



การสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนนิวตัน  
CREATION OF NEWTON RING APPARATUS



นายเขมรัฐ จุฑานฤปกิจ  
นางสาวณัฐธิชา ชัตติยะ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อปีการศึกษา 2557 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CREATION OF NEWTON RING APPARATUS



MR. KHEMMARAT JUTANARUEPAKIT  
MISS NATTHICHA KHATTIYA

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS  
DEPARTMENT OF PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง ACADEMIC YEAR 2557 ภายของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนนิวตัน

CREATION OF NEWTON RING APPARATUS

ชื่อนักศึกษา

นายเขมรัฐ จุฑานฤปกิจ รหัสนักศึกษา 54050489

นางสาวณัฐธิชา ชัดติยะ รหัสนักศึกษา 54050517

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2557

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.สุรชาติ กมลติลก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์  
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ประธาน บุรณศิริ	
อ.กীরยุทธ ศรีนวลจันทร์	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง	
อ.สุรชาติ กมลติลก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนนิวตัน
ชื่อนักศึกษา	นายเขมรัฐ จุฑานฤปกิจ รหัสนักศึกษา 54050489 นางสาวณัฐธิชา ชัดติยะ รหัสนักศึกษา 54050517
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.สุรชาติ กมลดิลก

### บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการออกแบบชุดทดลองวงแหวนของนิวตันซึ่งสามารถใช้วัดรัศมีความโค้งของเลนส์และความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ต้องการวัด โดยชุดทดลองวงแหวนของนิวตันใช้ทฤษฎีการแทรกสอดของแสงซึ่งเกิดจากแสงสองลำที่สะท้อนจากกระจกใสและเลนส์เกิดการแทรกสอดกันโดยจะสังเกตเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถปรับเพื่อเลื่อนตำแหน่งรับภาพได้ทั้งแกน  $x$  และแกน  $y$  และมีความละเอียดของการปรับเลื่อนตำแหน่ง  $0.001$  เซนติเมตร โดยการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็นสองตอน ตอนแรกจะเป็นการทดลองเพื่อหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ทราบค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนคือเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเปรียบเทียบกับการใช้สเปียร์โรมิเตอร์ และตอนที่สองเป็นการทดลองเพื่อคำนวณหาค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดสีแดง สีเขียว และสีม่วงที่ไม่ทราบค่าตามลำดับ โดยใช้รัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้จากตอนแรกมาคำนวณย้อนกลับ จากการทดลองทั้งสองตอนพบว่าชุดทดลองวงแหวนของนิวตันชุดนี้สามารถหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์และค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดได้ใกล้เคียงกับค่าจริง

**คำสำคัญ :** การแทรกสอดของแสง, รัศมีความโค้งของเลนส์, วงแหวนของนิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Creation of Newton Ring Apparatus	
<b>Students</b>	Mr. Khemmarat jutanauepakit	Student ID 54050489
	Miss Natthicha Khattiya	Student ID 54050517
<b>Degree</b>	Bachelor of Science in Applied Physics	
<b>Department</b>	Physics	
<b>Academic Year</b>	2014	
<b>Advisor</b>	Mr.Surachart Kamoldilok	

### Abstract

Newton's ring apparatus was developed in this special project. It can be used to measure curvature radius of the lens and wavelength of the light source. Interference theory was used in the Newton's ring apparatus, both interference beams reflected from the glass and the lens. Interference pattern will be observed by microscope position adjustable on x-axis and y-axis; it has a resolution 0.001 centimeter. Dark fringe was used to investigate the curvature radius of the lens and the wavelength of the laser light source. In this experiment was evaluated in two steps. First step was evaluated and second step was evaluated wavelength of the light source. Experimental result of both steps close to a truth.

**Keywords :** Interference, curvature radius of the lens, Newton's ring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความสนับสนุน ให้ คำแนะนำ คำปรึกษา และช่วยเหลือของอาจารย์สุรชาติ กมลดีลิก ผู้ซึ่งให้คำแนะนำปรึกษาทางด้าน วิชาการ อธิบายและแก้ไขปัญหาทางระบบทัศนศาสตร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำนิพนธ์และ ทดลองโครงการพิเศษนี้ รวมไปถึงการฝึกฝนทักษะการคิดแก้ไขปัญหา ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในการเรียนหรือการทำงานในระดับสูงต่อไป

ขอขอบคุณคณาจารย์ นักศึกษา นักศึกษาปริญญาโท นักศึกษาปริญญาเอก และเจ้าหน้าที่ ของคณะวิทยาศาสตร์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ อธิบาย และเอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือให้ทางคณะผู้จัดทำได้มีความรู้ความ เข้าใจไปปรับปรุงแก้ไขให้โครงการพิเศษนี้มีประสิทธิภาพและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

และขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้ คำแนะนำ และเป็นกำลังใจเสมอมา จนการศึกษาโครงการพิเศษนี้เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณงามความดีอันพึงมีจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา อันเป็นที่ เคารพยิ่งและคณาจารย์ผู้ประสาศาวิชาความรู้ ตลอดจนทุกๆ ท่านที่ให้กำลังใจช่วยเหลือตลอดจน โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

