สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาระบบการวัดแบบอัตโนมัติ สำหรับเครื่องวัดความหนาฟิล์มบาง ชนิดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

T058704

นายชัชชัย พรหมศาสตร์
นายนิธิ อาศุศิริ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

ฟส.
สว353ก
ช548ก

เลขหมู่
เลขทะเบียน 58704
วัน,เดือน,ปี 31 ส.ค. 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Development of Automation for spectrophotometer thin film thickness Measurement tool

Chatchai Pomsat

Nithi Arsusiri

A special Project Submitted in Partal Fulfillment of the Requiirement for the Degree of

Bechelor of Science

Department of Applied physics

Faculty of Science

King Mongkut'sInstitute of Technology Ladkrabang

Academic 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง การพัฒนาระบบการวัดแบบอัตโนมัติ สำหรับเครื่องวัดความหนาฟิล์มบาง ชนิดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

นักศึกษา นายชัชชัย พรหมศาสตร์

นายนิธิ อาศุศิริ

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สุวัฒน์ โสภิตพันธ์

นายโกวิท โซวสุวรรณ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้ โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ดร.ปิติพร ถนอมงาม	
กรรมการ	ผศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
กรรมการ	อ.สุรชาติ กมลดิลก	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.สุวัฒน์ โสภิตพันธ์	
	นายโกวิท โซวสุวรรณ	

.....

(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง การพัฒนาระบบการวัดแบบอัตโนมัติ สำหรับเครื่องวัดความหนาฟิล์มบาง ชนิดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

นักศึกษา นายชัชชัย พรหมศาสตร์

นายนิธิ อาศุศิริ

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ **คณะวิทยาศาสตร์**

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา 2547

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สุวัฒน์ โสภิตพันธ์

นายโกวิท โชวสุวรรณ

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้นำเสนอการควบคุมแท่นวางชิ้นงานของเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์.ซึ่งเดิมเป็นระบบเลื่อนด้วยมือโดยเปลี่ยนมาใช้สเต็ปปิ้งมอเตอร์เพื่อควบคุมแท่นวางชิ้นงานให้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอัตโนมัติ.ซึ่งจะช่วยให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการตรวจวัดแบบหลายจุดและมีชิ้นงานจำนวนมาก.สเต็ปปิ้งมอเตอร์ถูกควบคุมผ่านทางพอร์ตขนานของเครื่องคอมพิวเตอร์โปรแกรมควบคุมถูกเขียนขึ้นด้วยภาษาวิชวลเบสิกโดยมีกล่องควบคุมเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องวัด การทำงานของเครื่องควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบควบคุมด้วยมือ และระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ.

ผลการทำงานของเครื่องควบคุมนี้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่โดยมีความละเอียดในแนวแกนเอ็กซ์เท่ากับ 1.05 ไมโครเมตรและในแนวแกนวายเท่ากับ 1.42 ไมโครเมตร.ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกนเอ็กซ์เท่ากับ 0.15 เปอร์เซ็นต์ต่อการเคลื่อนที่แต่ละครั้งและในแนวแกนวายเท่ากับ 0.39 เปอร์เซ็นต์ต่อการเคลื่อนที่แต่ละครั้ง.โดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้มาจากการลื่นไถลช่วงสั้นๆระหว่างสายพานกับแกนหมุนของแท่นวางชิ้นงานซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Development of Automation for Spectrophotometer Thin Film Thickness Measurement Tool
Name	Chatchai Pomsat
	Nithi Arsusiri
Department	Applied Physics Faculty of Science
Program	Applied Physics
Academic Year	2004
Special project Adviser	Assoc.Prof.Dr.Jiti Nookeaw
Special project Co. Adviser	Dr.Suwat Sopitpan
	Mr.Kowit Sowsuwan

Abstract

This special project presents an Automatic Spectrophotometer State Controller, using stepping motor. The controller is connected to a computer via a parallel port. The controlling program, written in Visual basic, can control the X-Y state for multi point measurement. It has benefit for an operator to measure more samples with higher throughput. The controller can be switched in manual control mode.

The state resolution is 1.05 micrometer in X - axis and 1.43 micrometer in Y – axis. Error values per moving strokes in X - Y axis are 0.15 percent and 0.39 percent, consequence these are effect from mechanical part, which are accepted in this application

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้า นายชัชชัย พรหมศาสตร์ และ นายนิธิ อาศุศิริ นักศึกษาทำโครงงาน จาก สาขาโซลิดสเตทอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้เข้ารับการฝึกอบรมในหน่วยงาน Equipment Engineer ณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ Thai Microelectronics Center (TMEC) ระหว่างวันที่ 16 มิถุนายน พ.ศ. 2547 ถึงวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2548 ซึ่งได้รับมอบหมายให้ทำโครงงานทางด้านการการพัฒนาระบบการวัดแบบอัตโนมัติ สำหรับเครื่องวัดความหนาฟิล์มบางชนิดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

การฝึกอบรมและการเขียนรายงานในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ก็เพราะได้รับความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ดังนี้

1. ดร. อิทธิ ฤทธาภรณ์ ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่เห็นเล็งเห็นความสำคัญของระบบการศึกษา และได้ให้โอกาสที่มีคุณค่ายิ่งแก่ข้าพเจ้า
2. รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว หัวหน้าศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. ดร.สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ นักวิจัย 2
4. นายโกวิท โชวสุวรรณ ผู้ช่วยนักวิจัย

และขอขอบคุณทีมงานทุกฝ่าย ตลอดจนบุคคลท่านอื่นๆ ที่มิได้กล่าวนาม ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำ, ปรึกษาและติดตามการดูแลปฏิบัติงานให้สำเร็จลงได้ด้วยดีมาตลอด ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณทุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

นายชัชชัย พรหมศาสตร์
นายนิธิ อาศุศิริ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา, ที่มาของปัญหา และแนวทางการแก้ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย และวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ทฤษฎีและหลักการทางแสง	3
2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)	3
2.1.2 ทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ (Transfer Matrix)	6
2.1.3 ค่าความสะท้อนในกรณีที่แสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวรอยต่อ	12
2.2 พอร์ตขนาน (Parallel Port)	15
2.2.1ความรู้เบื้องต้นของพอร์ตขนาน	15
2.2.1.1 พอร์ตดาต้า (Data Port)	16
2.2.1.2 พอร์ตคอนโทรล (Control Port)	17
2.2.1.3 พอร์ตแสดงสถานะหรือพอร์ตสเตตัส (Status)	19
2.2.2 การนำพอร์ตขนานไปใช้งาน	19
2.3 สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor)	20
2.3.1 ความรู้เบื้องต้นของสเตปปิ้งมอเตอร์	20
2.3.1.1 วิธีการวัดหาปลายของขดลวด	20
2.3.2 หลักการทำงานของสเต็ปปิ้งมอเตอร์	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.3 การพันขดลวดหรือคอยล์บนสเต็ปปิ้งมอเตอร์ 23

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ทำไมถึงเลือกใช้พอร์ตขนาน 25

3.2 ทำไมถึงเลือกใช้สเต็ปปิ้งมอเตอร์ 25

3.3 การติดตั้งสเต็ปปิ้งมอเตอร์ 26

3.4 วิธีการติดตั้งเซนเซอร์ 35

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ศึกษาการเคลื่อนที่ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ 37

4.1.1 จุดประสงค์การทดลอง 37

4.1.2 วิธีการทดลอง 37

4.1.3 ผลการทดลอง 38

4.1.4 วิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของระยะทางที่น้อยสุดของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ 44

4.1.1 แกนเอ็กซ์ 44

4.1.2 แกนวาย 44

4.1.5 สรุปผลการทดลอง 44

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 ผลสรุป 45

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 45

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

ก.คู่มือการใช้งานระบบวัดแบบอัตโนมัติ 48

ข.วงจรสมบูรณ์ของกล่องควบคุม 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สถานะของขาคอนเนคเตอร์	17
3.1	การปรับดิฟสวิทช์ในการเซตความละเอียดของไมโครสเต็ป	34
4.1	การทดลองการส่งพัลส์ทางแกน X	38
4.2	การทดลองการส่งพัลส์ทางแกน Y	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.2	การสะท้อนของแสงจากฟิล์มบางชั้นเดียว	7
2.3	กราฟระหว่างค่าความสะท้อนกับความยาวคลื่น	14
2.4	พอร์ตดาต้า	16
2.5	ลักษณะการต่อขาของสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบต่างๆ	21
2.6	การพันขดลวดบนสเตเตอร์ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์	23
2.7	วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ทั้ง 2 แบบ	24
3.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบทั้งหมด	27
3.2	ชุดอินเตอร์เฟสพอร์ตขนาน	28
3.3	ลักษณะปุ่มกดสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่	28
3.4	ลักษณะของตัวหมุนเดิมในเครื่องวัด	29
3.5	ชุดขับเคลื่อนที่จะนำไปติดเข้ากับแท่น	29
3.6	การติดตั้งสเต็ปปิ้งมอเตอร์กับแท่นเลื่อน	30
3.7	ลักษณะของโมดูลขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว	30
3.8	ลักษณะโดยรวมของชุดควบคุม	31
3.9	วงจรสมบูรณ์ของวงจรอินเตอร์เฟสพอร์ตขนาน	32
3.10	การต่อสายสัญญาณเข้ากับโมดูลอย่างละเอียด	33
3.11	รูปจำลองและรูปจริงของเซนเซอร์แบบแสง	35
3.12	ข้อมูลของพอร์ตสเตตัสที่ตำแหน่งต่างๆ	36
4.1	ช่วงค่าความผิดพลาดของสายพานทางแกน X	40
4.2	ช่วงค่าความผิดพลาดของสายพานทางแกน Y	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา, ที่มาของปัญหา และแนวทางการแก้ปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านการตรวจสอบคุณภาพความหนาของชิ้นสาร มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อนำไปพัฒนา ระบบ และเทคนิคการปลูกฟิล์มบาง (Thin Film) ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ทำการตรวจวัดคือเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ เป็นเครื่องที่ใช้วัดความหนาของฟิล์มบาง (Thin film thickness) โดยใช้หลักการทางแสงมาทำการวิเคราะห์ และทำการยิงแสงที่มีความยาวคลื่นแต่ละค่ามายังชิ้นงาน จากนั้นเครื่องจะตรวจวัดค่าการสะท้อนแสงก่อนที่จะนำมาทำการวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงาน

ในปัจจุบัน แท่นวางชิ้นงาน (State) ของเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ เป็นการวัดแบบเลื่อนตำแหน่งด้วยมือ (Manual) ซึ่งเป็นการยากที่จะทำการวัดหลายๆจุดในชิ้นสารเดียวกันและไม่มีความแม่นยำพอสำหรับการที่จะตรวจวัดที่จุดเดิม จึงต้องใช้โปรแกรมวิชวลเบสิก (Visual Basic) มาควบคุมระบบ สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor) โดยควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกนเอ็กซ์-วาย (X-Y) จากคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน (Parallel Port) เพื่อทำให้การตรวจวัดชิ้นงานมีคุณภาพเพิ่มมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของระบบต่างๆในเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

1.2.2 เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรมวิชวลเบสิก (Visual Basic)

1.2.3 เพื่อพัฒนาเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ให้เคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ (Auto) โดยมีความแม่นยำพอสำหรับการตรวจวัดที่จุดเดิม

1.2.4 เพื่อทำการออกแบบและติดตั้งระบบควบคุมการเลื่อนของแท่นวางชิ้นงาน (State)

1.2.5 เพื่อทำการวัดชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอรที่ทำการพัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์(Spectrophotometer) โดยใช้โปรแกรมวิชวลเบสิก (Visual Basic) และทำการออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมแท่นวางชิ้นงาน (State) ให้เคลื่อนที่ในแนวเอ็กซ์-วาย (X-Y) และทำการวัดความหนาของฟิล์มบางตัวอย่าง (Thin film thickness) กับเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

1.4 ขั้นตอนการวิจัย และวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาโปรแกรมที่นำมาใช้ในการดำเนินงานได้แก่ โปรแกรมวิชวลเบสิก (Visual Basic) เพื่อควบคุมการเลื่อนของแท่นวางชิ้นงาน (State)

1.4.2 ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

1.4.3 ทำการออกแบบอุปกรณ์ในการติดตั้งสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor)

1.4.4 ทำการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อพัฒนาการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

1.4.5 ทำการเชื่อมต่อและทดสอบการเคลื่อนที่ กับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตขนาน (Parallel Port)

1.4.6 ทำการวัดความหนาของฟิล์มบาง (Thin film thickness) โดยใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความเข้าใจในหลักการของเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

1.5.2 มีความรู้ในการเขียนโปรแกรมวิชวลเบสิก (Visual Basic) ที่ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆได้

1.5.3 มีความรวดเร็วและความแม่นยำในการตรวจวัด

1.5.4 รู้จักการทำงานอย่างเป็นระบบและทำให้สามารถทำงานร่วมกับผู้อื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีและหลักการทางแสง

แสงมีสมบัติที่เป็นทั้งคลื่นและอนุภาค (Wave - particle duality) ซึ่งสมบัติทางอนุภาคสามารถใช้พิจารณาในเรื่องที่แสงมีอันตรกิริยากับสสาร สำหรับสมบัติทางคลื่น สามารถใช้พิจารณาในเรื่องการเคลื่อนที่และปรากฏการณ์การแทรกสอด การเลี้ยวเบน และในหัวข้อนี้จะเป็นการพิจารณาถึงปรากฏการณ์สะท้อนของแสง ที่สามารถวิเคราะห์หาความหนาของฟิล์มได้

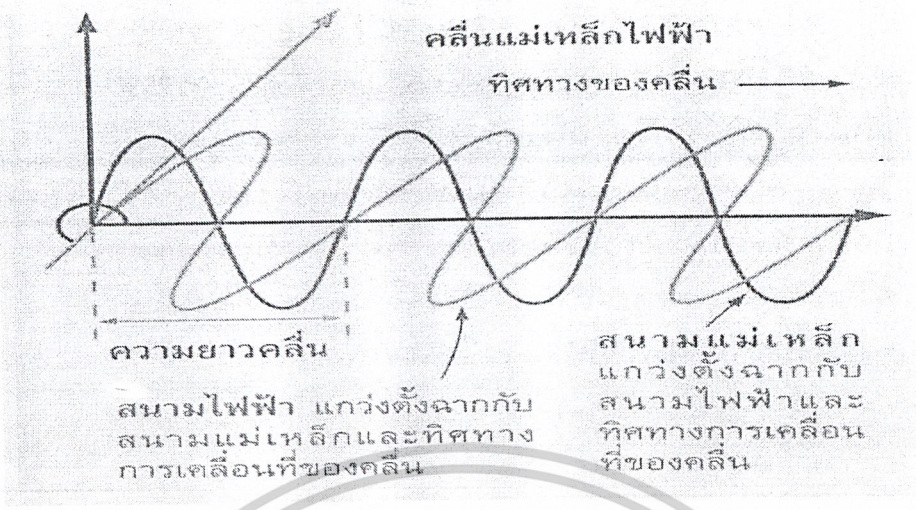
2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแต่ละที่ อาจมีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว (Monochromatic) หรืออาจมีความยาวคลื่นหลายค่า (polychromatic) และกรณีที่มีหลายค่านี้อาจอยู่ในลักษณะที่ต่อเนื่อง หรือไม่ต่อเนื่องก็ได้ เราเรียกการกระจายของความยาวคลื่น (หรือพลังงาน) นี้ว่าสเปกตรัม (spectrum) ของคลื่น ในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีชื่อเรียกหลายชื่อขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นหรือความถี่ ค่าความยาวคลื่น λ และความถี่ ν ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$c = \lambda\nu \tag{2.1}$$

คลื่นที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศ จะมีอัตราเร็วของคลื่น c มีค่า 3×10^8 เมตรต่อวินาที ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 380 ถึง 770 นาโนเมตร เป็นช่วงของแสง หรือช่วงที่ทำให้เกิดการมองเห็น (visible region) แสงช่วงนี้อยู่ระหว่างแสงในช่วงที่มองไม่เห็น 2 ช่วงคือ อัตราไวโอเลต (ultraviolet) และอินฟราเรด (infrared)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมการที่แทนการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแทนการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B ดังรูปที่ 2.1 ระนาบของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกันและตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นหรือ k และจะเขียนได้ว่า

$$E = E_0 e^{i(h.r-\omega t)} \tag{2.2}$$

และ

$$E = B_0 e^{i(h.r-\omega t)} \tag{2.3}$$

คลื่นทั้งสองนี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วและความถี่เดียวกัน โดยที่ E_0 และ B_0 เป็นขนาดของแอมปลิจูลของคลื่นทั้งสอง และมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$E_0 = cB_0 \tag{2.4}$$

และ

$$E = \frac{c}{n} B \tag{2.5}$$

โดยที่ค่าอัตราเร็วของคลื่นในสุญญากาศ c มีค่า

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ε_0 เป็น Permittivity มีค่าเท่ากับ 8.8542 x 10^{-12} $(C\text{-}s)^2/kg\text{-}m^2$ ส่วน μ_0 เป็น Permeability มีค่าเท่ากับ 4π x 10^{-7} kg-m/s^2 และจะทำให้ได้ค่าอัตราเร็ว c เท่ากับ 2.999 x 10^8 m/s คลื่นดังกล่าวจะส่งผ่านพลังงานจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งโดยมีความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) ที่สัมพันธ์สนามไฟฟ้าเป็น

$$\mu_E = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 \qquad (2.7)$$

และความหนาแน่นของพลังงาน ที่สัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กเป็น

$$\mu_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \qquad (2.8)$$

จากสมการ (2.4) ถึง (2.8) สามารถแสดงได้ว่า

$$\mu_E = \mu_B$$

ดังนี้ ความหนาแน่นของพลังงานทั้งหมด

$$\mu = 2\mu_E \qquad (2.9)$$

$$\mu = 2\mu_B \qquad (2.10)$$

$$\mu = \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{\mu_0} B^2 = \varepsilon_0 cEB \qquad (2.11)$$

ในการพิจารณาอัตราการส่งพลังงานหรือกำลัง (Power) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงเวลา Δt ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด A

$$\text{กำลัง} = \mu \Delta v / (\Delta t) = \mu cA \qquad (2.12)$$

กำลังที่ส่งผ่านพลังงานต่อหนึ่งพื้นที่หรือ S จะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \mu c \tag{2.13}$$

