

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

## การพัฒนารีแฟรคโตมิเตอร์



นายชนรัตน์ หมี่น้ำเงิน  
นายชาคริต อนุสนธิ์อศิษฐ์

๒๕๔๘  
๕/๒๕๕๐  
๒๕๕๘

เลขทงู.....  
เลขทะเบียน.....**62299**  
วัน,เดือน,ปี.....**- 8 ส.ค. ๒๕๔๙**

b.....**11620043**  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๔๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Development of a refractometer



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Bachelor of Science**

**Department of Applied Physics**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

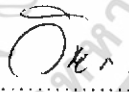
**Academic Year 2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การพัฒนารีแฟรกโตมิเตอร์  
นักศึกษา นายชนรัตน์ หมื่นน้ำเงิน  
นายชาคริต อนุสนธิ์ดิษฐ์  
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.วิษณุ เพชรภา

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
กรรมการ อ.ธนกรณ์ ศีลาวัฒนานนท์	
กรรมการ ผศ.สาห์รบ เล็กชะอุ่ม	
กรรมการที่ปรึกษา รศ.วิษณุ เพชรภา	

  
(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)  
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การพัฒนารีเฟรคโทมิเตอร์	
นักศึกษา	นายชนรัตน์ หมีน้ำเงิน	
	นายชาคริต อนุสนธิ์อดิษฐ์	
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
ปีการศึกษา	2548	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิษณุ เพชรภา	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการพัฒนาเครื่องรีเฟรคโทมิเตอร์เพื่อใช้ในการหาค่าดัชนีหักเหและความเข้มข้นของสารละลาย โดยใช้หลักการของการหักเหของแสง เครื่องมือนี้ประกอบไปด้วยปริซึมสามเหลี่ยมด้านเท่า 2 อันและปริซึมสามเหลี่ยมมุมฉาก 1 อัน เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านสารละลายที่มีความเข้มข้นและดัชนีหักเหต่างกัน ทำให้เกิดการหักเหที่มุมที่แตกต่างกันเพราะความแตกต่างของทางเดินแสงซึ่งแยกได้โดยตัวสแกนจับแสง ความเข้มข้นกับดัชนีหักเหสามารถหาได้ด้วยอุปกรณ์นี้ ผลของดัชนีหักเหและความเข้มข้นของสารละลายจะถูกแสดงผ่านหน้าจอ LCD ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น ดัชนีหักเหและตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบบนตัวจับแสงพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นมีผลทำให้ทางเดินแสงลดลง ขณะเดียวกันดัชนีหักเหของสารละลายแปรผันตรงกับความเข้มข้นแบบเชิงเส้น

<b>Special Project Title</b>	Development of a refractometer
<b>Name</b>	Mr.Chonnarat Meenamngoen Mr.Chakrit Anusonadisai
<b>Special Project Advisor</b>	Assoc. Prof. Wisanu Pecharapa
<b>Department</b>	Applied Physics
<b>Academic year</b>	2005

### Abstract

This special project is the development of refractometer used for measuring the solution refractive index and concentration by principle of light refraction. The apparatus consists of two equilateral prisms and a retroreflector prism. When the light passes through solution with different concentration and different refractive index, it refracts with different angle causing the difference in optical path which is distinguished by scanned-detector. Based on the model, the concentration and refractive index can be achieved. The result of refractive index and concentrate of solution are displayed on LCD display unit. The relationships between the concentration, refractive index to the detector position are investigated. Increment of concentration affects in decrease of optical path distance. Meanwhile, refractive index of the solution is linearly proportional to its concentration.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์จากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน ดังนี้

- |  |  |
|--|--|
| บิดา และมารดา                                    | ผู้ให้กำเนิด คอยอุปการะเลี้ยงดู เป็นผู้ให้กำลังใจ และอยู่เคียงข้างเรามาตลอด        |
| อ.วิษณุ เพชรภา                                   | ผู้ให้โอกาส ให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการทำโครงการ                              |
| นางสาวณัฐกานต์ ศรีศรีกับ<br>นายไชยพร สวงนุกูณากร | ผู้ที่ให้คำปรึกษาในด้าน โปรแกรมคอนโทรลเลอร์ และคอยช่วยเหลือในการทำโครงการนี้ตลอดมา |
| เพื่อนๆ ในห้องโปรเจก                             | ผู้ที่ช่วยเหลือในด้านต่างๆ   |

นายชนรัตน์ หมี่น้ำเงิน  
นายชาคริต อนุสนธิ์ดิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 การหักเหของแสง ( refraction )	3
2.2 หลักการของรีแฟรคโตมิเตอร์	5
2.2.1 ระบบการส่องผ่านของแสง ( transparent refractometer )	5
2.2.2 ระบบการสะท้อนของแสง ( reflection refractometer )	6
2.3 ทฤษฎีสเตปปีงมอเตอร์	7
2.3.1 วงจรขับสเตปปีงมอเตอร์	10
2.3.2 ส่วนการทำงานของตัวสเตปปีงมอเตอร์ (Stepping Motor)	11
2.3.3 ส่วนการทำงานของตัวตรวจวัด (Detector)	11
2.4 ส่วนการทำงานของตัวเปรียบเทียบ (Comparator)	12
2.5 การเปรียบเทียบของค่าที่หมุนกับระยะทางของสเตปปีงมอเตอร์	12
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินการ	
3.1 การวัดค่ามุมของปริซึม และค่าดัชนีหักเหของปริซึม	13
3.2 สร้างเครื่อง รีแฟรคโตมิเตอร์ ดันแบบ	17
3.3 ศึกษาและคิดค้นสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่อง รีแฟรคโตมิเตอร์ ดันแบบ	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

43

## 5.2 แนวทางในการพัฒนา

43

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส	8
ตารางที่ 2.2 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบสองเฟส	9
ตารางที่ 2.3 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบครึ่งสเตป	10
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่ามุมยอด	31
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหของปริซึมแล้วทำการคำนวณ ตามสมการที่ 3.5 จะได้ค่าของมุม $\theta$ แล้วนำไปหาค่าดัชนีหักเหของปริซึม ตามสมการที่ 3.16	32
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองที่วัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในรูปของระยะ ทางที่วัดได้	33
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองระหว่างตำแหน่งของแสงของน้ำตาลซูโครสกับ ค่าดัชนีหักเหที่คำนวณได้	34
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส	35
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองที่วัดค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในรูปของระยะทางที่วัดได้	36
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองระหว่างตำแหน่งของแสงของ สารละลายโซเดียมคลอไรด์กับค่าดัชนีหักเหที่คำนวณได้	37
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมคลอไรด์	38
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองที่วัดค่าความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์ ในรูปของระยะทางที่วัดได้	39
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองระหว่างตำแหน่งของแสงของสารละลายแอลกอฮอล์ กับค่าดัชนีหักเหที่คำนวณได้	40
ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลองระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของ สารละลายแอลกอฮอล์	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้าที่
รูปที่ 2.1 แสดงการหักเหของแสงในแก้วน้ำ	3
รูปที่ 2.2 แสดงการหักเหของแสง	4
รูปที่ 2.3 แสดงการทำงานของรีเฟรคโตมิเตอร์ระบบการส่องผ่าน	5
รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของรีเฟรคโตมิเตอร์ระบบการสะท้อน	6
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์	7
รูปที่ 2.6 แสดงการวางของขดลวดแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์	7
รูปที่ 2.7 แสดงการหมุนของแกนมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส	8
รูปที่ 2.8 แสดงการหมุนของแกนมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบสองเฟส	9
รูปที่ 2.9 แสดงการหมุนของแกนมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบครึ่งสเกล	10
รูปที่ 2.10 แสดงวงจรขับสเตปป์มอเตอร์โดยใช้ไอซี Driver เบอร์ ULN2003	11
รูปที่ 2.11 แสดงชุดสแกน	12
รูปที่ 3.1 แสดงการหามุมแอตของปริซึม	13
รูปที่ 3.2 แสดงการหักเหของแสงในการหาค่าดัชนีหักเหของปริซึม	14
รูปที่ 3.3 แสดงหลักการหักเหของแสงในเครื่อง รีเฟรคโตมิเตอร์ ดันแนบ	17
รูปที่ 3.4 แสดงการหักเหของแสงผ่านปริซึมตัวที่ 1	18
รูปที่ 3.5 แสดงการหักเหของแสงผ่านปริซึมตัวที่ 2	21
รูปที่ 3.6 แสดงการหักเหของแสงระหว่างสารละลายกับปริซึม	23
รูปที่ 3.7 รูปแสดงการหักเหของแสงของปริซึมตัวสะท้อน	26
รูปที่ 3.8 แสดงการเดินทางของแสงของเครื่องรีเฟรคโตมิเตอร์ดันแนบ	28
รูปที่ 4.1 ปริซึมตัวสะท้อน	29
รูปที่ 4.2 ปริซึมที่นำมาประกอบเป็นรีเฟรคโตมิเตอร์	29
รูปที่ 4.3 สเตปมอเตอร์คิดตัวตรวจจับแสง	29
รูปที่ 4.4 เลเซอร์	30
รูปที่ 4.5 วงจรขับเคลื่อนสเตปมอเตอร์	30
รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ภายในที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว	30
รูปที่ 4.7 รูปอุปกรณ์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว	31
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสกับค่าแฉงที่วัดได้	33
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของน้ำตาลซูโครสกับค่าแฉงที่วัดได้	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส	35
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับตำแหน่งที่วัดได้	36
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับตำแหน่งที่วัดได้	37
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	38
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์กับตำแหน่งที่วัดได้	39
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของสารละลายแอลกอฮอล์กับตำแหน่งที่วัดได้	40
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์	41

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันการพัฒนาด้านวิทยาการมีแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านแสงอย่างรวดเร็ว และแพร่หลาย ทำให้เกิดความสนใจศึกษาคุณสมบัติต่างๆของแสง ทั้งนี้เทคโนโลยีทางด้านแสงยังมีความสำคัญ เนื่องจากแสงมีคุณสมบัติในการหักเหได้ในตัวกลางต่างๆ จึงทำให้เกิดการประยุกต์การนำแสงมาใช้ในตรวจสอบสารละลาย ทั้งในด้านฟิสิกส์ และเคมี โดยอาศัยค่าดัชนีหักเหของแสง

ดังนั้นจึงเกิดความสนใจที่จะประดิษฐ์เครื่องรีแฟรค โทมิเตอร์ต้นแบบขึ้น โดยอาศัยหลักการหักเหของแสง ทั้งเพื่อใช้ในการศึกษา เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ และวิจัยสำหรับนักศึกษาในระดับอุดมศึกษา

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้าง คุณสมบัติ และหลักการการทำงานของเครื่องรีแฟรค โทมิเตอร์
2. สามารถนำเครื่อง รีแฟรค โทมิเตอร์ ไปประยุกต์ใช้งานได้จริง
3. สามารถนำความรู้และเทคนิคที่ได้มานำไปประยุกต์ใช้ได้
4. พัฒนารูปแบบ รีแฟรค โทมิเตอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ทางฟิสิกส์และเคมี
5. สามารถสร้างเครื่อง รีแฟรค โทมิเตอร์ ต้นแบบได้

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

สำหรับขอบเขตในการศึกษาและพัฒนารูปแบบของเครื่อง รีแฟรค โทมิเตอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในทางฟิสิกส์และเคมี แบ่งออกเป็น ส่วน ๆ ได้ดังนี้

- 1.3.1 ส่วนทฤษฎี จะเป็นการศึกษาค่าดัชนีหักเหของสารละลายชนิดต่าง ๆ เพื่อนำมาคำนวณหาคุณสมบัติของสารละลาย
- 1.3.2 ส่วนของเทคนิคการวัด การวัดค่าดัชนีหักเหจะวัดโดยใช้เครื่อง รีแฟรค โทมิเตอร์
- 1.3.3 ส่วนของผลและการสรุป เราทำการรวบรวมผลการทดลองจากตัวอย่างสารละลายต่าง ๆ และนำมาคำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่เราต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ระยะเวลาดำเนินการ

มิถุนายน	2548	ศึกษาหลักการในการทำงานของของเครื่องรีเฟรคโตมิเตอร์
กรกฎาคม	2548	สร้างเครื่องจำลอง
ตุลาคม	2548	สร้างเครื่องจำลอง
พฤศจิกายน	2548	ศึกษาการทำงานและข้อผิดพลาดต่าง ๆ จากเครื่องจำลอง
ธันวาคม	2548	สร้างเครื่องต้นแบบ
มกราคม	2549	ทำการวัดและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
กุมภาพันธ์	2549	ตรวจสอบความถูกต้อง
มีนาคม	2549	จัดทำเอกสารประกอบและตรวจสอบความถูกต้องครั้งสุดท้าย

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.) สามารถใช้เครื่องรีเฟรคโตมิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง
- 2.) เรียนรู้ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องรีเฟรคโตมิเตอร์ ได้
- 3.) สามารถนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี
- 4.) ฝึกความรับผิดชอบ ความเรียบร้อยของการทำงานที่ใช้เวลานาน
- 5.) ฝึกการทำงานกับผู้อื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

รีแฟรคโตมิเตอร์ หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการหักเหของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลางหนึ่ง โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดความต่างของตัวแปรที่มีผล เช่น มุม ความเร็ว หรือดัชนีหักเหของแสงของตัวกลาง เป็นต้น



