

การพัฒนาระบบควบคุมหัววัดแบบเรียงแถวกึ่งอัตโนมัติ
DEVELOPMENT OF SEMI-AUTOMATIC COLLINEAR
PROBE CONTROLLING SYSTEM

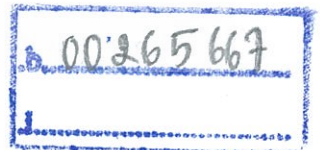


โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาระบบควบคุมหัววัดแบบเรียงแถวกึ่งอัตโนมัติ
DEVELOPMENT OF SEMI-AUTOMATIC COLLINEAR
PROBE CONTROLLING SYSTEM



นายบวร โพธิ์ทอง



TB00165

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในคณะศึกษาศาสตร์นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF SEMI-AUTOMATIC COLLINEAR PROBE CONTROLLING SYSTEM



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSIC, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ACADEMIC YEAR 2016
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การพัฒนาระบบควบคุมหัววัดแบบเรียงแถวกึ่งอัตโนมัติ
 Development of Semi-Automatic Collinear Probe
 Controlling System

ชื่อนักศึกษา นายบวร โพธิ์ทอง รหัสนักศึกษา 56051161



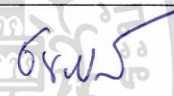

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
 ประจำปีการศึกษา 2559

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|---|--|
| ดร.กฤษกร ไส้เจริญรัตน์ ประธานกรรมการ |  |
| รศ.วิชาญ เตชะธีระ กรรมการ |  |
| อ.ธนภรณ์ สิววัฒนานนท์ กรรมการ |  |
| ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------|---|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การพัฒนาระบบควบคุมหัววัดแบบเรียงแถวกึ่งอัตโนมัติ |
| ชื่อนักศึกษา | นายบวร โพธิ์ทอง รหัสนักศึกษา 56051161 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ |
| ภาควิชา | ฟิสิกส์ |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ |
| มหาวิทยาลัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) |
| ปีการศึกษา | 2559 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ |

บทคัดย่อ

ระบบควบคุมหัววัดของเครื่องโฟร์พอยท์โพรบ (Four-Point Probe) แบบ 2 แกน (x และ y) ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการวัดตัวอย่างสารกึ่งตัวนำในรูปแบบแผ่น แต่ละแกนจะประกอบด้วย สายพาน และลีดสกรู ขับเคลื่อนด้วยสเต็ปเปอร์มอเตอร์ การทำงานจะถูกควบคุมโดยบอร์ด Arduino เชื่อมต่อผ่านพอร์ตคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Universal G-code Sender เป็นตัวแปลงโค้ด สามารถทำงานครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด 18×13.5 ตารางเซนติเมตร อีกทั้งยังสามารถปรับอุณหภูมิที่ฐานรองตามที่ต้องการได้ ในเบื้องต้นกำหนดให้ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C และ 60°C จากการทดสอบระบบพบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และแกน y สเต็ปละ 1 มิลลิเมตร ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 0.188 มิลลิเมตรในแกน x และ 0.113 มิลลิเมตรในแกน y ตามลำดับ และสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C และ 60°C ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 5°C

คำสำคัญ : โฟร์พอยท์โพรบ, การวัดตัวอย่างสารกึ่งตัวนำในรูปแบบแผ่น

| | | |
|---------------|---|---------------------|
| Title | Development of Semi-Automatic Collinear Probe | |
| Students | Mr.Borwon Phothong | Student ID 56051161 |
| Degree | Bachelor of Science in Applied Physics | |
| Department | Science | |
| University | 2016 | |
| Academic Year | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) | |
| Advisor | Dr.Pichanan Teesetsopon | |

Abstract

The controlling systems for two-axis four-point probe machine were created for semiconductor sheet measurement. x and y axis moving systems consist of belts and lead screws which were driven by stepper motors. Moving operation was controlled by Arduino board connected via computer port using Universal G-code Sender program as a code converter. The operating area is 18 cm x 13.5 cm. Moreover, the temperature of the four-point probe stage could be adjusted to the desired temperature. The stage temperature was pre-designed at 30°C and 60°C to test the controlling system. The results reveal that four-point probe head can be moved in x and y axis with 1 mm each step. The maximum error was 0.188 mm for x axis and 0.113 mm for y axis, respectively. The stage temperature can be controlled with the maximum error at 5°C.

Keywords: four-point probe, Arduino, collinear probe

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ได้รับคำแนะนำ และการชี้แนะต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย โดยความกรุณาจาก ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่น รวมไปถึง รศ.วิชาญ เตชิตธีระ รศ.วิชิต ศิริโชติ ดร.ภาณุพล ไชลนกระโทก ที่ช่วยอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับสถานที่ทำการวิจัย และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการในการทำงานวิจัยที่ดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้ความสนับสนุน และส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจพร้อมทั้งคำแนะนำที่ดีตลอดมา

ด้วยความกรุณาของท่านที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

นายบวร โพธิ์ทอง



สารบัญ

| | หน้า |
|--|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ช |
| คำย่อ/สัญลักษณ์ | ฌ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 1 |
| 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) | 3 |
| 2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงประเภทดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine-doped Tin Oxide, FTO) | 4 |
| 2.3 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดฟิล์ม | 5 |
| 2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการควบคุมอุปกรณ์ของระบบวัด | 9 |
| 2.5 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) | 11 |
| 2.6 รีเลย์ (Relay) | 17 |
| 2.7 G-code | 18 |
| 2.8 Heater PCB | 21 |
| 2.9 CNC (Computer Numerical Control) | 21 |
| 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 22 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 23 |
| 3.1 การออกแบบระบบควบคุมหัววัดสำหรับเครื่องวัดโพรงที่โพรบ | 23 |
| 3.1.1 ออกแบบส่วนควบคุมหัววัด | 25 |
| 3.1.2 วงจรที่ใช้สำหรับควบคุมระบบวัด | 29 |
| 3.1.3 ชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมระบบ (G-code) | 30 |
| 3.2 วิธีการวัดระยะห่างระหว่างจุดด้วยโปรแกรม Image J | 31 |
| 3.3 การออกแบบวงจรควบคุมอุณหภูมิ | 32 |
| 3.3.1 การออกแบบวงจร | 32 |
| 3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้กำเนิดความร้อน | 33 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 3.3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิ Xplorer GLX | 34 |
| 3.3.4 การออกแบบคำสั่งการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ | 35 |
| 3.4 การนำระบบที่ออกแบบมาทำการทดลอง | 36 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล | 37 |
| 4.1 ผลการทดลองโดยวิธีการเคลื่อนหัววัดไปในระยะที่กำหนด 1 mm | 37 |
| 4.1.1 ผลการทดลองในแนวแกน x | 38 |
| 4.1.2 ผลการทดลองในแนวแกน y | 45 |
| 4.2 ผลการทดลองการตั้งค่าอุณหภูมิของฐานรองตัวอย่าง | 50 |
| 4.2.1 ผลการทดลองการให้ความร้อนจากแหล่งความร้อน PCB Heatbed MK3 ALU | 50 |
| 4.3 การทดลองหาค่า correction factor | 55 |
| 4.3.1 ผลการทดลองหาแนวโน้มของค่า correction factors F_{31} | 56 |
| 4.3.2 ผลการทดลองหาแนวโน้มของค่า correction factors F_{32} | 57 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 58 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 58 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 58 |
| เอกสารอ้างอิง | 59 |
| ภาคผนวก | 61 |
| ภาคผนวก ก | 62 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 แสดงผลการดำเนินงาน | 2 |
| 4.1 ผลการทดลองในแนวแกน x (ระยะเคลื่อนที่ 1 mm) | 38 |
| 4.2 สรุปความคลาดเคลื่อนในแนวแกน x | 44 |
| 4.3 ผลการทดลองในแนวแกน y (ระยะเคลื่อนที่ 1 mm) | 45 |
| 4.4 สรุปความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y | 49 |
| 4.5 ผลการทดลองการให้ความร้อนจากการกำหนดโปรแกรม | 51 |
| 4.6 ผลการทดลองหาแนวโน้มของค่า Correction Factors F_{31} | 55 |
| 4.7 ผลการทดลองหาแนวโน้มของค่า Correction Factors F_{32} | 57 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท N | 3 |
| 2.2 ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท P | 4 |
| 2.3 Two-point probe technique | 5 |
| 2.4 Four-point probe technique | 5 |
| 2.5 ค่าความต่างศักย์ของ 1 หัววัด | 6 |
| 2.6 ค่าความต่างศักย์ของ 2 หัววัด | 6 |
| 2.7 ค่าความต่างศักย์สำหรับหัววัดแบบเรียงแถว | 7 |
| 2.8 การวัดแบบโพร์พอยท์โพรบ | 7 |
| 2.9 แผ่นฟิล์มบางที่มีฉนวนกัน | 7 |
| 2.10 วิธีการหาความต้านทานเชิงแผ่น | 8 |
| 2.11 การกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างสำหรับสารกึ่งตัวนำ | 9 |
| 2.12 โครงสร้างของ Microcontroller | 10 |
| 2.13 โครงสร้างส่วนเสริมของ Microcontroller | 11 |
| 2.14 โครงสร้างสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดวาริเอเบิลรีลักแตนซ์และสัญลักษณ์ | 12 |
| 2.15 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) | 13 |
| 2.16 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดไฮบริดขนาด 5 เฟส | 14 |
| 2.17 สัญลักษณ์ โครงสร้าง และวงจรขับที่ใช้กับมอเตอร์แบบไบโพลาร์ 2 เฟส | 14 |
| 2.18 สัญลักษณ์ โครงสร้าง และวงจรขับที่ใช้กับมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 2 เฟส | 15 |
| 2.19 สัญลักษณ์ โครงสร้างมอเตอร์ 2 เฟสที่พันลวดแบบไบโพลาร์และแยกปลายแต่ละขด | 15 |
| 2.20 การป้อนพัลส์เข้าที่เฟส | 16 |
| 2.21 การทำงานภายในของรีเลย์ | 17 |
| 2.22 Heater Plate | 21 |
| 3.1 แผนผังการออกแบบระบบควบคุมหัววัดสำหรับเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบ | 24 |
| 3.2 ฐานรองของแกน x | 25 |
| 3.3 ฐานรองของแกน x แผ่นให้ความร้อน และแกนอลูมิเนียม | 26 |
| 3.4 ฐานรองของแกน x ประกอบกับฐานของเครื่อง | 26 |
| 3.5 แท่นจับหัวเข็มของแกน y และแกนการเคลื่อนที่ | 27 |
| 3.6 ระบบในแนวแกน z และแกนการเคลื่อนที่ | 27 |
| 3.7 ภาพแสดงการประกอบการเคลื่อนที่รวม 3 แกน | 28 |
| 3.8 การประกอบการเคลื่อนที่รวม 3 แกน (เครื่องจริง) | 28 |
| 3.9 Circuit Diagram ของ CNC Shield | 29 |
| 3.10 Driver motor เบอร์ A4988 | 29 |

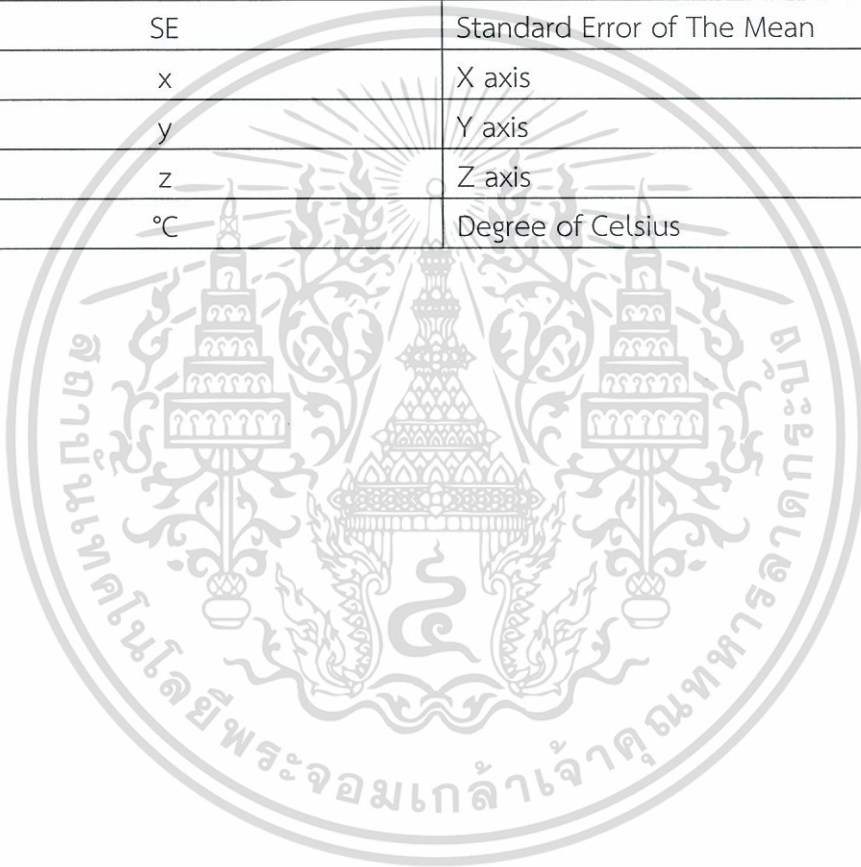
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.11 Driver Motor เบอร์ A4988และ CNC Shield Bored | 30 |
| 3.12 แสดงการแปลคำสั่งเป็น G-code | 30 |
| 3.13 ตัวอย่างการหาตำแหน่งของหัววัดโดยใช้โปรแกรม Image J | 31 |
| 3.14 ภาพการต่อใช้งานอุปกรณ์ขา Digital ที่ใช้ควบคุม | 32 |
| 3.15 วงจรที่ใช้ในระบบควบคุมความร้อนของฐานล่องชิ้นงาน | 33 |
| 3.16 แผ่นให้ความร้อนและลักษณะของขดลวดทองแดงที่อยู่ภายใน | 33 |
| 3.17 เครื่อง Xplorer GLX ที่ใช้เก็บค่าอุณหภูมิในการทดลอง | 34 |
| 3.18 ตัวอย่างคำสั่งควบคุมอุณหภูมิ | 35 |
| 3.19 การทดสอบวัดจริงที่ระยะ d ต่าง | 36 |
| 4.1 แสดงการวัดระยะการเคลื่อนที่ (1 mm) | 37 |
| 4.2 ปัญหาความไม่ตรงของสายพานเคลื่อนที่ในแนวแกน x | 44 |
| 4.3 ผลการทดลองการให้ความร้อนจากการกำหนดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ | 50 |
| 4.4 เปรียบเทียบการทดลองหาค่า Correction Factor ในสองกรณี | 55 |
| 4.5 แนวโน้มค่า Correction Factor เมื่อวัดใกล้ขอบของชิ้นงานเมื่อวางแนวเข็มหัวตั้งฉากและขนานกับขอบของชิ้นงาน | 55 |
| 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า F_{31} กับ d/s | 56 |
| 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า F_{32} กับ d/s | 57 |

คำย่อ/สัญลักษณ์

| คำย่อ/สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|-----------------|----------------------------|
| CNC | Computer Numerical Control |
| DC | Direct Current |
| F | Correction Factors |
| FTO | Fluorine Doped Tin Oxide |
| PCB | Print Circuit Board |
| SD | Standard Deviation |
| SE | Standard Error of The Mean |
| x | X axis |
| y | Y axis |
| z | Z axis |
| °C | Degree of Celsius |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาระบบหัววัดชนิดเรียงแถว (Collinear) แบบปรับตำแหน่งการวัดได้อัตโนมัติทำให้สะดวกต่อการวัดกระแสจกนำไฟฟ้าในขนาดต่าง ๆ พัฒนาระบบโดยใช้ Stepper Motor ร่วมกับระบบสายพานและต้นแบบจาก 3D Printer ทำให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการอย่างละเอียด และระยะที่แม่นยำยิ่งขึ้นจากเดิมที่ต้องใช้การปรับระยะด้วยผู้ทดลองเองซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากต้องคาดคะเนระยะด้วยสายตาจึงนำมาสู่การพัฒนาาระบบหัววัด

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่น (Sheet Resistivity : R_{sheet}) โดยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ (Four-Point Probe) หรือ “เข็ม 4 จุด” สามารถวัดบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าเป็นการวัดแบบไม่ทำลายและเป็นเทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องทำรอยสัมผัสโอห์มมิก จึงเป็นการง่ายต่อการวัดและลดความคลาดเคลื่อนในการใช้งานแต่ละครั้ง

โครงการนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาระบบวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบแบบหัววัดอัตโนมัติ เพื่อใช้ในห้องห้องปฏิบัติการในงบประมาณที่ประหยัดโดยประยุกต์ความรู้ทางเครื่องกล ไมโครคอนโทรลเลอร์ และการเขียนโปรแกรมภาษา C++ และขยายขอบเขตความสามารถในการวัดตัวอย่างภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบหัววัดให้สามารถควบคุมตำแหน่งการวัดได้ในระนาบ x และ y
2. เพื่อสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิของฐานวางชิ้นงาน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. พัฒนาการเคลื่อนที่ของหัววัดให้ครอบคลุมการทำงานภายในพื้นที่ 18×13.5 ตารางเซนติเมตร
2. ศึกษาและสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิของฐานวางชิ้นงาน
3. ทดสอบระบบที่ออกแบบขึ้นโดยการวัดค่า Correction Factors ของกระจกนำไฟฟ้าชนิด

FTO

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงผลการดำเนินงาน

| ปีการศึกษา | การดำเนินงาน | ระยะเวลาในการดำเนินงาน | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|------------------------|------|-------|-------|------|
| | | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. |
| 2559 | 1. ศึกษาข้อมูลระบบกลไก | | | | | |
| | 2. เขียนแบบตรวจสอบ | | | | | |
| | 3. ส่งงานสร้างระบบวัด | | | | | |
| | | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. |
| | 4. เขียนโปรแกรมสั่งการ | | | | | |
| | 5. ตรวจสอบโปรแกรมปรับปรุงแก้ไข | | | | | |
| 6. ทำซ้ำระบบสอบเทียบหัววัด | | | | | | |

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้ความเข้าใจในหลักการ Microcontroller และระบบคำสั่งต่างๆ
2. ระบบวงจรควบคุมกระแสเพื่อให้ความร้อนในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

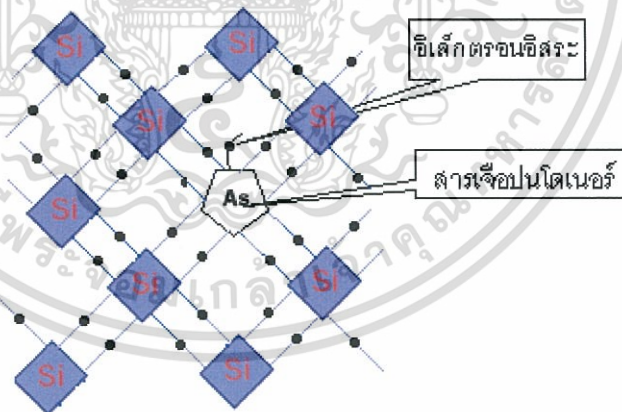
2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) คือ สารที่มีสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระอยู่น้อยจึงไม่สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากได้ เช่น ซิลิกอน เจอร์เมเนียม เทลลูเรียม เป็นต้น เพื่อให้จะได้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากจึงต้องมีการเจือปนอะตอมของธาตุอื่นลงไปเนื้อสารเนื้อเดียวเหล่านี้ หรือเอาอะตอมของธาตุบางชนิดมาทำปฏิกิริยากันให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นโดยวิธีดังกล่าวนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ หรือสารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบตามลำดับ ซึ่งจะเป็นสารที่ใช้ทำทรานซิสเตอร์และไดโอดชนิดต่าง ๆ

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ เป็นสารที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเจือปนลงไปเนื้อสารกึ่งตัวนำแท้เพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (N-Type) และสารกึ่งตัวนำประเภทพี (P-Type)

2.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (N-Type)

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของสารหนู ทำให้มีอิเล็กตรอนเกินขึ้นมา 1 ตัว เรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในก้อนผลึกนั้นจึงยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้เช่นเดียวกับตัวนำทั่วไป

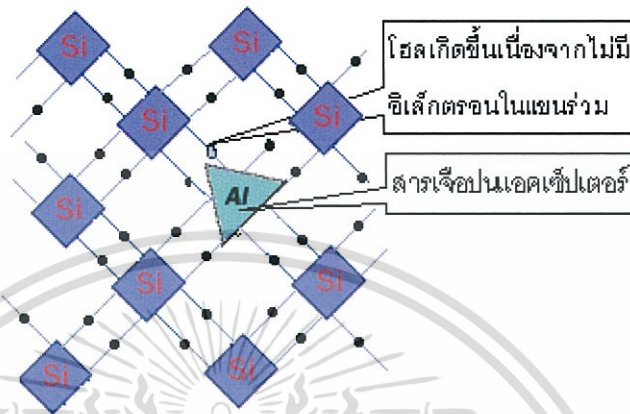


รูปที่ 2.1 ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท N [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สารกึ่งตัวนำประเภทพี (P-Type)

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของอะลูมิเนียม ทำให้เกิดที่ว่างซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) ขึ้นในแขนร่วมของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนข้างโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในโฮลทำให้ดูคล้ายกับโฮลเคลื่อนที่ได้จึงทำให้กระแสไหลได้ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าโฮลจะเคลื่อนที่จากศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังศักย์ไฟฟ้าต่ำ [1]



รูปที่ 2.2 ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท P [1]

2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงประเภทดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine-Doped Tin Oxide, FTO)

สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง (Wide Band Gap Semiconductor) และมักถูกเตรียมให้อยู่ในรูปฟิล์มบางที่มีลักษณะเป็นรูพรุนสูง (High Porous)

ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงเป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีและแสงสามารถทะลุผ่านได้มาก ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงที่สำคัญในปัจจุบัน ได้แก่ ดีบุกออกไซด์เจือด้วยอินเดียม (Indium Doped Tin Dioxide, ITO) ดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine-Doped Tin Oxide, FTO) เป็นต้น [2]

2.2.1 ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงประเภทดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine-Doped Tin Oxide, FTO)

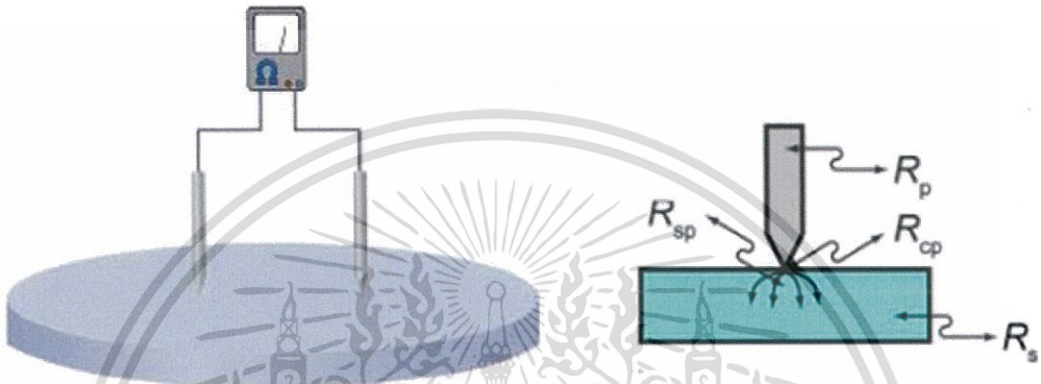
ฟิล์มบางออกไซด์ดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine-Doped Tin Oxide, FTO) เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์หลากหลายประเภท รวมถึงโปรแกรมประยุกต์ต่างๆ เช่น ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Opto-Electronics) ระบบสัมผัสหน้าจอ (Touch Screen Displays) เป็นต้น ฟิล์มบางออกไซด์ดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนเป็นวัสดุที่ค่อนข้างมีเสถียรภาพภายใต้สภาวะบรรยากาศ ปฏิบัติทางเคมี เนื่องจากมีความสามารถในการทนอุณหภูมิสูง ทนต่อการถูกกัดกร่อน และถูกกว่าดีบุกออกไซด์เจือด้วยอินเดียม (Indium Doped Tin Dioxide, ITO) [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดฟิล์ม

