

เครื่องควบคุมตำแหน่งเคลื่อน X-Y สำหรับระบบคีมจับเชิงแสง

X-Y STAGE CONTROLLER FOR OPTICAL TWEEZERS SYSTEM



นายอนุพร เกตุคำวัฒนภพธรรม

นางสาวนิภารัตน์ เจริญชวนกันที่กุล

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาและพัฒนาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

เครื่องควบคุมแท่นเลื่อน X-Y สำหรับระบบคีมจับเชิงแสง

## X-Y STAGE CONTROLLER FOR OPTICAL TWEEZERS SYSTEM



นายนภาพร เหล่าวัฒนธรรม  
นางสาวนิภารัตน์ เจียมอนันท์กุล

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน คณะวิทยาศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รังที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2555

# X-Y STAGE CONTROLLER FOR OPTICAL TWEEZERS SYSTEM



**Mr. Navaporn Laowattanatham**

**Miss Niparat Cheamanunkul**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT**

**OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

**IN APPLIED PHYSICS**

**FACULTY OF SCIENCE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

**ACADEMIC YEAR 2012**

หัวข้อโครงการพิเศษ เครื่องควบคุมแท่นเลื่อน X-Y สำหรับระบบคีมจับเชิงแสง  
X-Y stage controller for optical tweezers system

ชื่อนักศึกษา นาย นวพร เหล่าวัฒนธรรม  
นางสาว นิภารัตน์ เจียมอนันท์กุล






ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประธาน บุรณศิริ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.วิจิต ศิริโชติ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์  
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ อ. สุรชาติ กมลดีด	
กรรมการ ดร. กীরุทธิ์ ศรีนวลจันทร์	
กรรมการ อ. ชรรมรัตน์ แต่งตั้ง	
กรรมการ ดร.ประธาน บุรณศิริ	
กรรมการ รศ.วิจิต ศิริโชติ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการพิเศษเรื่อง	เครื่องควบคุมแท่นเลื่อน X-Y สำหรับระบบคิมจับเชิงแสง
นักศึกษา	นายนวพร เหล่าวัฒนธรรม นางสาวนิภารัตน์ เจียมอนันท์กุล
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ประธาน บุรณศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.วิจิต ศิริโชติ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างฐานวางตัวอย่างที่สามารถควบคุมให้เคลื่อนที่ในแนวแกน X-Y โดยใช้สเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส ควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้วงจร ควบคุม ติดตั้งกับฐานวาง ตัวอย่าง จากนั้นทำการทดสอบการเคลื่อนของฐานตัวอย่าง ซึ่งมีความละเอียด และความแม่นยำ พร้อมทั้งติดตั้งระบบจำกัดการเคลื่อน ซึ่งสเต็ปปีงมอเตอร์ ที่ใช้งานนี้ หมุนด้วยความ ละเอียด 0.072 องศา/สเต็ป เลื่อนด้วยระยะ 0.2 ไมโครเมตร ฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบ กิ่งอัตโนมัติพร้อม โปรแกรมและ ระบบควบคุม จะถูกนำไปติดตั้งในระบบคิมจับเชิงแสงที่ได้สร้าง ขึ้น โดยระบบการมองเห็นภาพ จะถูกควบคุมด้วย โปรแกรมควบคุมการเก็บภาพนิ่งและ ภาพเคลื่อนไหว จากนั้นทำการ ทดสอบการจับอนุภาคตัวอย่าง เพื่อสร้างเป็นระบบคิมจับแสงแบบ กิ่งอัตโนมัติ ที่สามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษาอนุภาคตัวอย่างที่มีขนาดเล็กในระดับไมครอน และ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางชีววิทยาเชิงฟิสิกส์ ของตัวอย่างที่นำมาศึกษาต่อไป

คำสำคัญ : สเต็ปปีงมอเตอร์, ฐานตัวอย่าง, คิมจับเชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	X-Y stage controller for optical tweezers system
<b>Students</b>	Mr. Navaporn Laowattanatham Miss Niparat Cheamanunkul
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Applied Physics
<b>Academic Year</b>	2012
<b>Advisor</b>	Dr. Prathan Buranasiri
<b>Co-Advisor</b>	Assoc. Prof. Wichit Sirichote

### ABSTRACT

This special project aim is to design and implement a semi-automation system for controlling optical tweezers' sample stage moving in X-Y axis using a 5-phase stepping motors which have been controlled by microcontroller. These stepping motors have been operated with a resolution of 0.072 degree per step in the range of 0.2 micrometer. After that this semi-automation X-Y sample stage controlling system has been installed with conventional optical tweezers based on microscope to complete the overall system. Furthermore the vision system for optical tweezers system has been operated with specific software to capture still, and dynamical images and store them into computer data storage. In operation testing, the sample particles that is polystyrene have been used to test the overall system operation. After system testing we found that this optical tweezers with semi-automation sample stage controlling system can be applied to study a small particles in micron scale, and biological cells and analyze some biophysics properties and so on.

**Keywords :** Stepping motor, X-Y stage, Optical tweezers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการ พิเศษนี้สามารถสำเร็จเสร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความสนับสนุน ให้คำแนะนำปรึกษา และช่วยเหลือของ ดร. ประธาน บุรณศิริ และ รศ. วิจิต ศิริโชติ ผู้ซึ่งให้คำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการ อธิบายและแก้ไขปัญหาทางระบบทัศนศาสตร์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินงานสร้าง และทดลอง โครงการพิเศษนี้ รวมไปถึงการฝึกฝนทักษะการคิดแก้ไขปัญหา ทำให้ลูกศิษย์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตการเรียน หรือการทำงานในระดับสูงต่อไป

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์ นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอก ของคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อันประกอบด้วย รศ. อนุพงศ์ สรงประภา, อ. สุรชาติ กมลคิลก, อ. กางปัญญา สุวรรณสุขใจ, รศ. สาทราย เล็กชะอุม, ดร. กীর युทธ์ ศรีนวลจันทร์, อ. ชรรมรัตน์ แต่งตั้ง, รศ. ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา, นายสุวรรณ พลอยพิชิต, นายสิวกกร สุขประเสริฐชัย, นายสุรวุฒิ วิจารณ์, นายสมพบ แซ่เจีย, นายอมร เทศสกุลวงศ์, นายณัฐกฤษ สมดอก, นายฉิรวัฒน์ จิงทอง, นายชลชาย อังวมิษฐ์สกุล และนายนพพร สุขขัง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ อธิบาย เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือให้ทางคณะผู้จัดทำได้มีความรู้ความเข้าใจ ไปปรับปรุงแก้ไขให้โครงการพิเศษนี้มีประสิทธิภาพและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นายชนเศ ฌ วิเชียร และ นางสาวสุขพิชญ์ จรรย์ชล จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษาการติดตั้งอุปกรณ์ การทดลอง และความช่วยเหลือในการทำทดลองตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ ลีมพรจิตรวิไล ที่เป็นเจ้าของ บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด และบุคลากร คุณวรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล, คุณกฤษดา ใจเย็น, คุณสมเกียรติ กิจวงศ์วัฒน์ ที่ให้การสนับสนุน และให้คำปรึกษา ในเรื่องของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และระบบแมคคาณิก ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบฐานวางตัวอย่าง และวงจรชุดควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ

ขอกราบขอบพระคุณ บรรดาคณาครู อาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทในทุกแขนงสาขาวิชา ตั้งแต่เยาว์มาจนถึงปัจจุบัน ตลอด จน กราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูให้การศึกษาและสอนแนวทางในการดำเนินชีวิตตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณเพื่อนๆชาวฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่เป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

นาย นพพร เหล่าวัฒนธรรม

นางสาว นิภารัตน์ เจริญมนันท์กุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้ง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	5
2.1 สเต็ปป์มอเตอร์	5
2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของสเต็ปป์มอเตอร์	5
2.1.2 หลักการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์	6
2.1.3 การแบ่งชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์	7
2.1.3.1 สเต็ปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet : PM)	7
2.1.3.2 สเต็ปป์มอเตอร์แบบปรับความต้านทานแม่เหล็ก (Variable Reluctance : VR)	7
2.1.3.3 สเต็ปป์มอเตอร์แบบผสม (Hybrid : HB)	8
2.1.4 การพันขดลวดบนสเตเตอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์	9
2.1.4.1 การพันขดลวดแบบไบโพลาร์ (Bipolar)	9
2.1.4.2 การพันขดลวดแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar)	9

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.5 โครงสร้างขดลวดและรูปแบบการต่อสายของสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส	10
2.1.6 รูปแบบการกระตุ้นการขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส	11
2.1.7 คุณสมบัติของสเต็ปปีงมอเตอร์	13
2.1.7.1 คุณสมบัติเด่นของสเต็ปปีงมอเตอร์	13
2.1.7.2 ข้อดีของสเต็ปปีงมอเตอร์	13
2.1.8 การตรวจสอบตำแหน่งการหมุนไปของสเต็ปปีงมอเตอร์	14
2.1.8.1 การนับจำนวนสเต็ปที่หมุนไปของสเต็ปปีงมอเตอร์	14
2.1.8.2 การตรวจสอบกระแสของแต่ละเฟสเมื่อทำการหมุนไปของสเต็ปปีงมอเตอร์	15
2.1.8.3 การใช้เอ็นโคดเดอร์(Encoder) ตรวจสอบการหมุนไปของสเต็ปปีงมอเตอร์	16
2.2 แนะนำโปรแกรม LabVIEW และการใช้งานเบื้องต้น	17
2.3 คีมจับเชิงแสง (Optical tweezers)	21
2.3.1 หลักการทำงานของ Optical tweezers	21
2.4 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)	23
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b>	<b>24</b>
3.1 ออกแบบสร้างวงจรควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส และวงจรแหล่งจ่ายไฟ	24
3.1.1 วงจรควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส	24
3.1.2 แหล่งจ่ายไฟ	32
3.1.3 สร้างกล่องชุดควบคุมฐานวางสารตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ	33
3.2 คิดตั้งฐานวางตัวอย่างกับสเต็ปปีงมอเตอร์ ชุดวงจรควบคุม และทดสอบการทำงาน	34
3.2.1 การทดสอบความแม่นยำในการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์	36
3.2.1.1 การทดสอบใช้กล่องกล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของ	
3.2.1.2 การทดสอบใช้ไมโครมิเตอร์วัดระยะที่สเต็ปปีงมอเตอร์หมุน	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ สเต็ปปีงมอเตอร์ ร์ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ค่า 36 การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ 37

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1.3 การทดสอบใช้เอ็นโคเดอร์ วัดตำแหน่งที่สเต็ปปีงมอเตอร์หมุน	38
3.3 ออกแบบและสร้างระบบการมองเห็นภาพ	38
3.4 ออกแบบและจัดระบบทัศนศาสตร์เพื่อสร้างเป็นระบบคิมจับเชิงแสง	40
3.5 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติในระบบคิมจับเชิงแสง	44
3.6 ทดสอบระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติและเก็บบันทึกผลการทดลอง	45
3.6.1 คุณสมบัติของสารตัวอย่างและการเตรียมสารตัวอย่าง	45
3.6.1.1 คุณสมบัติสารตัวอย่าง	45
3.6.1.2 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง	45
3.6.2 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการเลื่อนตำแหน่งวางสารตัวอย่างและการมองเห็น	47
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>50</b>
4.1 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ	50
4.1.1 ผลทดสอบการใช้กล้องกล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์	50
4.1.2 ผลทดสอบการใช้ไมโครมิเตอร์วัดระยะที่สเต็ปปีงมอเตอร์หมุน	51
4.1.3 ผลทดสอบใช้เอ็นโคเดอร์ วัดตำแหน่งที่สเต็ปปีงมอเตอร์หมุน	53
4.2 ผลการทดสอบระบบการมองเห็นภาพ	54
4.2.1 ระบบการมองเห็นภาพ	54
4.2.1.1 ระบบการมองเห็น	54
4.2.1.2 การปรับระยะโฟกัสของภาพเมื่อใส่ฟิลเตอร์กรองแสงเลเซอร์	56
4.2.2 ผลการใช้งานโปรแกรมเชื่อมต่อควบคุมการมองเห็นและเก็บภาพ	60
4.3 ผลการทดสอบการจัดวางอุปกรณ์ทัศนศาสตร์	61
4.3.1 การจัดวางระบบทัศนศาสตร์ทั้งหมด	61
4.3.2 ผลการเพิ่มส่วนการขยายลำแสง	62
4.3.3 การจัดวางลำแสงเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ 100x และการปรับจุดโฟกัสที่แผ่นสไลด์	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้อัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดสอบการจับอนุภาค และการเก็บบันทึกผล	65
4.4.1 สภาวะที่ยังไม่สามารถจับอนุภาคได้	65
4.4.2 สภาวะที่เริ่มจับอนุภาคได้	66
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการทดลอง	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	70
<b>ภาคผนวก</b>	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงการดำเนินงานวิจัยทำโครงการพิเศษ	4
2.1 การควบคุมอุปกรณ์สวิทช์ซึ่งแบบเต็มขั้นของสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟสแบบไปโพล่า	12
2.2 ลำดับการควบคุมการขับเคลื่อนสเต็ปป์แบบเต็มขั้นแบบ 2 ขดของสเต็ปป์แบบ 5 เฟส	12
3.1 แสดงลำดับการขับสเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟส แบบเต็มขั้น	27
4.1 แสดงตำแหน่งการหมุน	50
4.2 แสดงการทดสอบสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยไมโครมิเตอร์	51
4.3 แสดงผลการวัดสัญญาณที่ได้จากเอ็นโคดเดอร์เมื่อสเต็ปป์มอเตอร์หมุนไป	53
4.4 แสดงผลคุณสมบัติของแท่นเลื่อน X-Y	53
4.5 แสดงภาพของเมื่อบีคขนาด 8 ไมโครเมตร ตามกำลังขยายที่แตกต่างกัน	54
4.6 แสดงภาพของเมื่อบีคขนาด 100 ไมโครเมตร ตามกำลังขยายที่แตกต่างกัน	55
4.7 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 1 ชั้น	56
4.8 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 2 ชั้น	57
4.9 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 1 ชั้น	58
4.10 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 2 ชั้น	59
4.11 แสดงการวัดขนาดลำแสงเลเซอร์	62
4.12 แสดงระยะห่างเลนส์ที่ใช้ขยายลำแสงเลเซอร์	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างภายในของสเต็ปปีงมอเตอร์	5
2.2 ตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดขดลวดอยู่กับที่ของสเต็ปปีงมอเตอร์	6
2.3 ตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดขดลวดอยู่กับที่ของสเต็ปปีงมอเตอร์	6
2.4 โครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร	7
2.5 โครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบปรับความต้านทานแม่เหล็ก	8
2.6 โครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบผสม	8
2.7 สเต็ปปีงมอเตอร์แบบไบโพลาร์ 4 สาย	9
2.8 สเต็ปปีงมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 6 สาย	9
2.9 แสดงการพันขดลวดแบบไบโพลาร์และแบบยูนิโพลาร์ ของสเต็ปปีงมอเตอร์	9
2.10 โครงสร้างขดลวด สเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส ชนิด New pentagon bipolar	10
(a) แบบขดไม่อิสระ (5เส้น)	
(b) แบบขดอิสระ (10เส้น)	
2.11 สเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟสที่มีโครงสร้างขดลวด ชนิด New pentagon bipolar	10
(a) แบบขดไม่อิสระ	
(b) แบบขดอิสระ	
2.12 วงจรการขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส	11
2.13 โครงสร้างภายในขดลวดของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟสเมื่อทำการขับเคลื่อนแบบเต็มสเต็ป	12
2.14 การแสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการตรวจสอบการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่านพอร์ต RS232	14
2.15 วงจรสมบูรณของการใช้ IC สำเร็จที่ออกแบบมาพร้อมกับการวัดกระแสของแต่ละเฟส	15
2.16 Incremental encoder ความละเอียด 4096 พัลส์/รอบ	16
2.17 รูปแบบเฟสของสัญญาณที่ออกมาจาก Encoder แสดงผลการหมุนไปแบบ CW/CCW	16
2.18 สเต็ปปีงมอเตอร์ที่มีการติดตั้ง Encoder มาเรียบร้อยแล้ว	16
2.19 ลักษณะของ Control Palette	18
2.20 ลักษณะของ Function Palette	18
2.21 แสดง Front Panel และ Block diagram	19
2.22 GUI Front Panel ของโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่าน RS-232	19

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 แสดง Block Diagram ของ โปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่าน RS-232	20
2.24 จากการโฟกัสแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดเล็กๆ เพื่อดักจับวัตถุขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในระบบ Optical tweezers	21
2.25 อธิบายแรงในการจับอนุภาค	22
(a) ในแนวตั้งฉากกับลำเลเซอร์	
(b) ในแนวขนานกับลำเลเซอร์	
2.26 แสดงการจัดตั้งอุปกรณ์ optical tweezers อย่างง่าย	23
2.27 แสดงแรงที่เกิดขึ้นเมื่อ เมื่อดำเลเซอร์ เคลื่อนที่ผ่านอนุภาค	23
2.28 กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลอเล็กทรอนิกส์	23
3.1 แผนผังการทำงานโดยรวมของชุดควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์พร้อมคันโยกและสวิตช์	24
3.2 ลิมิตสวิตช์	25
3.3 โมดูล คัน โยกควบคุม	25
3.4 สวิตช์ควบคุมการทำงาน	25
3.5 กล่องควบคุม Joybox ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนของแท่นเลื่อน X-Y	26
3.6 บอร์ดวงจรควบคุมและประมวลผลหลัก	26
3.7 แสดงวงจรภาคขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส	27
3.8 บอร์ดวงจรขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส ที่สร้างขึ้น	28
3.9 วงจรสมบูรณของภาคการขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส ที่เชื่อมต่อสั่งงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์	29
3.10 แผนผังการทำงาน โปรแกรมโดยรวมของชุดควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติของฐานวางตัวอย่าง	30
3.11 ลักษณะภายนอกและภายในของ สเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส	31
VEXTA MODEL PK543AN-TG20	
3.12 ใคอะแกรมการจัดเฟสภายในและชุดเกียร์ทดของ สเต็ปปีงมอเตอร์ชนิด 5 เฟส	31
VEXTA MODEL PK543AN-TG20	
3.13 แสดงวงจรภาคจ่ายไฟที่ใช้ในวงจรชุดขับเคลื่อนทั้งหมด	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 แสดงไดอะแกรมการขยายลำแสง	42
3.31 แสดงส่วนของการขยายแสง	42
3.32 แสดงกระจกที่ใช้สะท้อนเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ	43
3.33 แสดงการวางเลนส์ใกล้วัตถุอยู่เหนือกระจกสะท้อน	44
3.34 แผนผังการทำงานโดยรวมของระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ	44
3.35 ระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้น	45
(a) ในส่วนของระบบควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนแบบกึ่งอัตโนมัติ	
(b) ส่วนทัศนศาสตร์ที่เป็นส่วนประกอบของระบบคิมจับเชิงแสง	
3.36 แสดงการเตรียมที่วางสารตัวอย่าง	46
(a) การเตรียมแผ่นสไลด์สำหรับใส่ตัวอย่าง	
(b) การเตรียมที่วางแผ่นสไลด์	
3.37 แผ่นสไลด์ที่ใส่สารตัวอย่างพร้อมทำการทดลอง	46
3.38 แสดงการใช้งาน โปรแกรมในส่วน Initial	47
3.39 แสดงการใช้งาน โปรแกรมในส่วน ของการควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนในแกน X-Y	48
3.40 แสดงการใช้งานในส่วนของการเก็บภาพนิ่ง	48
3.41 แสดงการใช้งานในส่วนของการเก็บภาพเคลื่อนไหว	49
4.1 การใช้งาน โปรแกรมควบคุมการมองเห็นภาพและบันทึกภาพในโหมดภาพนิ่ง	60
4.2 การใช้งาน โปรแกรมควบคุมการมองเห็นภาพและบันทึกภาพในโหมดภาพเคลื่อนไหว	60
4.3 แสดงการจัดระบบทัศนศาสตร์ของระบบทั้งหมด	61
4.4 ลำแสงเลเซอร์ยังไม่เข้าตรงกลางของเลนส์ใกล้วัตถุ 100x พอดี	63
4.5 ลำแสงเลเซอร์ยังเข้าตรงกลางของเลนส์ใกล้วัตถุ 100x พอดี	63
4.6 ระยะเวลาที่ลำแสงโฟกัสพอดีที่คาร์ดสไลด์เมื่อดูจากกล้อง	64
4.7 (a) แสดงภาพเม็คบีดที่ติดบนสไลด์ และต้องอ้างอิงถึงเข้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป	65
(b) แสงเลเซอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับเม็คบีด	

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงเมื่อดับเริ่มทำปฏิริยากับแสงเลเซอร์	66
(a) เมื่อดับตัวใหญ่สองตัวอยู่กับที่	
(b) เมื่อเปิดแสงมีเมื่อดับไหลเข้ามาใกล้ลำแสง	
(c) เมื่อดับไหลมารวมตัวกัน	
(d) ปิดแสงและสังเกตเมื่อดับเปลี่ยนตำแหน่งจากการดักจับ	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในด้านต่างๆ ได้มีบทบาทสำคัญอย่างมาก องค์ความรู้และเทคโนโลยีใหม่ๆ ยังคงต้องอาศัยหลักการพื้นฐานมาประยุกต์ใช้และปรับปรุงให้ได้เครื่องมือที่สร้างขึ้นมานั้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการ ความทันสมัย และความสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ถ้าหากจะกล่าวถึงการศึกษาอนุภาค ในระดับไมครอน นั้นมีขนาดเล็กจำเป็นจะต้องมีเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการพิจารณาถึงคุณลักษณะของอนุภาคตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งก็ได้มีการคิดค้นหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือ การคิดค้นนำแสงและระบบทัศนศาสตร์เข้ามาช่วยในการศึกษาอนุภาค ถูกคิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 โดย Arthur Ashkin กับ Steven Chu และทีมงานในปัจจุบันได้มีนักวิจัยและอาจารย์ที่มีความสนใจและทำงานวิจัยเกี่ยวข้องกับคีมจับเชิงแสงเพื่อนำไปศึกษาวัตถุขนาดเล็กกันอย่างแพร่หลาย โดยได้มีการประยุกต์ องค์ความรู้ในหลายหลายแขนงนำมาพัฒนาให้ระบบคีมจับเชิงแสงมีประสิทธิภาพในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น

หลักการของคีมจับเชิงแสงอาจกล่าวได้ว่า เลเซอร์และระบบทัศนศาสตร์เป็นองค์ประกอบหลัก การโฟกัสแสงเลเซอร์เข้าสู่ระบบทัศนศาสตร์ ผ่านไปยังอนุภาคขนาดเล็กที่ต้องการจะศึกษา โดยอนุภาคจะถูกกักไว้ที่จุดโฟกัสของเลเซอร์เปรียบเสมือนแสงเลเซอร์เป็นกับกับดักโปร่งแสง ถ้าหากเลื่อนแท่นวางตัวอย่างก็จะพบว่าอนุภาคที่อยู่ในกับดักนั้นยังอยู่กับที่ โดยอนุภาคที่ไม่ถูกคักจับจะเคลื่อนที่ตามแท่นที่เลื่อนไป ซึ่งอนุภาคที่ไม่มีการเคลื่อนที่นั้นเกิดจากหลักการการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคที่เราต้องการจับนั่นเอง ในกรณีนี้โมเมนตัมที่เปลี่ยนไปจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาค สิ่งแวดล้อมของอนุภาค และกำลังของแสงเลเซอร์ที่ใช้ ในการจับด้วย ถ้าหากใช้แสงที่มีกำลังประมาณ 10 มิลลิวัตต์ แรงที่ได้จะอยู่ในระดับพิโคนิวตัน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วมีกำลังมากพอที่จะสามารถจับอนุภาค ในระดับไมโครเมตรถึงระดับนาโนเมตรได้

แรงที่เกิดจากแสง เลเซอร์ นี้จะเกิดขึ้นเมื่อเราโฟกัสลำ แสงลงไปใกล้ๆ กับอนุภาคที่เราต้องการจะจับเพื่อให้แสงสามารถหักเหเข้าไปภายในและสะท้อนที่พื้นผิวของอนุภาคได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อแสงหักเหจากซ้ายไปขวาผ่านเข้าไปภายในอนุภาคเล็กๆ จะเกิดแรงปฏิกิริยาย้อนกลับจากขวาไปซ้ายด้วย ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ของนิวตัน ซึ่งเมื่อกำหนดทางคณิตศาสตร์แล้วแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะมีทิศเข้าหาจุดโฟกัสหรือจุดที่มีความเข้มสูงสุดของเลเซอร์นั่นเอง ซึ่งอนุภาคก็จะอยู่ในสภาพที่คล้ายกับว่าถูกจับเอาไว้ภายในลำเลเซอร์นั่นเอง

จากการที่ได้ศึกษางานวิจัยที่ได้มีการพัฒนาอีกอย่างต่อเนื่องยังคงมีการใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นส่วนประกอบหลักในระบบคีมจับเชิงแสงอยู่ ซึ่งถ้าจะกล่าวถึง แท่นวาง ตัวอย่าง ของกล้อง

จุลทรรศน์ จะมีการป้อนหมุนปรับเลื่อนซ้าย -ขวา ที่มีการปรับโดยใช้มือหมุน แต่ถ้าหากต้องการ หมุนให้แทนเลื่อนไปด้วยความสะดวกก็อาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนของระยะที่เลื่อนไปได้

ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาว่า จะมีวิธีการ ใหนบ้างที่จะ ช่วยลดความคลาดเคลื่อน ตรงนี้ไปได้ โดยพบว่ามีการนำมอเตอร์มาติดกับแกนเลื่อนกลายเป็นแทนเลื่อน X-Y และออกวาง จำหน่ายขายกันอย่างแพร่หลายมีหลายความ ละเอียดและหลายขนาดให้เลือกสรร ใช้งานได้ตาม ต้องการ แต่ยังคงมีราคาแพงอยู่มาก ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำได้เล็งเห็นว่าสามารถ ใช้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์และแมคคานิค นำมาประกอบรวมกันกลายเป็นแทนเลื่อน X-Y ที่มีประสิทธิภาพ ใกล้เคียงกันมีความยืดหยุ่นในการออกแบบระบบ และใช้งานอีกทั้งยังสามารถติดตั้งอุปกรณ์ ตรวจสอบการเคลื่อนที่และสวิทซ์จำกัดการเคลื่อนที่ ระบบโดยรวมจะควบคุมการเคลื่อนผ่านคันโยก ควบคุมและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW

ในส่วนของการมองเห็นของระบบคิมจับเชิงแสงนั้นจากเดิมจะใช้กล้องจุลทรรศน์ดูแต่ได้ ทำการปรับเปลี่ยนมาใช้ กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ โดยสามารถปรับระยะโฟกัส ของภาพให้ได้มีกำลังขยายของภาพได้อย่างอิสระ เชื่อมต่อและจัดการผ่าน พอร์ต USB ทำงาน ร่วมกับ โปรแกรม LabVIEW ในส่วนของ Vision ในการเก็บข้อมูลภาพนิ่งและเคลื่อนไหว

ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้เกิดเป็นระบบคิมจับเชิงแสงแบบ กึ่งอัตโนมัติที่สามารถปรับ ตำแหน่งของแท่นวาง บันทึกลงและประมวลผลภาพของการจับสารตัวอย่างได้โดยใช้โปรแกรมที่ได้ พัฒนาขึ้นมา ที่สามารถตอบสนองและรองรับการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกัน มีความสะดวก แม่นยำ มีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ในการพัฒนาการศึกษาอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยา ฟิสิกส์ ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้าง ฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ มีความความละเอียดใน การเคลื่อนที่ระดับไมโครเมตร

1.2.2 เพื่อสร้างโปรแกรมและวงจรควบคุมสเต็ปมอเตอร์ 5 เฟส อย่างง่าย

1.2.3 เพื่อสร้างระบบการมองเห็นภาพโดยใช้โปรแกรมควบคุมการจัดเก็บภาพนิ่งและ ภาพเคลื่อนไหว

1.2.4 เพื่อนำ ฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้น นี้ ไปติดตั้งทำงาน ร่วมกับระบบคิมจับเชิงแสงเพื่อศึกษาอนุภาคขนาดเล็ก

1.2.5 เพื่อประยุกต์ใช้วัสดุที่มีอยู่นำมาสร้างเป็นระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ แบบ ราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้สเต็ปปีงมอเตอร์ติดตั้งบนแท่นเลื่อน x-y ที่มีความละเอียดสูง ควบคุมสั่งงานผ่านคั่นโยกควบคุมและจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.2 สร้าง วงจรขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส แบบจ่ายจำนวนสองชุดพร้อมวงจรแหล่งจ่ายไฟ

1.3.3 สร้าง ระบบ การมองเห็นภาพและโปรแกรมควบคุมการเก็บภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวที่ใช้ในระบบคิมจับเชิงแสง

1.3.4 ออกแบบและสร้างระบบทัศนศาสตร์ที่ใช้ในระบบคิมจับเชิงแสง

1.3.5 พัฒนาและปรับปรุงระบบคิมจับเชิงแสง โดยนำฐานวางตัวอย่างที่ ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติมาติดตั้งในระบบทำให้กลายเป็น ระบบคิมจับเชิงแสง แบบกึ่งอัตโนมัติ มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

### 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

#### 1.4.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหลักการ ทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์เบื้องต้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ วงจรแหล่งจ่ายไฟ ระบบการมองเห็น การทำงานของคิมจับเชิงแสง อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ และ โปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการควบคุมการเลื่อนของฐานวางตัวอย่างและการเก็บข้อมูลภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว

1.4.1.2 ออกแบบและสร้างวงจรขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส แบบจ่ายจำนวนสองชุด พร้อมระบบการระบายความร้อน ก ารวัดแรงดันและกระแส และวงจรแหล่ง จ่ายไฟที่เหมาะสม กลายเป็นกล่องควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ที่สร้างขึ้นเองจากไมโ ครคอนโทรลเลอร์และ วงจรอิเล็กทรอนิกส์

1.4.1.3 ติดตั้งสเต็ปปีงมอเตอร์ พร้อมทั้งกล่องควบคุมที่สร้างขึ้น กับฐานวางสาร ตัวอย่างที่เลื่อนด้วยความละเอียดในแนวแกน X-Y พร้อมสร้างระบบจำกัดการเลื่อน

1.4.1.4 ทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของฐานวางสารตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นและหาความละเอียดและแม่นยำสูงสุดที่สามารถเลื่อนได้

1.4.1.5 ออกแบบและสร้างระบบทัศนศาสตร์และระบบการมองเห็นที่เป็น

เอกสารนี้เป็นองค์ประกอบของคิมจับเชิงแสงแล้วนำฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นมาติดตั้งภายในระบบ

1.4.1.6 ทดลองการจับอนุภาค ตัวอย่างขนาดเล็กโดยใช้ ระบบคิมจับเชิงแสง แบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้น พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น

1.4.1.7 แก้ไขปรับปรุงระบบทัศนศาสตร์และระบบควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.4.1.8 สรุปผลการทำงานของระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ การทดลองดักจับอนุภาคตัวอย่าง(เม็ดบีด) และแนวทางการพัฒนาให้ การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 1.4.2 ตารางการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงการดำเนินงานวิจัยทำโครงการพิเศษ

แผนการดำเนินงาน	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1.ศึกษาข้อมูล												
2.ออกแบบสร้างวงจรขับสเต็ปมิ่งมอเตอร์												
3.ติดตั้งฐานเลื่อนแกนX-Y												
4.ทดสอบการทำงานของฐานเลื่อน												
5.สร้างระบบทัศนศาสตร์และการมองเห็น												
6.ทดสอบการจับอนุภาคตัวอย่างขนาดเล็ก												
7.ปรับปรุงระบบ												
8.สรุปผลการทำงานระบบ												

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่ได้สร้างขึ้นมานั้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์แมคคานิก เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการจัดซื้อฐานวางตัวอย่างที่มีขายกันในต่างประเทศที่มีราคาสูงและต้องเสียค่าจัดส่งสินค้า อีกทั้งได้ความละเอียดที่ใกล้เคียงหรือละเอียดกว่าในบางรุ่น และสามารถปรับเปลี่ยนเพิ่มเติมให้มีความสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานได้ แล้วยังประยุกต์ใช้ไปติดตั้งในระบบคิมจับเชิงแสงทำให้มีความสามารถในการเลื่อนฐานวางตัวอย่างได้ในระดับไมโครเมตร แทนที่จะใช้มือปรับหมุนในแบบเดิมที่อาจ จะไม่ได้ความละเอียดและแม่นยำมากนัก กลายเป็นการเสริมศักยภาพ ให้ระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น อีกทั้งยังมีระบบการมองเห็นภาพ โปรแกรมควบคุมการเก็บภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว ที่ช่วยในการดูภาพที่เกิดขึ้นแทนระบบกล้องจุลทรรศน์แบบเดิม ทำให้กลายเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้ ผู้ที่ต้องการศึกษา อนุภาคตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก มีความสะดวก ง่ายต่อการใช้งาน และสามารถนำไปพัฒนางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

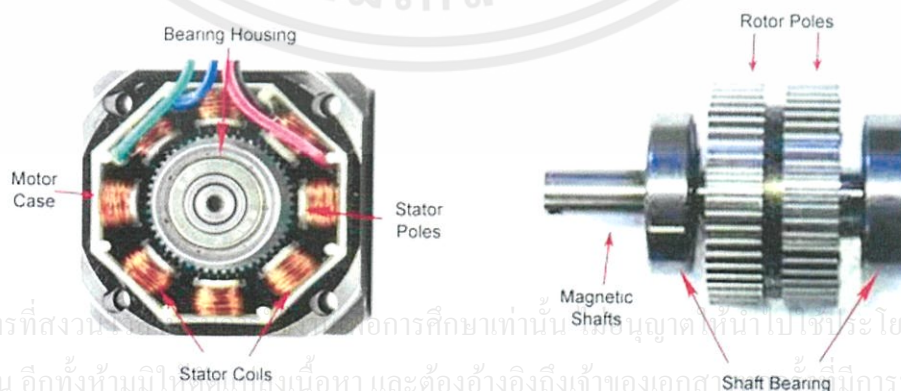
### 2.1 สเต็ปป์มอเตอร์

สเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่แกนหมุนจะเคลื่อนที่ไปเป็นขั้นๆหรือเป็นสเต็ป โดยสเต็ปละกี่องศา อาทิเช่น  $0.36^{\circ}/\text{Step}$  ,  $0.72^{\circ}/\text{Step}$  ,  $1.8^{\circ}/\text{Step}$  ,  $3.6^{\circ}/\text{Step}$  ,  $7.2^{\circ}/\text{Step}$  เป็นต้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของมอเตอร์ ตามจำนวน ความถี่ สัญญาณพัลส์ (Pulse Signal) ที่ป้อนให้โดยใช้วงจรควบคุม (Driver) โดยสามารถออกแบบให้มอเตอร์นั้นหมุนอย่างต่อเนื่องหรือหมุนเป็นสเต็ปได้ โดยการควบคุมทิศทางได้จากการ เลื่อนลำดับ สเต็ปการทำงาน (Sequence)

สเต็ปป์มอเตอร์นั้นได้ถูกนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในชิ้นส่วนของเครื่องมือ เครื่องจักรที่จะเคลื่อนที่ไปเป็นสเต็ป ในงานควบคุมตำแหน่งที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น เครื่องพิมพ์ เครื่องกัดเซาะผิววัสดุ เครื่องควบคุมแขนกล เครื่อง X-Y plotter หุ่นยนต์ และเครื่อง CNC เพราะเนื่องจากคุณสมบัติตัวหมุน (Rotor) ของสเต็ปป์มอเตอร์ที่สามารถหมุนเป็นสเต็ปด้วยมุมที่มีความแน่นอนและสามารถรักษาดำแหน่งของตัวหมุนให้อยู่หนึ่งกับที่ได้

#### 2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานของสเต็ปป์มอเตอร์

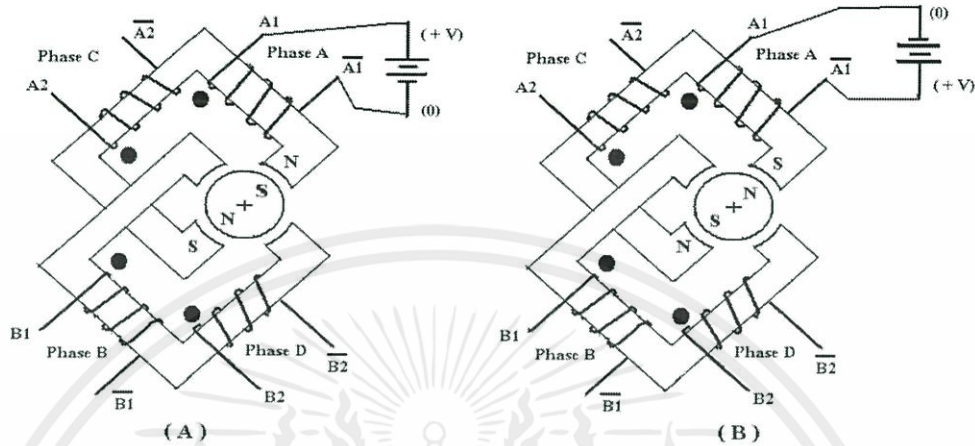
สเต็ปป์มอเตอร์จะมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ ชุดแกนหมุน (Rotor) ที่เป็นชุดของแม่เหล็กถาวร สามารถเคลื่อนที่ได้ และ สเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนที่อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งจะเป็นส่วนที่มีขดลวดพันล้อมรอบแกนเหล็ก ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งจะทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์เข้ามาแล้วเปลี่ยนเป็นสนามแม่เหล็ก ผลักให้ชุดแกนหมุนเกิดแรงผลักและดันให้เคลื่อนที่ไปตามต้องการ



รูปที่ 2.1 แสดง โครงสร้างภายในของสเต็ปป์มอเตอร์

## 2.1.2 หลักการทำงานของสแต็ปปีงมอเตอร์

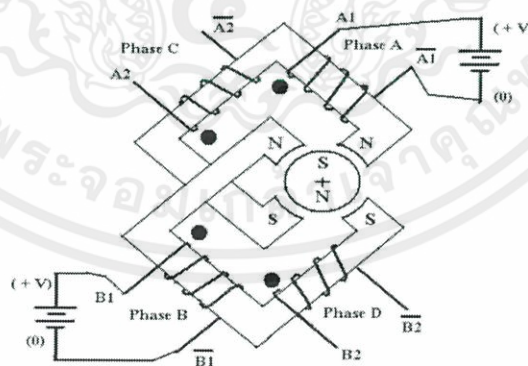
เพื่อที่จะอธิบายการทำงานของสแต็ปปีงมอเตอร์ จะยกตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กที่ขดขดลวดอยู่กับที่ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขดขดลวดอยู่กับที่ของสแต็ปปีงมอเตอร์