นายเชมรัฐ จุฑานฤปกิจ  
นางสาวณัฐธิชา ชัดติยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 อุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน	3
2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์วงแหวนนิวตัน	4
2.3 การแทรกสอดของคลื่นแสง	4
2.3.1 การทดลองช่องเปิดคู่ของยัง	5
2.3.2 การวิเคราะห์การแทรกสอดของคลื่นแสงของช่องเปิดคู่ของยัง	6
2.4 การหาค่าความโค้งและความยาวคลื่นจากอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน	9
2.5 กล้องจุลทรรศน์แบบปรับเลื่อนได้	13
2.6 เลเซอร์	15
2.6.1 คุณสมบัติของเลเซอร์	15
2.6.2 การปลดปล่อยโดยการกระตุ้น	16
2.6.3 เลเซอร์ไดโอด	17
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>19</b>
3.1 ออกแบบ และสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน	19
3.2 ติดตั้งชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันบนแผ่นงานสำหรับงาน ทางทรนศาสตร์และทดสอบการทำงาน	24
3.2.1 ติดตั้งชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันบนแผ่นงานสำหรับงาน ทางทรนศาสตร์	25
3.2.2 ทดสอบการทำงานของชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	32
4.1 ผลการทดสอบเพื่อหารัศมีของเลนส์จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน	32
4.2 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่หาได้	37
4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดง	38
4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว	42
4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วง	45
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	49
5.1 สรุปผลการวิจัย	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
<b>บรรณานุกรม</b>	50
<b>ภาคผนวก</b>	51
ภาคผนวก ก	52
ภาคผนวก ข	59
ภาคผนวก ค	66
ภาคผนวก ง	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางการดำเนินงาน	2
4.1 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 1	32
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 2	33
4.3 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 3	34
4.4 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 4	35
4.5 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 5	36
4.6 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์	37
4.7 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน	37
4.8 ผลการทดลองที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์	38
4.9 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 1	38
4.10 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 2	39
4.11 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 3	39
4.12 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 4	40
4.13 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 5	40
4.14 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดง	41
4.15 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียวครั้งที่ 1	42
4.16 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียวครั้งที่ 2	42
4.17 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียวครั้งที่ 3	43
4.18 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียวครั้งที่ 4	44
4.19 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียวครั้งที่ 5	44
4.20 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว	45
4.21 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 1	45
4.22 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 2	46
4.23 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 3	46
4.24 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 4	47
4.25 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 5	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

4.26 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของ  
เลเซอร์ไดโอดสีม่วง

หน้า

48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน	3
2.2 การแทรกสอดของอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน	4
2.3 การทดลองช่องเปิดคู่ของยัง	5
2.4 การเกิดแถบสว่างและแถบมืดบนฉาก	6
2.5 ระยะต่างๆในการทดลองของยัง	7
2.6 แสดงช่วงที่สัมผัสกับอากาศของอุปกรณ์วงแหวนนิวตัน	9
2.7 แสดงการสะท้อนและหักเหของแสงที่ตกกระทบ	10
2.8 แสงสะท้อนสองลำที่ทำให้เกิดการแทรกสอดเป็นริ้ว	11
2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบปรับเลื่อนได้ (Traveling Microscope)	13
2.10 แสดงวิธีหาค่า Least count ของกล้องจุลทรรศน์	14
2.11 แสดงตัวอย่างการวัดค่าของสเกลบนกล้องจุลทรรศน์	14
2.12 คุณสมบัติของเลเซอร์ที่มีทิศทางเดียวที่แน่นอน	15
2.13 แสดงการปลดปล่อยของพลังงานโดยการกระตุ้น	16
2.14 แท้คเกจเลเซอร์ไดโอดขนาดเล็ก	17
2.15 โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด	18
3.1 ทางเดินแสงในการสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน	19
3.2 เลเซอร์ฮีเลียม - นีออน	20
3.3 เลเซอร์ไดโอดที่มีสีและค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน	21
3.4 เลนส์นูนที่ใช้ขยายลำแสงเลเซอร์	21
3.5 เลนส์นูนทำหน้าที่เป็นแว่นขยาย	22
3.6 ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน	22
3.7 ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตันที่ประกอบไปด้วยแผ่นแก้วเรียบและเลนส์นูนแกมราบ	23
3.8 กล้องจุลทรรศน์	23
3.9 ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดบนแผ่นงานสำหรับงานทางทัศนศาสตร์	24
3.10 แหล่งกำเนิดเมื่อผ่านเลนส์นูน	25
3.11 แหล่งกำเนิดแสงเมื่อผ่านเลนส์เว้า	25
3.12 ลำแสงที่ถูกทำให้สะท้อนโดยกระจกใส	26
3.13 ลำแสงที่สะท้อนลงสู่ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 สเกลที่ใช้วัดของกล้องจุลทรรศน์	27
(a) สเกลวัดในแนวแกน Z	27
(b) สเกลการวัดในแนวแกน X และแกน Y	27
3.15 รั้วการแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม - นีออน	27
3.16 รั้วการแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดสีแดง	28
3.17 รั้วการแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดสีเขียว	28
3.18 รั้วการแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดสีม่วง	28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

การที่วัตถุโปร่งแสงซึ่งบางมากปรากฏมีสีต่างๆคล้ายสีรุ้งและเปลี่ยนลวดลายไปแล้วแต่มุมมอง ดังเช่นที่เป็นกับฟิล์มน้ำมันบางๆบนพื้นถนนที่เปียก หรือกับปีกแมลงบางๆ หรือกับฟองสบู่ เป็นตัวอย่างของปรากฏการณ์ที่มาจากต้นตอเดียวกันทั้งสิ้นต้นตอนี้เราเรียกกันในชื่อ การแทรกสอด (Interference) ของแสง ในโครงการพิเศษนี้ เราจะศึกษาปรากฏการณ์ดังกล่าวซึ่ง เซอร์ไอแซก นิวตัน (Sir Isaac Newton) เป็นผู้ค้นพบและรู้จักต่อมาในชื่อ วงแหวนของนิวตัน (Newton's Ring)

ปัจจุบันมีการนำทฤษฎีการแทรกสอดของวงแหวนของนิวตันมาใช้ในการวัดสิ่งต่างๆซึ่งทฤษฎีวงแหวนของนิวตันสามารถนำมาหาหาค่าความโค้งของผิวเลนส์ โดยวงแหวนของนิวตันจะอาศัยการแทรกสอดของคลื่น 2 ขบวน คลื่นที่แทรกสอดจะเกิดเป็นริ้วการแทรกสอด (Fringe) ลำแสงทั้งสองขบวนต้องเป็นแสงโคฮีเรนต์ และกำเนิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันถึงจะสามารถสังเกตริ้วการแทรกสอดที่เกิดได้โดยอาศัยหลักการทางแสงของอินเตอร์เฟอริเตอร์

