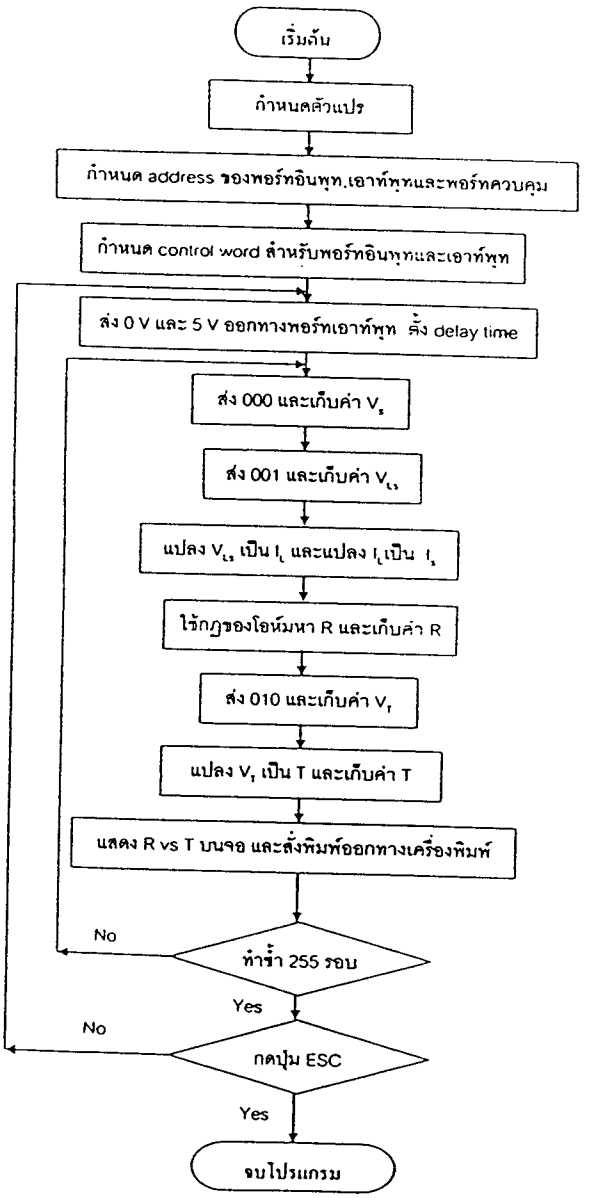
2.3)เขียนโปรแกรมเพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรเชื่อมต่อโดยการนำแรงดันไฟฟ้าภายในคอมพิวเตอร์ออกนอกคอมพิวเตอร์ ดังรายละเอียดในภาคผนวก(โปรแกรมที่ 2) ซึ่งสามารถสรุปหลักการทำงานของโปรแกรมได้ดังโฟว์ชาร์ทรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โฟว์ชาร์ทแสดงการตรวจสอบการทำงานของวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ให้นำแรงดันไฟฟ้าภายในคอมพิวเตอร์ออกนอกคอมพิวเตอร์

2.4) ทำการสั่งรัน (RUN) โปรแกรมที่ 2 เพื่อนำแรงดันไฟฟ้าออกทางพอร์ท B ของ ET-PC8255 Card สังเกตได้จากการติดดับของ LED ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากคอมพิวเตอร์เป็น 5 V โดยใช้คำสั่ง Port[PB]:=255 LED จะติด แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากคอมพิวเตอร์เป็น 0 V โดยใช้คำสั่ง Port[PB]:=0 LED จะดับ

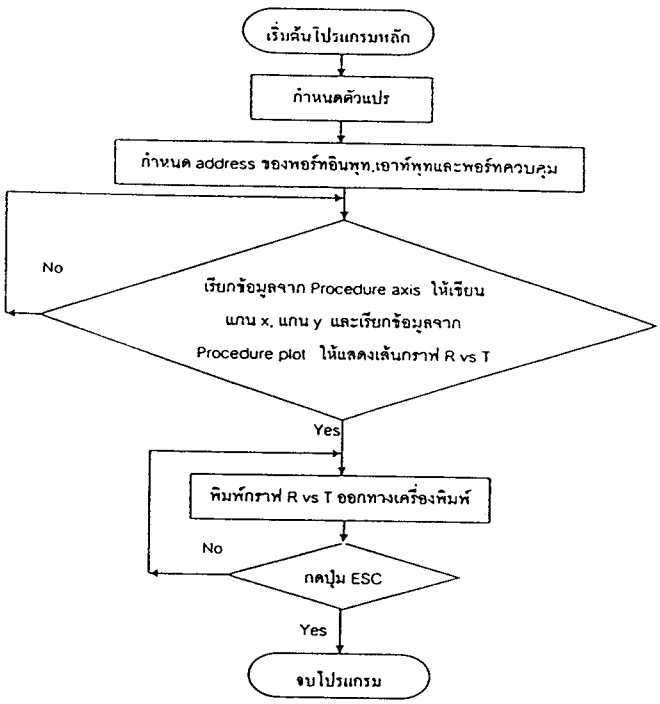
2.5) เขียนโปรแกรมเพื่อให้คอมพิวเตอร์อ่านความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังรายละเอียดในภาคผนวก(โปรแกรมที่3)ซึ่งสามารถสรุปหลักการทำงานของโปรแกรมได้ดังโฟว์ชาร์ทรูปที่ 3.8



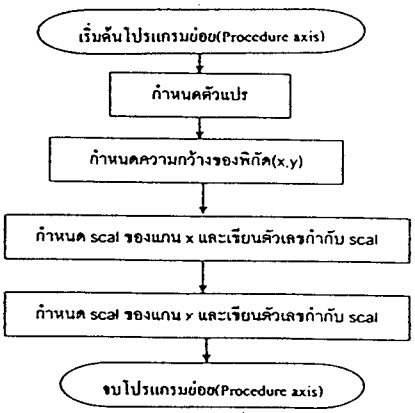
รูปที่ 3.8 โฟว์ชาร์ทแสดงหลักการทำงานของโปรแกรมให้คอมพิวเตอร์อ่านความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