จากรูปที่ (A) เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดขด Phase A โดยต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่ที่ขั้ว A1 และขั้วลบเข้าที่ขั้ว A2 ของสแต็ปปีงมอเตอร์ ก็จะมีผลทำให้เกิดขั้วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่แกนเหล็กของขดขดลวดอยู่กับที่เพียง 2 ขั้วตามรูปที่ 2.2(A)

ต่อมาเมื่อสลับขั้วการจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามรูป ที่ 2.2 (B) ก็จะมีผลทำให้เกิดขั้วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่แกนเหล็กของขดขดลวดอยู่กับที่ เปลี่ยนไปเป็นตามรูปที่ 2.2 (B)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขดขดลวดอยู่กับที่ของสแต็ปปีงมอเตอร์

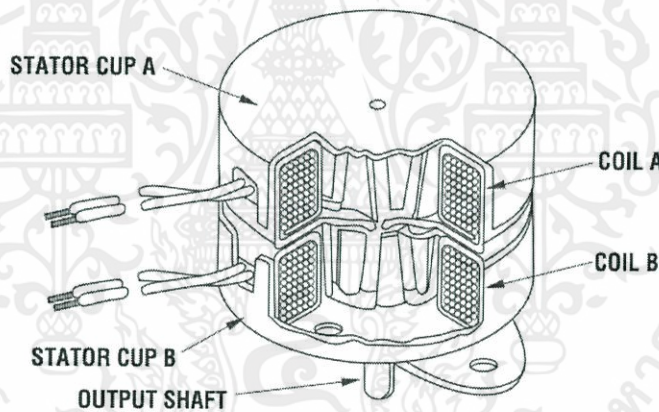
จากรูปที่ 2.3 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดขด Phase A และ Phase B พร้อมกันโดยที่ Phase A ต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่ที่ขั้ว A1 และขั้วลบเข้าที่ขั้ว A2 ของสแต็ปปีงมอเตอร์ และที่ Phase B ต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่ที่ขั้ว B1 และขั้วลบเข้าที่ขั้ว B2 ก็จะมีผลทำให้เกิดขั้วของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่แกนเหล็กของขดขดลวดอยู่กับที่ทั้ง 4 ขั้วตามรูปที่ 2.3

### 2.1.3 การแบ่งชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์

มีการแบ่งชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์ตามลักษณะโครงสร้างซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ แบบแม่เหล็กถาวรหรือ PM (Permanent Magnet), แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็กได้หรือ VR (Variable Reluctance) และแบบผสมหรือไฮบริด (Hybrid)

#### 2.1.3.1. สเต็ปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet : PM)

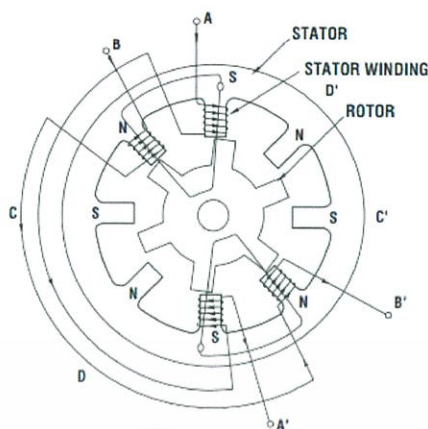
ส่วนหมุน (Rotor) ที่เป็นทรงกระบอกไม่มีขั้วยื่น (Non-Silent Pole) และฝังแม่เหล็กถาวรลงในส่วนหมุนโดยวางสลับขั้วเหนือและขั้วใต้ เป็นลักษณะเฉพาะของสเต็ปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (PM) จากคุณสมบัติที่ส่วนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวร เมื่อขดลวดในส่วนอยู่กับที่ได้รับการกระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็ก ขั้วแม่เหล็กบนส่วนอยู่กับที่กับขั้วแม่เหล็กบนส่วนหมุนที่เป็นขั้วตรงข้ามกันจะดึงดูดเข้าหากัน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของส่วนหมุนเข้าหาส่วนอยู่กับที่เป็นการฝังแม่เหล็กถาวรลงในส่วนหมุน ทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงขึ้น สเต็ปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร นี้จึงให้แรงบิดที่สูงกว่า สเต็ปป์มอเตอร์แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

#### 2.1.3.2 สเต็ปป์มอเตอร์แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Variable reluctance : VR)

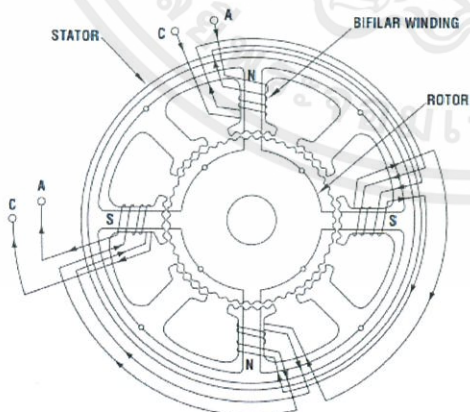
สเต็ปป์มอเตอร์แบบปรับค่าความต้านทานแม่เหล็ก (VR) มีส่วนหมุน เป็นแผ่นโลหะบางที่มีขั้วยื่น (Silent Pole) ออกมา ซึ่งถูกนำมาเรียงซ้อนกันให้เป็นแท่งตัน ดังรูปที่ 2.5 เมื่อลวดของส่วนที่อยู่กับที่ ได้รับการกระตุ้น กระแสที่ไหลผ่านขดลวดนั้นจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น และใช้ขั้วที่ยื่นออกมาของส่วนหมุน เป็นทางผ่านของเส้นแรงแม่เหล็ก ดังนั้นขั้วของส่วนหมุนจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วของส่วนอยู่กับที่ ในทิศทางที่ทำให้ความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) มีค่าน้อยที่สุด เมื่อทำการกระตุ้นขดลวดของส่วนอยู่กับที่อย่างเป็นลำดับถูกต้องและต่อเนื่องจะทำให้เกิดการหมุนของส่วนหมุนขึ้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสเต็ปิ่งมอเตอร์แบบปรับความต้านทานแม่เหล็ก

### 2.1.3.3. สเต็ปิ่งมอเตอร์แบบผสม (Hybrid : HB)

เมื่อนำเอาลักษณะของสเต็ปิ่งมอเตอร์แบบปรับความต้านทานแม่เหล็ก และแบบแม่เหล็กถาวร มารวมกัน ทำให้เกิดสเต็ปิ่งมอเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบใหม่ขึ้น โดยส่วนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวรที่มีลักษณะเป็นซี่ฟันยื่นออกมา (Rotor Teeth) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนหมุนของสเต็ปิ่งมอเตอร์ชนิดนี้จะมีมากกว่าหนึ่งวง โดยมีขั้วแม่เหล็กที่สลับกัน และซี่ฟันของแต่ละวงของส่วนหมุนจะไม่ตรงกัน ทำให้มุมการเคลื่อนที่มีความละเอียดสูงขึ้น เมื่อขดลวดทางส่วนอยู่กับที่ ได้รับการกระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็ก ขั้วแม่เหล็กของส่วนอยู่กับที่ จะดึงดูดแม่เหล็กถาวรที่ถูกฝังอยู่ในส่วนหมุน ที่มีขั้วตรงข้ามกัน และใช้ซี่ฟันที่ยื่นออกมาของส่วนหมุนเป็นแนวทางของเส้นแรงแม่เหล็ก และเมื่อกระตุ้นเป็นลำดับที่ถูกต้องจะทำให้ส่วนหมุนเคลื่อนที่ได้ตามต้องการ รูปโครงสร้างของสเต็ปิ่งมอเตอร์แบบผสมเป็นไปดังรูปที่ 2.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้วงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสเต็ปิ่งมอเตอร์แบบผสม  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.4 การพันขดลวดบนสเตเตอร์ของสตีปิ้งมอเตอร์

เป็นโครงสร้างรูปแบบการพันขดลวดของสตีปิ้งมอเตอร์ แบ่งได้ดังนี้

### 2.1.4.1. การพันขดลวดแบบไบโพลาร์ (Bipolar)

จะมีการพันขดลวดหนึ่งขด โดยจำนวนรอบนั้นจะขึ้นอยู่กับสเป็คของสตีปิ้งมอเตอร์ ในแต่ขั้วแม่เหล็กของ สเตเตอร์ โดยขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์จะถูกกำหนดโดยทิศทางของการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามได้เพียง การกลับทิศทางของการไหลในกระแสไฟฟ้า จะมาจากการควบคุมของวงจรสวิตซ์ซึ่งให้กลับขั้วไฟฟ้า

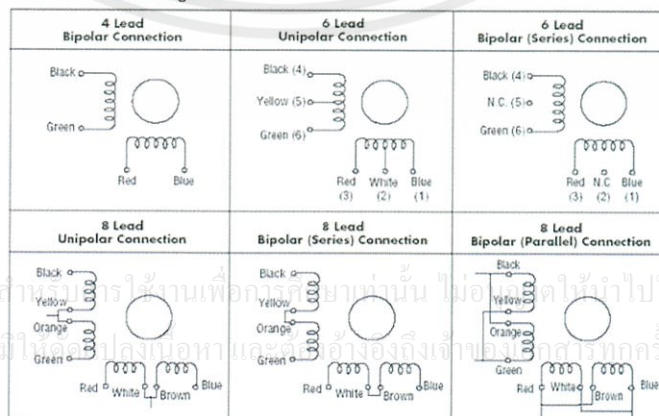
### 2.1.4.2 การพันขดลวดแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar)

จะมีการพันขดลวด 2 ขด บนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ทำให้แต่ละขดลวดเกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม เช่นกันการกลับทิศทางขั้วแม่เหล็กทำได้โดยใช้วงจรสวิตซ์ซึ่งให้สลับหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งแทนกัน ซึ่งการพันขดลวดทั้ง 2 แบบที่กล่าวมา มันต่างกันอย่างไร ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า แบบยูนิโพลาร์จะทำให้เกิดแรงบิดน้อยกว่าแบบไบโพลาร์ โดยวิธีการเลือกซื้อจะดูจากสายไฟที่ต่อมาจากตัวสตีปิ้งมอเตอร์ซึ่งแบบไบโพลาร์จะมี 4 สาย ดังรูปที่ 2.7 ส่วนเป็นแบบยูนิโพลาร์จะมี 5 สายหรือ 6 สาย ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 สตีปิ้งมอเตอร์แบบไบโพลาร์ 4 สาย รูปที่ 2.8 สตีปิ้งมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 6 สาย

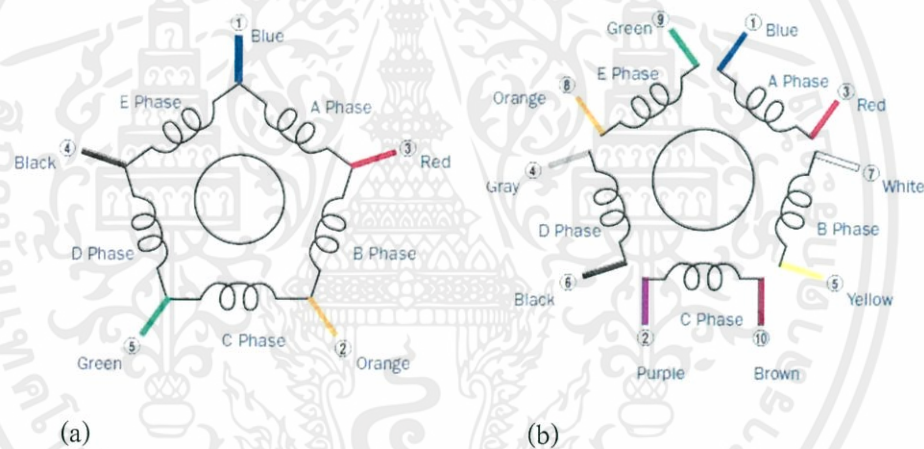
Wire Connection Diagrams



รูปที่ 2.9 แสดงการพันขดลวดแบบไบโพลาร์และแบบยูนิโพลาร์ ของสตีปิ้งมอเตอร์

### 2.1.5 โครงสร้างขดลวดและรูปแบบการต่อสายของสเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟส

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการสร้างสเต็ปป์มอเตอร์ได้ถูกพัฒนาไปมากกว่าเก่าโดยทางผู้ผลิตได้พัฒนาให้สเต็ปป์มอเตอร์นั้นมีความละเอียดในการหมุนแต่ละสเต็ปมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับ สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 2 เฟส โดยเรียกว่าสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส โดยจำนวนของขดลวดสเตเตอร์ได้เพิ่มขึ้นเป็น 10 ขดจากเดิมที่สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 2 เฟสนั้นมีขดลวดสเตเตอร์เพียง 8 ขดเท่านั้นส่งผลให้ สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส นั้นมีความละเอียดในการหมุนไปด้วยความละเอียด 0.72 องศาต่อสเต็ป หรือ 0.36 องศาต่อสเต็ป โดยทางผู้ผลิตนั้นได้ออกแบบออกมาสองรุ่นคือ 1.สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ชนิด New pentagon bipolarแบบขดไม่อิสระ 2.สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ชนิด New pentagon bipolar แบบขดอิสระ ซึ่งจะมึวิธีการขับและรายละเอียดที่แตกต่างกัน การใช้ชุดวงจรขับก็ต้องใช้เฉพาะไม่สามารถใช้ร่วมกันได้ เนื่องจากรูปแบบการขับเคลื่อนทางไฟฟ้านั้นต่างกัน โดยการแบ่งแยกนั้นอาจทำได้โดยสังเกตสายสัญญาณเป็น 5 เส้น และ 10 เส้น ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 โครงสร้างขดลวด สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ชนิด New pentagon bipolar (a) แบบขดไม่อิสระ (5 เส้น) และ (b) แบบขดอิสระ (10 เส้น)



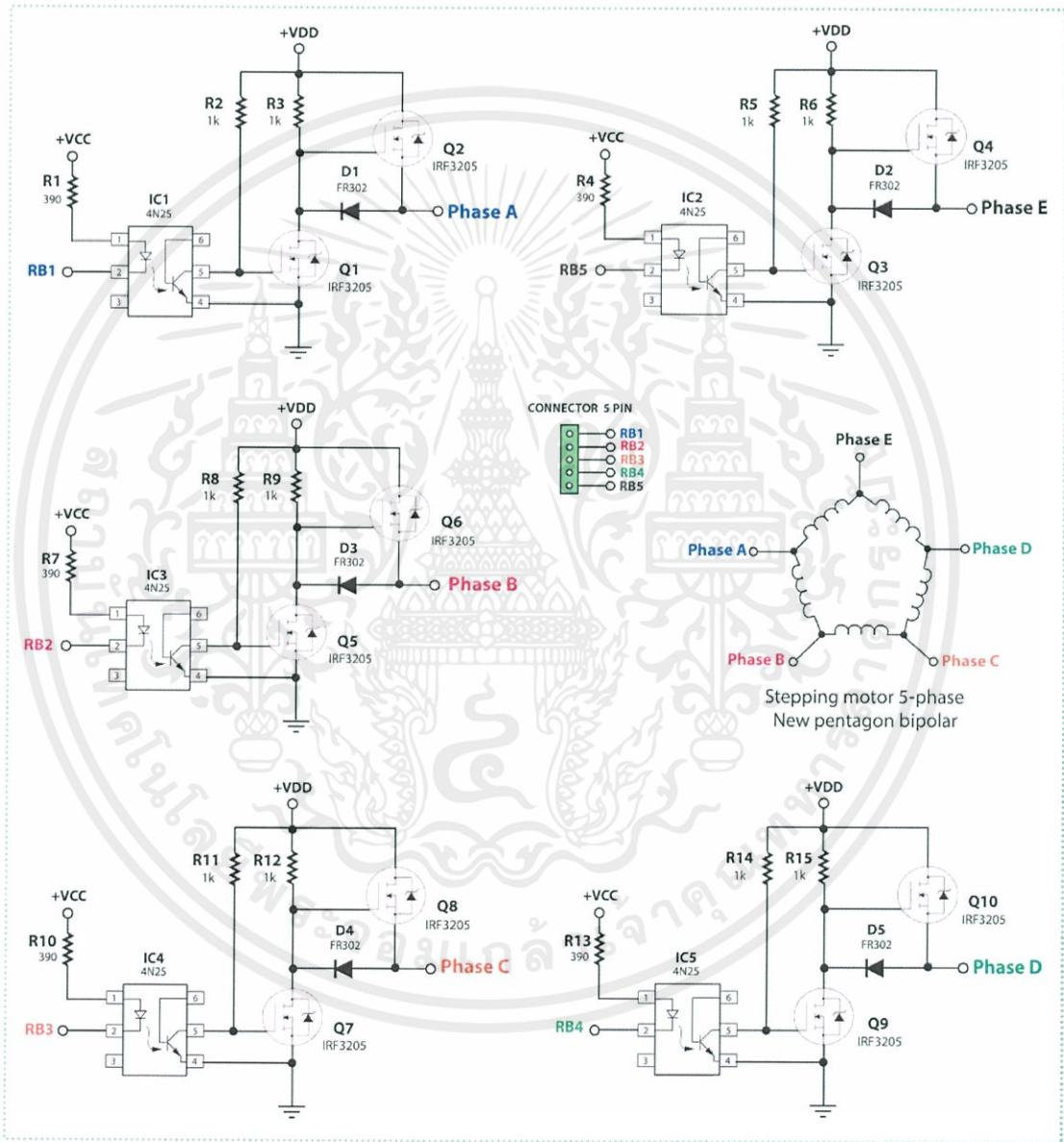
(a)

(b)

รูปที่ 2.11 สเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟสที่มีโครงสร้างขดลวด ชนิด New pentagon bipolar (a) แบบขดไม่อิสระ และ (b) แบบขดอิสระ

### 2.1.6 รูปแบบการกระตุ้นการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส

สเต็ปป์มอเตอร์มีวิธีการขับเคลื่อนที่แตกต่างกันไปหลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับจำนวนขดลวดหรือจำนวนเฟส วงจรขับ และวิธีการขับเคลื่อน ในที่นี้จะกล่าวอ้างอิงถึงวิธีการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส แบบไบโพลาร์ ที่ใช้อุปกรณ์สวิตช์เป็นวงจรขับเคลื่อน ดังรูปที่ 2.12 และเงื่อนไขการขับเคลื่อนดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.12 วงจรการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส

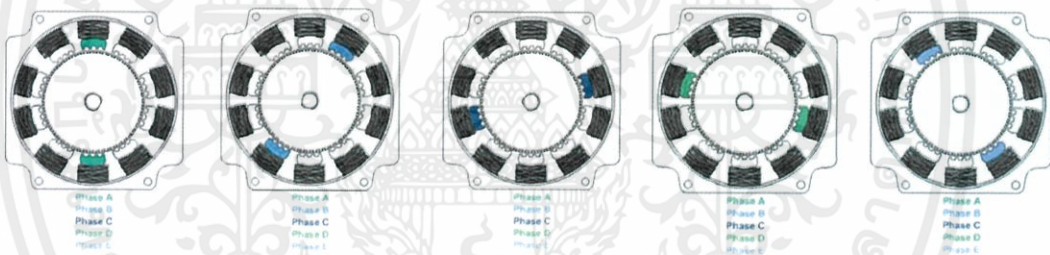
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งแบบเต็มขั้นของสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟสแบบ ไบโพลาร์

เฟส สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>A</b>	บวก	บวก	บวก	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ
<b>B</b>	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก	บวก	บวก
<b>C</b>	ลบ	ลบ	บวก	บวก	บวก	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ
<b>D</b>	บวก	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก
<b>E</b>	ลบ	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก	บวก	บวก	บวก	ลบ
ทิศทางเข็ม عقاربเขมือ(CW)	→									
ทิศทางเขมือทวนเขมือ(CCW)	←									

โดยทั่วไปแล้วการใช้งานจะใช้ชุดขับเคลื่อน (Driver) ที่ทำขึ้นมาให้เข้ากันได้กับสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ในแต่ละรุ่น ถ้าหากจะต้องการทำชุดขับเคลื่อนเองก็จำเป็นต้องรู้ว่าจะใช้สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ที่ใช้นั้นเป็นรุ่นไหน ภายในมีวิธีพันขดลวดแบบใด และเปรียบเทียบลำดับการขับเคลื่อน จากคู่มือของชุดขับเคลื่อนที่ได้ทำออกมาวางขาย โดยในงานงานวิจัยนี้ได้ใช้ สเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟสที่มีโครงสร้างขดลวด ชนิด New pentagon bipolar แบบขดไม้อิสระ ใช้วิธีการขับเคลื่อนแบบขดคู่ แบบเต็มขั้น

Stepping motor 5 phase (New pentagon bipolar)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างภายในขดลวดของสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส เมื่อทำการขับเคลื่อนแบบเต็ม สเต็ป

จากรูปที่ 2.13 ได้แสดงให้เห็นถึงการกระตุ้นการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส ด้วยวิธีเต็มขั้นซึ่งเป็นพื้นฐานของการกระตุ้นแบบเต็มสเต็ป ซึ่งได้พัฒนาไปเป็นลำดับการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส เรียกว่าการกระตุ้นขดลวดแบบเต็มสเต็ป 2 ขดลวด และลำดับการทำงานเป็นไปดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลำดับการควบคุมการขับเคลื่อนสเต็ปป์แบบเต็มขั้น แบบ 2 ขด ของสเต็ปป์แบบ 5 เฟส

เฟส สเต็ปที่	1	2	3	4	5
<b>A</b>	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	บวก
<b>B</b>	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ
<b>C</b>	ลบ	บวก	บวก	ลบ	ลบ
<b>D</b>	ลบ	ลบ	บวก	บวก	ลบ
<b>E</b>	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก
ทิศทางเขมือทวนเขมือ(CW)	→				
ทิศทางเขมือเขมือ(CCW)	←				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

## 2.1.7 คุณสมบัติของสเต็ปปีงมอเตอร์

### 2.1.7.1 คุณสมบัติเด่นของสเต็ปปีงมอเตอร์

- มุมในการหมุน (rotation angle) มีค่าตามสัดส่วนของจำนวนของพัลส์อินพุตที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์
- ความเร็วในการหมุน (rotation speed) มีค่าตามสัดส่วนและสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณพัลส์อินพุตที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์
- ใช้ในการควบคุมตำแหน่งแบบระบบเปิดที่มีความแม่นยำสูง โดยไม่ต้องใช้สัญญาณป้อนกลับของการกำหนดตำแหน่ง
- ไม่มีความผิดพลาดสะสมของการกำหนดตำแหน่ง
- เหมาะกับงานที่ต้องการกลไกเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ แรงบิดสูง โดยไม่ต้องใช้ระบบเฟืองทดรอบเพิ่มเติม
- สามารถกำเนิดและรักษาแรงบิดได้ในทันทีที่มอเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน
- สามารถรักษาอัตราการหมุนของแกนได้โดยไม่ทำให้มอเตอร์เสียหาย
- มีลูกปืนความเที่ยงตรงสูง เพื่อช่วยการหมุนของแกนมีความแม่นยำ

### 2.1.7.2 ข้อดีของสเต็ปปีงมอเตอร์

- การกำทอนหรือการเกิดเรโซแนนซ์ทำให้ไม่สามารถควบคุมการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์ได้
- การทำให้มอเตอร์สามารถหมุนแกนด้วยความเร็วสูงทำได้ยาก
- หากเกิดแรงบิดสูงสูงเกินกว่าที่รับได้หรือเกิดโอเวอร์ทอร์กรมอเตอร์จะสูญเสียการรับรู้ตำแหน่งของแกนหมุน จะต้องกลับไปเริ่มต้นการอินิเชียลใหม่
- ให้แรงบิดที่น้อยกว่ามอเตอร์ไฟตรงและมอเตอร์ไฟสลัที่ขนาดของตัวมอเตอร์เท่ากัน

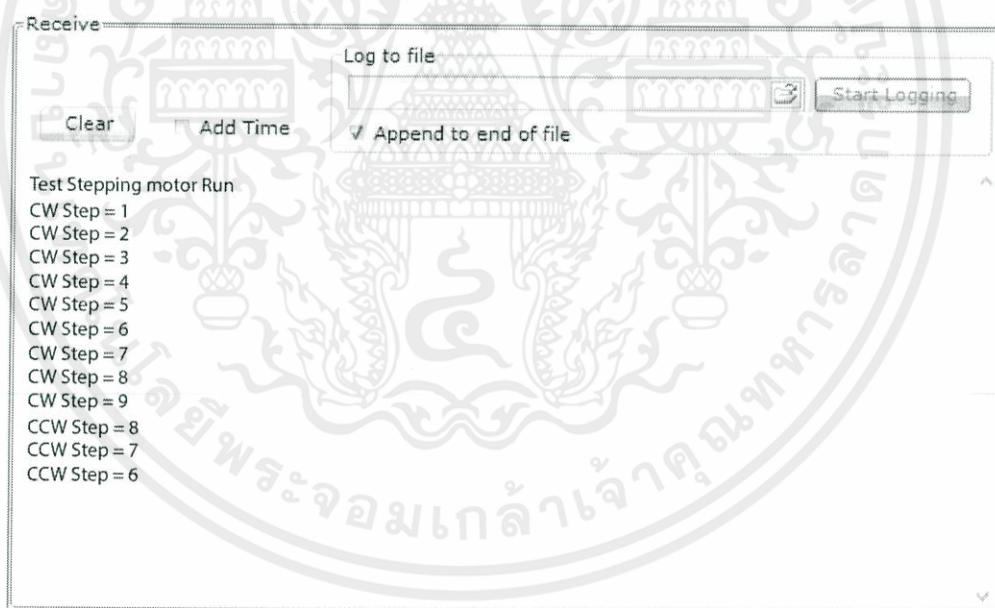
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.8 การตรวจสอบตำแหน่งการหมุนไปของสเต็ปปีงมอเตอร์

โดยทั่วไปแล้วสเต็ปปีงมอเตอร์เมื่อเกิดการทำการหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW) หรือในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (CCW) ไม่ว่าจะใช้ชุดขับเคลื่อนสำเร็จที่ทำมาให้เหมาะสมและเข้ากันได้ดีในแต่ละรุ่นหรือหากจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานร่วมกับวงจรขับเคลื่อน ทำชุดขับเคลื่อนเองก็ตามจะมีลำดับและวิธีการขับเคลื่อนเป็นไปตามแต่ละแบบและแต่ละรุ่นซึ่งผู้ใช้งานก็จำเป็นที่จะต้องศึกษาแล้วเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับงานของตน แต่ถ้าหากจะกล่าวว่าการที่สเต็ปปีงมอเตอร์หมุนไปนั้นหมุนไปก็สเต็ปก็มีหลากหลายวิธีให้ทำการตรวจสอบ อาทิเช่น

### 2.1.8.1 การนับจำนวนสเต็ปที่หมุนไปของสเต็ปปีงมอเตอร์

จะสามารถทำการนับสเต็ปจากการสั่งงานได้โดยเช็คจากการทำงานที่ได้เขียนโปรแกรมไว้เช่น ถ้าหากโปรแกรมเข้าไปทำงานในรูป การหมุนแบบ CW ก็ให้ทำการเพิ่มค่าในตัวแปรหนึ่งไปเรื่อยๆแต่หากเข้าไปทำงานในรูปการหมุนแบบ CCW ก็ให้ทำการลดค่าตัวแปรเดิมลงทีละหนึ่ง และทำการแสดงค่าตัวแปรนี้ออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านพอร์ต RS232 ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การแสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการตรวจสอบการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่านพอร์ต RS232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



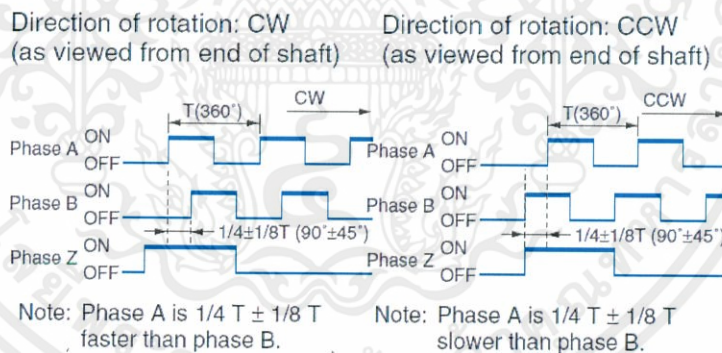
2.1.8.3 การใช้เอ็นโคดเดอร์(Encoder) ตรวจสอบการหมุนไปของสเต็ปิ่งมอเตอร์

ได้มีการพัฒนาใช้เทคนิคทางแสงเข้ามาช่วยในการตรวจสอบการหมุนไปของมอเตอร์ชนิดต่างๆได้โดยแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆคือ Incremental encoder และAbsolute encoder ทั้งสองแบบนี้ใช้หลักการส่งแสงผ่านวงล้อที่มีแถบมืด - แถบสว่างแล้วมีตัวตรวจจับได้สัญญาณออกมาเป็นรูปแบบพัลส์โดยในโครงการพิเศษนี้เลือกใช้แบบ Incremental encoder จึงได้สัญญาณออกมาดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะทำให้สามารถรู้ได้ว่าสเต็ปิ่งมอเตอร์หมุนไปในทิศทางไหน ด้วยความเร็วเท่าไร และหมุนไปที่สเต็ป

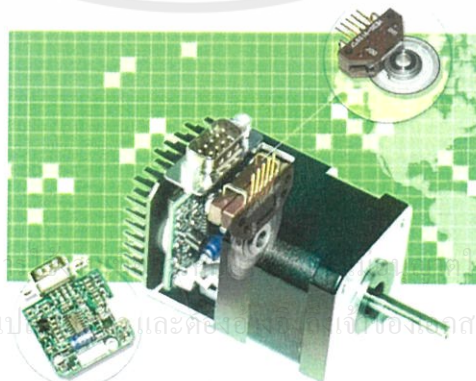
โดยในปัจจุบันทางบริษัทผู้ผลิตสเต็ปิ่งมอเตอร์ก็ได้ทำการผลิตสเต็ปิ่งมอเตอร์ที่มีการติดตั้งเอ็นโคดเดอร์ มาเรียบร้อยแล้วทำให้ง่ายต่อการตรวจสอบตำแหน่งที่หมุนไปได้



รูปที่ 2.16 Incremental encoder ความละเอียด 4096 พัลส์/รอบ



รูปที่ 2.17 รูปแบบเฟสของสัญญาณที่ออกมาจากEncoder แสดงผลการหมุนไปแบบCW/CCW



รูปที่ 2.18 สเต็ปิ่งมอเตอร์ที่มีการติดตั้งEncoder มาเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบ... และต้อง... เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 แนะนำโปรแกรม LabVIEW และการใช้งานเบื้องต้น

LabVIEW จัดเป็นซอฟต์แวร์ประเภท Programming Language คล้ายกับ Visual Basic หรือ Visual C++ แต่แตกต่างกันตรงที่ LabVIEW เป็นการสร้างโปรแกรมโดยใช้รูปภาพ (Graphical Programming Language) คือจะใช้บล็อกฟังก์ชันซึ่งแทนด้วยรูปไอคอน (Icon) แทนการเขียนโปรแกรมย่อย (Subroutine) และใช้เส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อกฟังก์ชันแทนการไหลของข้อมูลระหว่างโปรแกรมย่อยนั้น ๆ คล้ายกับการเขียนโฟลว์ชาร์ต (Flow Chart) หรือ บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ของโปรแกรม สิ่งที่ทำให้ LabVIEW ต่างจากซอฟต์แวร์สำหรับการพัฒนาโปรแกรมอื่นทั่วไปอีกอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการพัฒนาโปรแกรมใช้งานทางด้านงานวัดและงานควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งถือเป็นเป้าหมายสำคัญของ LabVIEW โดยจะมีเครื่องมือ (Tool) และไลบรารี (Library) ที่สนับสนุนการใช้งานทางด้านนี้ไว้อย่างมากมาย ให้ผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของเครื่องมือเสมือนจริง (Virtual Instrument: VI)

### การออกแบบโปรแกรมโดยใช้ LabVIEW

LabVIEW เป็นซอฟต์แวร์ภาษาอย่างหนึ่งที่ใช้พัฒนาโปรแกรมใช้งานอื่นๆ โดยเน้นไปทางด้านการใช้งานในงานวัดและควบคุมอัตโนมัติ โปรแกรมที่ได้จากการพัฒนาโดยใช้ LabVIEW นี้เรียกว่า VI (Virtual Instrument) คือ การจำลองรูปแบบของส่วนต่างๆ ในเครื่องมือที่ใช้งานวัดคุม เช่น มิเตอร์, บาร์สเกล, กราฟ, สวิตช์และปุ่ม มาไว้บนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการควบคุมและแสดงผล

LabVIEW อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุม ทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบโปรแกรมตามที่ใช้ต้องการ หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

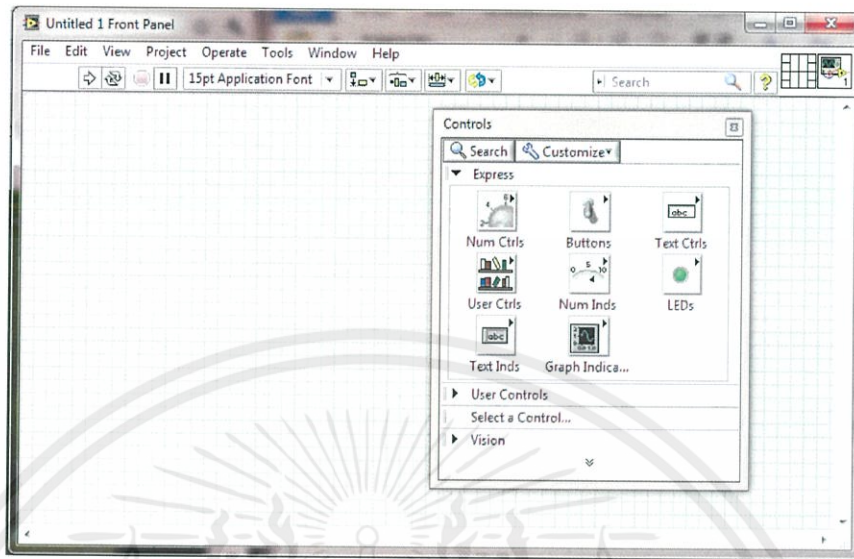
1. Acquisition ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบในที่นี้คือคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจจะมาจาก การ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า), การ์ด IMAQ, (สำหรับข้อมูลประเภทรูป) หรือ GPIB (สำหรับควบคุมเครื่องมือ)
2. Analysis หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วอาจจะผ่านฟังก์ชันในการทำ Analysis หรือ วิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งาน สามารถนำไปแสดงแทน นสิ่งที่วัดได้และใช้งานได้
3. Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น DMM (Digital Multimeter) แสดงผลเฉพาะสัญญาณที่วัดได้โดยไม่จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์กับเวลาหรือ Oscilloscope แสดงผลของข้อมูลที่รายงานหรือเก็บข้อมูลใน Hard disk

**เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ**

#### 1. เครื่องมือที่ใช้ออกแบบ Front Panel

โปรแกรม Virtual Instrument ที่สร้างโดย LabVIEW จะเรียกส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) ว่า Front Panel ซึ่งประกอบด้วยส่วนรับคำสั่งควบคุม เช่น การป้อนข้อมูล, ปุ่ม, สวิตช์และส่วนแสดงผลข้อมูล เช่น มิเตอร์ , บาร์สเกลและกราฟ เป็นต้น ส่วนต่างๆเหล่านี้สามารถ

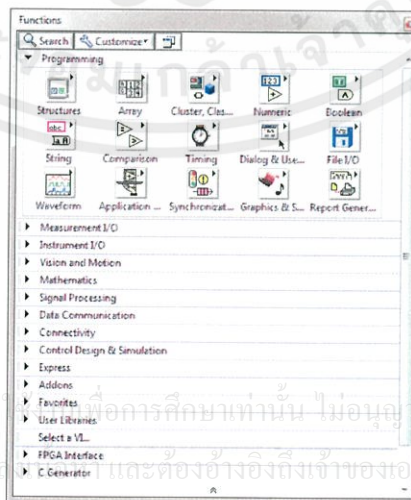
เลือกได้จากกรุปไอคอนใน Controls Palette แล้วนำมาวางประกอบกันเป็น Front Panel ผู้ใช้สามารถควบคุมการทำงานของโปรแกรมที่สร้างขึ้นผ่าน Front Panel นี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.19



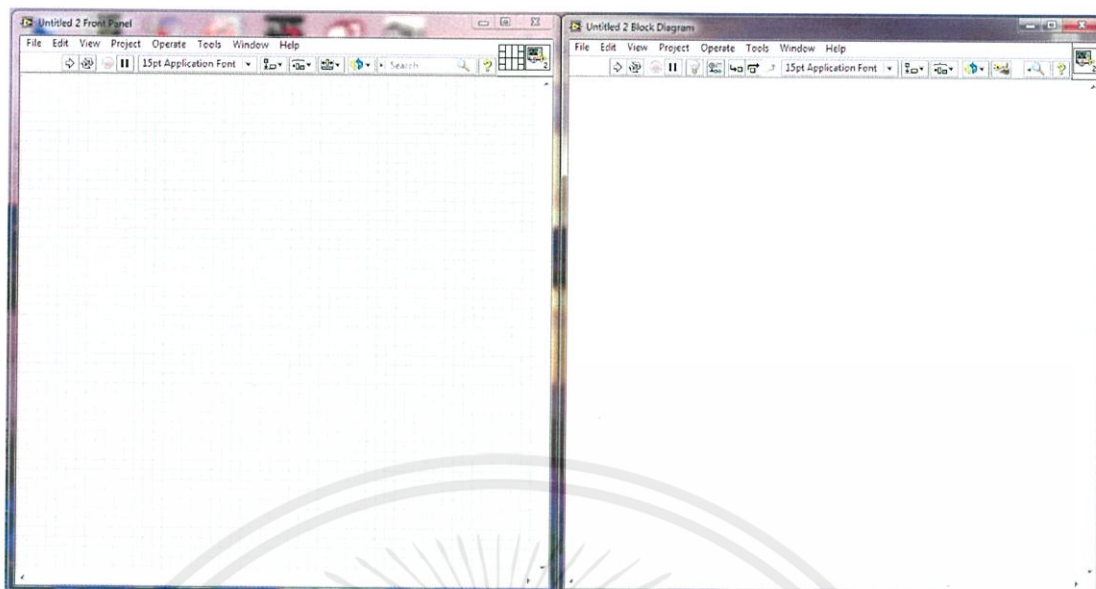
รูปที่ 2.19 ลักษณะของ Control Palette

## 2. Graphic Block Diagram

การสร้างโปรแกรม VI บน LabVIEW ทำได้โดยการสร้างบล็อกไดอะแกรมซึ่งประกอบด้วยรูปไอคอนของบล็อกฟังก์ชันต่างๆที่ใช้แทนโปรแกรมย่อย โดยไม่ต้องกังวลเรื่องการใช้ภาษามากมายเหมือนกับการเขียนโปรแกรมด้วยข้อความแบบเดิมๆ สามารถเลือกบล็อกฟังก์ชันต่างๆได้จาก Function Palette มาวางและเชื่อมบล็อกต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อระบุว่ามีการส่งข้อมูลจากบล็อกหนึ่งไปยังอีกบล็อกหนึ่ง ฟังก์ชันการทำงานของบล็อกต่างๆ ที่มีให้เลือกใช้มีตั้งแต่ฟังก์ชันการคำนวณธรรมดาไปจนถึงฟังก์ชันการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูง รวมถึงฟังก์ชันการควบคุมอุปกรณ์ที่ทางเข้าและทางออกการปฏิบัติการเกี่ยวกับไฟล์ข้อมูลและอื่นๆอีกมากมาย ดังรูปที่ 2.20