ในโครงการฉบับนี้เป็นการสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันเพื่อคำนวณย้อนกลับหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดที่มีสีแตกต่างกันไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน
- 2) เพื่อศึกษาการติดตั้งชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน
- 3) เพื่อศึกษารหัสความโค้งของผิวเลนส์จากการแทรกสอดของชุดทดลองวงแหวนของนิวตัน
- 4) เพื่อศึกษาหาความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดที่มีสีแตกต่างกันจากการคำนวณริ้วการแทรกสอดที่เกิดบนชุดทดลองวงแหวนของนิวตัน

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันเพื่อหาหาค่าความโค้งของผิวเลนส์และหาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์เป็นการใช้เลนส์นูนแก้วผิวเรียบ แล้วทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดระหว่างผิวของเลนส์นูนแก้วผิวเรียบและแผ่นแก้วผิวเรียบ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่นและสีที่แตกต่างกันได้แก่สีแดง สีเขียว และสีม่วง ซึ่งในแต่ละความยาวคลื่นจะทำให้ได้ริ้วการแทรกสอดที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป จากนั้นจะนำค่าของริ้วการแทรกสอดที่ได้ไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดในแต่ละสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

### 1) ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ขั้นตอนที่ 1    เสนองงานวิจัย
- ขั้นตอนที่ 2    ศึกษารายละเอียด ทฤษฎี และข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- ขั้นตอนที่ 3    ตั้งสมมติฐาน และเตรียมการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 4    ทำการทดลองและประเมินผลการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 5    ปรับปรุงการทดลองในส่วนที่ผิดพลาด
- ขั้นตอนที่ 6    สรุปผลการทำวิจัย และแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

### 2) ตารางการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ขั้นตอนที่ 1										
ขั้นตอนที่ 2										
ขั้นตอนที่ 3										
ขั้นตอนที่ 4										
ขั้นตอนที่ 5										
ขั้นตอนที่ 6										

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทำการติดตั้งชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันได้
- 2) มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน
- 3) สามารถหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดแต่ละสีโดยใช้กระบวนการแทรกสอดของวงแหวนของนิวตันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตันเป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการแทรกสอดของคลื่นแสงสองขบวน คลื่นที่แทรกสอดกันจะเกิดเป็นริ้วการแทรกสอด (Fringe) ลำแสงทั้งสองขบวนต้องเป็นแสงที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันถึงจะสามารถสังเกตริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นได้ การแทรกสอดของแสงสองขบวนนี้เกิดขึ้นบนชุดอุปกรณ์ของวงแหวนนิวตันซึ่งสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ของความโค้งของเลนส์ที่วางบนแผ่นแก้วเรียบและความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ได้

### 2.1 อุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

อุปกรณ์วงแหวนของนิวตันประกอบด้วย 2 ส่วนคือ เลนส์นูน (convex lens) ซึ่งจะต้องเป็นเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสมากๆ และแผ่นแก้วเรียบคือส่วนที่เป็นฐานรองสำหรับไว้วางเลนส์นูนไว้ด้านบนโดยทั้งเลนส์นูนและแผ่นแก้วเรียบควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันและความหนาใกล้เคียงกัน จากนั้นนำมาใส่ตัวยึดที่มีลักษณะเป็นวงกลมที่สามารถขันเกลียวนี้ोटเพื่อปรับขนาดของช่องว่างระหว่างเลนส์กับแผ่นแก้วเรียบให้เกิดจุดที่เกิดเป็นริ้วการแทรกสอด (Fringe)

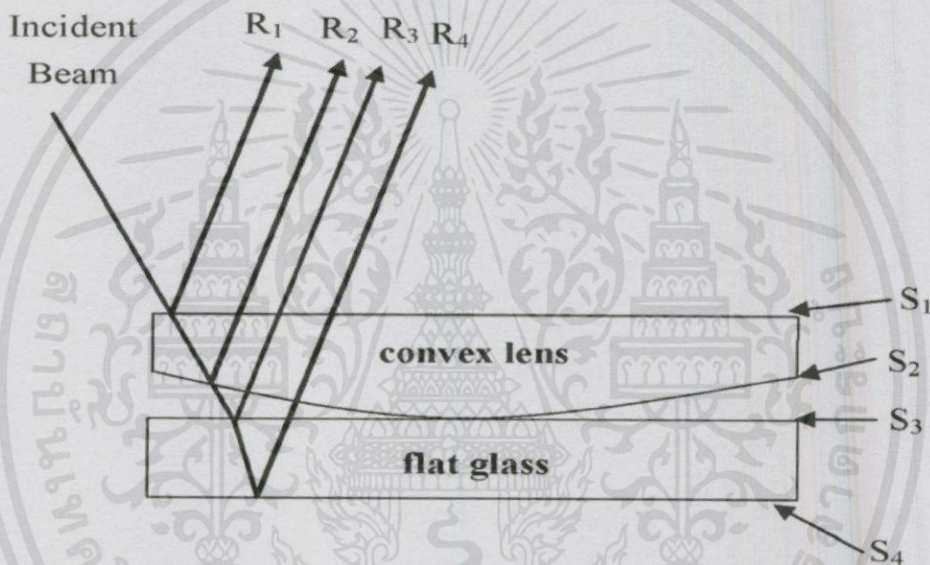


รูปที่ 2.1 อุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์วงแหวนนิวตัน

อุปกรณ์วงแหวนของนิวตันประกอบด้วยเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสมากๆ และแผ่นแก้วเรียบ ซึ่งเลนส์นูนจะวางอยู่ด้านบนของแผ่นแก้วเรียบ จากอุปกรณ์นี้จะมีช่วงที่สัมผัสกับอากาศสี่ช่วงของเลนส์นูนกับแผ่นแก้วเรียบโดยกำหนดให้เป็นพื้นที่ ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ) ดังรูปที่ 2.1 จากแหล่งกำเนิดแสงที่เป็น Monochromatic Light ลำแสงจะตกกระทบกับผิวเลนส์นูนจะเกิดการสะท้อนและหักเหผ่านรอยต่อ  $S_1$  และเดินทางต่อมาถึงบริเวณ  $S_2$  จะเกิดการสะท้อนและหักเหและบริเวณรอยต่อที่เหลือ ( $S_3, S_4$ ) ก็จะมีการสะท้อนและหักเหแบบเดียวกัน ซึ่งแสงที่สะท้อนจากรอยต่อ  $S_2$  และ  $S_3$  จะเกิดการแทรกสอดกัน แต่แสงที่สะท้อนจาก  $S_1$  และ  $S_4$  จะไม่เกิดการแทรกสอดกันเนื่องจากความหนาของแผ่นแก้วเรียบกับเลนส์นูนนั้นมากกว่าความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 2.2 การแทรกสอดของอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