2.6) ทำการสั่งรัน (RUN) โปรแกรมที่ 3. แล้วเพิ่มอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า คอมพิวเตอร์จะอ่านค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆและสั่งให้คอมพิวเตอร์พิมพ์ข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิของสารทั้ง 3 สูตร ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 100 ^{0}C โดยใช้ซิกมาพลอต

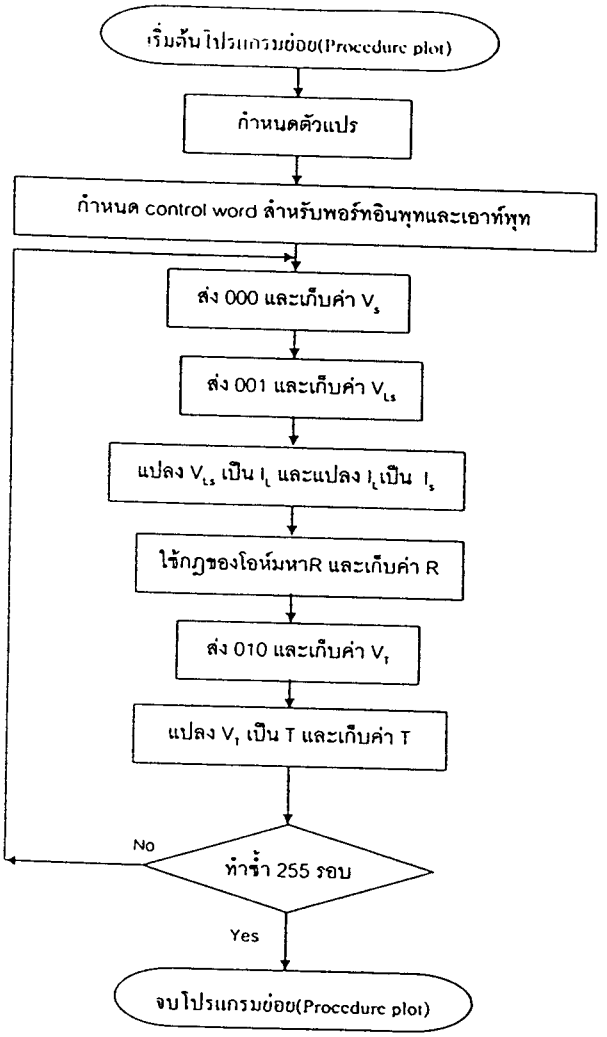
2.7) เขียนโปรแกรมเพื่อให้คอมพิวเตอร์แสดงกราฟของความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังรายละเอียดในภาคผนวก(โปรแกรมที่ 4) ซึ่งสามารถสรุปหลักการทำงานของโปรแกรมได้ดังโฟว์ชาร์ท รูปที่ 3.9(ก), รูปที่ 3.9(ข) และรูปที่ 3.9(ค)



รูปที่ 3.9(ก) โฟว์ชาร์ทแสดงหลักการของโปรแกรมหลักเพื่อให้คอมพิวเตอร์แสดงและพิมพ์เส้นกราฟของความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.9(ข) โฟว์ชาร์ทแสดงหลักการของโปรแกรมย่อยเพื่อให้คอมพิวเตอร์แสดงแกน x และแกน y ของความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.9(ค) โฟว์ชาร์ทแสดงหลักการของโปรแกรมย่อยเพื่อให้คอมพิวเตอร์แสดงกราฟของความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

2.8) สั่งรัน (RUN) โปรแกรมที่ 4 แล้วเพิ่มอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าและใช้คำสั่งให้คอมพิวเตอร์พิมพ์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของสารทั้ง 3 สูตร

3.3.4.3 **การวิเคราะห์ค่า α ,B และ R(T)**

ก. การวิเคราะห์ค่า α

วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นลบ (α) โดยใช้ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิซึ่งได้จากการทดสอบปรากฏการณ์ NTC ทั้ง 3 วิธี และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิจะพบว่าการลดลงของค่าความต้านทานมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพแนนท์เชียล (exponential function) ที่สอดคล้องกับสมการ $y = ae^{-bx}$ และเมื่อเทียบกับสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน (R) กับอุณหภูมิ (T) ของสารตัวอย่างที่มีสมบัติเป็นเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.11) คือ $R(T) = R_{\alpha}e^{-\alpha T}$

ข. การวิเคราะห์ค่า B

วิเคราะห์ค่าดัชนีความไวในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (B) ของสารทั้ง 3 สูตร โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน (R) และส่วนกลับของอุณหภูมิ(1/T) ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการที่ (2.4) คือ $R(T) = R_{\alpha}e^{\frac{B}{T}}$

ค. การวิเคราะห์ค่า R(T)

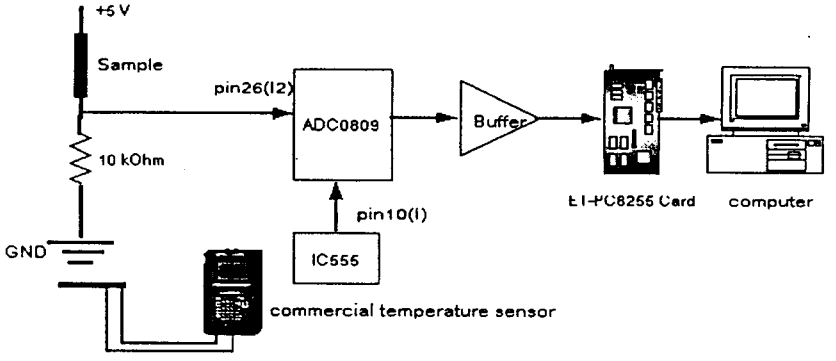
วิเคราะห์หาสมการทั่วไปของค่าความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ(R(T))โดยการแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 2.11 [$R(T) = R_{\alpha}e^{-\alpha T}$] โดยที่ R_{α} คือค่าความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง ซึ่งเมื่อเทียบกับสมการ $y = ae^{-bx}$ ก็คือค่า a , ค่า α เป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.3.4.3(ก)