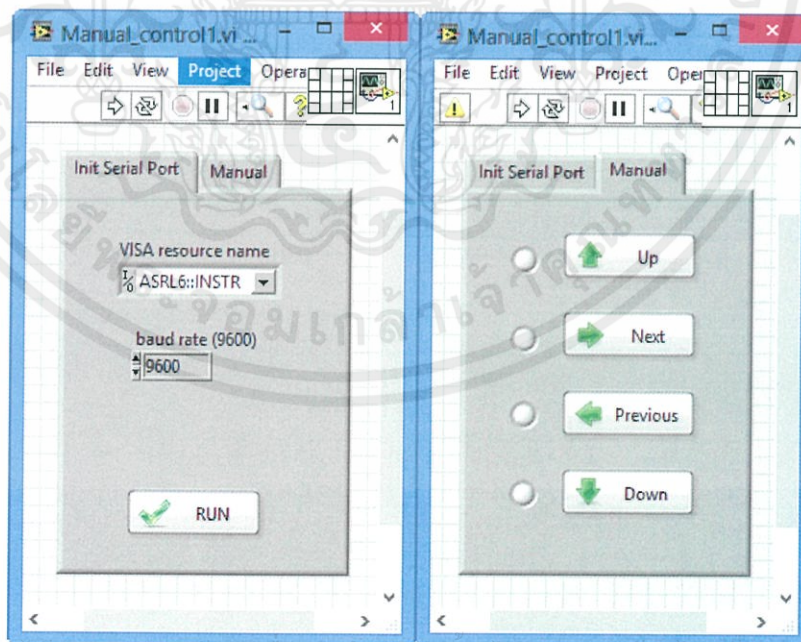


รูปที่ 2.20 ลักษณะของ Function Palette

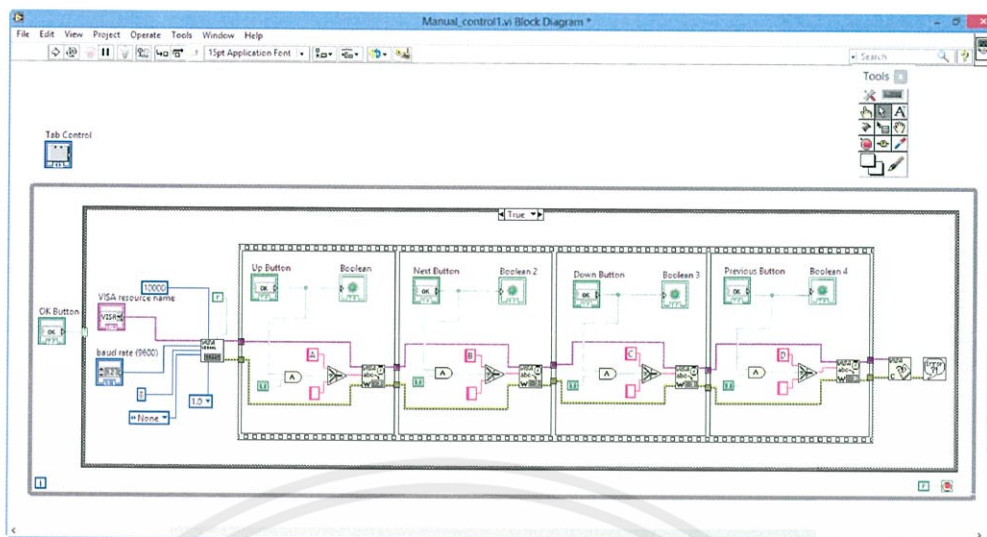


รูปที่ 2.21 แสดง Front Panel และ Block diagram

ใน LabVIEW นั้นได้มีปลั๊กอินในส่วนของ การเชื่อมต่อแบบอนุกรม (RS-232) ที่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เครื่องมือที่มีพอร์ตอนุกรม หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้สามารถใช้ GUI ของ LabVIEW ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เชื่อมต่อกับบอร์ดวงจรควบคุมเพื่อขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้งานด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 2.22 GUI Front Panel ของโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่าน RS-232

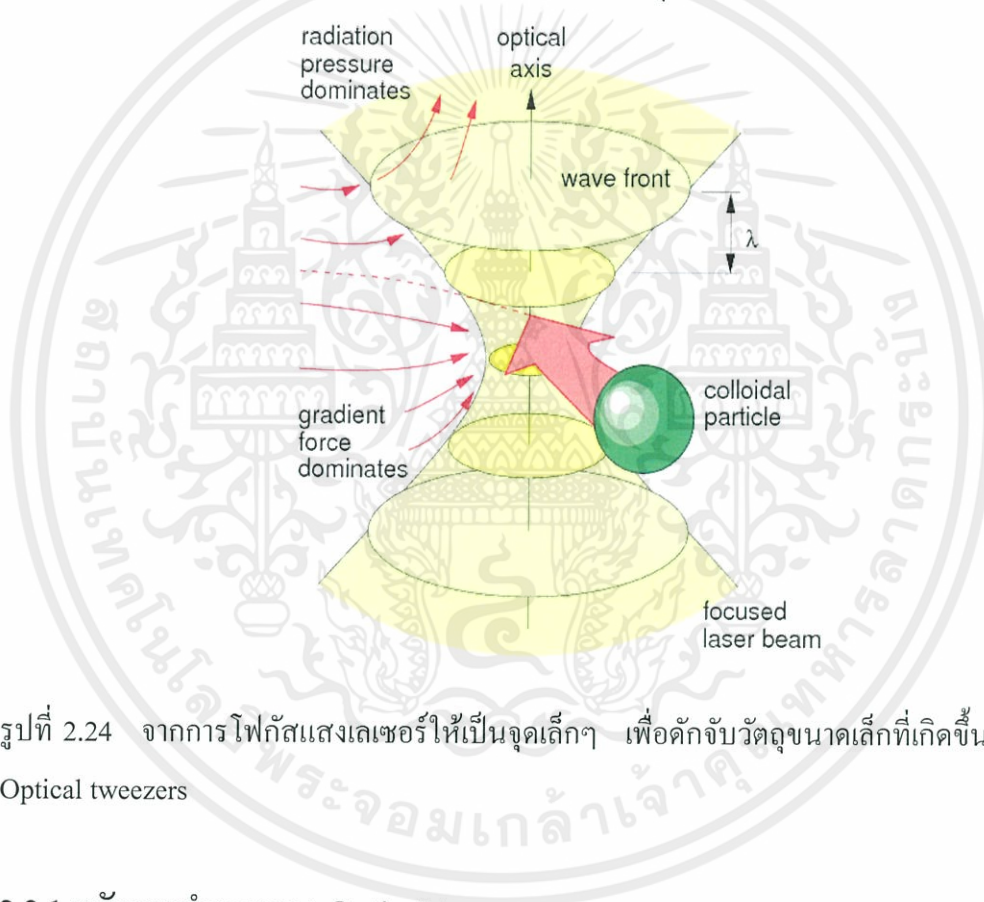


รูปที่ 2.23 แสดง Block Diagram ของโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปิ่งมอเตอร์ผ่าน RS-232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 คีมจับเชิงแสง (Optical tweezers)

Optical tweezers เป็นเทคนิคที่ใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวดักจับ (Trap) อนุภาคขนาดเล็ก ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 โดย Arthur Ashkin กับ Steven Chu และทีมงาน หัวใจสำคัญของ Optical tweezers ก็คือการโฟกัสแสงเลเซอร์โดยเลนส์วัตถุของกล้องจุลทรรศน์ (Microscope objective) ลงมาที่อนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งอนุภาคจะถูกกักไว้ที่จุดโฟกัสของเลเซอร์ เงื่อนไขโดยทั่วไปของการดักจับอนุภาคด้วยเลเซอร์ คือ อนุภาคต้องโปร่งใสและมีดัชนีหักเหมากกว่าตัวกลางรอบๆ อนุภาค หัวใจสำคัญของการจับอนุภาคด้วยแสงก็คือการใช้เลนส์รวมแสงที่มีค่า Numerical aperture สูงเพื่อให้เกิดความแตกต่างของความเข้มแสงที่มาก ส่งผลให้แรงเกรเดียน (Gradient force) มากกว่าแรงการกระเจิง (Scattering force) จึงสามารถจับอนุภาคในสามมิติได้

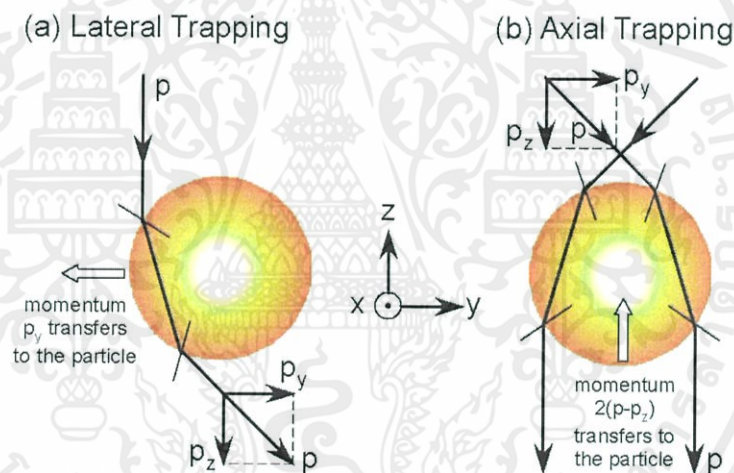


รูปที่ 2.24 จากการโฟกัสแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดเล็กๆ เพื่อดักจับวัตถุขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในระบบ Optical tweezers

#### 2.3.1. หลักการทำงานของ Optical tweezers

Optical tweezers สามารถอธิบายได้ด้วยหลักทัศนศาสตร์เรขาคณิต โดยใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัม แสงเป็นอนุภาคโฟตอนซึ่งมีโมเมนตัมเป็น  $P = \frac{h}{\lambda}$  เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในอนุภาคที่มีค่าดัชนีหักเหต่างจากดัชนีหักเหของตัวกลางรอบๆ อนุภาคนั้น ทำให้โมเมนตัมของแสงเลเซอร์เกิดการหักเหไปจากแนวเดิมหลังจากผ่านอนุภาคที่ต้องการดักจับ โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลางของลำเลเซอร์เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม ของระบบ พิจารณาลำแนวแสงเลเซอร์แนวหนึ่งผ่านอนุภาคทรงกลมที่เขวมนลอยอยู่ในน้ำดังรูปที่ 2.25 (a) อนุภาคนี้นี้มีดัชนีหัก

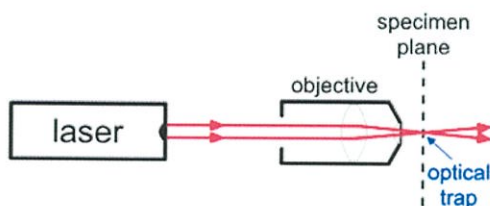
มากกว่าดัชนีหักเหของน้ำ จะทำให้อนุภาคนี้ประพฤติตัวเป็นเลนส์นูนและทำให้ลำแสงเลเซอร์หักเหไปในทิศทางเข้าหาจุดศูนย์กลางของอนุภาคนั้นและแสงเป็นอนุภาคโฟตอนจะพบว่าโฟตอนที่วิ่งผ่านอนุภาคจะมีโมเมนตัมในแนวแกน  $y$  ที่เปลี่ยนไปมีค่าเท่ากับ  $p_y$  ซึ่งจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทาง  $-y$  ด้วยแรงโมเมนตัม  $-p_y$  เพื่อให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมในแนวแกน  $y$  ของระบบและอนุภาคจะหยุดเคลื่อนที่เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มาอยู่ บริเวณกลางลำเลเซอร์พอดี เนื่องจากที่บริเวณกลางลำเลเซอร์เป็นจุดที่แสงจะไม่มีหักเหเมื่อวิ่งผ่านอนุภาค ในความเป็นจริงแสงเลเซอร์ที่ผ่านอนุภาคที่จุดโฟกัสของ microscope objective นั้นมีมากกว่าหนึ่งแนวคั้งที่เห็นในรูปที่ 2.25 (a) จึงต้องมีการรวมผลจากโฟตอนทุกแนวผลที่ได้จะเหมือนเดิมคืออนุภาคจะถูกแรงของแสงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับลำเลเซอร์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางของลำเลเซอร์ ทำนองเดียวกันจะมีแรงในทิศทางที่ขนานกับลำเลเซอร์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นลงเข้าหาจุดโฟกัสของเลเซอร์เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (b) ซึ่งจะทำให้อนุภาคถูกดักจับได้ในสามมิติ



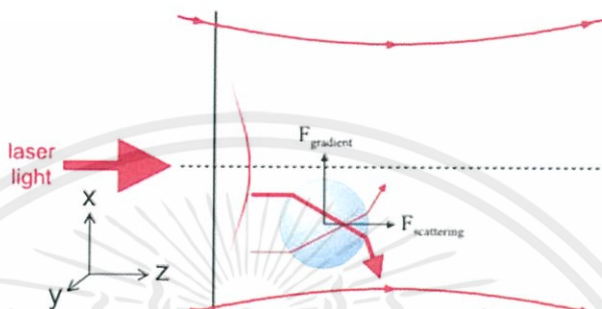
รูปที่ 2.25 อธิบายแรงในการจับอนุภาค (a) ในแนวตั้งฉากกับลำเลเซอร์ และ (b) ในแนวขนานกับลำเลเซอร์

การจัดอุปกรณ์ optical tweezers อย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2.26 โดยแหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ถูกยิงผ่าน microscope objective ลำแสงเลเซอร์เมื่อผ่าน microscope objective จะไปรวมกันเป็นจุดที่ระยะโฟกัสของ microscope objective ซึ่งจะถูกรับระยะโฟกัสให้ไปตกบนอนุภาคที่ต้องการจะดักจับพอดีซึ่งสามารถอธิบายแรงที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.25 (b) ลำเลเซอร์จะมีความเข้มสูงสุดที่บริเวณตรงกลางลำเลเซอร์และจะมีความเข้มลดลงตามแนวรัศมี ดังรูปที่ 2.27 แรงที่เกิดขึ้นจะมี 2 แบบ ดังที่กล่าวไปแล้วในรูปที่ 2.25 เรียกแรงที่เกิดขึ้นที่มีทิศตั้งฉากกับลำเลเซอร์ว่าแรงเกรเดียนท์ (Gradient Force) ส่วนแรงที่มีทิศขนานกับลำเลเซอร์เรียกว่าแรงกระเจิง (Scattering Force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2354-1414



รูปที่ 2.26 แสดงการจัดตั้งอุปกรณ์ optical tweezers อย่างง่าย



รูปที่ 2.27 แสดงแรงที่เกิดขึ้นเมื่อลำเลเซอร์เคลื่อนที่ผ่านอนุภาค

## 2.4 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)



รูปที่ 2.28 กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์

ในโครงการพิเศษนี้เลือกใช้ กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ ภายในเป็น เซนเซอร์แบบซีมอส(CMOS) ขนาด 640x480 ความละเอียด 2 ล้านพิกเซล มีระบบทัศนศาสตร์ช่วย ในการขยายภาพโดยปรับระยะโฟกัสทำให้ได้กำลังขยาย 50x-500x พร้อมหลอดไฟ LED ให้ ความสว่างจากทางด้านบนจึงสามารถนำมาใช้เป็นกล้องส่องดูอนุภาคตัวอย่างและ บันทึกภาพเก็บไว้ใน คอมพิวเตอร์ได้ทันที ผ่านพอร์ต USB มีความยืดหยุ่นในการเขียน โปรแกรมเชื่อมต่อและควบคุมได้ อย่างหลากหลาย

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน วิจัยของ โครงการงานพิเศษนี้เป็นการสร้างฐานวางสารตัวอย่างที่เคลื่อนที่ในแนวแกน X-Y โดยใช้สเต็ปปีงมอเตอร์ในการควบคุมการหมุน พร้อมระบบจำกัดการหมุน จากนั้น จะทำการติดตั้งในระบบคีมจับเชิงแสงต่อไป โดยจะแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบ สร้างวงจรชุดควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส และวงจรแหล่งจ่ายไฟ

ขั้นตอนที่ 2 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างกับสเต็ปปีงมอเตอร์ ชุดวงจรควบคุม และทดสอบการทำงาน

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบและสร้างระบบการมองเห็นภาพ

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบและจัดระบบทัศนศาสตร์เพื่อสร้างเป็นระบบคีมจับเชิงแสง

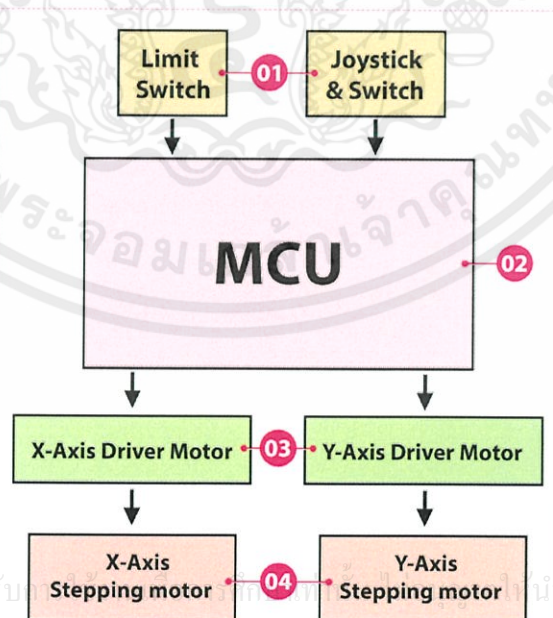
ขั้นตอนที่ 5 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติในระบบคีมจับเชิงแสง

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ และเก็บบันทึกผลการทดลอง

โดยมีรายละเอียดของการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนดังนี้

#### 3.1 ออกแบบสร้างวงจรควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส และวงจรแหล่งจ่ายไฟ

##### 3.1.1 วงจรควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส

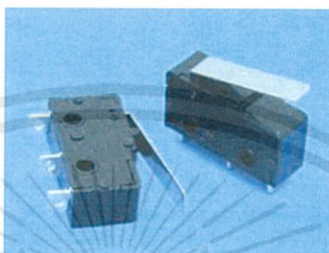


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานโดยรวมของชุดควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์พร้อมคีม โยกและสวิทช์

## ส่วนที่1 สวิตช์ (Switchs)

1.1 ลิ้มิตสวิตช์ (Limit switch) ใช้ในการตรวจสอบและกำหนดระยะทางที่แท่นเคลื่อนเคลื่อนที่ไปได้ในแนวระนาบแกน X-Y โดยติดตั้งที่แท่นเคลื่อนทั้งในสแต็ปป์แกน X-Y ขณะทำงานเมื่อแท่นเคลื่อนไปสุด ลิ้มิตสวิตช์จะถูกกดและส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการแจ้งเตือนว่าแท่นเคลื่อนได้เคลื่อนไปสุดแล้ว



รูปที่ 3.2 ลิ้มิตสวิตช์

1.2 คันโยกควบคุม (Joystick) ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนของแท่นวางสารตัวอย่างที่ติดกับสแต็ปป์มอเตอร์ โดยให้สัญญาณออกมาเป็น สัญญาณอนาล็อกสองสัญญาณ คือ แกน X และแกน Y ส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนของแท่นวางสารตัวอย่างให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบแกน X-Y



รูปที่ 3.3 โมดูล คันโยกควบคุม

1.3 สวิตช์ (Switch) ใช้ในการเลือกปุ่มHome เพื่อใช้การตั้งค่าใหม่ให้กับการหมุนของสแต็ปป์มอเตอร์ และส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ ปุ่ม Capture ที่ใช้ในการเก็บภาพหนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

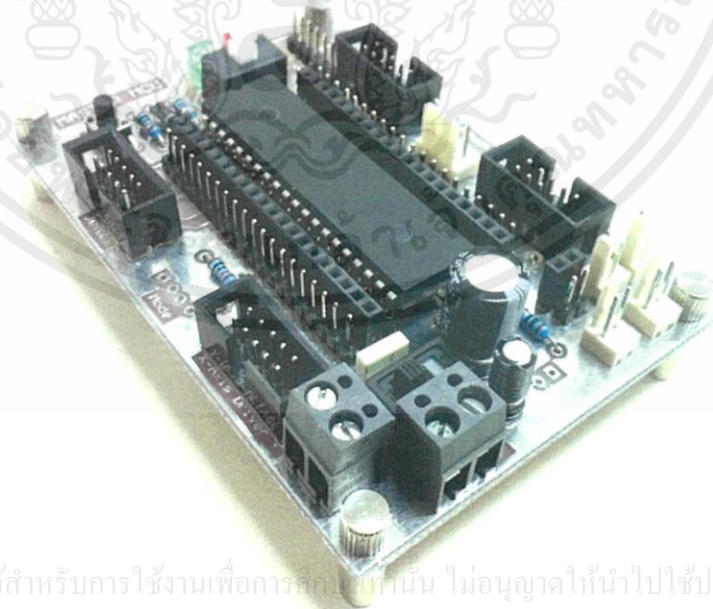
รูปที่ 3.4 สวิตช์ควบคุมการทำงาน



รูปที่ 3.5 กล่องควบคุม Joybox ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนของแท่นเลื่อน X-Y

## ส่วนที่ 2 MCU

ในระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัตินี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมโดยทำงานรับสัญญาณจากลิมิตสวิตช์ คันโยกควบคุม และสวิตช์ ทำการประมวลผลและส่งสัญญาณออกไปยังบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำงานร่วมโปรแกรม LabVIEW ผ่านพอร์ต RS-232 โดยในระบบนี้เลือกใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC 18F458 เป็นหัวใจหลักในการควบคุมประมวลผลระบบทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 บอร์ดวงจรควบคุมและประมวลผลหลัก

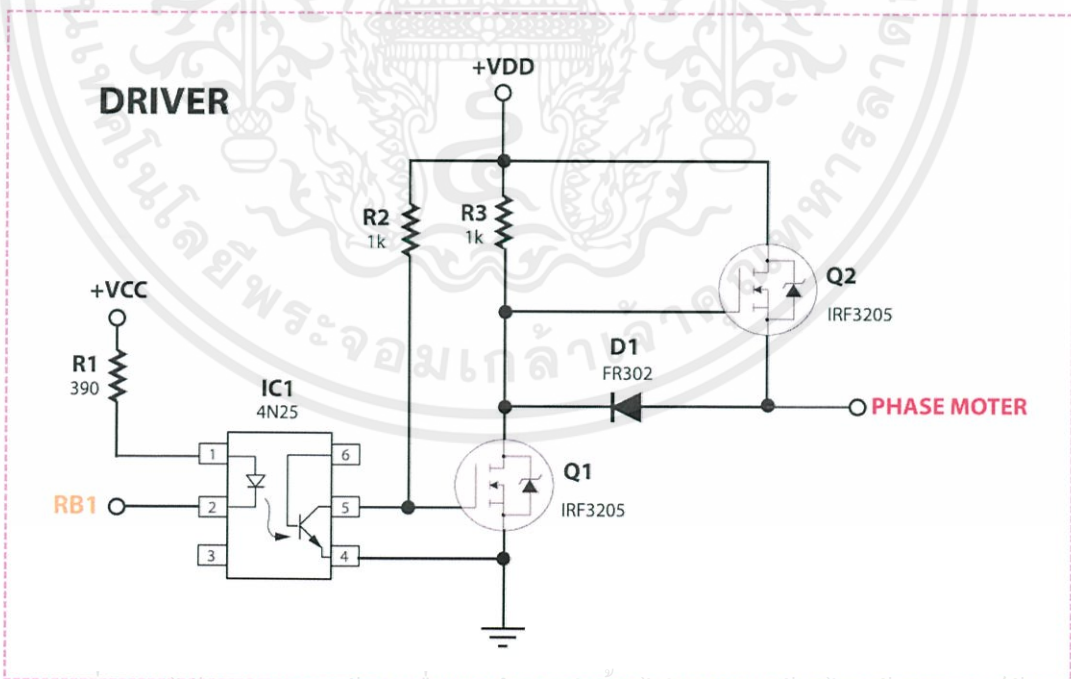
### ส่วนที่ 3 X-Y Driver Motor

วงจรการควบคุมและขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์ ชนิด 5 เฟส ควบคุมสเต็ปป์สองตัวในแนวแกน X-Y

จากการศึกษาลำดับการทำงาน (Step sequence) ของสเต็ปป์มอเตอร์ ชนิด 5 เฟส พบว่าลำดับการทำงานนั้นสามารถกระตุ้นได้หลายแบบแต่ในที่นี้ทางคณะผู้จัดทำเลือกใช้ลำดับการทำงานแบบเต็มขั้น โดยมีลำดับการทำงานเป็นไปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงลำดับการขับสเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟส แบบเต็มขั้น

เฟส / สเต็ปที่	1	2	3	4	5
1	บวก	ลบ	ลบ	ลบ	บวก
2	บวก	บวก	ลบ	ลบ	ลบ
3	ลบ	บวก	บวก	ลบ	ลบ
4	ลบ	ลบ	บวก	บวก	ลบ
5	ลบ	ลบ	ลบ	บวก	บวก
ทิศตามเข็มนาฬิกา(CW)	→				
ทิศทวนเข็มนาฬิกา(CCW)	←				



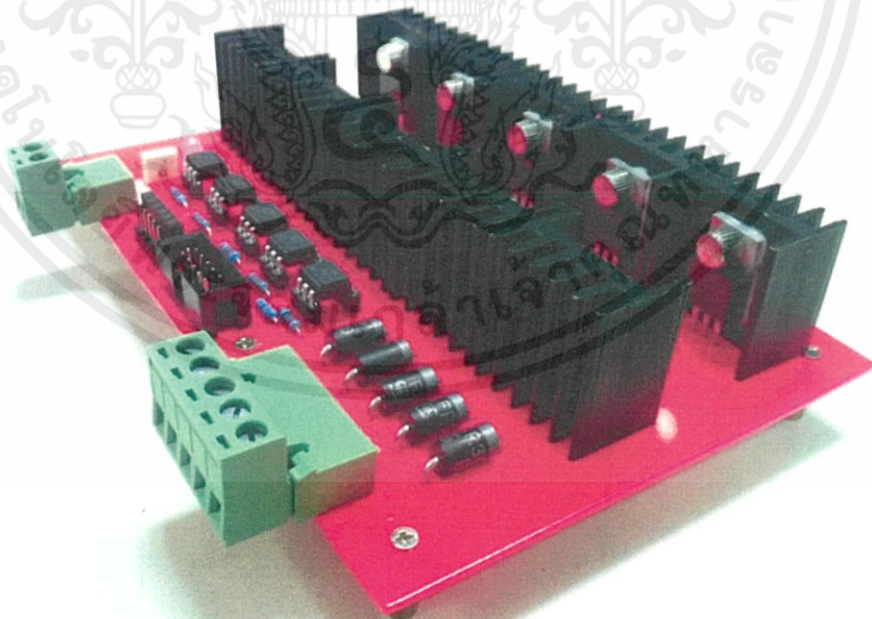
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป ไซ้ประโยชน์ด้านการค้า รูปที่ 3.7 แสดงวงจรภาคขับสเต็ปป์มอเตอร์ 5 เฟส ไม่ว่าจะฉีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของวงจรควบคุมและขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ แบบ 5 เฟสเป็นไปดังรูปที่ 3.7 โดยการทำงานของวงจรคือ รับสัญญาณดิจิทัลที่ส่งมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งไปยัง ออปโตคัปเปอร์ (Opto-Coupler) แล้วส่งต่อไปยังมอสเฟสและไปยังสเต็ปปีงมอเตอร์ทั้ง 5 เฟส โดยถ้าหากสัญญาณที่ส่งมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะมี 2 สัญญาณคือ

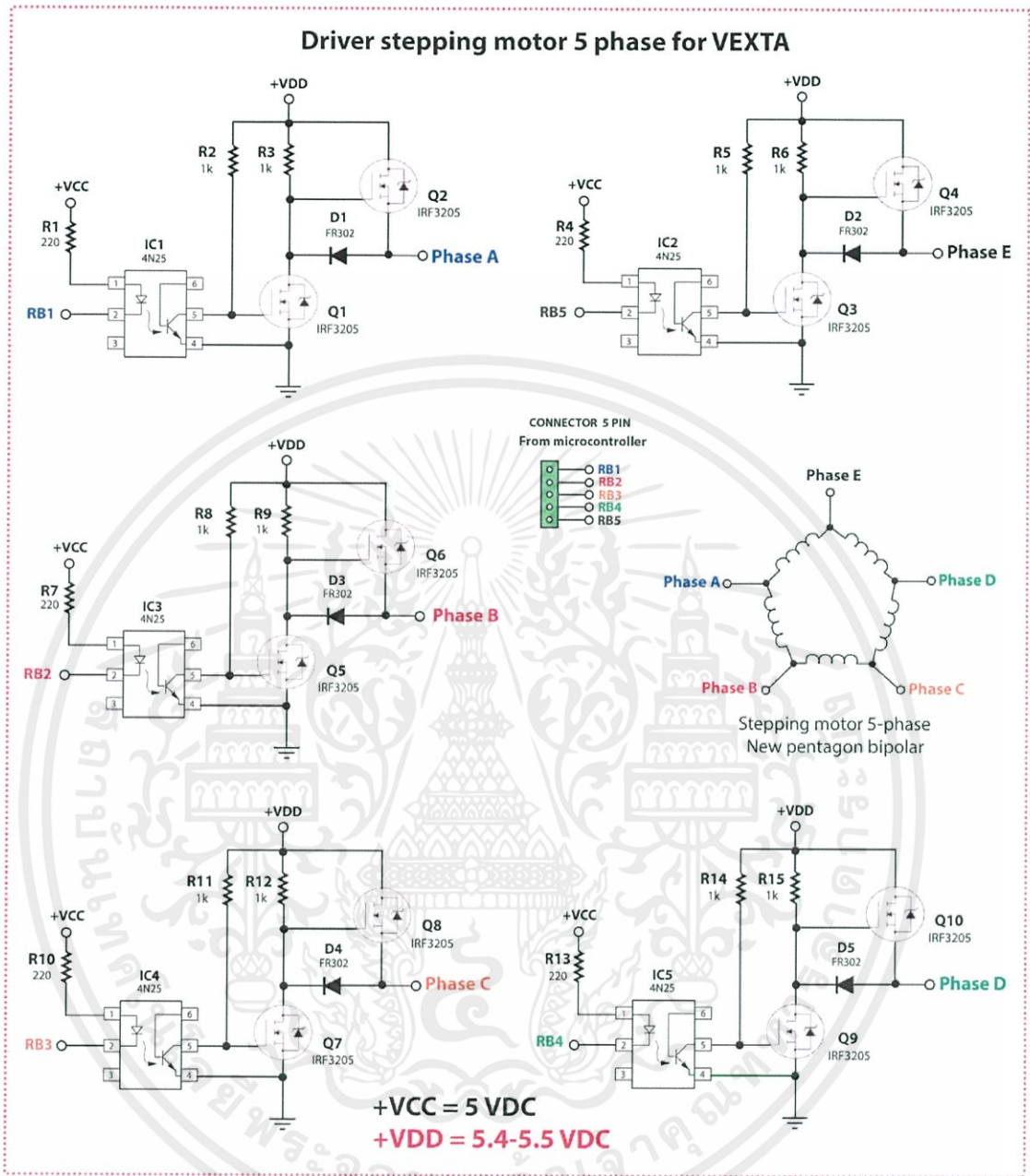
ลอจิก “0” (Low) จะทำให้เกิด การส่งสัญญาณแสงภายในออปโตคัปเปอร์ ส่งผลให้โฟโตทรานซิสเตอร์ภายในมีสถานะเปิด (On) ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ Q1 มีสถานะปิดแล้วทำให้ อุปกรณ์สวิตซ์ Q2 มีสถานะเปิดจากไฟ +VDD ที่ไหลเข้าขา Gate จึงทำให้จุดเชื่อมต่อไปยังเฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์มีสัญญาณเป็น ลอจิก “1” (High) จากไฟ +VDD

ลอจิก “1” (High) จะทำให้ไม่เกิด การส่งสัญญาณแสงภายในออปโตคัปเปอร์ ส่งผลให้โฟโตทรานซิสเตอร์ภายในมีสถานะปิด (Off) ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ Q1 มีสถานะเปิดจากไฟ +VDD ที่ไหลเข้าขา Gate แล้วทำให้ อุปกรณ์สวิตซ์ Q2 มีสถานะปิด จึงทำให้จุดเชื่อมต่อไปยังเฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์มีสัญญาณเป็น ลอจิก “0” (Low)

จากรูปด้านบนจะเห็นว่า มีไดโอดช่วยในการป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสไฟ โดย ใช้การขับแต่ละรอบประกอบด้วย 5 สเต็ปได้ตามตารางที่ 3.1 จึงจะครบลำดับการทำงาน ซึ่งวิธีการขับเคลื่อนแบบนี้เป็นวิธีที่สะดวก ง่ายต่อการเชื่อมต่อส่งงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์และใช้พอร์ตในการเชื่อมต่อน้อย

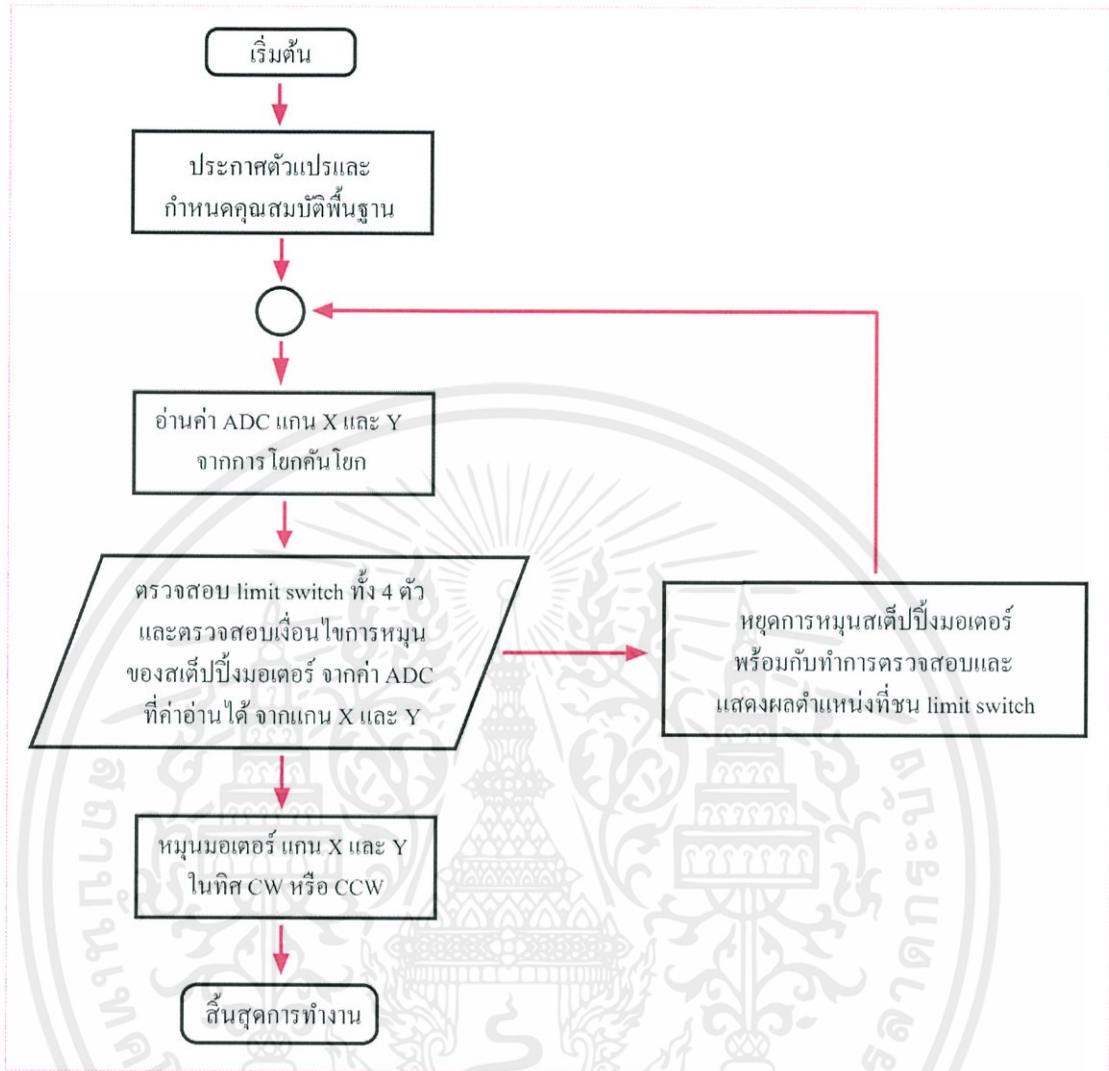


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 3.8 บอร์ดวงจรขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส ที่สร้างขึ้นมีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรสมบรูณ์ของภาคการขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส ที่เชื่อมต่อส้งงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