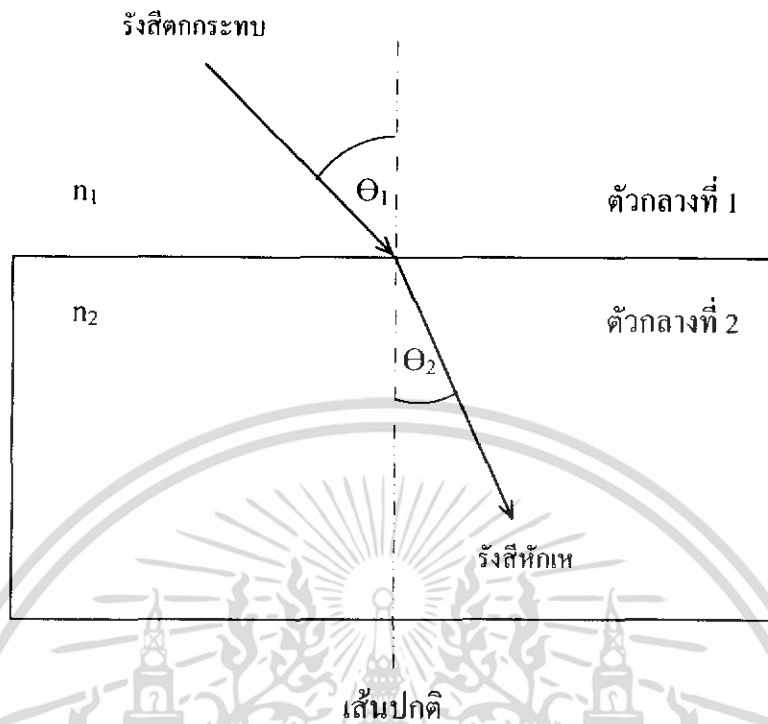
เมื่อนำหลอด ๆ หนึ่งจุ่มลงในแก้วน้ำที่มีน้ำอยู่ จะสังเกตเห็นการโค้งงอของหลอด และถ้า น้ำที่มีอยู่ในแก้วมีน้ำตาลละลายอยู่ หลอดก็จะโค้งงอมากขึ้น (อธิบายดังรูปที่ 2.1) ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การหักเหของแสง (refraction) รีแฟรคโตมิเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการหักเหของแสงนี้ โดยหลักการทำงานของ รีแฟรคโตมิเตอร์ จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสาร (เช่น สารละลายของน้ำตาลในน้ำ) และจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่น

#### 2.1 การหักเหของแสง (Refraction)

ดัชนีการหักเหหรือดัชนีการหักเหของตัวกลางใด ๆ (optical medium) นิยามว่า “อัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในสุญญากาศต่อความเร็วของแสงในตัวกลาง” ถ้าให้  $n$  เป็นดัชนีการหักเหของตัวกลางใด ๆ

$$n = \frac{c}{V} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการหักเหของแสง

เมื่อแสงเดินทางผ่าน ตัวกลาง สองตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกันคือ  $n_1$  และ  $n_2$  โดยที่รังสีตกกระทบทำมุมกับเส้นแนวฉากของรอยต่อระหว่างสองตัวกลางเป็นมุม  $\theta_1$  เรียกว่ามุมตกกระทบจะเกิดการหักเห หรือมีการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ โดยที่ทิศทางก็จะทำมุม  $\theta_2$  ทำกับเส้นแนวฉาก โดยที่การเปลี่ยนแปลงของทิศทางหักเหเกิดขึ้นเนื่องจากตัวกลางทั้งสอง มีความเร็วของแสงของสองตัวกลางไม่เท่ากัน โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบมุมหักเหและความเร็วในสองตัวกลางเป็นไปตามกฎการหักเหดังสมการกฎของสเนล

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

หรือ

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.3)$$

เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของสารละลายเปลี่ยนตามความเข้มข้นของสารละลายดังนั้น เราจึงสามารถวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายได้โดยใช้หลักการหักเหของแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

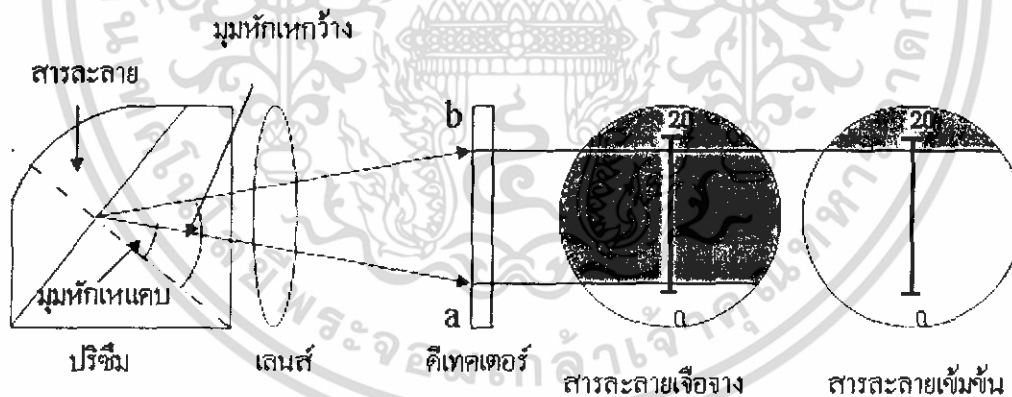
## 2.2 หลักการของ รีแฟรคโตมิเตอร์

การตรวจสอบค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) สามารถทำได้ 2 ระบบ คือ ระบบการส่องผ่านของแสง (transparent refractometer) และ ระบบการสะท้อนของแสง (reflection refractometer) โดย รีแฟรคโตมิเตอร์ ที่ใช้ระบบของการส่องผ่าน คือ แอนด์เฮลด์รีแฟรคโตมิเตอร์ (ไม่จำเป็นต้องเป็นแอนด์เฮลด์ก็ได้) และ อะเบร์รีแฟรคโตมิเตอร์ ส่วนรีแฟรคโตมิเตอร์ ที่ใช้ระบบของการสะท้อนของแสง คือ คิจิตอลรีแฟรคโตมิเตอร์

### 2.2.1 ระบบการส่องผ่าน

ระบบการตรวจสอบสำหรับ รีแฟรคโตมิเตอร์ สรุปลงได้ดังนี้

- 1) ในรูปที่ 2.3 การตรวจสอบจะใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์หักเหของแสงบนรอยต่อระหว่างปริซึมมากกว่าของสารละลายตัวอย่าง
- 2) ถ้าตัวอย่างเจือจาง จะทำให้มุมของการหักเหแคบ (ตำแหน่ง a รูปที่ 2.3 ) เนื่องจากมีความแตกต่างของดัชนีหักเหของแสงระหว่างปริซึมกับสารละลายตัวอย่างมาก แต่ในทางตรงกันข้าม
- 3) ถ้าตัวอย่างเข้มข้น มุมของการหักเหจะกว้าง (ตำแหน่ง b รูปที่ 2.3 )

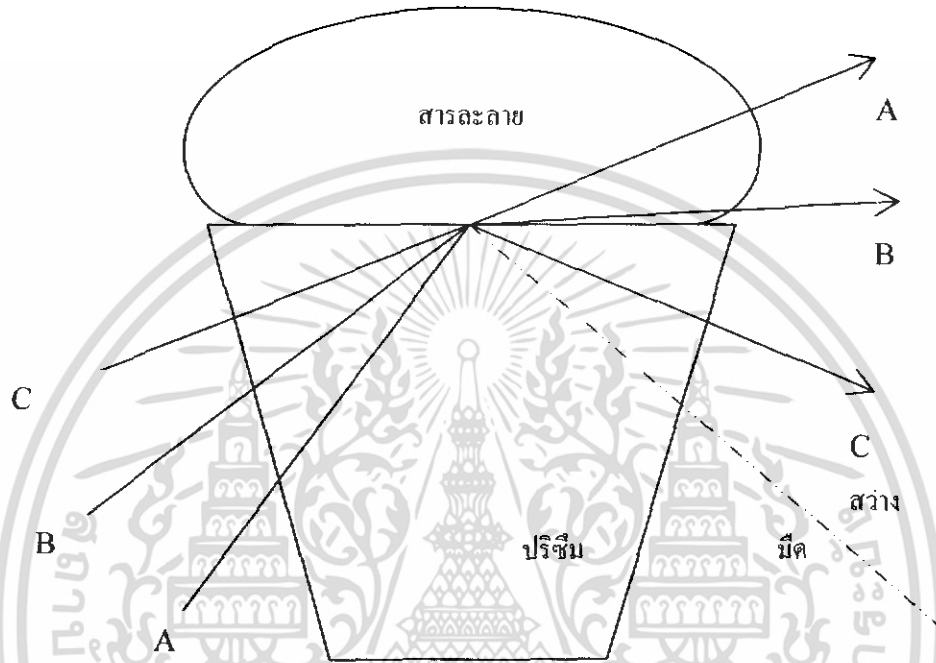


รูปที่ 2.3 แสดงการทำงานของรีแฟรคโตมิเตอร์ระบบการส่องผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 ระบบการสะท้อน

ระบบการตรวจสอบสำหรับ ดิจิตอลรีเฟรคโตมิเตอร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้



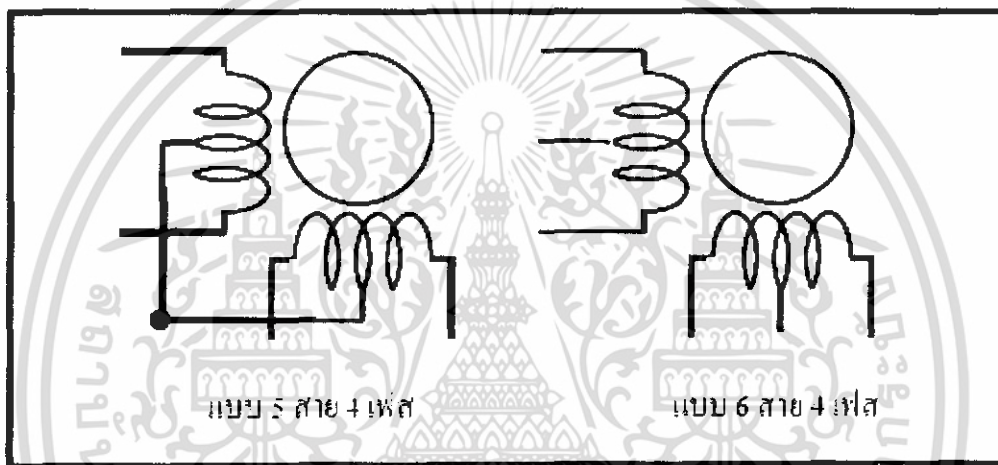
รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของรีเฟรคโตมิเตอร์ระบบการสะท้อน

ในรูปที่ 2.4 แสง A ที่ตกกระทบทางด้านล่างซ้ายของปริซึมจะไม่สะท้อนกลับบริเวณรอยต่อแต่จะทะลุผ่านสารละลายตัวอย่าง แสง B จะสะท้อนตามรอยต่อและขนานกับพื้นผิวสัมผัสไปทางด้านขวา และแสง C มีมุมตกกระทบที่มากกว่าที่จะทะลุผ่านสารละลายตัวอย่างไปได้หรือก็คือมีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤติ จึงทำให้แสงที่ตกกระทบสะท้อนกลับหมดในทางด้านขวา

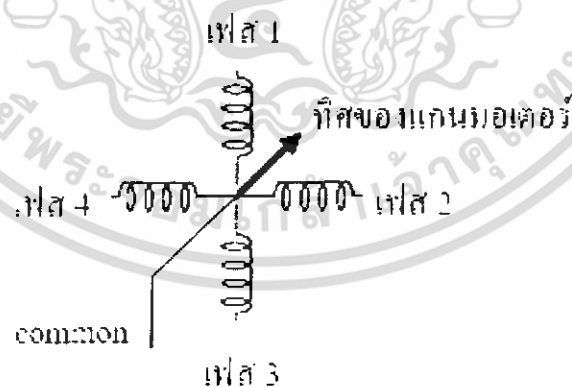
ผลที่ได้คือจะเกิดบริเวณ B ที่เป็นทั้งส่วนมืดและส่วนที่สว่างตรงบริเวณเส้นประ (B') ของรูปที่ 2.4 ในรูป มุมของการสะท้อนบริเวณเส้นรอยต่อจะเป็นอัตราส่วนกับดัชนีหักเหของแสง ตำแหน่งของเส้นรอยต่อระหว่างส่วนมืดกับส่วนสว่างจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์และถูกเปลี่ยนไปเป็นค่าดัชนีหักเหของแสง

### 2.3 ทฤษฎีสเตปปีงมอเตอร์

สเตปปีงมอเตอร์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนในปัจจุบันสเตปมอเตอร์ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายมากที่สุด และหาได้ง่ายคือ สเตปปีงมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ (uni-polar stepper motor) มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์



รูปที่ 2.6 แสดงการวางของขดลวดแต่ละเฟสของสเตปปีงมอเตอร์

สเตปปีงมอเตอร์แบบนี้มีการพันขดลวด 2 ขด บนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ แต่ละขด แบ่งเป็น 2 เฟส รวมมอเตอร์ทั้งตัวจะมี 4 เฟส คือ เฟส 1, 2, 3 และ 4 มีการต่อสายออกมาจากขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละขดเพื่อจ่ายไฟเลี้ยง ทำให้สเตปป์มอเตอร์แบบนี้มีทั้งแบบ 5 สายและ 6 สาย ถ้าเป็นแบบ 5 สาย จะเป็นการนำสายไฟเลี้ยงของขดลวดทั้งสองมาต่อรวมกันเป็นสายเดียว