เมื่อแทนค่า μ ตามสมการ (2.11) จะได้

$$S = E^2 cEB \tag{2.14}$$

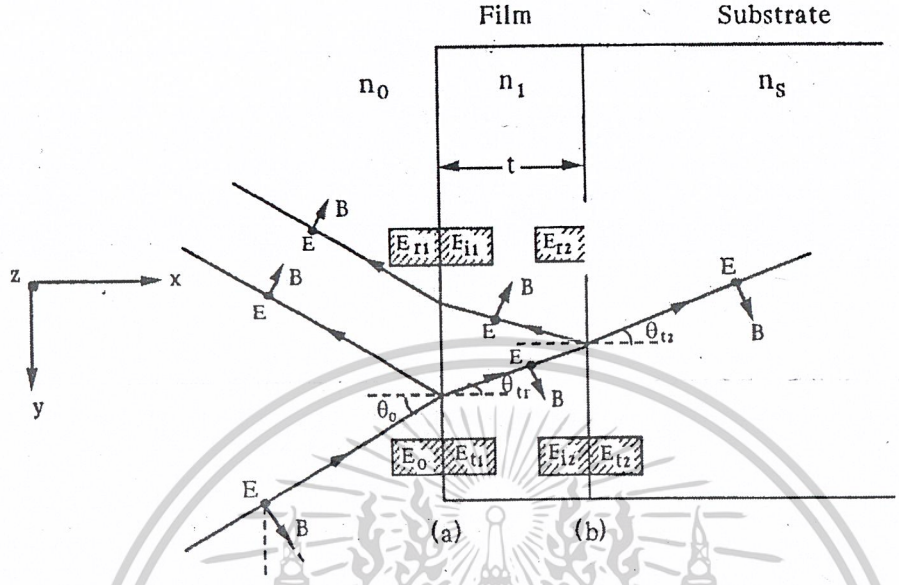
ค่า S นี้คือ Pointing vector และทิศทางนั้นจะเหมือนกับทิศที่ได้จากการทำครอสโปรดัก (Cross product) ของ E กับ B นั่นคือ

$$S = \varepsilon_0 c^2 E \times B \tag{2.15}$$

2.1.2 **ทรานส์เฟอร์เมทริกซ์** (Transfer matrix)

ในการวิเคราะห์เพื่อหาทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ (Transfer matrix) นี้จะทำโดยอาศัยปริมาณต่าง ๆ ตามที่กำหนดในรูปที่ 2.2 ลำแสงตกกระทบที่แสดงในรูปมีสนามไฟฟ้า E ในทิศตั้งฉากกับระนาบของแสงตกกระทบ (ในที่นี้คือระนาบของกระดาษ) (ในกรณีที่แสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวรอยต่อ หรือ $\theta_0 = 0$ เราจะไม่สามารถแยกความแตกต่างของสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับที่ขนานกับระนาบแสงตกกระทบได้) ลำแสงตกกระทบจะเกิดการสะท้อนที่ผิวรอยต่อ (a) ระหว่างตัวกลางภายนอก ที่มีดัชนีหักเห n_0 กับฟิล์มบางของสารไดอิเล็กตริก ที่มีดัชนีหักเห n_1 ขณะเดียวกับแสงอีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านเข้าไปในฟิล์มและเกิดการสะท้อนที่ผิวรอยต่อ (b) ระหว่างฟิล์มกับฐานรองที่มีดัชนีหักเห n_S ตามแนวของลำแสงนั้น แสดงสนามไฟฟ้าไว้ในลักษณะจุด เพื่อแทนทิศชี้ขึ้นตั้งฉากกับกระดาษ หรือทิศ –Z และสนามแม่เหล็กแสดงในลักษณะที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า เมื่อมีการสะท้อน สนามแม่เหล็กในแนวแกน Y จะมีการกลับทิศ สำหรับช่องสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ที่ผิวรอยต่อทั้งสอง แสดงขนาดของสนามไฟฟ้า เช่น E_{r1} แทนผลรวมของลำแสงสะท้อนทั้งหมดที่ผิวรอยต่อ (a) ขณะออกมาจากฟิล์ม และ E_{i2} แทน ผลรวมของลำแสงที่ผิวรอยต่อ (b) ซึ่งมุ่งเข้าสู่ฐานรอง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การสะท้อนของแสงจากฟิล์มบางชั้นเดียว จุด ● ในรูปใช้แทนลูกศรชี้ขึ้นและมีทิศทางตั้งฉากกับกระดาษ

ถ้าเราสมมุติให้ฟิล์มนี้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมมาตรในทุกทิศทาง (Isotropic) และความหนาของฟิล์มนี้อยู่ในช่วงของความยาวคลื่นแสง ดังนั้นระยะแตกต่างของทางเดินแสง หรือ OPD ของแสงสะท้อนและแสงส่งผ่านทั้งหลายจะมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับความยาวอาพันธ์ (Coherence length) ของแสงความถี่เดียว

เงื่อนไขที่บริเวณรอยต่อ (Boundary conditions) สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นระนาบที่ตกกระทบที่ผิวรอยต่อ (a) และ (b) นี้กำหนดอย่างง่าย ๆ ว่า องค์ประกอบในแนวเส้นสัมผัส (Tangent components) ของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กที่ผิวรอยต่อมีค่าต่อเนื่องข้ามผิวรอยต่อนั้น นั่นคือขนาดของสนามที่ทั้งสองด้านของผิวรอยต่อมีค่าเท่ากัน สำหรับในกรณีของรูปที่ 2.2 สนามไฟฟ้าจะมีทิศในแนวเส้นสัมผัสของผิวรอยต่อโดยตลอดทั้งที่ผิวรอยต่อ (a) และ (b) ในขณะที่สนามแม่เหล็กจะมีทั้งองค์ประกอบในแนวเส้นสัมผัส (ทิศ Y) และในแนวตั้งฉาก (ทิศ X) ดังนั้นเงื่อนไขที่ผิวรอยต่อของสนามทั้งสองจึงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_a = E_0 + E_{r1} = E_{t1} + E_{i1} \tag{2.16}$$

$$E_b = E_{i2} + E_{r2} = E_{t2} \tag{2.17}$$

$$B_a = B_0 \cos\theta_0 + B_{r1} \cos\theta_0 = B_{t1} \cos\theta_{t1} - B_{i1} \cos\theta_{t1} \tag{2.18}$$

$$B_b = B_{i2} \cos\theta_{t1} + B_{r2} \cos\theta_{t1} = B_{t2} \cos\theta_{t2} \tag{2.19}$$

จากสมการทั้งสี่ข้างต้นนี้ ถ้านำมาเขียนใหม่โดยอาศัยสมการ (2.5) จะได้

$$B_a = \gamma_0 (E_0 - E_{r1}) = \gamma_1 (E_{t1} - E_{i1}) \tag{2.20}$$

$$B_b = \gamma_1 (E_{i2} - E_{r2}) = \gamma_s E_{t2} \tag{2.21}$$

โดยที่ $\gamma_0 = n_0 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cos\theta_0$ (2.22)

$$\gamma_1 = n_1 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cos\theta_{t1} \tag{2.23}$$

$$\gamma_2 = n_s \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cos\theta_{t2} \tag{2.24}$$

เนื่องจาก E_{i2} และ E_{t1} จะต่างกันที่เฟสซึ่งเกิดจากการที่แสงเดินทางผ่านฟิล์มเท่านั้น ดังนั้นถ้าเราใช้ความสัมพันธ์ที่เคยทราบมาแล้วว่า

$$\delta = k_0 \Delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2 n_1 t \cos\theta_{t1} \tag{2.25}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$E_{i2} = E_{t1} e^{-i\delta} \tag{2.26}$$

ในทำนองเดียวกันจะได้

$$E_{i1} = E_{r2} e^{-i\delta} \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการใช้สมการ (2.26) และ (2.27) เราจะสามารถกำจัดค่า E_{i2} และ E_{r2} ในสมการ (2.17) และ (2.21) ได้ดังนี้

$$E_b = E_{t1}e^{-i\delta} + E_{i1}e^{+i\delta} = E_{t2} \tag{2.28}$$

$$B_b = \gamma_1 (E_{t1}e^{-i\delta} - E_{i1}e^{+i\delta}) = \gamma_s E_{t2} \tag{2.29}$$

พิจารณาเฉพาะคู่ซ้ายมือของสมการทั้งสองนี้ จะทำให้หาค่า E_{t1} และ E_{i1} ในเทอมของ E_b และ B_b ได้เป็น

$$E_{t1} = \left(\frac{\gamma E_b + B_b}{2\gamma_1} \right) e^{+i\delta} \tag{2.30}$$

$$E_{i1} = \left(\frac{\gamma E_b - B_b}{2\gamma_1} \right) e^{-i\delta} \tag{2.31}$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.30) และ (2.31) ลงในสมการ (2.16) และ (2.20) และ อาศัยสูตรของออยเลอร์ (Euler's formula) จะได้

$$E_a = E_b \cos\delta + B_b \left(\frac{i \sin\delta}{\gamma_1} \right) \tag{2.32}$$

$$B_b = E_b (i\gamma_1 \sin\delta) + B_b \cos\delta \tag{2.33}$$

จากสมการทั้งสองนี้สามารถนำมาเขียนเป็นสมการเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{vmatrix} E_a \\ B_a \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\delta & \frac{i \sin\delta}{\gamma_1} \\ i\gamma_1 \sin\delta & \cos\delta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_b \\ B_b \end{vmatrix} \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมทริกซ์ 2 x 2 ที่ได้นี้เรียกว่าทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ (Transfer matrix) ของฟิล์ม ซึ่งอาจเขียนแทนได้ง่าย ๆ ว่า

$$M = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} \tag{2.35}$$

ถ้าที่ผิวรอยต่อ (b) มีฟิล์มบางของสารอีกชนิดหนึ่งอยู่ เราก็จะสามารถหาค่าดังสมการ (2.34) ได้อีกเช่นกัน โดยที่ E_b และ B_b ก็จะมีความสัมพันธ์กับ E_c และ B_c ที่ผิวรอยต่อ (c) และเป็นเช่นนี้กับฟิล์มทุกชั้นที่มีอยู่บนฐานรอง ดังนั้นถ้าเรามีฟิล์มทั้งหมด N ชั้น จะเขียนได้ว่า

$$\begin{vmatrix} E_a \\ B_a \end{vmatrix} = M_1 M_2 M_3 \ldots\ldots M_N \begin{vmatrix} E_b \\ B_b \end{vmatrix}$$

ซึ่งทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ (Transfer matrix) ของฟิล์มทั้งหมด M_T ก็คือผลคูณของเมทริกซ์ของฟิล์มแต่ละชั้น โดยการเรียงลำดับก็เรียงตามลำดับที่แสงเดินทางไปนั่นเอง

$$M_T = M_1 M_2 M_3 \ldots M_N \tag{2.36}$$

ถ้าเรายอ้นกลับมาพิจารณาสมการ (2.16), (2.17), (2.20) และ (2.21) เฉพาะส่วนดังนี้

$$E_a = E_0 + E_{r1} \tag{2.37}$$

$$E_b = E_{t2} \tag{2.38}$$

$$B_a = \gamma_0 \left(E_0 - E_{r1} \right) \tag{2.39}$$

$$B_b = \gamma_s E_{t2} \tag{2.40}$$

ถ้านำค่าในสมการทั้งสี่นี้ไปแทนลงในทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ (Transfer matrix) (2.34) และ (2.35) จะได้

$$\begin{vmatrix} E_0 + E_1 \\ \gamma_0 \left(E_0 - E_{r1} \right) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_{t2} \\ \gamma_s E_{t2} \end{vmatrix} \tag{2.41}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $$E_0 + E_{r1} = m_{11}E_{t2} + m_{12}\gamma_s E_{t2}$$

$$\gamma_0(E_0 - E_{r1}) = m_{21}E_{t2} + m_{22}\gamma_s E_{t2}$$

ซึ่งจะได้ต่อไปว่า

$$1 + \frac{E_{r1}}{E_0} = m_{11}\frac{E_{t2}}{E_0} + m_{12}\frac{E_{t2}}{E_0}$$

$$\gamma_0\left(1 - \frac{E_{r1}}{E_0}\right) = m_{21}\frac{E_{t2}}{E_0} + m_{22}\frac{E_{t2}}{E_0}$$

และได้ $$1 + r = m_{11}t + m_{12}\gamma_s t \quad (2.42)$$

$$\gamma_0(1 - r) = m_{21}t + m_{22}\gamma_s t \quad (2.43)$$

โดยที่ r และ t เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่าน และมีค่าเป็น

$$r \equiv \frac{E_{r1}}{E_0} \text{ และ } t \equiv \frac{E_{t2}}{E_0} \quad (2.44)$$

สมการ (2.42) และ (2.43) สามารถนำไปหาค่า r และ t ได้ในรูปของเทอมในทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ (Transfer matrix) ได้เป็น

$$t = \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0\gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \quad (2.45)$$

$$\mathrm{r} = \frac{\gamma_0 \mathrm{m}_{11} + \gamma_0\gamma_\mathrm{s}\mathrm{m}_{12} - \mathrm{m}_{21} - \gamma_\mathrm{s}\mathrm{m}_{22}}{\gamma_0 \mathrm{m}_{11} + \gamma_0\gamma_\mathrm{s}\mathrm{m}_{12} + \mathrm{m}_{21} + \gamma_\mathrm{s}\mathrm{m}_{22}} \quad (2.46)$$

สมการ (2.45) และ (2.46) ร่วมกับเทอมในทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ (Transfer matrix) ตามสมการที่ (2.34) จะทำให้เราสามารถคำนวณสมบัติของการสะท้อนและการส่งผ่านของฟิล์มทั้งที่เป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนที่จะไปพิจารณาการใช้ประโยชน์ของสมการเหล่านี้ เราจำเป็นต้องคำนึงถึงการดัดแปลงผลที่ได้ อันเนื่องมาจากการที่แสงตกกระทบมีสนามไฟฟ้าที่สถานะทางโพลาไรเซชันต่างไปจากกรณีข้างต้น เช่น ถ้าให้สนามไฟฟ้าอยู่ในทิศของสนามแม่เหล็กในรูปที่ 2.2 สนามแม่เหล็กก็จะต้องหมุนไป เพื่อให้ได้แนวทางของแสงที่เคลื่อนที่ไปคงเดิม การคำนวณตามลักษณะข้างต้นนี้จะทำให้ผลลัพธ์ที่คล้ายกันมาก โดยมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ค่า γ_1 ในสมการ (2.28) กล่าวคือเทอมโคไซน์ (cosine) ที่เคยเป็นตัวคูณจะกลายเป็นตัวหาร นั่นคือ

ถ้า E ตั้งฉากกับระนาบแสงตกกระทบ $\gamma_1 = n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\cos\theta_{t1}$

ถ้า E ขนานกับระนาบแสงตกกระทบ $\gamma_1 = n_1\dfrac{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}{\cos\theta_{t1}}$ (2.47)

ในกรณีที่แสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวรอยต่อ จะมี $E_\perp$ กับ $E_\parallel$ เหมือนกันไม่สามารถบอกความแตกต่างได้ และ $\cos\theta_1 = 1$ จึงทำให้ γ_1 ของทั้งกรณี $E_\perp$ และ $E_\parallel$ เหมือนกัน อย่างไรก็ตาม สำหรับการตกกระทบที่มุมอื่น ๆ เราจะต้องคำนึงค่าจากทั้งกรณี $E_\perp$ และ $E_\parallel$ เช่นในกรณีของแสงที่ไม่โพลาไรซ์ ค่าความสะท้อน (Reflectance) R จะเป็น

$$R = \frac{1}{2}(R_\parallel + R_\perp) \qquad (2.48)$$

2.1.3 ค่าความสะท้อนในกรณีที่แสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวรอยต่อ

กรณีที่แสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวรอยต่อนี้ เป็นกรณีที่พบได้บ่อย ๆ ซึ่งเราอาจนำผลนี้ไปใช้กับกรณีที่มุมตกกระทบมีค่าน้อย ๆ ได้ดีเช่นกัน เนื่องจากลำแสงตั้งฉากกับผิวรอยต่อหรือมุมตกกระทบมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่ามุมอื่น ๆ ได้แก่มุมสะท้อน มุมหักเห ต่างก็จะเป็นศูนย์ทั้งหมด ในสมการ (2.22) ถึง (2.24) เทอมโคไซน์ (cosine) จึงมีค่าเป็นหนึ่งทั้งหมด ดังนั้นเทอมในทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ (transfer matrix) จึงเขียนได้เป็น

$$m_{11} = \cos\delta \qquad m12 = \frac{i\sin\delta}{n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$$
$$m_{21} = i\,n_1\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\sin\delta \qquad m_{22} = \cos\delta \qquad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าเหล่านี้ไปแทนค่าในสมการ (2.46) แล้วจะได้

$$r = \frac{n_1(n_0 - n_s)\cos\delta + i(n_0 n_s - n_1^2)\sin\delta}{n_1(n_0 + n_s)\cos\delta + i(n_0 n_s + n_1^2)\sin\delta} \qquad (2.50)$$

ถ้านิยามค่าความสะท้อน R ซึ่งเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึง exitance ที่สะท้อนขึ้นมาให้เป็น

$$R \equiv |r|^2 \qquad (2.51)$$

เนื่องจาก r เป็นตัวเลขเชิงซ้อน

$$r = \frac{A + iB}{C + iD}$$

ดังนั้น
$$|r|^2 = |rr^*| = \frac{A + iB}{C + iD} \cdot \frac{A - iB}{C - iD}$$
$$= \frac{A^2 + B^2}{C^2 + D^2}$$

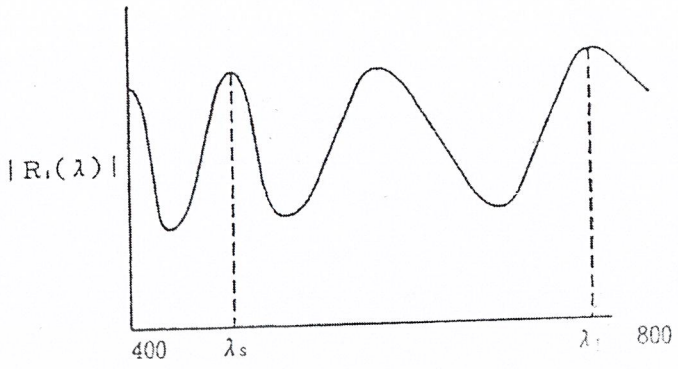
นั่นคือจะได้ในกรณีที่แสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวรอยต่อว่า

$$R = \frac{n_1^2(n_0 - n_s)^2\cos^2\delta + (n_0 n_s - n_1^2)^2\sin^2\delta}{n_1^2(n_0 + n_s)^2\cos^2\delta + (n_0 n_s + n_1^2)^2\sin^2\delta} \qquad (2.52)$$

จัดรูปสมการ (2.52) จะได้

$$R = 1 - \frac{4n_S n_1^2 n_0}{\left\{n_1^2(n_S + n_1)^2 - (n_1^2 - n_0^2)(n_S^2 - n_1^2)\sin^2\frac{\delta}{2}\right\}} \qquad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟระหว่างค่าความสะท้อนกับความยาวคลื่น

โดยจะมีวิธีคำนวณหาความหนาของฟิล์มบางดังนี้

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_S} 2n_1(\lambda_S)t = m\pi \tag{2.54}$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_L} 2n_1(\lambda_L)t = (m+\chi)\pi \tag{2.55}$$

เมื่อ χ คือจำนวนพีค (peaks) ที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสง

นำสมการที่ (2.54) มาลบกับ (2.55) จะได้

$$d_1 = \frac{|\chi|}{4} \cdot \frac{1}{\frac{n_1(\lambda_S)}{\lambda_S} - \frac{n_2(\lambda_L)}{\lambda_L}} \tag{2.56}$$

เมื่อ λ_S คือความยาวคลื่นเริ่มต้นที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสง

λ_L คือความยาวคลื่นสุดท้ายที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 พอร์ตขนาน (Parallel Port)

2.2.1ความรู้เบื้องต้นของพอร์ตขนาน

พอร์ตขนาน สาเหตุที่มีชื่อนี้ เนื่องจากการถ่ายทอดข้อมูลของพอร์ตนี้เป็นแบบขนาน การประมวลผลส่วนใหญ่จะขนาน 8 บิต