3.3.5 **การประยุกต์ใช้สารตัวอย่างทั้ง 3 สูตร**

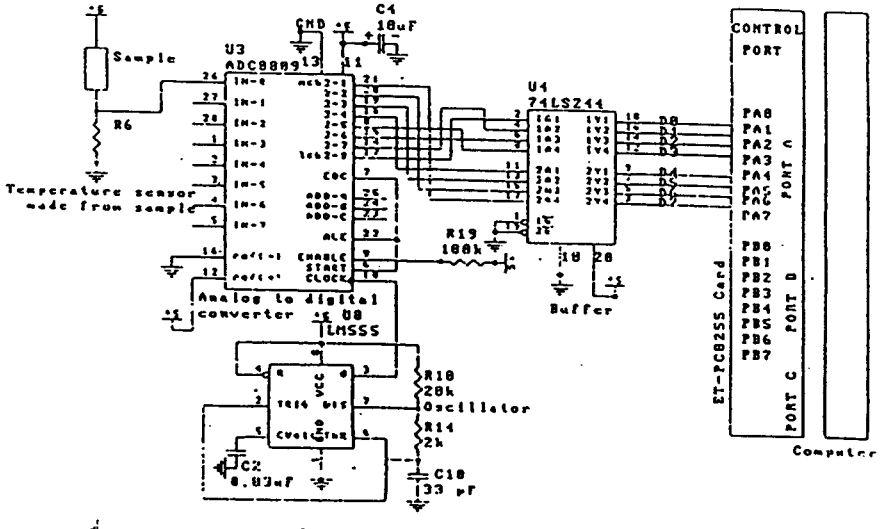
3.3.5.1 **การประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ**

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบปรากฏการณ์ NTC มาทดสอบให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำ เพื่อต้องการตรวจสอบว่า สารตัวอย่างสามารถทำหน้าที่เป็นหัววัดได้หรือไม่ และการออกแบบระบบการวัดอุณหภูมิจะทำได้ง่ายกว่าการออกแบบระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) ออกแบบระบบการวัดอุณหภูมิที่แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้สารที่เตรียมได้เป็นหัววัดดังรูปที่ 3.10 ระบบการวัดนี้ใช้วงจรเชื่อมต่อ ADC0809, 74LS244, ET-PC8255 Card และคอมพิวเตอร์เหมือนกันการทดสอบปรากฏการณ์ NTC วิธีที่ 3 หลังจากนั้นศึกษารายละเอียดของวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.11 และประกอบวงจรลงบนโปรโตบอร์ด



รูปที่ 3.10 แสดงระบบการวัดอุณหภูมิที่แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

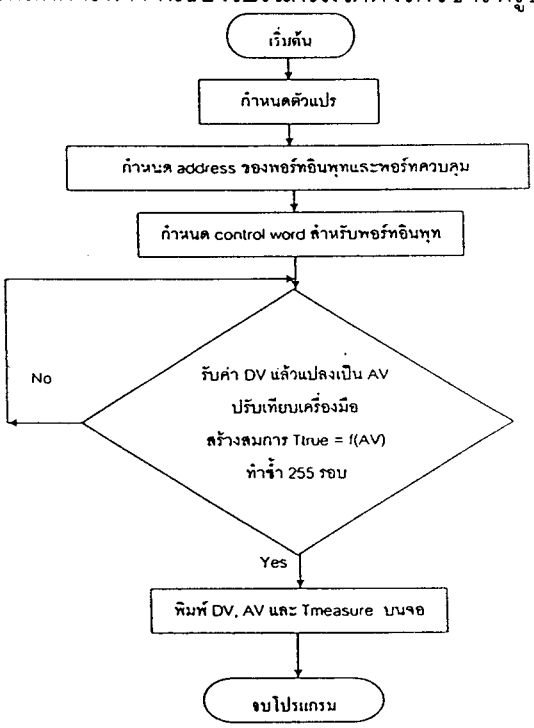


รูปที่ 3.11 วงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์สำหรับให้คอมพิวเตอร์วัดอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 สามารถอธิบายการทำงานของระบบได้ว่า เริ่มจากแรงดันไฟฟ้าตรง 5 V ไหลผ่านสารตัวอย่างที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน ทำให้สารตัวอย่างมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าทางขา 26 (I_0) ของไอซี ADC0809 ซึ่งเป็นแรงดันอนาลอก (AV) ไอซีตัวนี้จะทำหน้าที่แปลงแรงดันอนาลอกเป็นแรงดันดิจิตอล (DV) สำหรับไอซี 555 จะทำหน้าที่ผลิตแรงดันรูปสี่เหลี่ยมแล้วส่งเข้าขา 10 ของไอซี ADC0809 เพื่อให้ไอซี ADC0809 ทำงาน แรงดันดิจิตอลจะเคลื่อนที่ผ่านบัฟเฟอร์ 74LS244 และผ่าน ET-PC8255 Card

ทางพอร์ท A แล้วเข้าไปในหน่วยความจำแรมของคอมพิวเตอร์ โดยเก็บไว้ในตัวแปร DV ทำการแปลงแรงดัน DV เป็น AV ใช้คำสั่งให้แปลงแรงดัน AV ที่เข้าไปในเครื่องให้เป็น T

2)เขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการวัดอุณหภูมิดังรายละเอียดในภาคผนวก(โปรแกรมที่ 5) ซึ่งสามารถสรุปหลักการทำงานของโปรแกรมได้ดังโฟว์ชาร์ทรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โฟว์ชาร์ทแสดงการใช้คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ