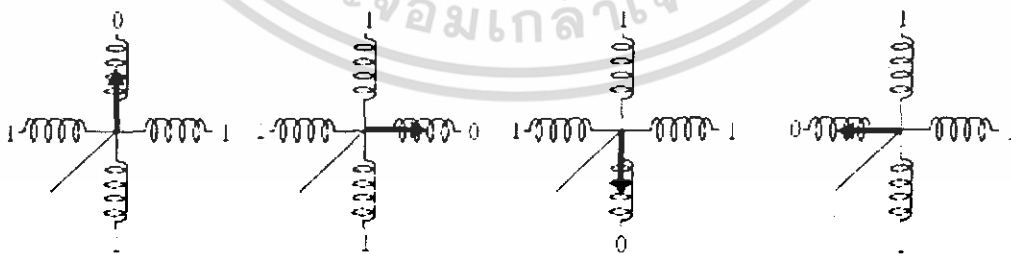
การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปแต่ละสเตปป์ทำได้โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังขดลวดที่ละขดบนสเตเตอร์ ซึ่งต้องป้อนเป็นแบบซีควเอนเชียลในรูปแบบที่ถูกต้องด้วย สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือ แบบหนึ่งเฟส, แบบ 2 เฟส (two phase) และแบบครึ่งสเตป (half step)

แบบหนึ่งเฟสหรือแบบฟูลสเตป (full step) เป็นการกระตุ้นที่มีรูปแบบง่ายที่สุด โดยทำการกระตุ้นขดลวดทีละขดในเวลาหนึ่งไล่เรียงติดกันไป เช่น เริ่มต้นที่ขดที่ 1,2,3,4 แล้ววนกลับมาขดที่ 1วนไปเรื่อยๆ หรือเริ่มที่ขดที่ 1 แล้วย้อนไปยังขดที่ 4,3,2 แล้วกลับมาขดที่ 1 อีกครั้ง ซึ่งทำให้ทิศทางของการหมุนสวนกันในการกระตุ้นรูปแบบนี้จึงมีขดลวดเพียงขดเดียวในเวลาหนึ่งที่ถูกกระตุ้นเท่านั้นวงจรกระตุ้นแบบเวฟจึงมีราคาถูกและง่าย ขั้นตอนการทำงานต่างๆ แสดงดังในตาราง

2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	-	ทำงาน	-	-
3	-	-	ทำงาน	-
4	-	-	-	ทำงาน



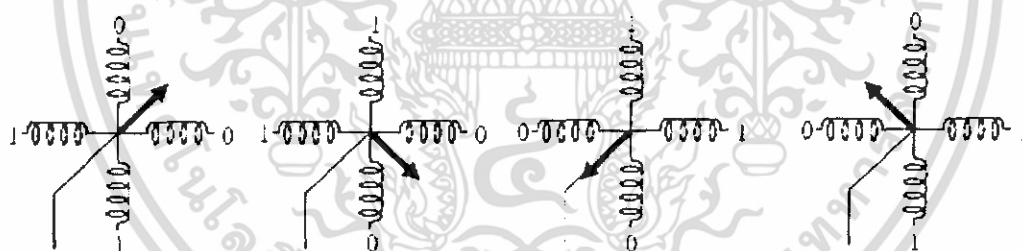
รูปที่ 2.7 แสดงการหมุนของแกนมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส

แบบ 2 เฟสเป็นการกระตุ้นซึ่งคล้ายกับแบบหนึ่งเฟสแต่การกระตุ้นแบบนี้จะทำการกระตุ้นโดยจ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ขดลวด 2 ขด ที่อยู่ใกล้กันในเวลาเดียวกัน และเรียงติดกันไปเช่นเดียวกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเวฟ ดังตัวอย่าง ขดลวดชุดแรกที่ถูกระตุ้นจะเป็นขดที่ 1 และ 2 ตามด้วยการกระตุ้น ขดที่ 2 และ 3 ต่อไปเป็นขดที่ 3 และ 4 ถัดไปเป็นขดที่ 4 และ 1 แล้วกลับมาที่ขดที่ 1 และ 2 วนไปตามลำดับ เช่นนี้ หรือ เริ่มที่ขด 1 และ 4 ตามด้วยขดที่ 4 และ 3 ถัดไปเป็นขดที่ 3 และ 2 ต่อไปเป็นขดที่ 2 และ 1 แล้ววน กลับมาที่ขดที่ 1 และ 4 ทิศทางการหมุนจะสวนทางกัน การกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์แบบนี้ สามารถเพิ่มแรงบิดได้มากกว่าแบบเวฟ โรเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยแรงดึงอย่างเต็มแรงจาก 2 ขดลวดที่ ถูกระตุ้นพร้อมกัน และต่อไปด้วยแรงดึงจากอีก 2 ขดลวดถัดไป สำหรับข้อเสียคือการกระตุ้นแบบนี้ ต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น ขั้นตอนการทำงานต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์  
เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบสองเฟส

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	ทำงาน	-	-
2	-	ทำงาน	ทำงาน	-
3	-	-	ทำงาน	ทำงาน
4	ทำงาน	-	-	ทำงาน



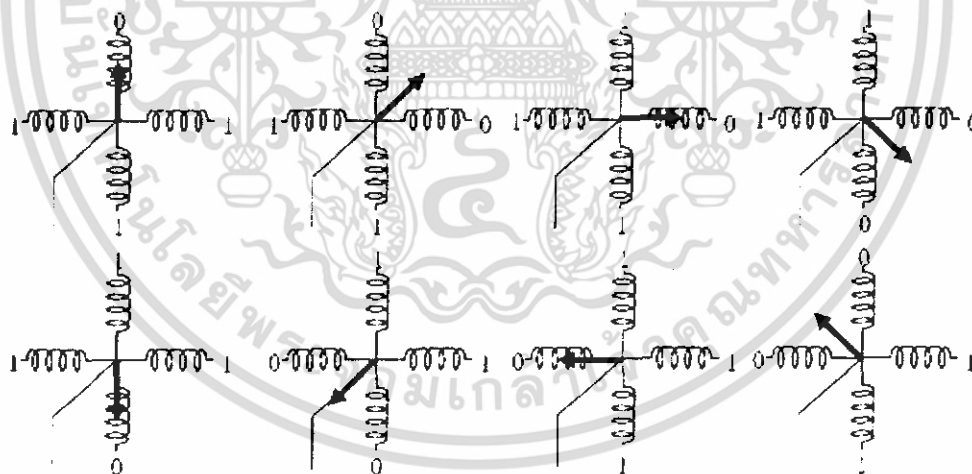
รูปที่ 2.8 แสดงการหมุนของแกนมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบสองเฟส

แบบครึ่งสเตปเป็นรูปแบบที่ผสมผสานระหว่างการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟสและแบบ 2 เฟส เพื่อเพิ่มจำนวนของสเตปต่อรอบอีกเท่าตัวหนึ่ง ในระบบนี้จะทำการกระตุ้นขดลวดเรียงกันไปเป็น ลำดับดังนี้ เริ่มจากขดลวดที่ 1,1 และ 2,2,2 และ 3,3,3 และ 4,4,4 และ 1 แล้ววนกลับมายังขดลวดที่ 1 แรงบิดที่ได้จากการกระตุ้นแบบนี้จะเพิ่มมากขึ้นอีก เพราะช่วงสเตปป์มีระยะสั้นลง แต่ละสเตปป์เกิด แรงดึงจากขดลวด 2 ขดที่ถูกระตุ้นพร้อมกัน ความถูกต้องของตำแหน่งมีเพิ่มมากขึ้น แต่ต้องพึง ระวังไว้อีกประการหนึ่งว่า เมื่อกระตุ้นให้ทำงานในรูปแบบนี้จะต้องทำการหมุนถึง 2 สเตปป์ จึงจะได้

เท่ากับระยะเท่ากับ 1 สเตปเต็มของการควบคุมใน 2 แบบแรก สำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องใช้ขนาดเท่ากับแบบ 2 เฟสเป็นอย่างน้อย จึงจะเพียงพอ ขั้นตอนการทำงานต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์  
เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบครึ่งสเตป

ลำดับที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	ทำงาน	ทำงาน	-	-
3	-	ทำงาน	-	-
4	-	ทำงาน	ทำงาน	-
5	-	-	ทำงาน	-
6	-	-	ทำงาน	ทำงาน
7	-	-	-	ทำงาน
8	ทำงาน	-	-	ทำงาน



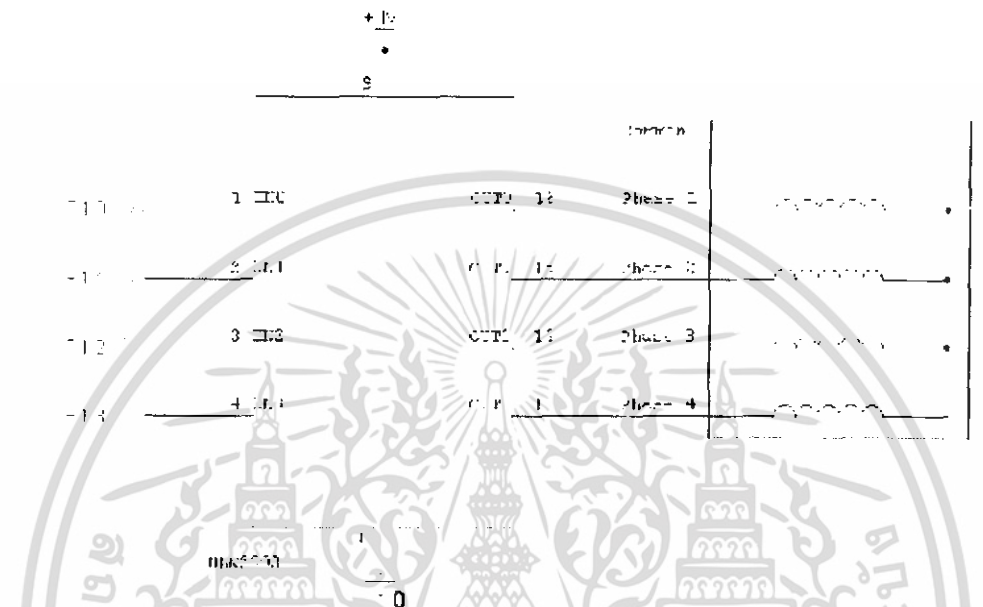
รูปที่ 2.9 แสดงการหมุนของแกนมอเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบครึ่งสเตป

### 2.3.1 วงจรขับสเตปिंगมอเตอร์

จากที่กล่าวมาข้างต้นในการควบคุมสเตปिंगมอเตอร์จะต้องมีการป้อนสัญญาณที่เป็น  
ซีแควเรนซ์ออกไป โดยหลังจากป้อนสัญญาณจะต้องคอยเวลา (Delay) จนกระทั่งสเตปिंगมอเตอร์  
หมุนไปเสร็จสิ้นแล้ว จึงจะสามารถส่งสัญญาณต่อไปได้ ซึ่งจะต้องมีภาคขับ (Driver Circuit) ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถจ่ายกระแสได้เพียงพอที่จะทำให้สเตปป์มอเตอร์หมุนไปได้ ซึ่งในวงจรภาคขั้วนี้เราอาจใช้ ไอซีแบบ Open Collector เช่น ULN2003 , ULN2803 เป็นต้น หรืออาจใช้ Power Transistor หรือ Power MOSFET เช่น BD139 , IRF510 เป็นต้น



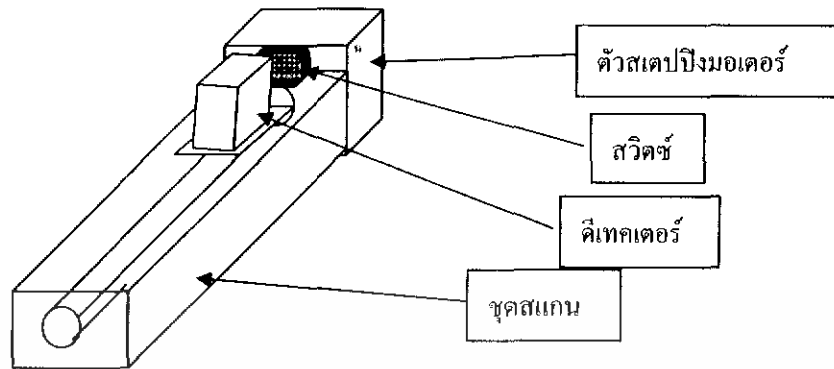
รูปที่ 2.10 แสดงวงจรขับสเตปป์มอเตอร์โดยใช้ไอซี Driver เบอร์ ULN2003

### 2.3.2 ส่วนการทำงานของตัวสเตปป์มอเตอร์ (Stepping Motor)

เมื่อมีสัญญาณมาวางเพื่อทำการตรวจสอบตำแหน่งที่ลำแสงเกิดการหักเหมาตกกระทบ สเตปป์มอเตอร์จะทำการหมุนไปที่ละสเตปจนวัดตำแหน่งของลำแสงเสร็จ และจะหมุนกลับมา ยังที่จุดเริ่มต้นใหม่โดยมีสวิทช์ตรวจสอบว่าดีเทกเตอร์ได้กลับมายังจุดเริ่มต้นแล้ว