2.3.1 Two-Point Probe

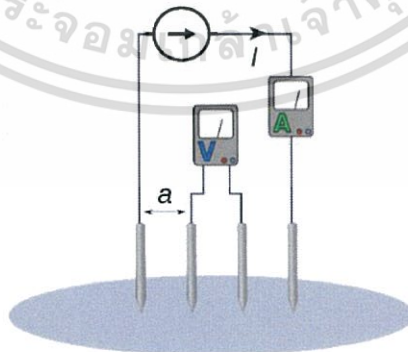
การวัดโดยเทคนิคทูพอยท์โพรบจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก เนื่องจากปฏิกิริยากระแส (I) และ วัตต์ความต่างศักย์ (V) ที่เข้าเดียวกัน จึงทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าความต้านทานที่ขาของหัววัด (R_p) และค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัส (R_{cp}) รวมอยู่ด้วยดังรูปที่ 2.3 โดยมีความต้านทานทุกค่าเป็นสองเท่าเพราะมี 2 หัววัด [9]



รูปที่ 2.3 Two-point probe technique [9]

2.3.2 Four-Point Probe

การวัดโดยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ จะเกิดความคลาดเคลื่อนได้น้อยกว่า เนื่องจากมีหัววัด 4 หัว สองขานอกปฏิกิริยากระแส และวัตต์ความต่างศักย์ที่ขาคู่ในดังรูปที่ 2.4 เมื่อหัววัดทำหน้าที่แยกกันจึงลดความคลาดเคลื่อนจากค่าความต้านทานที่เกิดจากหัววัดที่จ่ายกระแสลงได้ [9]



รูปที่ 2.4 Four-Point Probe Technique [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 สมการ Four-Point Probe

กำหนดให้ กระแสไหลออกมาจากปลายแฉกรัศมีหัววัดน้อยมาก

(1) การหาค่าความต่างศักย์ของ 1 หัววัด ดังรูปที่ 2.5

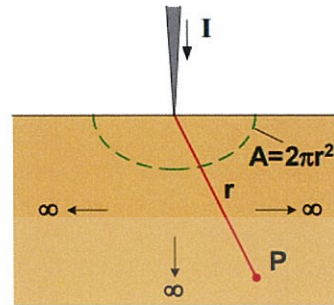
$$V = IR \quad (2.1)$$

$$J\rho = -\frac{dV}{dR} \quad (2.2)$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.3)$$

$$\int_0^V dV = -\frac{I\rho}{2\pi} \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} \quad (2.4)$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \quad (2.5)$$

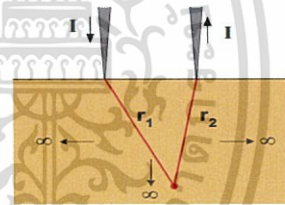


รูปที่ 2.5 ค่าความต่างศักย์ของ 1 หัววัด [6]

(2) การหาค่าความต่างศักย์ของ 2 หัววัด ดังรูปที่ 2.6

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r_1} - \frac{I\rho}{2\pi r_2} \quad (2.6)$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.6 ค่าความต่างศักย์ของ 2 หัววัด [6]

(3) การหาค่าความต่างศักย์สำหรับหัววัดแบบเรียงแถว ดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8

$$V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{2s} \right); V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2s} - \frac{1}{s} \right) \quad (2.8)$$

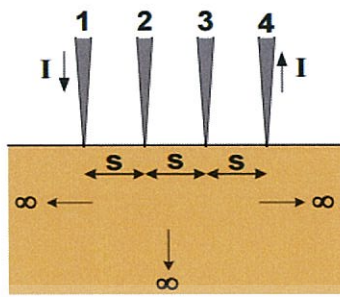
$$V = V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{2s} - \frac{1}{2s} + \frac{1}{s} \right) \quad (2.9)$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi s} \quad (2.10)$$

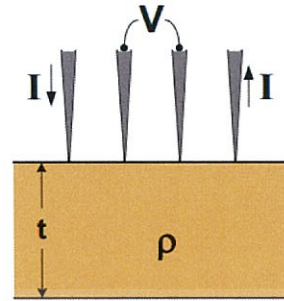
$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I}; \Omega/\text{cm} \quad (2.11)$$

J คือ ความหนาแน่นกระแส I คือ กระแสไฟฟ้า ρ คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) ค่าความต้านทานที่คำนวณได้ตามสมการ (2.11) จะถูกต้องเมื่อตัวอย่างที่นำมาวัดไม่มีขอบเขตสิ้นสุดและมีการนำไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจนถึงขอบล่างดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 ค่าความต่างศักย์ สำหรับหัววัดแบบเรียงแถว [6]



รูปที่ 2.8 การวัดแบบโพร์พอยท์โพรบ [6]

(5) สำหรับตัวอย่างที่ไม่สอดคล้องกับข้อ (4) และฐานของฟิล์มไม่นำไฟฟ้าจะต้องมีการแก้ไขการคำนวณให้ถูกต้องโดยอาศัย Correction Factor ดังนี้

$$\rho = 2\pi s F \left(\frac{V}{I} \right) ; \Omega / \text{cm} \quad (2.12)$$

$$F = F_1 F_2 F_3$$

$$F_1 = \frac{t/s}{2 \ln \left[\sin \sin h \left(\frac{t}{s} \right) \sin \sin h \left(\frac{t}{2s} \right) \right]} \quad (2.13)$$

ค่าแก้ไขความผิดพลาดจากความหนาของตัวอย่าง

- F_2 = ค่าแก้ไขความผิดพลาดจากขนาดของตัวอย่าง (ตัวอย่างต้องมีขนาด 40 เท่าของระยะห่างระหว่างหัววัด)

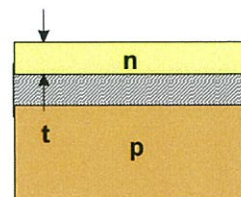
- F_3 = ค่าแก้ไขความผิดพลาดจากระยะห่างระหว่างหัววัดถึงขอบของตัวอย่าง

(6) Correction Factor สำหรับฟิล์มบาง
พิจารณาฟิล์มบางบนฉนวนรูปที่ 2.9 เช่น
ยางของฟิล์มของโลหะบนฉนวน

$$F_1 = \frac{t/s}{2 \ln \left[\sin \sin h \left(\frac{t}{s} \right) \sin \sin h \left(\frac{t}{2s} \right) \right]}$$

ปกติ $t \ll s$

ให้ $\sin hx \cong x$ สำหรับ $x \ll 1$



รูปที่ 2.9 แผ่นฟิล์มบางที่มีฉนวนกัน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore F_1 \approx \frac{t/s}{2 \ln(2)}$$

ดังนั้น สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางบนฉนวน สามารถหาได้จาก

$$\rho = 2\pi s \frac{t/s}{2 \ln 2} \frac{V}{I} = \frac{\pi}{\ln 2} t \frac{V}{I} = 4.532 t \frac{V}{I} \quad (2.14)$$

2.3.2.2 ความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance)

รูปที่ 2.10 ความต้านทานหาได้จาก

$$R = \frac{\rho I}{A} = \frac{\rho L}{t W} \quad (2.15)$$

มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohms : Ω)

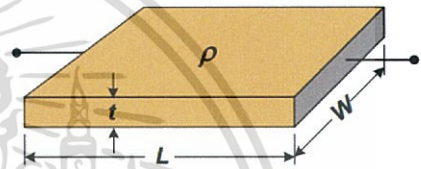
t คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

ρ คือ สภาพความต้านทาน

A คือ พื้นที่ตัดขวางของชั้นสารตัวอย่าง

L คือ ความยาวของชั้นสารตัวอย่าง

W คือ ความกว้างของชั้นสารตัวอย่าง



ดังนั้น ค่าความต้านทานเชิงแผ่น รูปที่ 2.10 วิธีการหาความต้านทานเชิงแผ่น [6]

$$R_{sheet} = \frac{\rho}{t} = \frac{R}{\left(\frac{L}{W}\right)} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (2.16)$$

มีหน่วยเป็น Ohms/square หรือ (Ω/\square) [6]

2.3.2.3 เทคนิคโพรบอยที่โพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว (Collinear Four-Point Probe Technique)

หลักการของเทคนิคสี่หัววัดแบบเรียงแถว แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปที่ยาคู่บนและโวลต์ตกคร่อมสามารถวัดได้ระหว่างคู่ขาในโดยใช้โวลต์มิเตอร์ที่ความต้านทานภายในสูงแสดงได้ ดังนี้

$$R_{sheet} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (2.17)$$

V คือ โวลต์ตกคร่อมที่ผิวสารกึ่งตัวนำ

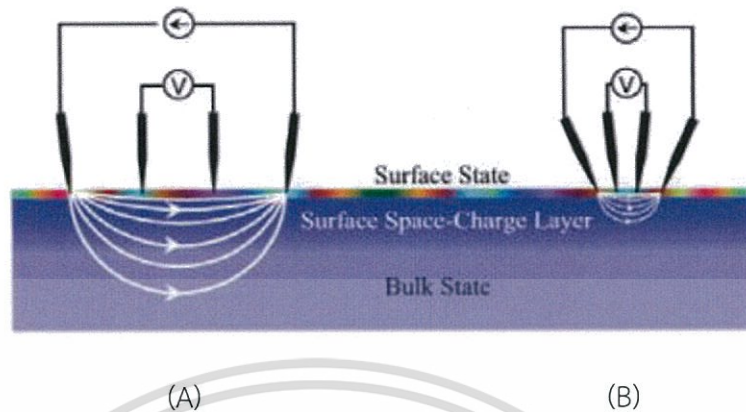
I คือ กระแสที่ไหลผ่าน

R_{sheet} คือ ความต้านทานของเทคนิคสี่หัววัด

สำหรับการวัดที่ผลึกสารกึ่งตัวนำหรือแผ่นฟิล์มบาง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ 3 ส่วน คือ ที่ผิว (Surface state) ช่องว่างที่มีผิวกับระนาบประจุ (Surface space-charge layer) และเนื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาร (Bulk State) ดังรูปที่ 2.11 จากการศึกษาพบว่าถ้าลดช่องว่างของโพรบจะสามารถลดการรบกวนของกระแสและเพิ่มความไวที่ผิวได้ [10]



รูปที่ 2.11 การกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างสำหรับสารกึ่งตัวนำ [10]

(A) วิธีการวัดรูปแบบสี่ห้วัดขนาดใหญ่

(B) วิธีการวัดรูปแบบสี่ห้วัดขนาดเล็ก

2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการควบคุมอุปกรณ์ของระบบวัด

2.4.1 ความหมาย

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู , หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน

2.4.2 โครงสร้างของ microcontroller

โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์รูปที่ 2.12 สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

2.4.2.1 หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU: Central Processing Unit) ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางควบคุมการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ทั้งหมด โดยนำข้อมูลจากอุปกรณ์รับข้อมูลมาทำงาน ประมวลผลข้อมูลตามคำสั่งของโปรแกรม และส่งผลลัพธ์ออกไปหน่วยแสดงผล

2.4.2.2 หน่วยความจำ (Memory) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory) เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือข้อมูลใดๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกระดานหัดในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำ (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM : Erasable Electrically Read-Only Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.3 ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port) มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ใช้ร่วมกันระหว่างพอร์ตอินพุต เพื่อรับสัญญาณ อาจจะใช้การกดสวิตช์ เพื่อนำไปประมวลผลและส่งไปพอร์ตเอาต์พุตเพื่อแสดงผลเช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

2.4.2.4 ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (BUS) คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ตเป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data Bus) บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัสควบคุม (Control Bus)

2.4.2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับกำหนดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นมีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย [11]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ Microcontroller [11]

2.4.3 โครงสร้างส่วนเสริมของ Microcontroller

โครงสร้างส่วนเสริมอื่นๆของ Microcontroller (รูปที่ 2.13) จะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตของแต่ละบริษัทที่จะผลิตคุณสมบัติพิเศษ ได้แก่

2.4.3.1 ADC (Analog to Digital) ส่วนภาครับสัญญาณอนาล็อกแปลงไปเป็นสัญญาณดิจิทัล

2.4.3.2 DAC (Digital to Analog) ส่วนภาคส่งสัญญาณดิจิทัลแปลงไปเป็นสัญญาณอนาล็อก

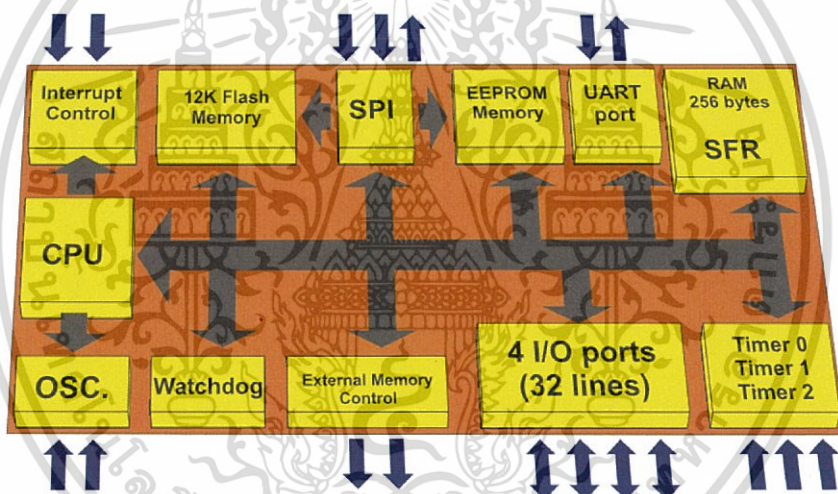
2.4.3.3 I2C (Inter Integrate Circuit Bus) เป็นการสื่อสารอนุกรม แบบซิงโครนัส (Synchronous) เพื่อใช้ติดต่อสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) กับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Philips Semiconductors โดยใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้น คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Serial Data (SDA) และสาย Serial Clock (SCL) ซึ่งสามารถ เชื่อมต่ออุปกรณ์ จำนวนหลายๆ ตัว เข้าด้วยกันได้ ทำให้ MCU ใช้พอร์ตเพียง 2 พอร์ตเท่านั้น

2.4.3.4 SPI (Serial Peripheral Interface) เป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เพื่อรับส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส (Synchronize) มีสัญญาณนาฬิกาเข้ามาเกี่ยวข้องระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) หรือจะเป็นอุปกรณ์ภายนอกที่มีการรับส่งข้อมูลแบบ SPI อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นมาสเตอร์ (Master) โดยปกติแล้วจะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ หรืออาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์ Master จะต้องควบคุมอุปกรณ์ Slave ได้ โดยปกติตัว Slave มักจะเป็นไอซี (IC) หน้าที่พิเศษต่างๆ เช่น ไอซีอุณหภูมิไอซีฐานเวลานาฬิกาจริง (Real-Time Clock) หรืออาจเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ในโหมด Slave ก็ได้เช่นกัน

2.4.3.5 PWM (Pulse Width Modulation) การสร้างสัญญาณพัลส์แบบสแควร์เวฟ ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่และ Duty Cycle ได้เพื่อนำไปควบคุมอุปกรณ์ต่างๆเช่น มอเตอร์

2.4.3.6 UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสสำหรับมาตรฐานการรับส่งข้อมูลแบบ RS-232โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้ในงานนี้คือ Arduino ตระกูล AVR [11]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างส่วนเสริมของ microcontroller [11]

2.5 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor)

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ เป็นมอเตอร์ที่มีการหมุนเป็นสเต็ป (Step) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์ (Stator) ในลักษณะเป็นพัลส์ (Pulse) ในกรณีที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดขดนั้นของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตลอดเวลา ก็จะทำให้เกิดการหมุนเพียงหนึ่งสเต็ปเท่านั้นซึ่งต่างจาก DC เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ก็จะหมุนตามจนกว่าจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ [4]

2.5.1 ข้อดีของสเต็ปเปอร์มอเตอร์เมื่อเทียบกับ DC มอเตอร์

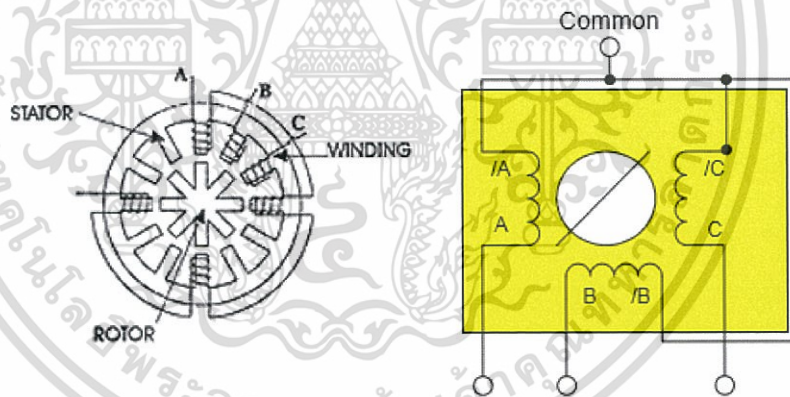
2.5.1.1 สามารถใช้ในงานควบคุมตำแหน่งในลักษณะวงจรถูกควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control) ได้โดยไม่ต้องการสัญญาณป้อนกลับ (Feedback Signal) แต่อาศัยการนับจำนวนของพัลส์ที่ส่งไปควบคุมการหมุนแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 ไม่มีส่วนของแปร่งถ่านที่จะสึกหรอและไม่เกิดการสปาร์คที่แปร่งถ่านซึ่งอาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน [4]

2.5.2 ชนิดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

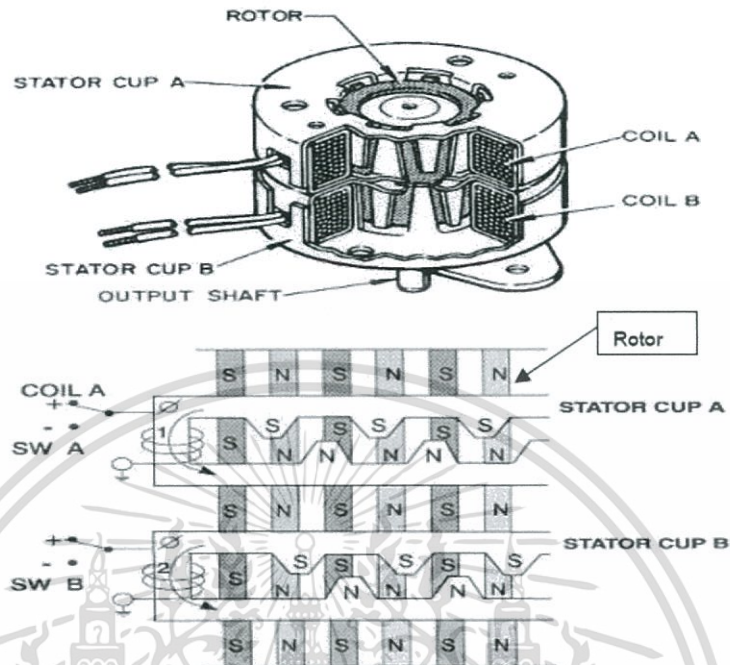
2.5.2.1 วารีเอเบิลรีลักแตนซ์ (Variable Reluctance : VR) แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 โครงสร้างภายในประกอบด้วย โรเตอร์ (Rotor) ทำด้วยเหล็กอ่อน รูปทรงกระบอกและ ทำเป็นลักษณะฟัน (Teeth) สเตเตอร์ (Stator) จะมีลวดพัน และจะเป็นลักษณะของฟันเช่นกัน เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะเกิดเป็นขั้วแม่เหล็กที่ฟันของสเตเตอร์และเหนี่ยวนำให้ฟันของโรเตอร์เกิดเป็นขั้วแม่เหล็กที่มีขั้วตรงกันข้ามกับสเตเตอร์ทำให้ดึงดูดกันเกิดการหมุนของโรเตอร์ขึ้น มอเตอร์ชนิดนี้โดยปกติจะมีขนาด 3 เฟส ในบางครั้งอาจพบถึง 4 เฟส มอเตอร์ชนิดนี้ถ้าไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดบนสเตเตอร์ ตัวโรเตอร์จะไม่เกิดแรงดึงดูดกับสเตเตอร์ มอเตอร์ชนิดนี้ไม่นิยมนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมแต่จะถูกนำไปใช้กับงานที่มีขนาดเล็ก เช่น Micro-Positioning Table เป็นต้น เพราะไม่มีส่วนที่เป็นแม่เหล็กถาวร ดังนั้นในขณะที่ไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จึงไม่เกิดแรงดึงดูด วิธีการขับ (Driving) หรือการกระตุ้นเฟส (Phase Excitation) จะทำดังนี้คือ ต่อปลายด้าน Common เข้ากับแหล่งจ่ายไฟขั้วบวก (+) แล้วทำการสวิตซ์ให้ปลายด้าน A , B และ C ต่อดึงกราวด์ (Ground) ตามลำดับทีละปลาย



รูปที่ 2.14 โครงสร้างสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดวารีเอเบิลรีลักแตนซ์และสัญลักษณ์ [4]

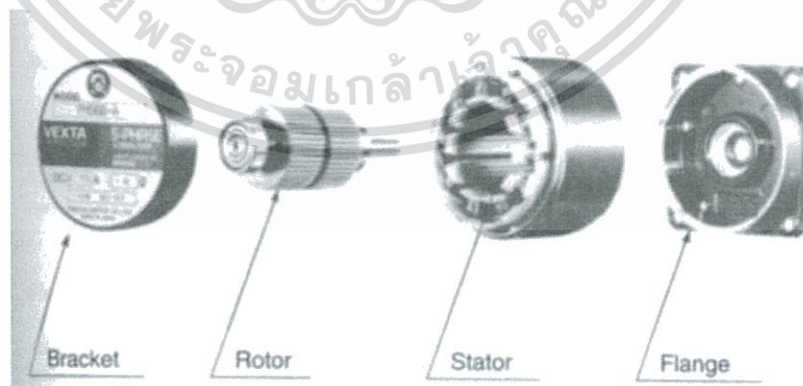
2.5.2.2 แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet : PM) แสดงได้ดังรูปที่ 2.15 โครงสร้างภายในประกอบด้วย โรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวรรูปทรงกระบอกเรียบ สเตเตอร์จะมีขดลวดพัน และก็จะทำเป็นฟัน เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะเกิดเป็น ขั้วแม่เหล็กที่ฟันของสเตเตอร์และจะดึงดูดกับขั้วของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ขึ้น มอเตอร์ชนิดนี้โดยจะมีตั้งแต่ขนาด 2 เฟสขึ้นไปไม่นิยมนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมแต่จะถูกนำไปใช้กับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์เช่นตัวขับเคลื่อนล้อที่ใช้หมุนเพื่อเลื่อนกระดาดของเครื่องพิมพ์ เป็นต้น เพราะความเร็วต่ำ แรงบิดต่ำ และนอกจากนี้ด้วยโครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้ทำให้มุมที่หมุนไปแต่ละสเต็ป (Step Angle) ไม่ละเอียด เช่น สเต็ปละ 3.6, 7.5, 15, 18 องศา เป็นต้น มอเตอร์ชนิดนี้ถึงไม่จ่ายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดบนสเตเตอร์ตัวโรเตอร์จะเกิดแรงดึงดูดกับสเตเตอร์ซึ่งเกิดจากอำนาจของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ทำให้หมุนได้ยาก จำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์สามารถ นับได้จากจำนวนขั้วแม่เหล็กที่จะเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่สเตเตอร์ชุดใดชุดหนึ่ง



รูปที่ 2.15 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)[4]

2.5.2.3 แบบผสม (Hybrid : HB) ดังรูปที่ 2.16 ใช้หลักการทำงานของทั้งสองแบบมาออกแบบโดยที่สเตเตอร์จะคล้ายกับแบบVR ส่วนโรเตอร์จะคล้ายแบบPM แต่จะทำเป็นฟัน มอเตอร์แบบนี้นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพราะแรงบิดสูงความละเอียดของสเต็ปในการหมุนสูงความเร็วสูงกว่าสองแบบที่กล่าวมาแล้ว มอเตอร์ชนิดนี้โดยปกติจะมีขนาด 2 เฟส ถึง 5 เฟส และมอเตอร์ชนิดนี้ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ เหนือกว่าเดิมไปอีกโดยให้ชื่อว่า “Enhanced Hybrid”