3)ทำการปรับเทียบเครื่องมือ(instrument calibration) เพื่อให้สารตัวอย่างทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ โดยสั่งรัน(RUN) โปรแกรมที่ 5 เพิ่มอุณหภูมิของสารตัวอย่างโดยใช้เตาไฟฟ้า อ่านอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นแรงดันอนาลอก (AV) บนจอคอมพิวเตอร์ บันทึกค่า Ttrue กับ AV ทุกๆ 5 ^{0}C ตั้งแต่ 25 ^{0}C จนถึง 170 ^{0}C และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ttrue กับ AV เพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ttrue และ AV หลังจากนั้นพิมพ์สมการลงในโปรแกรมที่ 5 และสั่งรันโปรแกรมอีกครั้ง แล้วอ่านอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) และอ่านอุณหภูมิจากคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สารตัวอย่างเป็นหัววัด (Tmeasure) บันทึกค่า Ttrue กับ Tmeasure ทุกๆ 5 ^{0}C ตั้งแต่ 25 ^{0}C จนถึง 170 ^{0}C แล้วเขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure พร้อมทั้งหาเปอร์เซนต์ความแตกต่างระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure ในที่สุดจะได้เครื่องวัดอุณหภูมิที่แสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้สารตัวอย่างที่เตรียมได้เป็นหัววัด

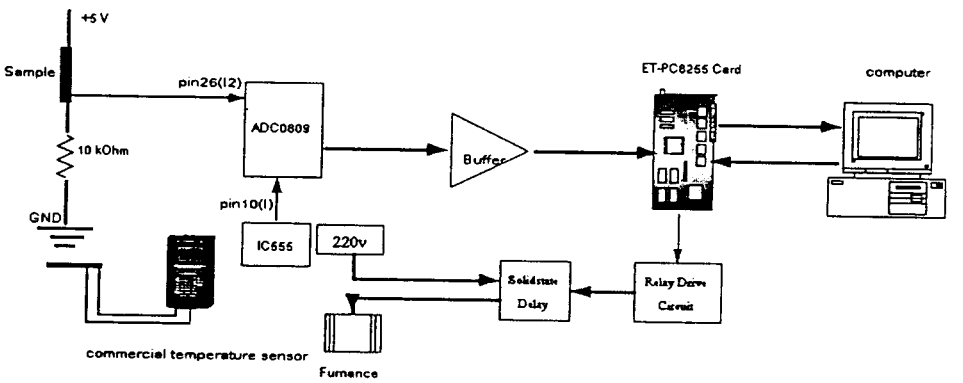
3.3.5.2 **การประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิ**

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิมาทดสอบให้ทำหน้าที่เป็นหัววัดและควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งได้สร้างระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิโดยใช้คอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า (25 ^{o}C ถึง 200 ^{o}C) , เตาอบไฟฟ้า (25 ^{o}C ถึง 900 ^{o}C) และของไนโตรเจนเหลว (-50 ^{o}C ถึง 20 ^{o}C) โดยใช้สารตัวอย่างเป็นหัววัด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

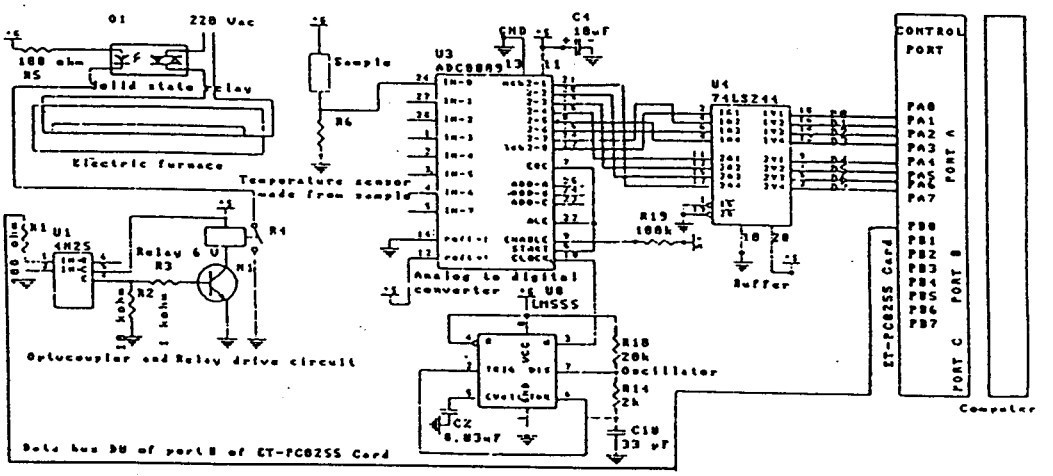
ก. การประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า

มีขั้นตอนการทำดังนี้

1) ออกแบบระบบการจ่ายไฟฟ้าวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าดังรูปที่ 3.13 ศึกษารายละเอียดของวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ตามรูปที่ 3.14 และประกอบวงจรลงบนโปรโตบอร์ด