เพื่อให้เข้าถึงการนำเอาพอร์ตขนานไปใช้งาน ก่อนอื่นต้องทำความเข้าใจก่อนว่า ปกตินั้นการสั่งพิมพ์รายงานจากคอมพิวเตอร์ไปยังพอร์ตขนาน กับเครื่องพิมพ์ เริ่มจากสัญญาณพอร์ตดาต้า (data) ถูกส่งออกไปยังเครื่องพิมพ์ พร้อมทั้งส่งสัญญาณสโตรบ (strobe) ออกไปด้วยเพื่อให้เครื่องรับรู้ว่ามีการส่งข้อมูลใหม่มาที่ขาดาต้า (data) แล้วจากนั้นคอมพิวเตอร์จะต้องรอการตอบกลับจากเครื่องพิมพ์นั่นคือเครื่องพิมพ์จะสร้างสัญญาณ busy หรือเพื่อบอกว่าเครื่องพิมพ์ยังไม่พร้อมที่จะรับข้อมูลใหม่ จนกระทั่งเมื่อเครื่องพิมพ์พร้อม เครื่องพิมพ์จะส่งสัญญาณ Ack ส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแจ้งว่า พร้อมที่จะรับข้อมูล

นอกจากสัญญาณทั้งสามแล้วส่วนใหญ่การติดต่อกับเครื่องพิมพ์ยังต้องมีสัญญาณ อื่นๆ ร่วมด้วย เนื่องจากเครื่องพิมพ์ต้องทำหน้าที่ถึง 3 อย่างด้วยกันคือ รับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์, พิมพ์ข้อมูลที่รับเข้ามา และตอบสนองต่อการใช้งานของผู้ใช้

พอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์ยังแยกย่อยออกเป็นอีก 3 พอร์ตได้แก่ พอร์ตเอาต์พุตที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องพิมพ์ พอร์ตเอาต์พุตสำหรับสัญญาณสโตรบ (Strobe) และรีเซต (Reset) พอร์ตอินพุตสำหรับการอ่านค่าสัญญาณ Acknowledge, busy และสัญญาณ Error จากเครื่องพิมพ์

โดยปกติพอร์ตขนานออกแบบมาให้มีสายสัญญาณอยู่ทั้งหมด 17 เส้น สายสัญญาณเหล่านี้จะมีรีจิสเตอร์ 3 ตัวควบคุมการทำงานดังนี้

1.พอร์ตเอาต์พุตสำหรับข้อมูล 8 เส้นมีรีจิสเตอร์ Data ควบคุม

2.พอร์ตอินพุตสำหรับการอ่านค่าสถานะต่างๆ จากภายนอกมีอยู่ด้วยกัน 5 เส้นใช้รีจิสเตอร์ STATUS ในการควบคุม

3.พอร์ตเอาต์พุตสำหรับการส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ภายนอก มีอยู่ด้วยกัน 4 เส้นใช้รีจิสเตอร์ Control ในการควบคุม

การติดต่อกับพอร์ตขนานจะต้องมีการอ้างแอดเดรส ตำแหน่งที่ใช้ในการอ้างแอดเดรสถึงจะเป็นตำแหน่ง A0-A9 และใช้ขา IOR และ IOW สำหรับเป็นตัวเลือกว่าต้องการอ่านหรือเขียนรีจิสเตอร์ตัวใด จากการดีโค้ดแอดเดรส A0-A9 นี้เองทำให้ได้สัญญาณออกมาไปควบคุมหรืออีนาเบิลวงจรบัฟเฟอร์ต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Data write สัญญาณอีนาเบิลสำหรับนำข้อมูลที่อยู่ในบัส Data ออกไปที่ขาดาต้า (Data) ของพอร์ตขนาน

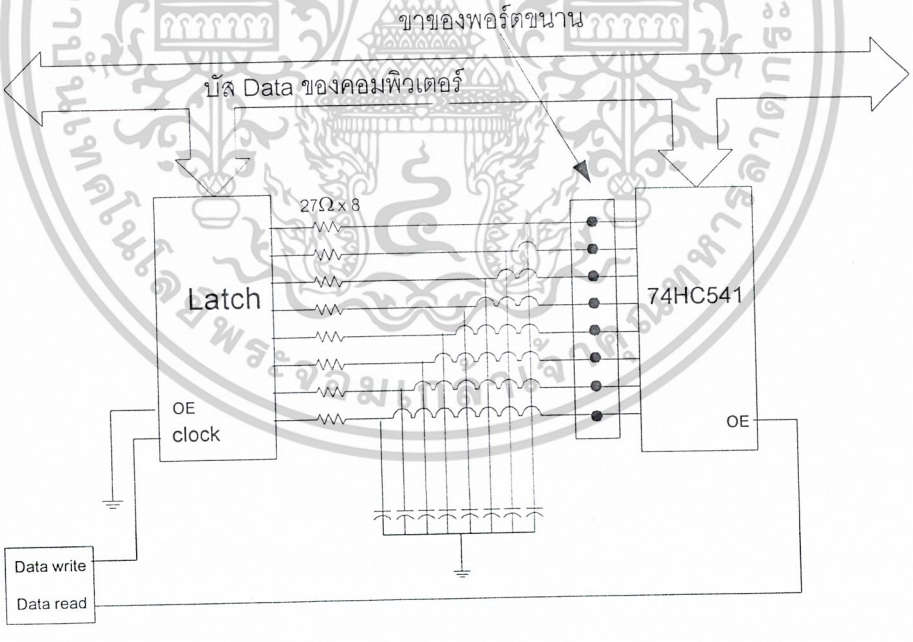
Data read สัญญาณอีนาเบิลสำหรับอ่านข้อมูลจากขาดาต้า (Data) ของพอร์ตขนานมาเก็บไว้ในบัสของ Data

Control write สัญญาณอีนาเบิลสำหรับนำข้อมูลที่อยู่ในบัส Data ออกไปอยู่ที่ขาคอนโทรล (Control) ของพอร์ตขนาน สำหรับพอร์ตนี้นอกจากจะนำข้อมูลออกไปยังพอร์ตขนานแล้ว ยังทำหน้าทิอินเตอร์รัปของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่พอร์ต Status อีกด้วย

Control read สัญญาณอีนาเบิลสำหรับอ่านข้อมูลจากขาคอนโทรล (Control) มาเก็บไว้ในบัส Data

Status read สัญญาณอีนาเบิลสำหรับอ่านข้อมูลจากขาพอร์ตสเตตัส (Status) มาเก็บไว้ในบัส Data

2.2.1.1 **พอร์ตดาต้า** (Data Port)



รูปที่ 2.4 พอร์ตดาต้า (Data Port)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าพอร์ตดาต้า (Data Port) ประกอบไปด้วยบัฟเฟอร์ 1 ตัว และไอซีแลตช์อีก 1 ตัว เมื่อคอมพิวเตอร์อ้างการส่งข้อมูล คอมพิวเตอร์จะเขียนข้อมูลไปยังไอซีแลตช์ 1 ตัว ทั้ง 8 บิต เอาต์พุตของไอซีแลตช์ 1 คือ D0-D7 ซึ่งเอาต์พุตนี้จะไปปรากฏอยู่ที่พอร์ตขนานในตำแหน่งขา 2 ถึง 9

สำหรับบัฟเฟอร์สำหรับการอ่านข้อมูลกลับได้แก่เบอร์ 74HC541 ซึ่งเมื่อต้องการอ่านค่าคอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณ Data read ออกมาเพื่ออีนาเบิลไอซี 74HC541 สำหรับพอร์ตขนานแบบมาตรฐาน พอร์ตดาต้า (Data) จะต้องใช้เพื่อการส่งค่าออกเอาต์พุตเท่านั้น แต่สำหรับพอร์ตขนานที่มีการสื่อสารสองทิศทาง สามารถอ่านค่าจากพอร์ตดาต้า (Data) ได้ด้วย แต่ก่อนที่จะอ่านค่าต้องจำไว้เสมอว่าจะต้องป้อนค่าเอาต์พุตให้มีค่าลอจิก "1" ทั้งหมดก่อน

2.2.1.2 พอร์ตคอนโทรล (Control Port)

DB-25	รีจิสเตอร์	ทิศทาง	ตำแหน่งบิต	ชื่อขาสัญญาณ	หน้าที่การทำงาน
1	Control	Out	C0	STROBE	แอกทีฟ 0 ส่งค่าออกไปเพื่อบอกว่าที่ขา Data มีข้อมูลอยู่แล้ว
2-9	Data	Out	D1-D8	DATA1-DATA2	สำหรับพอร์ตขนานมาตรฐานเดิมขานี้ทำหน้าที่ส่งข้อมูลเท่านั้นสำหรับปัจจุบันขานี้รับข้อมูลอินพุตได้ด้วย
10	Status	In	S6	nACK	เป็นพัลส์ลอจิก 0 ที่ส่งมาจากเครื่องพิมพ์เพื่อบอกว่าได้รับข้อมูลที่ส่งไปแล้ว
11	Status	In	S7	BUSY	เป็นสัญญาณแจ้งมาจากเครื่องพิมพ์ว่ายังไม่พร้อมรับข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
58704

DB-25	รีจิสเตอร์	ทิศทาง	ตำแหน่งบิต	ชื่อขาสัญญาณ	หน้าที่การทำงาน
12	Status	In	S5	PE	แจ้งกระดาษหมด
13	Status	In	S4	SELECT	แจ้งว่าเครื่องพิมพ์ต่ออยู่
14	Control	Out	C1	AUTO FEET	ส่งให้เครื่องพิมพ์เลื่อนบรรทัด
15	Status	In	S3	ERROR	สัญญาณจากเครื่องพิมพ์มายังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงข้อผิดพลาดจากการพิมพ์
16	Control	Out	C2	INIT	รีเซตเครื่องพิมพ์โดยให้ลอจิก 0
17	Control	In	C3	SELECT-IN	ส่งสัญญาณไปยังเครื่องพิมพ์เพื่อแจ้งว่าต้องการเลือกเครื่องพิมพ์เครื่องนี้
18-25				GND	กราวด์

ตารางที่ 2.1 สถานะของขาคอนเนคเตอร์

พอร์ตคอนโทรล (Control) ใช้สำหรับคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องพิมพ์ จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าพอร์ตควบคุม ประกอบไปด้วยบิตเอาต์พุต 4 บิตที่ต่อออกไปยังเครื่องพิมพ์ ส่วนบิตอีนาเบิลอินเตอรัปต์ไม่ได้ถูกต่อออกไป เอาต์พุตของพอร์ตควบคุมมีอินเวอร์เตอร์แบบคอลเลคเตอร์เปิดต่อร่วมอยู่ด้วย โดยเอาต์พุตเหล่านี้จะถูกพูลอัปไว้ด้วยตัวต้านทานค่า 4.7 กิโลโอห์ม สำหรับบิต C2 จะผ่านอินเวอร์เตอร์ถึงสองตัวทำให้เอาต์พุตของบิต C2 ไม่มีการกลับสถานะลอจิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะของพอร์ตควบคุมสามารถอ่านค่ากลับได้โดยการใช้บัฟเฟอร์ 74HC541 ซึ่งเอาต์พุตของ 74HC541 มีอินเวอร์เตอร์อยู่ภายใน ทำให้ค่าที่อ่านได้ตรงกับค่าที่ส่งออกไป การควบคุมการอ่าน และเขียนข้อมูลจากพอร์ตควบคุม คอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูลที่ขา Control write และขา Control read เนื่องจากเอาต์พุตของพอร์ตคอนโทรล (Control) เป็นแบบคอลเลคเตอร์แบบเปิด ดังนั้นผู้ใช้สามารถอ่านค่าอินพุตจากสัญญาณจากภายนอกได้ โดยก่อนที่จะอ่านค่าจะต้องทำให้ขาพอร์ตที่ต้องการอ่านมีลอจิก “1” เสียก่อน

2.2.1.3 **พอร์ตแสดงสถานะหรือพอร์ตสเตตัส** (Status)

พอร์ตสเตตัส (Status) เป็นพอร์ตที่คอมพิวเตอร์ใช้สำหรับการอ่านค่าสถานะจากเครื่องพิมพ์ จะสังเกตได้ว่ามีขาสัญญาณอยู่ทั้งหมด 5 สัญญาณด้วยกัน และจะเรียกชื่อเป็นS3, S4, S5, S6 และ S7 ซึ่งตัวเลขนั้นหมายถึงตำแหน่งบิตของขาเหล่านี้ภายในรีจิสเตอร์ Status นั่นเองสำหรับบิต S7 จะมีค่าต่างจากบิตอื่นๆ ที่เมื่อสัญญาณจากภายนอกเข้ามาแล้วจะไม่ผ่านอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่ขาอื่นๆ ผ่านอินเวอร์เตอร์ทั้งหมด ดังนั้นเมื่อข้อมูลผ่านจากขาอินพุตไปยัง 74HC541 ซึ่งเอาต์พุตมีการกลับสถานะทำให้บิต S7 เป็นบิตเดียวที่กลับสถานะ นอกจากนี้ในการใช้งานถ้าต้องการใช้งานในการสร้างสัญญาณอินเตอร์รัปจากของขอบขาขึ้นของขา S6 สามารถกำหนดค่าได้จากพอร์ตคอนโทรล (Control) บิต4

2.2.2 **การนำพอร์ตขนานไปใช้งาน**

สำหรับพอร์ตขนานแบบมาตรฐาน ผู้ใช้สามารถนำพอร์ตอินพุต 5 บิตพอร์ต เอาต์พุต 4 บิต และพอร์ตเอาต์พุตอีก 8 บิต ไปใช้งานได้โดยตรง โดยที่ 4 บิตของพอร์ตเอาต์พุตหรือพอร์ตคอนโทรล (Control) นั้นสามารถดัดแปลงให้เป็นพอร์ตอินพุตขนาด 4 บิตได้ด้วย ดังนั้นผู้ใช้งานจึงสามารถนำสัญญาณจากพอร์ตขนานที่มากถึง 17 เส้น ไปใช้งานในการควบคุมโดยใช้ระดับสัญญาณ TTL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor)

2.3.1 ความรู้เบื้องต้นของสเตปปิ้งมอเตอร์

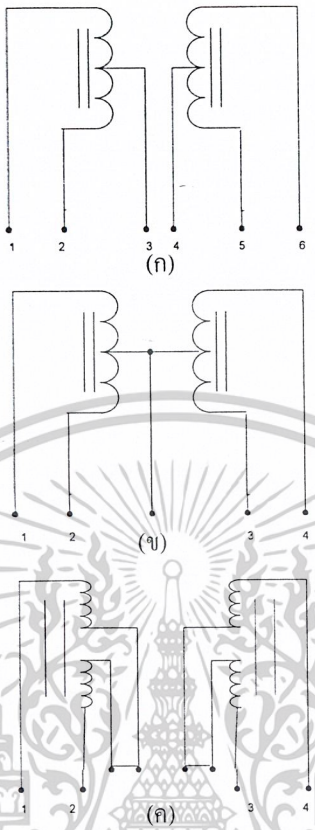
เมื่อกล่าวถึงสเต็ปปิ้งมอเตอร์ ผู้ที่สนใจทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ย่อมรู้จักกันดี แต่ที่ยังไม่เคยใช้ก็มีอีกมากอาจจะเนื่องมาจากข้อแตกต่างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสสลับทั่วๆไป ที่ป้อนแรงดันเข้าไปแล้วก็จะหมุนทันที แต่สเต็ปปิ้งมอเตอร์ไม่เป็นเช่นนั้น ทั้งนี้เพราะสเต็ปปิ้งมอเตอร์มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยขดลวดหลายขด และตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กที่คงที่ที่อยู่ในตัวมอเตอร์นั้นก็มีการจัดเรียงแบบหลายตำแหน่งสลับกันไป ดังนั้นการที่จะทำให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์หมุนได้ก็ต้องทำการป้อนแรงดันไปให้กับขดลวดภายในทีละขดสลับกันไปและต่อเนื่องกันเป็นจังหวะๆ เหตุที่ทำให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์หมุนได้เพราะจังหวะการป้อนแรงดันให้กับแต่ละขดนั้นมีความเร็วที่ควบคุมได้ จึงทำให้สามารถที่จะควบคุมให้หมุนเร็วหรือช้า เป็นจังหวะหรือสเต็ป (step) ได้อีกด้วยจากหลักการทำงานนี้เองจึงเรียกว่า สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (stepping motor)

จากกรณีข้างต้นจึงทำให้ผู้ที่สนใจทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ไม่ค่อยได้นำมาออกแบบใช้งานกันกว้างขวางพอสมควรเพราะคิดว่ามีความยุ่งยากและซับซ้อนในส่วนของวงจรขับ (driver circuit) สเต็ปปิ้งมอเตอร์ จะมีใช้งานกันอย่างกว้างขวางก็เฉพาะแต่ในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวกับเครื่องพิมพ์งานทางคอมพิวเตอร์และอุตสาหกรรมอื่นๆ เป็นต้น ในระดับผู้ใช้ทั่วไป ยังไม่ค่อยนิยมนำมาออกแบบใช้งานมากนัก เนื่องจากราคาสูงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่พอสมควร

2.3.1.1 วิธีการวัดหาปลายของขดลวด

ในแบบ 6 เส้น สามารถตรวจหาคู่ของขดลวดในมอเตอร์ได้โดยอาศัยโอห์มมิเตอร์ตั้งย่านวัด x 1 กิโลโอห์ม สังเกตดูรูปที่ 2.5 (ก) จะประกอบด้วยขดลวด 2 ขดบนสเตเตอร์หนึ่งขั้ว ดังนั้นให้ใช้โอห์มมิเตอร์วัดปลายสายใดสายหนึ่งเป็นหลัก แล้วทำการวัดอีกสายหนึ่งจะได้ค่าประมาณ 40 โอห์มมิเตอร์ แสดงว่าเป็นการวัดเจอขดลวดหนึ่งขดแล้วอาจจะเป็นขดที่ 1 กับ 3 หรือ 2 กับ 3 ก็ได้ และให้คงที่ปลายสายแรกไว้ แต่ให้ย้ายปลายสายที่ สองไปวัดอีกเส้นหนึ่งจะได้ค่าความต้านทานเป็นสองเท่า แสดงว่าปลายสายหลักนั้นเป็นสายของเซ็นเตอร์แท็ปหรือขา 3 นั่นเอง ที่เหลือก็จะเป็นขา 1 หรือขา 2 ทำเช่นนี้กับการหาปลายสายของขดลวดที่เหลือ จากในรูป ขา 1 2 ก็คือ A B และ 5 6 คือ C D แล้วนำไปต่อกับตำแหน่งขาบนชุดควบคุมให้ตรงกัน ส่วนขา 3 4 นั้นจะต้องต่อรวมกันแล้วนำไปต่อที่ตำแหน่งไฟบวก (+) เท่านี้ก็จะสามารถควบคุมมอเตอร์ได้ ในแบบ 5 เส้น และแบบ 8 เส้น ก็มีหลักการหาขั้วปลายของขดลวดเช่นเดียวกัน แต่การรวมขาเซ็นเตอร์แท็ปนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 (ข) และ รูปที่ 2.5 (ค) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะการต่อขาของสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบต่าง ๆ
ก) สเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ชนิด 6 เส้น
ข) สเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ชนิด 5 เส้น
ค) สเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ชนิด 8 เส้น