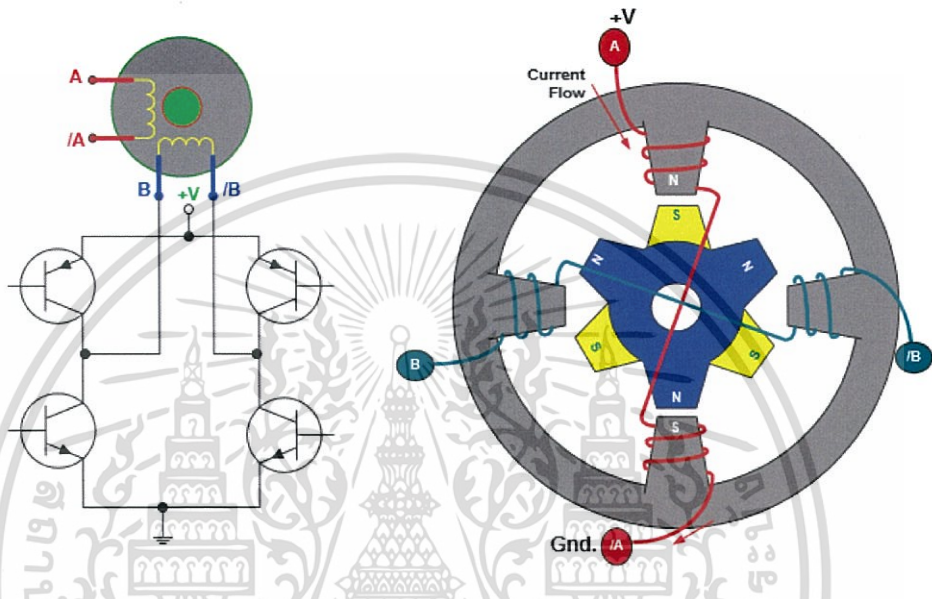


รูปที่ 2.16 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดไฮบริดขนาด 5 เฟส[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

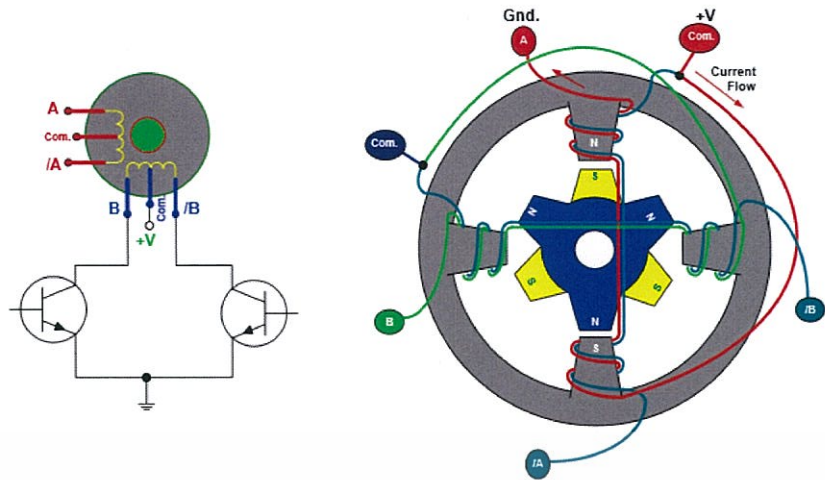
2.5.3 ชนิดของสแต็ปเปอร์มอเตอร์แบ่งตามลักษณะสายที่ใช้ต่อกับวงจรขับ

2.5.3.1 แบบไบโพลาร์ (Bipolar) รูปที่ 2.17 ขดลวดที่สเตเตอร์แต่ละชุดจะไม่มีจุดร่วม การต่อเข้ากับวงจรขับจะใช้ปลายทั้งสองด้านของขดลวดแต่ละชุดทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟจากปลายด้านหนึ่งไปยัง ปลายอีกด้านหนึ่งของขดลวดและการเปลี่ยนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ชุดเดียวกันนี้ก็ได้โดยสลับทิศทางการไหล ของกระแสไฟฟ้านั้นเอง ดังนั้น วงจรขับที่ใช้จึงจำเป็นต้องสามารถกลับทิศทางการไหลของกระแสได้ กรณีเป็น มอเตอร์ 2 เฟสจะมีสายที่ใช้ต่อเข้ากับวงจร 4 สาย



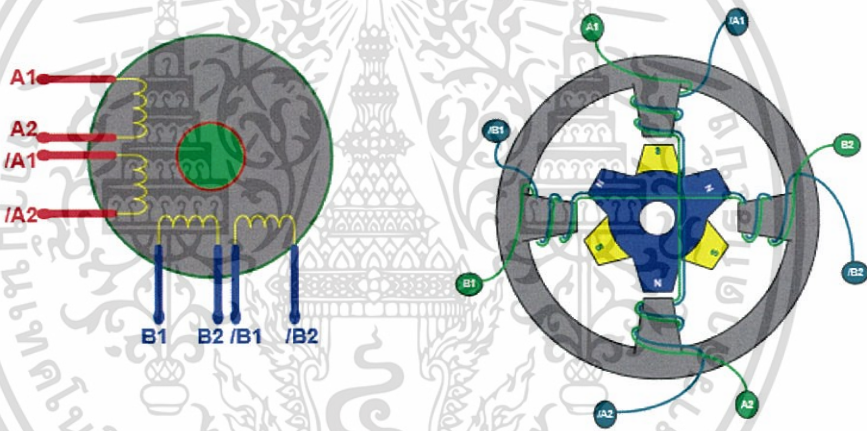
รูปที่ 2.17 สัญลักษณ์ โครงสร้าง และวงจรขับที่ใช้กับมอเตอร์แบบไบโพลาร์ 2 เฟส [4]

2.5.3.2 แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) รูปที่ 2.18 ขดลวดที่สเตเตอร์แต่ละชุดจะมีจุดร่วม การพันขดลวดจะพันในแบบ Bifilar การต่อเข้ากับวงจรขับจะใช้ปลายของขดลวดแต่ละด้านต่อเข้ากับวงจรขับและใช้จุดร่วมต่อเข้ากับขั้วบวกของ แหล่งจ่ายไฟการทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟให้ไหลจากจุดร่วมลงกราวด์มาครบ วงจรที่ปลายด้านหนึ่งของขดลวด การเปลี่ยนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ชุดเดียวกันนี้ก็ได้โดยเปลี่ยนการจ่ายกระแสไฟจากขดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่งของขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์ชุดเดียวกัน ดังนั้นวงจรขับจึงเป็นวงจรสวิตช์เพื่อให้จ่ายกระแสไฟที่ผ่านขดลวดครบวงจรเท่านั้น กรณีเป็นมอเตอร์ 2 เฟสจะมีสายที่ใช้ต่อเข้ากับวงจร 5 หรือ 6 สาย



รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์ โครงสร้าง และวงจรขับที่ใช้กับมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 2 เฟส [4]

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ 2 เฟส ดังรูปที่ 2.19 ที่มีการพันลวดแบบไบโพลาร์และแยกปลายแต่ละขดออกจากกันดังนั้นสามารถเลือกต่อเป็นแบบต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ 2.19 สัญลักษณ์ โครงสร้างมอเตอร์ 2 เฟสที่พันลวดแบบไบโพลาร์ และแยกปลายแต่ละขด [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 การป้อนพัลส์ให้กับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ในการควบคุมการหมุน

การที่จะให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์หมุนได้ในลักษณะของการหมุนทวนเข็มนาฬิกาหรือการหมุนตามเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 2.20 คือ การป้อนพัลส์เข้าที่เฟสโดยเรียงลำดับกันคือ

1-2-3-1-2-3-1-2-3

ซึ่งลักษณะของพัลส์ที่ป้อน คือ

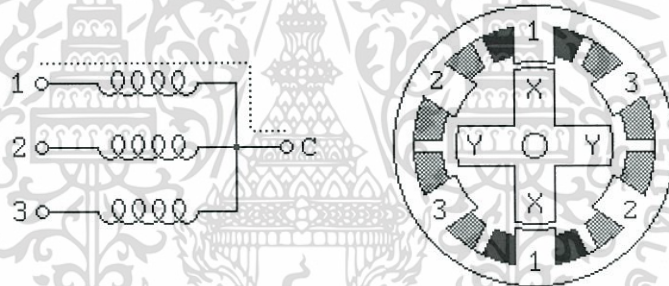
| | | |
|-------|--------------------|-------------|
| เฟส 1 | 100100100100100100 | Times-----> |
| เฟส 2 | 010010010010010010 | Times-----> |
| เฟส 3 | 001001001001001001 | Times-----> |

ถ้าต้องการให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์หมุนกลับทางกันลักษณะการป้อนก็จะเป็นการป้อนโดยเรียงลำดับเฟสย้อนกลับ

3-2-1-3-2-1-3-2-1

ซึ่งลักษณะของ pulse ที่ป้อนคือ

| | | |
|-------|-----------------|-------------|
| เฟส 3 | 100100100100100 | Times-----> |
| เฟส 2 | 010010010010010 | Times-----> |
| เฟส 1 | 001001001001001 | Times-----> |



รูปที่ 2.20 การป้อนพัลส์เข้าที่เฟส [5]

2.5.4.1 ขั้นตอนการป้อนพัลส์เข้าที่เฟส

(1) เมื่อเฟส 1 ถูกป้อนพัลส์เข้ามาทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ Stator ที่ขดลวด 1 และจะผลักรับโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปคนละทาง

(2) เมื่อเฟส 2 ถูกป้อน ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ขด 2 และก็จะผลักรับโรเตอร์ให้เกิดการเคลื่อนที่ไปอีก

(3) เมื่อเฟส 3 ถูกป้อน ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ขด 3 และจะผลักรับโรเตอร์ให้เกิดการเคลื่อนที่ไปอีกดังรูปที่ 2.21 การเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นและโรเตอร์จะหมุนไปในทิศทางที่ตรงข้ามกัน [5]

2.6 รีเลย์ (Relay)

เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็กเพื่อใช้ในการดึงดูดหน้าสัมผัสของคอนแทกให้เปลี่ยนสถานะโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อทำการปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสคล้ายกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเราสามารถนำรีเลย์ไปประยุกต์ใช้ ในการควบคุมวงจรต่าง ๆ ในงานช่างอิเล็กทรอนิกส์มากมาย [13]

2.6.1 ส่วนประกอบของรีเลย์

รีเลย์ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

2.6.1.1 ขดลวด (Coil) เหนียวนำกระแสต่ำ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้แก่โลหะไปกระตุ้นให้หน้าสัมผัสต่อกันดังรูปที่ 2.21 ทำงานโดยการรับแรงดันจากภายนอกต่อคร่อมที่ขดลวดเหนียวนำนี้ เมื่อขดลวดได้รับแรงดัน(ค่าแรงดันที่รีเลย์ต้องการขึ้นกับชนิดและรุ่นตามที่คุณผลิตกำหนด) จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้แกนโลหะด้านในไปกระตุ้นให้แผ่นหน้าสัมผัสต่อกัน

2.6.1.2 หน้าสัมผัส (Contact) ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์จ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์ที่ต้องการ



รูปที่ 2.21 การทำงานภายในของรีเลย์ [13]

2.6.2 จุดต่อใช้งานมาตรฐาน

2.6.2.1 จุดต่อ NC ย่อมาจาก Normal Close หมายความว่าปกติปิด หรือ หากยังไม่จ่ายไฟให้ขดลวดเหนียวนำหน้าสัมผัสจะติดกัน โดยทั่วไปเรามักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการให้ทำงานตลอดเวลาเช่น

2.6.2.2 จุดต่อ NO ย่อมาจาก Normal Open หมายความว่าปกติเปิด หรือหากยังไม่จ่ายไฟให้ขดลวดเหนียวนำหน้าสัมผัสจะไม่ติดกัน โดยทั่วไปเรามักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการควบคุมการเปิดปิดเช่น โคมไฟสนามหรือหน้าบ้าน

2.6.2.3 จุดต่อ C ย่อมาจาก Common คือจุดร่วมที่ต่อมาจากแหล่งจ่ายไฟ

2.6.3 ประเภทของรีเลย์

2.6.3.1 รีเลย์กำลัง (Power Relay) หรือมักเรียกกันว่าคอนแทกเตอร์ (Contactor or Magnetic contactor) ใช้ในการควบคุมไฟฟ้ากำลัง มีขนาดใหญ่กว่ารีเลย์ธรรมดา

2.6.3.2 รีเลย์ควบคุม (Control Relay) มีขนาดเล็กกำลังไฟฟ้าต่ำ ใช้ในวงจรควบคุมทั่วไปที่มีกำลังไฟฟ้าไม่มากนัก หรือเพื่อการควบคุมรีเลย์หรือคอนแทกเตอร์ขนาดใหญ่ รีเลย์ควบคุมเรียกง่าย ๆ ว่า "รีเลย์" [13]

2.7 G-code

2.7.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของโปรแกรม

NC Program คือกำหนดความเร็ว ทิศทางการทำงานงาน อัตราป้อน วิธีการกัดงาน ลำดับการทำงาน โดยแปลความเป็นรหัสที่เรียกว่า NC Code ส่วนมากมักใช้มาตรฐานคือ G-code ที่กำหนดโดย ISO แต่ส่วนใหญ่แล้วมาตรฐาน G-code มีหลากหลายให้เหมาะสมกับการใช้งานมีลักษณะเหมือนกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั่วไป โดยประกอบด้วยบล็อก (Block) และในแต่ละบล็อก (Block) ประกอบด้วยเวิร์ด (Word) ต่างๆ [12]

ตัวอย่าง NC โปรแกรม

| | | | |
|----|-----|--------|--------|
| N1 | G00 | T0101 | S1500 |
| N2 | | X50.0 | Z2.0 |
| N3 | G01 | Z-25.0 | F0.200 |

2.7.2 คำสั่งที่ใช้ใน NC Program

สามารถแยกได้ 3 ประเภท คือ

2.7.2.1 โค้ดคำสั่งการควบคุมโปรแกรม (Program Control Instructions) ใช้กำหนดลำดับขั้นตอนการทำงาน

2.7.2.2 โค้ดคำสั่งทางเรขาคณิต (Geometric Instructions) เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่รูปทรงเลขาคณิตตามรูปทรงของชิ้นงานได้แก่ โค้ดจี หรือ G-Code ต่าง ๆ

2.7.2.3 โค้ดคำสั่งทางเทคนิค (Technical Instructions) ใช้ในการควบคุมเทคนิคการทำงานของเครื่องจักร

2.7.3 ชุดคำสั่ง G-code

เป็นคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ ดังนี้

G00 การเดินเป็นแนวเส้นตรง เป็นการเคลื่อนที่แบบเร็ว ใช้ในกรณีต้องการให้เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งอย่างรวดเร็ว ในลักษณะที่ไม่มีการตัดชิ้นงานความเร็วในการเคลื่อนที่ที่สามารถควบคุมได้โดย Rapid

G01 เป็นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง ส่วนมากใช้ในการลักษณะการกินชิ้นงาน สามารถควบคุมความเร็วโดย Speed และ Feed

G02 การเคลื่อนที่เป็นแนวโค้งตามรัศมี มีทิศทางตามเข็มนาฬิกา

G03 การเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นโค้งตามรัศมี มีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

G04 เป็นคำสั่งให้หยุดทำงานชั่วขณะในลักษณะของการหน่วง (Dwell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- G09 หยุดการทำงาน
- G10 การ Setting Data ของการเดินทางด้วยความเร็ว
- G11 การ Setting Data ของการเดินทางเป็นเส้นตรง
- G12 การเดินเส้นโค้งแบบตามเข็มนาฬิกา
- G13 การเดินเส้นโค้งแบบทวนเข็มนาฬิกา
- G15 การยกเลิกคำสั่งเดินเส้นโค้ง
- G16 การเดินโดยใช้คำสั่งการเดินโค้ง
- G17 การเลือกพื้นผิวบนระนาบ XY
- G18 การเลือกพื้นผิวบนระนาบ ZX
- G19 การเลือกพื้นผิวบนระนาบ ZY
- G20 เป็นการกำหนดหน่วยวัดระบบนิ้ว (ค่าที่ป้อนเป็นนิ้ว)
- G21 เป็นการกำหนดหน่วยวัดเป็นระบบเมตริก (ค่าที่ป้อนเป็นมิลลิเมตร)
- G23 การยกเลิกหรือปิดตรวจสอบระยะเพื่อของชิ้นงาน
- G25 ปิดการตรวจสอบวัดเพลลาของหัวกัด
- G26 เปิดการตรวจสอบวัดเพลลาของหัวกัด
- G27 การตรวจสอบการกลับสู่จุดที่ใช้อ้างอิง
- G28 การกลับสู่จุดที่ใช้ในการอ้างอิงของเครื่อง
- G29 การกลับจุดที่ใช้อ้างอิงของเครื่อง
- G30 การกลับจุดอ้างอิงของเครื่องจากการกำหนดข้อมูลในเครื่อง
- G31 การข้ามคำสั่งเกี่ยวกับจุดอ้างอิง
- G33 การเดินกั๊ดทำเกลียว
- G40 การยกเลิกค่าชดเชยรัศมีของ Tool
- G41 การกำหนดค่าชดเชยรัศมีของ Tool (offset) ไปทางด้านซ้าย
- G42 การกำหนดค่าชดเชยรัศมีของ Tool (offset) ไปทางด้านขวา
- G43 การกำหนดความยาวของมิดกั๊ดที่มีค่าบวก
- G44 การกำหนดความยาวของมิดกั๊ดที่มีค่าลบ
- G49 ยกเลิกค่าความยาวของมิดกั๊ด
- G50 ยกเลิกมาตราส่วน
- G51 กำหนดมาตราส่วน
- G54 กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 1
- G55 กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 2
- G56 กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 3
- G57 กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 4
- G58 กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 5
- G59 กำหนดตำแหน่งงานในข้อมูลที่ 6
- G63 เลือกโหมดของการทำเกลียวแบบ Tap
- G64 เลือกขนาดของกัทตัดเฉือนด้วยตัวการกั๊ด
- G65 การเรียก Marco โปรแกรมมาใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- G67 ยกเลิก Macro โปรแกรม
- G68 การลอกแบบงานโดยหมุนรอบจุดอ้างอิง
- G69 ยกเลิกการลอกแบบงาน
- G73 การเจาะแบบหยุดให้คายเศษ
- G74 การทำเกลียวด้วยการ Tap
- G76 การคว้านรูปแบบละเอียด
- G80 ยกเลิกการเจาะ การคว้านในแบบต่างๆ
- G81 การเจาะแบบไม่ยก (Spot Drilling)
- G82 การเจาะแบบไม่ยก (Counter Boring)
- G83 การเจาะลึกแบบยกคายเศษ
- G84 การทำเกลียวในแบบ Tapping
- G85-89 การคว้านรูปแบบคว้านหยาบ
- G90 มีดเคลื่อนบนจุดใดๆ วัดระยะจากจุดศูนย์งานทุกครั้ง (Absolute System)
- G91 มีดเคลื่อนบนจุดใดๆ วัดระยะจากจุดเริ่มงานทุกครั้ง (Increment System)
- G92 การเปลี่ยนจุดศูนย์ของงานที่ใช้อ้างอิง
- G93 อัตราการป้อนตรงข้ามกับหน่วยของเวลา
- G94 อัตราการป้อน หน่วยเป็น ระยะทาง/เวลา
- G95 อัตราการป้อน หน่วยเป็น ระยะทาง/รอบ
- G96 ความเร็วของเพลา มีดกัด เมตร/นาที
- G97 ความเร็วของเพลา มีดกัด รอบ/นาที
- G98 การเปลี่ยนตำแหน่งเท่ากับค่า G43
- G99 การยกเปลี่ยนตำแหน่งเท่ากับค่า R

ตัวอย่างการใช้งาน G-code

- G00 X0Y0Z15 = เคลื่อนที่เร็วไปที่ตำแหน่ง X = 0, Y= 0 และ Z =15
- G00 X20Y20Z10 = เคลื่อนที่เร็วไปที่ตำแหน่ง X = 20, Y= 20 และ Z =10 [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 Heater PCB (Print Circuit Board)

Heater PCB (Print Circuit Board) รูปที่ 2.22 เป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน โดยหลักการคือ เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตัวนำที่มีความต้านทานสูง ลวดตัวนำนั้นจะนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ได้โดยอาศัยการนำความร้อน (Heat conduction) ซึ่งก็คือปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อนในโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ (คล้ายการนำไฟฟ้าในของเหลวและของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำเป็นผลมาจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียงในก๊าซ) การนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะเทือนระหว่างโมเลกุลหรือกล่าวคือการนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่าน โดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัส [7]



รูปที่ 2.22 Heater plate [7]

2.9 CNC (Computer Numerical Control)

เป็นเครื่องจักรกลอัตโนมัติที่ทำงานโดยการโปรแกรมเข้าไปด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยจะให้ทำงานตามแบบที่เราโปรแกรมเข้าไป มีหลายภาษาที่ใช้กับเครื่อง โดยมากจะเป็นงานโลหะที่มีความซับซ้อนและต้องการความแม่นยำสูง โดยที่การหล่อไม่สามารถทำได้หรือสามารถทำได้ก็ตามเครื่องจักรกลพื้นฐานเช่น เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจียรนัย และเครื่องตัดโลหะแผ่นเป็นเครื่องจักรกลที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร เครื่องยนต์ และแม่พิมพ์ ตลอดจนหน่วยงานสร้าง ซ่อมงานโลหะโดยทั่วไป และอาจกล่าวได้ว่าความก้าวหน้าของเครื่องจักรกลประสิทธิภาพสูงหลายประเภทในยุคปัจจุบันล้วนแต่มีรากฐานมาจากเครื่องจักรพื้นฐานเหล่านี้ทั้งสิ้น แสดงการทำงานของเครื่องกลึงที่ใช้แรงงานคนในการหมุนเกลียวข้อับเพื่อป้อนมีดกลึงเข้าหาชิ้นงาน ผู้ปฏิบัติงานกับเครื่องกลึงหรือเครื่องจักรกลพื้นฐานอื่นๆ จะต้องมีทักษะและความชำนาญในการหมุนเกลียวข้อับที่ใช้ในการป้อนอุปกรณ์ตัดเข้าหาชิ้นงานเป็นอย่างดี แต่ถึงกระนั้นพบได้บ่อยว่าผู้ปฏิบัติงานต้องใช้เวลามากในการผลิตชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง เนื่องจากข้อจำกัดด้านการมองเห็นของผู้ปฏิบัติงาน และความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดที่ต้องทำบ่อยครั้ง ในบางครั้งยังพบว่าชิ้นงานที่ได้มีความคลาดเคลื่อนทางขนาดเกินกว่าที่จะยอมรับได้ระบบ CNC (Computer Numerical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Control) เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อเปลี่ยนแปลงและควบคุมสภาพการทำงานของเครื่องจักรกลพื้นฐานดังกล่าวจากเดิมซึ่งใช้แรงงานคนในการทำงานร่วมกับเครื่องจักร ให้เครื่องจักรเหล่านี้สามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติด้วยตัวเองนอกจากนี้ ระบบ CNC ยังช่วยเพิ่มความสามารถให้เครื่องจักรพื้นฐานเหล่านี้สามารถทำงานลักษณะซับซ้อนได้ด้วย ความรวดเร็วและแม่นยำในระดับที่พ้นความสามารถในการรับรู้ของมนุษย์โดยทั่วไปหลายสิบเท่าตัว สำหรับการประยุกต์ใช้ระบบ CNC ในเครื่องจักรพื้นฐานดังกล่าว ระบบ CNC จะประกอบไปด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งซึ่งถูกนำไปใช้ในการหมุนเกลียวขับเคลื่อนมือคน และระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการควบคุมมุมและความเร็วที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหล่านั้นหมุนเกลียวขับเคลื่อน โดยระบบคอมพิวเตอร์ดังกล่าวสามารถควบคุมมุมของมอเตอร์ได้ด้วยความละเอียดถึง 0.1 องศา หรือดีกว่า สามารถให้ความละเอียดในการป้อนอุปกรณ์ตัดเข้าสู่ชิ้นงานสูงถึง 0.02 มิลลิเมตร หรือดีกว่าในปัจจุบัน มีการใช้ระบบ CNC สำหรับเครื่องจักรพื้นฐานในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เครื่องยนต์ แม่พิมพ์ และในหน่วยงานสร้าง ซ่อมอย่างแพร่หลาย หากประมาณคร่าวๆ มูลค่าเบื้องต้นของระบบ CNC ในอุตสาหกรรมเหล่านี้อยู่ในระดับหลายพันล้านบาท ในทางปฏิบัติระบบ CNC ดังกล่าวและผู้เชี่ยวชาญในระบบดังกล่าวถูกนำเข้าจากประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา เยอรมัน และ ญี่ปุ่น เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจาก CNC ดังกล่าวเป็นเทคโนโลยีระดับสูง [16]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

“เทคโนโลยี 3D Printer”