### 2.3.3 ส่วนการทำงานของตัวตรวจวัด (Detector)

ในส่วนของตัวตรวจวัดติดตั้งไว้บนชุดสแกนต่อไว้กับตัวสเตปป์มอเตอร์ เมื่อตัวสเตปป์ มอเตอร์หมุน จะทำให้ตัวตรวจวัดสามารถเคลื่อนที่เพื่อตรวจสอบว่าลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเกิดการหักเหที่ตำแหน่งใด



รูปที่ 2.11 แสดงชุดสแกน

#### 2.4 ส่วนการทำงานของตัวเปรียบเทียบ (Comparator)

วงจรถือเปรียบเทียบจะทำการตรวจสอบว่ามีระดับแรงดันไฟฟ้าจากตัวตรวจวัดมีค่าเท่ากับตอนที่ตัวตรวจวัดได้วัดแสงหรือไม่ ถ้ามีระดับแรงดันเท่ากับตอนที่ตัวตรวจวัดได้รับแสง จะให้แรงดันเอาต์พุตออกมา 5 โวลต์ แต่ถ้าระดับแรงดันมีค่าเท่ากับตอนที่ตัวตรวจวัดไม่ได้รับแสง จะให้แรงดันเอาต์พุตออกมา 0 โวลต์ วงจรนี้จะรวมอยู่ในระบบ ไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 2.5 การเปรียบเทียบองศาที่หมุนกับระยะทางของสเกลปิงมอเตอร์

จากการคำนวณจะทำให้ทราบระยะห่างหนึ่งรอบของแกนหมุน โดยการวัดความละเอียดของเกลียว จากการวัดระยะห่างระหว่างเกลียวของแกนหมุน 1 เกลียว ซึ่งการทดลองสามารถวัดระยะห่างระหว่างเกลียว 1 เกลียว มีขนาดเท่ากับ 1 มิลลิเมตรแสดงว่า ในการหมุน 1 รอบจะทำให้ตัวคิเทคเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ 1 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาใช้หมุนแกนหมุนเป็นสเกลปิงมอเตอร์ที่เมื่อสเกลปิงมอเตอร์เคลื่อนที่ไป 1 เฟส จะมีมุมเปลี่ยนแปลงไป  $1.836^\circ$

ดังนั้น ความละเอียดที่คิเทคเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้จะคำนวณได้ดังนี้

$$360^\circ = 1 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$1.836^\circ = x \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น ถ้ามอเตอร์หมุนไปหนึ่งเฟส จะเท่ากับ ระยะ x มิลลิเมตร

$$x = \frac{1.836^\circ}{360^\circ} = 0.0051 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น ระยะ x เท่ากับ 0.0051 มิลลิเมตร ซึ่งหมายถึง เครื่องมือนี้จะสามารถวัดขนาดได้เล็กมากที่สุดเท่ากับ 5.1 ไมโครเมตร แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดจากตัวคิเทคเตอร์ ซึ่งมีความกว้างของพื้นที่ที่ใช้ในการรับแสงมีขนาดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร จึงทำให้เครื่องมือมีความละเอียดลดลง คือสามารถวัดวัตถุที่มีขนาดเล็กที่สุดเพียง 1 มิลลิเมตร

## บทที่ 3

### การวิจัยและการดำเนินการ

#### 3.1 การวัดค่ามุมยอดของปริซึม และค่าดัชนีหักเหของปริซึม

##### วิธีการหาค่ามุมยอดของปริซึม



- ปรับสเปกโทรมิเตอร์ให้พร้อมสำหรับการใช้
- หามุมยอดของปริซึมโดยวางมุมยอดนั้นเข้าหาคอลลิเมเตอร์ดังรูปที่ 5 หาดำแหน่งแนวแสงสะท้อนจากหน้าทั้งสองของปริซึม โดยใช้กล้องโทรทรรศน์บันทึกตำแหน่งทั้งสองแล้วไปหามุม  $x$  จากนั้นคำนวณหามุมยอดจากสมการ

$$x = 2\theta \quad (3.1)$$

ให้ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง โดยวางปริซึมในทิศทางต่างๆกันแล้วนำผลมาหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$\theta_D = \theta_1 + \theta_4 - (\theta_3 + \theta_2) \quad (3.4)$$

จะได้

$$\theta_4 = 45^\circ + \theta_D - \theta_1 \quad (3.5)$$

เมื่อยิงแสงเข้าที่รอยต่อแรกด้วยมุม  $\theta_1$  ทำกับเส้นปกติแล้วแสงจะหักเหในตัวปริซึมแล้วออกสู่อากาศด้วยมุม  $\theta_4$  เราต้องพิจารณาที่รอยต่อสุดท้ายเพราะว่าเราจะทราบค่า  $\theta_4$  จากสมการที่ 3.5 แล้วนำค่า  $\theta_4$  มาหาค่า  $n_p$  ตามสมการที่ 3.16

จากกฎของสเนล

$$\sin \theta_1 = n_p \sin \theta_2 \quad (3.6)$$

$$\sin \theta_4 = n_p \sin \theta_3 \quad (3.7)$$

จาก

$$\theta_2 + \theta_3 = 45^\circ \quad (3.8)$$

ดังนั้น

$$\sin \theta_4 = n_p \sin(45^\circ - \theta_2) \quad (3.9)$$

นำพจน์หลังมากระจายได้เป็น

$$n_p [\sin 45^\circ \cos \theta_2 - \cos 45^\circ \sin \theta_2] \quad (3.10)$$

โดยที่  $\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2}$  ดังนั้นจะได้สมการใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_p \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n_p^2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\sin \theta_1}{n_p} \right) \right] \quad (3.11)$$

นำกลับไปแทนค่าในสมการที่ 3.9 ได้เป็น

$$\sin \theta_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \theta_1} - \sin \theta_1 \right] \quad (3.12)$$

$$\sqrt{2} \sin \theta_4 = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \theta_1} - \sin \theta_1 \quad (3.13)$$

$$\left( \sqrt{2} \sin \theta_4 + \sin \theta_1 \right)^2 = n_p^2 - \sin^2 \theta_1 \quad (3.14)$$

$$\left( \sqrt{2} \sin \theta_4 + \sin \theta_1 \right)^2 + \sin^2 \theta_1 = n_p^2 \quad (3.15)$$

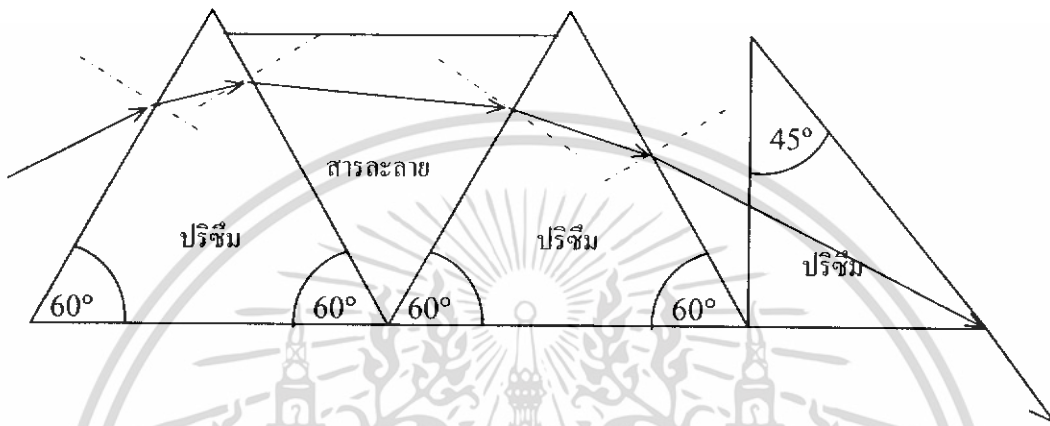
เพราะฉะนั้นจึงได้ค่า  $n_p$  เท่ากับ

$$n_p = \sqrt{\left( \sqrt{2} \sin \theta_4 + \sin \theta_1 \right)^2 + \sin^2 \theta_1} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สร้างเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ต้นแบบ

3.3 ศึกษาและคิดค้นสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ต้นแบบ

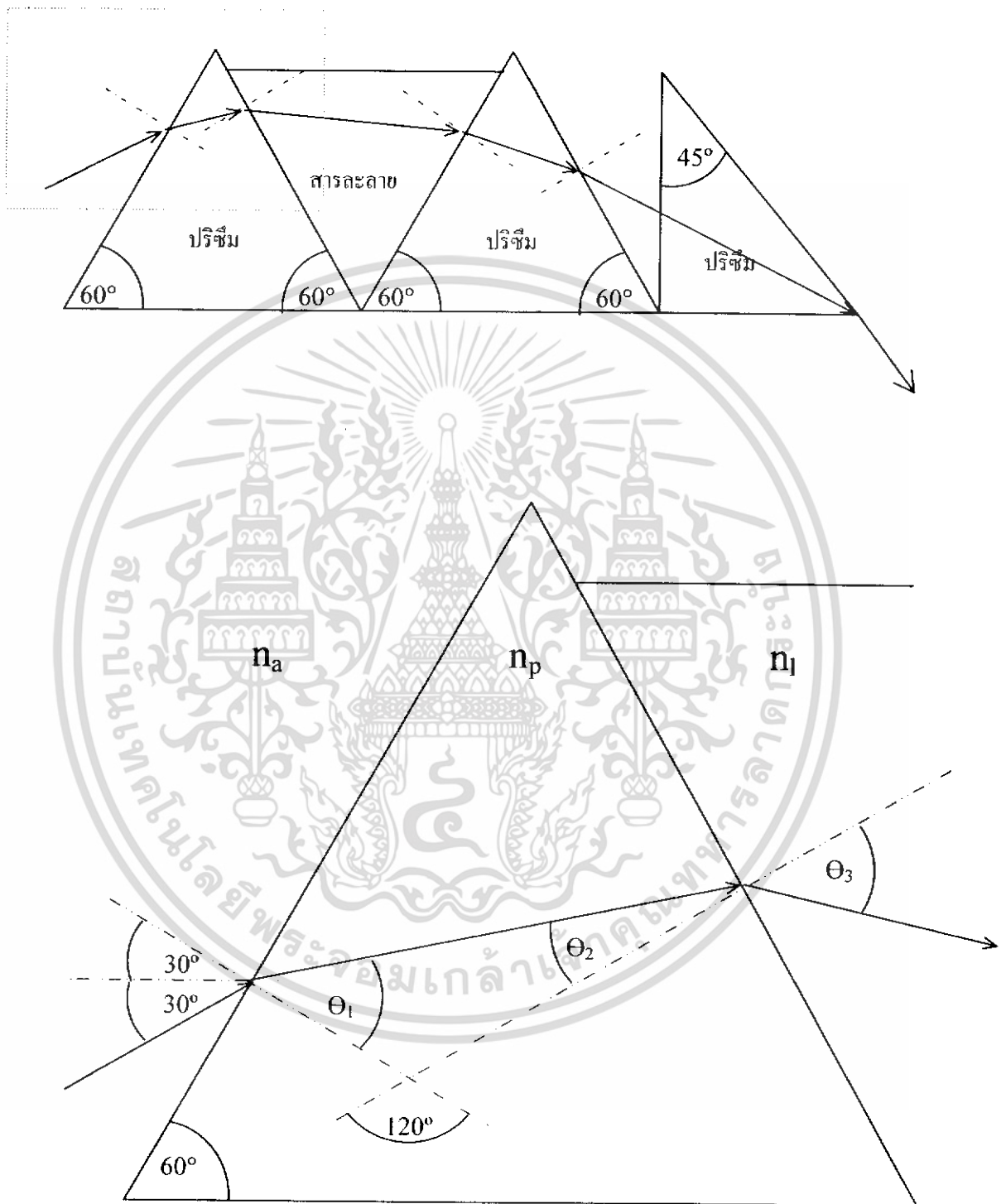


รูปที่ 3.3 แสดงหลักการหักเหของแสงในเครื่อง รีแฟรคโตมิเตอร์ ต้นแบบ

หลักการของเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ต้นแบบคือจะทำให้แสงเข้าที่ปริซึมตัวซ้ายทำมุมค่าหนึ่งกับเส้นปกติแล้วหักเหผ่านเข้ามาในตัวปริซึมตัวซ้ายแล้วหักเหผ่านเข้าไปในสารละลายแล้วหักเหผ่านเข้าไปในปริซึมตัวขวาแล้วหักเหผ่านออกสู่อากาศ จากนั้นจะใช้ปริซึมมุมฉากเป็นตัวสะท้อนให้แสงหักเหลงข้างล่างซึ่งจะบอกรายละเอียดในลำดับต่อไป

62299

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงการหักเหของแสงผ่านปริซึมตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่รอยต่อแรก โดยยิงแสงเข้าปริซึมที่มุม  $60^\circ$  องศา กับเส้นปกติแล้วใช้ กฎของสเนล คำนวณหาค่า  $\theta_1$  ออกมาแล้วนำไปพิจารณาหาค่า  $\theta_2$  จากมุมภายในสามเหลี่ยม แล้วแสงจะทะลุ ผ่านออกจากปริซึมไปยังสารละลายโดยเกิดการหักเหเข้าเส้นปกติโดยทำมุม  $\theta_3$  กับเส้นปกติ โดย แสดงดังสมการต่อไปนี้