แต่ส่วนมากแล้วสเต็ปปิ้งมอเตอร์ที่มีมาตรฐานนั้นจะมีการระบุหรือกำหนดสีของสายไฟที่ต่อออกจากปลายขดลวดภายในออกมาสู่ภายนอกต่อใช้งานไว้เรียบร้อยพร้อมกับสัญลักษณ์ของขดลวดภายในด้วย โดยจะเป็นสติกเกอร์หรือราเบลติดอยู่ที่ตัวถังมอเตอร์ในบางผู้ผลิตอาจจะมีการบอกขนาดของแรงดันใช้งานและกระแสแต่ละขดไว้ด้วย แต่ถึงอย่างไรก็ตามหากต่อปลายของขดลวดไม่ถูกต้องเมื่อต่อเข้ากับบอร์ดควบคุมก็จะไม่สามารถทำงานได้ หรืออาจจะต่อถูกบางเฟสและสลับเฟสกันอยู่ อาจจะทำให้หมุนกลับไปกลับมาในหนึ่งสเต็ปตลอดก็ได้ซึ่งก็ยังถือว่าไม่ทำงาน ให้ทำการค้นหาปลายสายของขดลวดภายในมอเตอร์ใหม่ แล้วจึงต่อเข้ากับวงจรขับให้ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 หลักการทำงานของสเต็ปปิ้งมอเตอร์

สเต็ปปิ้งมอเตอร์มีความแตกต่างจากมอเตอร์ทั่วๆไป โดยเมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับมัน มันจะหมุนเพียงเล็กน้อยตามเส้นรอบวงและหยุด ซึ่งแตกต่างจากมอเตอร์ทั่ว ๆ ไป ซึ่งจะหมุนทันทีและตลอดเวลา สเต็ปปิ้งมอเตอร์สามารถกำหนดตำแหน่งของการหมุนด้วยตัวเลขได้อย่างละเอียดโดยการใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวกำหนดและจัดเก็บตัวเลขนั้นไว้

สเต็ปปิ้งมอเตอร์สามารถใช้งานในระบบเปิด (open loop system) นั่นก็คือมันทำงานได้โดยไม่ต้องการการป้อนกลับ (feedback) แต่ทุกวิธีที่ต้องการกำหนดตำแหน่งได้อย่างถูกต้องจำเป็นที่ต้องการการป้อนกลับไปยังระบบให้รับรู้ และอะไรจะเป็นตัวบอกได้ว่าตำแหน่งถูกต้องแล้วหรือเกิดการผิดพลาด (error) วิธีหนึ่งที่ใช้กันโดยทั่วไปกับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ก็คือ การใช้สวิตช์ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งที่ต้องการตรวจจับ (limit switch) เมื่อสเต็ปปิ้งมอเตอร์เริ่มหมุนและหมุนจนกระทั่งถึงตำแหน่งของสวิตช์ตรวจจับสัญญาณก็จะถูกป้องกับเข้าสู่ระบบและทราบการทำงานของเสต็ปปิ้งมอเตอร์ได้ตลอดเวลา ซึ่งโดยปกติในในวงจรคอนโทรลเลอร์จะมีการกำหนดจุดอ้างอิง (reference point) ไว้ด้วย เพื่อให้จุดเริ่มต้นทำงานและอ้างอิงตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง

ตัวอย่างง่าย ๆ เช่นถ้าเริ่มป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฟล็อปปี้ดิสก์ไดรฟ์ จะได้ยินมันกำลังเคลื่อนที่เพื่อหาจุดอ้างอิงที่กำหนด หลังจากนั้นวงจรไดร์ฟคอนโทรลเลอร์จะเริ่มทำงานได้ โดยมันจะทราบถึงทุก ๆ สเต็ปที่กำลังขับเคลื่อนหัวอ่าน/เขียนไปยังแต่ละแทร็กบนดิสก์

เช่นเดียวกับมอเตอร์ทั่วไปการที่จะทำให้เกิดการหมุนโรเตอร์ (rotor) ได้ต้องมีการกระทำของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ (stator) ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดวางขั้วแม่เหล็ก (pole) การหมุนทำได้ทั้งแบบต่อเนื่องและกลับทิศทางไปมา โดยกระบวนการทางไฟฟ้าสลับหรือการจัดวางแปรงถ่าน (magnetic attraction) ที่ขั้วแม่เหล็กสร้างและหยุดสลับกัน ผลที่เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นบนสเตเตอร์โดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าทีละคู่ของขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามไปตลอดเวลา และเมื่อต้องการให้หยุดหมุน สามารถทำได้โดยหยุดการเกิดขั้วแม่เหล็กที่จุดหนึ่งคือจะสามารถหยุดการสวิตชิ่งในลำดับต่อไป

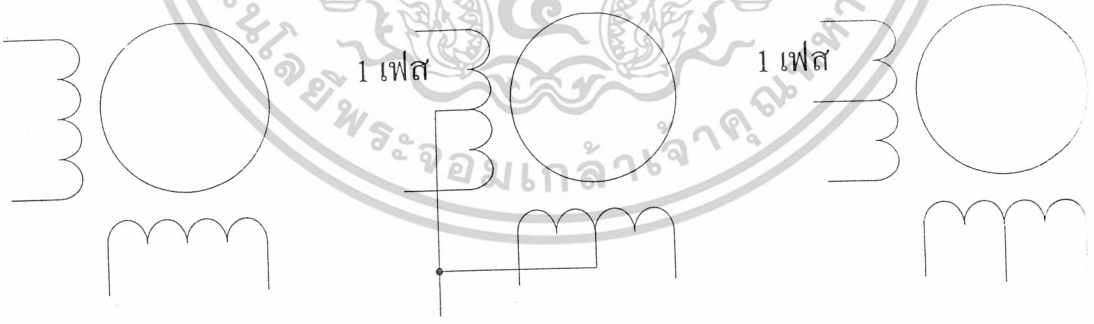
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การพันขดลวดหรือคอยล์บนสเต็ปปิ้งมอเตอร์

การพันขดลวดหรือคอยล์บนสเต็ปปิ้งมอเตอร์มีอยู่ 2 วิธี คือ แบบไบโพลาร์ (bipolar) และแบบยูนิโพลาร์ (unipolar) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

สเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบไบโพลาร์มีการพันลวด 1 ขดบนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ถูกกำหนดโดยทิศทางของกระแสไฟฟ้า และสามารถทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามได้โดยการกลับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งการกำหนดทิศการไหลและการกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า ทำได้โดยการใช้วงจรสวิตชิ่งกลับขั้วไฟฟ้า

สำหรับยูนิโพล่าร์จะมีการพันขดลวด 2 ขด บนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ซึ่งแต่ละขดจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกัน การกลับขั้วแม่เหล็กเปลี่ยนไปมาทำได้โดยการสวิตชิ่งกระแสไฟฟ้าจากขดลวดขดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่ง แทนเท่านั้น โดยปกติขดลวดทั้งสองจะมีการเชื่อมต่อกันหรือมีจุดร่วมเพื่อลดจำนวนของสายไฟที่ต่อจากมอเตอร์ วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์แบบยูนิโพล่าร์ทำได้ง่ายกว่าชนิดไบโพล่าร์ เพราะมันต้องการเพียงสวิตช์ธรรมดาในการเปิดและปิดกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดบนสเตเตอร์ในทิศทางที่ต้องการให้หมุนได้ทันที รูปที่ 2.7 แสดงวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวสวิตชิ่งให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ที่มีการพันขดลวดทั้ง 2 แบบ จะเห็นได้ว่าในแบบของยูนิโพล่าร์เป็นวงจรที่ง่ายและไม่มีความซับซ้อนเลย

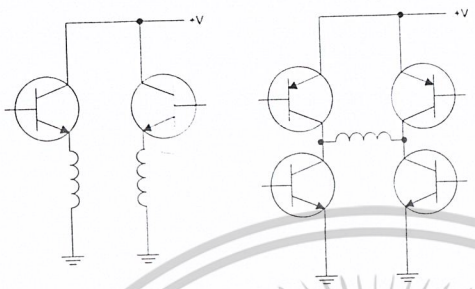


แบบ 4 สาย 2 เฟส แบบ 5 สาย 4 เฟส แบบ 6 สาย 4 เฟส

รูปที่ 2.6 การพันขดลวดบนสเตเตอร์ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์
ด้านซ้ายเป็นแบบไบโพลาร์ และที่เหลือเป็นแบบยูนิโพลาร์ ซึ่งมีทั้งแบบ 5 สาย และ 6 สาย 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามการพันขดลวดแบบยูนิโพลาร์ก็มีจุดด้อยตรงมีการพันแบบนี้จะทำให้เกิดแรงบิดน้อยกว่าแบบไบโพล่าร์ เพราะที่เท่ากัน จะมีเพียงครึ่งหนึ่งของขดลวดที่ถูกกระตุ้นให้ทำงานในระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น



(ก) (ข)

รูปที่ 2.7 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ทั้งสองแบบ
ก) ชนิดยูนิโพลาร์ ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์สวิตช์ 1 ตัวต่อ 1 คอยล์
ข) ชนิดไบพลาร์ ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์สวิตช์ 4 ตัว ต่อ 1 คอยล์

การพิจารณาว่าสเต็ปปิ้งมอเตอร์ตัวใดมีการพันขดลวดแบบใดสังเกตได้ง่าย โดยถ้าเป็นแบบไบโพลาร์จะมีสายไฟต่อออกจากมอเตอร์เพียง 4 สาย และถ้าเป็นแบบยูนิโพลาร์จะมี 5 สาย หรือ 6 สาย หรือทราบได้โดยการอ่านจากป้าย (name plate) ที่ติดอยู่กับมอเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1ทำไมถึงเลือกใช้พอร์ตขนาน

เมื่อเทียบการใช้การ์ดอินพุตเอาต์พุตที่ต้องติดตั้งอยู่ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์แล้วพอร์ตขนานมีข้อได้เปรียบอยู่หลายประการดังนี้

- ในด้านความปลอดภัย การที่ต้องถอดฝาเครื่องคอมพิวเตอร์ออกมาเพื่อเสียบการ์ดเชื่อมต่อลงในสล๊อตของคอมพิวเตอร์อาจจะทำให้เกิดความเสียหายกับส่วนอื่นๆ ของคอมพิวเตอร์ได้ ถ้าผู้ที่ใช้งานไม่มีความชำนาญหรือเกิดการต่อวงจรที่ผิดพลาด
- ในด้านการเข้ากันได้กับคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่ การเชื่อมต่อโดยใช้การ์ดที่เสียบลงในสล๊อตไม่สามารถใช้กับคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันได้
- ข้อจำกัดพื้นที่ คอมพิวเตอร์บางเครื่องมีการเสียบการ์ดเชื่อมต่อตัวอื่นๆอยู่แล้ว อาทิ การ์ดเสียง การ์ดโมเด็ม เป็นต้น จนไม่มีสล๊อตเหลือพอสำหรับการเสียบการ์ดต่อเพิ่มเติม
- ความสะดวกในการใช้งาน การเชื่อมต่อทางพอร์ตขนานสามารถทำได้ง่ายๆ เพียงต่อสายสำหรับเชื่อมต่อเข้ากับคอนเนคเตอร์ DB-25 ของพอร์ตขนาน
- ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลกับพอร์ตขนาน มีความเร็วเท่ากับการติดต่อกับระบบบัสโดยตรงและมีความเร็วมากกว่าการติดต่อผ่านทางพอร์ตอนุกรม

3.2 ทำไมถึงเลือกใช้สเต็ปปิ้งมอเตอร์

เพราะในการใช้งานส่วนใหญ่ที่ต้องการตำแหน่งและหยุดหมุนของมอเตอร์ที่แม่นยำและมีความเร็วที่แน่นอนรวมทั้งความต้องการแรงบิตที่แกนของมอเตอร์ที่สูงจึงทำให้เหมาะกับงานที่ต้องการคุณสมบัติดังกล่าว ซึ่งในงานประเภทนี้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วๆไป ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ถ้าใช้งานได้ก็คงต้องสร้างระบบเฟืองทดขึ้นมาและส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในการนำมาใช้งานและคงจะดีเท่าสเต็ปปิ้งมอเตอร์ไม่ได้ เพราะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงบิตที่แกนต่ำถึงแม้ว่าจะมีความเร็วรอบที่อาจจะสูงกว่าและใช้งานง่ายกว่าก็ตาม ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลเบื้องต้นว่าทำไมจึงต้องนำสเต็ปปิ้งมอเตอร์มาใช้งาน

สเต็ปปิ้งมอเตอร์สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางเพราะมีหลายขนาดจึงสามารถนำไปใช้ได้ แม้กระทั่งในงานจำพวกของเล่น อุปกรณ์ใช้งานในรถยนต์ ในกล้องวิดีโอหรือกล้องถ่ายรูปในแบบที่เป็นการซูมอัตโนมัติหรือการกรองฟิล์มอัตโนมัติรวมไปถึงการประยุกต์ใช้ในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศวิทยุติดรถยนต์ที่เป็นแบบชักขึ้น-ลงอัตโนมัติและใช้งานในลักษณะที่ต้องการโครงสร้างของมอเตอร์ที่แข็งแรง ใช้ในการควบคุมการปรับมุมเงยหรือมุมในส่วนต่าง ๆ และปรับระยะโฟกัสของกล้องเทเล-สโคปให้ทำงานในลักษณะอัตโนมัติหรือโปรแกรมการทำงานในลักษณะอัตโนมัติเป็นต้น นอกจากนั้นแล้วเมื่อสเต็ปปิ้งมอเตอร์ถูกออกแบบให้ใช้งานร่วมกับวงจรควบคุมการทำงานในลักษณะอื่นก็จะยิ่งเห็นประโยชน์มากมายขึ้นอีก และสามารถที่จะควบคุมลักษณะการหมุนได้ทั้งแบบหมุนต่อเนื่อง หมุนทีละสเต็ปสำหรับการค้นหาตำแหน่งที่แน่นอนได้ในการประยุกต์ใช้งานลักษณะเป็นตัวควบคุมการเลือกตำแหน่ง

ในปัจจุบันสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ บางครั้งอาจพบแบบ 5 เส้น แต่โดยปกติแล้วส่วนมากจะพบแบบ 6 เส้นและในบางครั้งอาจพบในแบบ 8 เส้น เท่าที่พบและมีใช้งานกันมากจะเป็นแบบ 5 และ 6 เส้น ในแบบ 6 และ 8 เส้น นี้เมื่อนำมาใช้งานในโครงงานนี้ก็จะทำการรวมขา 3 และ 4 เข้าด้วยกันก็จะเหลือเป็นแบบ 5 ขา ทันทีและต่อใช้งานง่ายขึ้น สเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์นี้จะมี 2 คอยล์ต่อขั้วสเตเตอร์หนึ่งขั้ว ส่วนในมอเตอร์แบบ 8 เส้นนั้นจะมีสองเส้นออกมาจาก 2 คอยล์จากสเตเตอร์คู่ที่จะยื่นออกมาภายนอกตัวมอเตอร์ ส่วนในแบบ 6 เส้นนั้นจะมี 2 คอยล์ในแต่ละขั้วสเตเตอร์และจะทำการต่อขั้วข้างใดข้างหนึ่งของคอยล์เข้าหากันก่อนที่จะต่อปลายออกมาภายนอกตัวมอเตอร์

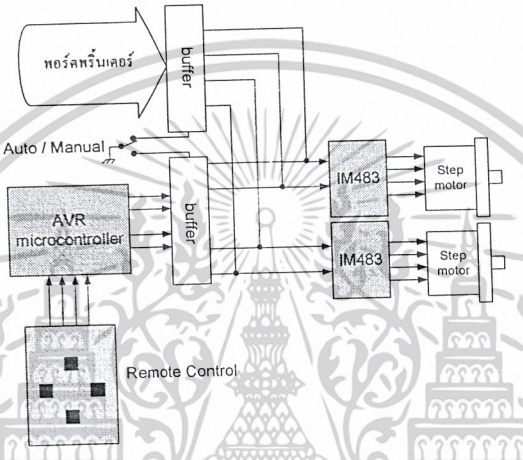
สเต็ปปิ้งมอเตอร์ที่ต้องการนำมาใช้ควบคุมในโครงงานนี้เป็นสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ชนิด 6 เส้น ซึ่งสเต็ปปิ้งมอเตอร์ชนิดนี้ ในปัจจุบันมีจำหน่ายอย่างกว้างขวางและมีใช้งานมากกว่าสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบไบโพลาร์ซึ่งเป็นแบบเก่าชนิด 4 เส้น แต่ในโครงงานนี้ต้องการแรงบิดหรือทอร์ค (Torque) ที่สูง จึงนำสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์มาแปลงเป็นสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบไบโพลาร์ เพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้งาน

3.3 การติดตั้งสเต็ปปิ้งมอเตอร์

หัวใจสำคัญของโครงงานนี้อยู่ที่ โมดูลขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงสองตัวซึ่งเป็นตัวกลางระหว่างคอมพิวเตอร์ควบคุมกับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ขนาดเล็กที่เป็นต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนแท่นวางชิ้นงาน โดยตัวควบคุมจะแบ่งเป็นสองส่วนคือส่วนแรกตัวควบคุมเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะตรวจจับการกดปุ่มควบคุมทิศทางแล้วจึงส่งสัญญาณไปยัง โมดูลขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์การใช้งานในส่วนนี้เป็นการควบคุมแท่นได้อย่างอิสระผ่านปุ่มควบคุม ส่วนที่สองเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สำหรับการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ โดยโปรแกรมควบคุมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษาวิชวลเบสิก6.0 จะส่งสัญญาณควบคุมที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์ออกยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

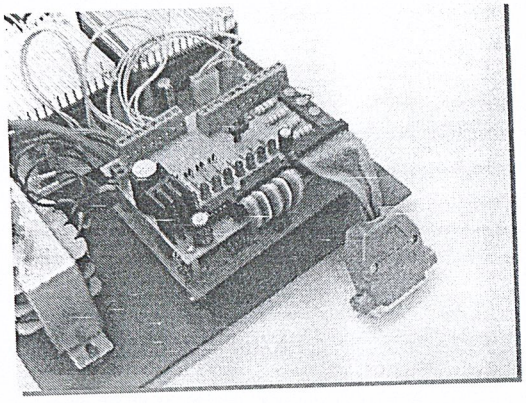
ช่องทางที่เรียกว่าพอร์ตขนานหรือที่เรารู้จักกันดีในชื่อของพอร์ตพริ้นเตอร์ สัญญาณที่ส่งออกมานี้จะผ่านบัฟเฟอร์ที่ต่ออนุกรมอยู่กับสายสัญญาณก่อนเข้าสู่โมดูลขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์สัญญาณที่ส่งเข้ามายังโมดูลนี้มีลักษณะเป็นเวกเตอร์ ที่ประกอบไปด้วยสัญญาณของทิศทางกับสัญญาณของระยะทางที่ต้องการ บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบทั้งหมดที่กล่าวมาแสดงให้เห็นดังรูปที่3.1