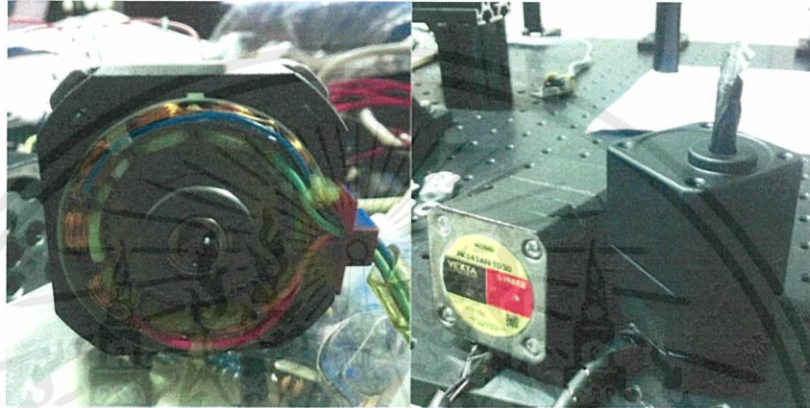


รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานโปรแกรมโดยรวมของชุดควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติของฐานวางตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ส่วนที่ 4 สเต็ปป์มอเตอร์ แบบ 5 เฟส

ในงาน โครงการพิเศษ นี้เลือกใช้สเต็ปป์มอเตอร์ แบบ 5 ที่มีโครงสร้างขดลวด ชนิด New pentagon bipolar แบบขดไม้อิสระ ของ VEXTA MODEL PK543AN-TG20 ที่มีความละเอียดจากเดิมคือ 0.72 องศาต่อสเต็ป มีการเพิ่มชุดเกียร์แบบ TH ที่มีอัตราทด 1:20 ทำให้ความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 0.036 องศาต่อสเต็ป



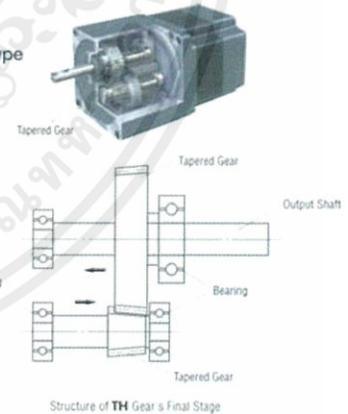
รูปที่ 3.11 ลักษณะภายนอกและภายในของ สเต็ปป์มอเตอร์แบบ 5 เฟส VEXTA MODEL PK543AN-TG20

#### ■ Wirings and Connections

- Step Angle 0.36°/0.72° Standard Type, Step Angle 0.72° High-Torque Type, Geared Type

◇ Inner Wiring Diagram for Motor  
Connection Type: New Pentagon (Bipolar)

For more details on the New Pentagon (Bipolar), please visit [www.orientalmotor.com](http://www.orientalmotor.com)



รูปที่ 3.12 ไดอะแกรมการจัดเฟสภายในและชุดเกียร์ทดของ สเต็ปป์มอเตอร์ชนิด 5 เฟส VEXTA MODEL PK543AN-TG20

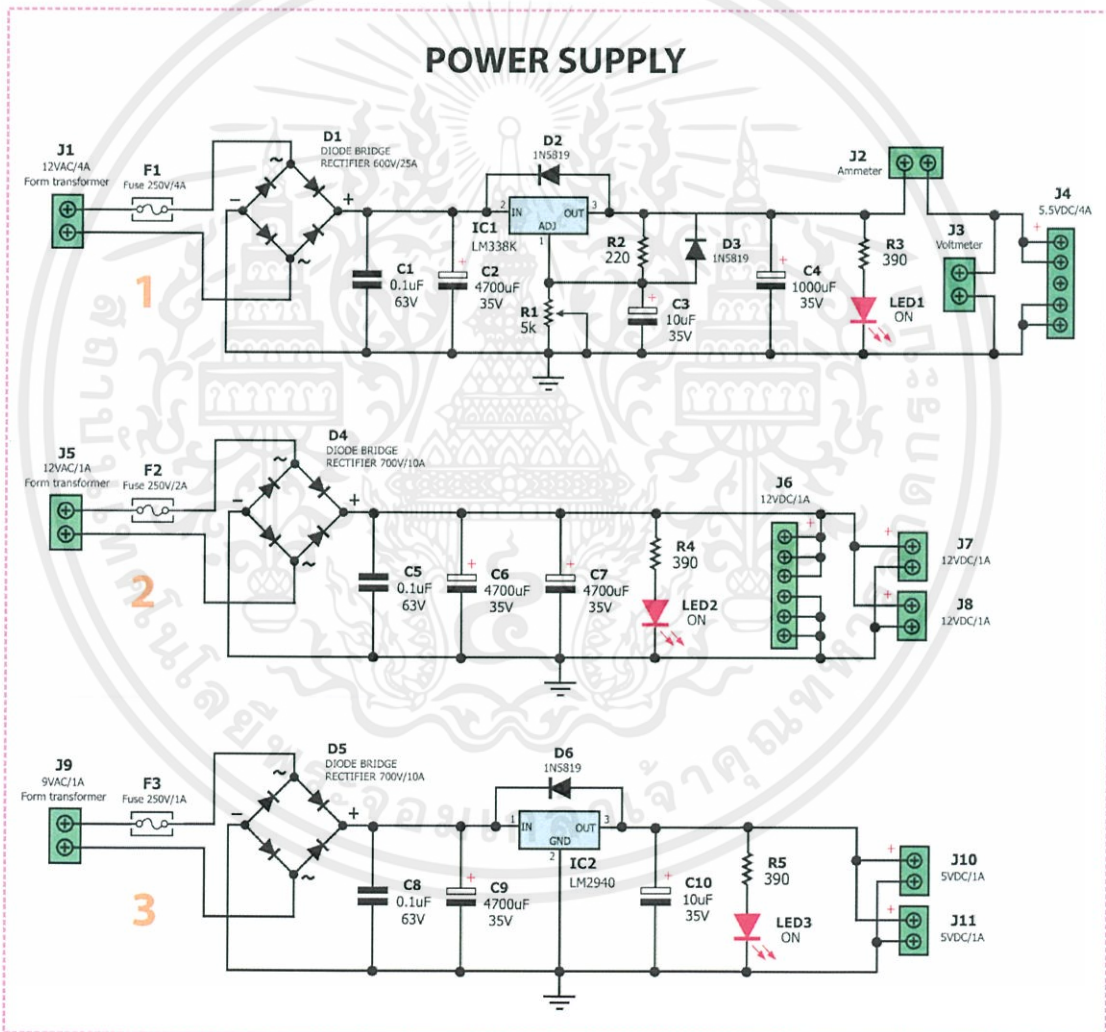
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 แหล่งจ่ายไฟ

โดยในชุดควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์ได้มีการใช้ไฟฟ้าตรง 3 ระดับด้วยกัน คือ

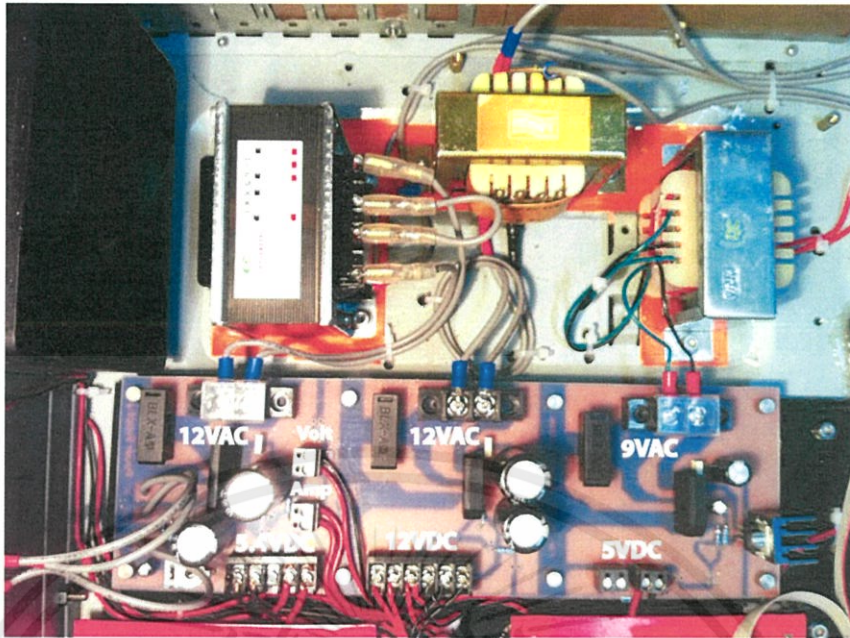
1. ภาคไฟกำลังของสแต็ปปีงมอเตอร์ใช้แรงดันไฟกระแสตรง 5.4 โวลต์
2. ภาคไฟเลี้ยงพัดลมระบายความร้อนในระบบใช้แรงดันไฟกระแสตรง 12 โวลต์
3. ภาคไฟเลี้ยงวงจรควบคุมประมวลผลหลักใช้แรงดันไฟกระแสตรง 5 โวลต์

โดยมีการป้องกันการดึง กระแสเกิน ใช้ฟิวส์มาจำกัดในแต่ละภาควงจรและเชื่อมต่อไปยังบอร์ดอื่นๆ ได้ มีการวัดและแสดงผลกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดดึงไป



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรภาคจ่ายไฟที่ใช้ในวงจรชุดขับเคลื่อนทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การเชื่อมต่อวงจรแหล่งจ่ายไฟกับหม้อแปลงและวงจรของโหลดที่ไฟ

### 3.1.3 สร้างกล่องชุดควบคุมฐานวางสารตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ

นำวงจรทั้งหมดมาประกอบลงกล่องควบคุมและเชื่อมต่อกับบอร์ดวงจรภาคหน้า กับสแต๊ปปีงมอเตอร์ทั้งสองตัว ลิ้มิตสวิทช์ พอร์ตการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ กล่องควบคุม Joybox มีการวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่โหลดดึงไป มีระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมและ ฮีทซิงค์(Heat sink) กลายเป็นกล่องควบคุมสแต๊ปปีงมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนอย่างกึ่งอัตโนมัติ

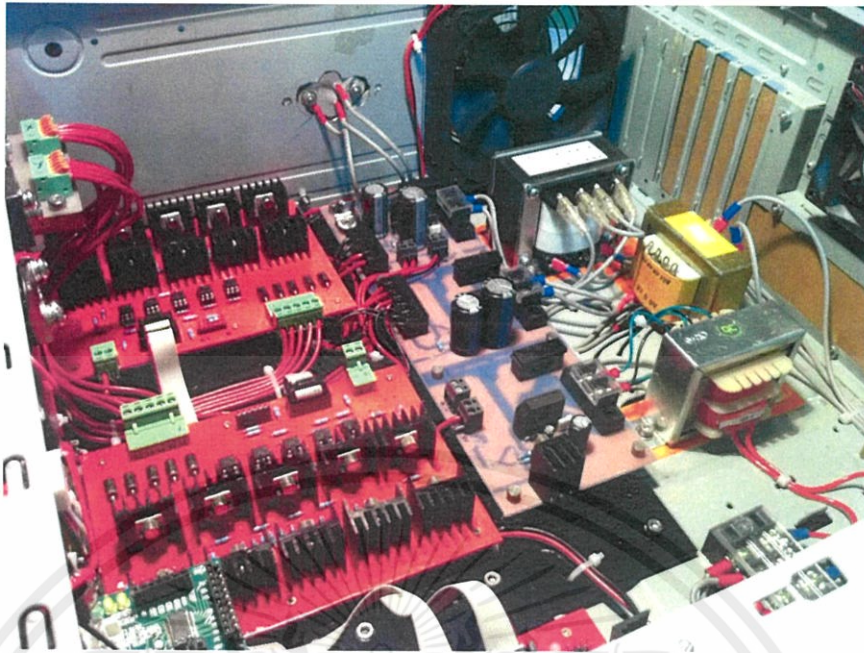


(a)



(b)

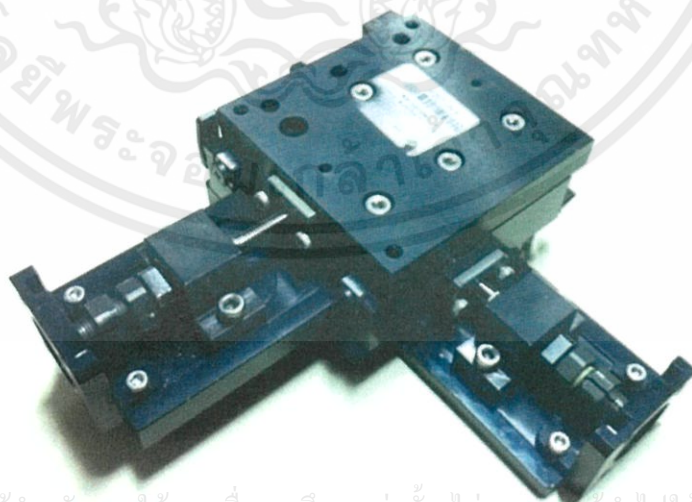
รูปที่ 3.15 กล่องควบคุมระบบกึ่งอัตโนมัติของฐานวางตัวอย่าง (a) แผงควบคุมหลักที่เชื่อมต่อกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า อุปกรณ์ต่างๆ และ (b) ระบบระบายความร้อนของกล่องควบคุมด้วยพัดลม และฮีทซิงค์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



รูปที่ 3.16 รูปแบบกล่องควบคุมมอเตอร์ทั้งหมด

### 3.2 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างกับสตีปิ้งมอเตอร์ ชุดวงจรควบคุม และทดสอบการทำงาน

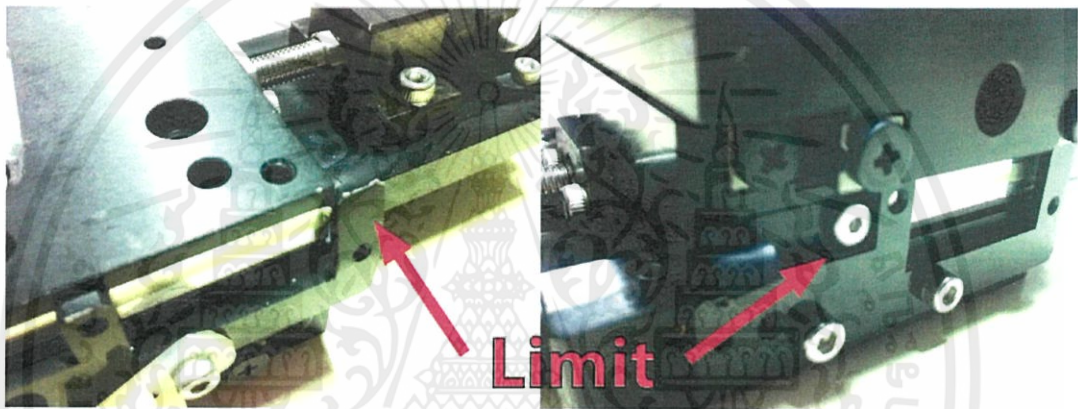
สตีปิ้งมอเตอร์ทั้งสองตัวนี้ได้ติดตั้งอยู่กับแท่นเลื่อนที่เคลื่อนที่ไปในแนวแกน X-Y และได้มีการติดตั้งชิ้นส่วนสำหรับวางแผ่นสไลด์ โดยแท่นเลื่อนนี้มีระยะทางสูงสุดในการเคลื่อนที่คือในแนวแกน  $X = 2$  เซนติเมตร  $Y = 2$  เซนติเมตร โดยทางคณะผู้จัดทำได้จัดหาแท่นเลื่อนในแนวแกน X-Y ที่สามารถจะติดตั้งสตีปิ้งมอเตอร์ได้ ดังรูปที่ 3.17



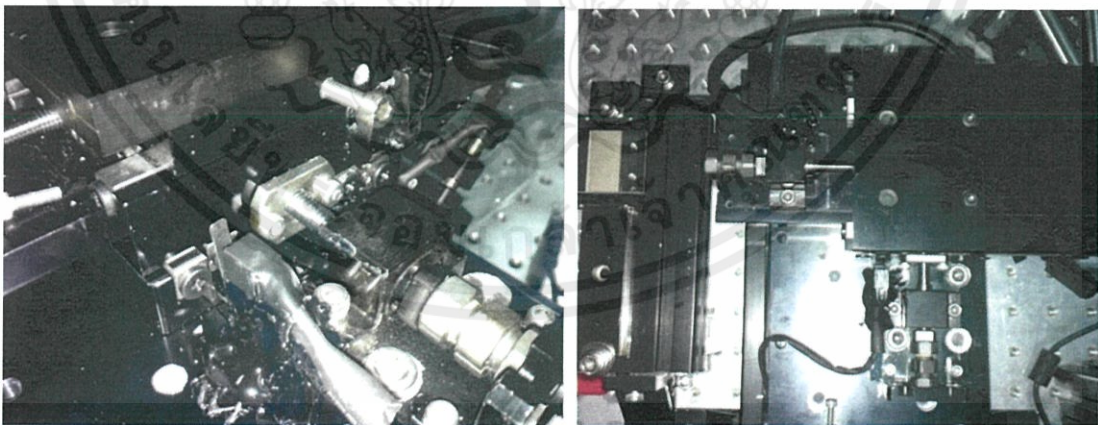
รูปที่ 3.17 แท่นเลื่อน X-Y Yaskawa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกใช้แทนเลื่อน X-Y Yaskawa ระยะทางการเลื่อนในแนวแกน X ทำได้มากที่สุดคือ 20 มิลลิเมตร ระยะทางการเลื่อนในแนวแกน Y มากที่สุด 30 มิลลิเมตร และระยะแกนพิช 0.1 เซนติเมตร ซึ่งได้มีการจำกัดระยะการเลื่อนมากที่สุด โดยใช้กลไกทางแมคคานิค ดังรูปที่ 3.18 เป็นตัวจำกัดการเลื่อนในแนวแกน X-Y และได้เพิ่มลิมิตสวิตช์เป็นตัวตรวจวัดระยะทางที่เลื่อนไปได้มากที่สุดไม่เกินในแนวแกน X คือ 20 มิลลิเมตร ระยะทางการเลื่อนในแนวแกน Y ได้มากที่สุด 20 มิลลิเมตร ในกรณีที่มีการเลื่อนไปสุดแล้วลิมิตสวิตช์ก็จะทำการส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลสั่งงานให้หยุดการปรับเลื่อนและแจ้งเตือนต่อผู้ใช้งาน ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 กลไกการจำกัดระยะทางการเคลื่อนที่มากที่สุดแนวแกน X-Y

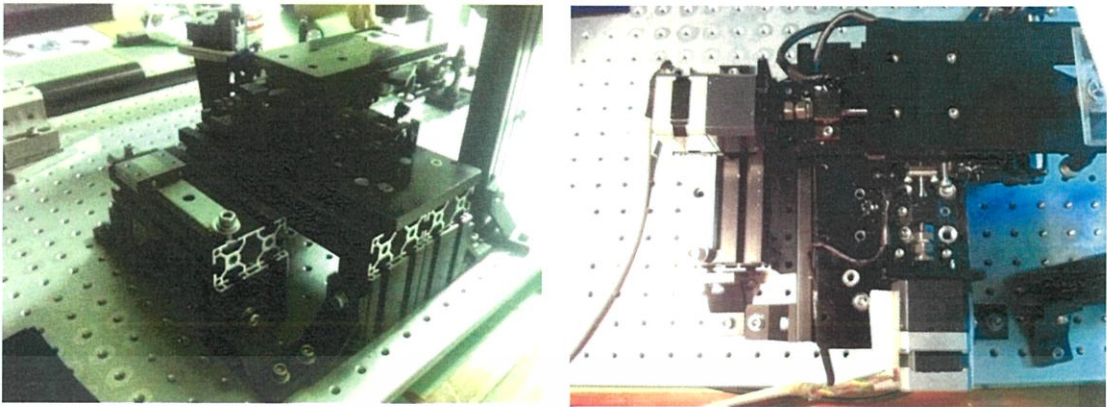


(a)

(b)

รูปที่ 3.19 การจำกัดการเลื่อนโดยใช้ลิมิตสวิตช์ (a) การติดตั้งพื้นฐานในแนวแกน X-Y และ (b) การติดตั้งลิมิตสวิตช์ทั้งหมด 4 ตัวเพื่อใช้จำกัดระยะการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานโดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

รูปที่ 3.20 การติดตั้งสเต็ปปีงมอเตอร์กับฐานวางตัวอย่าง (a) ฐานอลูมิเนียมโปรไฟล์ และราง linear slide และ (b) ติดตั้งสเต็ปปีงมอเตอร์ทั้งสองตัวกับฐานเลื่อนแกน X-Y

### 3.2.1 การทดสอบความแม่นยำในการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์

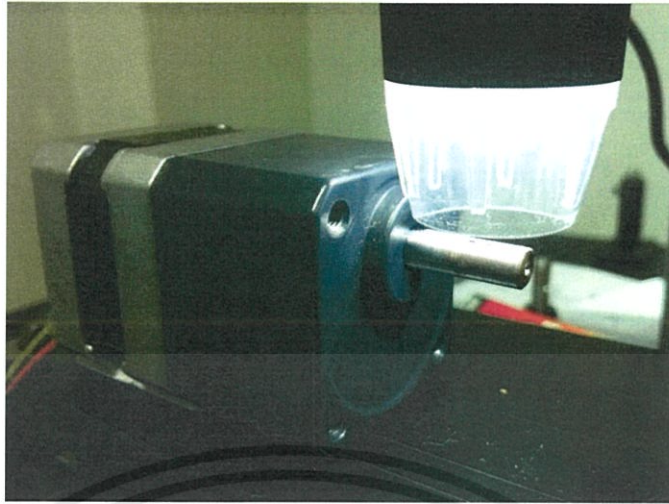
การทดสอบการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ เนื่องจากสเต็ปปีงมอเตอร์ 5 เฟส ที่เลือกใช้นั้นมีความละเอียด 0.036 องศาต่อสเต็ป แต่ให้ทำงานแบบเต็มขั้นสองเฟส ได้ความละเอียด 0.072 องศาต่อสเต็ปดังนั้นถ้าหากต้องการที่จะหมุน 1 รอบ แสดงว่าต้องหมุน 360 องศา (รอบ)

ดังนั้นจาก	1 สเต็ปหมุนไป 0.072 องศา
ถ้า	360 องศา ต้องหมุน $\frac{360}{0.072} = 5,000$ สเต็ป

#### 3.2.1.1 การทดสอบใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์

เมื่อทำการคำนวณสเต็ปการหมุนแล้วก็ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปมอเตอร์โดยให้ทำงานหมุน 5,000 สเต็ปแล้วหยุด 5 วินาที จากนั้นหมุนต่ออีก 5,000 สเต็ปในทิศทางเดียวกัน โดยทำซ้ำไปเรื่อยๆเป็นจำนวน 200 ครั้งปรับความเร็วในแต่ละสเต็ปเพิ่มขึ้นจาก 1 วินาที ไปจนถึง 10 มิลลิวินาที โดยที่รอยบากของแกนสเต็ปปีงมอเตอร์ใช้ปากกาเมจิกขีดเป็นสีดำไว้แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูว่า ณ ตอนที่สเต็ปปีงมอเตอร์หมุนมาครบ 1 รอบนั้นรอยบากกลับมาที่ตำแหน่งเดิมหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสเต็ปิ่งมอเตอร์

### 3.2.1.2 การทดสอบใช้ไมโครมิเตอร์วัดระยะที่สเต็ปิ่งมอเตอร์หมุน

จากนั้นทำการทดสอบตำแหน่งการหมุนของสเต็ปิ่งมอเตอร์กับไมโครมิเตอร์เพื่อความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยทำต่อสเต็ปิ่งมอเตอร์กับไมโครมิเตอร์แล้ว เขียนโปรแกรมควบคุมการหมุนของสเต็ปิ่งมอเตอร์ทำงานหมุน 5,000 สเต็ปแล้วหยุด

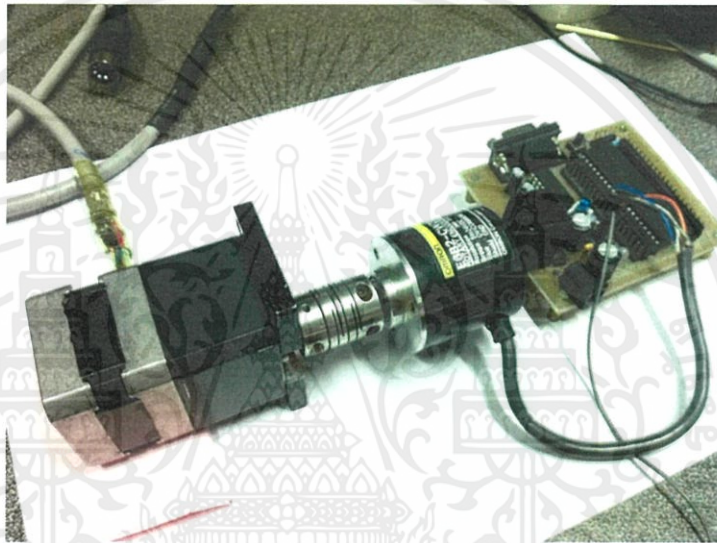
ซึ่งไมโครมิเตอร์เมื่อทำการหมุนครบรอบจะมีระยะเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อสเต็ปิ่งมอเตอร์หมุนครบแล้วก็ดูที่สเกลของไมโครมิเตอร์ควรตรงกับที่ตำแหน่ง 0.5 มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน รูปที่ 3.22 แสดงการเชื่อมต่อสเต็ปิ่งมอเตอร์กับไมโครมิเตอร์ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.3 การทดสอบใช้เอ็นโคเดอร์ วัดตำแหน่งที่สเต็ปมอเตอร์หมุน

เพื่อการแม่นยำในการหมุนไปของสเต็ปมอเตอร์จึงนำเอ็นโคเดอร์มาวัดตำแหน่งในการหมุน โดยความมีความละเอียดในการวัด 360 พัลส์ต่อรอบแต่สามารถเขียนให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น 2 หรือ 4 เท่าก็ได้ โดยในที่นี้ได้เขียนโปรแกรมวัดความละเอียดเป็น 2 เท่า ได้ความละเอียดในการวัดเป็น 720 พัลส์ต่อรอบ แสดงว่าจะมีสัญญาณเปลี่ยนแปลงทุกๆ 0.5 องศา ซึ่งสเต็ปมอเตอร์หมุนด้วยความละเอียด 0.072 องศาต่อสเต็ป ดังนั้นเมื่อสเต็ปมอเตอร์หมุน 7 สเต็ปก็จะตรวจวัดได้มา 1 สัญญาณ



รูปที่ 3.23 แสดงการเชื่อมต่อสเต็ปมอเตอร์กับเอ็นโคเดอร์ที่ใช้งานในการวัดตำแหน่งการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ออกแบบและสร้างระบบการมองเห็นภาพ

ในส่วนนี้จะเป็นระบบการมองเห็นภาพซึ่งจำเป็นต้องใช้กล้องที่มีกำลังขยายมากกว่าปกติในการมองภาพวัตถุตัวอย่างที่อยู่บนแท่นวางสารตัวอย่าง โดยในระบบจิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติได้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล ที่มีกำลังขยาย 50-500 เท่า ความละเอียด 2M Pixel และการเชื่อมต่อข้อมูลผ่านทางพอร์ต USB โดยที่นี่ได้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในส่วนของ Vision ในการรับสัญญาณภาพและควบคุมการเก็บภาพ รวมไปถึงการประมวลผลภาพ



(a)



(b)

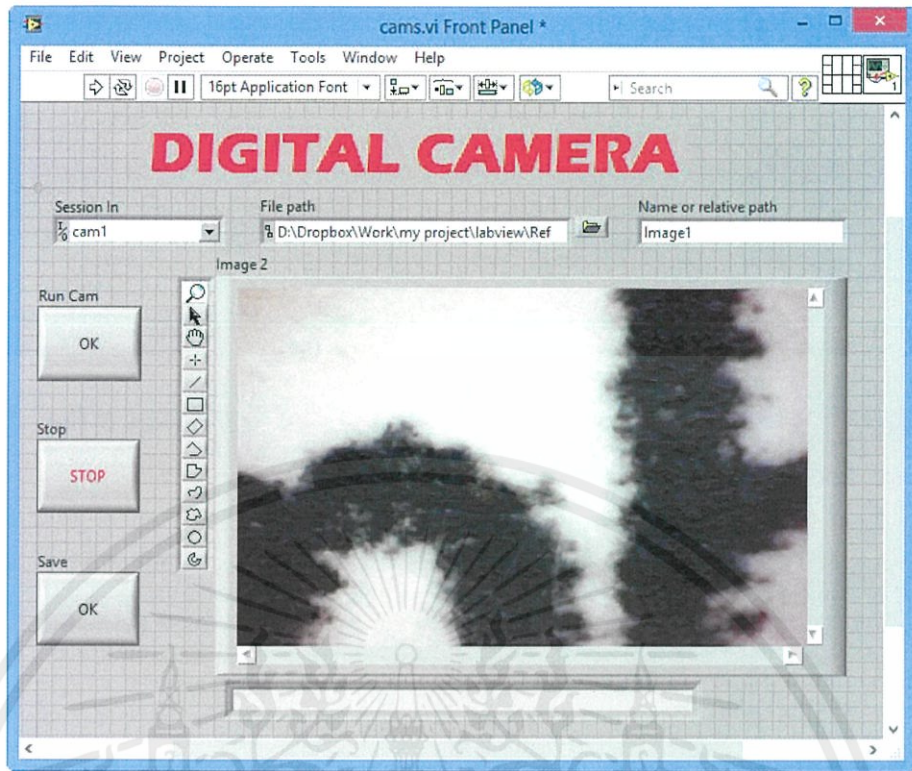
รูปที่ 3.24 กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (a) กล้องจุลทรรศน์ที่เลือกใช้งาน กำลังขยาย 50-500 เท่า และ (b) การติดตั้งกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถปรับระยะการโฟกัสภาพได้

โดยออกแบบให้สามารถทำการปรับระยะการโฟกัสของภาพได้จากการหมุน linear slide เลื่อนขึ้น-ลง



รูปที่ 3.25 แกนปรับระยะการโฟกัสภาพของกล้องจุลทรรศน์

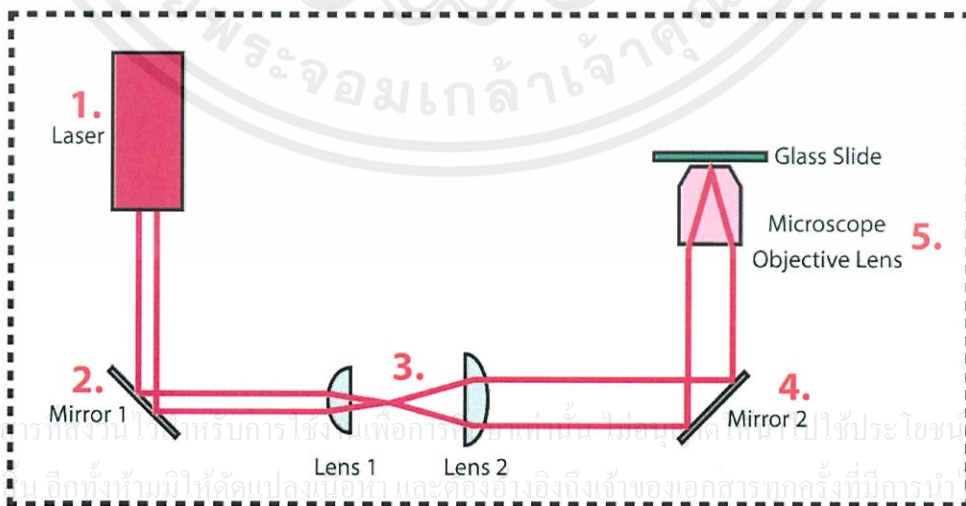
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 โปรแกรมการควบคุมการเก็บภาพ

โดยการเก็บภาพจากระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติจำเป็นต้องมีระบบการตัดแสงเลเซอร์ ในย่านสีแดงออกไปเพื่อไม่ให้เซนเซอร์ CCD นั้นบอดหรือเสียหายจากความเข้มของแสงเลเซอร์ ซึ่งก็มีหลากหลายวิธีมากแต่ในที่นี้เลือกใช้การใส่ฟิลเตอร์ โดยใช้ฟิลเตอร์สีน้ำเงิน ทำให้เกิดการกรองแสงในย่านที่เป็นสีแดงออกไป

3.4 ออกแบบและจัดระบบทัศนศาสตร์เพื่อสร้างเป็นระบบคิมจับเชิงแสง



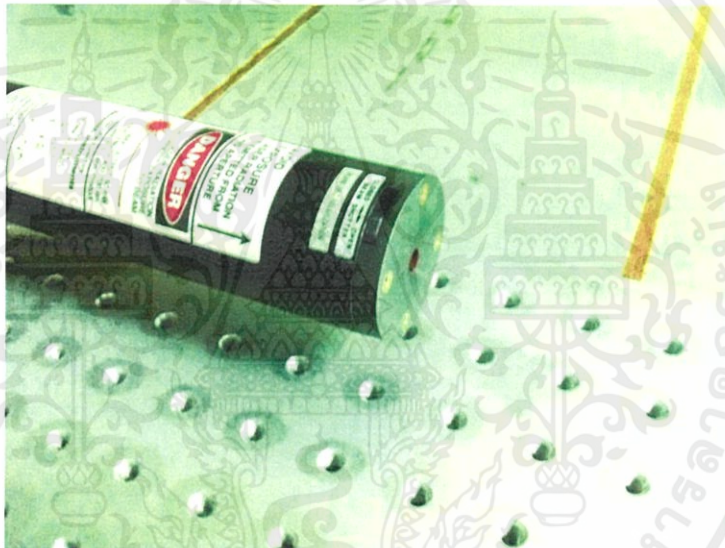
รูปที่ 3.27 แสดงการจัดวางระบบทัศนศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในส่วนแรกนั้นจะเป็นการออกแบบและจัดวางระบบทัศนศาสตร์ที่ใช้งานในระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งในขั้นตอนแรกได้ทำการออกแบบระบบทัศนศาสตร์เป็นไปตามแผนภาพโดยรวม ดังรูปที่ 3.27

### ส่วนที่ 1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

ในการสร้างระบบ คีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัตินี้ได้ใช้ เลเซอร์ฮีเลียมนีออน (He-Ne Laser) ที่มีคุณสมบัติ เป็นแสงสีแดง อยู่ในช่วงความยาวคลื่นความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร โดยมีกำลังสูงสุดของเลเซอร์ 20 มิลลิวัตต์ ที่ได้ติดตั้งอยู่บนฐานแท่นรอง โดยลำแสงจะมีความสูง 50 มม. และมีขนาดลำแสงความกว้าง 1.8 มม.