เทคโนโลยี 3D Printer ชนิด FDM (Fuse Deposition Material) เป็นที่รู้จักมากที่สุด เพราะเป็น Open Source ที่สามารถนำไปสร้างเครื่องโดยไม่ติดลิขสิทธิ์ โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ FDM ที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด หลักการทำงานของเทคโนโลยีนี้ คือ การฉีดเส้นวัสดุที่มีความหนืดออกมาจากหัวฉีดที่มีขนาดเล็ก ทับซ้อนกันไปเรื่อยๆ จนเกิดเป็นรูปวัตถุ 3 มิติขึ้นมา วัสดุที่นิยมใช้กับเทคโนโลยีนี้คือ พลาสติกจำพวก Thermal Plastic เช่น ABS Nylon PLA PET เป็นต้น ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดจะให้คุณสมบัติของชิ้นงานที่พิมพ์แตกต่างกันซึ่งหลักการก็คือ จะมีหัวฉีดที่มีรูขนาดเล็ก ซึ่งตรงหัวฉีด จะมีฮีตเตอร์สำหรับให้ความร้อนกับพลาสติก เมื่อพลาสติกเริ่มละลาย จะมีตัวดันเส้นลวดพลาสติกให้ผ่านหัวออกมา ซึ่งหัวพิมพ์ก็จะเคลื่อนที่ตามโปรแกรมในขณะที่หัวพิมพ์เคลื่อนที่ ก็จะฉีดพลาสติกออกมาด้วย และเริ่มพิมพ์ทับกันไปเป็นชั้น จนก่อให้เกิดรูปชิ้นงาน 3 มิติ [17]

ด้วยความสามารถในการกำหนดตำแหน่งการพิมพ์และแทนวางตัวอย่างที่ให้ความร้อนได้ของเครื่องพิมพ์ 3 มิตินี้ทำให้สามารถนำอุปกรณ์บางส่วนมาประยุกต์ใช้ในโครงการงานพิเศษนี้ได้ดังที่จะได้อธิบายในบทที่ 3 และบทที่ 4 ต่อไป

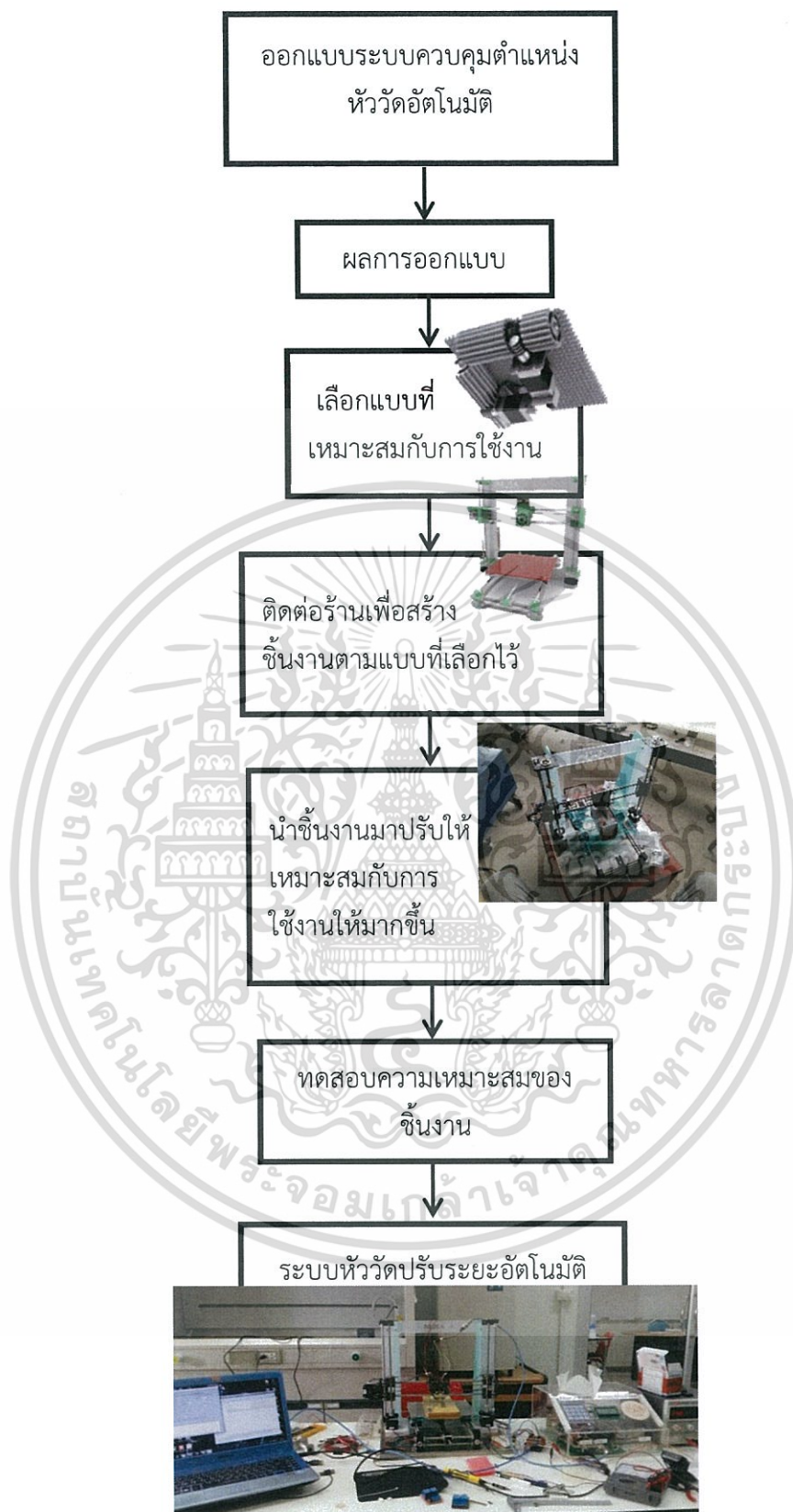
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบระบบควบคุมหัววัดสำหรับเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบ

การออกแบบระบบควบคุมหัววัดสำหรับเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบที่สามารถเลือกตำแหน่งที่ต้องการวัดได้โดยอ้างอิงต้นแบบจาก 3D Printer เพราะมีคุณสมบัติความละเอียดของระบบเนื่องจากประกอบด้วยสเต็ปมอเตอร์ในการขับเคลื่อนที่ตามแนวแกน x และ y วัสดุที่นำมาสร้างต้องมีความคงทนและแข็งแรงเพื่อรับน้ำหนักของมอเตอร์และระบบการเคลื่อนที่ของแกนเพื่อที่จะสามารถวัดค่าความต้านทานของกระจกเพื่อหาความต้านทานที่ตำแหน่งต่างๆ และฐานรองที่สามารถปรับอุณหภูมิได้เพื่อหาค่าความต้านทานเชิงแผ่นที่แปรผันกับอุณหภูมิ โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1 แผนผังการออกแบบระบบควบคุมหัววัดสำหรับเครื่องวัดโพรมีทไฟร์พอยท์โรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

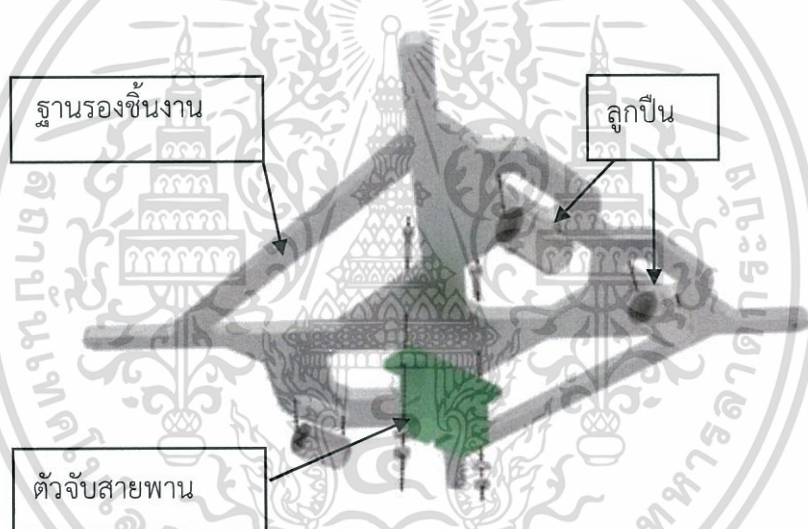
3.1.1 การออกแบบส่วนควบคุมหัววัด

การออกแบบส่วนควบคุมหัววัดจะออกแบบโดยอยู่ในขอบเขตของงานคือต้องสามารถเคลื่อนที่สองแกนเพื่อเป็นการเลือกตำแหน่งวัด และแกนยก ขึ้น-ลง หัววัดเพื่อทำการวัดและในเบื้องต้นคุณสมบัติเหล่านี้สามารถพบได้ใน 3D Printer จึงนำต้นแบบของ 3D Printer มาเป็นต้นแบบและประยุกต์ใช้ในการเลือกตำแหน่งของเครื่องโพรพอยท์โพรบ โดยระบบหัววัดประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่

3.1.1.1 แมคคาณิก

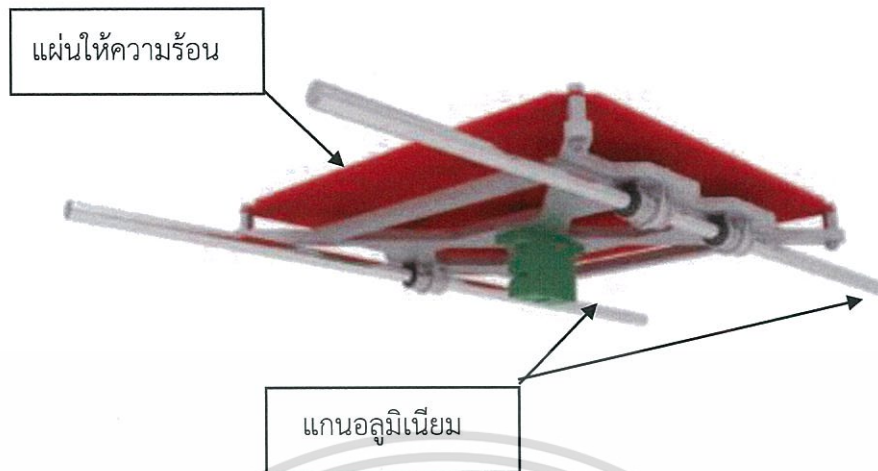
แบ่งเป็น 3 แกนที่ใช้ในการเคลื่อนที่

(1) ฐานรองชิ้นงานซึ่งเคลื่อนที่ในแนวแกน x ใช้สายพานขนาดระยะพิทเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ในการทำให้แกนเคลื่อนที่โดยติดกับตัวจับสายพานและมีลูกปืนเหล็ก 3 ตัว ประกอบแกนอลูมิเนียมสำหรับบังคับทิศทางให้เคลื่อนที่เป็นแนวตรงตามแกนของอลูมิเนียมระบบแสดงรูปประกอบการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวแกน x ดังรูปที่ 3.2 และด้านบนเป็นฐานสำหรับประกอบกับแผ่นให้ความร้อน



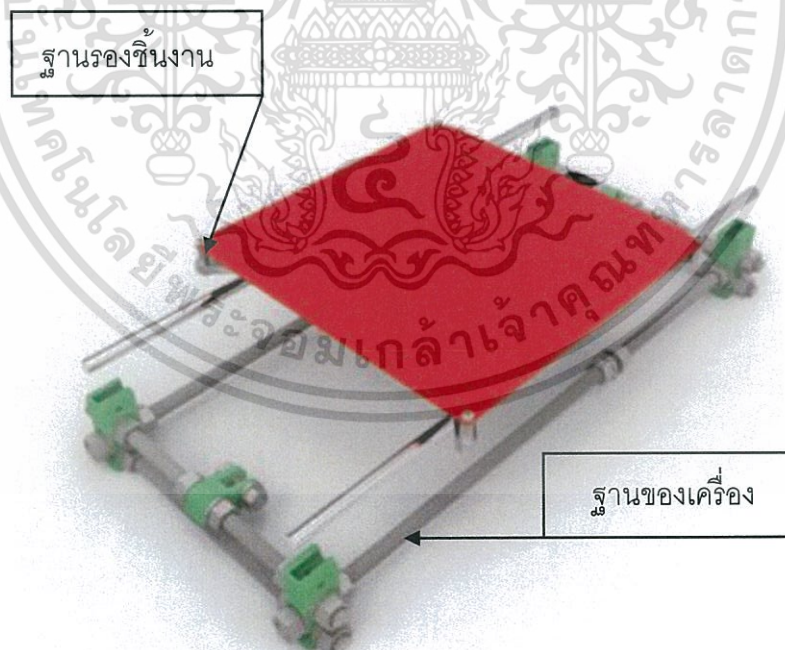
รูปที่ 3.2 ฐานรองของแกน x [14]

ฐานรองชิ้นงานที่ประกอบด้วยแกนอลูมิเนียมสำหรับบังคับทิศทางและมีแผ่นให้ความร้อนจากรูปที่ 3.3 เป็นการประกอบฐานเคลื่อนที่และแผ่นให้ความร้อน



รูปที่ 3.3 ฐานรองของแกน x แผ่นให้ความร้อน และแกนอลูมิเนียม [14]

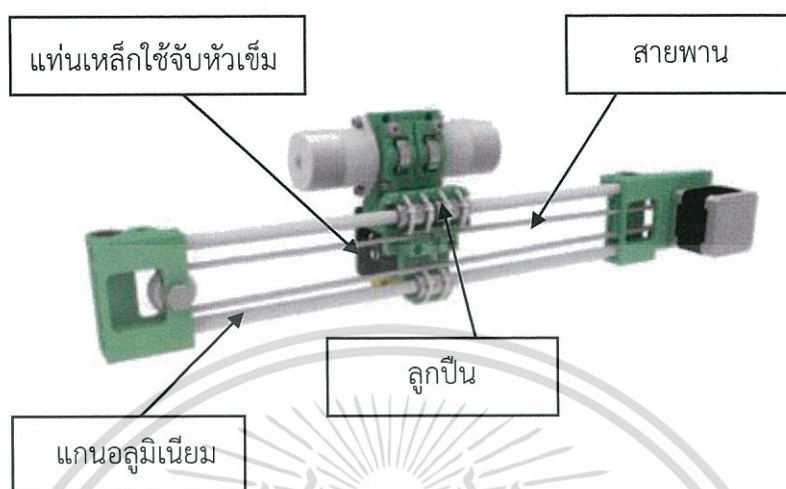
ฐานรองชิ้นงานที่ประกอบกับฐานของเครื่องมีลักษณะเป็นสองชั้นเพื่อใส่สายพานในการเคลื่อนแกนด้านล่างดัง รูปที่ 3.4 แสดงการประกอบระบบของการเคลื่อนที่ ฐาน และแผ่นให้ความร้อนเข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.4 ฐานรองของแกน x ประกอบกับฐานของเครื่อง [14]

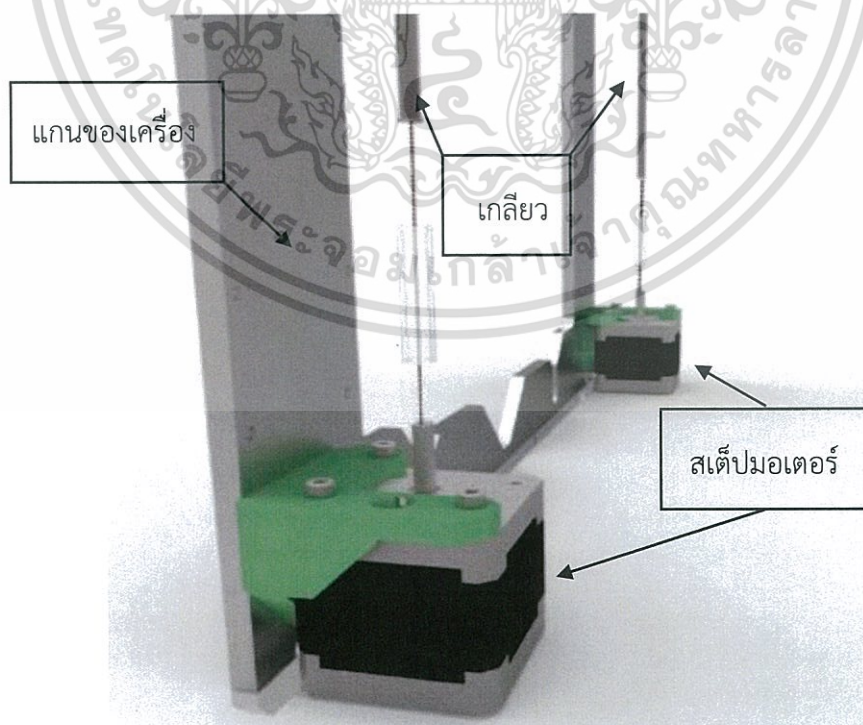
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) การเคลื่อนที่ในแนวแกน y เพื่อย้ายตำแหน่งของหัวเข็มประกอบด้วย สายพานสำหรับประกอบกับแท่นเหล็กใช้จับหัวเข็มและลูกปืนสองชุด ชุดที่หนึ่งกับประกอบกับแกนอลูมิเนียมในแกน y ชุดที่สองดัง รูปที่ 3.5 ประกอบกับแกน z ในลำดับต่อไป



รูปที่ 3.5 แท่นจับหัวเข็มของแกน y และแกนการเคลื่อนที่ [14]

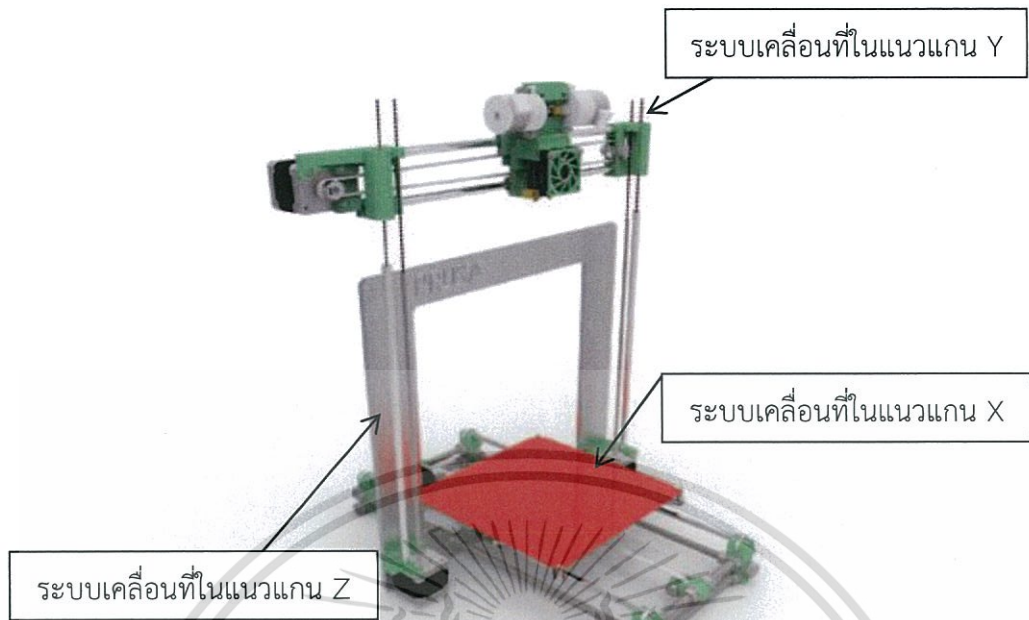
(3) แกน z ที่เชื่อมต่อกับแกน y มีหน้าที่ยกระบบเข็มวัดขึ้น-ลง เพื่อทำการวัด แกน z ประกอบด้วยสเต็ปมอเตอร์จำนวน 2 ตัวเพื่อเพิ่มกำลังใช้ในการยกแกน y ขึ้น โดยใช้ระบบเกลิยวและยึดติดกับแกนของเครื่องแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบในแนวแกน z และแกนการเคลื่อนที่ [14]

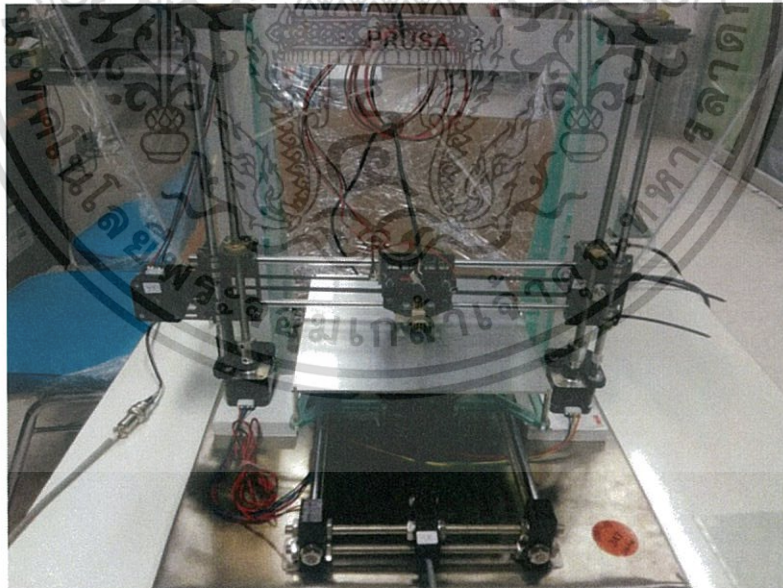
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพการประกอบรวมทั้งสามแกนเข้าด้วยกันทั้งระบบดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงการประกอบเคลื่อนที่รวม 3 แกน [14]

ภาพการประกอบรวมทั้งสามแกนเข้าด้วยกันภาพจริงดังรูปที่ 3.8

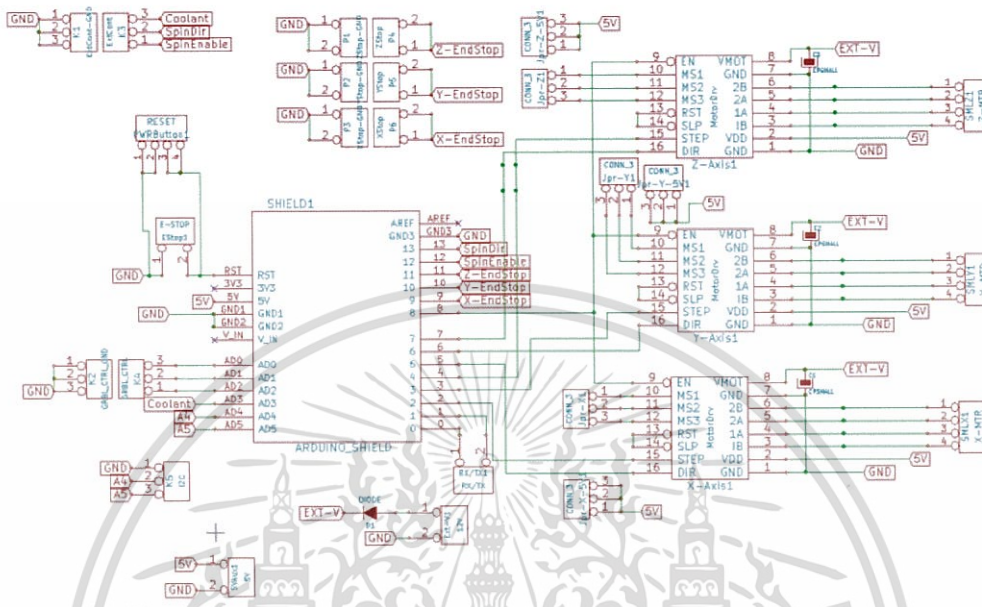


รูปที่ 3.8 การประกอบเคลื่อนที่รวม 3 แกน (เครื่องจริง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

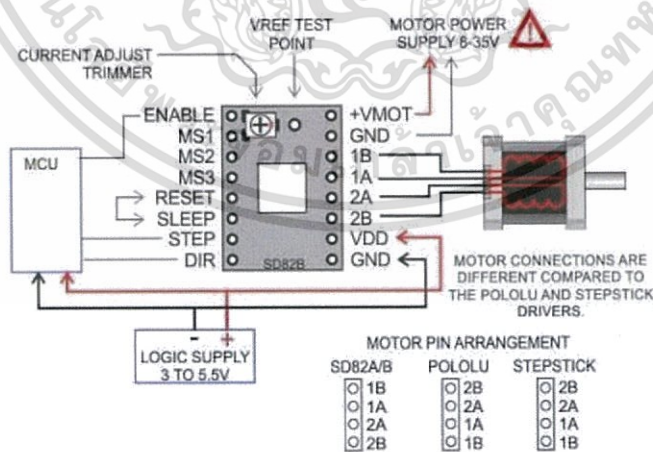
3.1.2 วงจรที่ใช้สำหรับควบคุมระบบวัด

3.1.2.1 วงจรดังรูปที่ 3.9 ที่เลือกใช้คือระบบของ CNC เนื่องจากมีความสามารถในการควบคุมตำแหน่งของระบบได้ตามต้องการและ แผงควบคุมมีขนาดเล็กประกอบด้วยชุดคำสั่งที่สามารถสั่งการในการเลือกตำแหน่งได้อย่างสะดวก (G-code จะกล่าวในหัวข้อต่อไป)



รูปที่ 3.9 Circuit Diagram ของ CNC Shield [15]