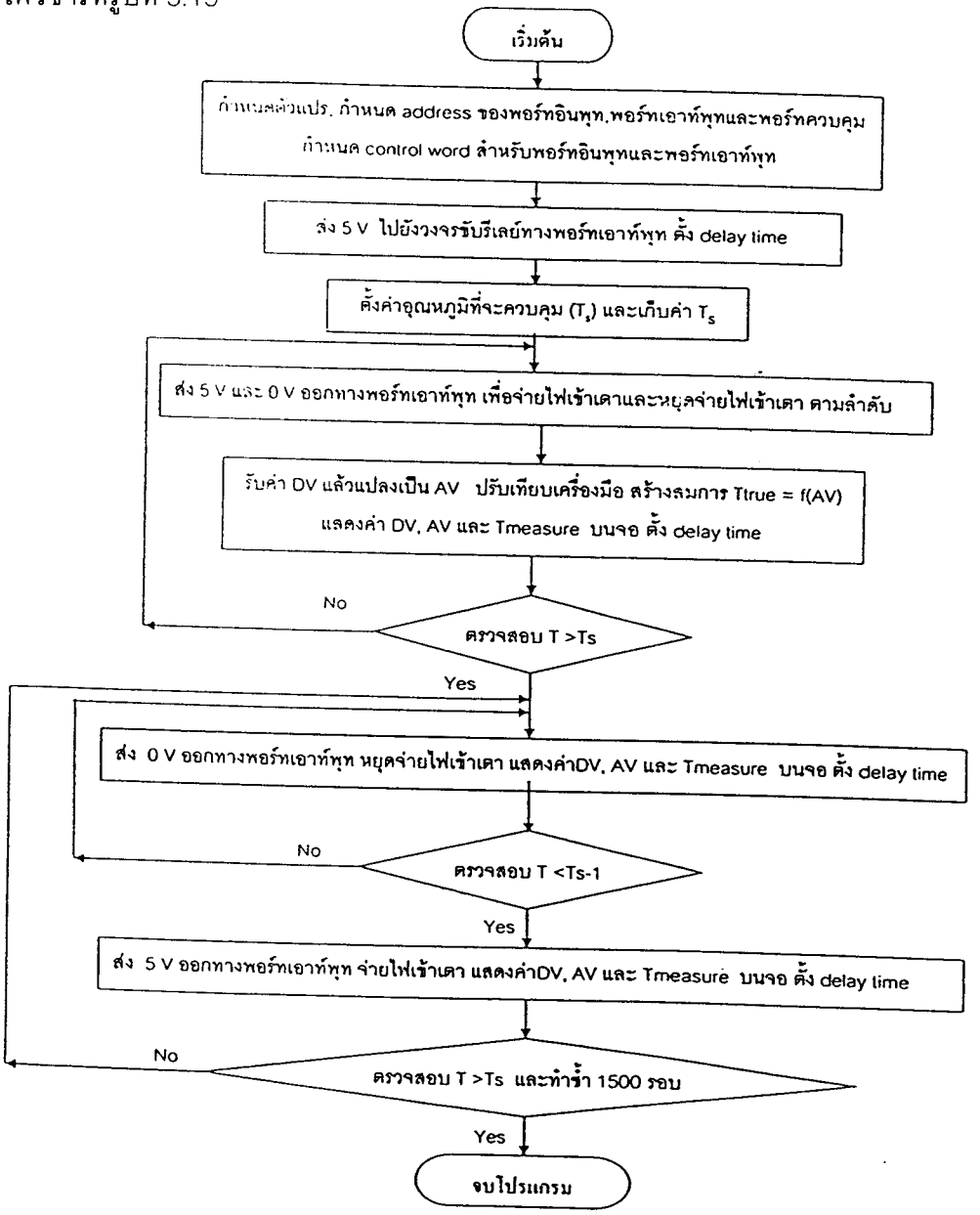
รูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างระบบจ่ายไฟฟ้า วัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 วงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์สำหรับให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.13 และ 3.14 จะเห็นว่าวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ประกอบด้วย 2 ส่วน กล่าวคือ วงจรส่วนแรกจะเหมือนกับวงจรที่ได้ประกอบเตรียมไว้ในหัวข้อ 3.3.5.1 คือให้สารตัวอย่างทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ สำหรับวงจรส่วนที่ 2 ที่ต่อเพิ่มเข้ามาเป็นวงจรขับรีเลย์เพื่อควบคุมโซลิดสเตตรีเลย์ให้จ่ายไฟฟ้าเข้าเตาไฟฟ้า

2)เขียนโปรแกรมสำหรับการจ่ายไฟฟ้าวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าดังรายละเอียดในภาคผนวก(โปรแกรมที่ 6) ซึ่งสามารถสรุปหลักการทำงานของโปรแกรมได้ดังโฟว์ชาร์ทรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 โฟว์ชาร์ทที่แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้า วัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า

3) สั่งรัน (RUN) โปรแกรมที่ 6 เพื่อให้คอมพิวเตอร์จ่ายไฟฟ้าวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า เริ่มแรกคอมพิวเตอร์จะส่งแรงดันไฟฟ้า 5 V ผ่านทางพอร์ท B ของ ET-PC8255 Card เข้าทางออพโตคอฟเปล่อร์ (optocoupler) 4N27 เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรขับรีเลย์ (relay drive circuit) ทำงาน วงจรขับรีเลย์จะควบคุมให้โซลิดสเตทรีเลย์ (solid state relay) ทำงาน เพื่อให้แรงดันไฟฟ้า 220 V จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดของเตาไฟฟ้า เสร็จแล้วคอมพิวเตอร์จะอ่านอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าโดยใช้สารตัวอย่างเป็นหัววัดอุณหภูมิ แรงดันตกคร่อมสารตัวอย่าง(AV) จะถูกส่งเข้าวงจรแปลงแรงดันอนาลอกเป็นแรงดันดิจิตอล (DV) ซึ่งใช้ไอซี ADC0809 นำแรงดันดิจิตอลจากไอซีตัวนี้ผ่านไอซี 74LS244 ส่งแรงดันดิจิตอลผ่านพอร์ท A ของ ET-PC8255 Card แล้วเข้าไปในหน่วยความจำแรมของคอมพิวเตอร์ คำสั่งที่ทำหน้าที่อ่านแรงดันดิจิตอลซึ่งเป็นข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิ คือ DV:=port[PA] ใช้คำสั่ง writeln แสดงอุณหภูมิบนจอ

4) ทำการปรับเทียบเครื่องมือเพื่อให้คอมพิวเตอร์อ่านอุณหภูมิทำได้ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 3.3.5.1 เริ่มจากหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (T) (Union 305) กับแรงดันอนาลอก (AV) ของสารทั้ง 3 สูตร พิมพ์สมการลงในโปรแกรมที่ 6 สั่งรันโปรแกรมอีกครั้ง แล้วอ่านอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) และอ่านอุณหภูมิจากคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สารตัวอย่างเป็นหัววัด (Tmeasure) บันทึกค่า Ttrue กับ Tmeasure ทุกๆ 5 ^{0}C ตั้งแต่ 25 ^{0}C จนถึง 200 ^{0}C แล้วเขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure พร้อมทั้งหาเปอร์เซนต์ความแตกต่างระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure