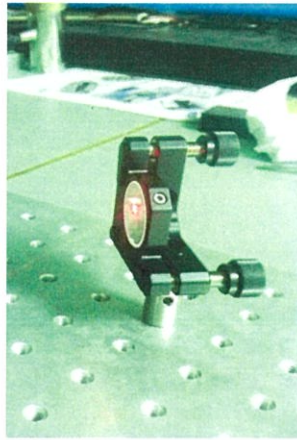


รูปที่ 3.28 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

### ส่วนที่ 2 กระจก 1 (Mirror Mount)

ลำแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์จะถูกกระจกสะท้อนทำให้เปลี่ยนทิศทางและยังสามารถปรับให้ลำแสงเลื่อนไปได้ตามต้องการจากการปรับกระจก สะท้อนลำแสงไปยังส่วนของการขยายลำแสงต่อไป โดยในระบบนี้ได้ใช้กระจกแบบสะท้อนแสง ขนาด 1 นิ้ว พร้อมกับแท่นจับและปรับระนาบของกระจก

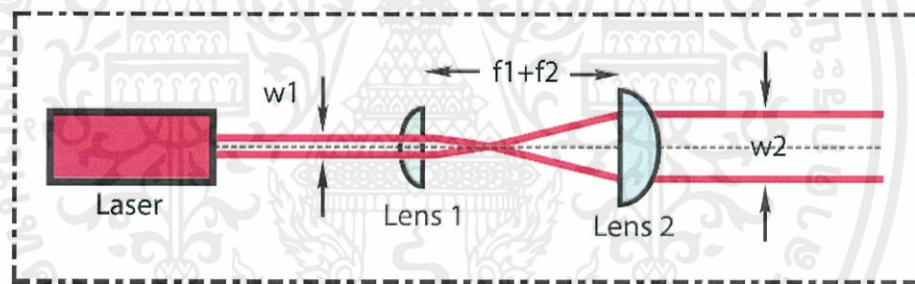
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



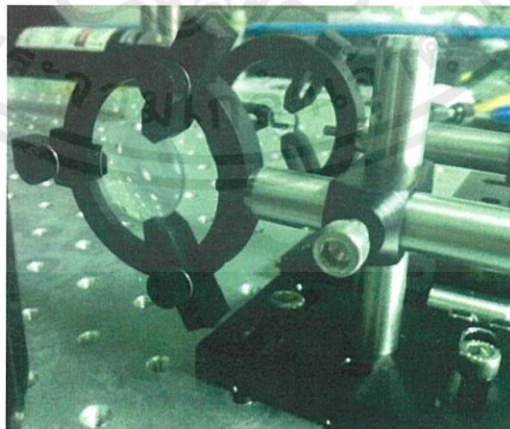
รูปที่ 3.29 แสดงกระจกที่ใช้ในการทดลอง

### ส่วนที่ 3 ส่วนของการขยายลำแสง (Beam Expander)

เมื่อแสงเดินทางเป็นระนาบมายังส่วนการขยายลำแสงจะทำให้ลำแสงมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งระบบการขยายแสงนี้ ประกอบด้วยเลนส์นูนแกมระนาบ (Plano Convex lens) 2 ตัว มีความยาวโฟกัส 20 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.30 แสดงไดอะแกรมการขยายลำแสง



รูปที่ 3.31 แสดงส่วนของการขยายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบ Beam expander จากรูปเลนส์ตัวที่ 1 มีระยะโฟกัสอยู่ที่ 20 mm. และเลนส์ตัวที่ 2 มีระยะโฟกัสอยู่ที่ 60 mm. ดังนั้นการคำนวณระยะห่างระหว่างเลนส์ทั้งสองคือ ระยะห่างของเลนส์ เท่ากับ จุดโฟกัสของเลนส์ตัวที่ 1 บวกกับ ระยะของจุดโฟกัสของเลนส์ตัวที่ 2

$$\begin{aligned}\text{ระยะห่างของเลนส์} &= f_1(\text{mm}) + f_2(\text{mm}) \\ &= 20 + 60 \\ &= 80 \text{ mm.}\end{aligned}$$

จากการคำนวณจะเห็นว่าเราต้องวางเลนส์ห่างกันเป็นระยะ 80 มิลลิเมตร ซึ่งเราสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงที่ถูกขยายโดยเลนส์ทั้งสอง จากรูป 3.4 ได้จากสูตร

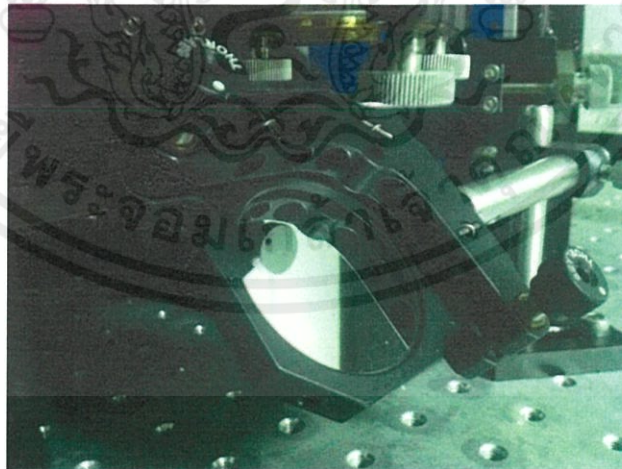
$$w_2 = \left( \frac{f_2}{f_1} \right) w_1 \quad (3.1)$$

คำนวณตามสมการที่ (3.1)

เส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงที่ถูกขยายแล้วจะมีขนาดเท่ากับ 5.4 มิลลิเมตร

#### ส่วนที่ 4 กระจก (Mirror Mount)

กระจกเป็นแบบสะท้อนแสง ขนาด 2 นิ้ว ใช้เพื่อสะท้อนลำแสงเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens)

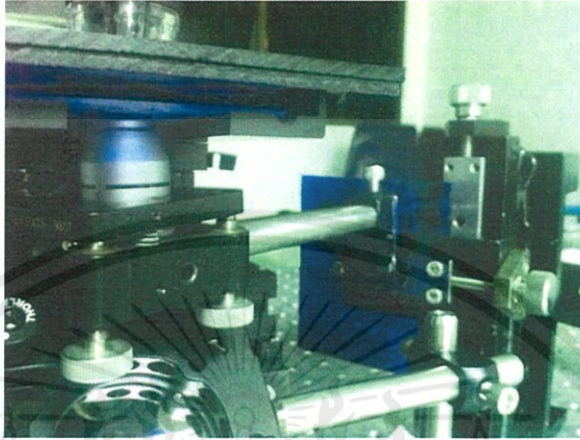


รูปที่ 3.32 แสดงกระจกที่ใช้สะท้อนเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ส่วนที่ 5 เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens)

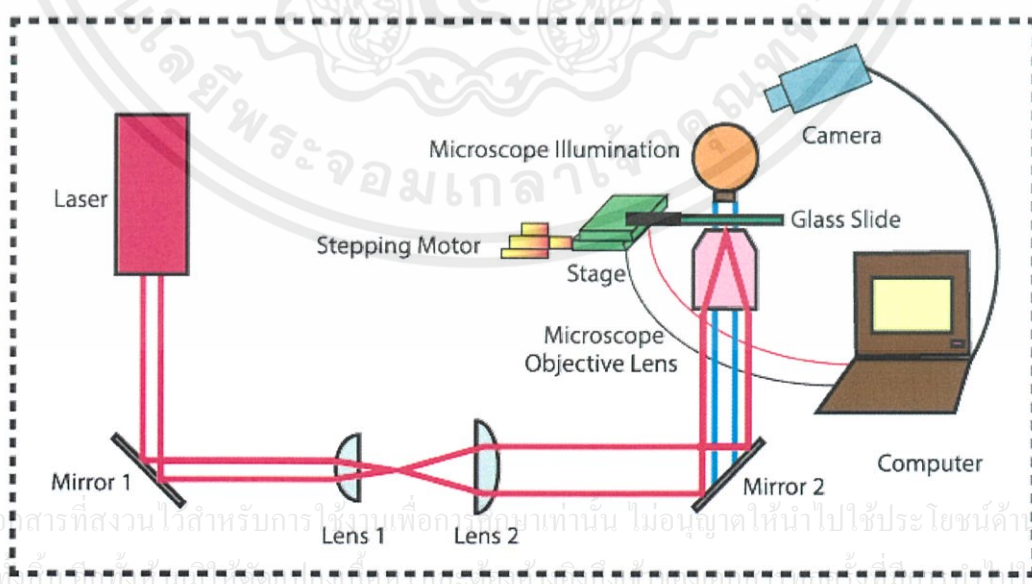
ใช้ในการดักจับอนุภาค มีขนาด 100x หัวเป็นแบบจุ่มน้ำมัน NA.1.25 โดยติดตั้งบนแท่นเลื่อน X-Y-Z ซึ่งสามารถทำการปรับให้ลำแสงเลเซอร์เข้าสู่ศูนย์กลางเลนส์ได้อย่างแม่นยำ



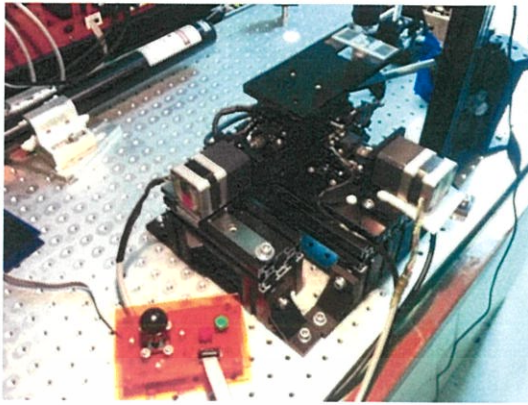
รูปที่ 3.33 แสดงการวางเลนส์ใกล้วัตถุอยู่เหนือกระจกสะท้อน

### 3.5 ติดตั้งฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติในระบบคีมจับเชิงแสง

หลังจากที่ทำการสร้าง ฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนอย่างกึ่งอัตโนมัติในแนวแกน X-Y พร้อมชุดควบคุมการทำงานแล้ว ก็ทำมาติดตั้งในระบบคีมจับเชิงแสงในส่วนของฐานวางตัวอย่าง ซึ่งจะช่วยให้กลายเป็นระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ แผ่นผังโดยรวมของระบบการทำงานเป็นไปดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 แผ่นผังการทำงานโดยรวมของระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ



(a)



(b)

รูปที่ 3.35 ระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้น (a) ในส่วนของระบบควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนแบบกึ่งอัตโนมัติ และ (b) ส่วนทัศนศาสตร์ที่เป็นส่วนประกอบของระบบคิมจับเชิงแสง

### 3.6 ทดสอบระบบคิมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ และเก็บบันทึกผลทดลองการจับอนุภาคตัวอย่าง

#### 3.6.1 คุณสมบัติของสารตัวอย่างและการเตรียมสารตัวอย่าง

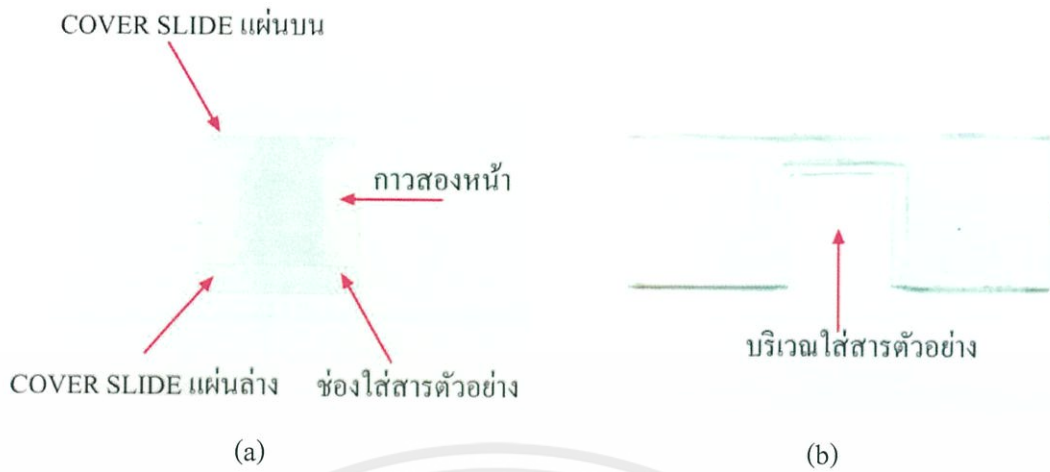
##### 3.6.1.1 คุณสมบัติสารตัวอย่าง

- มีลักษณะโปร่งใส
- ดัชนีหักเหมากกว่าตัวกลางรอบๆอนุภาค

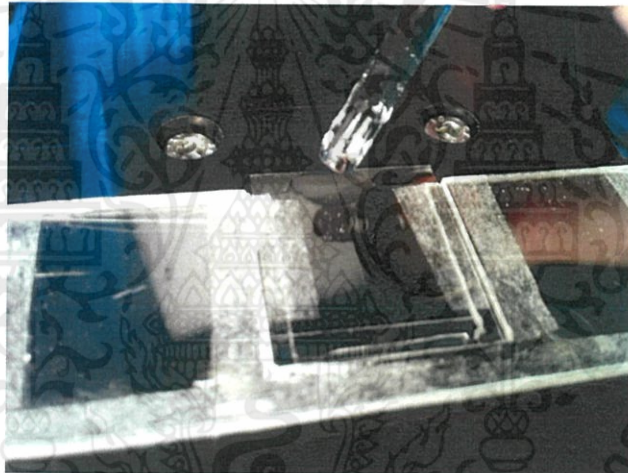
##### 3.6.1.2 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง

ตัดกาวยางหน้าชนิดเยื่อที่ความหนา 0.01 มิลลิเมตร ให้เป็นเส้น โดยมีขนาดความกว้างเส้นละประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาติดบนกระจกปิดแผ่นสไลด์ 2 ด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.36 จากนั้นนำกระจกปิดแผ่นสไลด์อีกแผ่นมาปิดทับ เจือจางความเข้มข้น เม็ดโพลีสไทลีน ด้วยการเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ แล้วนำเม็ดโพลีสไทลีนที่เจือจางแล้วใส่ในเซลล์ที่เตรียมไว้ จากนั้นนำเซลล์ที่ใส่สารแขวนลอยเม็ดโพลีสไทลีนไปใส่ในเซลล์ สำหรับติดตั้งบนกล้องจุลทรรศน์ซึ่งจะได้เซลล์ดังรูปที่ 3.37 ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 แสดงการเตรียมที่วางสารตัวอย่าง (a)การเตรียมแผ่นสไลด์สำหรับใส่ตัวอย่าง และ (b) การเตรียมที่วางแผ่นสไลด์

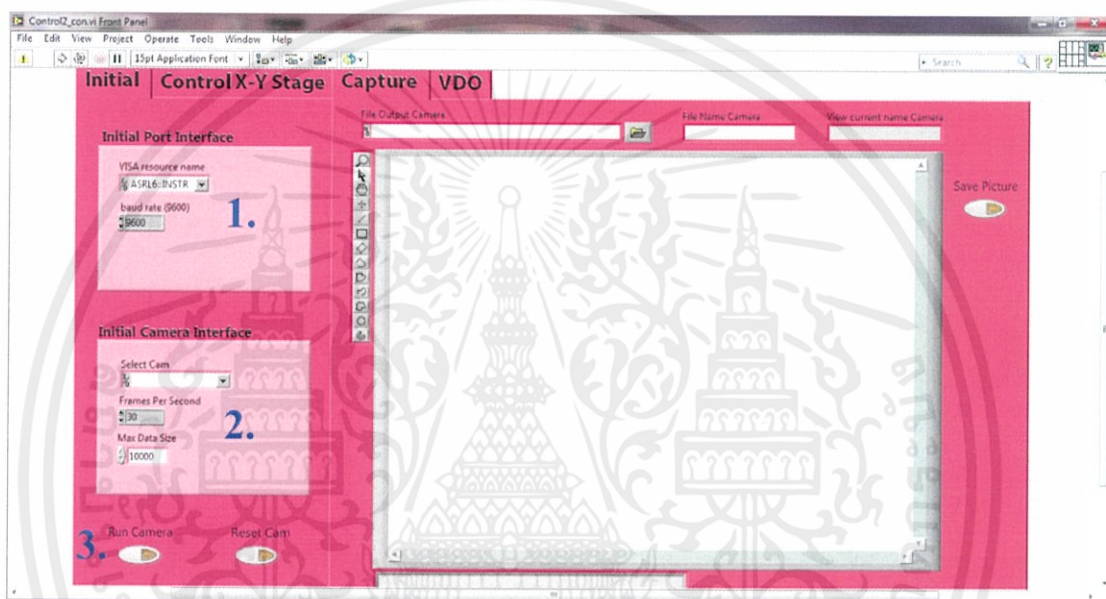


รูปที่ 3.37 แผ่นสไลด์ที่ใส่สารตัวอย่างพร้อมทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนตำแหน่งวางสารตัวอย่างและการมองเห็น

ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเชื่อมต่อและควบคุมการเลือกของตำแหน่งวางสารตัวอย่างซึ่งสามารถควบคุมได้จากกล่องควบคุม (Joyboy) หรือ ใช้งาน GUI ในการควบคุม และในส่วนของ การเก็บบันทึกผลนั้นได้เก็บข้อมูลเป็นภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวจากกล้อง กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลที่เชื่อมต่อกับ LabVIEW Vision ซึ่งจะขออธิบายการใช้งานโปรแกรม ดังนี้

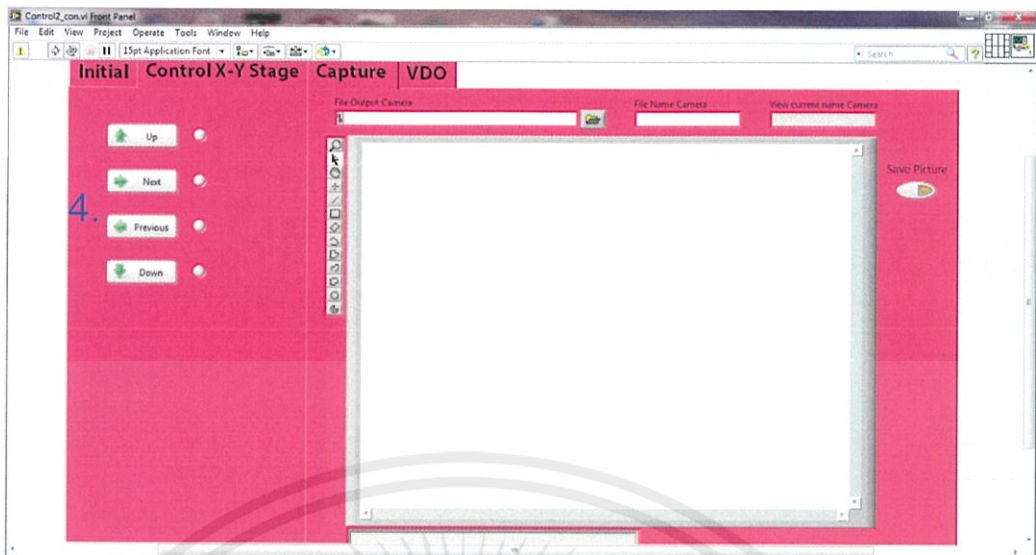


รูปที่ 3.38 แสดงการใช้งานโปรแกรมในส่วน Initial

1. ตั้งค่าการเชื่อมต่อ Com port และ baud rate โดยในที่นี้เลือกใช้เป็น COM3 (เป็นค่าเฉพาะแต่ละเครื่อง) , Baud rate 9600
2. ตั้งค่าการเชื่อมต่อกำลังโดยเลือกช่องเชื่อมต่อกำลัง , เฟรมต่อวินาที และขนาดข้อมูลมากที่สุด ในที่นี้ใช้ Cam4 , 30 และ 10000 ตามลำดับ
3. กด Run Camera เพื่อเริ่มการใช้งาน

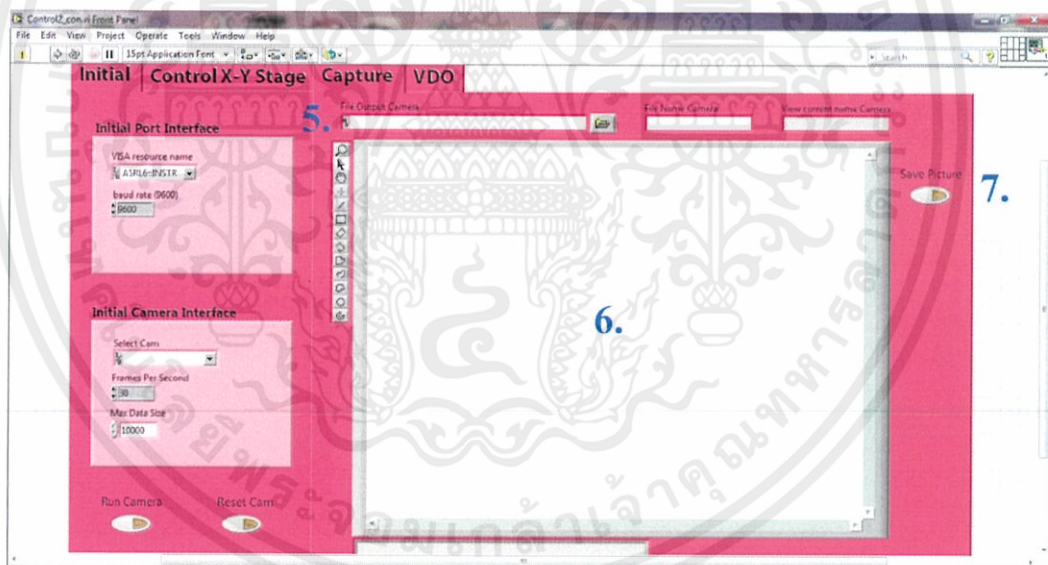
**หมายเหตุ** การตั้งค่าในส่วน Initial จะตั้งค่าเพียงครั้งเดียว ตลอดการใช้โปรแกรม และค่าต่างๆจะเป็นแต่ละเครื่องไม่เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.39 แสดงการใช้งานโปรแกรมในส่วนของการควบคุมฐานวางตัวอย่างที่เลื่อนในแกน X-Y

4.การใช้งานในส่วนนี้จะทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของ Stage ขึ้น ลง ซ้ายและขวา เมื่อทำการกดแต่ละปุ่มก็จะมีหลอดไฟ LED แสดงสถานะการทำงานด้วย

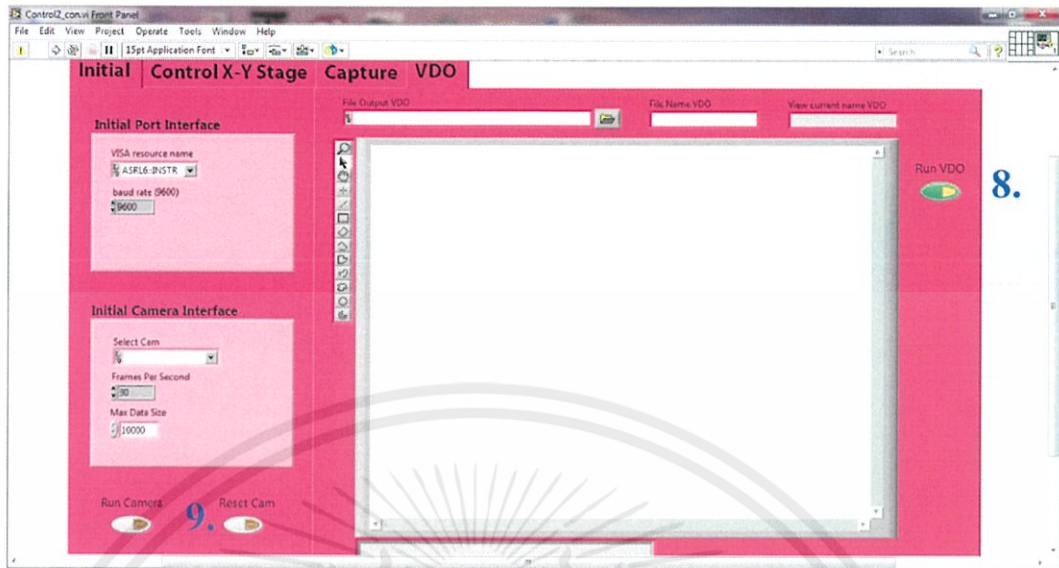


รูปที่ 3.40 แสดงการใช้งานในส่วนของการเก็บภาพนิ่ง

5.ในโหมดการเก็บภาพนิ่ง ตั้งค่าเลือกที่อยู่ของไฟล์ที่จะจัดเก็บไฟล์รูปภาพ (File Output Camera) โดยกดปุ่มรูปแฟ้ม จากนั้นทำการกำหนดชื่อไฟล์ (Name File Camera) และช่องแสดงชื่อไฟล์รูปภาพที่ได้จับเก็บไปแล้ว

เอกสารนี้เป็น 6.จอแสดงผลภาพ Output การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด 7.ปุ่มสำหรับการจัดเก็บรูปภาพที่ต้องการ เมื่อทำการกดแล้วก็จะเห็นได้ว่าตัวเลขไฟล์จะเพิ่มขึ้นตาม และไฟล์รูปภาพก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.41 แสดงการใช้งานในส่วนของการเก็บภาพเคลื่อนไหว

8. ในโหมดการเก็บภาพเคลื่อนไหว ก็ยังคงเก็บที่อยู่ไฟล์ที่ได้อธิบายไว้เหมือนดังข้อ 5. และปุ่มกดสำหรับ RUN VDO และกดอีกครั้งเพื่อหยุดการเก็บภาพเคลื่อนไหว
9. เมื่อทำการหยุดการเก็บภาพเคลื่อนไหวแล้วทำการเปลี่ยนชื่อ File Name VDO จากนั้น กดปุ่ม Reset Cam เพื่อเริ่มการเก็บข้อมูลอีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

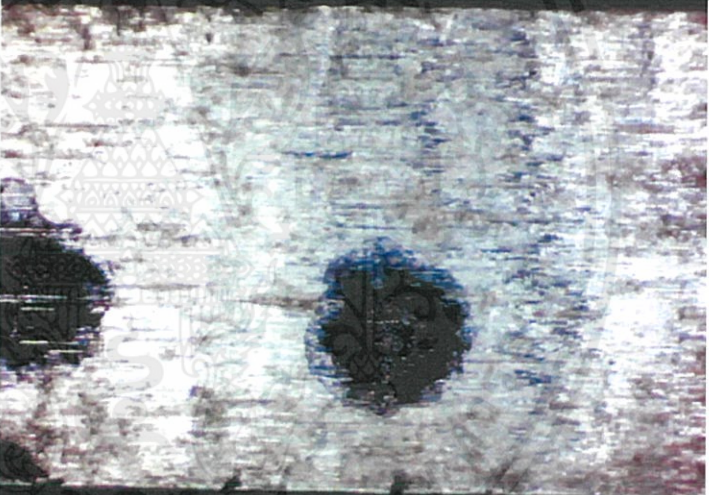
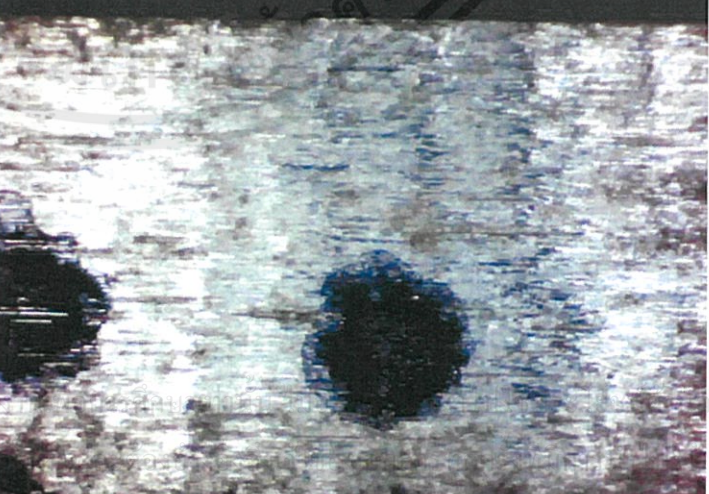
### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ

##### 4.1.1 ผลทดสอบการใช้กล้องกล้องจุลทรรศน์ส่องดูการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์

จากการทดลองให้สเต็ปมอเตอร์หมุน 5,000 สเต็ป (1 รอบ) แล้วหยุด 5 วินาทีในทิศทางเดียวกันจนครบ 1,000 รอบ จากนั้นหมุนกลับอีกทิศทางหนึ่งไปจนครบ 1,000 รอบ โดยทำซ้ำไปเรื่อยๆ และใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูตำแหน่งที่หมุนไปพบว่าเป็นไปตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งการหมุน

ตำแหน่งการหมุน	รูปตำแหน่งการหมุน
เริ่มการหมุน	
หมุนครบ 1,000 รอบ	

จากการทดลองที่หมุนไปเป็นจำนวนรอบที่ 1, 10, 50, 100, 200, 500, 1000 ครั้ง และหมุนกลับ  
ไปเป็นจำนวนรอบที่ 1, 10, 50, 100, 200, 500, 1000 ครั้ง พบว่าตำแหน่งที่ทำการทำเครื่องหมายไว้เมื่อ  
หมุนไปแล้วยังคงกลับมาที่เดิมไม่เปลี่ยนตำแหน่งไป

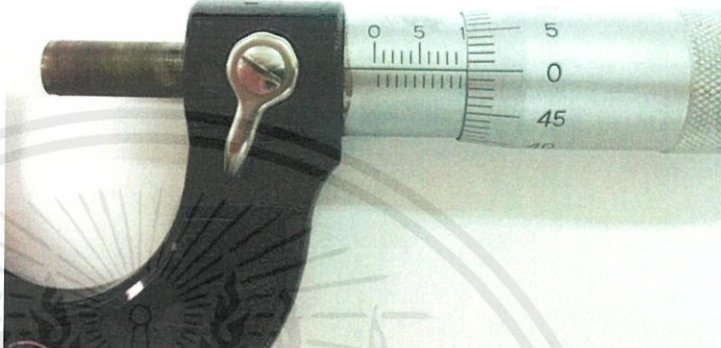
#### 4.1.2 ผลทดสอบการใช้ไมโครมิเตอร์วัดระยะที่สแต็ปปีงมอเตอร์หมุน

จากการทดสอบการหมุนของสแต็ปปีงมอเตอร์ที่เชื่อมต่อกับไมโครมิเตอร์เพื่อวัดระยะที่  
การหมุนไปนั้นพบว่า เป็นไปตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการทดสอบสแต็ปปีงมอเตอร์ด้วยไมโครมิเตอร์

ตำแหน่งการหมุน	รูประยะการหมุน
เริ่มการหมุน	
หมุนครบ 1 รอบ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งการหมุน	รูประยะการหมุน
หมุนครบ 20 รอบ	
หมุนครบ 40 รอบ	

จากการทดลองได้ทำการสั่งงานให้สเต็ปป์มอเตอร์หมุน ไปครบ 1,20,40 รอบทั้งสองตัว แล้วอ่านสเกลได้เป็นระยะ 0.5 , 10 , 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าสเต็ปป์มอเตอร์มีความแม่นยำในการหมุน ที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 ผลทดสอบใช้เอ็นโคเดอร์ วัดตำแหน่งที่สตีปิ้งมอเตอร์หมุน

จากการทดสอบการวัดตำแหน่งของสตีปิ้งมอเตอร์จากเอ็นโคเดอร์พบว่าเป็นไปตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดสัญญาณที่ได้จากเอ็นโคเดอร์เมื่อสตีปิ้งมอเตอร์หมุนไป

ทิศทางการหมุน/สตีป	0	1250	2500	3750	5000	6250	7500	8750	10000
พัลส์ในทิศ ตามเข็มนาฬิกา (CW)	0	179	357	538	716	896	1075	1256	1439
พัลส์ในทิศ ทวนเข็มนาฬิกา (CCW)	1440	1257	1078	899	719	540	359	179	0

จากการทดลองพบว่าเมื่อสตีปิ้งมอเตอร์หมุนไปเอ็นโคเดอร์จะให้สัญญาณออกมาแล้วใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลและนับจำนวนสตีปที่หมุนไปด้วยความละเอียด 2 เท่า ได้โดยมีความละเอียด 1 พัลส์ต่อ 7 สตีป

#### คุณสมบัติของแท่นเลื่อน X-Y

จากการทดสอบการทำงานของฐานเลื่อน X-Y ที่ได้สร้างขึ้นมานั้นสามารถสรุปเป็นคุณสมบัติการทำงานของแท่นเลื่อนได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลคุณสมบัติของแท่นเลื่อน X-Y

ความละเอียดในการเลื่อน	0.2 ไมครอน
ความแม่นยำในการเลื่อน	1 ไมครอน
ความเร็วในการหมุน	50 มม./วินาที
ระยะทางในการเลื่อนสูงสุด	แกน X=20 มม. แกน Y=20 มม.
รองรับน้ำหนักได้สูงสุด	10 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดสอบระบบการมองเห็นภาพ

### 4.2.1 ระบบการมองเห็นภาพ

จากระบบการมองเห็นภาพที่ได้สร้างขึ้น โดยใช้กล้องกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล กำลังขยาย 50-500 เท่า ได้ทำการทดลอง เป็นสองส่วนคือ ระบบการมองเห็น โดยปรับระยะภาพ และการใส่ฟิลเตอร์กรองแสง

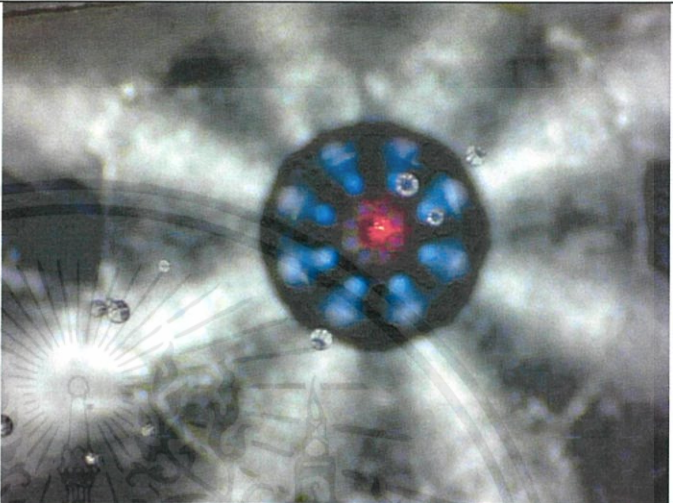

#### 4.2.1.1 ระบบการมองเห็น

จากการทดลองหาค่ากำลังขยายและระยะการโฟกัสภาพของกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลมีผลเป็นไปดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงภาพของเม็ดบีดขนาด 8 ไมโครเมตร ตามกำลังขยายที่แตกต่างกัน

กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	ภาพเม็ดบีดขนาด 8 ไมโครเมตร
50	43.41	
250	19.24	

ตารางที่ 4.6 แสดงภาพของเม็ดบีคขนาด 100 ไมโครเมตร ตามกำลังขยายที่แตกต่างกัน


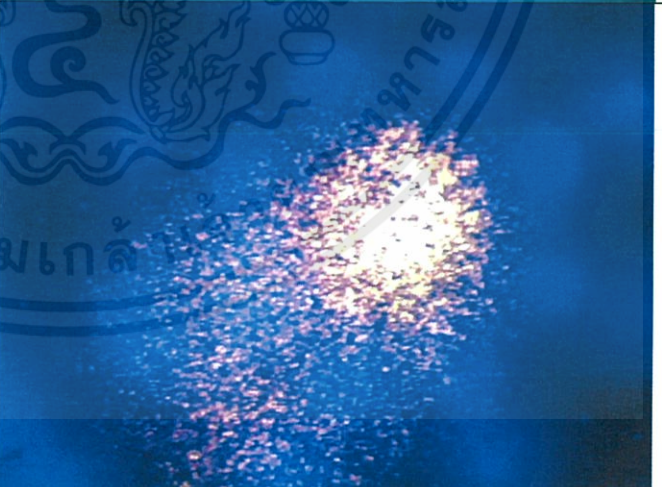
กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	ภาพเม็ดบีคขนาด 100 ไมโครเมตร
50	36.22	
250	15.11	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.2 การปรับระยะโฟกัสของภาพเมื่อใส่ฟิลเตอร์กรองแสงเลเซอร์



เนื่องจากการทดลองนี้ได้ใช้ฟิลเตอร์ที่ทำจากแผ่นอะคริลิกใสสีน้ำเงินซึ่งจะสะท้อนแสงเลเซอร์และจะผ่านไปได้น้อยโดยได้ทำการซ้อนแผ่นอะคริลิกเป็นจำนวนสองชั้นจึงทำให้ความเข้มของแสงเลเซอร์เข้าสู่กล้องน้อยลง แต่ก็ทำให้ระยะการโฟกัสของภาพนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยได้ผลเป็นดังตารางที่ 4.7 – 4.10

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 1 ชั้น

กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	เมื่อบีบขนาด 8 ไมโครเมตร
50	46.05	
250	22.60	

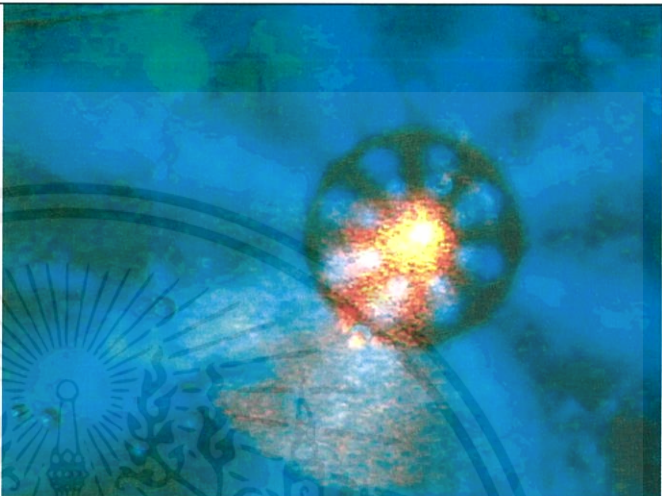

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 2 ชั้น

กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	เมื่อบีบขนาด 8 ไมโครเมตร
50	48.35	
250	23.45	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 1 ชั้น

กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	เมื่อบีบขนาด 100 ไมโครเมตร
50	42.55	
250	18.89	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการใส่แผ่นฟิลเตอร์กรองแสง 2 ชั้น

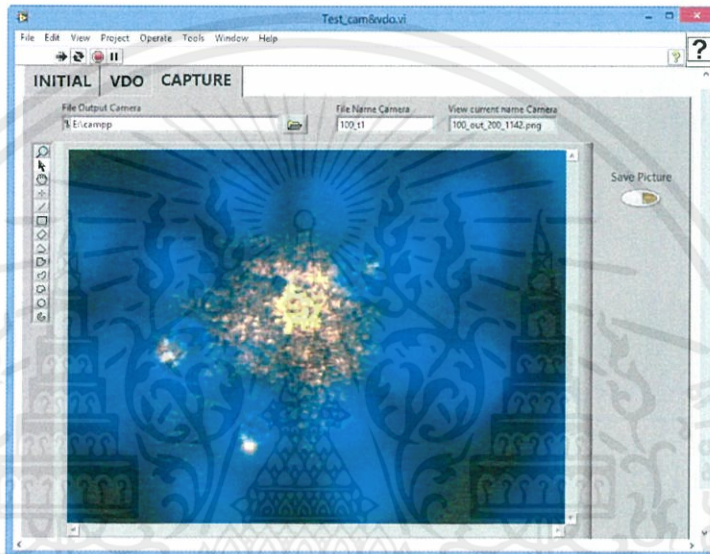
กำลังขยาย (เท่า)	ระยะโฟกัสภาพ (มม.)	เมื่อบีบขนาด 100 ไมครอน
50	44.26	
250	20.69	

ซึ่งจากตารางที่ 4.8 จะพบว่า เมื่อทำการใส่ฟิลเตอร์กรองแสงเข้าไปแล้วนั้นจะไม่เห็นสารตัวอย่างเมื่อบีบขนาด 8 ไมโครเมตรเลย เนื่องจากมีขนาดเล็กมาก

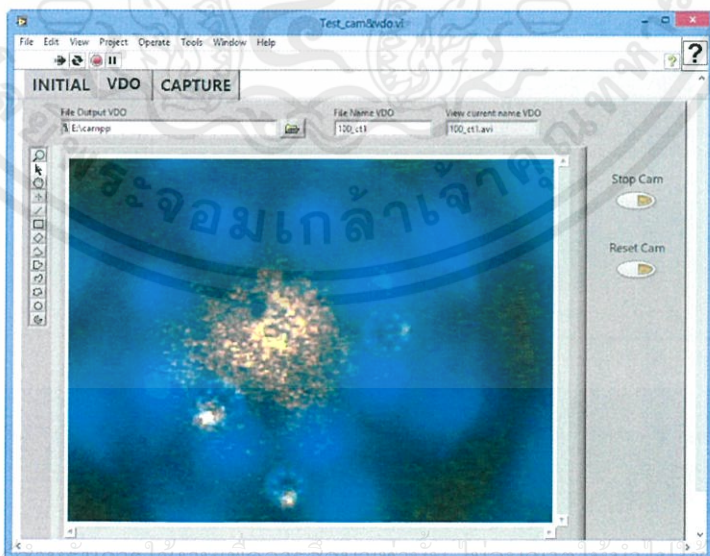
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการใช้งานโปรแกรมเชื่อมต่อควบคุมการมองเห็นและเก็บภาพ

โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อการมองเห็นภาพนั้นจะเก็บข้อมูลเป็นภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวซึ่งการใช้วิธีการใช้งานได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อการออกแบบและสร้างระบบการมองเห็น แล้ว ซึ่งภาพเคลื่อนไหวที่ทำการอัดนั้นมึขนาดใหญ่มากจำเป็นต้องจัดสรรแหล่งเก็บข้อมูลที่มีขนาดที่เหมาะสม และทำการแปลงไฟล์ภาพเคลื่อนไหวที่บันทึกไว้นั้นให้มีขนาดที่เล็กลง



รูปที่ 4.1 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการมองเห็นภาพและบันทึกภาพในโหมดภาพนิ่ง



รูปที่ 4.2 การใช้งานโปรแกรมควบคุมการมองเห็นภาพและบันทึกภาพในโหมดภาพเคลื่อนไหว

### 4.3 ผลการทดสอบการจัดวางอุปกรณ์ทัศนศาสตร์

#### 4.3.1 การจัดวางระบบทัศนศาสตร์ทั้งหมด

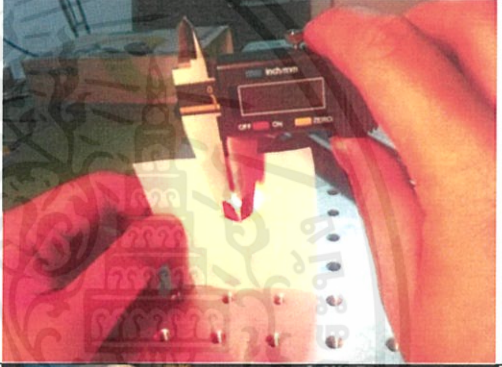
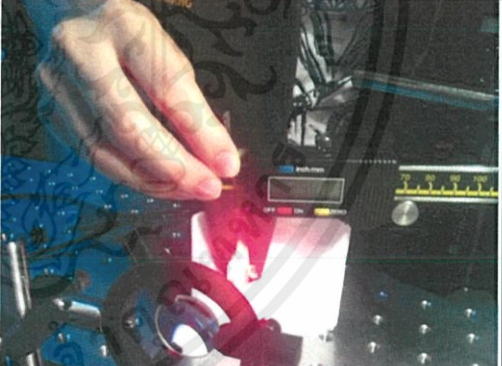