จากกฎของสเนล

$$n_a \sin 60^\circ = n_p \sin \theta_1 \quad (3.17)$$

โดยที่

$$n_p = 1.5 \quad (3.18)$$

จะได้

$$\theta_1 = 35.3^\circ \quad (3.19)$$

จากมุมภายในสามเหลี่ยมจะได้

$$\theta_2 = 60^\circ - \theta_1 \quad (3.20)$$

$$\theta_2 = 60^\circ - 35.3^\circ \quad (3.21)$$

$$\theta_2 = 24.7^\circ \quad (3.22)$$

กฎของสเนลที่รอยต่อระหว่าง  $\theta_3$  กับ  $\theta_2$

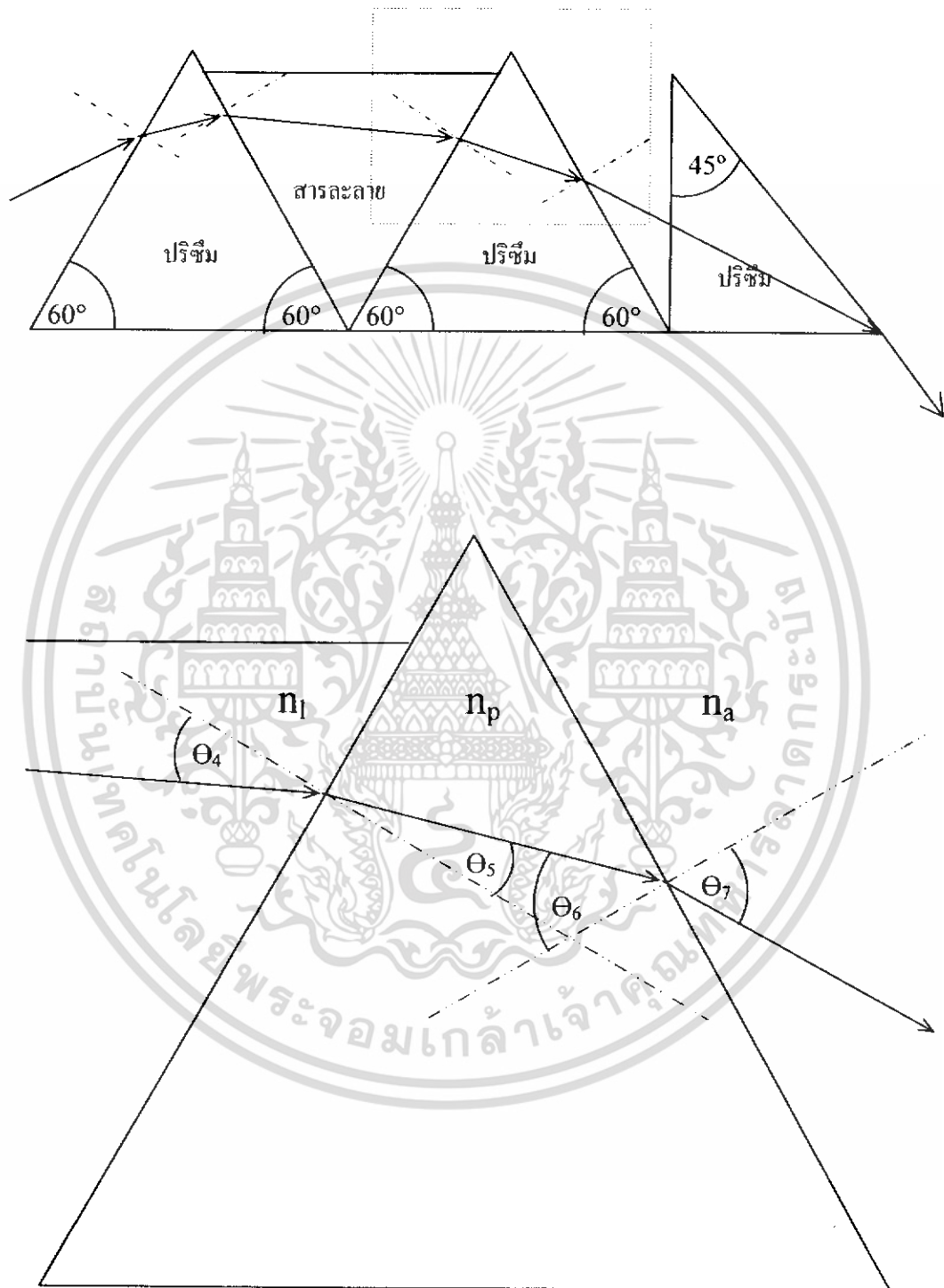
$$n_p \sin \theta_2 = n_l \sin \theta_3 \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin \theta_3 = \frac{n_p \sin \theta_2}{n_l} \quad (3.24)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงการหักเหของแสงผ่านปริซึมตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาย้อนกลับโดยคิดจากรอยต่อสุดท้ายที่ออกมาสู่อากาศโดยทำมุม  $\theta_7$  กับเส้นปกติของปริซึมจากการพิจารณารอยต่อนี้ทำให้ได้ค่ามุม  $\theta_6$  โดยแสดงดังสมการต่อไปนี้

กฎของสเนลระหว่าง  $\theta_6$  กับ  $\theta_7$  จะได้

$$n_d \sin \theta_7 = n_p \sin \theta_6 \quad (3.25)$$

โดยที่  $n_d = 1$  จะได้

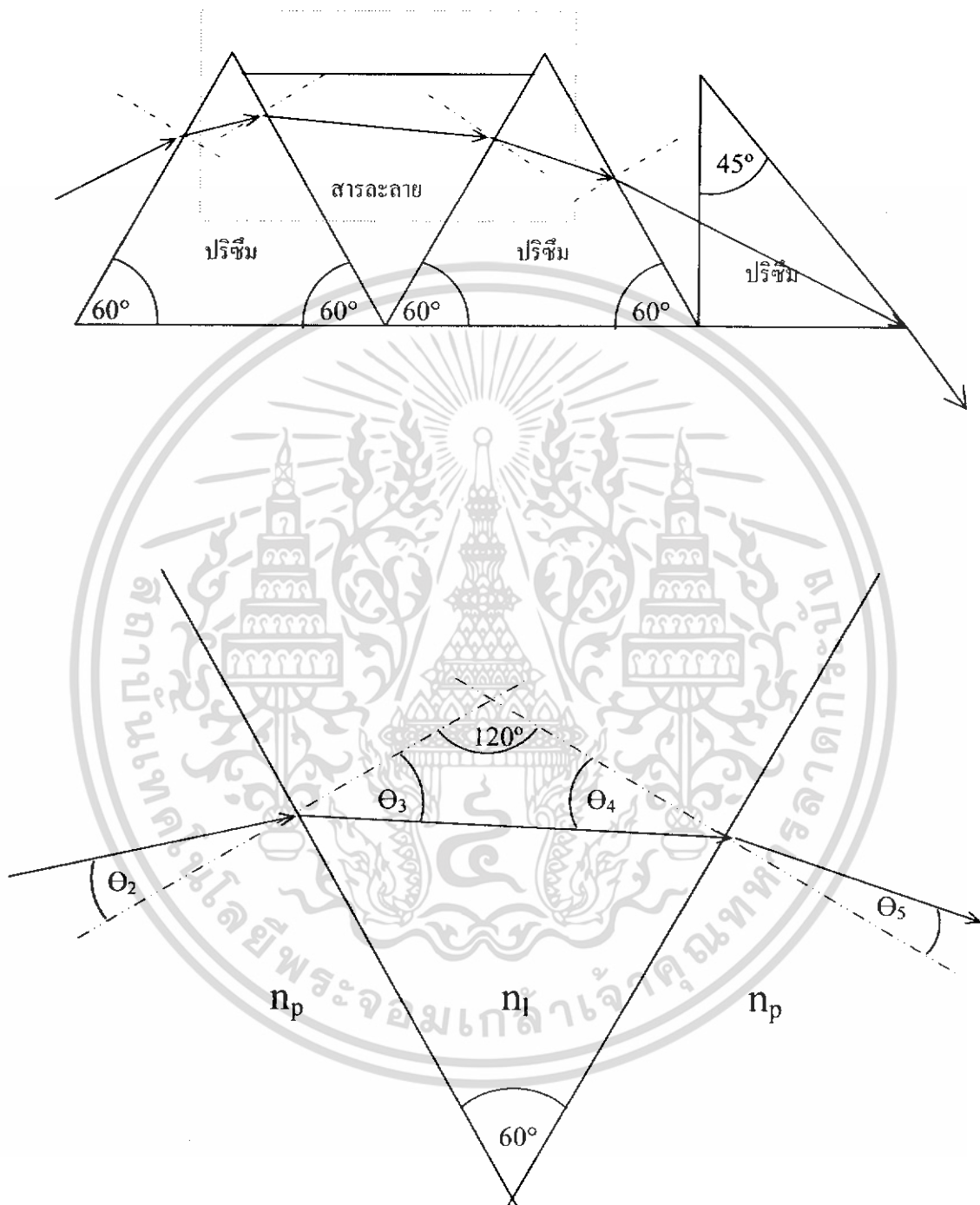
$$\sin \theta_7 = n_p \sin \theta_6 \quad (3.26)$$

$$\theta_6 = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_7}{n_p} \right) \quad (3.27)$$

จากมุมภายในสามเหลี่ยมจะได้

$$\theta_5 = 60^\circ - \theta_6 \quad (3.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงการหักเหของแสงระหว่างสารละลายกับปริซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากมุมภายในสามเหลี่ยมจะได้

$$\theta_4 = 60^\circ - \theta_3 \quad (3.29)$$

กฎของสเนลระหว่าง  $\theta_4$  กับ  $\theta_5$  จะได้

$$n_l \sin \theta_4 = n_p \sin \theta_5 \quad (3.30)$$

นำสมการที่ 3.28 กับ 3.29 แทนลงในสมการที่ 3.30 ได้เป็น

$$n_l \sin(60^\circ - \theta_3) = n_p \sin(60^\circ - \theta_6) \quad (3.31)$$

จาก

$$\sin(60^\circ - \theta_3) = \sin 60^\circ \cos \theta_3 - \cos 60^\circ \sin \theta_3 \quad (3.32)$$

และจากสูตร

$$\cos \theta_3 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_3} \quad (3.33)$$

นำสมการที่ 3.24 แทนลงในสมการที่ 3.33 แล้วนำไปแทนลงในสมการที่ 3.32 แล้วนำไปแทนในสมการที่ 3.31 และนำสมการที่ 3.27 ลงในสมการที่ 3.31 จะได้เป็น

$$n_l \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\sqrt{n_l^2 - 0.6268^2}}{n_l} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{0.6268}{n_l} \right) \right] = 1.5 \sin \left[ 60^\circ - \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_7}{1.5} \right) \right] \quad (3.34)$$

นำ  $n_l$  คูณเข้าไปในวงเล็บฝั่งซ้าย จะได้

$$\left( \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{n_l^2 - 0.6268^2} \right)^2 = \left[ 1.5 \sin \left\{ 60^\circ - \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_7}{1.5} \right) \right\} + 0.3134 \right]^2 \quad (3.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{3}{4}n_i^2 - 0.2946 = \left[ 1.5 \sin \left\{ 60^\circ - \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_7}{1.5} \right) \right\} + 0.3134 \right]^2 \quad (3.36)$$

จะได้สมการที่ใช้หาค่าดัชนีหักเหดังนี้

$$\therefore n_i = \sqrt{\frac{4}{3} \left\langle \left[ 1.5 \sin \left\{ 60^\circ - \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_7}{1.5} \right) \right\} + 0.3134 \right]^2 + 0.2946 \right\rangle} \quad (3.37)$$