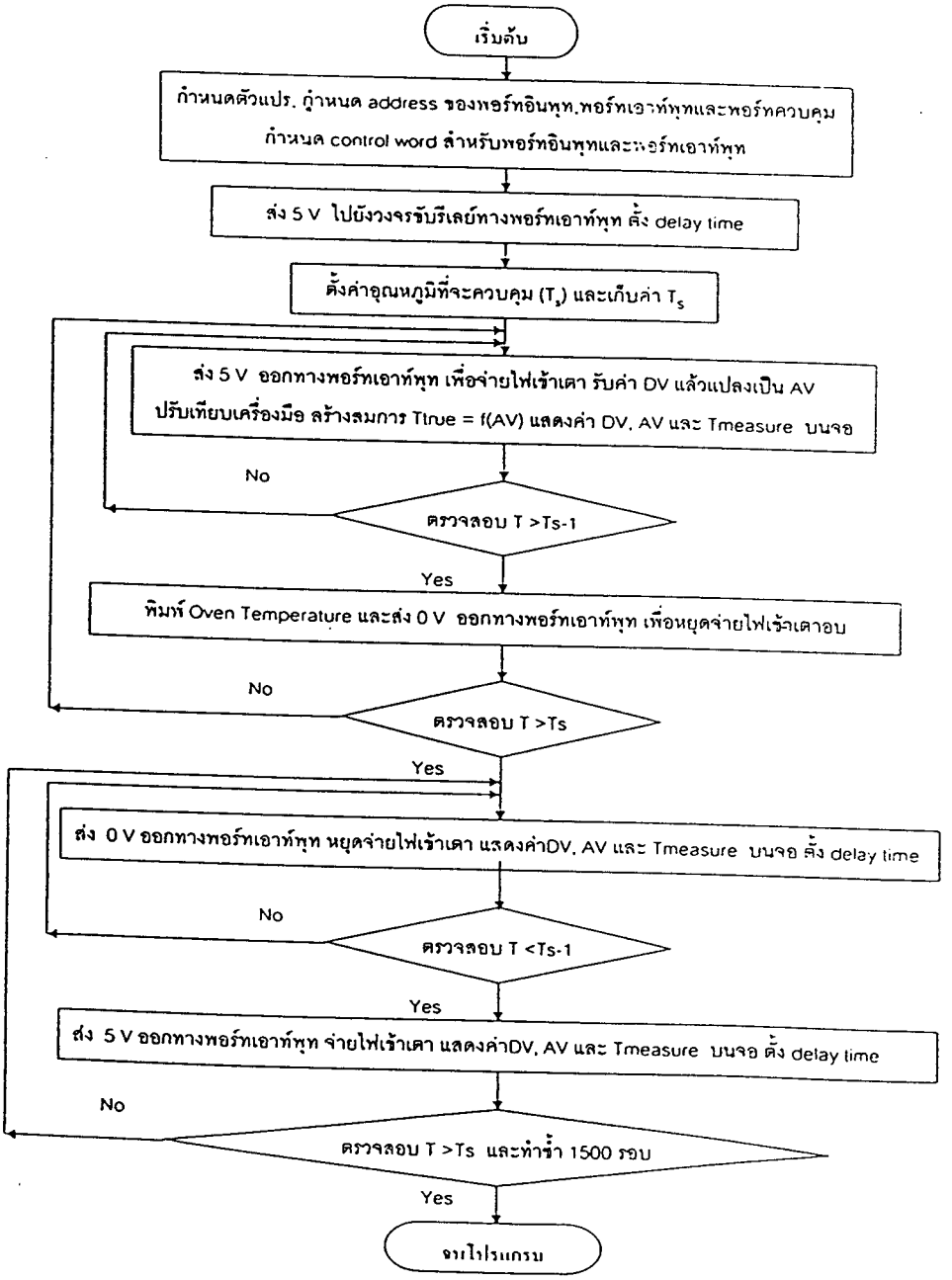
5) เสร็จแล้วนำระบบการจ่ายไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าไปใช้งาน เริ่มจากเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ เข้าโปรแกรม เปิดสวิทซ์ไฟเลี้ยงที่เข้าขดลวดของเตาไฟฟ้า สั่งรัน (RUN) โปรแกรมและตั้งอุณหภูมิที่จะทำการควบคุมตามต้องการแต่เงื่อนไขของเตาไฟฟ้าชนิดนี้จะให้ความร้อนได้ประมาณ 200 ^{0}C เมื่อเลือกอุณหภูมิที่จะควบคุมเสร็จก็ทำการ Enter ระบบก็จะทำงานทันที

ข. การประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้า

ขั้นตอนหลักๆในการแสดงตัวอย่างประยุกต์จะเหมือนกับการประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า มีดังนี้

1) ใช้ระบบการจ่ายไฟฟ้าวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 3.13 และ และใช้แผงวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 3.14

2) เขียนโปรแกรมสำหรับการจ่ายไฟฟ้าวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้า ดังรายละเอียดในภาคผนวก (โปรแกรมที่ 7) ซึ่งสามารถสรุปหลักการทำงานของโปรแกรมได้ดังโฟว์ชาร์ทดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 โฟว์ชาร์ทที่แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้า วัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า

4) สั่งรัน(RUN) โปรแกรมที่ 7 เพื่อวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาอบไฟฟ้า ซึ่งการทำงานของระบบจะเหมือนกับระบบการทำงานของการวัดและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า