รูปที่ 4.3 แสดงการจัดระบบทัศนศาสตร์ของระบบทั้งหมด

### 4.3.2 ผลการเพิ่มส่วนการขยายลำแสง

จากเดิมที่ลำแสงเลเซอร์ออกมาจากแหล่งกำเนิดนั้นมีขนาดเล็กดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการผ่านระบบการขยายลำแสงโดยใช้เลนส์นูนแบบ Plano-Convex lens ทำการวัดขนาดของลำแสงเลเซอร์ก่อนเข้าและออกจากเลนส์

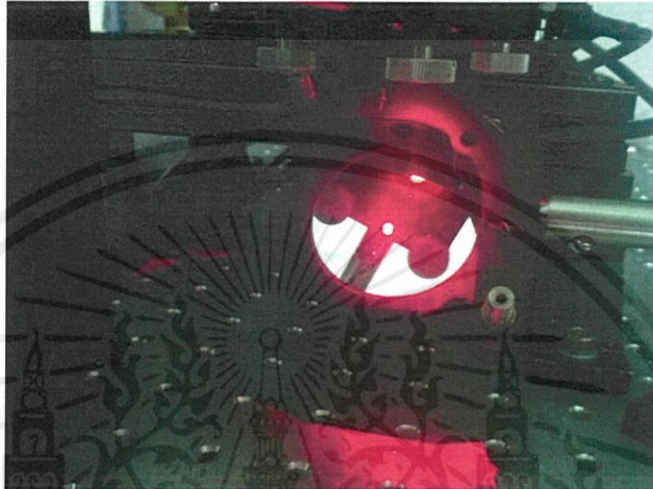
ตารางที่ 4.11 แสดงการวัดขนาดลำแสงเลเซอร์

ตำแหน่งการวัดขนาดลำแสงเลเซอร์	ขนาดของลำแสงเลเซอร์	รูปภาพขนาดของลำแสงเลเซอร์
ก่อนเข้าระบบขยายลำแสง	1.80	
ออกจากระบบขยายลำแสง	5.40	

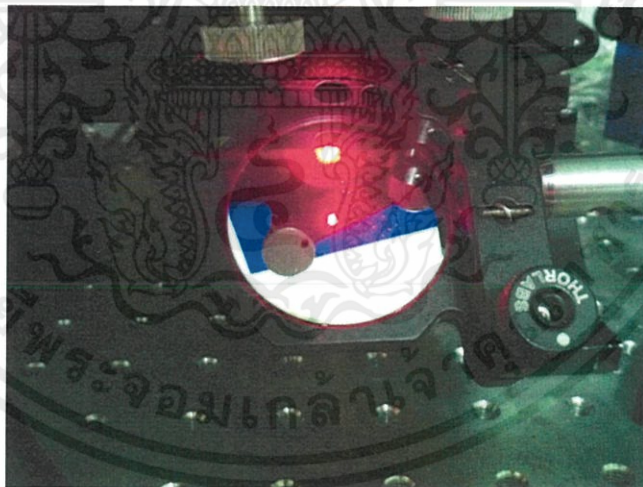
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การจัดวางลำแสงเข้าสู่เลนส์ใกล้วัตถุ 100x และการปรับจุกโฟกัสที่แผ่นสไลด์

ทำการปรับ liner slide X-Y-Z เพื่อหาตำแหน่งที่ลำแสงเลเซอร์จะเข้าตรงกลางพอดีกับขอบเลนส์ใกล้วัตถุ 100x ทางด้านล่าง ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ลำแสงเลเซอร์ยังไม่เข้าตรงกลางของเลนส์ใกล้วัตถุ 100xพอดี



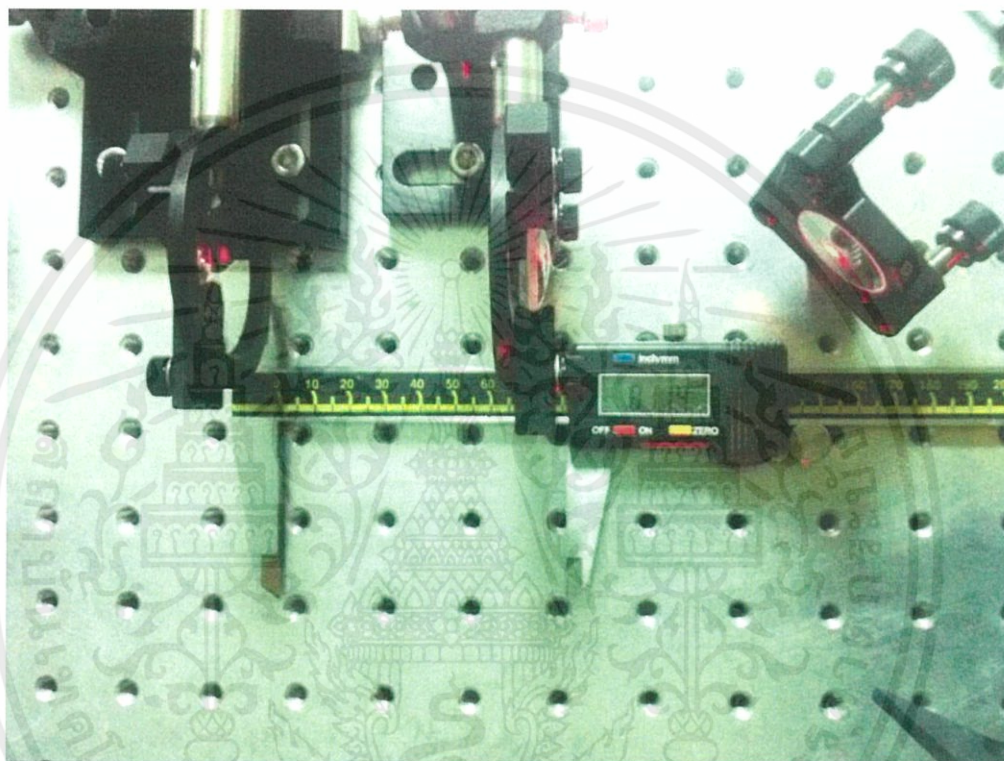
รูปที่ 4.5 ลำแสงเลเซอร์ยังเข้าตรงกลางของเลนส์ใกล้วัตถุ 100xพอดี

แต่เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณระยะการวางเลนส์ 1 และเลนส์ 2 ที่ได้จากการคำนวณเป็นระยะ 8 ซม. เมื่อทำการวางระบบจะทดลองปรับตำแหน่งระยะการวาง ที่ทำให้ขนาดของลำแสงขยายเพิ่มขึ้น และขนาดของลำแสงที่ได้รับการขยายแล้วเท่ากันทั้งระบบจริง เป็นไปดังตารางที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่อื่นที่นอกเหนือจากนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงระยะห่างเลนส์ที่ใช้ขยายลำแสงเลเซอร์

ระยะห่างของเลนส์ (ซม.)	ขนาดของลำแสงเลเซอร์จุดที่ 1	ขนาดของลำแสงเลเซอร์จุดที่ 2
8.114	5.41	5.40



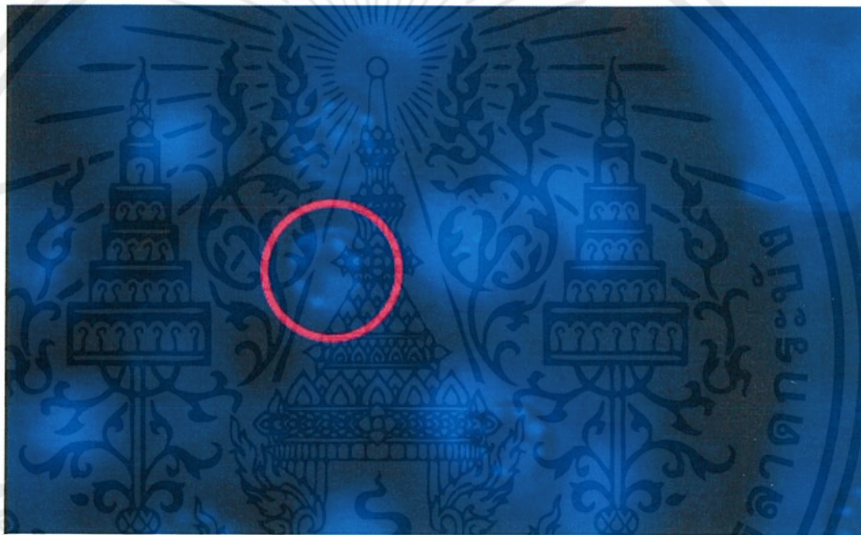
รูปที่ 4.6 ระยะที่ลำแสงโฟกัสพอดีที่การ์ดสไลด์เมื่อดูจากกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 ผลการทดสอบการจับอนุภาค และการเก็บบันทึกผล

### 4.4.1 สถานะที่ยังไม่สามารถจับอนุภาคได้

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการใส่สารตัวอย่าง(เม็ดบีด)เข้าไปแล้ว เม็ดบีดที่ใส่เข้าไปนั้นมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำสังเกตได้จากการผสมเม็ดบีดกับสารละลายจะพบว่าเม็ดบีดลอยตัวอยู่ด้านบน ซึ่งการทดลองจริงๆแล้วเม็ดบีดจะต้องอยู่ในรูปของสารแขวนลอยทำให้เม็ดบีดลอยติดอยู่ที่คาร์ดสไลด์ดังรูป 4.7 (a) และเมื่อส่องแสงเลเซอร์เข้าไปจะพบว่า เม็ดบีดนั้นอยู่กับที่ที่ไม่เคลื่อนย้าย ดังรูป 4.7 (b) ก็แสดงว่ายังไม่สามารถที่จะทำการจับเม็ดบีดได้ ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากเลเซอร์ไม่มีแรงกระตุ้นที่จะเอาชนะแรงกระเจิงของเม็ดบีดที่ติดกับสไลด์ได้



(a)



(b)

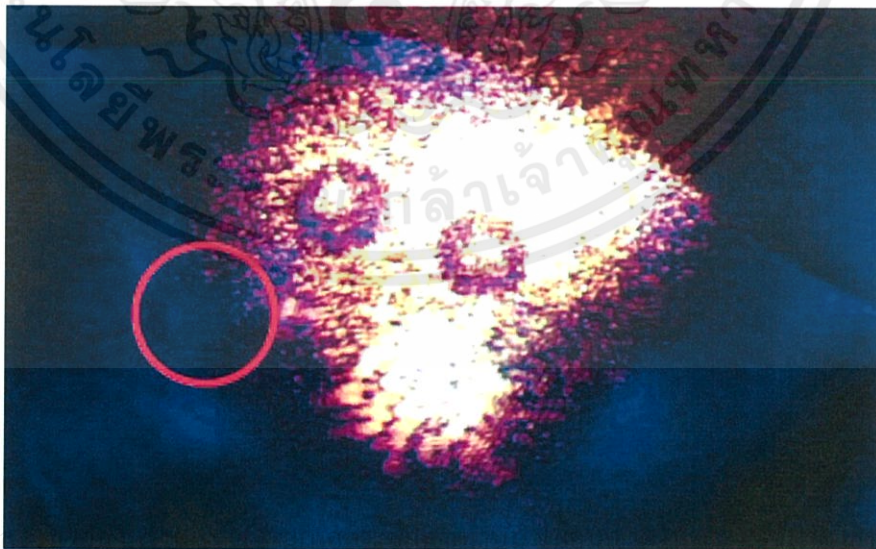
รูปที่ 4.7 (a) แสดงภาพเม็ดบีดที่ติดบนสไลด์ และ (b) แสงเลเซอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับเม็ดบีด

#### 4.4.2 สถานะที่เริ่มจับอนุภาคได้

จากการทดลองพบว่าจะมีเม็ดบีดที่มีหลายขนาดโดยจากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเม็ดบีดที่ใหญ่ก็จะติดอยู่ที่แผ่นสไลด์แต่สังเกตได้ว่าจะมีเม็ดบีดที่เล็กกว่าลอยอยู่ในระหว่างการ์ด สไลด์ทั้งสองแผ่นที่ประกบติดกัน แล้วเมื่อทำการเปิดแสงเลเซอร์ก็จะเห็นได้ว่าจะมีเม็ดบีดลอยเข้ามาใกล้กับแสงเลเซอร์เห็นได้ดังกรอบวงกลมที่อยู่ในรูปที่ 4.8 จากนั้นเม็ดบีดก็จะเข้ามาติดกับตรงกลางลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มมากที่สุดดังกรอบวงกลมที่อยู่ในรูป และเมื่อปิดแสงเลเซอร์ก็จะเห็นตำแหน่งของเม็ดบีดที่ตั้งเข้ามาเนื่องจากลำแสงเลเซอร์ ดังรูปที่ 4.8



(a)

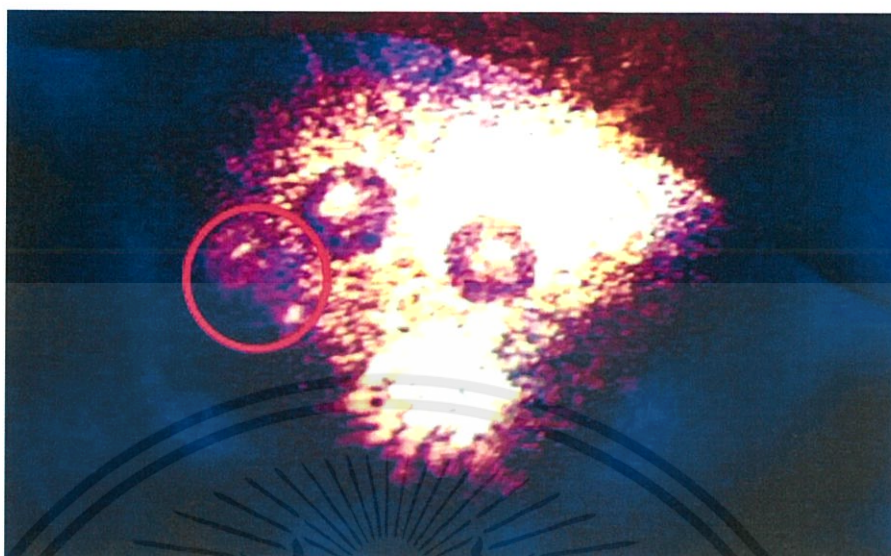


(b)

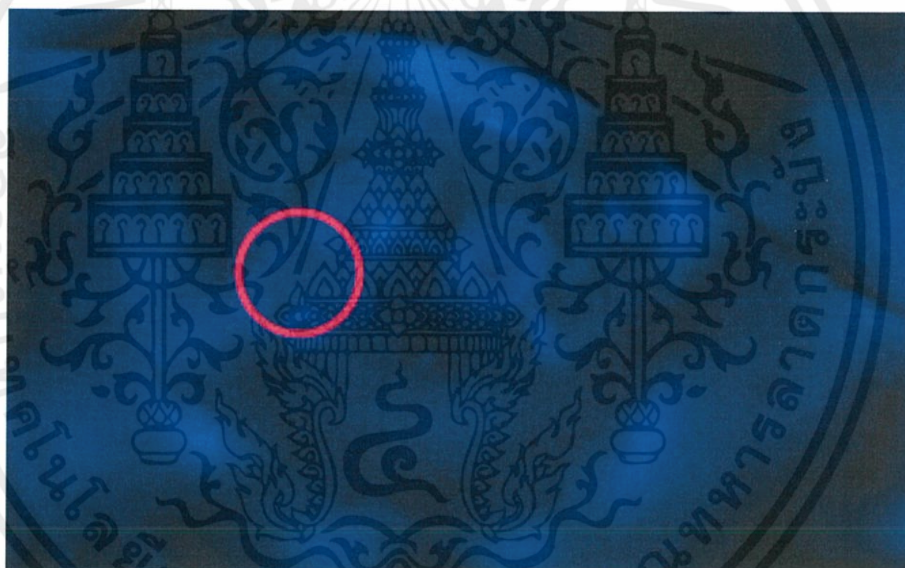
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่

นี้ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)



(d)

รูปที่ 4.8 แสดงเม็ดบีดเริ่มทำปฏิกิริยากับแสงเลเซอร์ (a) เม็ดบีดตัวใหญ่สองตัวอยู่กับที่ (b) เมื่อเปิดแสงมีเม็ดบีดไหลเข้ามาใกล้ลำแสง (c) เม็ดบีดไหลมารวมตัวกัน และ (d) ปิดแสงและสังเกต เม็ดบีดเปลี่ยนตำแหน่งจากการดักจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการดำเนินงานวิจัยโครงการพิเศษที่ได้ทำการสร้างฐานเลื่อน X-Y ที่ใช้ในระบบจับเชิงแสง โดยได้ทำการพัฒนาสร้างวงจรควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์แบบ 5 เฟส ซึ่งได้ทำการพัฒนาเงื่อนไขการขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์เป็นแบบเต็มขั้นกระตุ้นสองขดลวด โดยทำงานร่วมกับวงจรชุดควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แล้วนำไปติดตั้งบนฐานเลื่อน X-Y โดยใช้กล่องควบคุมการเลื่อน Joybox ก็จะกลายเป็นฐานเลื่อน X-Y ใช้งานตัวอย่างมีความละเอียดสูงสุดที่ทำได้ในการเลื่อน 0.2 ไมครอน ระยะการเลื่อนสูงสุด 2 ซม. ซึ่งมีระบบจำกัดระยะการเลื่อนสูงสุดโดยใช้ลิมิตสวิตช์ ถ้าหากฐานเลื่อน X-Y เลื่อนไปสู่ระยะการเลื่อนแล้วจะมีการแสดงไฟสถานะที่ตำแหน่งที่ชนกับลิมิตสวิตช์แล้วเลื่อนกลับมาในตำแหน่งสุดท้ายก่อนการชนลิมิตสวิตช์ ก็ถือได้ว่าเป็นฐานเลื่อน X-Y ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์แทนเลื่อน X-Y ที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีขายกันในท้องตลาด

ในส่วนของระบบการถ่ายภาพเก็บบันทึกภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว ซึ่งนำข้อมูลภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัลไมโครสโคป มาเก็บบันทึกภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวผ่าน GUI ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น มีความสามารถในการปรับแทนเลื่อน X-Y ให้เคลื่อนที่ไปได้อย่างอิสระ และในส่วนของระบบการกรองแสงได้นำแผ่นฟิลเตอร์ที่ได้สร้างขึ้นมาใช้ในการกรองและตัดแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูง ทำให้เซนเซอร์รับภาพของกล้องดิจิทัลไมโครสโคปไม่เกิดความเสียหาย โดยยังคงมองเห็นเมื่อดูดที่นำมาศึกษาอยู่

ในส่วนของระบบทัศนศาสตร์ เลนส์ใกล้วัตถุ 100x ที่ใช้ในการรวมแสงเลเซอร์ให้เกิดการโฟกัสที่แผ่นสไลด์ ผลปรากฏว่าขนาดของจุดโฟกัสมีขนาดที่ใหญ่มากกว่าอนุภาคตัวอย่างที่นำมาทดลองทำให้ไม่สามารถแยกแยะระหว่างอนุภาคตัวอย่างกับแสงเลเซอร์ได้อย่างชัดเจน แต่จากการทดลองระบบของเราถือว่าระบบมีประสิทธิภาพในการดักจับ จะเห็นได้จากเมื่อดูดขนาดเล็กมีการวิ่งเข้าหาแสงเลเซอร์ ซึ่งตรงกับทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าเลเซอร์มีกำลังมากพอที่จะจับอนุภาคแต่เลเซอร์ควรมีขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอมตร

โดยเมื่อนำแทนเลื่อน X-Y ที่สร้างขึ้นพร้อมชุดควบคุม มาติดตั้งกับระบบคีมจับเชิงแสงและระบบการมองเห็นแล้วบันทึกภาพนั้น ก็จะกลายเป็นระบบคีมจับเชิงแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่มีสามารถใช้งานฐานเลื่อนวางตัวอย่างอนุภาคที่นำมาศึกษา ดักจับอนุภาค เป็นการเสริมสร้างให้ระบบคีมจับเชิงแสงมีประสิทธิภาพและสะดวกต่อการใช้งาน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ฐานวางตัวอย่างที่ควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติที่นำไปติดตั้งในระบบคีมจับเชิงแสง นั้นยังคงต้องอาศัยการควบคุมจากคณโศกในการปรับให้ฐานวางตัวอย่างที่จะศึกษานั้นเลื่อนไปซึ่ง อาจจะมีการพัฒนาให้กลายเป็นการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยเมื่อทำการโฟกัสภาพได้นั้นจะใช้การสแกนเพื่อตรวจสอบและแยกแยะตัวอย่างที่ศึกษาออกจากพื้นหลัง จะทราบว่าเป็นขนาดของภาพที่แสดงผลอยู่นั้นมีจำนวนตัวอย่างอยู่เท่าใด และสามารถทราบถึงตำแหน่งของอนุภาคตัวอย่างแต่ละตัวได้ จากกระบวนการอิมเมจโพรเซสซิ่ง (Image processing) ที่นำมาใช้ในการประมวลผลภาพ จากนั้นจะสามารถนำข้อมูลนี้มาใช้ในการเลื่อนฐานวางตัวอย่างให้อนุภาคตัวอย่างขยับเข้าใกล้กับลำแสงเลเซอร์ที่อยู่ตรงกลางของภาพ ก็จะทำการดักจับอนุภาคตัวอย่างได้เองแบบอัตโนมัติ ดังนั้นเป็นการพัฒนาให้กลายเป็นระบบคีมจับเชิงแสงที่ควบคุมการเลื่อนของฐานวางตัวอย่างแบบอัตโนมัติ ให้สามารถนำไปพัฒนาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปใช้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางชีววิทยา-ฟิสิกส์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

นาย ปลื้มใจ อินช่วย, นาย สิริชัย มินสายีนุด และ นางสาว อูสา อภิญญาบุรุษย์, ระบบวัดเส้นตักย์  
ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง:  
กรุงเทพมหานคร, 2547

Orientalmotor. **Basics of Motion Control 2-phase and. 5-phase Stepper Motor** . 2012

[cited 2012 Oct 26]. Available from: <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/2phase-v-5phase.html>

Orientalmotor. **Basics of Step Motors** . 2012

[cited 2012 Dec 14]. Available from: <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/step-motor-basics.html>

Orientalmotor. **The 5-phase New Pentagon Driver Chip Set**. 2012

[cited 2012 Dec 14]. Available from:

[http://www.orientalmotor.com/technology/articles/pdfs/BuildingA5PhaseDriver\\_wDriverOptions.pdf](http://www.orientalmotor.com/technology/articles/pdfs/BuildingA5PhaseDriver_wDriverOptions.pdf)

Keir C. Neuman and Steven M. Block. 2004 Optical trapping. **Rev. Sci. Instrum.**, 75(9):2787-2809

Block S. M. 1992. "Making light work with optical tweezers." **Nature** 360(6403):493-5.

Svoboda K., Block S. M. 1994. "Biological applications of optical forces." **Annu Rev Biophys Biomol Struct** 23:247-85.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Simmons R. M., Finer J. T., Chu S., Spudich J. A. 1996. "Quantitative measurements of force and displacement using an optical trap." **Biophys J** 70(4):1813-22.

Peters I. M., de Groot B. G., Schins J. M., Figdor C. G., Greve J. 1998. "Three dimensional single-particle tracking with nanometer resolution." **Review of Scientific Instruments** 69(7):2762-6.

Smith S. P., Bhalotra S. R., Brody A. L., Brown B. L., Boyda E. K., Prentiss M. 1998. "Inexpensive optical tweezers for undergraduate laboratories." **Am. J. Phys.** 67(1):26-35.

Ashkin, A. 2000. "History of Optical Trapping and Manipulation of Small-Neutral Particle, Atoms, and Molecules." **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics** 6(6):841-856.

Ishii Y., Ishijima A., Yanagida T. 2001. "Single molecule nanomanipulation of biomolecules." **Trends Biotechnol** 19(6):211-6.

Kuo S. C. 2001. "Using optics to measure biological forces and mechanics." **Traffic** 2(11):757-63.

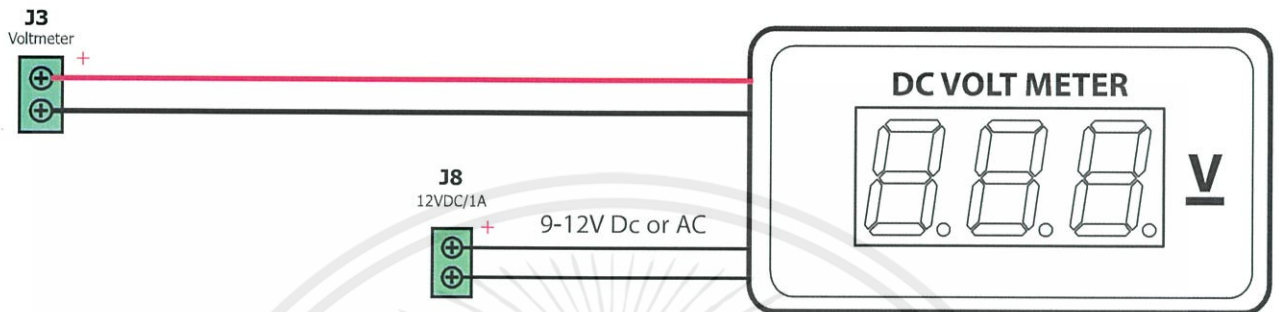
Lang M. J., Asbury C. L., Shaevitz J. W., Block S. M. 2002. "An automated two-dimensional optical force clamp for single molecule studies." **Biophys J** 83(1):491-501.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

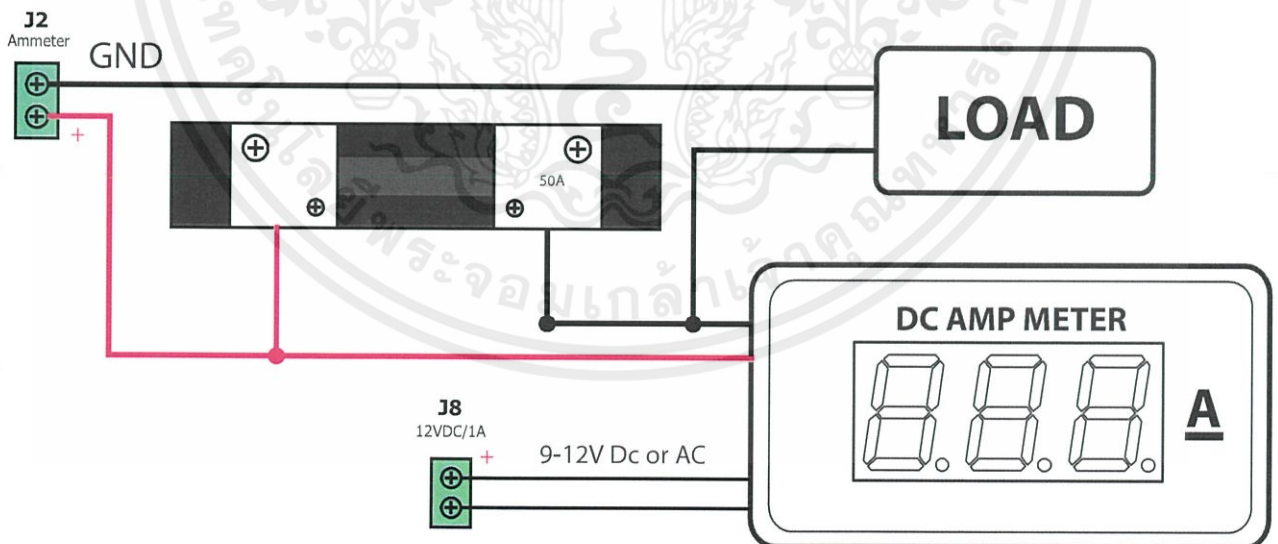


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Measurement voltage



# Measurement ampere



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

1: /*
2: * Project Name : The X-Y stage controlled for optical tweezers system
3: * Copyright : Navaporn Laowattantham, Niparat Cheamanunkul
4: * Description : This is control Driver X-Y axis used stepping motor 5 phase
5: for VEXTA only. The position limit by Limit switch. The Joeybox controlled
6: move stage in micron and display warning state. Using Serialport to interface
7: GUI(LabVIEW)to control and view digital microscope.
8: * Connection : Joybox connect Vcc=1,Vx=2(A1),Vy=3(A0),Sw_Green=4,Sw_Red=5
9:                 LED_LEFT=6(RB0),LED_Right=7(RB1),LED_Up=8(RB2),LED_Down=9(RB4)
10:                Driver X-axis connect PORTD0-4 and Driver Y-axis connect PORTC0-4
11: */
12:
13: //config LED Status
14: sbit LED_L at PORTB.B0;
15: sbit LED_R at PORTB.B1;
16: sbit LED_U at PORTB.B2;
17: sbit LED_D at PORTB.B3;
18: //config Limit switch connect
19: sbit Limit_X_L at PORTB.B7; //Active low
20: sbit Limit_X_R at PORTB.B5; //Active low
21: sbit Limit_Y_U at PORTB.B6; //Active low
22: sbit Limit_Y_D at PORTB.B4; //Active low
23: //config Switch Push_BB
24: sbit SW_Green at PORTA.B2;
25: sbit SW_Red at PORTA.B4;
26:
27: // Set intital register
28: char uart_rd,bufferX[20],bufferY[20];
29: unsigned int ReadX=0,ReadY=0;
30: unsigned int i,j,k,l,m;
31: unsigned int x1,y1,x2,y2;
32: unsigned int rs1,rs2;
33: unsigned int cnt1,cnt2,cnt3,cnt4;
34: unsigned int check1,check2,check3,check4;
35: unsigned char STM_CW[] = {0x03,0x06,0x0C,0x18,0x11}; //Active low
36: unsigned char STM_CCW[] = {0x11,0x18,0x0C,0x06,0x03};
37: unsigned char STM1_CW[] = {0x1C,0x19,0x13,0x07,0x0E}; //Active high
38: unsigned char STM1_CCW[] = {0x0E,0x07,0x13,0x19,0x1C};
39:
40: void Initmain(){
41:     UART1_Init(9600); // Initialize UART module at 9600 bps
42:     Delay_ms(100); // Wait for UART module to stabilize
43:     TRISA = 0x03;
44:     ADCON1 = 0b11000100; //Analog pin config AN0,AN1
45:     PORTB = 0x00;
46:     TRISB = 0xF0;
47:     TRISC = 0x80; //Config port C and serial port
48:     TRISD = 0x00;
49:     UART1_Write_Text("The X-Y stage controlled for optical tweezers system\n");
50: }
51:
52: //Clear and newline data
53: void newline(){
54:     UART1_Write(0x13);
55:     UART1_Write(0x10);
56: }
57:
58: //Delay time

```

```

59: void Debounce() {
60:     Delay_ms(260);
61: }
62:
63: // Send to Power circuit and Drive stepping motor
64: void Motor_X1() {
65:     for(x1=0;x1<5;x1++) {
66:         PORTD=STM_CW[x1]; Delay_ms(10);}
67: }
68: void Motor_Y1() {
69:     for(y1=0;y1<5;y1++) {
70:         PORTD=STM_CCW[y1]; Delay_ms(10);}
71: }
72: void Motor_X2() {
73:     for(x2=0;x2<5;x2++) {
74:         PORTC=STM_CW[x2]; Delay_ms(10);}
75: }
76: void Motor_Y2() {
77:     for(y2=0;y2<5;y2++) {
78:         PORTC=STM_CCW[y2]; Delay_ms(10);}
79: }
80:
81: // Use interface LabVIEW.
82: void labview() {
83:     if (UART1_Data_Ready()) { // If data is received,
84:         uart_rd = UART1_Read(); // read the received data,
85:         switch(uart_rd) {
86:             case('A'): Motor_X1();UART1_Write_Text("MX1 CW"); break;
87:             case('B'): Motor_Y1();UART1_Write_Text("MY1 CCW"); break;
88:             case('C'): Motor_X2();UART1_Write_Text("MX2 CW"); break;
89:             case('D'): Motor_Y2();UART1_Write_Text("MY2 CCW"); break; //
90:         }
91:     }
92: }
93:
94: //Test joysitck to control Stepping motor rotate.
95: void Runstep() {
96:     ReadX = ADC_Read(1); //x
97:     ReadY = ADC_Read(0); //y
98:     if(ReadX<400) { //left
99:         for(i=0;i<5;i++) {
100:             PORTD=STM_CW[i]; Delay_ms(10);}
101:     }
102:     if(ReadX>600) { //right
103:         for(j=0;j<5;j++) {
104:             PORTD=STM_CCW[j]; Delay_ms(10);}
105:     }
106:     if(ReadY<400) { //up
107:         for(k=0;k<5;k++) {
108:             PORTC=STM_CW[k]; Delay_ms(10);}
109:     }
110:     if(ReadY>600) { //down
111:         for(l=0;l<5;l++) {
112:             PORTC=STM_CCW[l]; Delay_ms(10);}
113:     }
114: }
115:
116: // To cheak limit switch ,after limit switch detect display LED and inverse sfte
ping motor rotation.

```

```

117: void limit_Switch_check(){
118:     if(Limit_X_L==0){
119:         LED_L=~LED_L;Delay_ms(500);
120:         UART1_Write_Text("E");
121:         for(cnt1=0;cnt1<150;cnt1++){
122:             for(check1=0;check1<5;check1++){
123:                 PORTD=STM1_CCW[check1]; Delay_ms(10);}
124:             }
125:         }
126:     if(Limit_X_R==0){
127:         LED_R=~LED_R;Delay_ms(500);
128:         UART1_Write_Text("F");
129:         for(cnt2=0;cnt2<150;cnt2++){
130:             for(check2=0;check2<5;check2++){
131:                 PORTD=STM1_CW[check2]; Delay_ms(10);}
132:             }
133:         }
134:     if(Limit_Y_U==0){
135:         LED_U=~LED_U;Delay_ms(500);
136:         UART1_Write_Text("G");
137:         for(cnt3=0;cnt3<150;cnt3++){
138:             for(check3=0;check3<5;check3++){
139:                 PORTC=STM1_CW[check3]; Delay_ms(10);}
140:             }
141:         }
142:     if(Limit_Y_D==0){
143:         LED_D=~LED_D;Delay_ms(500);
144:         UART1_Write_Text("H");
145:         for(cnt4=0;cnt4<10;cnt4++){
146:             for(check4=0;check4<5;check4++){
147:                 PORTC=STM1_CCW[check4]; Delay_ms(10);}
148:             }
149:         }
150: }
151:
152: // Real control all system.
153: void Runstep_SW(){
154:     PORTB=0x00;
155:     ReadX = ADC_Read(1); //x
156:     ReadY = ADC_Read(0); //y
157:     if((ReadX<400)&&(Limit_X_L==1)){ //left
158:         for(i=0;i<5;i++){
159:             PORTD=STM1_CW[i]; Delay_ms(10);}
160:         }
161:     if((ReadX>600)&&(Limit_X_R==1)){ //right
162:         for(j=0;j<5;j++){
163:             PORTD=STM1_CCW[j]; Delay_ms(10);}
164:         }
165:     if((ReadY<400)&&(Limit_Y_U==1)){ //up
166:         for(k=0;k<5;k++){
167:             PORTC=STM1_CW[k]; Delay_ms(10);}
168:         }
169:     if((ReadY>600)&&(Limit_Y_D==1)){ //down
170:         for(l=0;l<5;l++){
171:             PORTC=STM1_CCW[l]; Delay_ms(10);}
172:         }
173:     limit_Switch_check();
174: }

```

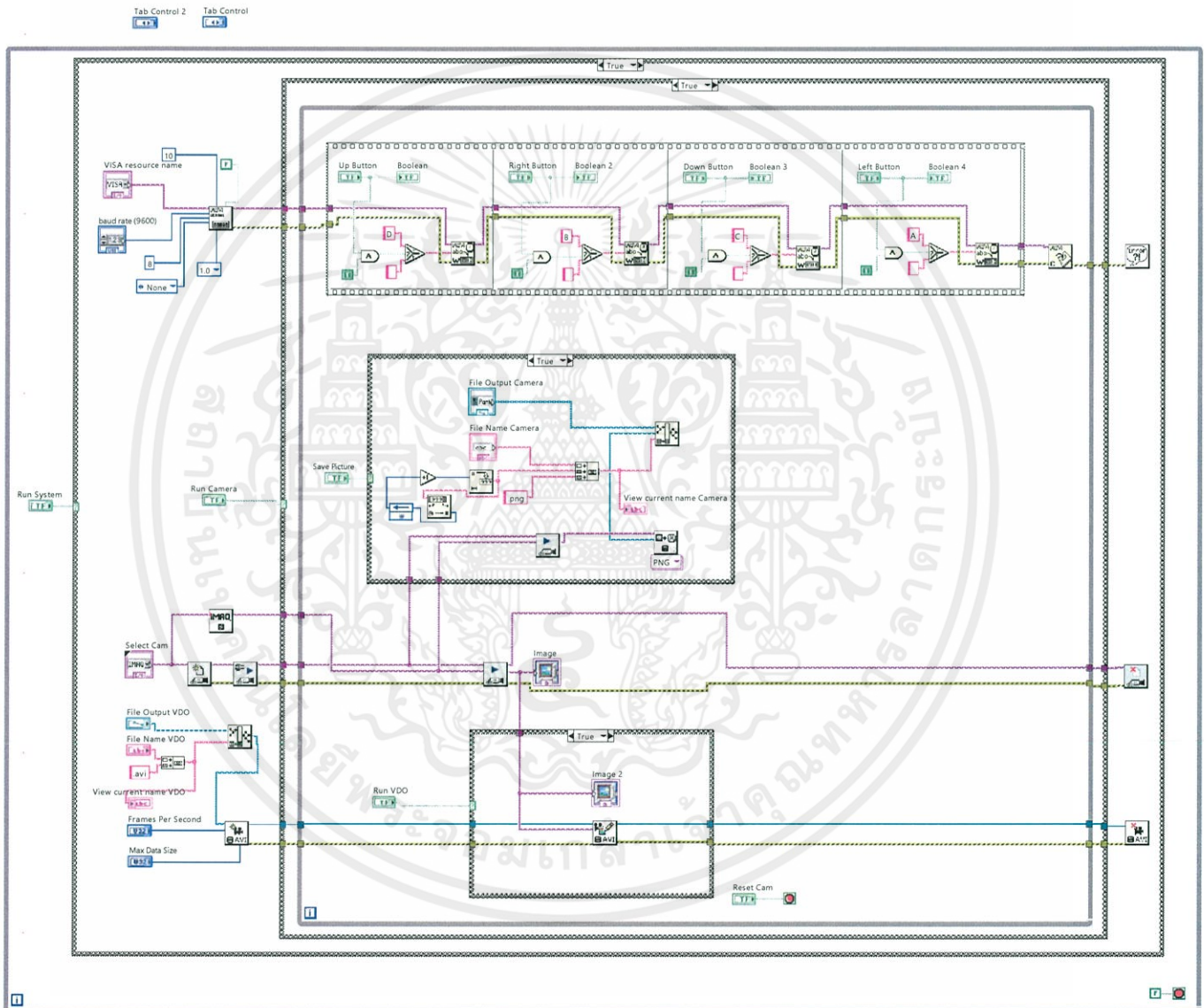
```
175:
176: //Run to caribation with absolute Encoder omron
177: void Test_encoder_CW() {
178:     for(m=0;m<250;m++) {
179:         for(i=0;i<5;i++) {
180:             PORTD=STM_CW[i]; Delay_ms(10);}
181:         }
182:     Delay_ms(8999);
183: }
184: void Test_encoder_CCW() {
185:     for(k=0;k<250;k++) {
186:         for(l=0;l<5;l++) {
187:             PORTD=STM_CCW[l]; Delay_ms(10);}
188:         }
189:     Delay_ms(8999);
190: }
191: void Run_encoder() {
192:     for(rs1=0;rs1<8;rs1++) {
193:         Test_encoder_CW();
194:     }
195:     Delay_ms(6889);
196:     for(rs2=0;rs2<8;rs2++) {
197:         Test_encoder_CCW();
198:     }
199:     Delay_ms(6889);
200: }
201:
202: //main code
203: void main() {
204:     Initmain();
205:     while(1){
206:         Runstep_SW();
207:         labview();
208:     }
209: }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Block Diagram LabVIEW



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## **Datasheet & Manual**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## High Performance 28-Pin/40-Pin Microcontrollers with CAN

### High Performance RISC CPU:

- C compiler optimized architecture instruction set
- Linear program memory addressing up to 32 Kbytes
- Linear data memory addressing to 4 Kbytes

Device	Program Memory		On-Chip RAM (bytes)	On-Chip EEPROM (bytes)
	On-Chip			
	FLASH (bytes)	# Single Word Instructions		
PIC18F258	32K	16384	1536	256
PIC18F458	32K	16384	1536	256
PIC18F248	16K	8192	768	256
PIC18F448	16K	8192	768	256

- Up to 10 MIPS operation
- DC - 40 MHz clock input
- 4 MHz - 10 MHz osc/clock input with PLL active
- 16-bit wide instructions, 8-bit wide data path
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single Cycle Hardware Multiplier.