3.1.2.2 Driver motor A4988 เป็นวงจรขับกระแสให้แก่อะไหล่มอเตอร์ที่กำหนดโดยระบบ CNC shield รูปที่ 3.10 แสดงการต่อวงจรของ Driver motor A4988 กับ Microcontroller และ stepper motor เข้าด้วยกันเพื่อใช้ในระบบ CNC



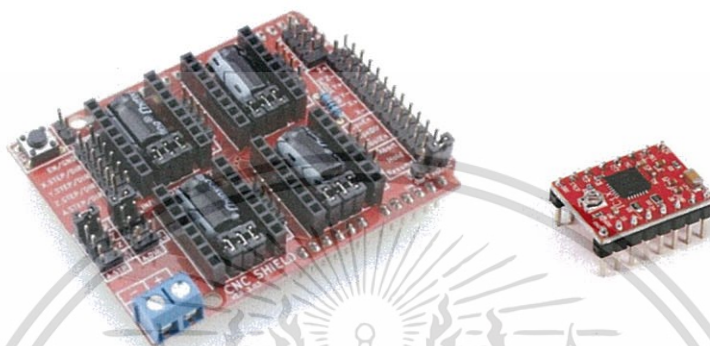
รูปที่ 3.10 Driver motor เบอร์ A4988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.3 การเลือกซื้ออุปกรณ์ที่ต้องการใช้ในงานเลือกซื้อตามระบบที่กำหนด

(1) Driver motor ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆในระบบการเลือกตำแหน่ง

(2) CNC Shield Bored ใช้สำหรับรวบรวม Driver Motor ไว้บนแผงวงจรเดียวกัน เพื่อความสะดวกในการใช้งาน และจัดซื้ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.11 แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้งานจริงในระบบ

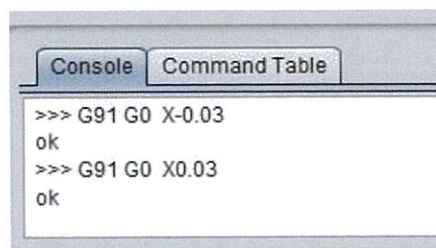


รูปที่ 3.11 Driver motor เบอร์ A4988 และ CNC Shield Bored [15]

3.1.3 ชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมระบบ (G-code)

3.1.3.1 G-code เป็นชุดคำสั่งที่นิยมใช้ในระบบ CNC เพราะมีคำสั่งในการสั่งการที่หลากหลาย เช่นสามารถกำหนดตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ ในระบบ 3 แกน จึงเหมาะสมแก่การนำมาประยุกต์ใช้ในโครงงานนี้ โดยเบื้องต้นได้ทดลองใช้ G-code ในการควบคุมระบบวัดที่สร้างขึ้นพบว่า ค่อนข้างยากต่อการใช้งาน เนื่องด้วยผู้ใช้ต้องจำคำสั่งต่างๆ ในการใช้งาน อีกทั้งยังต้องเขียนคำสั่งเริ่มต้นทุกครั้งที่ใช้งาน

3.1.3.2 Universal G-Code Sender เนื่องจาก G-Code เหมาะแก่การใช้งานแต่ไม่สะดวกในการสั่งการต่างๆ จึงใช้โปรแกรม Universal G-Code Sender เข้ามาช่วยในการแปลงตัวเลขคำสั่งที่ต้องการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปแบบ G-Code ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน Universal G-Code Sender จากรูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างการแปลงคำสั่งตำแหน่ง X-0.03 และ X0.03 ให้อยู่ในรูป G-Code และป้อนคำสั่งเข้า Microcontroller วิธีใช้งาน Universal G-Code Sender แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.12 แสดงการแปลคำสั่งเป็น G-Code

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการวัดระยะห่างระหว่างจุดด้วยโปรแกรม Image J

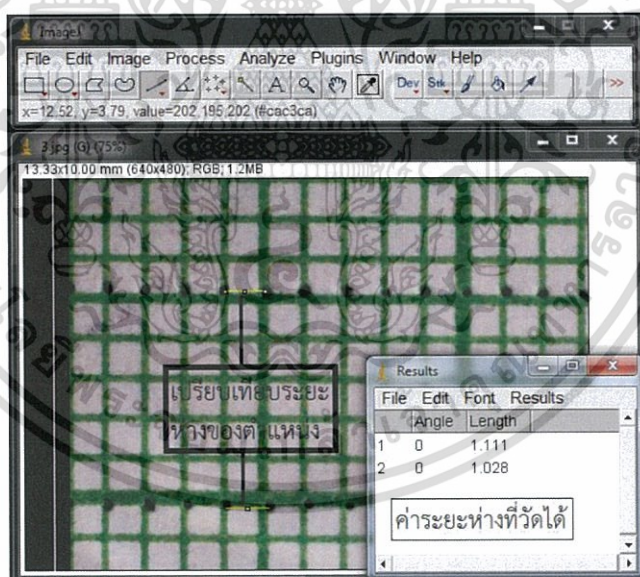
ImageJ เป็นโปรแกรมที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Wayne Rasband และ The National Institute of Health (NIH) ประเทศสหรัฐอเมริกา โปรแกรมนี้ถูกเขียนมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลจากรูปภาพ ตัวอย่างเช่น การนับจำนวนที่ได้จากภาพถ่าย การหาพื้นที่ของวัตถุ เป็นต้น โดยทำการวัดขนาดของอนุภาคที่ปรากฏในรูปภาพ นอกจากนี้ ยังได้มีการพัฒนามาวิเคราะห์ขนาดของเกรนและการกระจายตัวของภาคตัดขวางของวัสดุ เป็นการประยุกต์ใช้เพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุอีกวิธีหนึ่ง ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้มากขึ้นในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์

- การนำภาพมาวิเคราะห์ สามารถเลือกภาพถ่ายที่มีขนาด 8 บิต, 16 บิต และ 32 บิต
- สกุลไฟล์ภาพที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS, Raw
- สามารถคำนวณพื้นที่และปริมาณ Pixel ตามการเลือกพื้นที่ของผู้ใช้ กำหนดรูปแบบผ่าน

โหมด Contrast Manipulation, Sharpening, Smoothing, Edge Detection และ Median Filtering

ขั้นตอนการวัดระยะห่างระหว่างจุดโดยใช้โปรแกรม Imagej ดังรูปที่ 3.13

- (1) ตั้งค่าระยะอ้างอิง (1 Mm) โดยใช้ระยะของกระดาษกราฟ 1 ช่องเป็นแหล่งอ้างอิงในการวัด เพื่อใช้เปรียบเทียบในการวัดแต่ละครั้ง
- (2) ทำการวัดค่าเปรียบเทียบทั้ง 3 ครั้งในตำแหน่งเดียวกัน
- (3) หาค่าเฉลี่ยจาก 3 ตำแหน่งที่ทำการวัด และหาค่า SE



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการหาดำแหน่งของหัววัดโดยใช้โปรแกรม Image J

3.3 การออกแบบวงจรควบคุมอุณหภูมิ

3.3.1 การออกแบบวงจร

กำหนดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตามรูปที่ 3.14 ที่จะใช้ในการควบคุมวงจรรูปที่ 3.15 จากวงจรจำเป็นต้องกำหนดอุณหภูมิที่ใช้กระแสสูงถึง 2.69 Amp เนื่องจากโหลดต้องการเพราะเป็นระบบทำความร้อนจากระบบไฟฟ้าโดยวงจรที่ใช้ให้ความต่างศักย์จะประกอบไปด้วย

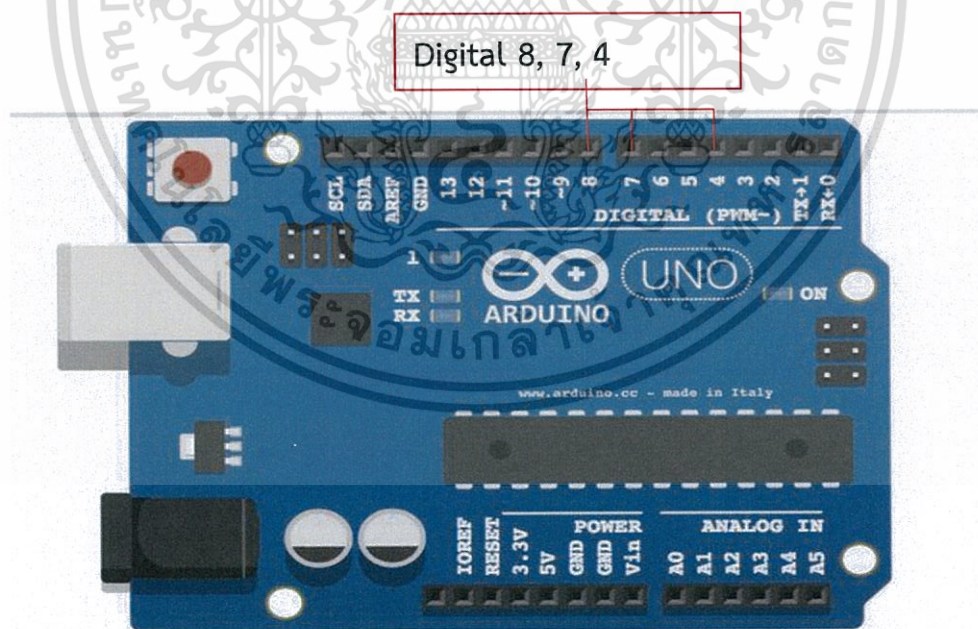
3.3.1.1 Microcontroller ขาข้อมูล 3 ขาที่ใช้งาน Digital 8, 7, 4 ตามรูปที่ 3.14 ใช้ควบคุมอุณหภูมิเมื่อถึงเวลาโดยอาศัย Crystal Oscillator ที่มีอยู่บน Board Microcontroller เป็นตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาโดยใช้คำสั่ง Millis ใช้แทนฟังก์ชัน Delay เพราะ Delay เป็นคำสั่งหยุดโปรแกรมให้ทำงานตามคำสั่งเดิมเมื่อโค้ดใช้ Delay นานจะเกิดการผิดพลาดและไม่ต้องใช้นาฬิกาจากภายนอกเป็นการลดอุปกรณ์

3.3.1.2 Optoisolator เป็นตัวส่งสัญญาณทางแสงและแยกวงจรกระแสสูงออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าป้องกันการไหลย้อนไปหาความต่างศักย์ต่ำใน Board Microcontroller

3.3.1.3 Relay ใช้เป็นสวิตช์สลับระหว่างอุณหภูมิ 30°C, 60°C, ปิดระบบ และสามารถป้องกันระบบจากการเปิดใช้งานทั้งสองช่องซึ่งอาจเกิดอันตรายเมื่อโค้ดทำงานผิดพลาดหรือ Controller เสียหายเมื่อไม่มีสัญญาณจะทำให้ Relay ไม่ทำงานและกลับไปยังสถานะปิดทั้งสองอัน

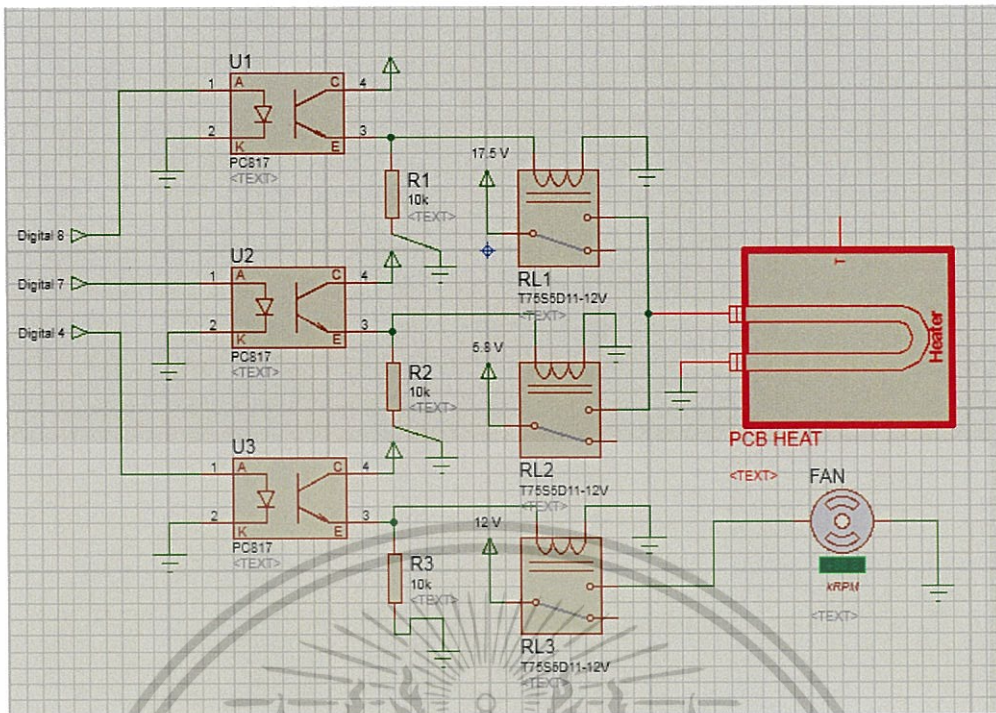
3.3.1.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ Xplorer GLX เป็นเครื่องที่มีความแม่นยำสูงสามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 2 ตำแหน่ง

3.3.1.5 แผ่นให้ความร้อน PCB Heat เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเรียบเหมาะสำหรับวางกระจกน้ำไฟฟ้าที่มีลักษณะเรียบเช่นเดียวกัน เพื่อเพิ่มหน้าสัมผัสและสามารถทำความร้อนได้เร็ว



รูปที่ 3.14 ภาพการต่อใช้งานอุปกรณ์ขา digital ที่ใช้ควบคุม

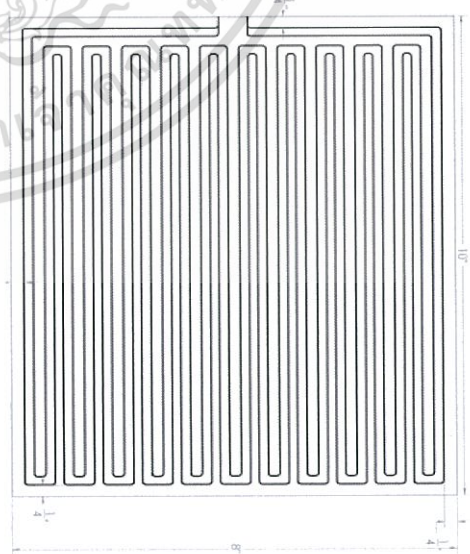
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 วงจรที่ใช้ในระบบควบคุมความร้อนของฐานลงชิ้นงาน

3.3.2 อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดความร้อน

ใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมในเครื่อง 3D Printer นำมาประยุกต์ใช้กับงานเพื่อให้สามารถวัดค่าความต้านทาน ขณะที่ตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้แผ่นให้ความร้อนรุ่น MK2B มีทองแดง 2 ชั้น หนา 35 ไมโครเมตร ขนาด 214 x 214 มิลลิเมตร ชูทองแดง มีความต้านทาน 1 ถึง 1.2 โอห์ม ดังรูปที่ 3.16

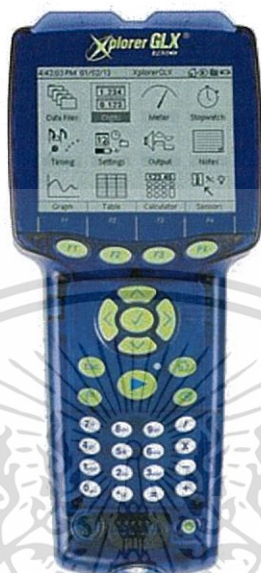


รูปที่ 3.16 แผ่นให้ความร้อนและลักษณะของขดลวดทองแดงที่อยู่ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขลิขสิทธิ์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิ Xplorer GLX

จากรูปที่ 3.17 เป็นเครื่องที่สามารถตรวจสอบข้อมูลและทำการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นได้อย่างง่ายดาย เช่น สถิติและเส้นโค้งเส้นตรงกับระบบปฏิบัติการที่ใช้ไอคอนปุ่มง่ายต่อการใช้งาน สำหรับการนำทางรวมทั้งสามารถป้อนข้อมูลแบบตัวเลขและตัวอักษร และสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้โดยตรง



รูปที่ 3.17 เครื่อง Xplorer GLX ที่ใช้เก็บค่าอุณหภูมิในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การออกแบบคำสั่งการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ

โดยกำหนดให้การให้อุณหภูมิมีลักษณะเป็นคาบ ความต่างระหว่างอุณหภูมิอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ออกแบบเพื่อต้องการศึกษาค่าความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าในระยะเวลาสั้น คำสั่งเบื้องต้นสามารถทำงานได้นาน 10 ชั่วโมง แบ่งเป็น 3 คาบ คาบละ 3 ชั่วโมง ประกอบด้วยอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 45 นาทีและอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 75 นาที และรวมระยะเวลาระหว่างการเปลี่ยนอุณหภูมิ การกำหนดค่าอุณหภูมิให้มีเวลาต่างกันเนื่องจากต้องการจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) ซึ่งมีมีอัตราส่วนอุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ จากรูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างคำสั่งควบคุมอุณหภูมิเวลาและการระบายความร้อน ด้วย Microcontroller

```

plus_30_60_30_60
1 #define CH1 8
2 #define CH2 7
3 #define CH3 4 // Fan
4 unsigned long start;
5 unsigned long over;
6 void setup()
7 {
8   Serial.begin(9600);
9   pinMode(CH1, OUTPUT);
10  pinMode(CH2, OUTPUT);
11  pinMode(CH3, OUTPUT);
12  digitalWrite(CH2, HIGH);
13  digitalWrite(CH1, HIGH);
14  delay(1000);
15 }
16 void loop()
17 {
18   start=millis();
19   delay(1000);
20   unsigned char h,m,s,ms;
21   unsigned long over; start;
22
23   unsigned long c;
24   c=int(start/1000);
25   Serial.println(c);
26   h=int(start/3600000);
27   over=start%3600000;
28   m=int(over/60000);
29   over=over%60000;
30   s=int(over/1000);
31   ms=over%1000;
32   if(c==2)
33   {
34     digitalWrite(CH1,LOW); //30 Open
35     if(c==3600)
36     {
37       digitalWrite(CH1,HIGH);
38       digitalWrite(CH2,LOW); //80 Open
39     }
40     if(c==10800)
41     {
42       digitalWrite(CH3,HIGH); //Fan Open
43
44     }
45     }
46     }
47     if(c==11700)
48     {
49       digitalWrite(CH3,LOW); //Fan Close
50     }
51     if( c==14400)
52     {
53       digitalWrite(CH1, HIGH);
54       digitalWrite(CH2,LOW); //80 Open
55     }
56     if(c==21600)
57     {
58       digitalWrite(CH2, HIGH);
59       digitalWrite(CH1,LOW); // 30 Open
60       digitalWrite(CH3, HIGH); //Fan Open
61     }
62     //END Loop 2
63     if(c==22500)
64     {
65       digitalWrite(CH2, HIGH);
66     }
67     if(c==25200)
68     {
69       digitalWrite(CH1, HIGH);
70       digitalWrite(CH2, LOW); //Open 80
71     }
72     if(c==32400) //opened 80* 1h
73     {
74       digitalWrite(CH2, HIGH);
75       digitalWrite(CH1, LOW); //Open 30
76       digitalWrite(CH3, HIGH); //Fan Open
77     }
78     //END Loop 3
79     if(c==24300)
80     {
81       digitalWrite(CH3,LOW); //Fan Close
82     }
83     if(c==36000)
84     {

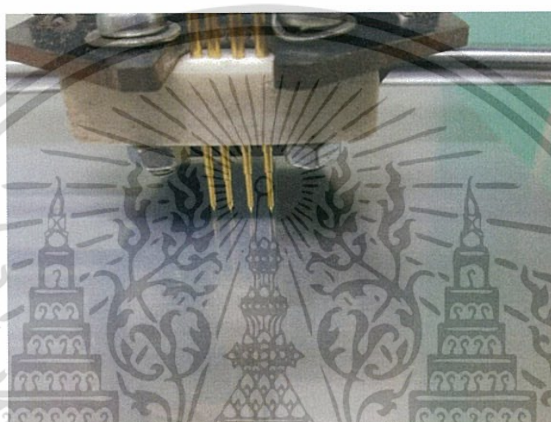
```

รูปที่ 3.18 ตัวอย่างคำสั่งควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การนำระบบที่ออกแบบมาทำการทดสอบการใช้งาน

ตามรูปที่ 3.19 แสดงการทดลองใช้งานระบบหัววัดที่ทำการพัฒนาขึ้นโดยใช้การปรับระยะ d ขึ้นทีละ 1 มิลลิเมตร เพื่อทดลองหาค่า Correction Factor ที่มีผลต่อตำแหน่งการวัดที่ห่างจากขอบของชิ้นงาน โดยมีวิธีการทดลอง คือ นำชิ้นงานแผ่นกระจกนำไฟฟ้า FTO ขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร ที่มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า 10 โอห์มวางชิ้นงานกระจกนำไฟฟ้า ณ จุดวัด แล้วกดเข็มวัดทั้ง 4 เข็ม ลงสัมผัสกับชิ้นงาน โดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงาน 0.5 มิลลิแอมป์ จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานตัวอย่าง พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งเครื่องโพร์พอยท์โพรบจะหาค่าความต้านทานจากอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้า และนำมาคำนวณหาค่า Correction Factor = $10/R$ โดยปรับระยะ D เพิ่มขึ้นทีละ 1 มิลลิเมตร ค่าระยะห่างระหว่างเข็ม (S) คงที่เท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.19 การทดสอบวัดจริงที่ระยะ d ต่าง

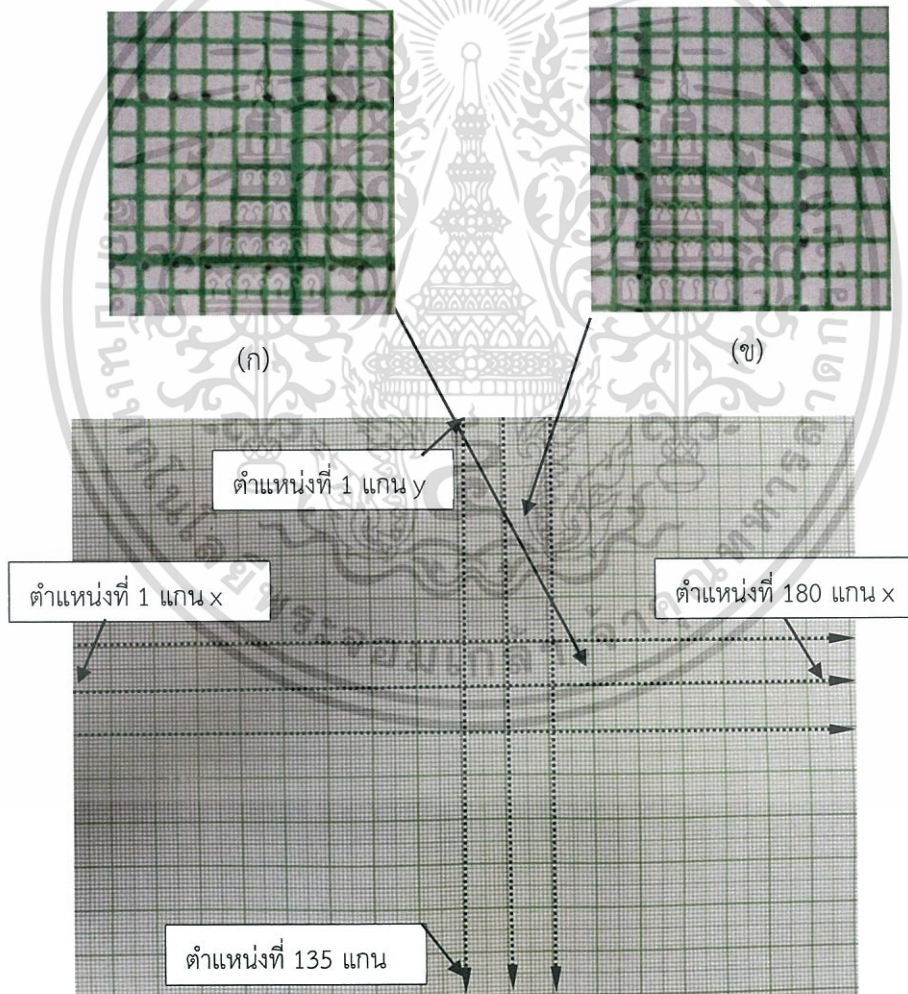
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองของเครื่องโฟร์พอยท์โพรบในการปฏิบัติงานต่างๆ ของเครื่องของเครื่องโฟร์พอยท์โพรบเพื่อทดสอบความสามารถในการปฏิบัติงานตามคำสั่งที่ได้กำหนดไว้