รูปที่3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบทั้งหมด

จากรูปที่3.1 โมดูลขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ทั้งสองตัวเรียกว่า IM483 ซึ่งจะได้รับสัญญาณจากชุดควบคุมสองชุดด้วยกัน คือจากพอร์ตพริ้นเตอร์กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสามารถเลือกได้ว่าจะใช้สัญญาณจากพอร์ตพริ้นเตอร์หรือจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยสวิตช์เลื่อนที่อยู่บนบอร์ดควบคุมถ้าเลื่อนสวิตช์ไปทาง Auto จะเป็นการใช้สัญญาณจากพอร์ตพริ้นเตอร์ของคอมพิวเตอร์ และถ้าเลื่อนสวิตช์ไปทาง Manual จะเป็นการใช้สัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะสามารถกดปุ่มควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่นวางชิ้นงานได้อย่างอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.2 ชุดอินเตอร์เฟสพอร์ตขนาน

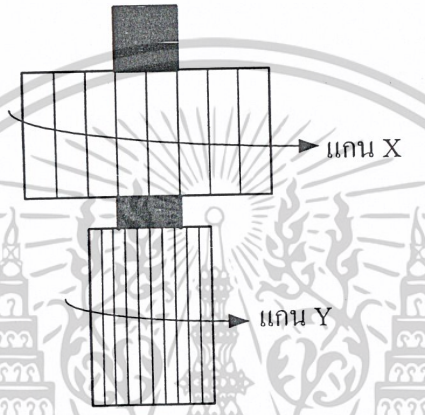
จากรูปที่3.2 ชุดอินเตอร์เฟสที่สร้างขึ้นบนแผ่นปริ๊นอเนกประสงค์ มีคอนเนคเตอร์แบบ DB25 สำหรับพอร์ตพริ้นเตอร์เพื่อใช้ส่งสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปยังโมดูลขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ IM483

รูปที่3.3 ลักษณะปุ่มกดสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่

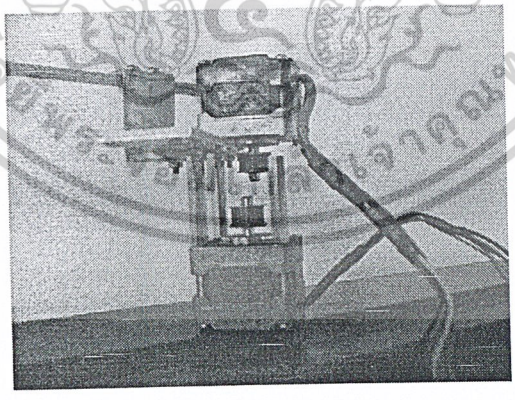
จากรูปที่3.3 ลักษณะของปุ่มควบคุมที่วางตัวเป็นรูปเครื่องหมายบวกซึ่งประกอบไปด้วยการควบคุมพื้นฐานทั้งหมด 4 แบบคือ บน ล่าง ซ้ายและขวา การเคลื่อนที่แต่ละแบบ สามารถเลือกได้ว่าจะให้เคลื่อนที่เร็วหรือช้าโดยเลือกกดปุ่ม ถ้ากดปุ่มที่อยู่รอบนอกจะเป็นการเคลื่อนที่เร็ว ส่วนปุ่มที่อยู่ด้านในจะเป็นการเคลื่อนที่ช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่3.5 แสดงให้เห็นถึงชุดขับเคลื่อนซึ่งประกอบไปด้วยสเต็ปปิ้งมอเตอร์จำนวน 2 ตัวโดยนำด้านหน้าของมอเตอร์เข้าหากัน เนื่องจากตัวส่งกำลังเดิมของเครื่องวัดที่ใช้การหมุนด้วยมือมีลักษณะวางตัวอยู่ในศูนย์กลางแนวเดียวกันคือหมุนด้านบนเป็นการเลื่อนแกนเอ็กซ์ และหมุนด้านล่างเป็นการเลื่อนแกนวาย โดยตัวหมุนที่ว่านี้มีลักษณะดังรูปที่3.4



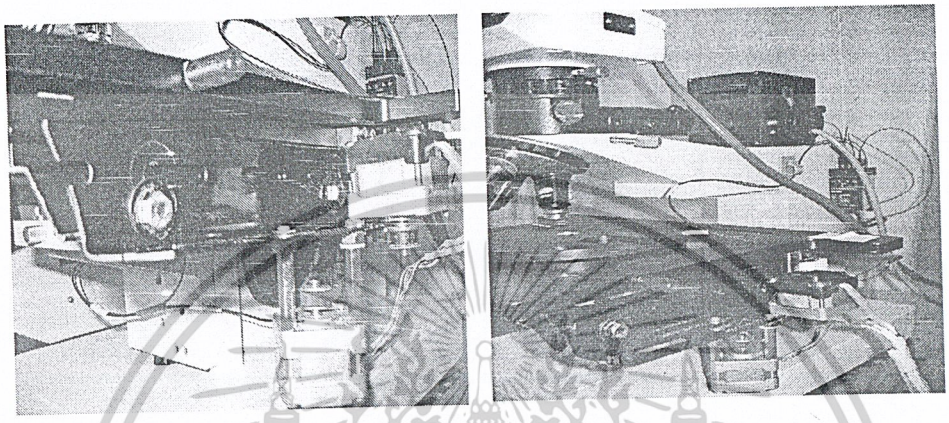
รูปที่3.4 ลักษณะของตัวหมุนเดิมในเครื่องวัด



รูปที่3.5 ชุดขับเคลื่อนที่จะนำไปติดเข้ากับแท่น

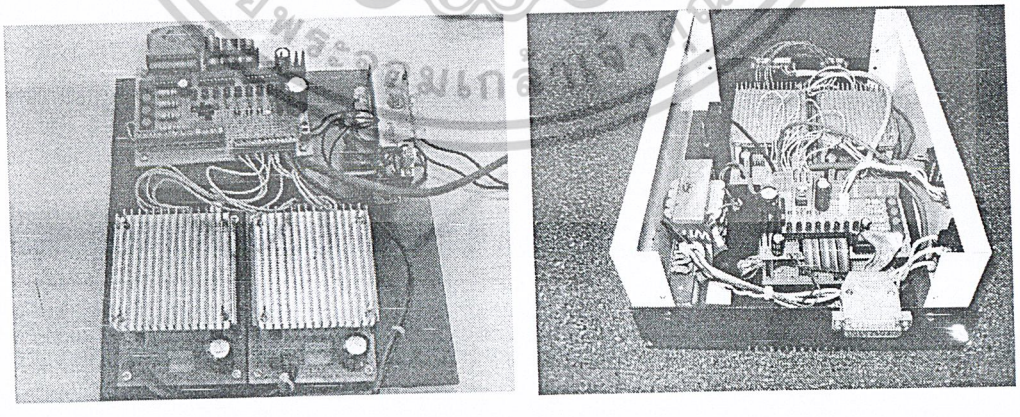
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบการติดตั้งแท่นยึดกับเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์นั้น อุปกรณ์ที่จะนำมาติดกับเครื่องนั้นต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเบา และทนต่อแรงดึงของมอเตอร์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งโครงงานนี้ผู้ทำได้ใช้เหล็กฉากที่บาง และเบานำมาติดกับเครื่องโดยใช้น็อตเป็นตัวจับยึดกับแท่นวัดส่วนตัวกลางที่ใช้ในการขับ ระหว่างสเต็ปปิ้งมอเตอร์กับแท่นวางชิ้นงานคือ สายพาน



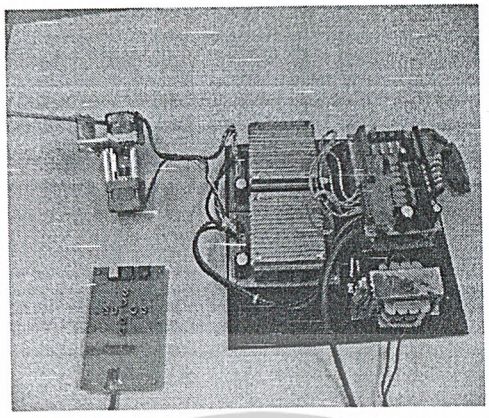
รูปที่ 3.6 การติดตั้งสเต็ปปิ้งมอเตอร์กับแท่นวางชิ้นงาน

การติดตั้งมอเตอร์ในลักษณะดังกล่าวนับว่าเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับเครื่องมือวัดตัวนี้ที่ไม่ได้ออกแบบมาให้เป็นระบบอัตโนมัติตั้งแต่แรก อย่างไรก็ตามถ้าเมื่อใดต้องการปรับเปลี่ยนมาใช้เป็นแบบเดิมคือใช้มือหมุนเพื่อเลื่อนแท่นวัดก็สามารถทำได้โดยง่ายและไม่มีผลกระทบต่อตัวเครื่อง



รูปที่3.7 ลักษณะของโมดูลขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ทั้งสองตัว

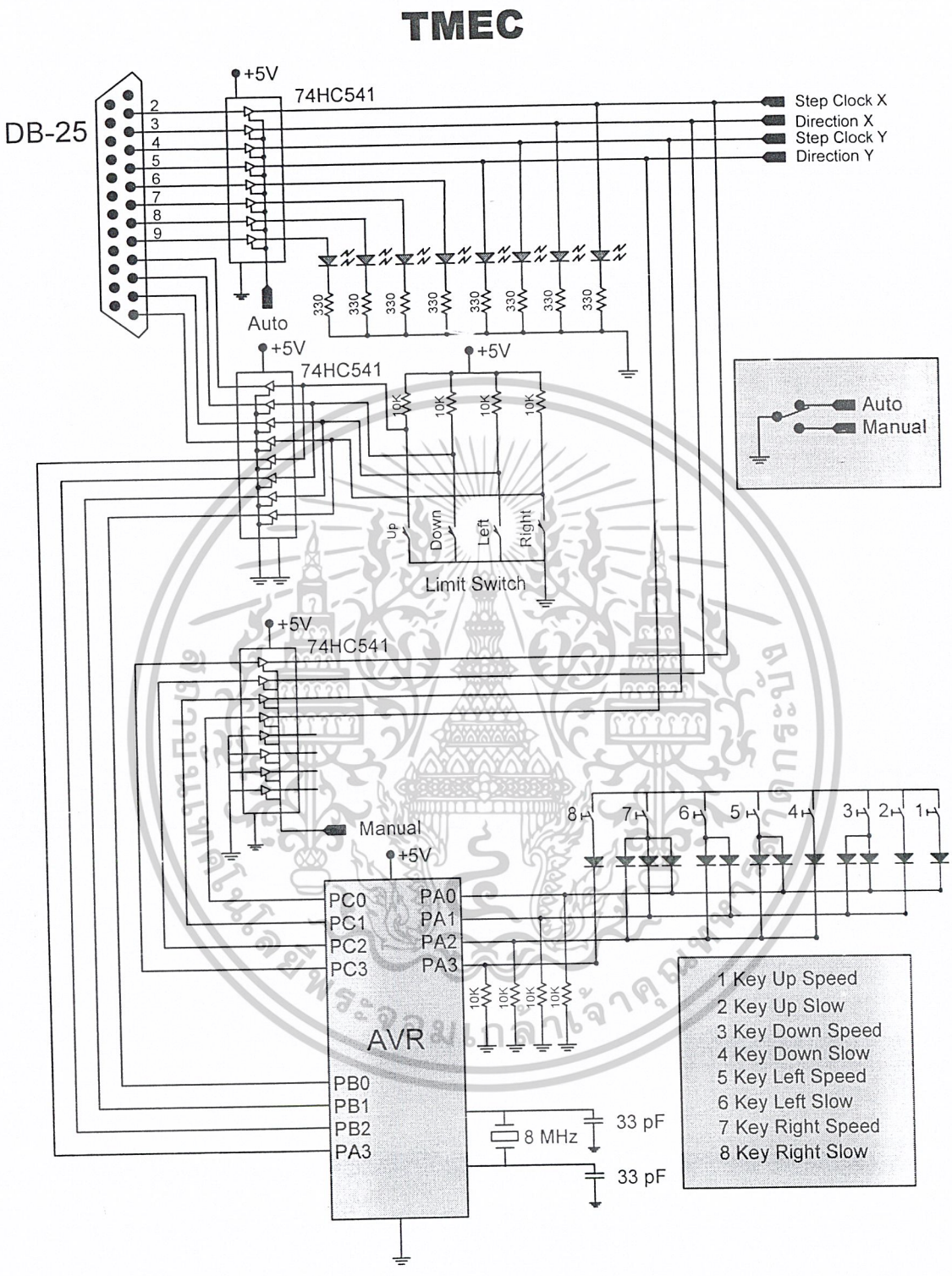
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.8 ลักษณะโดยรวมของชุดควบคุม

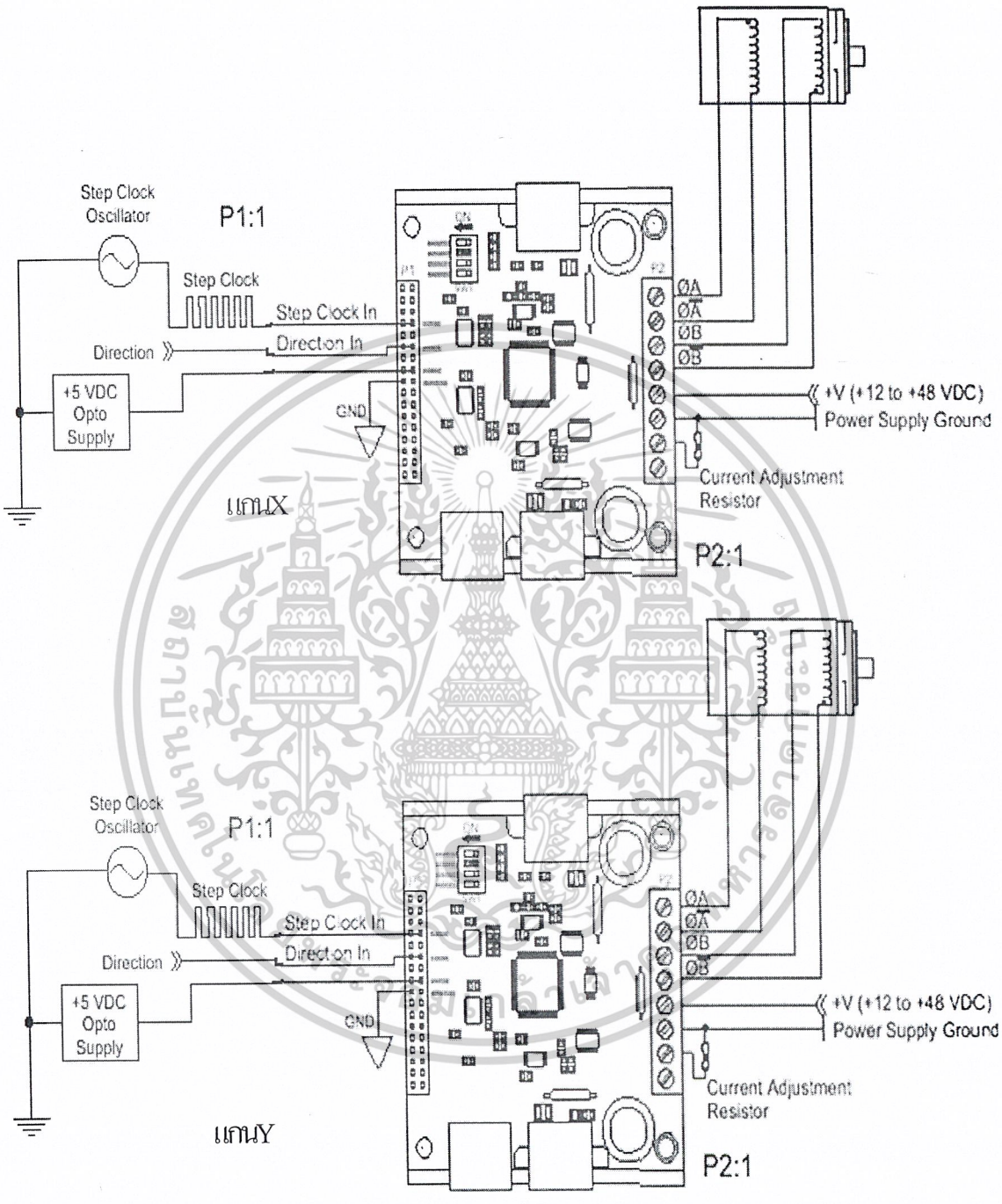
จากรูปที่3.8 เป็นระบบควบคุมการเคลื่อนที่เมื่อต่ออย่างเต็มระบบและพร้อมนำไปใช้งาน โดยอุปกรณ์ที่ได้นำมาใช้ มีข้อมูลทางเทคนิคดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.9 วงจรสมบูรณ์ของวงจรอินเตอร์เฟสพอร์ตขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.10 การต่อสายสัญญาณเข้ากับโมดูลอย่างละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครสเต็ปต่อสเต็ปทั้งหมด	ดิฟสวิทซ์0	ดิฟสวิทซ์1	ดิฟสวิทซ์2	ดิฟสวิทซ์3
2	0	0	0	0
4	1	0	0	0
8	0	1	0	0
16	1	1	0	0
32	0	0	1	0
64	1	0	1	0
128	0	1	1	0
256	1	1	1	0

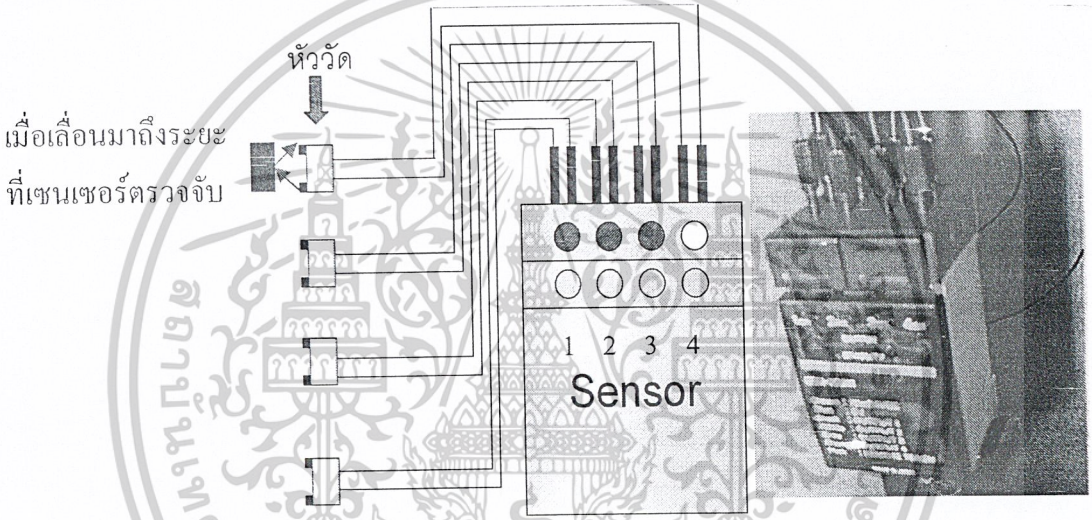
ตาราง 3.1 แสดงการปรับดิฟสวิทซ์ในการเซตความละเอียดของไมโครสเต็ป

เนื่องจากโมดูลขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์เป็นการขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบไมโครสเต็ป โดยค่าความละเอียดของไมโครสเต็ปสามารถกำหนดได้จากการเซตดิฟสวิทซ์ที่เรียงกันอยู่ 4 ตัว ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 3.1 สุดท้ายเป็นรูปที่ 3.10 แสดงการต่อการใช้งานโมดูลIM483อย่างละเอียด ซึ่งในโครงงานนี้ก็ได้ใช้ลักษณะการต่อแบบนี้เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการติดตั้งเซนเซอร์