## 2.3 การแทรกสอดของคลื่นแสง

คลื่นโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ชนิดจากลักษณะของการแกว่งกวัดของคลื่นคือคลื่นตามขวาง (คลื่นแสงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) และคลื่นตามยาว (เช่นคลื่นเสียง) การศึกษาการแทรกสอดของคลื่นจากคลื่นแสงมีข้อดีคือปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของคลื่นจะพิจารณาคลื่นแสงซึ่งเป็นคลื่นตามขวางที่เกิดจากการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเนื่องจากสนามทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดจึงจะกล่าวถึงเฉพาะสนามไฟฟ้าเท่านั้นคลื่นแสงจัดอยู่ในกลุ่มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (เช่นเดียวกับคลื่นไมโครเวฟคลื่นวิทยุตลอดจนรังสีเอ็กซ์ซึ่งจำแนกตามความถี่หรือความยาวคลื่น) โดยคลื่นแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วแสง ( $c$ ) เท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ประมาณ 400-700 นาโนเมตร ครอบคลุมช่วงแสงสีม่วงไปถึงแสงสีแดงทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ความถี่ของคลื่น ( $f$ ) และความเร็วคลื่นเป็นดังนี้

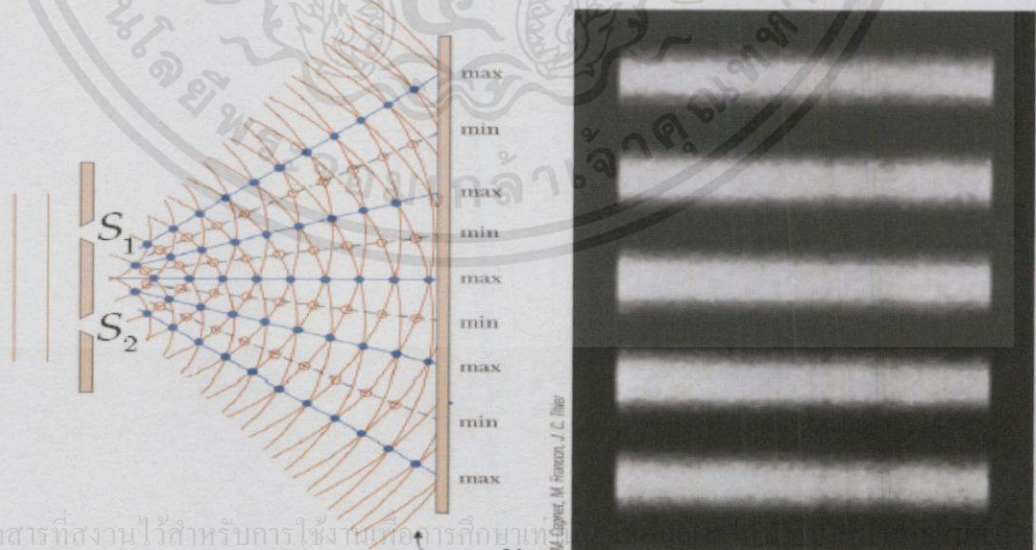
$$f\lambda = c \quad (1)$$

เมื่อ	$f$	คือ	ความถี่ของคลื่นแสง
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้
	$c$	คือ	ความเร็วแสงในสุญญากาศ

การแทรกสอดของคลื่นคือการรวมกันของคลื่นหลายขบวนโดยผลลัพธ์ของการรวมคลื่นจะหาได้จากการรวมกันแบบพีชคณิตโดยตรง ซึ่งการรวมคลื่นมีทั้งการรวมแบบเสริมกันและแบบหักล้างกัน เมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งจะเกิดการรวมคลื่นเสมอแต่อาจไม่เห็นผลของการแทรกสอดเนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงต่างเป็นอิสระจากกันทำให้ความต่างเฟสของแสงจากแต่ละแหล่งไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ซึ่งเร็วมาก) จึงไม่เห็นผลของการแทรกสอด ดังนั้นเงื่อนไขสำคัญเพื่อสังเกตผลของการแทรกสอดด้วยตาเปล่าคือความต่างเฟสที่คงตัว แม้ว่าเฟสของคลื่นอาจเปลี่ยนแปลงตามเวลาแต่แหล่งกำเนิดต้องมีความต่างเฟสคงที่เรียกว่าแหล่งกำเนิดอาพันธ์ (Coherent) และแหล่งกำเนิดแสงนั้นควรจะมีสีเดียว (Monochromatic) คือมีความยาวคลื่นหรือความถี่ค่าเดียว

### 2.3.1 การทดลองช่องเปิดคู่ของยัง (Young's Double-Slit Experiment)

วิธีหนึ่งในการสร้างแหล่งกำเนิดอาพันธ์คือการทำช่องเปิดเล็กๆ สองช่องแล้วให้แสงต้นกำเนิดส่องผ่านช่องเปิดทั้งสอง แม้ว่าเฟสของแสงที่ออกจากต้นกำเนิดจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาแต่แสงที่ลอดออกมาจากช่องเปิดนั้นเป็นแสงจากต้นกำเนิดจริงเดียวกันดังนั้นความต่างเฟสของคลื่นที่ออกมาจากช่องเปิดทั้งสองจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แสงจากช่องเปิดทั้งสองจึงเป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ เมื่อแสงเดินทางผ่านช่องเปิดจะเกิดการเลี้ยวเบนแล้วไปเกิดการแทรกสอดซึ่งสามารถสังเกตผลการแทรกสอดของแสงได้โดยให้แสงจากช่องเปิดไปตกบนฉากรับภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น