4.1 ผลการทดลองโดยวิธีการเคลื่อนหัววัดไปในระยะที่กำหนด

รูปที่ 4.1 แสดงการกำหนดตำแหน่งหัวเข็มวัดแต่ละจุดตามต้องการโดยการเลื่อนตำแหน่งครั้งละ 1 มิลลิเมตร วัดด้วยวิธีการใช้กระดาษกราฟที่มีระยะห่างระหว่างช่องเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และใช้เข็มวัดของเครื่องโฟร์พอยท์โพรบเจาะรูบนกระดาษเพื่อเป็นการแสดงตำแหน่งแล้วใช้การถ่ายภาพและวัดระยะห่างด้วยโปรแกรม Image J



รูปที่ 4.1 แสดงการวัดระยะการเคลื่อนที่ (1 mm)

(ก) ภาพขยายการวัดในแนวแกน x (ข) ภาพขยายการวัดในแนวแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ผลการทดลองในแนวแกน x

การทดลองวัดระยะของการเคลื่อนที่หัวเข็มโดยเคลื่อนที่ในระยะเวลาที่กำหนดคือระยะละ 1 มิลลิเมตร ในแนวแกน x ทดลองเป็นจำนวน 180 ตำแหน่ง ทำการวัดซ้ำตำแหน่งละ 3 ครั้ง ครอบคลุมพื้นที่การทำงานทั้งหมด 18 เซนติเมตรโดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้มีค่าไม่เกิน 10% เมื่อพิจารณาผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 ตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 พบว่า

4.1.1.1 ค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมดในแนวแกน x เท่ากับ 1.009 มิลลิเมตร

4.1.1.2 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (SE) สูงสุดเท่ากับ 0.171 มิลลิเมตรคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 17.1 %

4.1.1.3 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (SE) ต่ำสุดเท่ากับ 0.019 มิลลิเมตรคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 1.9 %

4.1.1.4 ตำแหน่งที่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10 % มีจำนวนเท่ากับ 48 ตำแหน่ง จากทั้งหมด 180 ตำแหน่ง คิดเป็น 26.5 % ผลสรุปเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในช่วงต่างๆ เป็นดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน x (ระยะเคลื่อนที่ตำแหน่งละ 1 mm)

| ตำแหน่งที่ | ระยะในแนวแกน X (mm) | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
|------------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 1 | 1.000 | 0.875 | 1.042 | 0.972 | 0.087 | 0.050 |
| 2 | 1.250 | 0.892 | 1.000 | 1.047 | 0.184 | 0.106 |
| 3 | 1.083 | 1.128 | 1.292 | 1.168 | 0.110 | 0.064 |
| 4 | 1.083 | 1.125 | 1.000 | 1.069 | 0.064 | 0.037 |
| 5 | 0.875 | 1.125 | 1.000 | 1.000 | 0.125 | 0.072 |
| 6 | 0.875 | 1.000 | 0.938 | 0.938 | 0.063 | 0.036 |
| 7 | 1.000 | 1.000 | 0.875 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 8 | 1.000 | 1.188 | 0.938 | 1.042 | 0.130 | 0.075 |
| 9 | 1.125 | 1.000 | 1.000 | 1.042 | 0.072 | 0.042 |
| 10 | 1.125 | 0.938 | 0.938 | 1.000 | 0.108 | 0.062 |
| 11 | 1.000 | 1.188 | 0.750 | 0.979 | 0.220 | 0.127 |
| 12 | 0.812 | 1.250 | 1.062 | 1.041 | 0.220 | 0.127 |
| 13 | 1.000 | 1.188 | 1.125 | 1.104 | 0.096 | 0.055 |
| 14 | 1.188 | 0.812 | 1.000 | 1.000 | 0.188 | 0.109 |
| 15 | 0.938 | 1.062 | 0.875 | 0.958 | 0.095 | 0.055 |
| 16 | 1.000 | 0.875 | 1.000 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 17 | 0.875 | 0.812 | 1.250 | 0.979 | 0.237 | 0.137 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน x (ต่อ)

| ระยะในแนวแกน X (mm) | | | | | | |
|---------------------|----------|-------|-------|------------|-------|-------|
| ตำแหน่งที่ | ครั้งที่ | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 18 | 1.000 | 1.000 | 1.188 | 1.063 | 0.109 | 0.063 |
| 19 | 1.000 | 1.062 | 0.875 | 0.979 | 0.095 | 0.055 |
| 20 | 0.875 | 1.375 | 0.938 | 1.063 | 0.272 | 0.157 |
| 21 | 1.125 | 1.000 | 0.812 | 0.979 | 0.158 | 0.091 |
| 22 | 1.062 | 0.812 | 1.000 | 0.958 | 0.130 | 0.075 |
| 23 | 1.000 | 0.705 | 1.062 | 0.922 | 0.191 | 0.110 |
| 24 | 0.875 | 1.000 | 0.812 | 0.896 | 0.096 | 0.055 |
| 25 | 1.000 | 1.125 | 0.875 | 1.000 | 0.125 | 0.072 |
| 26 | 0.938 | 0.938 | 1.062 | 0.979 | 0.072 | 0.041 |
| 27 | 0.938 | 1.188 | 1.062 | 1.063 | 0.125 | 0.072 |
| 28 | 1.062 | 1.000 | 1.000 | 1.021 | 0.036 | 0.021 |
| 29 | 0.938 | 1.000 | 1.062 | 1.000 | 0.062 | 0.036 |
| 30 | 1.250 | 1.062 | 1.250 | 1.187 | 0.109 | 0.063 |
| 31 | 0.875 | 1.188 | 0.812 | 0.958 | 0.201 | 0.116 |
| 32 | 1.062 | 0.875 | 1.000 | 0.979 | 0.095 | 0.055 |
| 33 | 1.375 | 0.938 | 0.812 | 1.042 | 0.295 | 0.171 |
| 34 | 0.625 | 0.812 | 1.000 | 0.812 | 0.188 | 0.108 |
| 35 | 0.812 | 1.000 | 1.062 | 0.958 | 0.130 | 0.075 |
| 36 | 0.705 | 1.062 | 1.000 | 0.922 | 0.191 | 0.110 |
| 37 | 1.000 | 0.812 | 1.062 | 0.958 | 0.130 | 0.075 |
| 38 | 1.125 | 0.875 | 1.375 | 1.125 | 0.250 | 0.144 |
| 39 | 0.938 | 1.062 | 0.625 | 0.875 | 0.225 | 0.130 |
| 40 | 1.188 | 1.062 | 0.812 | 1.021 | 0.191 | 0.110 |
| 41 | 1.000 | 1.000 | 0.705 | 0.902 | 0.170 | 0.098 |
| 42 | 1.000 | 1.062 | 1.000 | 1.021 | 0.036 | 0.021 |
| 43 | 1.062 | 1.250 | 1.125 | 1.146 | 0.096 | 0.055 |
| 44 | 1.188 | 0.812 | 1.000 | 1.000 | 0.188 | 0.109 |
| 45 | 0.875 | 1.000 | 1.000 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 46 | 0.875 | 1.188 | 1.000 | 1.021 | 0.158 | 0.091 |
| 47 | 1.062 | 0.875 | 1.000 | 0.979 | 0.095 | 0.055 |
| 48 | 1.375 | 0.938 | 0.812 | 1.042 | 0.295 | 0.171 |
| 49 | 1.000 | 0.812 | 1.000 | 0.937 | 0.109 | 0.063 |
| 50 | 0.812 | 1.000 | 1.062 | 0.958 | 0.130 | 0.075 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน x (ต่อ)

| ตำแหน่งที่ | ระยะในแนวแกน X (mm) | | | | | |
|------------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 51 | 1.083 | 1.125 | 0.750 | 0.986 | 0.205 | 0.119 |
| 52 | 0.875 | 1.125 | 1.000 | 1.000 | 0.125 | 0.072 |
| 53 | 0.875 | 0.812 | 0.938 | 0.875 | 0.063 | 0.036 |
| 54 | 1.000 | 1.000 | 0.875 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 55 | 1.000 | 1.188 | 0.938 | 1.042 | 0.130 | 0.075 |
| 56 | 1.125 | 1.250 | 1.000 | 1.125 | 0.125 | 0.072 |
| 57 | 0.875 | 1.000 | 1.000 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 58 | 0.875 | 1.188 | 1.125 | 1.063 | 0.166 | 0.096 |
| 59 | 1.062 | 0.875 | 0.938 | 0.958 | 0.095 | 0.055 |
| 60 | 1.375 | 0.938 | 1.188 | 1.167 | 0.219 | 0.127 |
| 61 | 0.625 | 0.812 | 1.000 | 0.812 | 0.188 | 0.108 |
| 62 | 0.812 | 1.000 | 1.000 | 0.937 | 0.109 | 0.063 |
| 63 | 1.083 | 1.125 | 1.062 | 1.090 | 0.032 | 0.019 |
| 64 | 0.875 | 1.125 | 1.188 | 1.063 | 0.166 | 0.096 |
| 65 | 1.000 | 0.875 | 0.875 | 0.917 | 0.072 | 0.042 |
| 66 | 1.188 | 0.938 | 1.000 | 1.042 | 0.130 | 0.075 |
| 67 | 1.250 | 1.000 | 1.000 | 1.083 | 0.144 | 0.083 |
| 68 | 0.938 | 0.938 | 1.000 | 0.959 | 0.036 | 0.021 |
| 69 | 1.188 | 0.750 | 1.000 | 0.979 | 0.220 | 0.127 |
| 70 | 1.000 | 1.062 | 1.250 | 1.104 | 0.130 | 0.075 |
| 71 | 1.188 | 1.125 | 0.938 | 1.084 | 0.130 | 0.075 |
| 72 | 0.812 | 1.000 | 1.188 | 1.000 | 0.188 | 0.109 |
| 73 | 1.062 | 0.875 | 1.250 | 1.062 | 0.188 | 0.108 |
| 74 | 0.875 | 1.000 | 1.188 | 1.021 | 0.158 | 0.091 |
| 75 | 0.812 | 1.250 | 0.812 | 0.958 | 0.253 | 0.146 |
| 76 | 1.000 | 1.188 | 1.062 | 1.083 | 0.096 | 0.055 |
| 77 | 1.062 | 0.875 | 1.062 | 1.000 | 0.108 | 0.062 |
| 78 | 1.000 | 1.000 | 0.875 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 79 | 1.188 | 1.125 | 0.812 | 1.042 | 0.201 | 0.116 |
| 80 | 0.875 | 0.938 | 1.000 | 0.938 | 0.063 | 0.036 |
| 81 | 0.938 | 1.188 | 1.062 | 1.063 | 0.125 | 0.072 |
| 82 | 0.812 | 1.000 | 1.000 | 0.937 | 0.109 | 0.063 |
| 83 | 1.000 | 1.000 | 1.188 | 1.063 | 0.109 | 0.063 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน x (ต่อ)

| ตำแหน่งที่ | ระยะในแนวแกน X (mm) | | | | | |
|------------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 84 | 1.125 | 1.062 | 0.875 | 1.021 | 0.130 | 0.075 |
| 85 | 1.125 | 1.188 | 0.938 | 1.084 | 0.130 | 0.075 |
| 86 | 0.875 | 0.875 | 1.000 | 0.917 | 0.072 | 0.042 |
| 87 | 0.938 | 1.000 | 0.938 | 0.959 | 0.036 | 0.021 |
| 88 | 1.000 | 1.000 | 1.083 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 89 | 0.938 | 1.000 | 0.875 | 0.938 | 0.063 | 0.036 |
| 90 | 1.083 | 1.125 | 0.875 | 1.028 | 0.134 | 0.077 |
| 91 | 0.875 | 1.125 | 1.000 | 1.000 | 0.125 | 0.072 |
| 92 | 0.875 | 0.812 | 1.000 | 0.896 | 0.096 | 0.055 |
| 93 | 1.000 | 1.000 | 1.125 | 1.042 | 0.072 | 0.042 |
| 94 | 1.000 | 1.188 | 1.125 | 1.104 | 0.096 | 0.055 |
| 95 | 1.125 | 1.250 | 1.000 | 1.125 | 0.125 | 0.072 |
| 96 | 1.125 | 0.938 | 1.000 | 1.021 | 0.095 | 0.055 |
| 97 | 1.000 | 1.188 | 1.000 | 1.063 | 0.109 | 0.063 |
| 98 | 0.812 | 1.250 | 1.125 | 1.062 | 0.226 | 0.130 |
| 99 | 1.000 | 1.188 | 1.125 | 1.104 | 0.096 | 0.055 |
| 100 | 1.188 | 0.812 | 0.812 | 0.937 | 0.217 | 0.125 |
| 101 | 0.938 | 1.062 | 1.000 | 1.000 | 0.062 | 0.036 |
| 102 | 1.000 | 0.875 | 1.000 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 103 | 0.875 | 1.000 | 0.938 | 0.938 | 0.063 | 0.036 |
| 104 | 1.000 | 1.000 | 0.938 | 0.979 | 0.036 | 0.021 |
| 105 | 0.812 | 1.000 | 1.062 | 0.958 | 0.130 | 0.075 |
| 106 | 1.000 | 1.125 | 0.938 | 1.021 | 0.095 | 0.055 |
| 107 | 1.188 | 1.125 | 1.250 | 1.188 | 0.063 | 0.036 |
| 108 | 1.250 | 1.000 | 0.875 | 1.042 | 0.191 | 0.110 |
| 109 | 0.938 | 1.000 | 1.250 | 1.063 | 0.165 | 0.095 |
| 110 | 1.188 | 1.000 | 1.188 | 1.125 | 0.109 | 0.063 |
| 111 | 1.250 | 1.125 | 0.875 | 1.083 | 0.191 | 0.110 |
| 112 | 1.188 | 1.125 | 0.792 | 1.035 | 0.213 | 0.123 |
| 113 | 0.875 | 1.042 | 1.128 | 1.015 | 0.129 | 0.074 |
| 114 | 0.792 | 1.000 | 1.125 | 0.972 | 0.168 | 0.097 |
| 115 | 1.128 | 1.292 | 1.125 | 1.182 | 0.096 | 0.055 |
| 116 | 1.125 | 0.750 | 0.875 | 0.917 | 0.191 | 0.110 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน x (ต่อ)

| ครั้งที่ | ระยะในแนวแกน X (mm) | | | | | |
|----------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 117 | 1.125 | 1.000 | 1.000 | 1.042 | 0.072 | 0.042 |
| 118 | 0.812 | 0.938 | 1.000 | 0.917 | 0.096 | 0.055 |
| 119 | 1.000 | 0.875 | 1.125 | 1.000 | 0.125 | 0.072 |
| 120 | 1.188 | 0.938 | 1.125 | 1.084 | 0.130 | 0.075 |
| 121 | 1.250 | 1.000 | 1.000 | 1.083 | 0.144 | 0.083 |
| 122 | 0.938 | 0.938 | 0.812 | 0.896 | 0.073 | 0.042 |
| 123 | 1.188 | 0.750 | 1.000 | 0.979 | 0.220 | 0.127 |
| 124 | 1.250 | 1.062 | 1.188 | 1.167 | 0.096 | 0.055 |
| 125 | 1.188 | 1.125 | 0.938 | 1.084 | 0.130 | 0.075 |
| 126 | 0.812 | 1.000 | 1.000 | 0.937 | 0.109 | 0.063 |
| 127 | 1.062 | 0.875 | 0.875 | 0.937 | 0.108 | 0.062 |
| 128 | 0.875 | 1.000 | 1.000 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 129 | 1.125 | 1.128 | 1.292 | 1.182 | 0.096 | 0.055 |
| 130 | 1.000 | 1.125 | 0.750 | 0.958 | 0.191 | 0.110 |
| 131 | 0.875 | 1.125 | 1.000 | 1.000 | 0.125 | 0.072 |
| 132 | 1.000 | 0.812 | 0.938 | 0.917 | 0.096 | 0.055 |
| 133 | 1.128 | 1.000 | 0.875 | 1.001 | 0.127 | 0.073 |
| 134 | 1.125 | 1.188 | 0.938 | 1.084 | 0.130 | 0.075 |
| 135 | 1.125 | 1.250 | 1.000 | 1.125 | 0.125 | 0.072 |
| 136 | 1.000 | 0.938 | 0.938 | 0.959 | 0.036 | 0.021 |
| 137 | 1.000 | 1.188 | 0.750 | 0.979 | 0.220 | 0.127 |
| 138 | 0.875 | 1.375 | 0.875 | 1.042 | 0.289 | 0.167 |
| 139 | 1.125 | 0.625 | 1.125 | 0.958 | 0.289 | 0.167 |
| 140 | 1.062 | 0.812 | 1.000 | 0.958 | 0.130 | 0.075 |
| 141 | 1.000 | 1.000 | 0.875 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 142 | 0.875 | 1.000 | 1.000 | 0.958 | 0.072 | 0.042 |
| 143 | 1.000 | 1.125 | 1.128 | 1.084 | 0.073 | 0.042 |
| 144 | 0.938 | 0.938 | 1.125 | 1.000 | 0.108 | 0.062 |
| 145 | 0.938 | 1.188 | 1.125 | 1.084 | 0.130 | 0.075 |
| 146 | 1.062 | 1.000 | 0.812 | 0.958 | 0.130 | 0.075 |
| 147 | 0.938 | 1.000 | 1.000 | 0.979 | 0.036 | 0.021 |
| 148 | 1.250 | 1.062 | 0.875 | 1.062 | 0.188 | 0.108 |
| 149 | 0.875 | 1.188 | 1.125 | 1.063 | 0.166 | 0.096 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน x (ต่อ)

| ครั้งที่ | ระยะในแนวแกน X (mm) | | | | | |
|----------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 150 | 1.062 | 0.875 | 1.062 | 1.000 | 0.108 | 0.062 |
| 151 | 1.375 | 0.938 | 1.000 | 1.104 | 0.236 | 0.137 |
| 152 | 0.625 | 0.812 | 1.000 | 0.812 | 0.188 | 0.108 |
| 153 | 0.812 | 1.000 | 0.812 | 0.875 | 0.109 | 0.063 |
| 154 | 0.705 | 1.062 | 1.000 | 0.922 | 0.191 | 0.110 |
| 155 | 1.000 | 0.812 | 1.000 | 0.937 | 0.109 | 0.063 |
| 156 | 1.125 | 0.875 | 1.000 | 1.000 | 0.125 | 0.072 |
| 157 | 0.938 | 1.062 | 1.000 | 1.000 | 0.062 | 0.036 |
| 158 | 1.188 | 1.062 | 1.000 | 1.083 | 0.096 | 0.055 |
| 159 | 1.000 | 1.000 | 1.125 | 1.042 | 0.072 | 0.042 |
| 160 | 1.000 | 1.062 | 0.875 | 0.979 | 0.095 | 0.055 |
| 161 | 1.062 | 1.250 | 0.792 | 1.035 | 0.230 | 0.133 |
| 162 | 1.188 | 0.812 | 1.128 | 1.043 | 0.202 | 0.117 |
| 163 | 0.875 | 1.000 | 1.125 | 1.000 | 0.125 | 0.072 |
| 164 | 1.250 | 0.875 | 1.125 | 1.083 | 0.191 | 0.110 |
| 165 | 1.188 | 1.062 | 0.812 | 1.021 | 0.191 | 0.110 |
| 166 | 0.812 | 1.062 | 1.000 | 0.958 | 0.130 | 0.075 |
| 167 | 1.062 | 1.000 | 1.188 | 1.083 | 0.096 | 0.055 |
| 168 | 0.875 | 1.062 | 1.250 | 1.062 | 0.188 | 0.108 |
| 169 | 0.812 | 1.250 | 0.938 | 1.000 | 0.225 | 0.130 |
| 170 | 1.000 | 0.812 | 1.188 | 1.000 | 0.188 | 0.109 |
| 171 | 1.000 | 1.000 | 1.250 | 1.083 | 0.144 | 0.083 |
| 172 | 1.000 | 1.188 | 1.188 | 1.125 | 0.109 | 0.063 |
| 173 | 1.000 | 0.875 | 0.812 | 0.896 | 0.096 | 0.055 |
| 174 | 1.188 | 0.938 | 1.062 | 1.063 | 0.125 | 0.072 |
| 175 | 0.812 | 0.812 | 0.875 | 0.833 | 0.036 | 0.021 |
| 176 | 1.062 | 1.000 | 0.812 | 0.958 | 0.130 | 0.075 |
| 177 | 0.875 | 1.125 | 1.000 | 1.000 | 0.125 | 0.072 |
| 178 | 1.000 | 1.062 | 0.875 | 0.979 | 0.095 | 0.055 |
| 179 | 1.062 | 1.250 | 0.792 | 1.035 | 0.230 | 0.133 |
| 180 | 1.188 | 0.812 | 1.128 | 1.043 | 0.202 | 0.117 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดเคลื่อนของการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน x โดยทำการทดลองทั้งหมด 180 ตำแหน่ง แบ่งเป็นช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสี่ช่วง คือ ผลการทดลองในช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่าง 0% ถึง 5% จำนวน 39 ครั้ง คิดเป็น 21.6% ผลการทดลองในช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่าง 5% ถึง 10% จำนวน 93 ครั้ง คิดเป็น 51.6% ผลการทดลองในช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่าง 10% ถึง 15% จำนวน 43 ครั้ง คิดเป็น 23.8% และผลการทดลองในช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่าง 15% ถึง 17.2% จำนวน 5 ครั้ง คิดเป็น 2.7% ซึ่งช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อยู่ระหว่าง 0% ถึง 10% เท่ากับ 132 ตำแหน่ง จาก 180 ตำแหน่งคิดเป็น 73.2% ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10%) ตารางที่ 4.2 ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนของการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน x

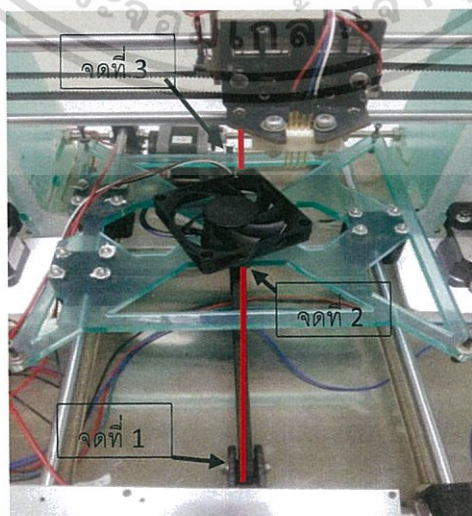
| ช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (z) | จำนวนตำแหน่ง | เปอร์เซ็นต์ตำแหน่งที่เกิดความคลาดเคลื่อนในแต่ละช่วง |
|------------------------------------|--------------|---|
| $0\% \leq z < 5\%$ | 39 | 21.6% |
| $5\% \leq z < 10\%$ | 93 | 51.6% |
| $10\% \leq z < 15\%$ | 43 | 23.8% |
| $15\% \leq z \leq 17.2\%$ | 5 | 2.7% |

4.1.1.6 สรุปความคลาดเคลื่อนของการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน x

(1) น้ำหนักของฐานรองเป็นการเพิ่มโหลดให้แก่มอเตอร์ในแกน x เป็นผลให้มอเตอร์ทำงานผิดปกติอาจเคลื่อนที่ไม่ตรงสเปคเนื่องจากน้ำหนักที่ได้รับ

(2) สายพานที่ใช้อาจไม่ตรงตำแหน่งกันทั้ง 3 จุด ตลอดแนวระหว่าง ตัวตริงสายพานด้านหน้า (จุดที่ 1) ฐานเคลื่อนที่ (จุดที่ 2) และ มอเตอร์ (จุดที่ 3) และอาจเกิดความบิดของสายพานทำให้ไม่สามารถขบกับเฟืองได้ทุกซี่ดัง รูปที่ 4.2

4.1.1.7 สามารถนำการควบคุมระบบหัววัดไปทดลองหาค่าผลกระทบของตำแหน่งการวัดนับจากขอบของตัวอย่างต่อค่า Correction Factor ได้ซึ่งจะอธิบายผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.2 ปัญหาความไม่ตรงของสายพานเคลื่อนที่ในแนวแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดลองในแนวแกน y

การทดลองวัดระยะของการเคลื่อนที่หัวเข็มโดยเคลื่อนที่ในระยะที่กำหนด เป็นระยะทาง 1 มิลลิเมตร ในแนวแกน y ทดลองเป็นจำนวน 135 ครั้งวัดซ้ำ 3 ครั้ง ครอบคลุมพื้นที่การทำงานทั้งหมด 13.5 เซนติเมตร ได้ผลดังรูปที่ 4.1 ตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 จากการทดลองพบว่า

4.1.2.1 ค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมดในแนวแกน y เท่ากับ 1.028 มิลลิเมตร

4.1.2.2 ค่า SE สูงสุดเท่ากับ 0.096 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 9.6%