### Peripheral Features:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Four external interrupt pins
- Timer0 module: 8-bit/16-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Timer1 module: 16-bit timer/counter
- Timer2 module: 8-bit timer/counter with 8-bit period register (time-base for PWM)
- Timer3 module: 16-bit timer/counter
- Secondary oscillator clock option - Timer1/Timer3
- Capture/Compare/PWM (CCP) modules  
CCP pins can be configured as:
  - Capture input: 16-bit, max resolution 6.25 ns
  - Compare is 16-bit, max resolution 100 ns ( $T_{CY}$ )
  - PWM output: PWM resolution is 1- to 10-bit.  
Max. PWM freq. @: 8-bit resolution = 156 kHz  
10-bit resolution = 39 kHz
- Enhanced CCP module which has all the features of the standard CCP module, but also has the following features for advanced motor control:
  - 1, 2, or 4 PWM outputs
  - Selectable PWM polarity
  - Programmable PWM deadtime
  - Auto shut-down

### Peripheral Features (continued):

- Master Synchronous Serial Port (MSSP) with two modes of operation:
  - 3-wire SPI™ (supports all 4 SPI modes)
  - I<sup>2</sup>C™ Master and Slave mode
- Addressable USART module: supports Interrupt-on-Address bit

### Advanced Analog Features:

- 10-bit Analog-to-Digital Converter module (A/D) with:
  - Fast sampling rate
  - Conversion available during SLEEP
  - DNL =  $\pm 1$  LSb, INL =  $\pm 1$  LSb
  - Up to 8 channels available
- Analog Comparator module:
  - 2 Comparators
  - Programmable input and output multiplexing
- Comparator Voltage Reference module
- Programmable Low Voltage Detection (LVD) module
  - Supports Interrupt-on-Low Voltage Detection
- Programmable Brown-out Reset (BOR)

### Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced FLASH program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical

### CAN bus Module Features:

- Message bit rates up to 1 Mbps
- Conforms to CAN 2.0B ACTIVE Spec with:
  - 29-bit Identifier Fields
  - 8-byte message length
- 3 Transmit Message Buffers with prioritization
- 2 Receive Message Buffers
- 6 full 29-bit Acceptance Filters
- Prioritization of Acceptance Filters
- Multiple Receive Buffers for High Priority Messages to prevent loss due to overflow
- Advanced Error Management Features

# PIC18FXX8

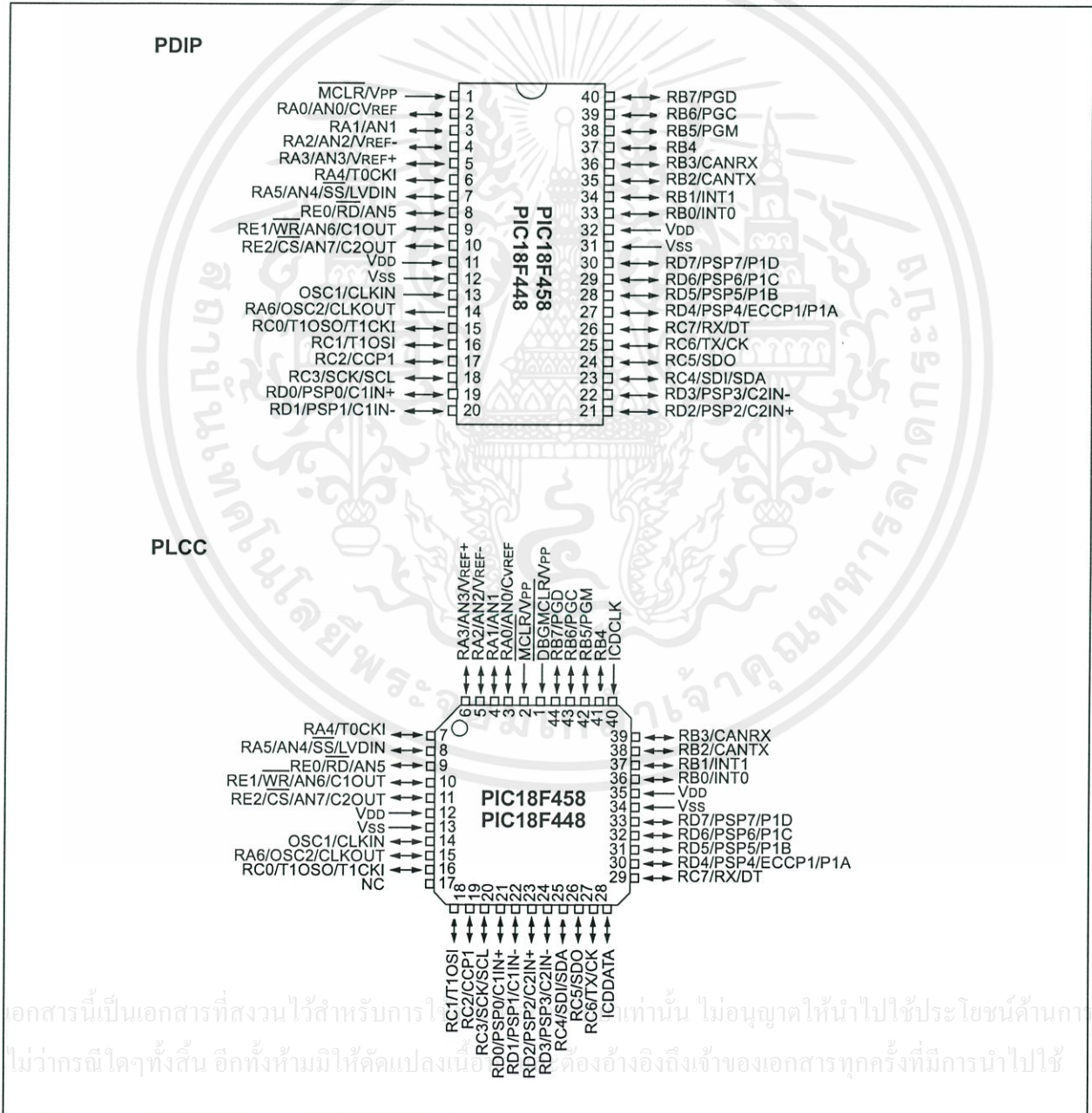
## Special Microcontroller Features:

- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT), and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options, including:
  - 4X Phase Locked Loop (of primary oscillator)
  - Secondary Oscillator (32 kHz) clock input
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins

## FLASH Technology:

- Low power, high speed Enhanced FLASH technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption

## Pin Diagrams



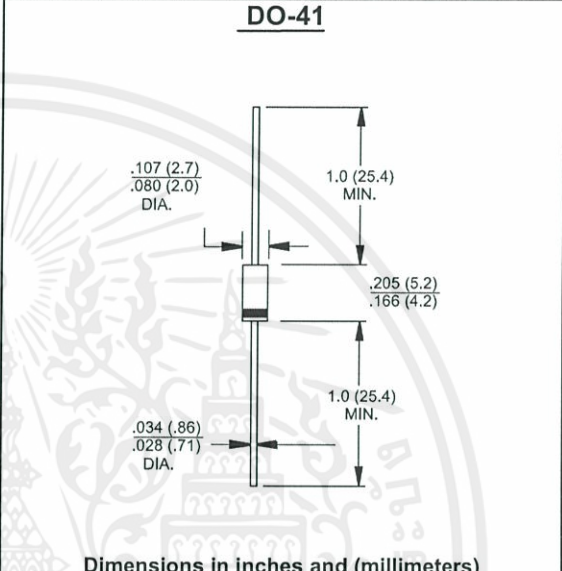


# 1N5817 THRU 1N5819

## 1.0 AMP. Schottky Barrier Rectifiers

	<b>Voltage Range</b> 20 to 40 Volts <b>Current</b> 1.0 Ampere
--	--

- Features**
- ◇ Low forward voltage drop
  - ◇ High current capability
  - ◇ High reliability
  - ◇ High surge current capability
- Mechanical Data**
- ◇ Cases: Molded plastic DO-41
  - ◇ Epoxy: UL 94V-O rate flame retardant
  - ◇ Lead: Axial leads, solderable per MIL-STD-202, Method 208 guaranteed
  - ◇ Polarity: Color band denotes cathode end
  - ◇ High temperature soldering guaranteed: 260°C/10 seconds/.375", (9.5mm) lead lengths at 5 lbs., (2.3kg) tension
  - ◇ Weight: 0.33 gram



### Maximum Ratings and Electrical Characteristics

Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.  
 Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.  
 For capacitive load, derate current by 20%

Type Number	Symbol	1N5817	1N5818	1N5819	Units
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	$V_{RRM}$	20	30	40	V
Maximum RMS Voltage	$V_{RMS}$	14	21	28	V
Maximum DC Blocking Voltage	$V_{DC}$	20	30	40	V
Maximum Average Forward Rectified Current .375 (9.5mm) Lead Length @ $T_L = 90^\circ C$	$I_{(AV)}$	1.0			A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms Single Half Sine-wave Superimposed on Rated Load (JEDEC method)	$I_{FSM}$	25			A
Maximum Instantaneous Forward Voltage @ 1.0A	$V_F$	0.45	0.550	0.600	V
Maximum Instantaneous Forward Voltage @ 3.0A	$V_F$	0.750	0.875	0.900	V
Maximum DC Reverse Current @ $T_A=25^\circ C$ at Rated DC Blocking Voltage @ $T_A=100^\circ C$	$I_R$	1.0 10			mA mA
Typical Thermal Resistance (Note 1)	$R_{\theta JA}$ $R_{\theta JC}$	100 45			$^\circ C/W$
Typical Junction Capacitance (Note 2)	$C_j$	55			pF
Operating Temperature Range	$T_J$	-65 to +125			$^\circ C$
Storage Temperature Range	$T_{STG}$	-65 to +125			$^\circ C$

Notes: 1. Mount on Cu-Pad Size 5mm x 5mm on P.C.B.

2. Measured at 1 MHz and Applied Reverse Voltage of 4.0 V D.C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัท TSC ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## FR301 THRU FR307

### 3.0 AMPS. Fast Recovery Rectifiers

	<b>Voltage Range</b> 50 to 1000 Volts <b>Current</b> 3.0 Amperes
--	---

<p><b>Features</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◇ Low forward voltage drop</li> <li>◇ High current capability</li> <li>◇ High reliability</li> <li>◇ High surge current capability</li> </ul> <p><b>Mechanical Data</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◇ Cases: Molded plastic</li> <li>◇ Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant</li> <li>◇ Lead: Axial leads, solderable per MIL-STD- 202, Method 208 guaranteed</li> <li>◇ Polarity: Color band denotes cathode end</li> <li>◇ High temperature soldering guaranteed: 250°C/10 seconds/.375", (9.5mm) lead lengths at 5 lbs., (2.3kg) tension</li> <li>◇ Weight: 1.2 grams</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>DO-201AD</b></p> <div style="text-align: center;"> </div> <p style="text-align: center;">Dimensions in inches and (millimeters)</p>
---	---

**Maximum Ratings and Electrical Characteristics**  
 Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.  
 Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.  
 For capacitive load, derate current by 20%

Type Number	FR301	FR302	FR303	FR304	FR305	FR306	FR307	Units	
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V	
Maximum RMS Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V	
Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V	
Maximum Average Forward Rectified Current .375"(9.5mm) Lead Length @T <sub>A</sub> = 55°C								3.0	A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms Single Half Sine-wave Superimposed on Rated Load (JEDEC method )								150	A
Maximum Instantaneous Forward Voltage @ 3.0A								1.2	V
Maximum DC Reverse Current @ T <sub>A</sub> =25°C at Rated DC Blocking Voltage @ T <sub>A</sub> =100°C								10 150	uA uA
Maximum Reverse Recovery Time ( Note 1 )	150			250		500		nS	
Typical Junction Capacitance ( Note 2 )								60	pF
Operating Temperature Range T <sub>J</sub>								-65 to +125	°C
Storage Temperature Range T <sub>STG</sub>								-65 to +150	°C

Notes:1. Reverse Recovery Test Conditions: I<sub>F</sub>=0.5A, I<sub>R</sub>=1.0A, I<sub>RR</sub>=0.25A  
 2. Measured at 1 MHz and Applied Reverse Voltage of 4..0 Volts D.C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**DC COMPONENTS CO., LTD.**  
RECTIFIER SPECIALISTS

**KBU10A  
THRU  
KBU10M**

**TECHNICAL SPECIFICATIONS OF SINGLE-PHASE SILICON BRIDGE RECTIFIER**  
VOLTAGE RANGE - 50 to 1000 Volts CURRENT - 10 Amperes

**FEATURES**

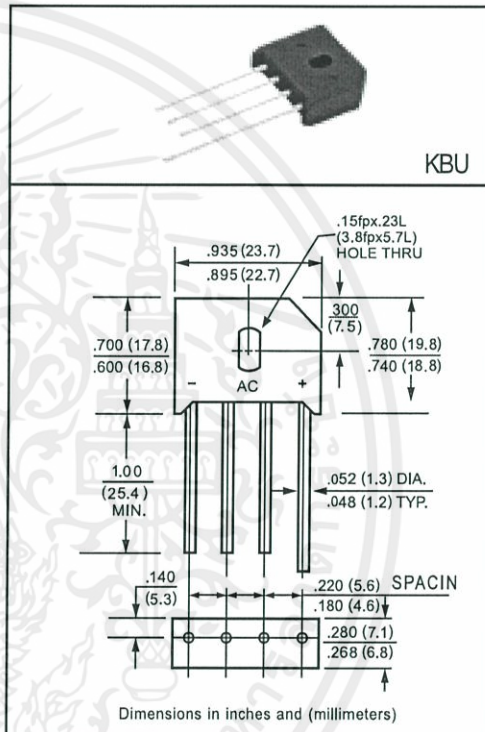
- \* Low leakage
- \* Low forward voltage
- \* Surge overload rating: 250 Amperes peak

**MECHANICAL DATA**

- \* Case: Molded plastic
- \* Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant
- \* Lead: MIL-STD-202E, Method 208 guaranteed
- \* Polarity: Symbols molded or marked on body
- \* Mounting position: Any
- \* Weight: 4.8 grams

**MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Ratings at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified.  
Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.  
For capacitive load, derate current by 20%.



	SYMBOL	KBU10A	KBU10B	KBU10D	KBU10G	KBU10J	KBU10K	KBU10M	UNITS	
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	V <sub>RRM</sub>	50	100	200	400	600	800	1000	Volts	
Maximum RMS Bridge Input Voltage	V <sub>RMS</sub>	35	70	140	280	420	560	700	Volts	
Maximum DC Blocking Voltage	V <sub>DC</sub>	50	100	200	400	600	800	1000	Volts	
Maximum Average Forward Rectified Output Current at T <sub>c</sub> = 75°C	I <sub>o</sub>								10	Amps
Peak Forward Surge Current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	I <sub>FSM</sub>								250	Amps
Maximum Forward Voltage Drop per element at 5.0A DC	V <sub>F</sub>								1.1	Volts
Maximum DC Reverse Current at Rated DC Blocking Voltage per element	@T <sub>A</sub> = 25°C								10	uAmps
	@T <sub>c</sub> = 100°C								500	
I <sup>2</sup> t Rating for Fusing (t<8.3ms)	I <sup>2</sup> t								127	A <sup>2</sup> Sec
Typical Junction Capacitance ( Note1)	C <sub>J</sub>								186	pF
Typical Thermal Resistance ( Note 2)	R <sub>θJA</sub>								10	°C/W
Operating and Storage Temperature Range	T <sub>J</sub> ,T <sub>STG</sub>								-55 to +150	°C

NOTES : 1. Measured at 1 MHz and applied reverse voltage of 4.0 volts

2. Thermal Resistance from Junction to Ambient and from junction to lead mounted on P.C.B. with 0.47 x 0.47" (12x12mm) copper pads.



# RBV2500 - RBV2510

**PRV : 50 - 1000 Volts**

**Io : 25 Amperes**

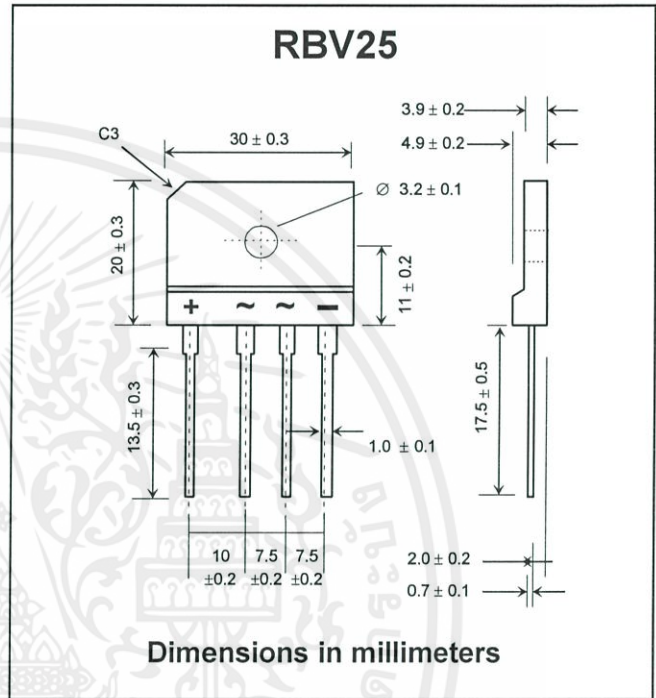
**FEATURES :**

- \* High current capability
- \* High surge current capability
- \* High reliability
- \* Low reverse current
- \* Low forward voltage drop
- \* High case dielectric strength of 2000 Vdc
- \* Ideal for printed circuit board
- \* Very good heat dissipation
- \* Pb / RoHS Free

**MECHANICAL DATA :**

- \* Case : Reliable low cost construction utilizing molded plastic technique
- \* Epoxy : UL94V-O rate flame retardant
- \* Terminals : Plated lead solderable per MIL-STD-202, Method 208 guaranteed
- \* Polarity : Polarity symbols marked on case
- \* Mounting position : Any
- \* Weight : 8.17 grams ( Approximally )

# SILICON BRIDGE RECTIFIERS



**MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Rating at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified.

Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.

For capacitive load, derate current by 20%.

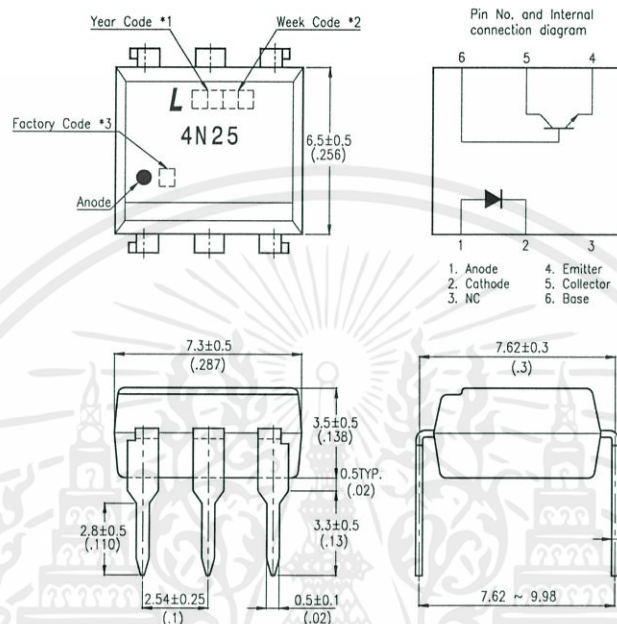
RATING	SYMBOL	RBV 2500	RBV 2501	RBV 2502	RBV 2504	RBV 2506	RBV 2508	RBV 2510	UNIT
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	V <sub>RRM</sub>	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Voltage	V <sub>RMS</sub>	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage	V <sub>DC</sub>	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward Current T <sub>c</sub> = 55°C	I <sub>F(AV)</sub>	25							A
Peak Forward Surge Current Single half sine wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	I <sub>FSM</sub>	300							A
Current Squared Time at t < 8.3 ms.	I <sup>2</sup> t	375							A <sup>2</sup> S
Maximum Forward Voltage per Diode at I <sub>F</sub> = 12.5 A	V <sub>F</sub>	1.1							V
Maximum DC Reverse Current at Rated DC Blocking Voltage	T <sub>a</sub> = 25 °C	10							μA
	T <sub>a</sub> = 100 °C	200							μA
Typical Thermal Resistance (Note 1)	R <sub>θJC</sub>	1.45							°C/W
Operating Junction Temperature Range	T <sub>J</sub>	- 40 to + 150							°C
Storage Temperature Range	T <sub>STG</sub>	- 40 to + 150							°C

**Notes :**

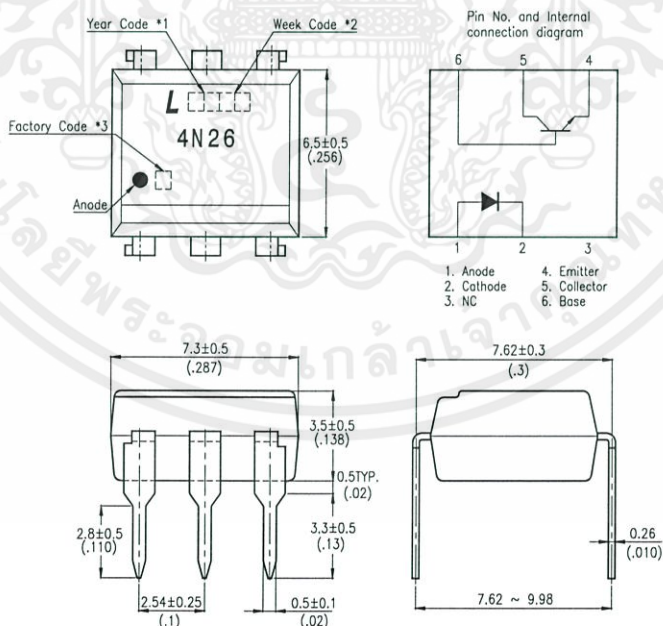
1. Thermal resistance from junction to case with units mounted on a 5" x 6" x 4.9" (12.8cm.x 15.2cm.x 12.4cm.) Al.-Finned Plate

## OUTLINE DIMENSIONS

### 4N25 :



### 4N26 :



เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของ LITE-ON TECHNOLOGY CORPORATION. การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 \*1. Year date code. สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 \*2. 2-digit work week.  
 \*3. Factory identification mark shall be marked (Z : Taiwan, Y : Thailand, X : China).

## ABSOLUTE MAXIMUM RATING

( Ta = 25°C )

PARAMETER		SYMBOL	RATING	UNIT
INPUT	Forward Current	I <sub>F</sub>	80	mA
	Reverse Voltage	V <sub>R</sub>	6	V
	Power Dissipation	P	150	mW
OUTPUT	Collector - Emitter Voltage	V <sub>CEO</sub>	30	V
	Emitter - Collector Voltage	V <sub>ECO</sub>	7	V
	Collector - Base Voltage	V <sub>CBO</sub>	70	V
	Collector Current	I <sub>C</sub>	100	mA
	Collector Power Dissipation	P <sub>C</sub>	150	mW
Total Power Dissipation		P <sub>tot</sub>	250	mW
*1 Isolation Voltage	4N25 series	V <sub>iso</sub>	2,500	V <sub>rms</sub>
	4N26 series		1,500	
Operating Temperature		T <sub>opr</sub>	-55 ~ +100	°C
Storage Temperature		T <sub>stg</sub>	-55 ~ +150	°C
*2 Soldering Temperature		T <sub>sol</sub>	260	°C

\*1. AC For 1 Minute, R.H. = 40 ~ 60%

Isolation voltage shall be measured using the following method.

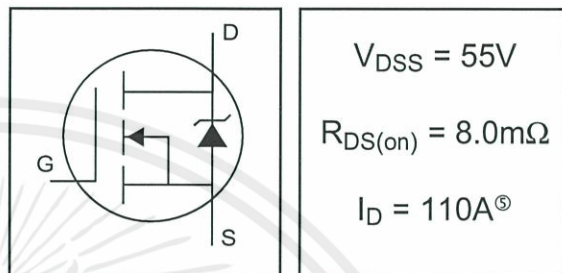
- (1) Short between anode and cathode on the primary side and between collector, emitter and base on the secondary side.
- (2) The isolation voltage tester with zero-cross circuit shall be used.
- (3) The waveform of applied voltage shall be a sine wave.

\*2. For 10 Seconds

# IRF3205

HEXFET® Power MOSFET

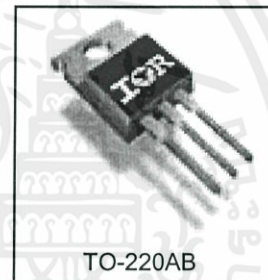
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



## Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



## Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	110 (5)	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	80	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current (1)	390	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$I_{AR}$	Avalanche Current (1)	62	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy (1)	20	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt (3)	5.0	V/ns
$T_J$	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
$T_{STG}$	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case )	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

## Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

01/25/01

## Electrical Characteristics @ T<sub>J</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V <sub>(BR)DSS</sub>	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	V <sub>GS</sub> = 0V, I <sub>D</sub> = 250μA
ΔV <sub>(BR)DSS/ΔT<sub>J</sub></sub>	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.057	—	V/°C	Reference to 25°C, I <sub>D</sub> = 1mA
R <sub>DS(on)</sub>	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	8.0	mΩ	V <sub>GS</sub> = 10V, I <sub>D</sub> = 62A ④
V <sub>GS(th)</sub>	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V <sub>DS</sub> = V <sub>GS</sub> , I <sub>D</sub> = 250μA
g <sub>fs</sub>	Forward Transconductance	44	—	—	S	V <sub>DS</sub> = 25V, I <sub>D</sub> = 62A④
I <sub>DSS</sub>	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V <sub>DS</sub> = 55V, V <sub>GS</sub> = 0V
		—	—	250		V <sub>DS</sub> = 44V, V <sub>GS</sub> = 0V, T <sub>J</sub> = 150°C
I <sub>GSS</sub>	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V <sub>GS</sub> = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V <sub>GS</sub> = -20V
Q <sub>g</sub>	Total Gate Charge	—	—	146	nC	I <sub>D</sub> = 62A
Q <sub>gs</sub>	Gate-to-Source Charge	—	—	35		V <sub>DS</sub> = 44V
Q <sub>gd</sub>	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	54	ns	V <sub>GS</sub> = 10V, See Fig. 6 and 13
t <sub>d(on)</sub>	Turn-On Delay Time	—	14	—		V <sub>DD</sub> = 28V
t <sub>r</sub>	Rise Time	—	101	—		I <sub>D</sub> = 62A
t <sub>d(off)</sub>	Turn-Off Delay Time	—	50	—		R <sub>G</sub> = 4.5Ω
t <sub>f</sub>	Fall Time	—	65	—		V <sub>GS</sub> = 10V, See Fig. 10 ④
L <sub>D</sub>	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L <sub>S</sub>	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C <sub>iss</sub>	Input Capacitance	—	3247	—	pF	V <sub>GS</sub> = 0V
C <sub>oss</sub>	Output Capacitance	—	781	—		V <sub>DS</sub> = 25V
C <sub>rss</sub>	Reverse Transfer Capacitance	—	211	—		f = 1.0MHz, See Fig. 5
E <sub>AS</sub>	Single Pulse Avalanche Energy②	—	1050⑥	264⑦	mJ	I <sub>AS</sub> = 62A, L = 138μH

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I <sub>S</sub>	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	110	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I <sub>SM</sub>	Pulsed Source Current (Body Diode)①	—	—	390		
V <sub>SD</sub>	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	T <sub>J</sub> = 25°C, I <sub>S</sub> = 62A, V <sub>GS</sub> = 0V ④
t <sub>rr</sub>	Reverse Recovery Time	—	69	104	ns	T <sub>J</sub> = 25°C, I <sub>F</sub> = 62A
Q <sub>rr</sub>	Reverse Recovery Charge	—	143	215	nC	di/dt = 100A/μs ④
t <sub>on</sub>	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L <sub>S</sub> +L <sub>D</sub> )				

### Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. ( See fig. 11 )
- ② Starting T<sub>J</sub> = 25°C, L = 138μH  
R<sub>G</sub> = 25Ω, I<sub>AS</sub> = 62A. (See Figure 12)
- ③ I<sub>SD</sub> ≤ 62A, di/dt ≤ 207A/μs, V<sub>DD</sub> ≤ V<sub>(BR)DSS</sub>, T<sub>J</sub> ≤ 175°C
- ④ Pulse width ≤ 400μs; duty cycle ≤ 2%.
- ⑤ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature. Package limitation current is 75A.
- ⑥ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑦ This is a calculated value limited to T<sub>J</sub> = 175°C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณไปใช้

# LM2940/LM2940C

## 1A Low Dropout Regulator

### General Description

The LM2940/LM2940C positive voltage regulator features the ability to source 1A of output current with a dropout voltage of typically 0.5V and a maximum of 1V over the entire temperature range. Furthermore, a quiescent current reduction circuit has been included which reduces the ground current when the differential between the input voltage and the output voltage exceeds approximately 3V. The quiescent current with 1A of output current and an input-output differential of 5V is therefore only 30 mA. Higher quiescent currents only exist when the regulator is in the dropout mode ( $V_{IN} - V_{OUT} \leq 3V$ ).

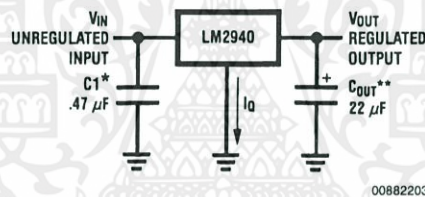
Designed also for vehicular applications, the LM2940/LM2940C and all regulated circuitry are protected from reverse battery installations or 2-battery jumps. During line transients, such as load dump when the input voltage can

momentarily exceed the specified maximum operating voltage, the regulator will automatically shut down to protect both the internal circuits and the load. The LM2940/LM2940C cannot be harmed by temporary mirror-image insertion. Familiar regulator features such as short circuit and thermal overload protection are also provided.

### Features

- Dropout voltage typically 0.5V @  $I_O = 1A$
- Output current in excess of 1A
- Output voltage trimmed before assembly
- Reverse battery protection
- Internal short circuit current limit
- Mirror image insertion protection
- P+ Product Enhancement tested

### Typical Application



\*Required if regulator is located far from power supply filter.

\*\* $C_{OUT}$  must be at least 22  $\mu F$  to maintain stability. May be increased without bound to maintain regulation during transients. Locate as close as possible to the regulator. This capacitor must be rated over the same operating temperature range as the regulator and the ESR is critical; see curve.

### Ordering Information

Temperature Range	Output Voltage						Package
	5.0	8.0	9.0	10	12	15	
$0^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$	LM2940CT-5.0	–	LM2940CT-9.0	–	LM2940CT-12	LM2940CT-15	TO-220
	LM2940CS-5.0	–	LM2940CS-9.0	–	LM2940CS-12	LM2940CS-15	TO-263
	LM2940CSX-5.0	–	LM2940CSX-9.0	–	LM2940CSX-12	LM2940CSX-15	
$-40^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$	LM2940LD-5.0	LM2940LD-8.0	LM2940LD-9.0	LM2940LD-10	LM2940LD-12	LM2940LD-15	LLP 1k Units Tape and Reel
	LM2940LDX-5.0	LM2940LDX-8.0	LM2940LDX-9.0	LM2940LDX-10	LM2940LDX-12	LM2940LDX-15	LLP 4.5k Units Tape and Reel
$-40^{\circ}C \leq T_J \leq 125^{\circ}C$	LM2940T-5.0	LM2940T-8.0	LM2940T-9.0	LM2940T-10	LM2940T-12	–	TO-220
	LM2940S-5.0	LM2940S-8.0	LM2940S-9.0	LM2940S-10	LM2940S-12	–	TO-263
	LM2940SX-5.0	LM2940SX-8.0	LM2940SX-9.0	LM2940SX-10	LM2940SX-12	–	
$-40^{\circ}C \leq T_A \leq 85^{\circ}C$	LM2940IMP-5.0	LM2940IMP-8.0	LM2940IMP-9.0	LM2940IMP-10	LM2940IMP-12	LM2940IMP-15	SOT-223
	LM2940IMPX-5.0	LM2940IMPX-8.0	LM2940IMPX-9.0	LM2940IMPX-10	LM2940IMPX-12	LM2940IMPX-15	SOT-223 in Tape and Reel
Marking	L53B	L54B	L0EB	L55B	L56B	L70B	

The physical size of the SOT-223 is too small to contain the full device part number. The package markings indicated are what will appear on the actual device.

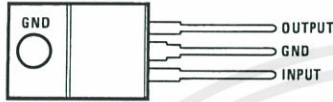
# Ordering Information (Continued)

Temperature Range	Output Voltage				Package
	5.0	8.0	12	15	
-55°C ≤ T <sub>J</sub> ≤ 125°C	LM2940J-5.0/883 5962-8958701EA	—	LM2940J-12/883 5962-9088401QEA	LM2940J-15/883 5962-9088501QEA	J16A
	LM2940WG5.0/883 5962-8958701XA	—	LM2940WG5-12/883	LM2940WG5-15/883	WG16A

For information on military temperature range products, please go to the Mil/Aero Web Site at <http://www.national.com/appinfo/milaero/index.html>.

## Connection Diagrams

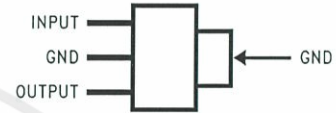
(TO-220) Plastic Package



00882202

Front View  
See NS Package Number TO3B

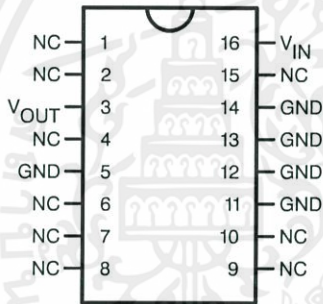
3-Lead SOT-223



00882242

Front View  
See NS Package Number MP04A

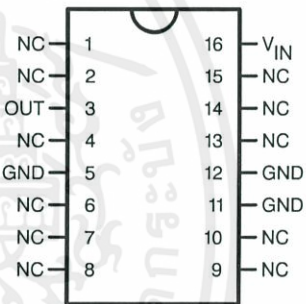
16-Lead Dual-in-Line Package (J)



00882243

Top View  
See NS Package Number J16A

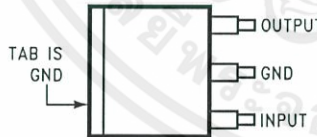
16-Lead Ceramic Surface-Mount Package (WG)



00882244

Top View  
See NS Package Number WG16A

(TO-263) Surface-Mount Package



00882211

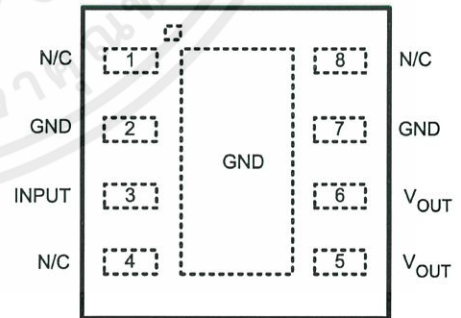
Top View



00882212

Side View  
See NS Package Number TS3B

8-Lead LLP



00882246

Top View

Order Number LM2940LD-5.0, LM2940LD-8.0,  
LM2940LD-9.0, LM2940LD-10,  
LM2940LD-12, LM2940LD-15  
See NS Package Number LDC08A

Pin 2 and pin 7 are fused to center DAP  
Pin 5 and 6 need to be tied together on PCB board

**Absolute Maximum Ratings** (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

LM2940S, J, WG, T, MP $\leq$ 100 ms	60V
LM2940CS, T $\leq$ 1 ms	45V
Internal Power Dissipation (Note 2)	Internally Limited
Maximum Junction Temperature	150°C
Storage Temperature Range	-65°C $\leq$ T <sub>J</sub> $\leq$ +150°C
Lead Temperature, Time for Wave Soldering	
TO-220 (T) Package	260°C, 10s

TO-263 (S) Package	260°C, 4s
SOT-223 (MP) Package	260°C, 4s
ESD Susceptibility (Note 3)	2 kV

**Operating Conditions** (Note 1)

Input Voltage	26V
Temperature Range	
LM2940T, LM2940S	-40°C $\leq$ T <sub>J</sub> $\leq$ 125°C
LM2940CT, LM2940CS	0°C $\leq$ T <sub>J</sub> $\leq$ 125°C
LM2940IMP	-40°C $\leq$ T <sub>A</sub> $\leq$ 85°C
LM2940J, LM2940WG	-55°C $\leq$ T <sub>J</sub> $\leq$ 125°C
LM2940LD	-40°C $\leq$ T <sub>J</sub> $\leq$ 125°C

**Electrical Characteristics**

V<sub>IN</sub> = V<sub>O</sub> + 5V, I<sub>O</sub> = 1A, C<sub>O</sub> = 22  $\mu$ F, unless otherwise specified. **Boldface limits apply over the entire operating temperature range of the indicated device.** All other specifications apply for T<sub>A</sub> = T<sub>J</sub> = 25°C.