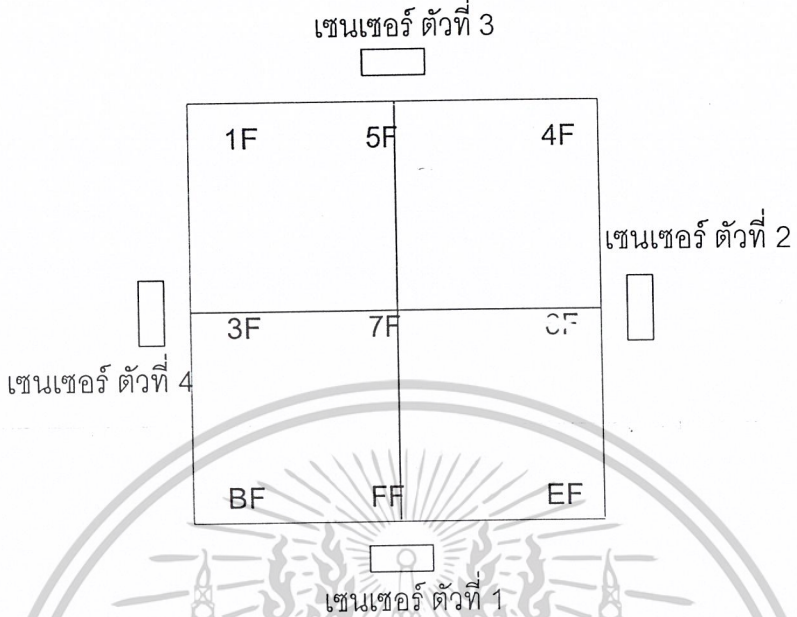
ทำการติดตั้งเซนเซอร์ทางแสง (Optical Sensor) ซึ่งมีหลักการส่งผ่านทางแสงนี้จะเป็นการส่งแสงไป และรอรับแสงกลับ โดยเซนเซอร์ชนิดนี้จะส่งแสงออกจากตัวเองอยู่ตลอดเวลา และจะกำหนดสถานะลอจิกเป็น 1 เมื่อแท่นวางแผ่นชิ้นงานเลื่อนมาถึงระยะที่กำหนด ก็จะมีการรับแสงที่สะท้อนกลับ และจะเปลี่ยนสถานะจากลอจิก 1 กลายเป็นลอจิก 0 ซึ่งสามารถสังเกตได้ โดยดูจากการไฟที่ติดและดับของหลอดไฟสีแดง ดังนั้นเมื่อแท่นวางแผ่นชิ้นงานเลื่อนมาถึงระยะที่เซนเซอร์ตรวจจับ หลอดไฟสีแดงจะดับลง จากนั้นมอเตอร์ก็จะหยุดทำงานดังรูป



รูปที่ 3.11 รูปจำลอง และรูปจริงของเซนเซอร์แบบแสง

จากรูปจำลองที่ 3.11 เลข 2, 4 แทนเซนเซอร์ที่ตรวจวัดระยะการชนทางแกนเอ็กซ์บวก และเอ็กซ์ลบ ตามลำดับ ส่วนเลข 3, 1 แทนเซนเซอร์ที่ตรวจวัดระยะการชนทางแกนวายบวก และวายลบ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ข้อมูลของพอร์ตสเตตัสที่ตำแหน่งต่างๆ

7F คือค่าที่แท่นวางชิ้นงานไม่ได้ชนกับเซนเซอร์ทั้ง 4 ตัวเลย

1F คือค่าที่แท่นวางชิ้นงานชนกับเซนเซอร์ตัวที่ 4 และ 3

5F คือค่าที่แท่นวางชิ้นงานชนกับเซนเซอร์ตัวที่ 3

4F คือค่าที่แทนวางชิ้นงานชนกับเซนเซอร์ตัวที่ 3 และ 2

6F คือค่าที่แท่นวางชิ้นงานชนกับเซนเซอร์ตัวที่ 2

EF คือค่าที่แท่นวางชิ้นงานชนกับเซนเซอร์ตัวที่ 2 และ 1

FF คือค่าที่แท่นวางชิ้นงานชนกับเซนเซอร์ตัวที่ 1

BF คือค่าที่แท่นวางชิ้นงานชนกับเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 4

3F คือค่าที่แท่นวางชิ้นงานชนกับเซนเซอร์ตัวที่ 4

จากรูปที่ 3.12 แสดงถึงค่าที่ส่งให้กับพอร์ตสเตตัส ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นอินพุทที่รับเข้ามาผ่านพอร์ตขนาน ทำให้เรารู้ตำแหน่งเริ่มและตำแหน่งสิ้นสุดในการเคลื่อนที่ของแท่นวางชิ้นงานในแต่ละแกน และสามารถเขียนโปรแกรมป้องกันความเสียหายของแท่นวางชิ้นงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในโครงงานได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งระหว่างสเต็ปปิ้งมอเตอร์กับเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วทำการติดตั้งเซนเซอร์แสงควบคุมมอเตอร์เพื่อป้องกันความเสียหายกับเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ และเพื่อทำการทดลองหาค่าของความผิดพลาดจากการส่งพัลส์ไปสเต็ปปิ้งมอเตอร์ โดยใช้เซนเซอร์ทางแสงทำการตรวจสอบ ได้ทำการทดลองเครื่องมือที่ติดตั้งควบคุมให้มอเตอร์ทำงานจากจุดเริ่มต้นไปจนถึงจุดที่เซนเซอร์ทำงาน สเต็ปปิ้งมอเตอร์ก็จะหยุดทำงาน หลังจากนี้ก็จะเป็นการทดลองใช้งาน และทำการเก็บผลเบื้องต้นจากการทดลอง เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของแท่นวางชิ้นงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์

4.1 ศึกษาการเคลื่อนที่ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์

4.1.1 จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแท่นวางชิ้นงาน

4.1.2 วิธีการทดลอง

1. ทำการสังเกตการเลื่อนของแท่นวางชิ้นงาน และปรับค่าความเร็วที่เหมาะสม
2. ทำการวัดระยะจากเซนเซอร์ในแนวแกนวายทางบวก ถึงระยะในแนวแกนวายทางลบ และทำการวัดระยะจากเซนเซอร์ในแนวแกนเอ็กซ์ทางบวก ถึงระยะในแนวแกนเอ็กซ์ทางลบ
3. ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมสเต็ปปิ้งมอเตอร์ โดยสั่งให้สเต็บมอเตอร์หมุนวน 100 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย ทางแกนเอ็กซ์ และแกนวาย โดยใช้เซนเซอร์เป็นตัวควบคุมระยะเริ่มต้นและระยะไกลสุดตามลำดับ
4. หาค่าเฉลี่ยของจำนวนพัลส์ต่อระยะทางแกนเอ็กซ์ และแกนวาย ที่ได้จากการทดลอง 100 ครั้ง
5. สรุปหาค่าความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ทดลองการส่งพัลส์ทางแกนเอ็กซ์

ครั้งที่	จำนวนพัลส์	ครั้งที่	จำนวนพัลส์	ครั้งที่	จำนวนพัลส์
1	99529	21	99718	41	99875
2	99670	22	100328	42	100281
3	100310	23	99999	43	99799
4	99527	24	100183	44	100108
5	99551	25	99798	45	99884
6	99762	26	100170	46	99647
7	100104	27	99782	47	99877
8	99597	28	99669	48	99894
9	99849	29	99654	49	100049
10	99471	30	99803	50	99952
11	99871	31	100271	51	100178
12	99433	32	99826	52	99835
13	100054	33	99806	53	99999
14	100215	34	99581	54	99488
15	100009	35	99805	55	99968
16	99738	36	99779	56	99881
17	99540	37	100260	57	100152
18	100360	38	100281	58	99537
19	99561	39	99870	59	99913
20	100069	40	100225	60	99844

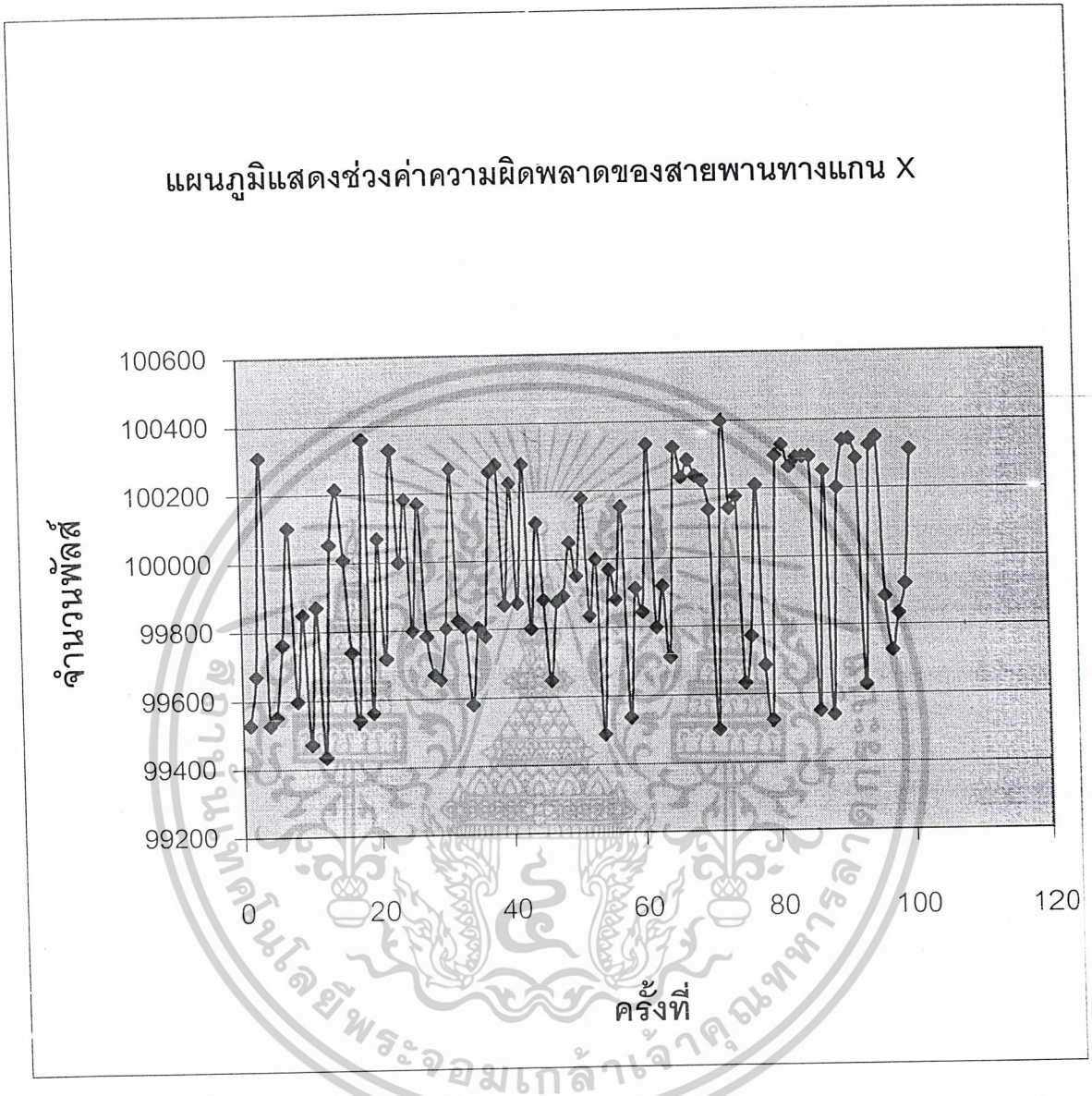
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ทดลองการส่งพัลส์ทางแกนเอ็กซ์ (ต่อ)

ครั้งที่	จำนวนพัลส์	ครั้งที่	จำนวนพัลส์
61	100334	81	100327
62	99798	82	100263
63	99919	83	100291
64	99710	84	100293
65	100324	85	100294
66	100236	86	99550
67	100287	87	100251
68	100239	88	99538
69	100225	89	100201
70	100140	90	100340
71	99498	91	100344
72	100397	92	100287
73	100144	93	99625
74	100178	94	100325
75	99632	95	100349
76	99769	96	99883
77	100211	97	99724
78	99683	98	99833
79	99524	99	99919
80	100296	100	100311

ผลรวมของจำนวนพัลส์ทางแกนเอกซ์ = 9995681 พัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดของสายพานทางแกนเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ทดลองการส่งพัลส์ทางแกนวาย

ครั้งที่	จำนวนพัลส์	ครั้งที่	จำนวนพัลส์	ครั้งที่	จำนวนพัลส์
1	90213	21	90213	41	90522
2	90536	22	90481	42	90265
3	90241	23	90243	43	90535
4	90504	24	90503	44	90263
5	90228	25	90288	45	90539
6	90510	26	90513	46	90287
7	90254	27	90253	47	90516
8	90510	28	90504	48	90232
9	90230	29	90227	49	90520
10	90492	30	90501	50	90273
11	90206	31	90268	51	90264
12	90530	32	90504	52	90538
13	90220	33	90237	53	90240
14	90511	34	90530	54	90508
15	90270	35	90281	55	90258
16	90259	36	90263	56	90539
17	90270	37	90531	57	90286
18	90499	38	90240	58	90533
19	90229	39	90509	59	90231
20	90257	40	90239	60	90551

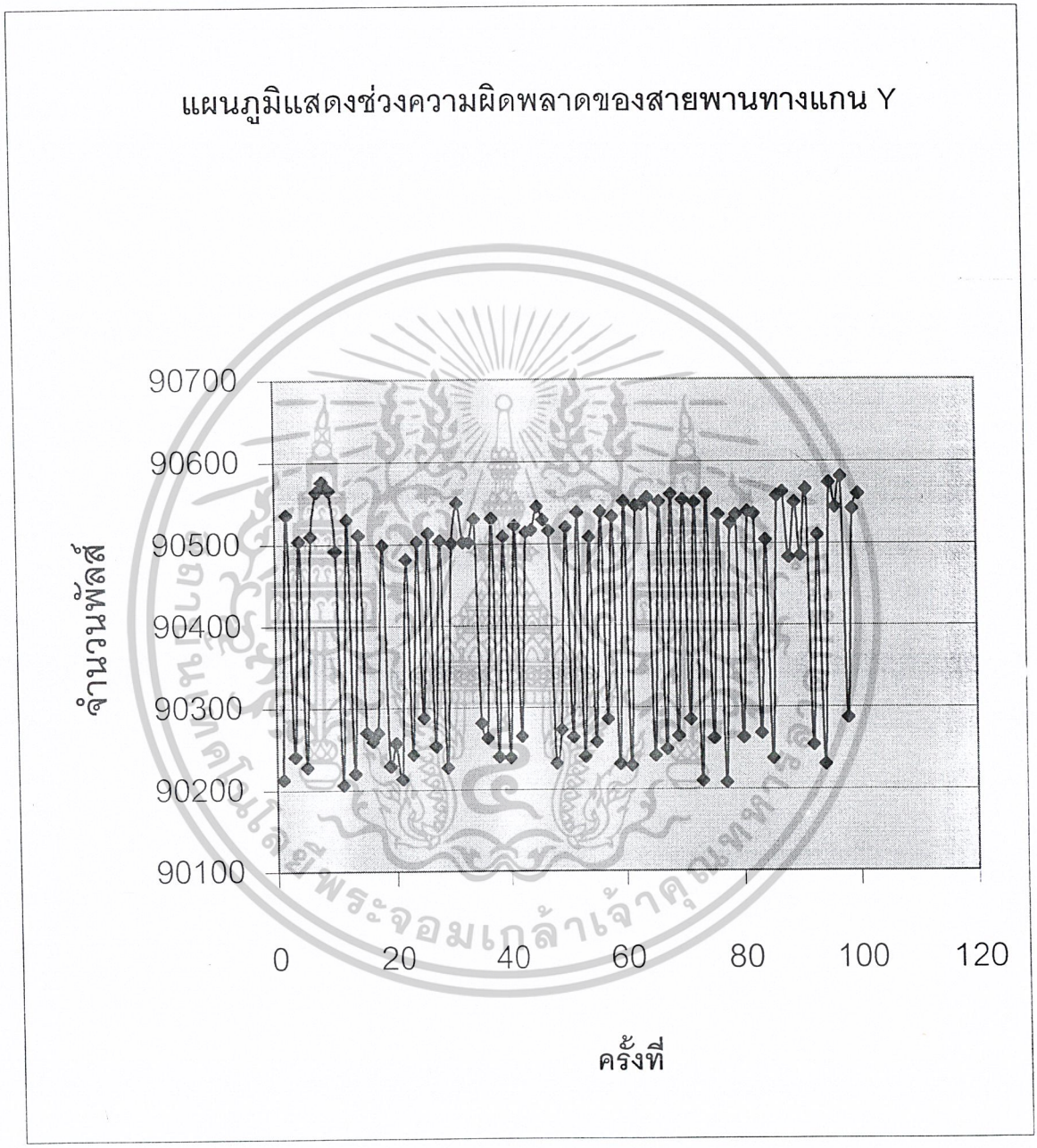
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ทดลองการส่งพัลส์ทางแกนวาย (ต่อ)

ครั้งที่	จำนวนพัลส์	ครั้งที่	จำนวนพัลส์
61	90229	81	90545
62	90546	82	90529
63	90208	83	90483
64	90556	84	90550
65	90241	85	90485
66	90551	86	90558
67	90249	87	90550
68	90560	88	90502
69	90265	89	90502
70	90553	90	90574
71	90285	91	90544
72	90550	92	90581
73	90210	93	90563
74	90560	94	90564
75	90262	95	90566
76	90548	96	90576
77	90535	97	90542
78	90524	98	90560
79	90514	99	90566
80	90517	100	90536

ผลรวมของจำนวนพัลส์ทางแกนวาย = 9041536 พัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดของสายพานทางแกนวาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 วิธีการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของระยะทางที่น้อยสุดของสเต็ปปิ้งมอเตอร์

4.1.4.1 แกนเอกซ์

ผลรวมของจำนวนพัลส์ทางแกนเอ็กซ์ 100 ครั้ง มีค่าเท่ากับ 9041536 พัลส์ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 90415.36 พัลส์

จากระยะทางมากสุดของแท่นวางชิ้นงานที่เลื่อนได้ทางแกนเอ็กซ์มีค่า 105 มิลลิเมตรจะได้ค่า 1 พัลส์มีค่าเท่ากับ $\frac{105}{99956.81}$=1.05 ไมโครเมตรต่อพัลส์

4.1.4.2 แกนวาย

ผลรวมของจำนวนพัลส์ทางแกนวาย100 ครั้ง มีค่าเท่ากับ 9995681 พัลส์ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 99956.81 พัลส์

จากระยะทางมากสุดของแท่นวางชิ้นงานที่เลื่อนได้ทางแกนวายมีค่า 129.0 มิลลิเมตรจะได้ค่า 1 พัลส์มีค่าเท่ากับ $\frac{129}{90415.36}$=1.42 ไมโครเมตรต่อพัลส์