4.1.2.3 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (SE) ต่ำสุดเท่ากับ 0.001 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.1%

4.1.2.4 จำนวนตำแหน่งที่สามารถควบคุมได้ (มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10%) จำนวนทั้งสิ้น 135 ตำแหน่ง จาก 135 ตำแหน่ง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สามารถควบคุมได้ 100 %

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน y (ระยะเคลื่อนที่ตำแหน่งละ 1 mm)

| ตำแหน่งที่ | ระยะในแนวแกน y (mm) | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
|------------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 1 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 2 | 0.917 | 0.917 | 0.917 | 0.917 | 0.000 | 0.000 |
| 3 | 0.917 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 0.083 | 0.048 |
| 4 | 1.000 | 0.917 | 1.000 | 0.972 | 0.048 | 0.028 |
| 5 | 1.083 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.083 | 0.048 |
| 6 | 1.000 | 0.971 | 1.083 | 1.018 | 0.058 | 0.034 |
| 7 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 8 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 9 | 0.917 | 0.917 | 1.000 | 0.945 | 0.048 | 0.028 |
| 10 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 11 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 12 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 13 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 14 | 1.000 | 1.170 | 0.837 | 1.002 | 0.167 | 0.096 |
| 15 | 1.000 | 1.083 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 16 | 1.167 | 1.083 | 0.917 | 1.056 | 0.127 | 0.073 |
| 17 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 18 | 1.000 | 1.167 | 1.000 | 1.056 | 0.096 | 0.056 |
| 19 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 20 | 1.000 | 1.083 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 21 | 0.971 | 1.000 | 1.003 | 0.991 | 0.018 | 0.010 |

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน y (ต่อ)

| ตำแหน่งที่ | ระยะในแนวแกน y (mm) | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
|------------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 22 | 1.000 | 1.167 | 1.167 | 1.111 | 0.096 | 0.056 |
| 23 | 0.917 | 1.083 | 1.083 | 1.028 | 0.096 | 0.055 |
| 24 | 1.003 | 1.253 | 1.083 | 1.113 | 0.128 | 0.074 |
| 25 | 1.083 | 1.167 | 1.000 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 26 | 0.833 | 1.000 | 1.083 | 0.972 | 0.127 | 0.074 |
| 27 | 1.000 | 1.087 | 1.000 | 1.029 | 0.050 | 0.029 |
| 28 | 1.083 | 1.167 | 1.000 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 29 | 1.000 | 1.000 | 1.083 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 30 | 1.000 | 1.167 | 1.170 | 1.112 | 0.097 | 0.056 |
| 31 | 1.200 | 0.917 | 0.920 | 1.012 | 0.163 | 0.094 |
| 32 | 1.000 | 1.000 | 1.083 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 33 | 0.917 | 1.000 | 0.917 | 0.945 | 0.048 | 0.028 |
| 34 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 35 | 1.083 | 1.083 | 1.000 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 36 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 37 | 1.083 | 1.083 | 1.000 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 38 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 39 | 1.167 | 1.000 | 1.000 | 1.056 | 0.096 | 0.056 |
| 40 | 0.971 | 0.833 | 0.833 | 0.879 | 0.080 | 0.046 |
| 41 | 1.250 | 1.000 | 1.000 | 1.083 | 0.144 | 0.083 |
| 42 | 0.917 | 0.920 | 1.000 | 0.946 | 0.047 | 0.027 |
| 43 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 44 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 45 | 1.167 | 1.000 | 1.083 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 46 | 1.000 | 0.917 | 1.000 | 0.972 | 0.048 | 0.028 |
| 47 | 1.083 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.083 | 0.048 |
| 48 | 1.000 | 0.971 | 1.083 | 1.018 | 0.058 | 0.034 |
| 49 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 50 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 51 | 0.917 | 0.917 | 1.000 | 0.945 | 0.048 | 0.028 |
| 52 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 53 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 54 | 1.083 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.083 | 0.048 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน y (ต่อ)

| ตำแหน่งที่ | ระยะในแนวแกน y (mm) | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
|------------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 55 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 56 | 0.917 | 0.920 | 1.000 | 0.946 | 0.047 | 0.027 |
| 57 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 58 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 59 | 1.167 | 1.000 | 1.083 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 60 | 1.000 | 0.917 | 1.000 | 0.972 | 0.048 | 0.028 |
| 61 | 1.083 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.083 | 0.048 |
| 62 | 1.000 | 0.971 | 1.083 | 1.018 | 0.058 | 0.034 |
| 63 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 64 | 0.917 | 0.920 | 1.000 | 0.946 | 0.047 | 0.027 |
| 65 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 66 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 67 | 1.167 | 1.000 | 1.083 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 68 | 0.917 | 1.000 | 0.917 | 0.945 | 0.048 | 0.028 |
| 69 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 70 | 1.083 | 1.083 | 1.000 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 71 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 72 | 1.083 | 1.083 | 1.000 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 73 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.972 | 0.048 | 0.028 |
| 74 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.972 | 0.048 | 0.028 |
| 75 | 0.971 | 1.083 | 1.000 | 1.018 | 0.058 | 0.034 |
| 76 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 77 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 78 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.972 | 0.048 | 0.028 |
| 79 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 80 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 81 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 82 | 1.000 | 1.000 | 0.837 | 0.946 | 0.094 | 0.054 |
| 83 | 1.170 | 0.837 | 1.000 | 1.002 | 0.167 | 0.096 |
| 84 | 1.083 | 1.083 | 1.000 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 85 | 1.083 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.083 | 0.048 |
| 86 | 1.000 | 1.083 | 1.167 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 87 | 1.083 | 1.083 | 1.083 | 1.083 | 0.000 | 0.000 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน y (ต่อ)

| ตำแหน่งที่ | ระยะในแนวแกน y (mm) | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
|------------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 88 | 1.000 | 1.003 | 1.083 | 1.029 | 0.047 | 0.027 |
| 89 | 1.167 | 1.167 | 1.000 | 1.111 | 0.096 | 0.056 |
| 90 | 1.083 | 1.083 | 1.083 | 1.083 | 0.000 | 0.000 |
| 91 | 1.253 | 1.083 | 1.000 | 1.112 | 0.129 | 0.074 |
| 92 | 1.167 | 1.000 | 1.000 | 1.056 | 0.096 | 0.056 |
| 93 | 1.000 | 1.083 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 94 | 1.000 | 1.000 | 1.083 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 95 | 1.000 | 1.000 | 1.083 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 96 | 1.000 | 1.000 | 1.003 | 1.001 | 0.002 | 0.001 |
| 97 | 1.000 | 1.000 | 1.167 | 1.056 | 0.096 | 0.056 |
| 98 | 0.837 | 1.000 | 1.083 | 0.973 | 0.125 | 0.072 |
| 99 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 100 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.972 | 0.048 | 0.028 |
| 101 | 1.083 | 1.167 | 1.000 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 102 | 1.083 | 1.083 | 1.000 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 103 | 1.003 | 1.083 | 1.000 | 1.029 | 0.047 | 0.027 |
| 104 | 1.167 | 1.000 | 1.003 | 1.057 | 0.096 | 0.055 |
| 105 | 1.083 | 1.083 | 1.000 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 106 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 107 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 108 | 1.083 | 1.000 | 1.003 | 1.029 | 0.047 | 0.027 |
| 109 | 1.000 | 1.000 | 1.003 | 1.001 | 0.002 | 0.001 |
| 110 | 1.000 | 1.000 | 1.167 | 1.056 | 0.096 | 0.056 |
| 111 | 0.837 | 1.000 | 1.083 | 0.973 | 0.125 | 0.072 |
| 112 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 113 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.972 | 0.048 | 0.028 |
| 114 | 1.083 | 1.167 | 1.000 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 115 | 1.083 | 1.083 | 1.000 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 116 | 1.003 | 1.083 | 1.000 | 1.029 | 0.047 | 0.027 |
| 117 | 1.167 | 1.000 | 1.003 | 1.057 | 0.096 | 0.055 |
| 118 | 1.083 | 1.083 | 1.000 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 119 | 1.000 | 1.083 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 120 | 1.000 | 1.003 | 1.083 | 1.029 | 0.047 | 0.027 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน y (ต่อ)

| ตำแหน่งที่ | ระยะในแนวแกน y (mm) | | | ระยะเฉลี่ย | SD | SE |
|------------|---------------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | ครั้งที่ | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 121 | 1.000 | 1.167 | 1.000 | 1.056 | 0.096 | 0.056 |
| 122 | 1.000 | 1.083 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |
| 123 | 1.003 | 1.083 | 1.000 | 1.029 | 0.047 | 0.027 |
| 124 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 125 | 1.167 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 126 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 127 | 1.167 | 1.000 | 1.000 | 1.056 | 0.096 | 0.056 |
| 128 | 1.083 | 0.837 | 1.000 | 0.973 | 0.125 | 0.072 |
| 129 | 1.000 | 1.167 | 1.083 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 130 | 1.000 | 1.083 | 1.003 | 1.029 | 0.047 | 0.027 |
| 131 | 1.000 | 1.083 | 1.167 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 132 | 1.000 | 1.000 | 1.083 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 133 | 1.167 | 1.000 | 1.083 | 1.083 | 0.084 | 0.048 |
| 134 | 1.083 | 1.000 | 1.000 | 1.028 | 0.048 | 0.028 |
| 135 | 1.083 | 1.000 | 1.083 | 1.055 | 0.048 | 0.028 |

ความคลาดเคลื่อนของการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน y โดยทำการทดลองทั้งหมด 135 ตำแหน่ง แบ่งเป็นช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสองช่วง คือ ผลการทดลองในช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่าง 0% ถึง 5% จำนวน 110 ครั้ง คิดเป็น 81.48% และผลการทดลองในช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่าง 5% ถึง 9.6% จำนวน 25 ครั้ง คิดเป็น 18.51% ซึ่งในช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนทั้งสองค่านี้ทั้งหมดเท่ากับ 100% ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10%) ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงความคลาดเคลื่อนของการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน y

| ช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (z) | จำนวนตำแหน่ง | เปอร์เซ็นต์ตำแหน่งที่เกิดความคลาดเคลื่อนในแต่ละช่วง |
|------------------------------------|--------------|---|
| $0\% \leq z < 5\%$ | 110 | 81.48% |
| $5\% \leq z \leq 10\%$ | 25 | 18.51% |

4.1.2.5 สรุปความคลาดเคลื่อนของการทดลองวัดระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

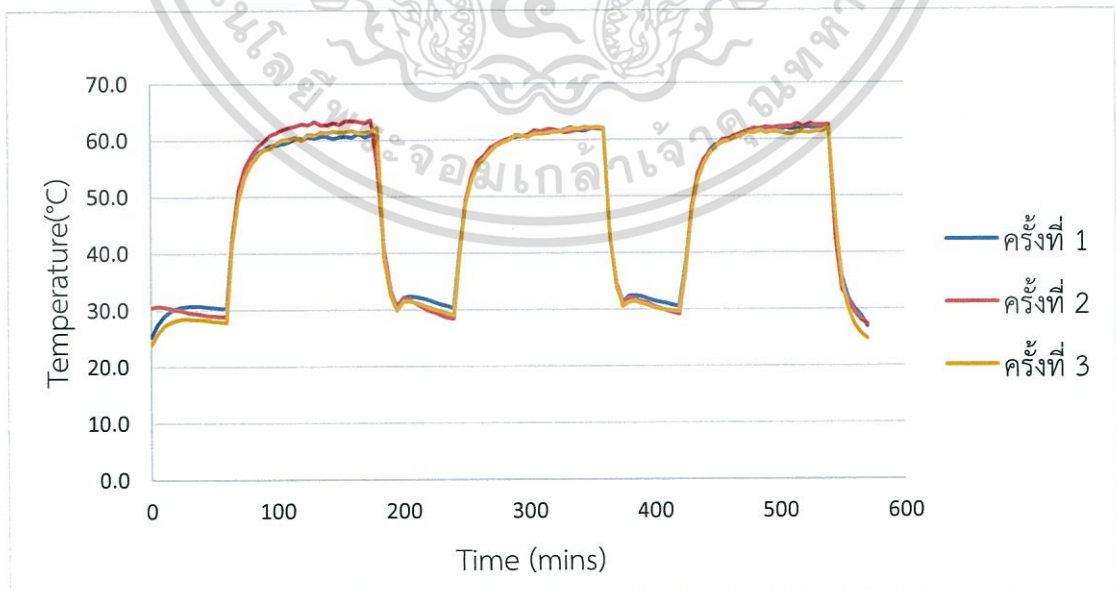
(1) ค่าความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน <math><10\%</math>) อาจเกิดจากความไม่ตั้งของสายพานและการรับน้ำหนักของระบบแกน y น้อยกว่าแกน x ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า

(2) สามารถนำการควบคุมระบบหัววัดไปทดลองหาค่าผลกระทบของตำแหน่งการวัดนับจากขอบของตัวอย่างต่อค่า Correction Factor ได้ โดยสามารถใช้แนวแกน y เป็นแนวการทดลองเปลี่ยนระยะ d (ระยะห่างระหว่างขอบ) ได้ดีกว่าแนวแกน x เนื่องจากมีค่าความถูกต้องและแม่นยำสูงกว่า

4.2 ผลการทดลองการตั้งค่าอุณหภูมิของฐานรองตัวอย่าง

4.2.1 ผลการทดลองการให้ความร้อนจากแหล่งความร้อน PCB Heatbed MK3 ALU

จากการทดลองกำหนดอุณหภูมิเบื้องต้นสองระดับคือ 30°C เป็นเวลา 45 นาที และ 60°C เป็นเวลา 75 นาที ทำให้จำเป็นต้องจ่ายแรงดันที่ 5.8 โวลต์ และ 18.75 โวลต์วัดค่าอุณหภูมิด้วยเครื่อง Pasco Xplorer GLX โดยทดลองวัดซ้ำ 3 ครั้งได้อุณหภูมิสองระดับที่มีลักษณะเป็นรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.5 คือ 30°C และ 60°C ความคลาดเคลื่อนในการทดลองครั้งที่สองอาจเกิดจากอุณหภูมิเริ่มต้นภายนอกที่ไม่เท่ากันและลักษณะคาบของอุณหภูมิที่ระดับ 30°C ของทั้ง 3 ครั้งไม่คงที่ตามที่กำหนดอาจมีผลกระทบมากจากการกำหนดให้พัดลมระบายอากาศถูกเปิดเมื่อครบกำหนดระยะเวลาที่ตั้งไว้สำหรับอุณหภูมิ 60°C โดยจะตั้งเวลาเปิดพัดลมเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิลดลงจนถึง 30°C จากนั้นพัดลมระบายอากาศจะถูกปิดโดยอัตโนมัติเมื่อไม่มีพัดลมระบายอากาศจึงทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง PCB Heat (ฐานรอง) กับอากาศภายในระบบมีน้อยลงอาจส่งผลให้เกิดการแกว่งของอุณหภูมิของฐานรองขึ้นโดยเฉลี่ยในการปรับค่าอุณหภูมิจาก 30°C ไปถึง 60°C จะใช้เวลาประมาณ 30 นาที และการลดอุณหภูมิจาก 60°C ลงมาจนถึง 30°C จะใช้เวลาประมาณ 35 นาที โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน $\pm 5^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองการให้ความร้อนจากการกำหนดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการให้ความร้อนจากการกำหนดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

| เวลา (นาที) | อุณหภูมิที่วัดได้ (°C) | | | เฉลี่ย (°C) | SD | SE |
|----------------|------------------------|------|------|-------------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 0 | 25.3 | 30.5 | 23.9 | 26.6 | 3.5 | 2.0 |
| 5 | 27.5 | 30.7 | 25.9 | 28.0 | 2.4 | 1.4 |
| 10 | 28.9 | 30.6 | 27.2 | 28.9 | 1.7 | 1.0 |
| 15 | 29.8 | 30.4 | 27.9 | 29.4 | 1.3 | 0.8 |
| 20 | 30.3 | 30.1 | 28.3 | 29.6 | 1.1 | 0.6 |
| 25 | 30.6 | 29.9 | 28.5 | 29.7 | 1.1 | 0.6 |
| 30 | 30.7 | 29.6 | 28.5 | 29.6 | 1.1 | 0.6 |
| 35 | 30.7 | 29.5 | 28.4 | 29.5 | 1.2 | 0.7 |
| 40 | 30.7 | 29.3 | 28.4 | 29.5 | 1.2 | 0.7 |
| 45 | 30.6 | 29.1 | 28.3 | 29.3 | 1.2 | 0.7 |
| 50 | 30.5 | 29.0 | 28.1 | 29.2 | 1.2 | 0.7 |
| 55 | 30.4 | 28.9 | 28.0 | 29.1 | 1.2 | 0.7 |
| 60 | 30.3 | 28.9 | 27.9 | 29.0 | 1.2 | 0.7 |
| 65 | 43.5 | 42.8 | 41.9 | 42.7 | 0.8 | 0.5 |
| 70 | 50.6 | 51.3 | 49.5 | 50.5 | 0.9 | 0.5 |
| 75 | 54.3 | 55.1 | 53.5 | 54.3 | 0.8 | 0.5 |
| 80 | 56.5 | 57.1 | 55.7 | 56.4 | 0.7 | 0.4 |
| 85 | 57.8 | 58.8 | 57.2 | 57.9 | 0.8 | 0.5 |
| 90 | 58.4 | 59.8 | 58.3 | 58.8 | 0.8 | 0.5 |
| 95 | 59.0 | 60.9 | 58.6 | 59.5 | 1.2 | 0.7 |
| 100 | 59.2 | 61.3 | 59.5 | 60.0 | 1.1 | 0.7 |
| 105 | 59.4 | 61.9 | 60.1 | 60.5 | 1.3 | 0.7 |
| 110 | 59.7 | 62.2 | 60.2 | 60.7 | 1.3 | 0.8 |
| 115 | 60.3 | 62.5 | 60.6 | 61.1 | 1.2 | 0.7 |
| 120 | 60.3 | 62.9 | 60.0 | 61.1 | 1.6 | 0.9 |
| 125 | 60.6 | 62.7 | 61.1 | 61.5 | 1.1 | 0.6 |
| 130 | 60.4 | 63.3 | 60.9 | 61.5 | 1.6 | 0.9 |
| 135 | 60.7 | 62.7 | 61.5 | 61.6 | 1.0 | 0.6 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4. 5 ผลการทดลองการให้ความร้อนจากการกำหนดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์(ต่อ)

| เวลา (นาที) | อุณหภูมิที่วัดได้ (°C) | | | เฉลี่ย (°C) | SD | SE |
|----------------|------------------------|------|------|-------------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 140 | 60.7 | 62.7 | 61.3 | 61.6 | 1.0 | 0.6 |
| 145 | 60.3 | 63.1 | 61.6 | 61.7 | 1.4 | 0.8 |
| 150 | 60.6 | 62.8 | 61.4 | 61.6 | 1.1 | 0.6 |
| 155 | 60.7 | 63.4 | 61.5 | 61.9 | 1.4 | 0.8 |
| 160 | 60.5 | 63.4 | 61.7 | 61.9 | 1.5 | 0.8 |
| 165 | 61.2 | 63.3 | 61.3 | 61.9 | 1.2 | 0.7 |
| 170 | 60.6 | 63.1 | 61.3 | 61.7 | 1.3 | 0.7 |
| 175 | 60.9 | 63.6 | 61.6 | 62.0 | 1.4 | 0.8 |
| 180 | 61.0 | 55.1 | 62.2 | 59.4 | 3.8 | 2.2 |
| 185 | 39.4 | 40.7 | 39.2 | 39.8 | 0.8 | 0.5 |
| 190 | 33.1 | 33.4 | 32.6 | 33.0 | 0.4 | 0.2 |
| 195 | 30.7 | 30.3 | 29.9 | 30.3 | 0.4 | 0.2 |
| 200 | 32.2 | 32.1 | 31.5 | 31.9 | 0.4 | 0.2 |
| 205 | 32.4 | 31.8 | 31.6 | 31.9 | 0.4 | 0.2 |
| 210 | 32.3 | 31.2 | 31.3 | 31.6 | 0.6 | 0.4 |
| 215 | 32.1 | 30.5 | 30.9 | 31.2 | 0.8 | 0.5 |
| 220 | 31.8 | 29.9 | 30.5 | 30.7 | 1.0 | 0.6 |
| 225 | 31.4 | 29.6 | 30.1 | 30.4 | 0.9 | 0.5 |
| 230 | 31.0 | 29.1 | 29.8 | 30.0 | 1.0 | 0.6 |
| 235 | 30.7 | 28.7 | 29.5 | 29.6 | 1.0 | 0.6 |
| 240 | 30.3 | 28.5 | 29.1 | 29.3 | 0.9 | 0.5 |
| 245 | 40.6 | 39.8 | 39.7 | 40.0 | 0.5 | 0.3 |
| 250 | 49.5 | 49.2 | 48.9 | 49.2 | 0.3 | 0.2 |
| 255 | 53.6 | 53.7 | 52.9 | 53.4 | 0.4 | 0.3 |
| 260 | 55.7 | 56.3 | 55.6 | 55.9 | 0.4 | 0.2 |
| 265 | 57.3 | 57.3 | 56.7 | 57.1 | 0.3 | 0.2 |
| 270 | 58.6 | 58.7 | 58.0 | 58.4 | 0.4 | 0.2 |
| 275 | 59.3 | 59.3 | 59.1 | 59.2 | 0.1 | 0.1 |
| 280 | 59.6 | 59.9 | 59.6 | 59.7 | 0.2 | 0.1 |

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการให้ความร้อนจากการกำหนดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์(ต่อ)

| เวลา (นาที) | อุณหภูมิที่วัดได้ (°C) | | | เฉลี่ย (°C) | SD | SE |
|----------------|------------------------|------|------|-------------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 285 | 60.3 | 60.3 | 60.0 | 60.2 | 0.2 | 0.1 |
| 290 | 60.5 | 60.8 | 60.9 | 60.7 | 0.2 | 0.1 |
| 295 | 60.7 | 60.7 | 60.8 | 60.7 | 0.1 | 0.0 |
| 300 | 60.8 | 61.0 | 60.6 | 60.8 | 0.2 | 0.1 |
| 305 | 61.2 | 61.7 | 61.1 | 61.3 | 0.3 | 0.2 |
| 310 | 61.2 | 61.5 | 61.1 | 61.3 | 0.2 | 0.1 |
| 315 | 61.6 | 61.9 | 61.2 | 61.6 | 0.4 | 0.2 |
| 320 | 61.7 | 61.9 | 61.4 | 61.7 | 0.3 | 0.1 |
| 325 | 61.5 | 61.6 | 61.5 | 61.5 | 0.1 | 0.0 |
| 330 | 61.9 | 61.3 | 61.7 | 61.6 | 0.3 | 0.2 |
| 335 | 62.2 | 61.5 | 62.0 | 61.9 | 0.4 | 0.2 |
| 340 | 61.7 | 61.9 | 62.0 | 61.9 | 0.2 | 0.1 |
| 345 | 61.6 | 62.0 | 62.3 | 62.0 | 0.4 | 0.2 |
| 350 | 62.0 | 62.0 | 62.1 | 62.0 | 0.1 | 0.0 |
| 355 | 62.0 | 62.2 | 62.3 | 62.2 | 0.2 | 0.1 |
| 360 | 61.9 | 62.1 | 62.1 | 62.0 | 0.1 | 0.1 |
| 365 | 42.7 | 42.9 | 42.9 | 42.8 | 0.1 | 0.1 |
| 370 | 34.5 | 34.5 | 34.1 | 34.4 | 0.2 | 0.1 |
| 375 | 31.4 | 31.1 | 30.6 | 31.0 | 0.4 | 0.2 |
| 380 | 32.4 | 32.0 | 31.4 | 31.9 | 0.5 | 0.3 |
| 385 | 32.5 | 31.8 | 31.5 | 31.9 | 0.5 | 0.3 |
| 390 | 32.3 | 31.4 | 31.1 | 31.6 | 0.6 | 0.4 |
| 395 | 31.9 | 31.1 | 30.8 | 31.3 | 0.6 | 0.3 |
| 400 | 31.6 | 30.6 | 30.4 | 30.9 | 0.6 | 0.4 |
| 405 | 31.3 | 30.2 | 30.1 | 30.5 | 0.7 | 0.4 |
| 410 | 31.1 | 29.8 | 29.9 | 30.3 | 0.7 | 0.4 |
| 415 | 30.8 | 29.5 | 29.8 | 30.0 | 0.7 | 0.4 |
| 420 | 30.6 | 29.2 | 29.7 | 29.8 | 0.7 | 0.4 |
| 425 | 37.7 | 36.7 | 36.8 | 37.1 | 0.6 | 0.3 |