ความหมายของตัวแปรต่างๆ

$n_i$  คือดัชนีหักเหของสารละลาย

$n_a$  คือดัชนีหักเหของอากาศ

$n_p$  คือดัชนีหักเหของปริซึม

$\theta_1$  คือมุมที่แสงเบี่ยงเบนเมื่อผ่านเข้าไปในปริซึมตัวที่ 1

$\theta_2$  คือมุมที่แสงตกกระทบภายในปริซึมตัวที่ 1

$\theta_3$  คือมุมที่แสงหักเหเมื่อผ่านเข้าไปในสารละลาย

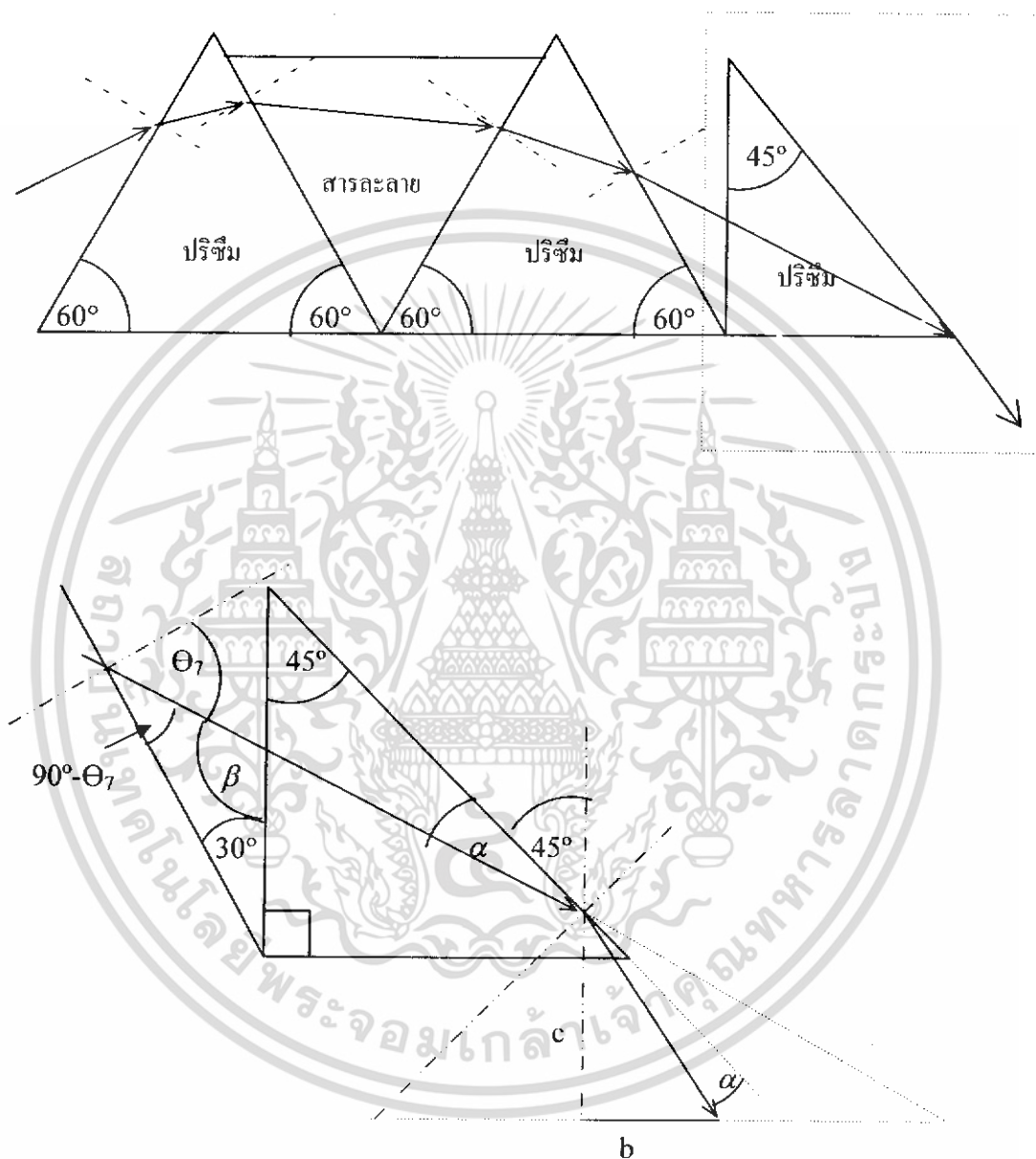
$\theta_4$  คือมุมที่แสงตกกระทบกับปริซึมตัวที่ 2

$\theta_5$  คือมุมที่แสงเบี่ยงเบนไปเมื่อเข้าสู่ปริซึมตัวที่ 2

$\theta_6$  คือมุมที่แสงตกกระทบภายในปริซึมตัวที่ 2

$\theta_7$  คือมุมที่แสงเบี่ยงเบนไปเมื่อออกสู่อากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 รูปแสดงการหักเหของแสงของปริซึมตัวสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแสงออกมาสู่อากาศแล้วทำการสะท้อนแสงให้หักเหลงสู่พื้นโดยการนำปริซึมตัวสะท้อนมาทำการหักเหให้แสงลงสู่พื้นเพื่อไม่ให้กินเนื้อที่ของเครื่องรีเฟรคโตมิเตอร์ให้มีขนาดใหญ่่มากโดยเราจะได้อ่า  $b$  และ  $c$  จากนั้นนำไปยอนหามุม  $\theta_7$  เพื่อที่จะนำมุม  $\theta_7$  ไปแทนในสมการที่ 3.36 เพื่อหาค่าดัชนีหักเหของสารละลายต่อไป

จากมุมภายใน 3 เหลี่ยม

$$180^\circ = 120^\circ - \theta_7 + \beta \quad (3.38)$$

จะได้

$$\beta = 60^\circ + \theta_7 \quad (3.39)$$

จากมุมภายใน 3 เหลี่ยม

$$\alpha + 45^\circ + (60^\circ + \theta_7) = 180^\circ \quad (3.40)$$

จะได้

$$\alpha = 75^\circ - \theta_7 \quad (3.41)$$

แทนค่า  $\alpha$  ลงในสมการ

$$90^\circ - \alpha = 90^\circ - 75^\circ + \theta_7 = 15^\circ + \theta_7 \quad (3.42)$$

จะได้

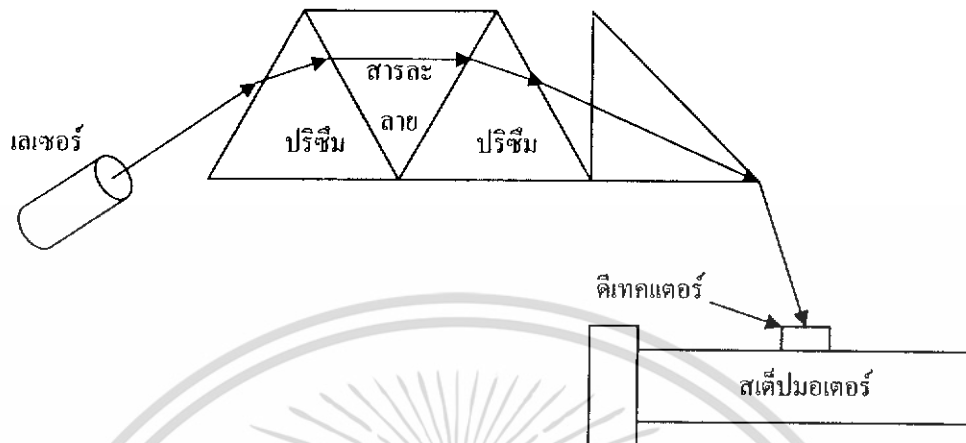
$$\tan(\theta_7 - 30^\circ) = \frac{b}{c} \quad (3.43)$$

ดังนั้น

$$\therefore \theta_7 = \tan^{-1}\left(\frac{b}{c}\right) + 30^\circ \quad (3.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ทำการทดลองเพื่อหาค่าดัชนีหักเหของสารละลายต่าง ๆ



รูปที่ 3.8 แสดงการเดินทางของแสงของเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ต้นแบบ

### 3.5 นำผลการทดลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย กับระยะทางการหักเหของแสง ค่าดัชนีหักเหของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

รูปอุปกรณ์ส่วนต่าง ๆ ที่ได้จัดทำขึ้น

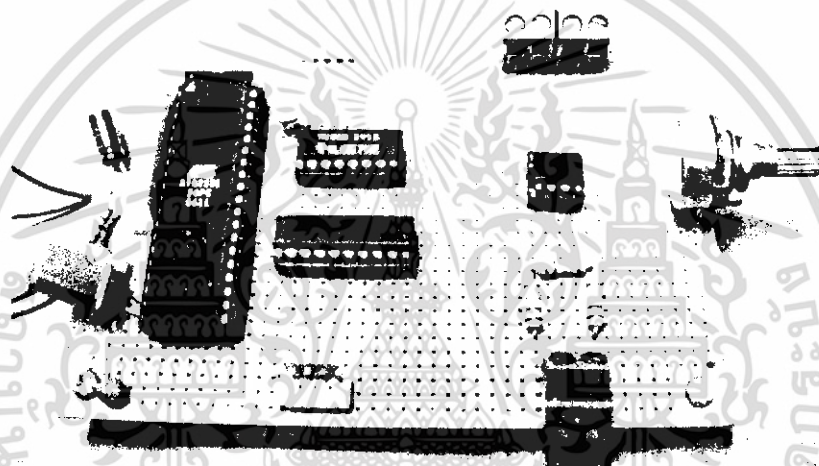


รูปที่ 4.3 สเตปมอเตอร์ติดตั้งตรวจสอบแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 เลเซอร์

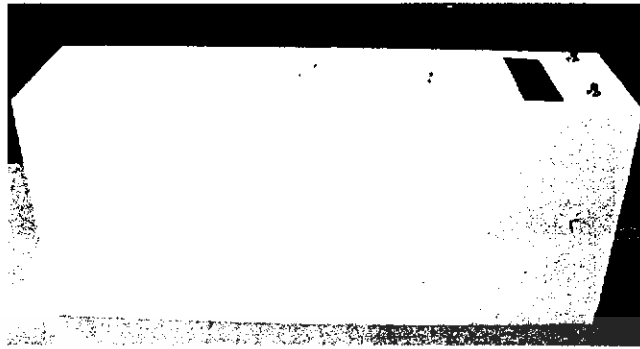


รูปที่ 4.5 วงจรขับเคลื่อนสเต็ปมอเตอร์



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ภายในที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปอุปกรณ์ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

ในที่นี้จะกล่าวถึงผลการทดลองเครื่องมือที่ได้สร้างขึ้น โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน  
ดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลองวัดค่าดัชนีหักเหและมุมยอดของปริซึม

##### 4.1.1 ผลการทดลองของมุมยอด

จากรูปที่ 3.1 เมื่อทำการทดลองแล้วจะได้ผลดังนี้ของมุมยอดดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่ามุมยอด

ครั้งที่	ตำแหน่งสะท้อน		มุม x (องศา)	มุมยอด θ (องศา)
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2		
1	259.71	140.2	119.51	59.755
2	220.1	103.05	117.05	58.325
3	222.6	103.85	118.75	59.375
4	240.6	119.4	121.2	60.6
5	250.43	130.68	119.75	59.875

ค่าเฉลี่ยมุมยอด =  $59.586 \approx 60$  องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลการทดลองหาค่าดัชนีหักเห

เราจะทำการทดลองดังรูปที่ 3.2 แล้วเพิ่มมุมไปที่ละ 2 องศาจะได้ผลดังตารางที่ 4.2 จากการทดลองหาค่าดัชนีหักเหของปริซึมแล้วทำการคำนวณตามสมการที่ 3.16 จะได้ผลดังตารางที่ 4.2 แล้วจะได้ค่าเฉลี่ยของค่าดัชนีหักเหของปริซึม

$$n_p = 1.496 \approx 1.5$$

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองการหาค่าดัชนีหักเหของปริซึมแล้วทำการคำนวณตามสมการที่ 3.5 จะได้ค่าของมุม  $\theta_4$  แล้วนำไปหาค่าดัชนีหักเหของปริซึมตามสมการที่ 3.16

มุมตกกระทบ(องศา)	มุมเบี่ยงเบน(องศา)	มุม D(องศา)	ดัชนีหักเห (n)
20	51.6	26.6	1.49
22	49.14	26.14	1.492
24	46.51	25.51	1.489
26	44.2	25.2	1.49
28	42.1	25.1	1.493
30	40.05	25.05	1.496
32	38	25	1.497
34	36	25	1.498
35	34.8	24.8	1.495
36	34.05	25.05	1.499
38	32	25	1.497
40	30.05	25.05	1.496
42	28.5	25.5	1.5
44	26.6	25.6	1.498
46	25.05	26.05	1.501
48	23.55	26.55	1.504
50	22.04	27.04	1.506

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการหักเหของแสงกับความเข้มข้นของสารละลาย

เราทำการวัดระยะทางที่แสงหักเหไปเพื่อนำมาหาค่าดัชนีหักเหของแสง แล้วนำไปสอบเทียบกับค่าการส่องผ่านของแสงเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารละลาย

### ผลการทดลอง

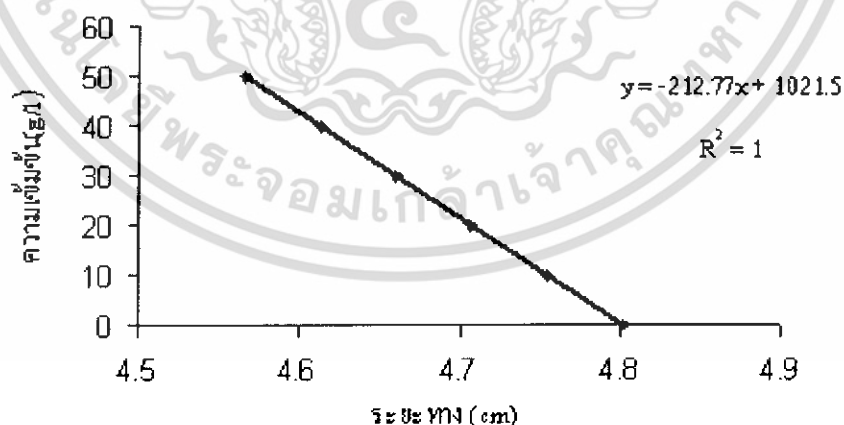
#### 4.2.1 น้ำตาลซูโครส

##### 4.2.1.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลซูโครสกับตำแหน่งของเลเซอร์

จากการทดลองจากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์จะได้ระยะทางออกมาแล้วนำไปบวกกับ 0.9 จะเป็นระยะ  $b$  ดังรูปที่ 3.7 แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองที่วัดค่าความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสในรูปของระยะทางที่วัดได้

ความเข้มข้นน้ำตาลซูโครส ( กรัม/ลิตร )	ระยะทางที่วัดได้ ( เซนติเมตร )
0	4.801
10	4.754
20	4.707
30	4.66
40	4.613
50	4.566



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสกับตำแหน่งที่วัดได้

จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าระยะทางจะแปรผกผันกับความเข้มข้นคือเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นระยะทางจะน้อยลง