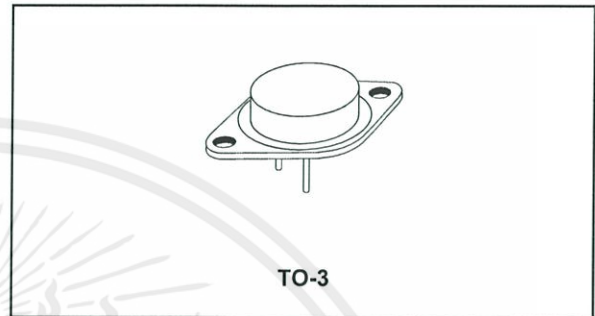
Output Voltage (V <sub>O</sub> )		5V			8V			Units
Parameter	Conditions	Typ	LM2940 Limit (Note 4)	LM2940/883 Limit (Note 5)	Typ	LM2940 Limit (Note 4)	LM2940/883 Limit (Note 5)	
Output Voltage	5 mA $\leq$ I <sub>O</sub> $\leq$ 1A	5.00	6.25V $\leq$ V <sub>IN</sub> $\leq$ 26V		9.4V $\leq$ V <sub>IN</sub> $\leq$ 26V			V <sub>MIN</sub> V <sub>MAX</sub>
			4.85/4.75	4.85/4.75	8.00	7.76/7.60	7.76/7.60	
Line Regulation	V <sub>O</sub> + 2V $\leq$ V <sub>IN</sub> $\leq$ 26V, I <sub>O</sub> = 5 mA	20	50	40/50	20	80	50/80	mV <sub>MAX</sub>
			5.15/5.25	5.15/5.25		8.24/8.40	8.24/8.40	
Load Regulation	50 mA $\leq$ I <sub>O</sub> $\leq$ 1A LM2940, LM2940/883 LM2940C	35	50/80	50/100	55	80/130	80/130	mV <sub>MAX</sub>
			50			80		
Output Impedance	100 mADC and 20 mArms, f <sub>O</sub> = 120 Hz	35		1000/1000	55		1000/1000	m $\Omega$
Quiescent Current	V <sub>O</sub> + 2V $\leq$ V <sub>IN</sub> $\leq$ 26V, I <sub>O</sub> = 5 mA LM2940, LM2940/883 LM2940C	10	15/20	15/20	10	15/20	15/20	mA <sub>MAX</sub>
			10	15				
	V <sub>IN</sub> = V <sub>O</sub> + 5V, I <sub>O</sub> = 1A	30	45/60	50/60	30	45/60	50/60	mA <sub>MAX</sub>
Output Noise Voltage	10 Hz – 100 kHz, I <sub>O</sub> = 5 mA	150		700/700	240		1000/1000	$\mu$ V <sub>rms</sub>
Ripple Rejection	f <sub>O</sub> = 120 Hz, 1 V <sub>rms</sub> , I <sub>O</sub> = 100 mA LM2940 LM2940C	72	60/54		66	54/48		dB <sub>MIN</sub>
			72	60		66	54	
	f <sub>O</sub> = 1 kHz, 1 V <sub>rms</sub> , I <sub>O</sub> = 5 mA			60/50			54/48	dB <sub>MIN</sub>
Long Term Stability		20			32			mV/ 1000 Hr
Dropout Voltage	I <sub>O</sub> = 1A	0.5	0.8/1.0	0.7/1.0	0.5	0.8/1.0	0.7/1.0	V <sub>MAX</sub>
	I <sub>O</sub> = 100 mA	110	150/200	150/200	110	150/200	150/200	mV <sub>MAX</sub>
Short Circuit Current (Note 6)		1.9	1.6	1.5/1.3	1.9	1.6	1.6/1.3	A <sub>MIN</sub>



# LM138/LM238 LM338

## THREE-TERMINAL 5 A ADJUSTABLE VOLTAGE REGULATORS

- GUARANTEED 7A PEAK OUTPUT CURRENT
- GUARANTEED 5A OUTPUT CURRENT
- ADJUSTABLE OUTPUT DOWN TO 1.2V
- LINE REGULATION TYPICALLY 0.005%/V
- LOAD REGULATION TYPICALLY 0.1%
- GUARANTEED THERMAL REGULATION
- CURRENT LIMIT CONSTANT WITH TEMPERATURE
- STANDARD 3-LEAD TRANSISTOR PACKAGE



### DESCRIPTION

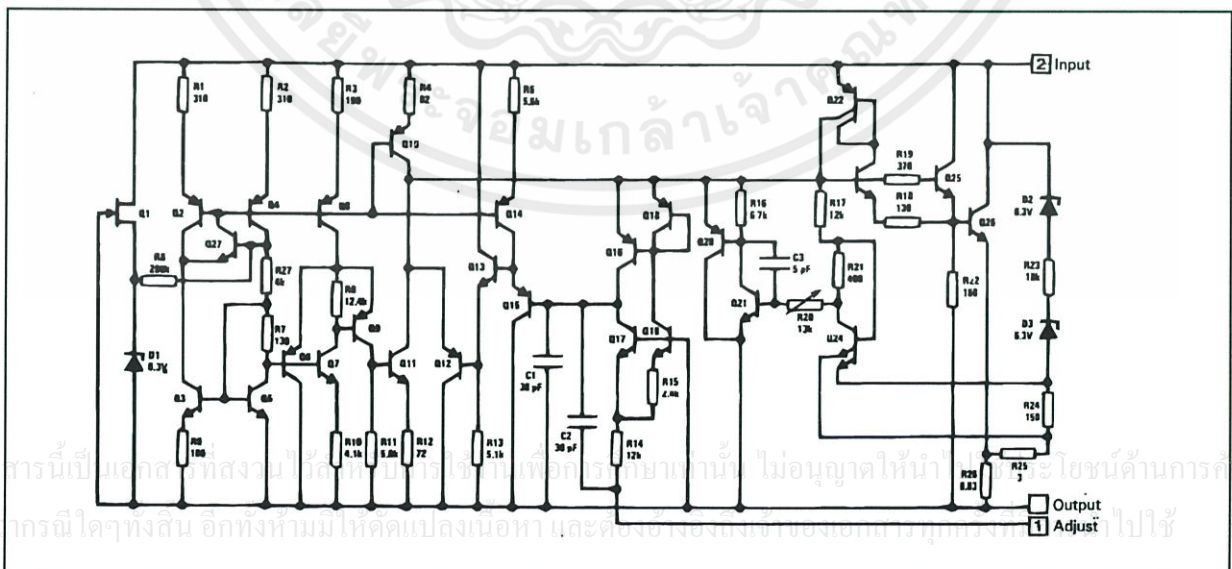
The LM138/LM238/LM338 are adjustable 3-terminal positive voltage regulators capable of supplying in excess of 5A over a 1.2V to 32V output range. They are exceptionally easy to use and require only 2 resistors to set the output voltage. Careful circuit design has resulted in outstanding load and line regulation comparable to many commercial power supplies. The LM138 family is supplied in a standard 3-lead transistor package.

A unique feature of the LM138 family is time-dependent current limiting. The current limit circuitry allows peak currents of up to 12A to be drawn from the regulator for short periods of time.

This allows the LM138 to be used with heavy transient loads and speeds start-up under full-load conditions. Under sustained loading conditions, the current limit decreases to a safe value protecting the regulator. Also included on the chip are thermal overload protection and safe area protection for the power transistor. Overload protection remains functional even if the adjustment pin is accidentally disconnected.

Normally, no capacitors are needed unless the device is situated far from the input filter capacitors in which case an input bypass is needed. An optional output capacitor can be added to improve transient response. The adjustment terminal can be bypassed to achieve very high ripple rejection ratios which are

### SCHEMATIC DIAGRAM



## LM138-LM238-LM338

difficult to achieve with standard 3-terminal regulators.

Besides replacing fixed regulators or discrete designs, the LM238 is useful in a wide variety of other applications. Since the regulator is "floating" and sees only the input-to-output differential voltage, supplies of several hundred volts can be

regulated as long as the maximum input to input differential is not exceeded.

The LM138/LM238/LM338 are packaged in standard steel TO-3 transistor packages. The LM138 is rated for operation from -55°C to 150°C, the LM238 from -25°C to 150°C and the LM338 from 0°C to 125°C.

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

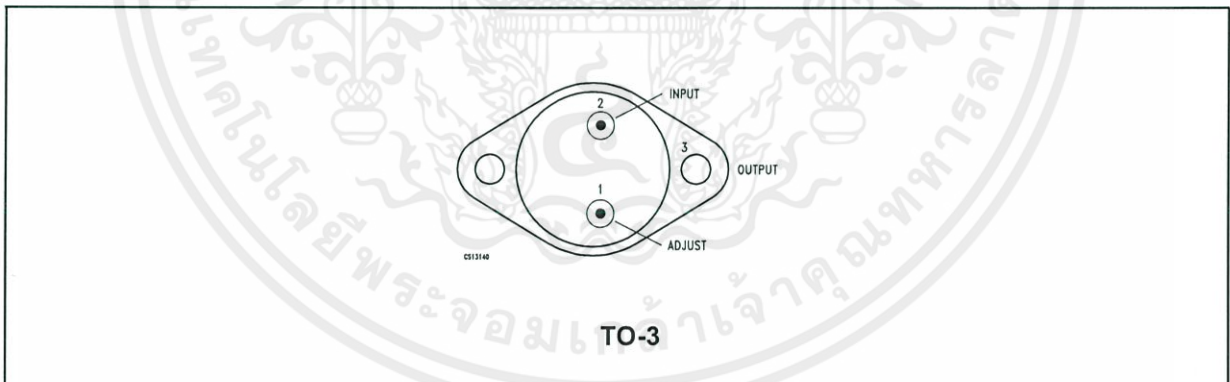
Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_I - V_O$	Input Output Voltage Differential	35	V
$P_{tot}$	Power Dissipation	Internally Limited	
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	-65 to 150	°C
$T_{lead}$	Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	300	°C
$T_{oper}$	Operating Junction Temperature Range	LM138	-55 to 150
		LM238	-25 to 125
		LM338	0 to 125

Absolute Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied.

### THERMAL DATA

Symbol	Parameter	Value	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case	1.4	°C/W
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	35	°C/W

### CONNECTION DIAGRAM (top view)



### ORDERING CODES

TYPE	TO-3	TEMPERATURE RANGE
LM138	LM138K	-55°C to 150°C
LM238	LM238K	-25°C to 150°C
LM338	LM338K	0°C to 125°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF LM338** ( $T_J = 0$  to  $150^\circ\text{C}$ ,  $V_I - V_O = 5\text{V}$ ,  $I_O = 2.5\text{A}$ .)

Although power dissipation is internally limited, these specifications apply to power dissipation up to 50W, unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$K_{VI}$	Line Regulation (Note 1)	$T_a = 25^\circ\text{C}$ , $V_I - V_O = 3$ to $35\text{V}$		0.005	0.03	%/V
$K_{VO}$	Load Regulation (Note 1)	$T_a = 25^\circ\text{C}$ $I_O = 10\text{mA}$ to $5\text{A}$	$V_O \leq 5\text{V}$	5	25	mV
			$V_O \geq 5\text{V}$	0.1	0.5	%
	Thermal Regulation	Pulse = 20 ms		0.002	0.02	%/W
$I_{adj}$	Adjustment Pin Current			45	100	$\mu\text{A}$
$\Delta I_{adj}$	Adjustment Pin Current Change	$I_L = 10\text{mA}$ to $5\text{A}$ $V_I - V_O = 3$ to $35\text{V}$		0.2	5	$\mu\text{A}$
$V_{ref}$	Reference Voltage	$V_I - V_O = 3$ to $35\text{V}$ , $I_O = 10\text{mA}$ to $5\text{A}$ $P \leq 50\text{W}$	1.19	1.24	1.29	V
$K_{VI}$	Line Regulation (Note 1)	$V_I - V_O = 3$ to $35\text{V}$		0.02	0.06	%/V
$K_{VO}$	Load Regulation (Note 1)	$I_O = 10\text{mA}$ to $5\text{A}$	$V_O \leq 5\text{V}$	20	50	mV
			$V_O \geq 5\text{V}$	0.3	1	%
$K_{VT}$	Temperature Stability	$T_J = T_{min}$ to $T_{max}$		1		%
$I_{O(min)}$	Minimum Load Current	$V_I - V_O \leq 35\text{V}$		3.5	10	mA
$I_{O(max)}$	Current Limit	$V_I - V_O \leq 10\text{V}$	DC	5	8	A
			0.5 ms Peak	7	12	
			$V_I - V_O = 30\text{V}$	1		
$V_{NO}$	RMS Output Noise (% of $V_O$ )	$T_a = 25^\circ\text{C}$ $f = 10\text{Hz}$ to $10\text{KHz}$			0.003	%
$R_{vf}$	Ripple Rejection Ratio	$V_O = 10\text{V}$ , $f = 120\text{Hz}$		60		dB
		$C_{adj} = 10\mu\text{F}$		60	75	
$K_{VH}$	Long Term Stability	$T_a = 125^\circ\text{C}$		0.3	1	%

Note 1: Regulation is measured at constant junction temperature. Changes in output voltage due to heating effects are taken into account separately by thermal rejection.

Figure 1 : Current Limit

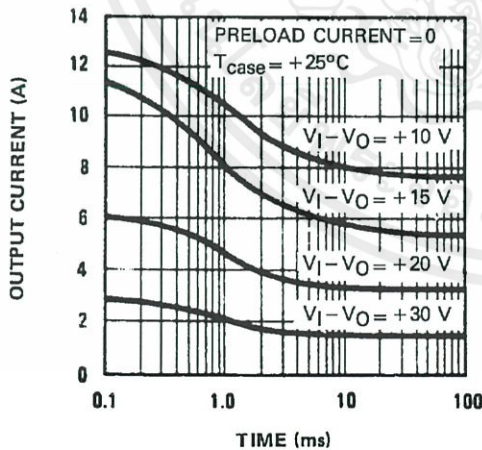
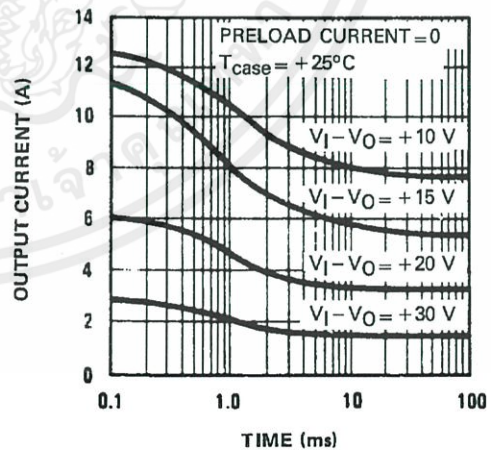
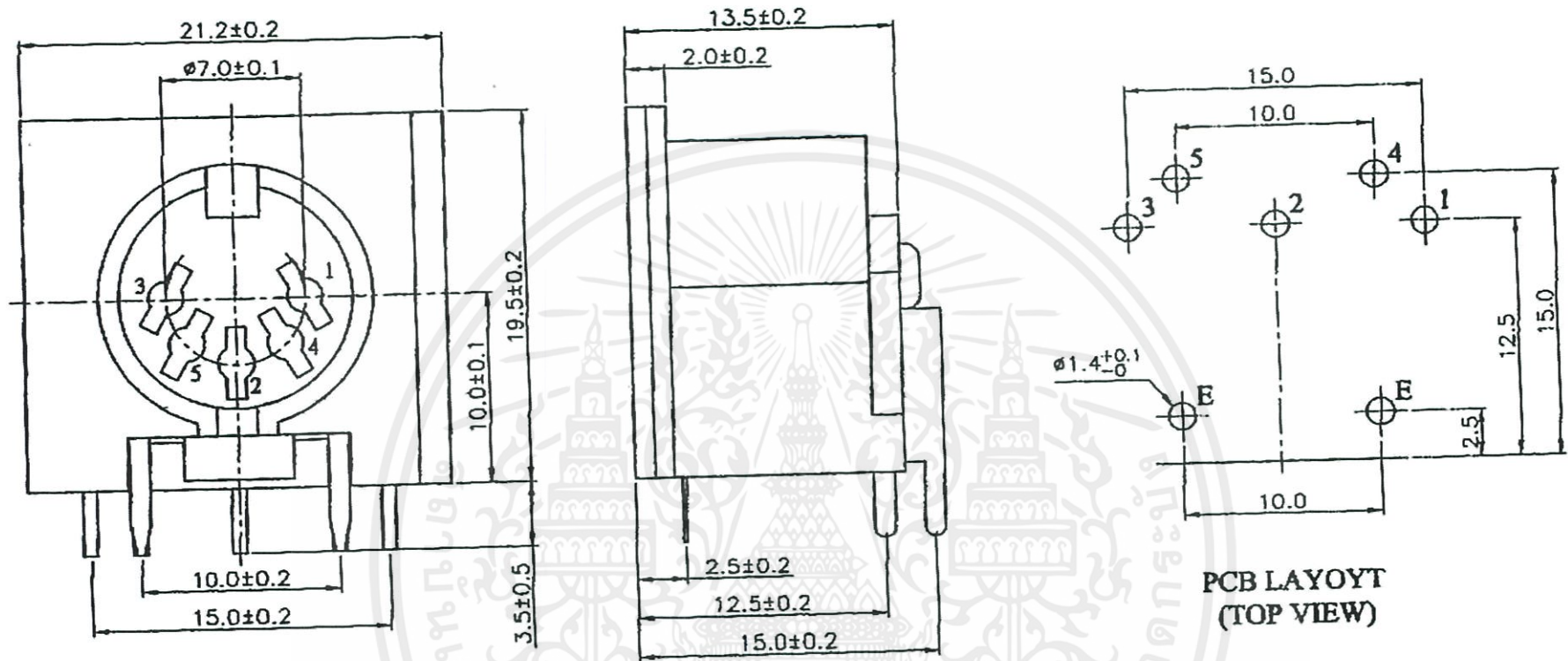


Figure 2 : Current Limit



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




PCB LAYOYT  
(TOP VIEW)

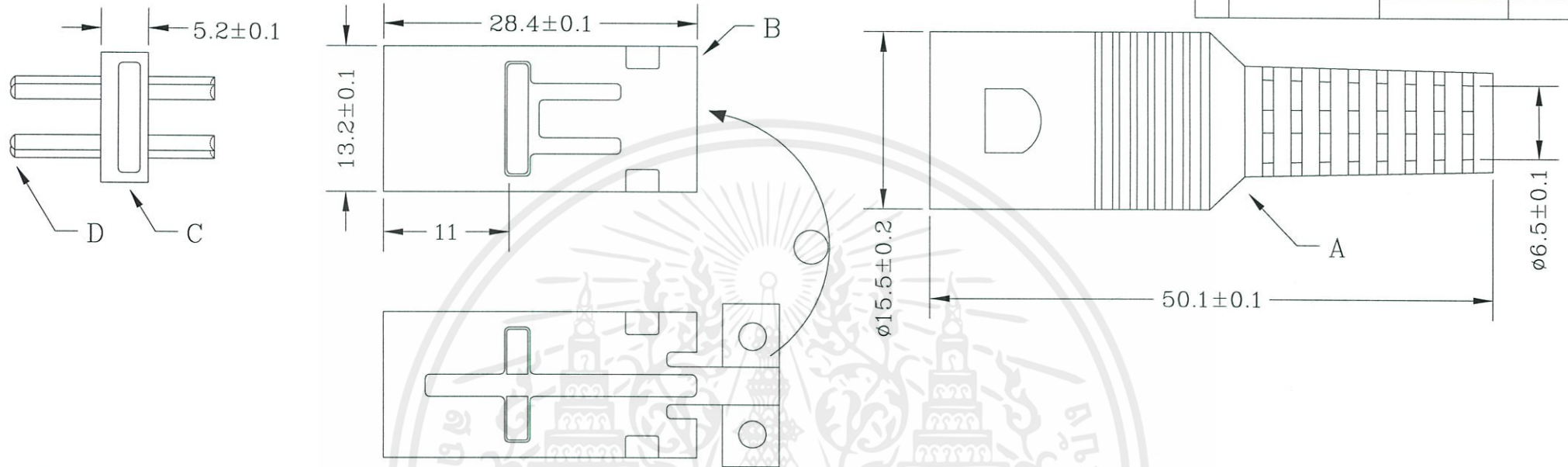
**SPECIFICATIONS:**

1. CONTACT RESISTANCE : 20m OHM MAX.
2. INSULATION RESISTANCE : DC 500V 100M OHM MIN.
3. VOLTAGE WITHSTANDING : AC 500V 1 MINUTE.
4. INSERTION FORCE : 4KG MAX.
5. WITHDRAWAL FORCE : 1- 3.5KG.
6. LIFE TEST : 5,000 CYCLES MIN. AFTER TEST , CONTACT RESISTANCE SHALL NOT EXCEED 50m OHM.
7. RATING : AC 100V 1A  
DC 24V 2A.

4.	CONTACT TERMINAL	5	BSR-0.5H 0.7 t	Pb10%, Sn90%	
3.	PLATE	1	BAKELITE	PL-PEM 1.4t	
2.	EARTH TERMINAL	1	PBR 0.25 t	NICKEL PLATED	
1.	BODY	1	P.B.T.		UL94V-0
P/N	PART NAME	Q'TY	MATERIAL	PLATING	REMARKS

PART-NO: DS-015		APPROVALS	DATE	 億群電氣股份有限公司 <b>GOLD-TEK</b> ELECTRIC CO., LTD.
DESCRIPTION:		DRAWN		
DWG NO.	SCALE	CHECK	CATALOG NO.	PAGE

REV	LCN NO.	DESCRIPTION	DATE
A	GTKSD0108	RELEASE	MAR.28.02
B		ADD. SAFETY	JAN.27.04



FRONT VIEW

3P 180°	4P 210°	5P 180°	5P 240°	5P 360°	6P 240°	7P 270°	8P 270°	8P 262°
DP3SA	DP4SA	DP5SA	DP5SA/240	DP5SA/360	DP6SA	DP7SA	DP8SA	DP8SA/262

MATERIALS:

A.BOOT:PVC

B.METAL PART:STEEL NICKEL PLATED

C.INSULATOR:PBT

D.PIN CONTACT:BRASS NICKEL PLATED

SPECIFICATIONS:

1.RATING:100V AC AT 1A

2.INSULATION RESISTANCE:OVER 100MΩ AT 500V DC

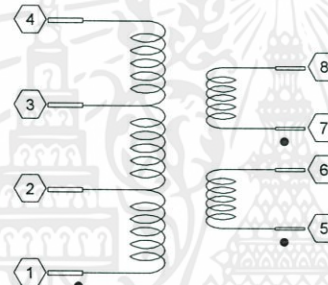
3.DIELECTRIC STRENGTH:250V AC FOR ONE MINUTE

4.CONTACT RESISTANCE:10mΩ MAX.

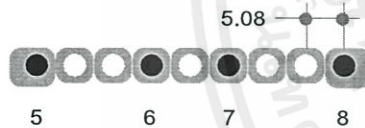
TOLERANCE UNLESS OTHERWISE SPECIFIED		PROJECTION	GOLD-TEK ELECTRIC CO., LTD.	
LINEAR	ANGLE			
X. ±	X° ±	UNITS	TITLE	
.X ±	.X° ±	MM	DIN PLUG ASSEMBLY TYPE	
.XX ±	.XX° ±	SCALE	PART NO. DP*SA (/240)	
.XXX±	.XXX°±	SIZE	CAD NO. I287	
APPD		A4	F:\Drw\PH\PH-0143	
CHKD			SHEET 1 OF 1	
DRAW	Z.	JAN. 27' 2004	IPART NO. 46000SER	
			圖面編號:GTKSD0949-B(1)	

**Features:**

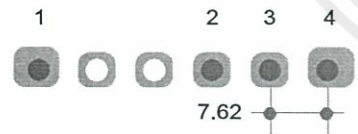
- Chassis mount
  - 12 output formats in one unit
- ( Note :one format at a time )



No load (AC) Volt	Full load(AC) Volt	Amp.	OUTPUT Terminals to connect	JUMPER	INPUT(220V) Terminals
6.0	5.5	8.00	5   8	5-7   6-8	1   4
6.5	6.0	8.00	5   8	5-7   6-8	1   3
7.0	6.5	8.00	5   8	5-7   6-8	1   2
6.0	5.5	4.00	5   6	-	1   4
6.0	5.5	4.00	7   8	-	1   3
6.5	6.0	4.00	5   6	-	1   3
6.5	6.0	4.00	7   8	-	1   3
7.0	6.5	4.00	5   6	-	1   2
7.0	6.5	4.00	7   8	-	1   2
6.0-0-6.0	5.5-0-5.5	4.00	5   6   8	6-7	1   4
6.5-0-6.5	6.0-0-6.0	4.00	5   6   8	6-7	1   3
7.0-0-7.0	6.5-0-6.5	4.00	5   6   8	6-7	1   2
12.0	11.0	4.00	5   8	6-7	1   4
13.0	12.0	4.00	5   8	6-7	1   3
14.0	13.0	4.00	5   8	6-7	1   2

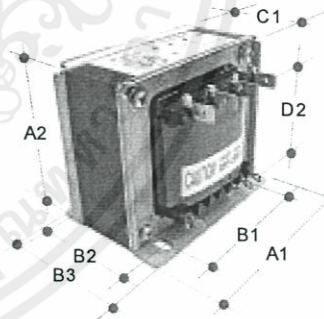


COPPER SIDE



PIN1-2	22.86
PIN2-3	7.62
PIN3-4	7.62
PIN5-6	15.24
PIN6-7	10.16
PIN7-8	15.24
A1	78.00
A2	65.00
B1	62.00
B2	48.60
B3	61.20
C1	59.00
D2	40.00

Dimensions in millimetres  
Weight : 1270 gms.

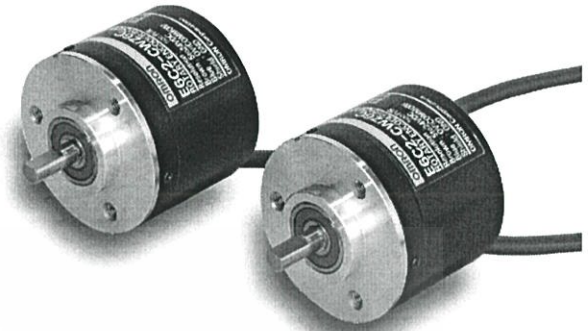


Bangkok Transtek Ltd.,Part.

Fax 02-2594136 / 02-6615098 Phone 02-6615099 / 02-2594122 / 02-2586419 e-mail: sale@copper-coil.com

## Tough and Easy

- Sealed bearings with IP64 oilproof construction.
- Improved shaft loading performance.  
Radial: 50 N, Thrust: 30 N
- Pre-wired Models with cable connected at an angle.  
Side or back cable connections also possible.
- Improved reliability with reverse connection and load short-circuit protection (except for line-driver outputs).



**⚠** Be sure to read *Safety Precautions* on page 4.

## Ordering Information

**Encoders** [Refer to *Dimensions* on page 4.]

Power supply voltage	Output configuration	Resolution (pulses/rotation)	Model
5 to 24 VDC	Open-collector output (NPN)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600	<b>E6C2-CWZ6C (resolution) 2M</b> Example: E6C2-CWZ6C 10P/R 2M
		720, 800, 1,000, 1,024, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	
12 to 24 VDC	Open-collector output (PNP)	100, 200, 360, 500, 600	<b>E6C2-CWZ5B (resolution) 2M</b> Example: E6C2-CWZ5B 100P/R 2M
		1,000, 2,000	
5 to 12 VDC	Voltage output	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600	<b>E6C2-CWZ3E (resolution) 2M</b> Example: E6C2-CWZ3E 10P/R 2M
		720, 800, 1,000, 1,024, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	
5 VDC	Line-driver output	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600	<b>E6C2-CWZ1X (resolution) 2M</b> Example: E6C2-CWZ1X 10P/R 2M
		720, 800, 1,000, 1,024, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	

**Accessories (Order Separately)** [Refer to *Dimensions* on *Rotary Encoder Accessories*.]

Name	Model	Remarks
<b>Couplings</b>	E69-C06B	---
	E69-C68B	Different end diameter
	E69-C610B	Different end diameter
	E69-C06M	Metal construction
<b>Flanges</b>	E69-FCA	---
	E69-FCA02	E69-2 Servo Mounting Bracket provided.
<b>Servo Mounting Bracket</b>	E69-2	Provided with E69-FCA02 Flange.

Refer to *Accessories* for details.

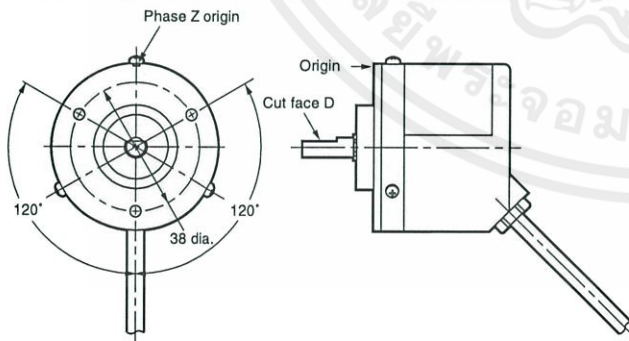
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ratings and Specifications

Item	Model	E6C2-CWZ6C	E6C2-CWZ5B	E6C2-CWZ3E	E6C2-CWZ1X
Power supply voltage		5 VDC -5% to 24 VDC +15%, ripple (p-p): 5% max.	12 VDC -10% to 24 VDC +15%, ripple (p-p): 5% max.	5 VDC -5% to 12 VDC +10%, ripple (p-p): 5% max.	5 VDC ±5%, ripple (p-p): 5% max.
Current consumption*1		80 mA max.	100 mA max.		160 mA max.
Resolution (pulses/rotation)		10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600, 720, 800, 1,000, 1,024, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	100, 200, 360, 500, 600, 1,000, 2,000	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600, 720, 800, 1,000, 1,024, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	
Output phases		Phases A, B, and Z			Phases A, $\bar{A}$ , B, $\bar{B}$ , Z, and $\bar{Z}$
Output configuration		NPN open-collector output	PNP open-collector output	Voltage output (NPN output)	Line driver output*2
Output capacity		Applied voltage: 30 VDC max. Sink current: 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 35 mA)	Applied voltage: 30 VDC max. Source current: 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at source current of 35 mA)	Output resistance: 2 kΩ Output current: 20 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 20 mA)	AM26LS31 equivalent Output voltage: High level: $I_o = -20$ mA Low level: $I_s = 20$ mA Output voltage: $V_o = 2.5$ V min. $V_s = 0.5$ V max.
Maximum response frequency*3		100 kHz	50 kHz	100 kHz	
Phase difference between outputs		90°±45° between A and B (1/4 T ± 1/8 T)			
Rise and fall times of output		1 μs max. (Control output voltage: 5 V, Load resistance: 1 kΩ, Cable length: 2 m)	1 μs max. (Cable length: 2 m, Sink current: 10 mA)		0.1 μs max. (Cable length: 2 m, $I_o = -20$ mA, $I_s = 20$ mA)
Starting torque		10 mN·m max.			
Moment of Inertia		1×10 <sup>-6</sup> kg·m <sup>2</sup> max.; 3 × 10 <sup>-7</sup> kg·m <sup>2</sup> max. at 600 P/R max.			
Shaft loading	Radial	50 N			
	Thrust	30 N			
Maximum permissible speed		6,000 r/min			
Protection circuits		Power supply reverse polarity protection, Load short-circuit protection			---
Ambient temperature range		Operating: -10 to 70°C (with no icing), Storage: -25 to 85°C (with no icing)			
Ambient humidity range		Operating/Storage: 35% to 85% (with no condensation)			
Insulation resistance		20 MΩ min. (at 500 VDC) between current-carrying parts and case			
Dielectric strength		500 VAC, 50/60 Hz for 1 min between current-carrying parts and case			
Vibration resistance		Destruction: 10 to 500 Hz, 150 m/s <sup>2</sup> or 2-mm double amplitude for 11 min 3 times each in X, Y, and Z directions			
Shock resistance		Destruction: 1,000 m/s <sup>2</sup> 3 times each in X, Y, and Z directions			
Degree of protection		IEC 60529 IP64, in-house standards: oilproof			
Connection method		Pre-wired Models (Standard cable length: 2 m)			
Material		Case: Zinc alloy, Main unit: Aluminum, Shaft: SUS420J2			
Weight (packed state)		Approx. 400 g			
Accessories		Instruction manual			

Note: Origin Indication

The following illustration shows the relationship between phase Z and the origin. Set cut face D to the phase Z origin as shown in the illustration.



\*1. An inrush current of approximately 9 A will flow for approximately 0.3 ms when the power is turned ON.

\*2. The line driver output is a data transmission circuit compatible with RS-422A and long-distance transmission is possible with a twisted-pair cable.(AM26LS31 equivalent)

\*3. The maximum electrical response speed is determined by the resolution and maximum response frequency as follows:

$$\text{Maximum electrical response speed (rpm)} = \frac{\text{Maximum response frequency}}{\text{Resolution}} \times 60$$

This means that the E6C2-C Rotary Encoder will not operate electrically if its speed exceeds the maximum electrical response speed.

I/O Circuit Diagrams

Model/Output Circuits	Output mode	Connection																		
<p><b>E6C2-CWZ6C</b></p>	<p><b>E6C2-CWZ6C NPN Open-collector Output Model</b>  <b>E6C2-CWZ5B PNP Open-collector Output Model</b></p> <p>Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft)      Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft)</p> <p>Note: Phase A is <math>1/4 T \pm 1/8 T</math> faster than phase B.      Note: Phase A is <math>1/4 T \pm 1/8 T</math> slower than phase B.</p> <p>(The ONs in the above timing chart mean that the output transistor is ON and the OFFs mean that the output transistor is OFF.)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Terminal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Brown</td> <td>Power supply (+Vcc)</td> </tr> <tr> <td>Black</td> <td>Output phase A</td> </tr> <tr> <td>White</td> <td>Output phase B</td> </tr> <tr> <td>Orange</td> <td>Output phase Z</td> </tr> <tr> <td>Blue</td> <td>0 V (common)</td> </tr> </tbody> </table>	Color	Terminal	Brown	Power supply (+Vcc)	Black	Output phase A	White	Output phase B	Orange	Output phase Z	Blue	0 V (common)						
Color	Terminal																			
Brown	Power supply (+Vcc)																			
Black	Output phase A																			
White	Output phase B																			
Orange	Output phase Z																			
Blue	0 V (common)																			
<p><b>E6C2-CWZ5B</b></p>	<p><b>E6C2-CWZ3E Voltage Output Model</b></p> <p>Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft)      Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft)</p> <p>Note: Phase A is <math>1/4 T \pm 1/8 T</math> faster than phase B.      Note: Phase A is <math>1/4 T \pm 1/8 T</math> slower than phase B.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Terminal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Brown</td> <td>Power supply (+Vcc)</td> </tr> <tr> <td>Black</td> <td>Output phase A</td> </tr> <tr> <td>White</td> <td>Output phase B</td> </tr> <tr> <td>Orange</td> <td>Output phase Z</td> </tr> <tr> <td>Blue/red stripes</td> <td>Output phase <math>\bar{A}</math></td> </tr> <tr> <td>White/red stripes</td> <td>Output phase <math>\bar{B}</math></td> </tr> <tr> <td>Orange/red stripes</td> <td>Output phase <math>\bar{Z}</math></td> </tr> <tr> <td>Blue</td> <td>0 V (common)</td> </tr> </tbody> </table>	Color	Terminal	Brown	Power supply (+Vcc)	Black	Output phase A	White	Output phase B	Orange	Output phase Z	Blue/red stripes	Output phase $\bar{A}$	White/red stripes	Output phase $\bar{B}$	Orange/red stripes	Output phase $\bar{Z}$	Blue	0 V (common)
Color	Terminal																			
Brown	Power supply (+Vcc)																			
Black	Output phase A																			
White	Output phase B																			
Orange	Output phase Z																			
Blue/red stripes	Output phase $\bar{A}$																			
White/red stripes	Output phase $\bar{B}$																			
Orange/red stripes	Output phase $\bar{Z}$																			
Blue	0 V (common)																			
<p><b>E6C2-CWZ3E</b></p>	<p><b>E6C2-CWZ1X Line Driver Output Model</b></p> <p>Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft)      Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft)</p> <p>Note: Receiver: AM26LS32 equivalent</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Terminal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Brown</td> <td>Power supply (+Vcc)</td> </tr> <tr> <td>Black</td> <td>Output phase A</td> </tr> <tr> <td>White</td> <td>Output phase B</td> </tr> <tr> <td>Orange</td> <td>Output phase Z</td> </tr> <tr> <td>Black/red stripes</td> <td>Output phase <math>\bar{A}</math></td> </tr> <tr> <td>White/red stripes</td> <td>Output phase <math>\bar{B}</math></td> </tr> <tr> <td>Orange/red stripes</td> <td>Output phase <math>\bar{Z}</math></td> </tr> <tr> <td>Blue</td> <td>0 V (common)</td> </tr> </tbody> </table>	Color	Terminal	Brown	Power supply (+Vcc)	Black	Output phase A	White	Output phase B	Orange	Output phase Z	Black/red stripes	Output phase $\bar{A}$	White/red stripes	Output phase $\bar{B}$	Orange/red stripes	Output phase $\bar{Z}$	Blue	0 V (common)
Color	Terminal																			
Brown	Power supply (+Vcc)																			
Black	Output phase A																			
White	Output phase B																			
Orange	Output phase Z																			
Black/red stripes	Output phase $\bar{A}$																			
White/red stripes	Output phase $\bar{B}$																			
Orange/red stripes	Output phase $\bar{Z}$																			
Blue	0 V (common)																			
<p><b>E6C2-CWZ1X</b></p>	<p>Note: 1. The shielded cable outer core (shield) is not connected to the inner area or to the case.                  2. The phase A, phase B, and phase Z circuits are all identical.                  3. Normally, connect GND to 0 V or to an external ground.</p>																			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้