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการให้ความร้อนจากการกำหนดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์(ต่อ)

| เวลา (นาที) | อุณหภูมิที่วัดได้ (°C) | | | เฉลี่ย (°C) | SD | SE |
|----------------|------------------------|------|------|-------------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 430 | 48.0 | 48.1 | 47.4 | 47.8 | 0.4 | 0.2 |
| 435 | 53.5 | 53.9 | 52.7 | 53.4 | 0.6 | 0.4 |
| 440 | 56.1 | 56.6 | 55.7 | 56.1 | 0.5 | 0.3 |
| 445 | 58.0 | 57.6 | 57.5 | 57.7 | 0.3 | 0.2 |
| 450 | 59.1 | 58.7 | 58.8 | 58.9 | 0.2 | 0.1 |
| 455 | 59.4 | 60.0 | 59.5 | 59.6 | 0.3 | 0.2 |
| 460 | 60.1 | 60.1 | 59.8 | 60.0 | 0.2 | 0.1 |
| 465 | 60.6 | 60.7 | 60.4 | 60.6 | 0.2 | 0.1 |
| 470 | 61.1 | 61.1 | 60.6 | 60.9 | 0.3 | 0.2 |
| 475 | 61.3 | 61.4 | 61.3 | 61.3 | 0.1 | 0.0 |
| 480 | 61.4 | 62.0 | 61.2 | 61.5 | 0.4 | 0.2 |
| 485 | 61.5 | 61.9 | 61.6 | 61.7 | 0.2 | 0.1 |
| 490 | 61.7 | 62.2 | 61.2 | 61.7 | 0.5 | 0.3 |
| 495 | 61.6 | 62.0 | 61.4 | 61.7 | 0.3 | 0.2 |
| 500 | 61.7 | 62.2 | 61.3 | 61.7 | 0.5 | 0.3 |
| 505 | 62.0 | 62.3 | 61.1 | 61.8 | 0.6 | 0.4 |
| 510 | 61.9 | 62.3 | 60.9 | 61.7 | 0.7 | 0.4 |
| 515 | 61.9 | 62.8 | 61.3 | 62.0 | 0.8 | 0.4 |
| 520 | 62.1 | 62.2 | 61.3 | 61.9 | 0.5 | 0.3 |
| 525 | 62.1 | 62.8 | 61.2 | 62.0 | 0.8 | 0.5 |
| 530 | 62.0 | 62.5 | 61.4 | 62.0 | 0.6 | 0.3 |
| 535 | 62.1 | 62.5 | 61.5 | 62.0 | 0.5 | 0.3 |
| 540 | 61.9 | 62.6 | 62.0 | 62.2 | 0.4 | 0.2 |
| 545 | 45.7 | 42.4 | 46.2 | 44.8 | 2.1 | 1.2 |
| 550 | 35.7 | 33.5 | 34.8 | 34.7 | 1.1 | 0.6 |
| 555 | 31.9 | 31.6 | 30.1 | 31.2 | 1.0 | 0.6 |
| 560 | 30.1 | 29.4 | 27.3 | 28.9 | 1.5 | 0.8 |
| 565 | 28.9 | 28.1 | 25.8 | 27.6 | 1.6 | 0.9 |
| 570 | 27.0 | 27.4 | 24.8 | 26.4 | 1.4 | 0.8 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

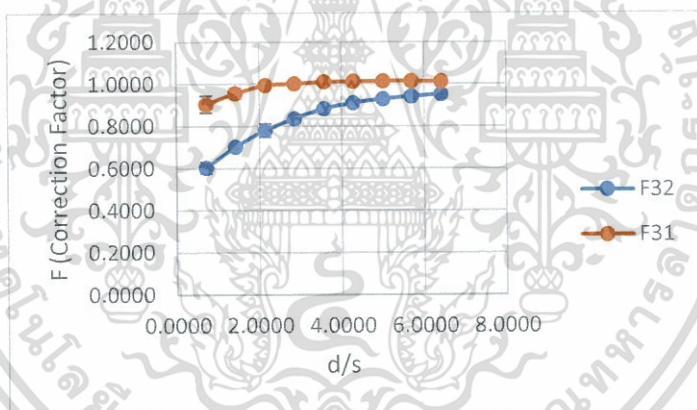
4.3 การทดลองหาค่า correction factor

แสดงค่าปรับตำแหน่งการวางหัววัดเทียบกับขอบของชิ้นงาน โดยกำหนดให้ d เป็นระยะจากขอบชิ้นงานถึงเข็มวัดและ s คือระยะระหว่างเข็มค่า F_3 เป็นค่าแก้ไขความคลาดเคลื่อน (Correction Factor) ที่เกิดจากผลกระทบของตำแหน่งการวัดนับจากขอบของชิ้นงาน พิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะจากขอบของชิ้นงานถึงเข็มวัดกับระยะห่างระหว่างเข็มวัด (D/S) สำหรับชิ้นงานที่มีฐานรองฟิล์ม (Substrate) ที่ไม่นำไฟฟ้า (Non-Conducting Boundary) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า Correction Factor ที่วัดได้จะเป็นไปดังรูปที่ 4.4 และเปรียบเทียบกับค่าจากแหล่งอ้างอิง โดยมีการเปลี่ยนแปลงได้สองรูปแบบขึ้นอยู่กับแนวการวางเข็มวัดเทียบขอบของชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.5

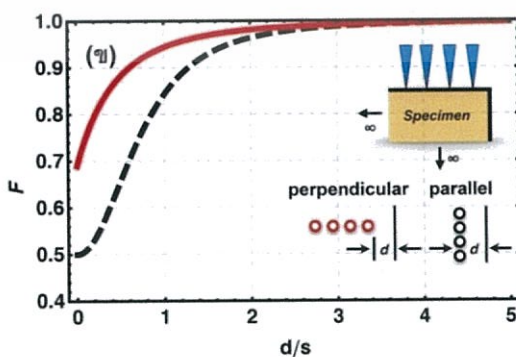
F_{31} กรณีวางแนวของเข็มวัดตั้งฉากกับแนวขอบชิ้นงาน

F_{32} กรณีวางแนวของเข็มวัดขนานกับแนวขอบชิ้นงาน

เมื่อนำระบบการควบคุมหัววัดที่ออกแบบขึ้นมาประยุกต์ใช้ทดสอบหาแนวโน้มของ Correction Factor จากกรวัด 10 ครั้งโดยการวางแนวของเข็มวัดตั้งฉากและขนานกับแนวขอบชิ้นงานได้ผลดังรูปที่ 4.6 ตาราง 4.6 และรูปที่ 4.7 ตารางที่ 4.7 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มสู่เข้าหาค่า 1 เช่นเดียวกัน แสดงว่าสามารถนำระบบที่ออกแบบขึ้นไปใช้ตรวจสอบเงื่อนไขดังกล่าวได้ โดยค่า Correction Factor ที่ได้จะสามารถนำไปใช้หาค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าให้ถูกต้องได้ยิ่งขึ้นต่อไป



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการทดลองหาค่า Correction Factor ในสองกรณี คือกรณีวางแนวของเข็มวัดตั้งฉากกับแนวขอบชิ้นงาน (F_{31}) และกรณีวางแนวของเข็มวัดขนานกับแนวขอบชิ้นงาน (F_{32})

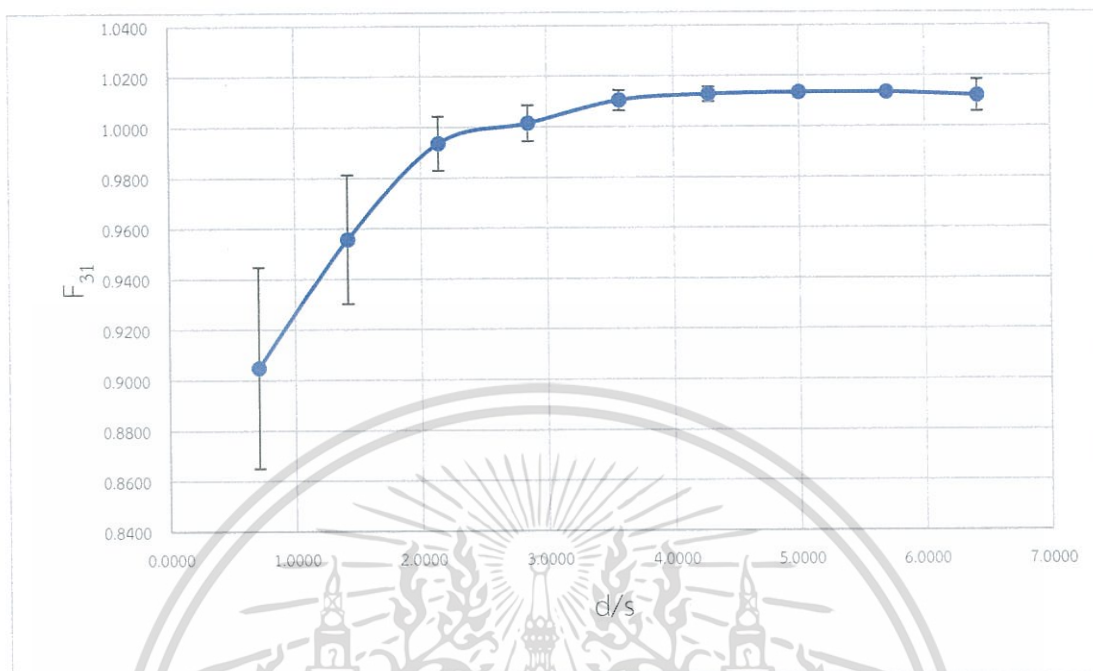


รูปที่ 4.5 แนวโน้มค่า Correction Factor เมื่อวัดใกล้ขอบของชิ้นงานเมื่อวางแนวเข็มหัววัดตั้งฉากและขนานกับขอบของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ผลการทดลองหาแนวโน้มของค่า Correction Factors F_{31}

F_{31} เป็นค่าปรับ กรณีวางแนวของเข็มวัดตั้งฉากกับแนวขอบชิ้นงาน



ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า F_{31} กับ d/s

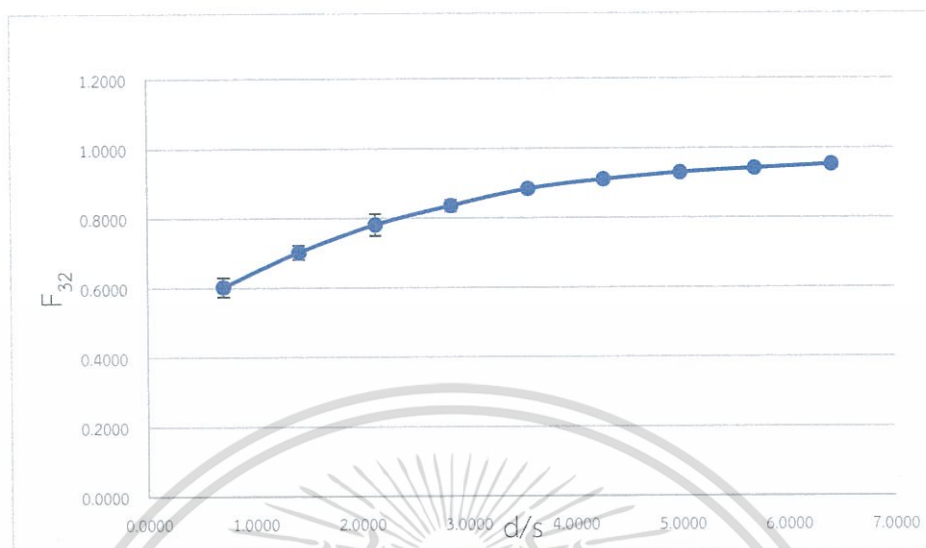
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองหาแนวโน้มของค่า Correction Factors F_{31}

| d/s | F_{31} | | | เฉลี่ย | SD | SE |
|--------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|
| | ครั้งที่1 | ครั้งที่2 | ครั้งที่3 | | | |
| 0.7100 | 0.8711 | 0.8945 | 0.9489 | 0.9048 | 0.0399 | 0.0230 |
| 1.4200 | 0.9360 | 0.9466 | 0.9845 | 0.9557 | 0.0255 | 0.0147 |
| 2.1400 | 0.9996 | 0.9813 | 0.9999 | 0.9936 | 0.0107 | 0.0062 |
| 2.8500 | 0.9966 | 0.9982 | 1.0096 | 1.0015 | 0.0071 | 0.0041 |
| 3.5700 | 1.0070 | 1.0096 | 1.0148 | 1.0105 | 0.0040 | 0.0023 |
| 4.2800 | 1.0150 | 1.0095 | 1.0139 | 1.0128 | 0.0029 | 0.0017 |
| 5.0000 | 1.0140 | 1.0149 | 1.0112 | 1.0134 | 0.0019 | 0.0011 |
| 5.7000 | 1.0140 | 1.0131 | 1.0131 | 1.0134 | 0.0005 | 0.0003 |
| 6.4200 | 1.0150 | 1.0048 | 1.0163 | 1.0120 | 0.0063 | 0.0036 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดลองหาแนวโน้มของค่า Correction Factors F_{32}

F_{32} เป็นค่าปรับ กรณีวางแนวของเข็มวัดขนานกับแนวขอบชิ้นงาน



ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า F_{32} กับ d/s

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองหาแนวโน้มของค่า Correction Factors F_{32}

| d/s | F ₃₂ | | | เฉลี่ย | S.D. | S.E. |
|--------|-----------------|-----------|-----------|--------|--------|--------|
| | ครั้งที่1 | ครั้งที่2 | ครั้งที่3 | | | |
| 0.7100 | 0.5710 | 0.6176 | 0.6198 | 0.6028 | 0.0276 | 0.0159 |
| 1.4200 | 0.6840 | 0.6994 | 0.7243 | 0.7026 | 0.0203 | 0.0117 |
| 2.1400 | 0.7940 | 0.7454 | 0.8033 | 0.7809 | 0.0311 | 0.0180 |
| 2.8500 | 0.8548 | 0.8247 | 0.8269 | 0.8355 | 0.0168 | 0.0097 |
| 3.5700 | 0.8904 | 0.8709 | 0.8894 | 0.8836 | 0.0110 | 0.0063 |
| 4.2800 | 0.9132 | 0.9000 | 0.9162 | 0.9098 | 0.0086 | 0.0050 |
| 5.0000 | 0.9331 | 0.9231 | 0.9316 | 0.9293 | 0.0054 | 0.0031 |
| 5.7000 | 0.9430 | 0.9373 | 0.9432 | 0.9412 | 0.0034 | 0.0019 |
| 6.4200 | 0.9530 | 0.9497 | 0.9539 | 0.9522 | 0.0022 | 0.0013 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เพื่อควบคุมระบบการเลือกตำแหน่งของหัววัดสำหรับเครื่องโฟร์พอยท์โพรบที่ใช้วัดค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำในรูปแบบฟิล์มโดยใช้สเต็ปมอเตอร์ที่มีความแม่นยำสูงในระดับมิลลิเมตรและใช้โปรแกรม Universal G-Code Sender เป็นตัวแปล G-Code ที่ใช้ในระบบให้สะดวกต่อการควบคุมและใช้งาน จากการทดสอบเลื่อนตำแหน่งการวัดครั้งละ 1 มิลลิเมตร ในแนวแกน X และ แกน Y ตามลำดับ ให้ข้อสรุปว่า

1. แกน X มีค่าเฉลี่ยของตำแหน่งการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.009 มิลลิเมตร จากการวัดทั้งหมด 180 ครั้ง และมีค่าเฉลี่ยของค่า SE เท่ากับ 0.076

2. แกน Y มีค่าเฉลี่ยของตำแหน่งการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.028 มิลลิเมตร จากการวัดทั้งหมด 135 ครั้ง และมีค่าเฉลี่ยของค่า SE เท่ากับ 0.036

จากผลข้อมูลการทดสอบระบบวัดแกน Y สามารถทำงานได้แม่นยำกว่าแกน X เนื่องจากแกน X ต้องรับน้ำหนักของแผ่นให้ความร้อนและระยะของสายพานที่มีความยาวและมีความตึงสูงทำให้สเต็ปมอเตอร์มีโหลดมากและเกิดเป็นผลความผิดพลาด

ฐานรองชิ้นงานของเครื่องโฟร์พอยท์โพรบสามารถควบคุมการให้ความร้อนของ PCB Heatbed MK3 ALU โดยการควบคุมการจ่ายค่าความต่างศักย์ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino แบบเป็นคาบ โดยเบื้องต้นกำหนดให้มีอุณหภูมิสองระดับ คือ 30 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาหาความต้านทานที่มีผลกับอุณหภูมิโดยมีความค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรรวมระบบวัดค่าความต้านทาน และการรายงานผลอุณหภูมิให้สามารถทำงานร่วมกันในเครื่องเดียว เพื่อสะดวกในการรายงานผล และวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนิดของสารกึ่งตัวนำ. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก
[:http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet7/phy3_1.htm](http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet7/phy3_1.htm)
- [2] นันทนัช วัฒนสุภิญญา. 2553. “สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม เตรียมโดยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง”. (ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ)
- [3] สารกึ่งตัวนำ. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://meixviii.blogspot.com/2012/03/2.html>
- [4] สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (STEPPER MOTOR). ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
http://www.adisak51.com/home/step_motor.pdf
- [5] สเต็ปมอเตอร์ (STEPPING MOTOR). ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
https://www.nectec.or.th/schoolnet/library/webcontest2003/100team/dlnes137/am/step_motor.html
- [6] Alan Doolittle. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://alan.ece.gatech.edu/ECE4813/Lectures/Lecture2ResistivityAndSheetResistance.pdf>
- [7] EAK ELECTRONIC. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.eak-electronic.com/>
- [8] Fluorine doped Tin Oxide (FTO) Glass. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=106837645>
- [9] I Miccoli, F Edler, H Pfnür and C Tegenkamp. The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems. 2015. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/27/22/223201>
- [10] J.C. Li,* Y. Wang, D.C. Ba. 2012. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<file:///C:/Users/Grace/Downloads/Characterization%20of%20semiconductor%20surface%20conductivity%20by%20using%20microscopic%20four-point%20probe%20technique.pdf>
- [11] Jumpstartinnovation.Technology for Agriculture Project. 2013. [online]. เข้าถึงได้จาก : <http://jumpstartinnovation.blogspot.com/2013/07/blog-post.html>
- [12] Nonglantayai1. 2013. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.cncroom.com/forum/index.php/topic,3426.0.html>
- [13] Relay. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Reprap Magazine Practical exploration of 3D printing. [online]. เข้าถึงได้จาก :
reprapmagazine.com
- [15] Robotics & Electronics. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<https://www.pololu.com/product/1182>
- [16] CNC (Computer Numerical Control) [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://cncprog.blogspot.com/p/cnc-machine.html>
- [17] Fused Deposition Modeling (FDM). [online]. เข้าถึงได้จาก :
<https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

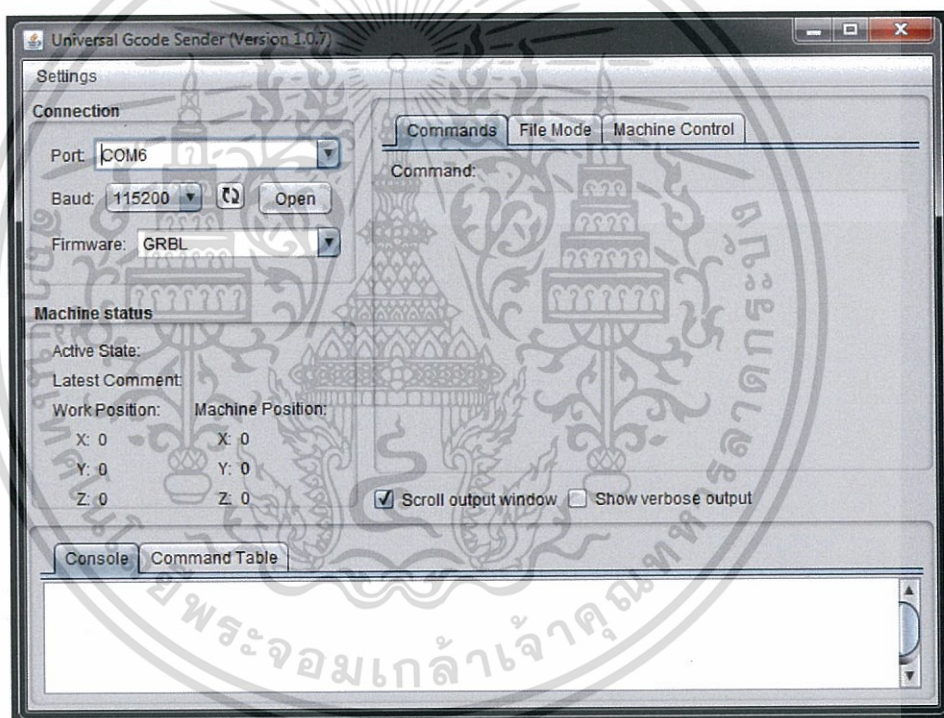
ภาคผนวก ก

วิธีการใช้โปรแกรม Universal G-code Sender เป็นโปรแกรมที่ทำหน้าที่แปลงระยะที่ผู้ใช้งานต้องการไปยังตำแหน่งวัดต่าง ๆ และทิศทางของการเคลื่อนที่

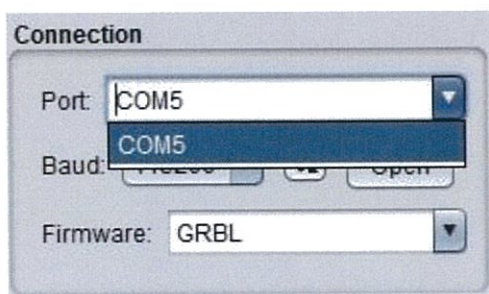
1. เปิดโปรแกรม Universal G-code Sender



2. และจะพบกับหน้าต่างดังรูป

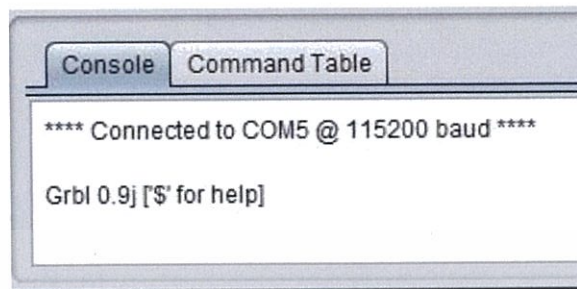


3. คลิก Port และเลือก COM... ที่ USB ทำการติดต่อกับเครื่อง 4PP จากนั้น กด Open

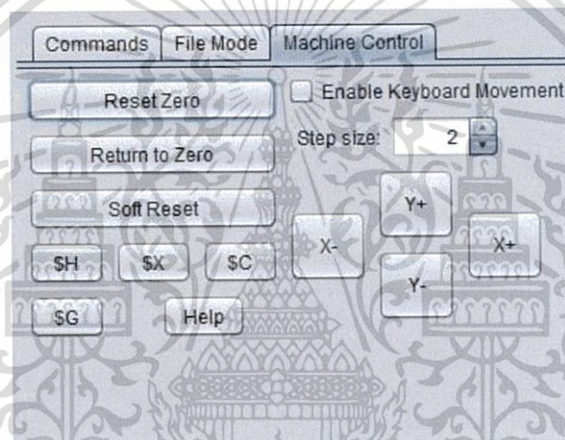


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

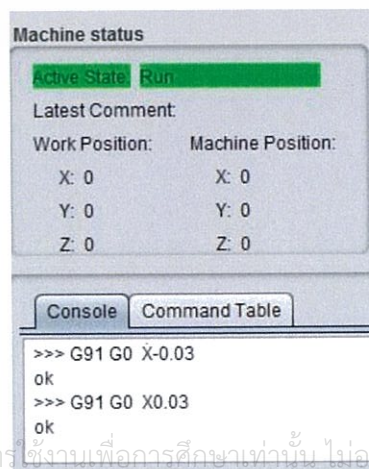
4. จากนั้นโปรแกรมจะแสดงการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมกับบอร์ดควบคุมเป็นข้อความ
Connected to COM @ 115200 baud



5. ลำดับต่อไปเลือก Machine Control จะปรากฏหน้าต่างตามภาพ



6. ใส่ระยะที่ต้องการต่อการกด 1 ครั้ง ที่ Step Size : และเลือกทิศทางที่ต้องการให้หัววัดเคลื่อนที่ไปมี 6 ปุ่มคำสั่งประกอบไปด้วย x+ , x- , y+ , y- , z+ และ z- เมื่อกดปุ่มคำสั่งจะมีแถบสีเขียวขึ้นเพื่อแสดงการส่งชุดคำสั่งไปยังตัวควบคุมทาบ Active State. Run (สามารถปรับค่าสูงสุดได้ 2 เพื่อความปลอดภัยของเครื่องจะได้รับความเสียหายได้)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้