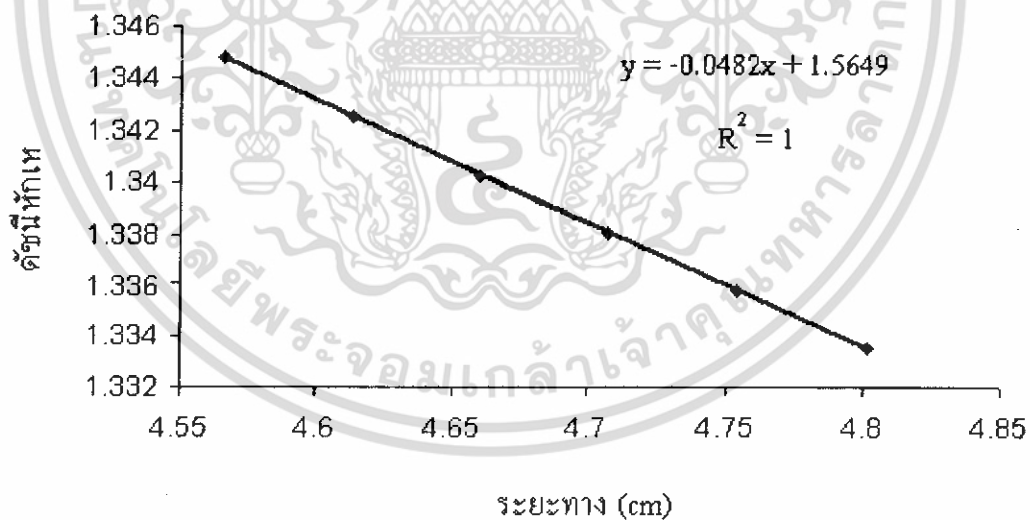
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเลนเซอร์กับดัชนีหักเหของน้ำตาเลนส์โครส

จากการทดลองระยะทางที่ได้จากการวัดนำมาคำนวณตามสมการที่ 3.36 จะได้ค่าดัชนีหักเหออกมาตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองระหว่างตำแหน่งของแสงของน้ำตาเลนส์โครสกับค่าดัชนีหักเหที่คำนวณได้

ระยะทางที่วัดได้ ( เซนติเมตร )	ดัชนีหักเห
4.801	1.333
4.754	1.335
4.707	1.338
4.66	1.340
4.613	1.342
4.566	1.344



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของน้ำตาเลนส์โครสกับตำแหน่งที่วัดได้

จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าระยะทางจะแปรผกผันกับค่าดัชนีหักเหคือเมื่อดัชนีหักเหมากขึ้นระยะทางจะน้อยลง

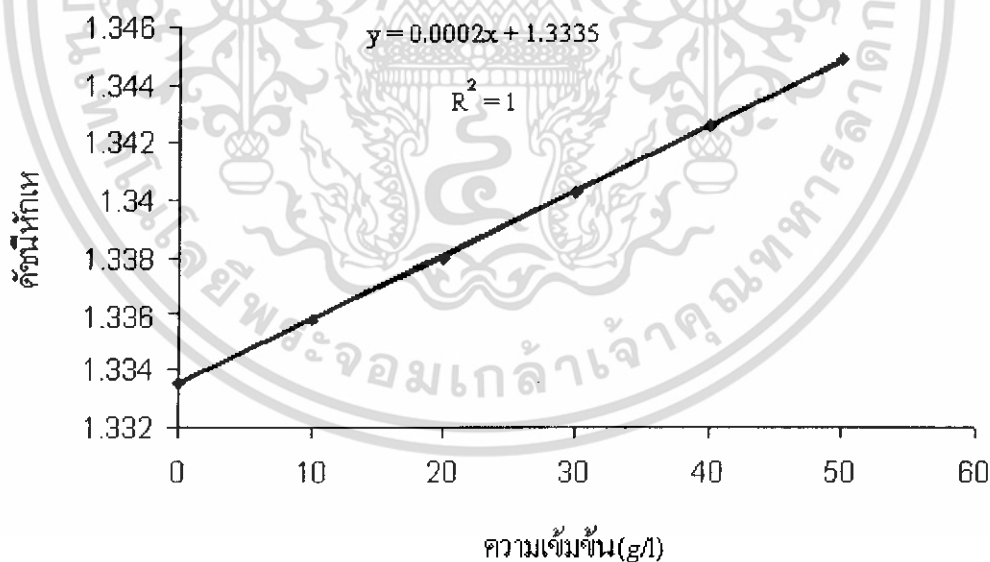
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหกับความเข้มข้นน้ำตาลซูโครส

จากการทดลองเมื่อนำค่าระยะทางที่วัดได้, ค่าดัชนีหักเห, ความเข้มข้นจากกราฟที่ 4.8 และ 4.9 มาทดสอบเทียบกันจะได้ค่าดัชนีหักเหที่ความเข้มข้นดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส

ความเข้มข้นน้ำตาลซูโครส ( กรัม/ลิตร )	ดัชนีหักเห
0	1.333
10	1.335
20	1.338
30	1.340
40	1.342
50	1.344



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส

จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นจะแปรผันตรงกับค่าดัชนีหักเหคือเมื่อค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าดัชนีหักเหก็จะมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

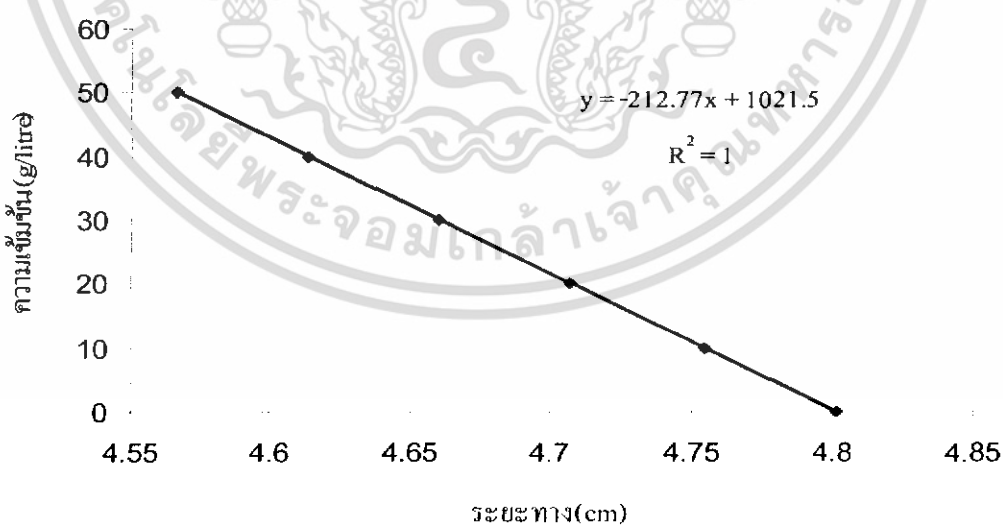
## 4.2.2 สารละลายโซเดียมคลอไรด์

### 4.2.2.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับตำแหน่งของเลนเซอร์

จากการทดลองจากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์จะได้ระยะทางออกมาแล้วนำไปบวกกับ 0.9 จะเป็นระยะ b ดังรูปที่ 3.7 แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองที่วัดค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในรูปของระยะทางที่วัดได้

ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( กรัม/ลิตร )	ระยะทางที่วัดได้ ( เซนติเมตร )
0	4.801
10	4.754
20	4.707
30	4.66
40	4.613
50	4.566



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับตำแหน่งที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

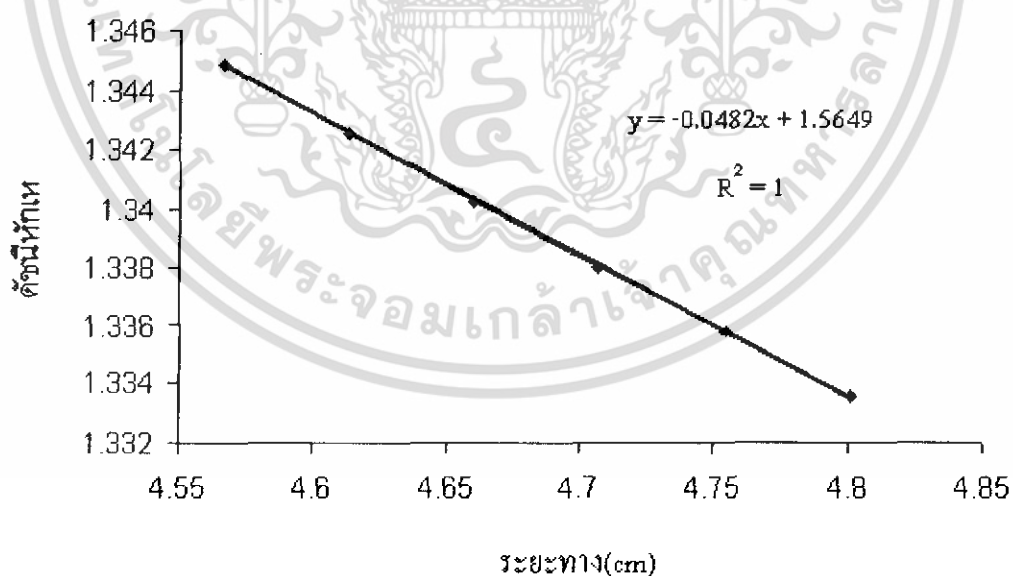
จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าระยะทางจะแปรผกผันกับความเข้มข้นคือเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นระยะทางจะน้อยลง

#### 4.2.2.2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเลเซอร์กับดัชนีหักเหสารละลายโซเดียมคลอไรด์

จากการทดลองระยะทางที่ได้จากการวัดนำมาคำนวณตามสมการที่ 3.36 จะได้ค่าดัชนีหักเหออกมาตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองระหว่างตำแหน่งของแสงของสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับค่าดัชนีหักเหที่คำนวณได้

ระยะทางที่วัดได้ ( เซนติเมตร )	ดัชนีหักเห
4.801	1.333
4.754	1.335
4.707	1.338
4.66	1.340
4.613	1.342
4.566	1.344



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับตำแหน่งที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

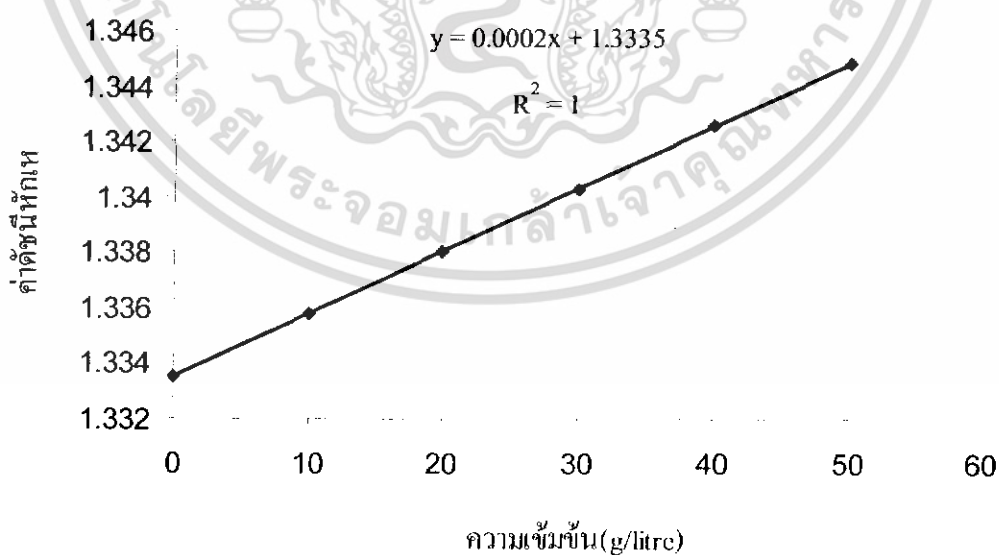
จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าระยะทางจะแปรผกผันกับค่าดัชนีหักเหคือเมื่อดัชนีหักเหมากขึ้นระยะทางจะน้อยลง

#### 4.2.2.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหกับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์

จากการทดลองเมื่อนำค่าระยะทางที่วัดได้, ค่าดัชนีหักเห, ความเข้มข้นจากกราฟที่ 4.11 และ 4.12 นำมาสอบเทียบกันจะได้ค่าดัชนีหักเหที่ความเข้มข้นดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ดัชนีหักเห	ความเข้มข้นน้ำตาลซูโครส ( กรัม/ลิตร )
1.333	0
1.335	10
1.338	20
1.340	30
1.342	40
1.344	50



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม

คลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นจะแปรผันตรงกับค่าดัชนีหักเหคือเมื่อค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าดัชนีหักเหก็จะมากขึ้นด้วย

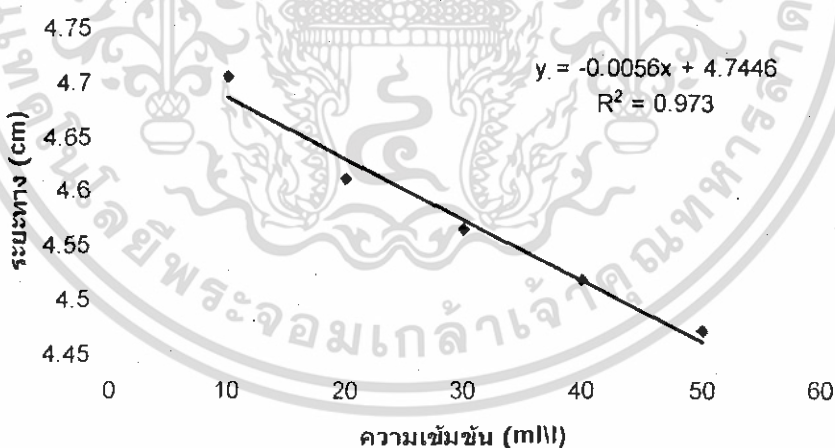
#### 4.2.3 สารละลายแอลกอฮอล์

##### 4.2.3.1 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์กับตำแหน่งของเลนเซอร์

จากการทดลองจากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์จะได้ระยะทางออกมาแล้วนำไปบวกกับ 0.9 จะเป็นระยะ  $b$  ดังรูปที่ 3.7 แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองที่วัดค่าความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์ในรูปของระยะทางที่วัดได้