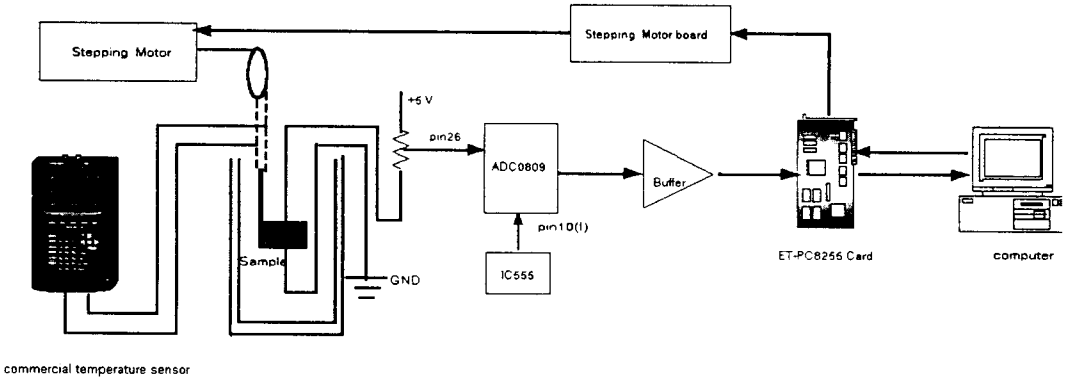
5) ทำการปรับเทียบเครื่องมือเพื่อให้คอมพิวเตอร์อ่านอุณหภูมิ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิคงที่ของเตาอบไฟฟ้านี้จุดประสงค์เพื่อเลือกอุณหภูมิที่อุณหภูมิสูงสุดเพียงค่าเดียวที่ความสามารถของสารในแต่ละสูตรที่จะทำหน้าที่เป็นหัววัดได้ วิธีการปรับเทียบเพื่อให้คอมพิวเตอร์อ่านอุณหภูมินั้นทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิไปที่อุณหภูมิสูงสุด โดยอ่านอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) และสังเกตแรงดันอนาลอกที่คอมพิวเตอร์อ่านได้ (AV) บนจอคอมพิวเตอร์ว่ามีค่าเป็นเท่าไรเช่น อุณหภูมิที่ได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ได้ 900 ^{0}C และอ่านแรงดันอนาลอกที่คอมพิวเตอร์อ่านได้ 4.824 V และนำมาคำนวณ T_{true}= b(AV) โดยที่ b เป็นค่าคงที่ ที่ได้จากการแก้สมการ ซึ่งหลักการเปรียบเทียบดังกล่าวนี้สามารถทำได้ทุกอุณหภูมิที่เราต้องการจะให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิคงที่ หลังจากนั้นพิมพ์สมการลงในโปรแกรม และทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากจอคอมพิวเตอร์ (Tmeasure) ดูว่าอ่านค่าได้ใกล้เคียงกันหรือไม่ และทำการทดลองซ้ำหลายๆครั้งเพื่อดูว่าอุณหภูมิที่เราเลือกให้ควบคุมอุณหูมิคงที่ แรงดันอนาลอกที่ใช้คอมพิวเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากหรือไม่ ถ้าไม่เปลี่ยนแปลงแสดงว่าสามารถใช้สมการที่ปรับเทียบได้

6) เสร็จแล้วนำระบบการจ่ายไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าไปใช้งาน

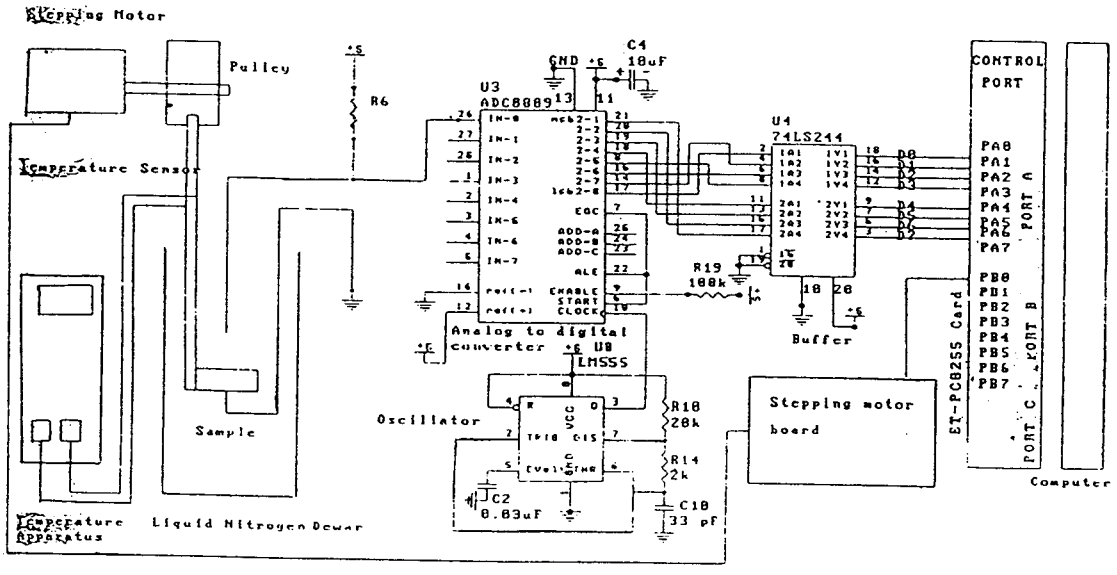
ค. การประยุกต์ใช้สารตัวอย่างให้ทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว

มีขั้นตอนการทำดังนี้

1) ออกแบบระบบการจ่ายไฟฟ้าวัดและควบคุมอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวแสดงดังรูปที่ 3.17 และประกอบวงจรตามรูปที่ 3.18 ลงบนโปรโตบอร์ด



รูปที่ 3.17 แสดงโครงสร้างระบบจ่ายไฟฟ้าวัดและควบคุมอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว