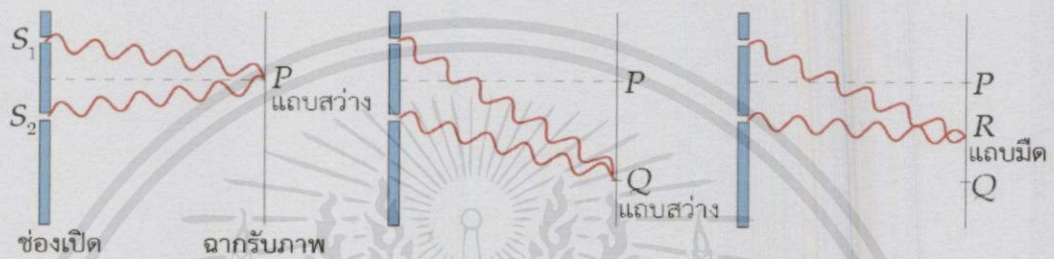
ฉากรับภาพ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 การทดลองช่องเปิดคู่ของยัง

### 2.3.2 การวิเคราะห์การแทรกสอดของคลื่นแสงของช่องเปิดคู่ของยัง

ผลที่ได้บนฉากจากรูปที่ 2.3 คือภาพของแถบสว่างและแถบมืดสลับกันโดยมีแถบสว่างกลางอยู่บริเวณแนวกลางจากช่องเปิดทั้งสองตามด้วยแถบมืดและแถบสว่างสลับกันไปซึ่งเป็นผลจากการแทรกสอดของแสงที่ออกมาจากช่องเปิดทั้งสองให้  $S_1$  และ  $S_2$  แทนแหล่งกำเนิดแสงจากรูปแบบการแทรกสอดด้านล่างจะเห็นว่าแถบสว่างกลางที่จุด  $P$  และแถบสว่างอันดับถัดไปที่จุด  $Q$  เกิดจากการแทรกสอดแบบเสริมกันของแสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$  แถบมืดที่จุด  $R$  เกิดจากการแทรกสอดแบบหักล้างกันของแสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$



รูปที่ 2.4 การเกิดแถบสว่างและแถบมืดบนฉาก

ที่จุด  $P$  แสงจาก  $S_1$  และ  $S_2$  เดินทางเป็นระยะทางเท่ากันถ้าพิจารณาการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิด  $S_1$  และ  $S_2$  ที่ตกลงบนจุด  $P$  มีเฟสตรงกัน (คงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) ผลรวมของคลื่นเป็นแบบเสริมกันจึงเห็นเป็นแถบสว่าง (คลื่นรวมมีแอมพลิจูดเป็นสองเท่าและมีการแกว่งกวัดเร็วมากซึ่งตาเราแยกการกระพริบของแสงไม่ออก)

ที่จุด  $Q$  แสงจาก  $S_1$  เดินทางไกลกว่า  $S_2$  เป็นระยะทางเท่ากับ 1 ความยาวคลื่นพอดีซึ่งระยะทางที่ต่างกัน (Path Difference, PD) นี้จะเลื่อนขบวนคลื่นที่รวมกันที่จุด  $Q$  ออกไป  $1\lambda$  พอดีถ้าพิจารณาการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิด  $S_1$  และ  $S_2$  (ซึ่งเลื่อนไป  $1\lambda$ ) ที่จุด  $Q$  จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่ตกลงบนฉากจะมีเฟสตรงกันผลรวมของคลื่นเป็นแบบเสริมกันจึงเห็นเป็นแถบสว่าง

ที่จุด  $R$  แสงจาก  $S_1$  เดินทางไกลกว่า  $S_2$  เป็นระยะทางเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นพอดีซึ่งระยะทางที่ต่างกันนี้จะเลื่อนขบวนคลื่นที่รวมกันที่จุด  $R$  ออกไป  $1/2\lambda$  พอดี ถ้าพิจารณาการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิด  $S_1$  และ  $S_2$  (ซึ่งเลื่อนไป  $1/2\lambda$ ) ที่จุด  $R$  จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่ตกลงบนฉากจะมีเฟสตรงข้ามกัน (คงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) ผลรวมของคลื่นเป็นแบบหักล้างกันจึงเห็นเป็นแถบมืด (คลื่นรวมมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์เสมอและไม่มีการแกว่งกวัด)

จะเห็นว่าสิ่งสำคัญที่มีผลต่อรูปแบบการแทรกสอดบนฉากคือระยะทางที่ต่างกัน PD ของแสงจากแหล่งกำเนิดจะเห็นว่าในระบบนี้ถ้า PD เป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น  $\lambda$  ผลรวมของคลื่นจะเป็นแบบเสริมกันเห็นเป็นแถบสว่าง (bright fringes) และถ้า PD เป็นจำนวนครึ่งของความยาวคลื่น  $\lambda$  ผลรวมของคลื่นจะเป็นแบบหักล้างกันเห็นเป็นแถบมืด (dark fringes) สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้

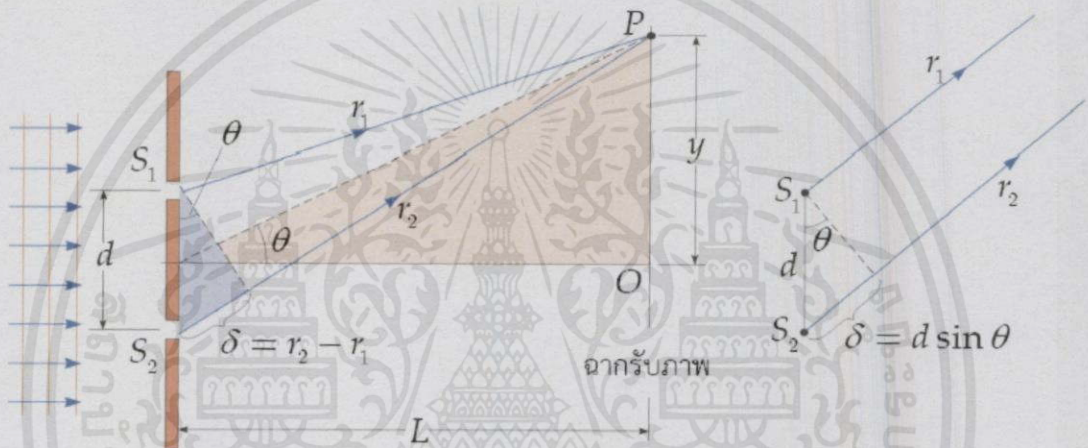
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์งานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้า มีอนุสัญญาให้ใช้แบบฟรีเป็นต้นฉบับการนำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PD = m \lambda ; m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{สว่าง} \tag{2}$$

$$PD = (m + \frac{1}{2}) \lambda ; m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \text{มืด} \tag{3}$$