4.1.5 สรุปผลการทดลอง

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 สามารถหาค่าเฉลี่ยของระยะทางที่น้อยสุดทางแกนเอ็กซ์เท่ากับ 1.05 ไมโครเมตรต่อสเต็ป ทางแกนวายเท่ากับ 1.42 ไมโครเมตรต่อสเต็ปตามลำดับ จากกราฟที่ 4.1 และ 4.2 แสดงถึงช่วงความไม่แน่นอนเนื่องจากการลื่นไถลของสายพาน ทำให้การเคลื่อนที่ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์มีค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาด โดยทางแกนเอ็กซ์พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.15 เปอร์เซ็นต์ต่อการเคลื่อนที่แต่ละครั้ง และทางแกนวายพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.39 เปอร์เซ็นต์ต่อการเคลื่อนที่แต่ละครั้ง ซึ่งผลการทดลองที่ได้ออกมานั้นเป็นกรณีที่ยอมรับได้ เพราะถ้าพิจารณาจากความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ซึ่งอยู่ในระดับมิลลิเมตร เทียบกับลำแสงที่ตกกระทบลงมาที่ฟิล์มบางซึ่งอยู่ในระดับเซนติเมตรแล้วถือว่าความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์นั้นส่งผลต่อการวัดความหนาที่จุดๆเดิมน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการทดลอง และผลของการติดชุดขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติสำหรับเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องวัดความหนาของฟิล์มบางได้อย่างดีเยี่ยม โดยการวัดนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 โหมดการวัด เพื่อให้เกิดความสะดวก, ความถนัดของผู้ใช้งาน และรูปแบบในการวัดชิ้นสารนั้นที่จะใช้กับเครื่องวัด หน้าที่หลักที่สำคัญคือการวัดชิ้นงาน สามารถกลับมาวัดจุดที่ตำแหน่งเดิมได้แม่นยำมากกว่าการใช้มือหมุนแบบเดิม และสามารถแสดงจุดการวัดชนิด 5 จุด และ 9 จุดได้อย่างแม่นยำ โดยมีความรวดเร็วมากกว่าการวัดแบบควบคุมด้วยมือ

นอกจากนี้ยังช่วยทำให้ผู้ใช้สามารถปรับปรุงกระบวนการต่างๆที่ใช้ผลิตสารกึ่งตัวนำที่ไม่ได้มาตรฐานได้ ซึ่งผู้ใช้สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานในจุดต่างๆทั่วทั้งแผ่นโดยทำการวัดทั้งก่อนและหลังกระบวนการได้ง่ายขึ้น จากเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ และส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตสารกึ่งตัวนำให้ได้ดียิ่งขึ้น

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ในโครงงานพิเศษนี้ ผู้พัฒนาได้ทำการพัฒนาแท่นวางชิ้นงานให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวเอ็กซ์-วายเท่านั้น ซึ่งในส่วนนี้สามารถแก้ไขปัญหาในเรื่องของตำแหน่งต่างๆบนชิ้นงานที่ผู้ใช้ต้องการวัด ทำให้ลดความผิดพลาดของผู้ใช้ที่ต้องการวัดที่จุดๆเดิม แต่ยังมีความยุ่งยากในเรื่องของการปรับโฟกัส ซึ่งผู้ใช้ต้องค่อยปรับโฟกัสใหม่ทุกครั้งที่เมื่อวัดจุดถัดไป

เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องที่ใช้วัดความหนาของฟิล์มบาง เมื่อทำการวัดหาค่าความหนาของฟิล์มบาง เครื่องจะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์และส่งค่าความหนาของฟิล์มมายังเครื่องพริ้นเตอร์เพื่อพิมพ์ค่าออกมา ทำให้ผู้ใช้ต้องจดค่าเก็บไว้หรือไม่ก็เก็บกระดาษนั้นไว้ ซึ่งเป็นการเสียเวลาและเกิดความลำบากเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตรมิเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ แม้จะสามารถทำให้ผู้ใช้ง่ายต่อการวัดชิ้นงานหลายๆจุด และก็ยังมีความยุ่งยากในการวัดอยู่ เนื่องจากตัวเครื่องสเปคโตรโฟโตรมิเตอร์ไม่ได้ถูกเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำให้ในการวัดแต่ละครั้ง ต้องเสียเวลากดปุ่มที่ตัวเครื่องสเปคโตรโฟโตรมิเตอร์เพื่อให้เครื่องทำการวัดค่าความหนาและที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อดำเนินการวัดในจุดต่อไป ดังนั้นถ้าในอนาคตสามารถทำการเชื่อมต่อระหว่างตัวเครื่องทั้งสอง โดยผ่านทางพอร์ตขนาน จะทำให้สามารถกดปุ่มแค่การวัดความหนาที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพียงที่เดียวเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

คู่มือการใช้งานระบบวัดแบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งานระบบวัดแบบอัตโนมัติสำหรับเครื่องวัดความหนาฟิล์มบางชนิดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

จัดทำโดยนักศึกษาโปรเจค การพัฒนาระบบการวัดแบบอัตโนมัติสำหรับเครื่องวัดความหนาฟิล์มบาง ชนิดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาระบบการวัดแบบอัตโนมัติ สำหรับเครื่องวัดความหนาฟิล์มบาง ชนิดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ชัชชัย พรหมศาสตร์

นิธิ อาศุศิริ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทแนะนำการใช้งาน

ก่อนอื่นจะขอแนะนำการใช้งานของโปรแกรมเสียก่อนเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายโดยผู้ใช้โดยโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 3 โหมดด้วนกันดังนี้

1.เป็นการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติแบบ 5 จุด และ 9 จุด
2.เป็นการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติแบบควบคุมมอเตอร์แบบเคลื่อนที่อิสระ
3.เป็นการเคลื่อนที่แบบกำหนดจุดเองหลายจุด

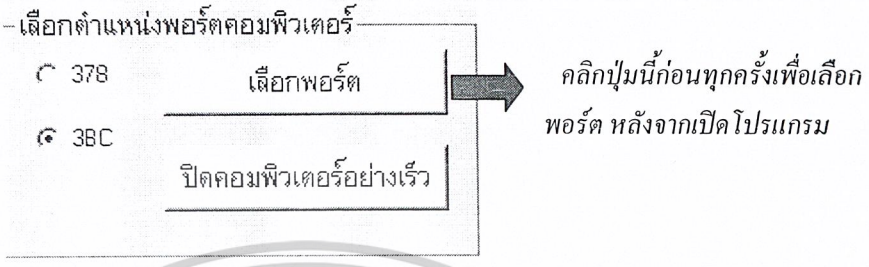
โดยทั้ง 3 โหมดนี้เมื่อเข้าสู่การทำงานแล้วโปรแกรมจะใช้งานได้เฉพาะโหมดที่ถูกทำการเลือกเท่านั้น ส่วนโหมดที่ไม่ได้ถูกทำการเลือกโดยผู้ใช้จะทำงานไม่ได้ ต้องทำการเปลี่ยนโหมดเสียก่อนเพื่อป้องกันการกดผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น ซึ่งผู้เขียนขอแนะนำว่าควรศึกษาคู่มือการใช้งานให้ละเอียดก่อนการใช้เพื่อรักษาไว้ซึ่งความสำเร็จที่จะถูกพัฒนาต่อไปในอนาคต

คณะผู้จัดทำโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกพอร์ต

เริ่มเข้าโปรแกรม สิ่งที่ต้องดูเป็นอย่างแรกเพื่อรองรับพอร์ตคอมพิวเตอร์หลายรุ่นก็คือต้องเข้าสู่ฟังก์ชันนี้ก่อน



รูปแสดงการเลือกพอร์ตของ Computer

สิ่งจำเป็นอย่างแรกในการใช้โปรแกรมนี้คือต้องเลือกพอร์ตของ Computer ก่อนเสมอ ผู้เขียนได้คิดมาใช้เพื่อรองรับคอมพิวเตอร์ได้หลาย ๆ รุ่น ที่มีตำแหน่งของแอดเดรสที่ไม่ตรงกัน อย่างเช่นเครื่องนี้เป็นเครื่องรุ่นเก่าจะอยู่ที่ตำแหน่ง 3BC

ลำดับขั้นตอนการเลือก

1.เปิดโปรแกรม

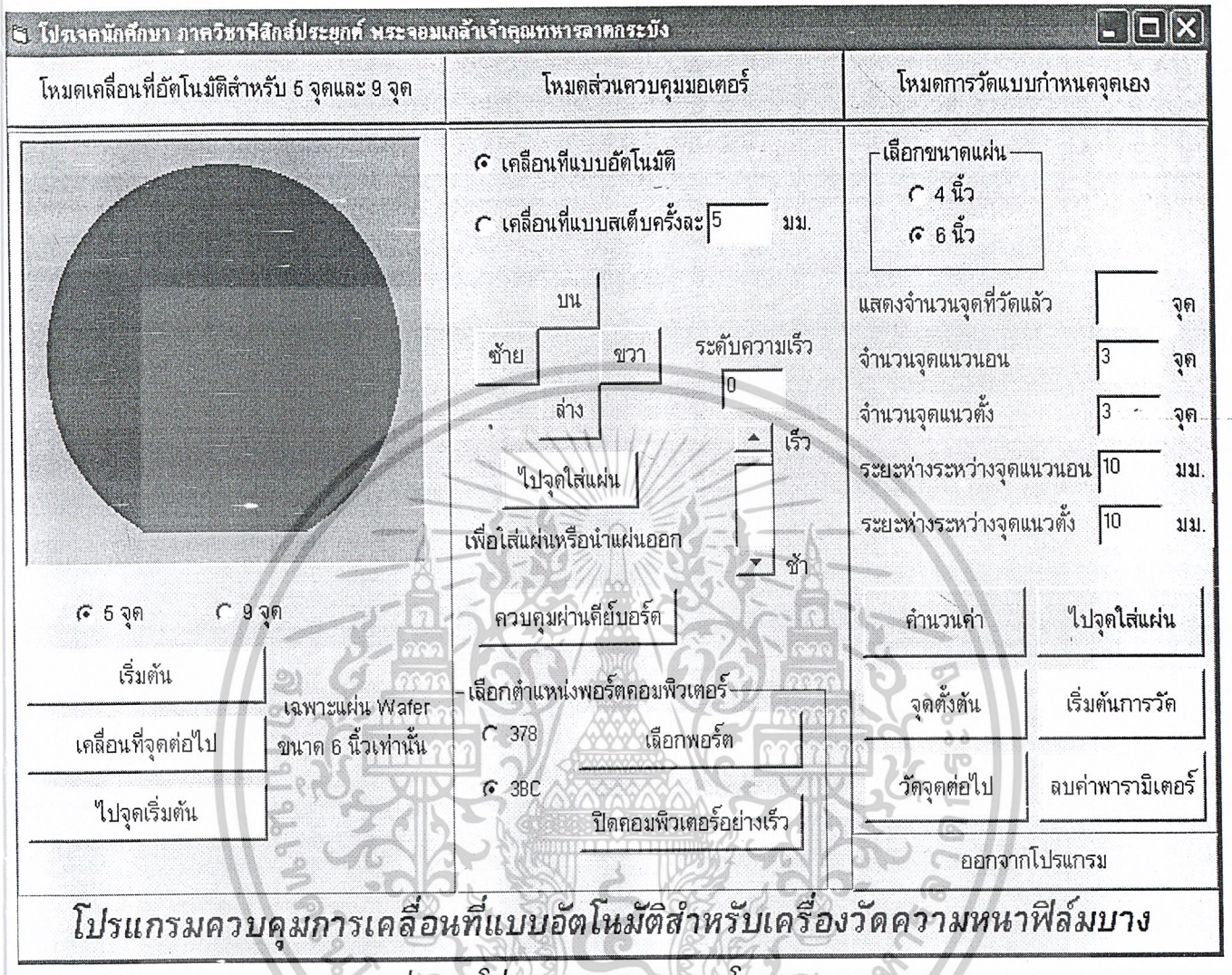
2.เลือกพอร์ต 3BC

3.คลิกที่"**เลือกพอร์ต**"

*หมายเหตุถึงแม้ว่าจะเลือกไว้อยู่แล้วแต่ก็ต้องคลิกย้ำสถานะพอร์ต 3BC อีกครั้งโดยการคลิก"เลือกพอร์ต" ทุกครั้งไม่เช่นนั้นจะทำให้ โปรแกรมทำงานผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่อง Spectrophotometer thin film thickness



รูปแสดงโปรแกรมการควบคุมโดยรวม

จากรูป เราจะแบ่งโหมด การควบคุมออกเป็น 3 โหมดหลักด้วยกันดังนี้

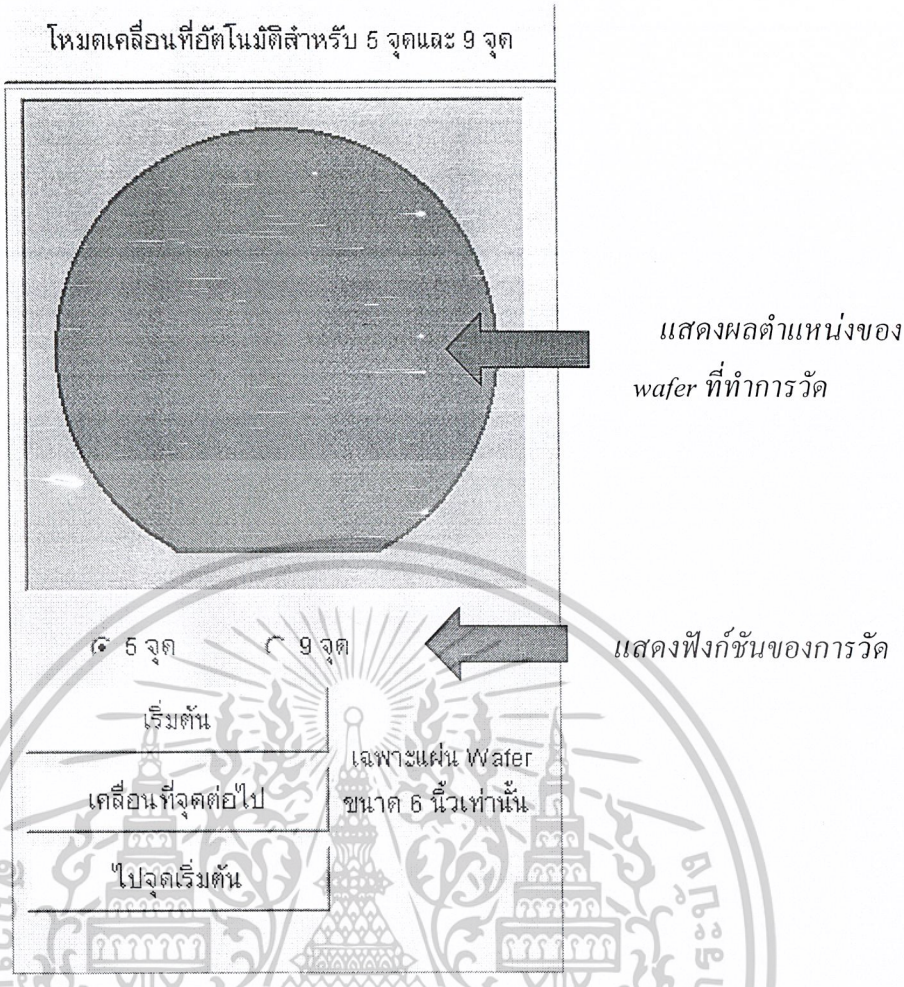
1.เป็นการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติแบบ 5 จุด และ 9 จุด

2.เป็นการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติแบบควบคุมมอเตอร์แบบเคลื่อนที่อิสระ

3.เป็นการเคลื่อนที่แบบกำหนดจุดเองหลายจุด

โหมดที่1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงโหมดที่ 1 แสดงการวัดแบบอัตโนมัติแบบ 5 จุด และ 9 จุด

โดยส่วนนี้จะทำการวัดแบบอัตโนมัติแบบ 5 จุด และ 9 จุด ก่อนที่จะเลือกใช้ฟังก์ชันการวัด ต้องให้แท่นเลื่อนใส่แผ่น เคลื่อนที่ไปยังจุดใส่แผ่นก่อนเสมอ และโหมดนี้ใช้ได้กับเฉพาะแผ่น Wafer 6 นิ้ว หรือมากกว่าเท่านั้น

ลำดับขั้นตอนการวัด

1.นำแผ่น Wafer ใส่ที่จุดใส่แผ่น

2.ทำการเลือกฟังก์ชันการทำงานแบบ 5 จุด หรือ 9 จุด

3.คลิก "**เริ่มต้น**"เพื่อเคลื่อนที่ไปยังจุดวัดจุดแรก

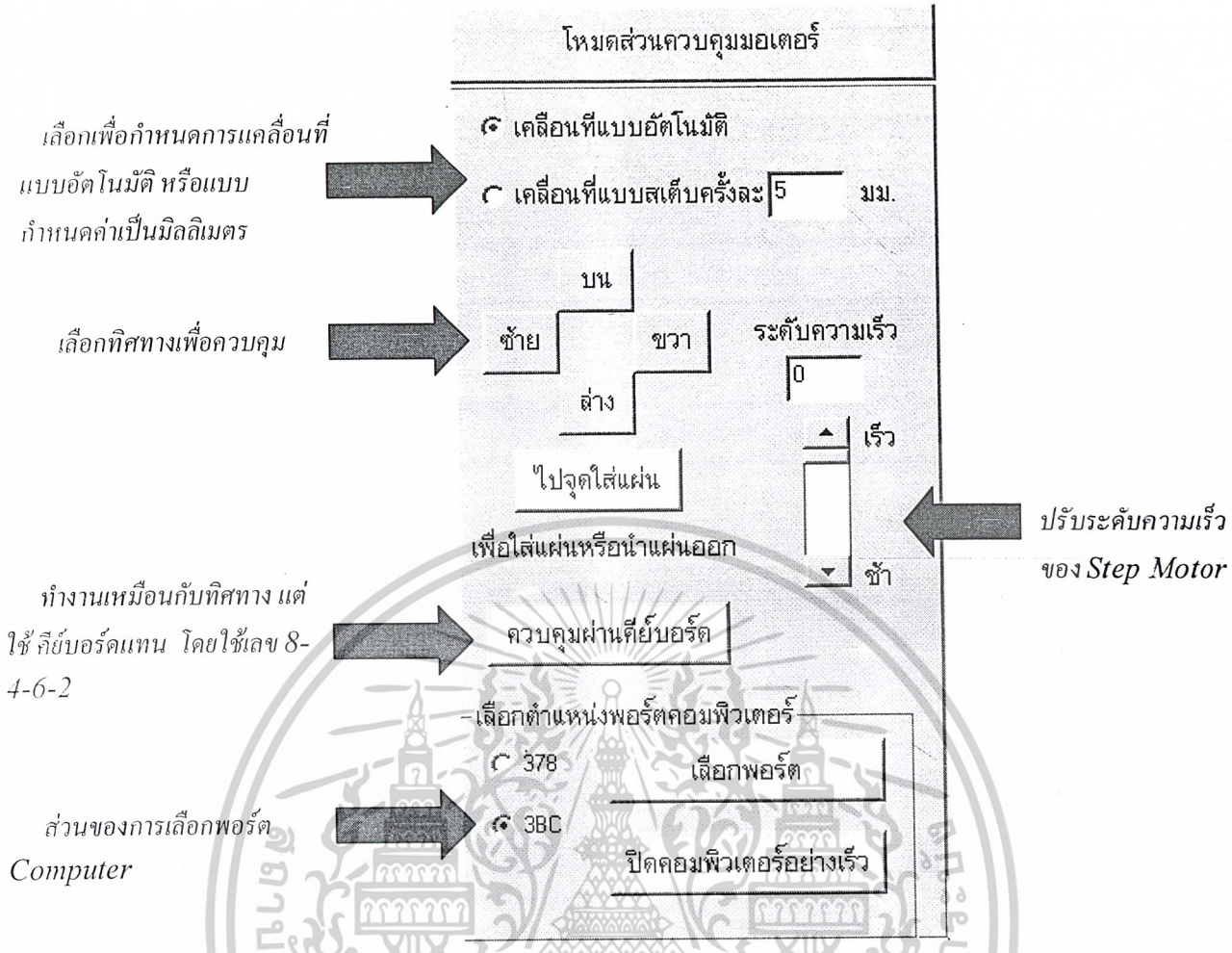
4.ปรับโฟกัสทำการวัด จากเครื่อง Spectrophotometer และทำการวัด