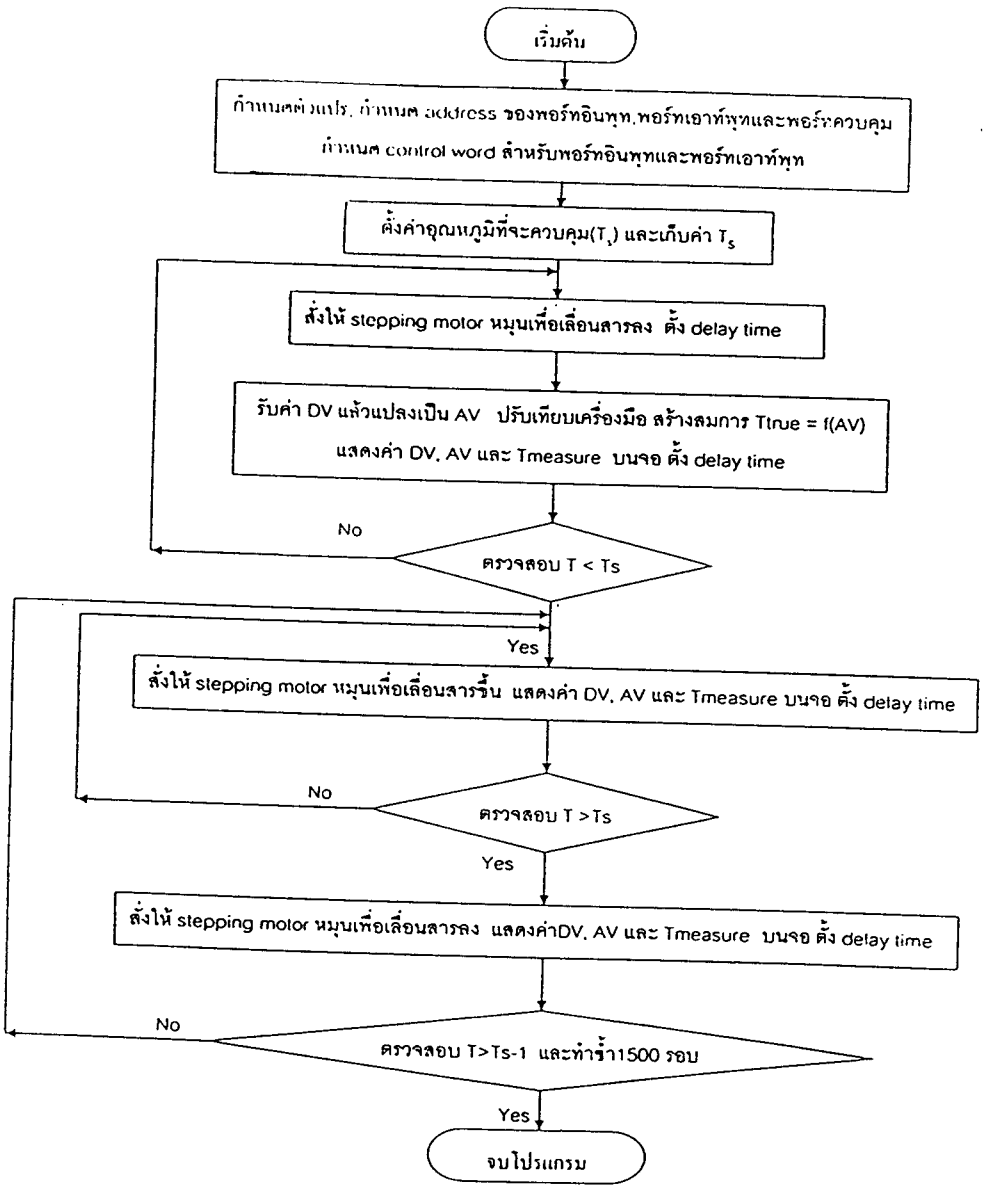
รูปที่ 3.18 วงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์สำหรับให้คอมพิวเตอร์ควบคุมอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว

จากรูปที่ 3.17 และ 3.18 จะเห็นว่าวงจรประกอบด้วย 2 ส่วน คือวงจรส่วนแรกจะเหมือนกับวงจรที่ได้ประกอบเตรียมไว้ในหัวข้อ 3.3.5.1 คือให้สารตัวอย่างทำหน้าที่เป็นหัววัด สำหรับวงจรส่วนที่ 2 เป็นการนำข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ออกทาง ET-PC8255 Card ไปยังสเตปปิ้งมอเตอร์บอร์ด(stepping motor board)เพื่อควบคุมให้สเตปปิ้งมอเตอร์ (stepping motor) หมุน โดยเขียนโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเตปปิ้งมอเตอร์

2) เขียนโปรแกรมสำหรับการจ่ายไฟฟ้าวัดและควบคุมอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวดังรายละเอียดในภาคผนวก(โปรแกรมที่ 8) ซึ่งสามารถสรุปหลักการทำงานของโปรแกรมได้ดังโฟว์ชาร์ทดังรูปที่ 3.19

3) สั่งรัน (RUN) โปรแกรมที่ 8 เพื่อให้คอมพิวเตอร์จ่ายไฟฟ้าวัดและควบคุมอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว โดยทำการปรับเทียบเครื่องมือเพื่อให้สารที่เตรียมได้ทำหน้าที่เป็นหัววัดอุณหภูมิ เริ่มจากหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร(AV)บนจอคอมพิวเตอร์ในขณะที่สเตปปิ้งมอเตอร์เลื่อนสารเข้าหาไนโตรเจนเหลวในช่วงอุณหภูมิ –50 ^{o}C จนถึง 20 ^{o}C แล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ttrue และ AV เพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ttrue และ AV พิมพ์สมการลงในโปรแกรมที่ 8 สั่งรันโปรแกรมอีกครั้ง แล้วอ่านอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิเชิงพาณิชย์ (Ttrue) และอ่านอุณหภูมิจากคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สารตัวอย่างเป็นหัววัด (Tmeasure) บันทึกค่า Ttrue กับ

Tmeasure ทุกๆ 5 ^{0}C ตั้งแต่ -50 ^{0}C จนถึง 20 ^{0}C แล้วเขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure พร้อมทั้งหาเปอร์เซนต์ความแตกต่างระหว่าง Ttrue กับ Tmeasure



รูปที่ 3.19 โฟว์ชาร์ทที่แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้า วัดและควบคุมอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว

4) เสร็จแล้วนำระบบการจ่ายไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิในย่านไนโตรเจนเหลวไปใช้งาน เริ่มจากเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ เข้าโปรแกรม สั่งรันโปรแกรมและตั้งอุณหภูมิที่จะทำการควบคุม ทำการ Enter ระบบจะทำงานทันที