- เมื่อ  $m$  คือ จำนวนเต็มแทนจำนวนลูกคลื่นที่ต่างกัน เครื่องหมายบวกและลบใช้เพียงเพื่อแสดงว่าระยะทางจาก  $S_2 > S_1$  หรือ  $S_1 > S_2$ ,
- PD คือ Path Difference
- $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

ทั้งนี้ค่าของ PD หาได้จากระยะต่างๆของระบบดังนี้



รูปที่ 2.5 ระยะต่างๆในการทดลองของยัง

จากรูปให้ช่องเปิดทั้งสองห่างกันเป็นระยะ  $d$  ระยะจากช่องเปิดไปยังฉากเป็น  $L$  ระยะทางที่แสงเดินทางจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ไปถึงฉากที่จุด  $P$  เป็น  $r_1$  และ  $r_2$  ดังนั้นระยะทางที่แสงเดินทางต่างกันจะเท่ากับ  $r_2 - r_1$  ทั้งนี้เมื่อมองจากช่องเปิดไปที่จุด  $P$  จะทำมุม  $\theta$  กับแนวกลางโดยทั่วไปฉากกับช่องเปิดจะอยู่ห่างกันมากและระยะ  $L$  จะมากกว่า  $d$  มาก ( $L \gg d$ ) ประมาณได้ว่าทางเดินของแสง  $r_1$  และ  $r_2$  ขนานกัน ( $r_1 \parallel r_2$ ) จากรูปจะได้ระยะทางของแสงที่ต่างกันคือ

$$PD = d \sin \theta \tag{4}$$

- เมื่อ PD คือ Path Difference
- $d$  คือ ผลต่างทางเดินแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้เงื่อนไขของมุมที่บอกตำแหน่งของแถบสว่างและแถบมืดบนฉากเป็น

$$d \sin \theta_{\text{bright}} = m \lambda ; m=0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{5}$$

$$d \sin \theta_{\text{dark}} = (m + \frac{1}{2}) \lambda ; m=0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{6}$$

เมื่อ	$m$	คือ	จำนวนเต็มแทนจำนวนลูกคลื่นที่ต่างกัน เครื่องหมายบวกและลบใช้เพียงเพื่อแสดงว่าระยะทางจาก $S_2 > S_1$ หรือ $S_1 > S_2$ ,
	$d$	คือ	ผลต่างทางเดินแสง
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

สังเกตว่าสำหรับเงื่อนไขแถบสว่างเมื่อ  $m = 0$ , มุม  $\theta_{\text{bright}} = 0$  ซึ่งเป็นตำแหน่งของแถบสว่างกลางที่วางตัวบนแนวกลางและเมื่อ  $m = 1, 2, 3, \dots$  จะเป็นแถบสว่างอันดับที่  $1, 2, 3, \dots$  ซึ่งสอดคล้องกับระยะทางที่ต่างกันเป็น  $1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$  ไปเรื่อยๆ

สำหรับเงื่อนไขแถบมืดเมื่อ  $m = 0$  จะได้ผลต่างของระยะทางเป็น  $1/2\lambda$  ทำให้เกิดแถบมืดอันดับที่ 1 และเมื่อ  $m = 1, 2, 3, \dots$  จะได้ผลต่างของระยะทางเป็น  $3/2\lambda, 5/2\lambda, 7/2\lambda, \dots$  ทำให้เกิดแถบมืดอันดับที่  $2, 3, 4, \dots$  ไปเรื่อยๆซึ่งค่าของ  $m$  ใช้เพียงเพื่อความสมบูรณ์ของสมการไม่มีความหมายแทนอันดับในการแทรกสอดของแสงเมื่อรู้มุม  $\theta$  ที่เกิดแถบต่างๆจะหาระยะหรือตำแหน่งของแถบนั้นๆเทียบกับแถบสว่างกลางได้โดยใช้ความสัมพันธ์

$$y = L \tan \theta \tag{7}$$

เมื่อ	$y$	คือ	ระยะห่างระหว่างฟริ้ง
	$L$	คือ	ระยะทางระหว่างสลิตถึงฉาก

ทั้งนี้ถ้าตำแหน่งของแถบนั้นเกิดขึ้นที่มุม  $\theta$  เล็กๆจะประมาณค่าของ  $y$  ได้จาก  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$  จะได้

$$y = L \sin \theta \tag{8}$$

$$Y_{\text{bright}} = m \lambda \frac{L}{D} \tag{9}$$

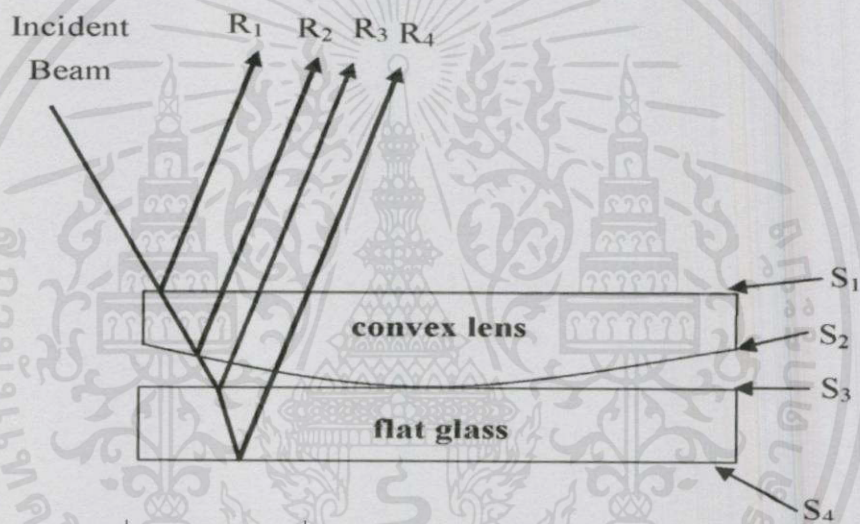
$$Y_{\text{dark}} = (m + \frac{1}{2}) \lambda \frac{L}{D} \tag{10}$$