5.คลิกเคลื่อนที่จุดต่อไป เพื่อทำการวัดจุดต่อไป และเมื่อครบ 9 จุด หรือ 5 จุดแล้ว โปรแกรมจะเตือนว่าเสร็จกระบวนการวัดแล้ว

6.คลิก "เคลียร์จุด"เพื่อลบจุดที่แสดงการตรวจวัดแล้ว และเคลื่อนที่มายังจุดใส่ Wafer

<u>โหมดที่2</u>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



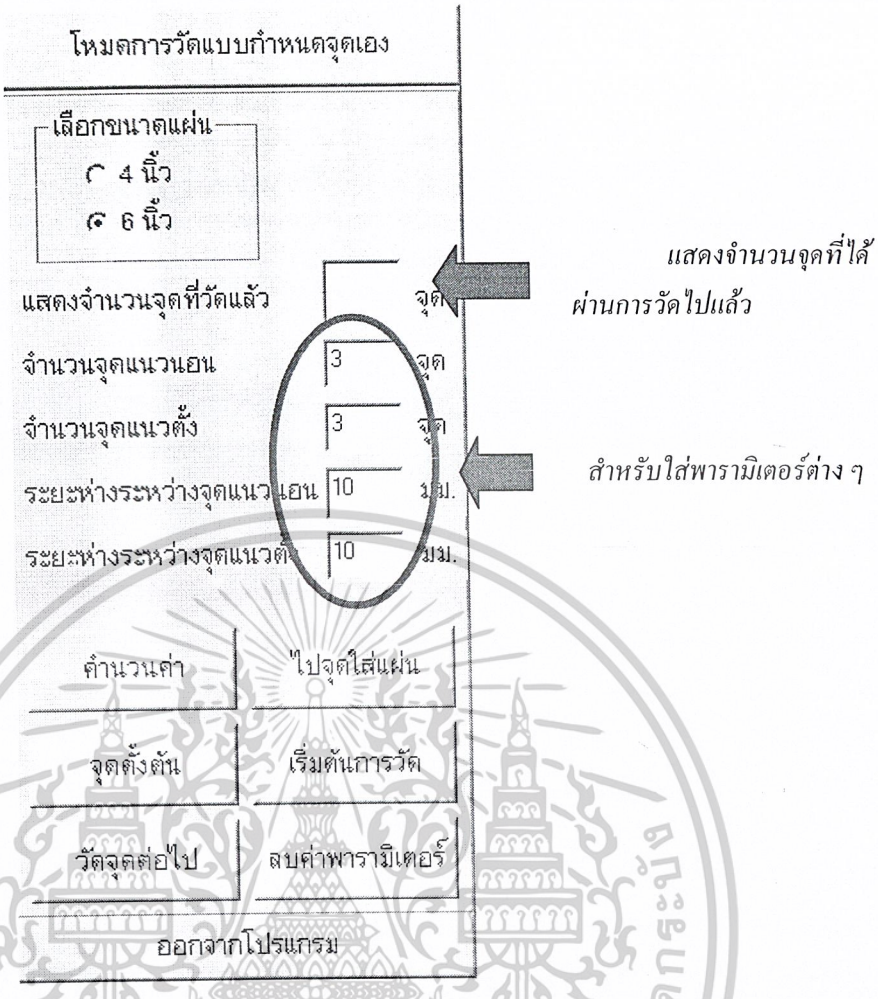
รูปโหมดที่ 2 แสดงการวัดแบบการเคลื่อนที่อิสระแบบอัตโนมัติ และแบบเสต็ป

โดยปกติเมื่อเปิดโปรแกรมจะจะทำการเลือกฟังก์ชันที่เป็นการเคลื่อนที่แบบ อัตโนมัติเสมอ เมื่อเริ่มใช้ฟังก์ชันนี้แล้ว ผู้ใช้เลือกเป็นการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติอิสระโดยผู้ใช้โดยการใช้เมาส์ควบคุม การเลื่อนจะมีการป้องกัน เมื่อเคลื่อนที่เกินระยะที่กำหนดโดย Sensor และสามารปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ตามต้องการ แต่ผู้เขียนโปรแกรมได้ทำการทดลองหาค่าที่เหมาะสมแล้วโดยใช้ ค่า 45 เป็นต้นแบบ

- การเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติแบบไม่กำหนดค่านั้นมอเตอร์จะหยุดเมื่อปล่อยเมาส์
- การเคลื่อนที่แบบกำหนดค่านั้นเมื่อเลือกใน Option click และกำหนดค่าเสร็จแล้วให้ใช้เมาส์คลิกเพียง 1 ครั้ง
- การเคลื่อนที่โดยใช้ “คีย์บอร์ด”นั้นใช้ตัวเลข 8 - 2 - 4 หรือ 6 เพื่อแทนการเคลื่อนที่ **บน-ล่าง-ซ้าย-ขวา** ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดที่3



รูปโหมดที่ 3 แสดงการวัดแบบเคลื่อนที่แบบกำหนดจำนวนจุดที่จะทำการวัด

โหมดนี้ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อทำการวัดหลาย ๆ จุดบนแผ่นเดียว โดยการใส่พารามิเตอร์จากผู้ใช้ เช่นถ้าใส่ค่าเป็น 7 จุดแกนเอ็กซ์กับ 7 จุดทางแนวแกน วาย ก็จะได้ 49 จุด โดยจะกำหนดค่าระยะห่างระหว่างจุดในแนวแกนเอ็กซ์กับ แนวแกนวายได้

ลำดับขั้นตอนการวัด

1.เลือกขนาดของ Wafer ที่จะทำการวัด แต่จะเลือกไว้ให้อัตโนมัติอยู่แล้ว

2.ต้อง"**คำนวณค่า**"ก่อนทุกครั้งหลังจากใส่พารามิเตอร์เสร็จแล้ว เพื่อป้องกัน ความเสียหายที่จะเกิดจากเครื่อง

3.เคลื่อนไปยัง"**จุดใส่แผ่น**"ก่อนเสมอ

4.คลิก"**จุดเริ่มต้น**"เพื่อไปจุดกึ่งกลางของ Wafer

5.คลิก"**เริ่มต้นการวัด**"แท่นจะเคลื่อนไปยังจุดที่ 1

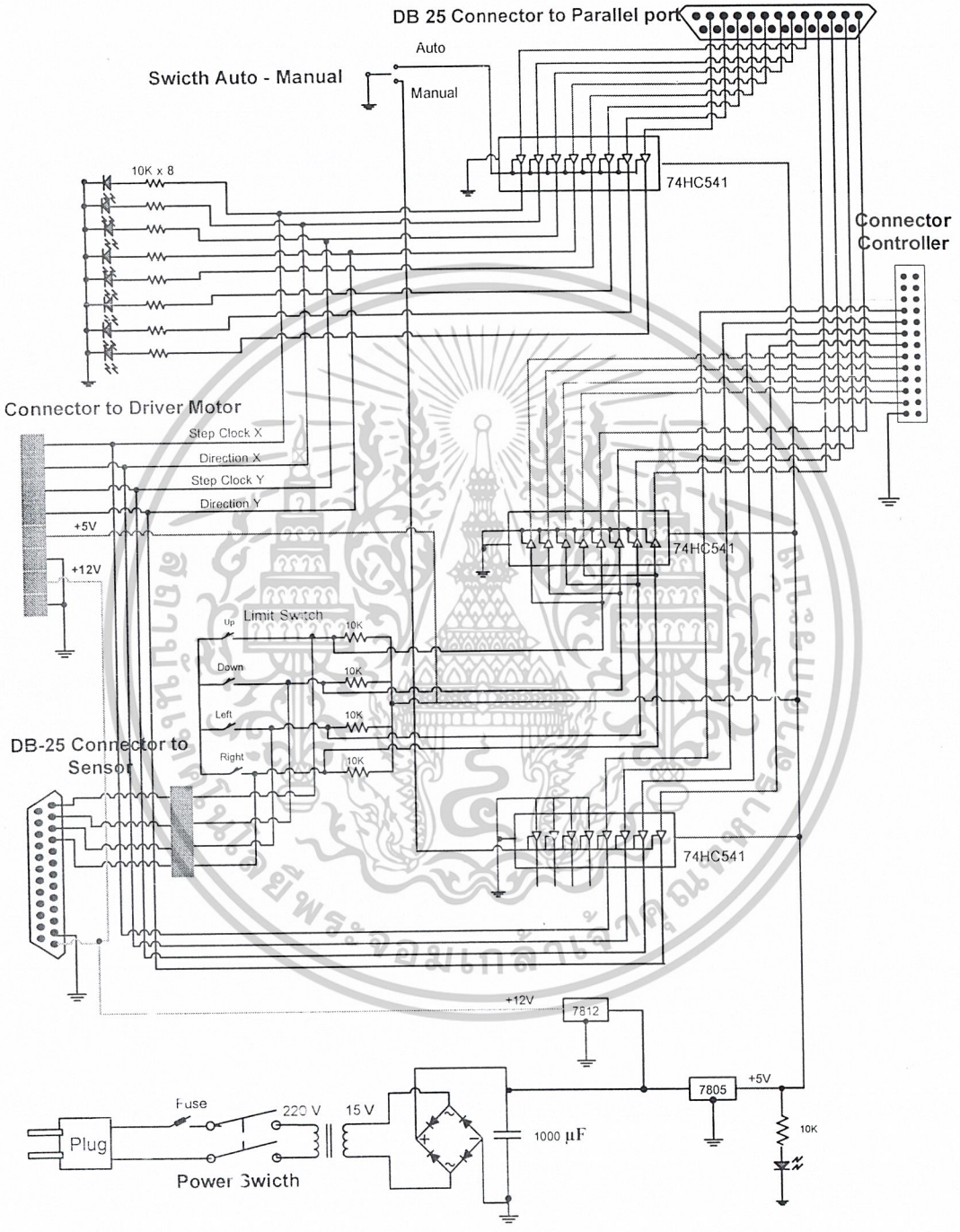
6.คลิก"**จุดต่อไป**"จนกระทั่งจบกระบวนการ และเมื่อครบแล้วแท่นจะเคลื่อนที่กลับมายังจุดใส่แผ่นอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

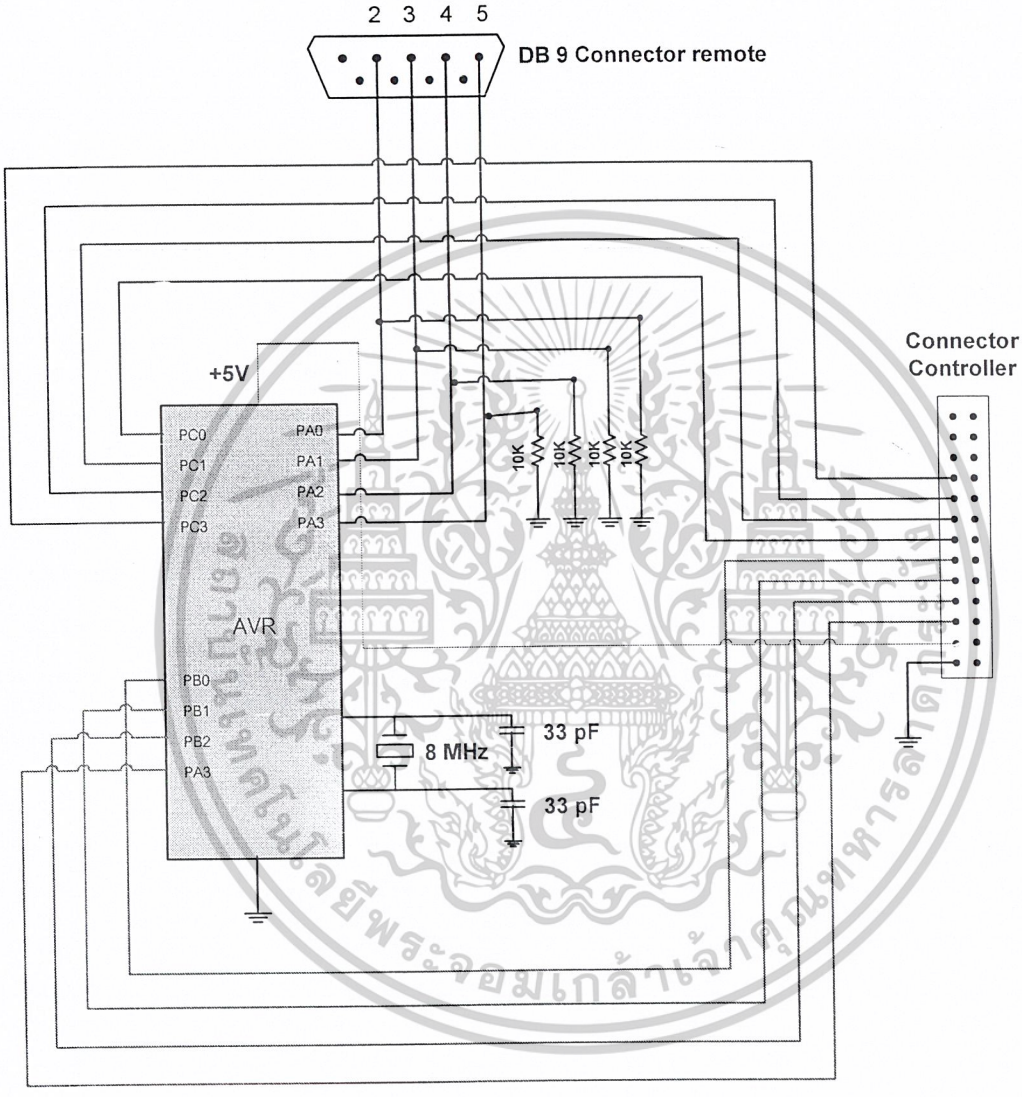
ภาคผนวก ข.

วงจรรวมสมบูรณ์ของกล่องควบคุม

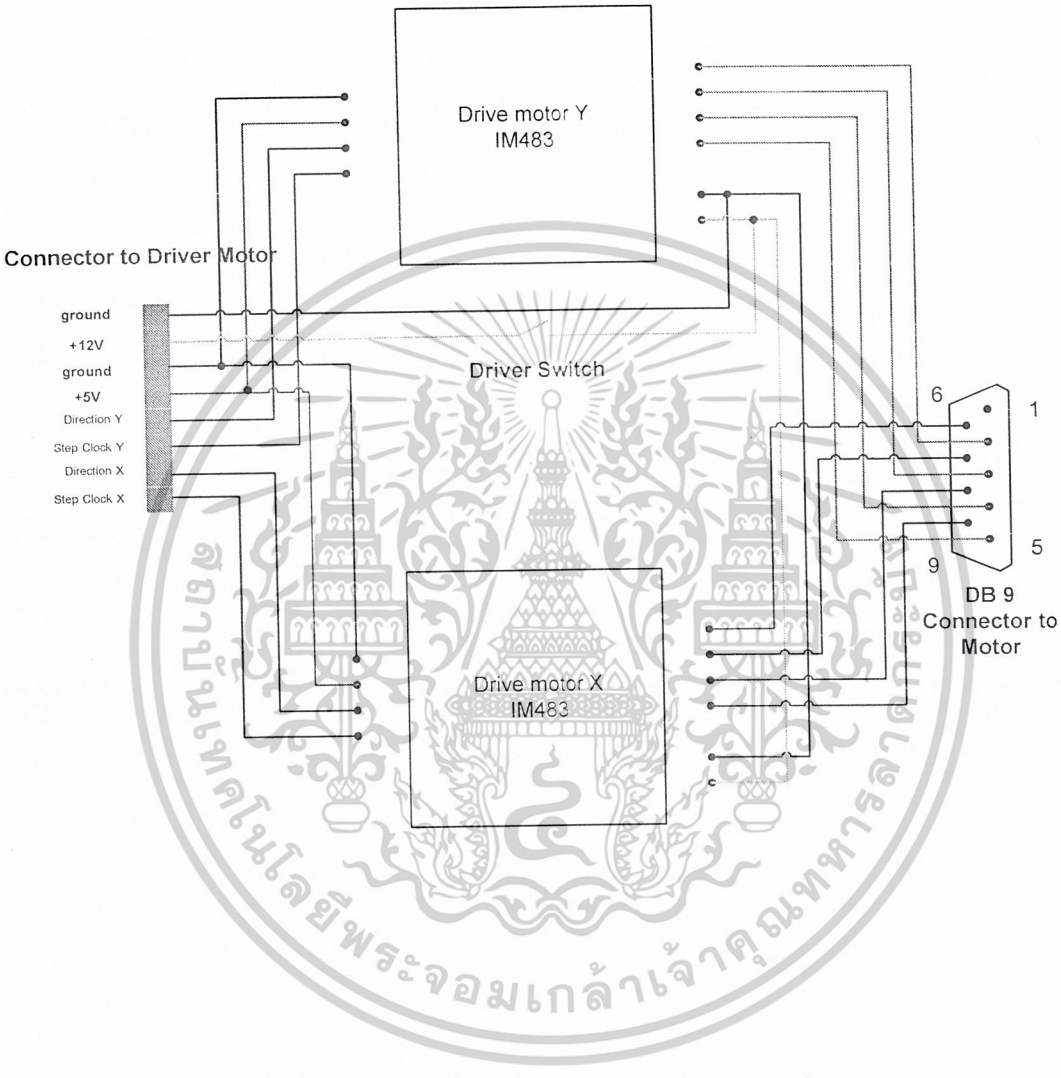
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ทัศนศาสตร์กายภาพ Physical Optics โดย ดร.สุวรรณ คูสำราญ

ISBN 974-621-208-7

เรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตขนาน โดย กฤษดา ใจเย็น และชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล

ISBN 974-865-178-9

คู่มือการเขียนโปรแกรม และใช้งาน Visual Basic 6 โดย สัจจะ จรัสรุ่งระวีวร

ISBN 974-619-077-6

หลักการเขียนโปรแกรม ภาษาปาสคาล โดย ผศ.สมจิตร อาจอินทร์

ISBN 974-674-244-2

ภาษาและการเขียนโปรแกรม C เรียบเรียงโดย ดร.วิทยา วัชระวิทยากุล

ISBN 974-509-519-2

Visual Basic 6 ฉบับโปรแกรมเมอร์ โดย กิตติ ภักดีวัฒนะกุล-จำลอง ครูอุตสาหะ

ISBN 974-7042-99-1

http://www.vbhelp.net

http://searchvb.techtarget.com

http://www.thaiio.com

http://www.vbwire.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้