ความเข้มข้นแอลกอฮอล์ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ระยะทางที่วัดได้ (เซนติเมตร)
10	4.707
20	4.613
30	4.566
40	4.519
50	4.472



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์กับตำแหน่งที่วัดได้

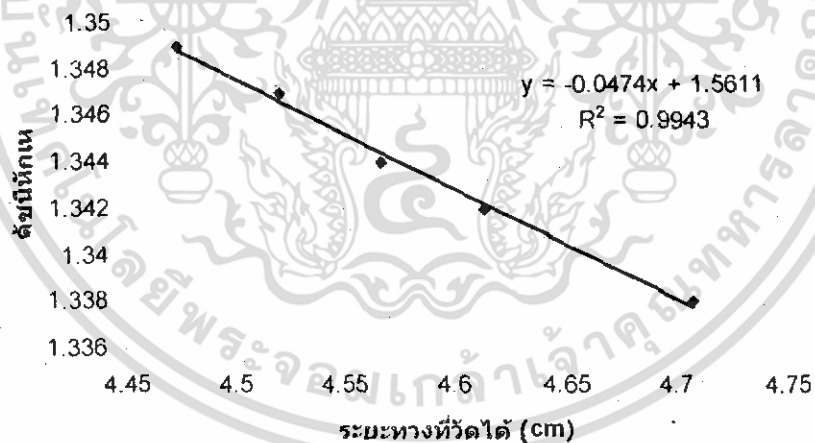
จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าระยะทางจะแปรผกผันกับความเข้มข้นคือเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นระยะทางจะน้อยลง

#### 4.2.3.2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเลขเซอร์กับดัชนีหักเหสารละลายแอลกอฮอล์

จากการทดลองระยะทางที่ได้จากการวัดนำมาคำนวณตามสมการที่ 3.36 จะได้ค่าดัชนีหักเหออกมาตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองระหว่างตำแหน่งของแสงของสารละลายแอลกอฮอล์กับค่าดัชนีหักเหที่คำนวณได้

ระยะทางที่วัดได้ (cm)	ดัชนีหักเห
4.707	1.338
4.613	1.342
4.566	1.344
4.519	1.347
4.472	1.349



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของสารละลายแอลกอฮอล์กับตำแหน่งที่วัดได้

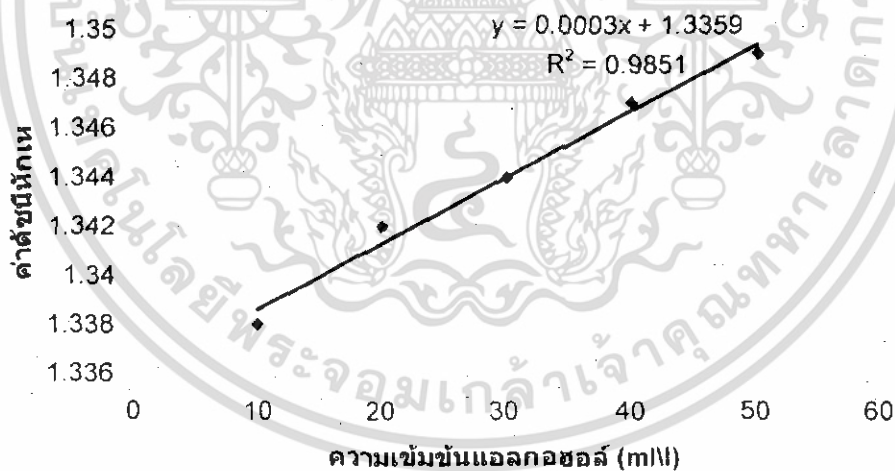
จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าระยะทางจะแปรผกผันกับค่าดัชนีหักเหคือเมื่อดัชนีหักเหมากขึ้นระยะทางจะน้อยลง

#### 4.2.3.3 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายแอลกอฮอล์กับค่าดัชนีหักเห

จากการทดลองเมื่อนำค่าระยะทางที่วัดได้, ค่าดัชนีหักเห, ความเข้มข้นจากกราฟที่ 4.14 และ 4.15 นำมาสอบเทียบกันจะได้ค่าดัชนีหักเหที่ความเข้มข้นดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลองระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์

ความเข้มข้นแอลกอฮอล์ (มิลลิลิตร/ลิตร)	ดัชนีหักเห
10	1.338
20	1.342
30	1.344
40	1.347
50	1.349



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์

จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นจะแปรผันตรงกับ  
ค่าดัชนีหักเหคือเมื่อค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่าดัชนีหักเหก็จะมากขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากการศึกษาโครงการพิเศษเรื่องการพัฒนารีเฟรคโตมิเตอร์ ได้ประดิษฐ์เครื่องรีเฟรคโตมิเตอร์ขึ้นเพื่อใช้ในการวัดค่าดัชนีหักเหของความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้หลักการหักเหของแสง และคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของสารละลาย และเครื่องสามารถแสดงค่าของข้อมูล 2 อย่างคือ ค่าดัชนีหักเหและ ค่าความเข้มข้น ออกทางหน้าจอ LCD ซึ่งทำให้สามารถหาค่าดัชนีหักเหของสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้โดยสะดวกและรวดเร็ว ค่าดัชนีหักเหของสารละลายตัวอย่างที่วัดได้จากเครื่องรีเฟรคโตมิเตอร์นี้จะมีค่าแม่นยำใกล้เคียงกับความเป็นจริง

#### 5.2 แนวทางในการพัฒนา

5.2.1 เปลี่ยนตัวดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดตำแหน่งเลเซอร์ให้เป็น CCD เนื่องจากค่าความละเอียดจะมีค่าเท่ากับขนาดของ  $\lambda$  พิกเซลของ CCD ซึ่งจะมีค่าความละเอียดในระดับ 10 ไมโครเมตร และประหยัดเวลาในการวัด

5.2.2 เปลี่ยนปริซึมให้มีคุณภาพมากขึ้น เพราะ ปริซึมที่ใช้ยู่มีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของสารละลาย จะทำให้ความสามารถในการแยกไม่ชัดเจนเท่าที่ควร

## เอกสารอ้างอิง

วารสารเพื่อห้องปฏิบัติการ วัด/ทดสอบ วิเคราะห์/วิจัย และควบคุมคุณภาพ LAB.TODAY ปีที่ 3  
ฉบับที่ 18 พฤษภาคม 2547

เครือวัลย์ คีตะจิตต์. 2528. ฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง QC 522

ผศ. นรินทร์ แนบชิด 2526 แสงประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัยรามคำแหง applied optics  
QC 401



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#include "c:\mc\8051io.h"
#include "c:\mc\8051reg.h"
#include "c:\mc\8051lcd.c"
```

```
register unsigned int num,step,step1,cound,size,size10,con,con10,n,n10,dis,dis10;
char *This =" Push start";
char *used =" X = ";
char *co =" C = ";
char *No =" N = ";
main()
{
    while(1)
    {
        P0=0x00;
        i_LCD();
        print_LCD(0x80,This);
        step=step1=size=size10=cound=0;
        while(1)
        {
            P3=0;
            while((P3&0x01)==0x01)
            {
                while(step<17956)
                {
                    P0=0x20;
                    step=step+1;
                    if((P3&0x02)==0x02)
                    {
                        cound=step;
                    }
                    delay(2);
                    P0=0x10;
                    step=step+1;
                    if((P3&0x02)==0x02)
                    {
                        cound=step;
                    }
                    delay(2);
                    P0=0x08;
                    step=step+1;
                    if((P3&0x02)==0x02)
                    {
                        cound=step;
                    }
                    delay(2);
                    P0=0x04;
                    step=step+1;
                }
            }
        }
    }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if((P3&0x02)==0x02)
{
    count=step;
}
delay(2);
if((count>10)&((P3&0x02)==0x00))
{
    goto out;
}
}
out:
size=((count/100)*47)+900;
size10=((count/100)*47)%100;

dis=size/100;
dis10=size10;

if(size<=4801)
{
    con=0;
    n=1;
    n10=333;
}
if(size<=4754)
{
    con=10;
    n=1;
    n10=335;
}
if(size<=4707)
{
    con=20;
    n=1;
    n10=338;
}
if(size<=4660)
{
    con=30;
    n=1;
    n10=340;
}
if(size<=4613)
{
    con=40;
    n=1;
    n10=342;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(size<=4566)
{
    con=50;
    n=1;
    n10=344;
}

i_LCD();
print_LCD(0x80,used);

LCDWD(dis/10+48);
LCDWD(dis%10+48);
LCDWD('.');
LCDWD(dis10/10+48);
LCDWD(dis10%10+48);
LCDWD('m');
LCDWD('m');

while(1)
{
    P0=0x04;
    delay(2);
    P0=0x08;
    delay(2);
    P0=0x10;
    delay(2);
    P0=0x20;
    delay(2);
    step1=step1+4;
    if(step1==step)
    {
        goto out1;
    }
}

out1:
while(1)
{
    i_LCD();
    print_LCD(0x80,co);

    LCDWD(con/10+48);
    LCDWD(con%10+48);

    LCDWD('g');
    LCDWD('/');
    LCDWD('!');
    delay(8000);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

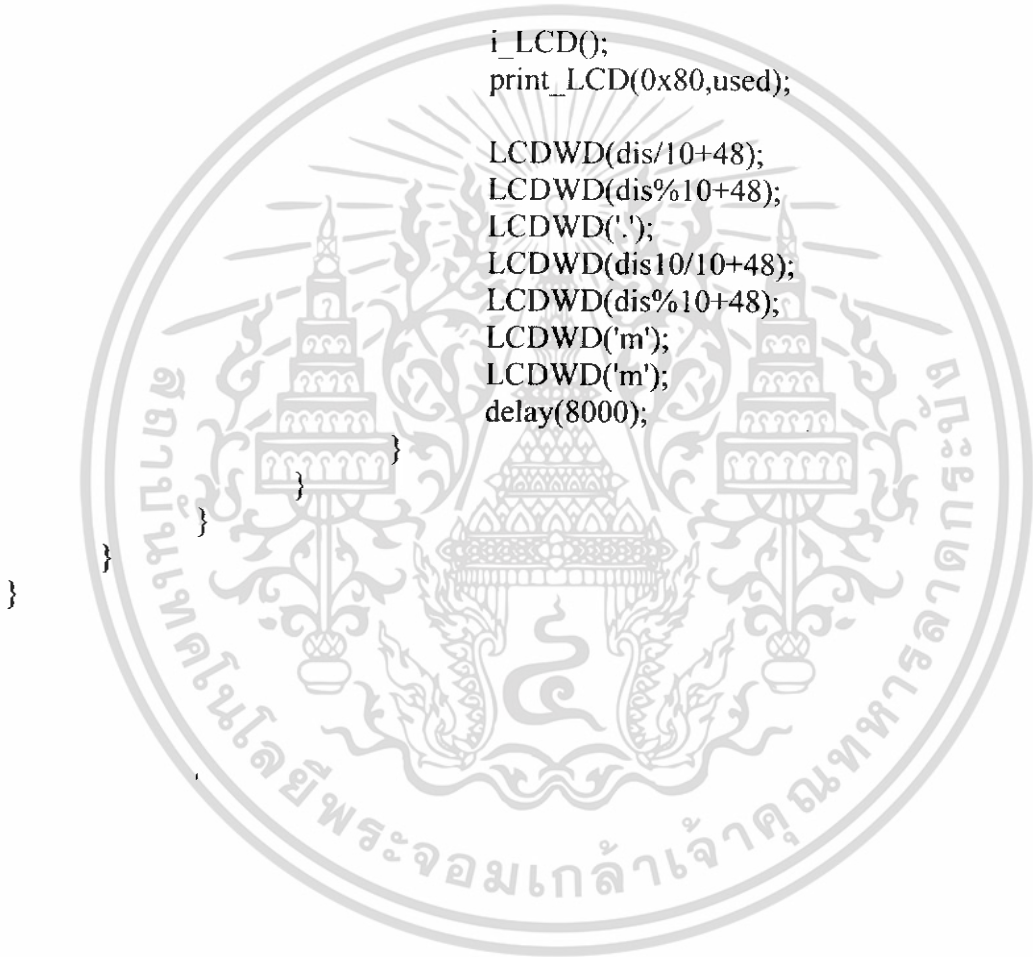
```
i_LCD();  
print_LCD(0x80,No);
```

```
LCDWD(49);  
LCDWD('.');  
LCDWD(n10/100+48);  
LCDWD((n10/10)%10+48);  
LCDWD(n10%10+48);
```

```
delay(8000);
```

```
i_LCD();  
print_LCD(0x80,used);
```

```
LCDWD(dis/10+48);  
LCDWD(dis%10+48);  
LCDWD('.');  
LCDWD(dis10/10+48);  
LCDWD(dis%10+48);  
LCDWD('m');  
LCDWD('m');  
delay(8000);
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้