เมื่อ	$m$	คือ	จำนวนเต็มแทนจำนวนลูกคลื่นที่ต่างกัน เครื่องหมายบวกและลบใช้เพียงเพื่อแสดงว่าระยะทางจาก $S_2 > S_1$ หรือ $S_1 > S_2$ , เดี๋ยวนี้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง
	$d$	คือ	ผลต่างทางเดินแสง

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีมุมเล็กๆเท่านั้น การประมาณมุมเล็กๆอาจดูแปลกแต่ถ้าลองคำนวณค่าจากเครื่องคำนวณจะพบว่าค่าที่เชื่อถือได้ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 3 เมื่อมุม  $\theta < 0.114 \text{ rad}$  หรือประมาณ  $7^\circ$  และถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 เมื่อมุม  $\theta < 0.250 \text{ rad}$  หรือประมาณ  $14^\circ$  ดังนั้นการใช้สมการนี้ต้องพึงระวังว่าค่าตอบที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเมื่อมุมใหญ่ขึ้น

## 2.4 การหาค่าความโค้งและความยาวคลื่นจากอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

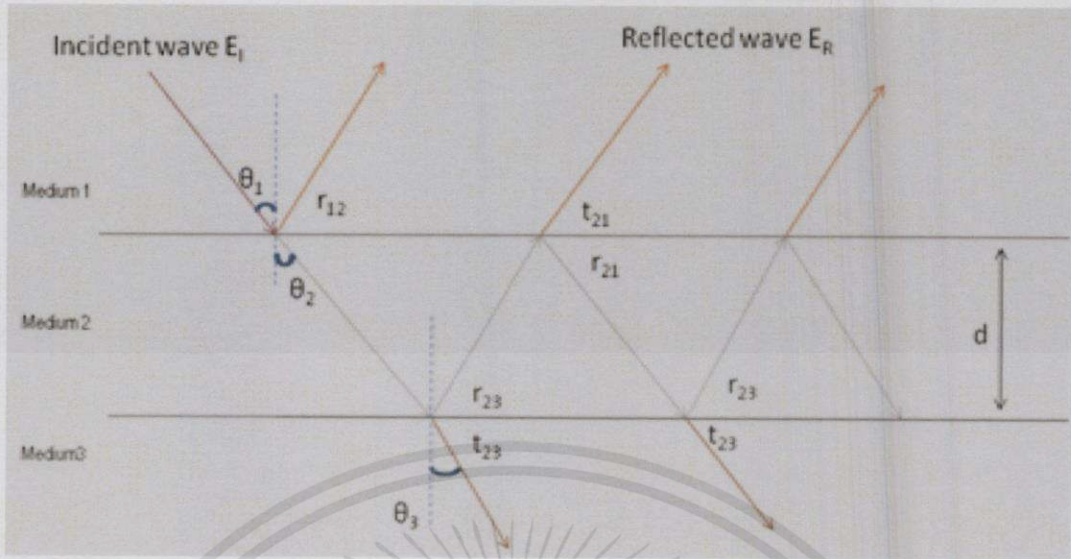
ในที่นี้เราจะศึกษาปรากฏการณ์ที่มาจากการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากผิวบนและที่ทะลุเข้าไปสะท้อนจากผิวล่างของฟิล์มบางๆที่เป็นอากาศ โดยฟิล์มบางที่เป็นอากาศมีความหนาน้อยมากหรือประมาณว่าเท่ากับความยาวคลื่นค่าหนึ่งในช่วงแสงย่านที่ตามองเห็นโดยเราจะแบ่งช่วงที่สัมผัสกับอากาศของอุปกรณ์วงแหวนนิวตันเป็น 4 ช่วง ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงช่วงที่สัมผัสกับอากาศของอุปกรณ์วงแหวนนิวตัน

แหล่งกำเนิดแสงที่เป็น Monochromatic Light ลำแสงจะตกกระทบกับผิวเลนส์นูนแกมราบ จะเกิดการสะท้อนและหักเหผ่านรอยต่อ  $S_1$  และเดินทางต่อมาถึงบริเวณ  $S_2$  จะเกิดการสะท้อนและหักเหและบริเวณรอยต่อที่เหลือ ( $S_3, S_4$ ) ก็จะมีการสะท้อนและหักเหแบบเดียวกัน ซึ่งแสงที่สะท้อนจากรอยต่อ  $S_2$  และ  $S_3$  จะเกิดการแทรกสอดกัน แต่แสงที่สะท้อนจาก  $S_1$  และ  $S_4$  จะไม่เกิดการแทรกสอดกันเนื่องจากความหนาของแผ่นแก้วเรียบกับเลนส์นูนแกมราบนั้นมากกว่าความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงการสะท้อนและหักเหของแสงที่ตกกระทบ

เมื่อ	$\theta_1$	คือ	มุมที่แสงตกกระทบจากเลนส์ไปยังช่องอากาศ
	$\theta_2$	คือ	มุมที่แสงหักเหผ่านเลนส์ไปยังช่องว่างอากาศ
	$\theta_3$	คือ	มุมที่แสงหักเหผ่านช่องว่างอากาศไปยังแผ่นแก้วเรียบ
	$r_{12}$	คือ	แสงสะท้อนจากรอยต่อของเลนส์กับช่องว่างอากาศ
	$r_{23}$	คือ	แสงสะท้อนจากรอยต่อของช่องว่างอากาศกับแผ่นแก้วเรียบ
	$r_{21}$	คือ	แสงสะท้อนจากรอยต่อของเลนส์และช่องว่างอากาศ
	$t_{21}$	คือ	แสงที่ผ่านจากช่องว่างอากาศไปยังเลนส์
	$t_{23}$	คือ	แสงที่ผ่านจากช่องว่างอากาศไปยังแผ่นแก้วเรียบ
	$d$	คือ	ความหนาของฟิล์มบางอากาศ

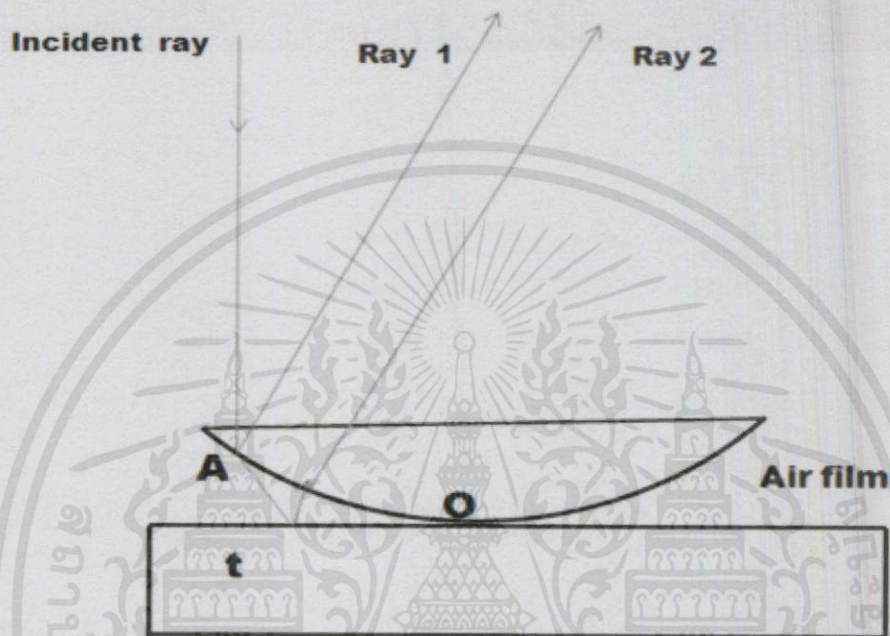
การแทรกสอดแบบเสริมสร้าง  $2\mu_2 d \cos r_{12} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$  (11)

การแทรกสอดแบบหักล้าง  $2\mu_2 d \cos r_{12} = m\lambda$  (12)

เมื่อ	$\mu_2$	คือ	ดัชนีหักเหของอากาศ
	$m$	คือ	ลำดับวีการแทรกสอด

วีการแทรกสอดของฟิล์มที่มีความหนาเท่ากันสามารถสังเกตเห็นได้เมื่อแสงสะท้อนกลับออกมาจากเลนส์นูนแกมราบที่ถูกวางไว้บนแผ่นแก้วเรียบแล้วเกิดฟิล์มบางอากาศระหว่างเลนส์และแผ่นแก้วเรียบ โดยความหนาของฟิล์มบางอากาศมีค่าตั้งแต่ 0 ไปจนถึง  $t$  เมื่อยังแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งลงไปจะเกิดวีการแทรกสอดของวงสว่างและวงมืดที่เกิดจากแสงสะท้อนสองลำ วีการแทรกสอดนี้ถูกค้นพบโดยนิวตัน ดังนั้นเลยถูกเรียกว่าวงแหวนของนิวตัน

จากรูปลำแสงสองลำที่สะท้อนแล้วทำให้เกิดการแทรกสอดก็คือ Ray1 (แสงสะท้อนลำที่หนึ่ง) ที่สะท้อนจากส่วนล่างของเลนส์และ Ray2 (แสงสะท้อนลำที่สอง) สะท้อนจากผิวบนของแผ่นแก้วเรียบ เนื่องจาก Ray1 กับ Ray2 เกิดจากแสงที่ตกกระทบเดียวกัน (แหล่งกำเนิดแสงเดียวกัน) เพียงแต่ถูกแบ่งความเข้มดังนั้นแสงทั้งสองลำก็เป็นโคฮีเรนต์กันซึ่งจะทำให้เกิดการแทรกสอดได้ และ Ray2 จะถูกกลับเฟสเนื่องจากสะท้อนจากอากาศเข้าสู่เลนส์



รูปที่ 2.8 แสงสะท้อนสองลำที่ทำให้เกิดการแทรกสอดเป็นริ้ว

เงื่อนไขสำหรับการแทรกสอดแบบเสริมสร้างและการแทรกสอดแบบหักล้างเมื่อแสงตกกระทบตั้งฉาก จะได้  $\cos\theta = 1$  และดัชนีหักเหของอากาศเท่ากับ 1 ดังนั้นเงื่อนไขใหม่สำหรับการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างจะเป็น

$$\text{การแทรกสอดแบบเสริมสร้าง} \quad 2t = (2m+1)\frac{\lambda}{2} \quad (13)$$

เมื่อ  $m$  คือ ลำดับของวงมืดหรือสว่าง  
 $t$  คือ ความหนาของฟิล์มบาง  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแทรกสอดแบบหักล้าง  $2t = m\lambda$  (14)

เมื่อ	$m$	คือ	ลำดับของวงมืดหรือสว่าง
	$t$	คือ	ความหนาของฟิล์มบาง
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่น

จุดมืดตรงกลางเป็นจุดที่เลนส์นูนสัมผัสกับแผ่นแก้วเรียบ ดังนั้นความหนาของฟิล์มจะน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นค่าผลต่างทางเดินแสงบริเวณนี้มีค่าเป็นศูนย์และคลื่นที่สะท้อนจากผิวด้านบนของแผ่นแก้วเรียบจะกลับเฟสไป  $180^\circ$  ดังนั้นการแทรกสอดตรงจุดศูนย์กลางจะเป็นการแทรกสอดแบบหักล้างหรือเป็นวงมืด โดยริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็นวงกลมขึ้นกับความหนาของฟิล์มบางอากาศกล่าวคือริ้วการแทรกสอดใดๆจะมีความหนาของฟิล์มบางอากาศเท่ากันเสมอ โดยสามารถหารัศมีของแถบมืดและแถบสว่างได้ดังนี้

รัศมีของแถบมืด  $r_m = \sqrt{m\lambda R}$  (15)

เมื่อ	$r_m$	คือ	รัศมีของแถบมืดที่ $m$
	$m$	คือ	ลำดับของแถบมืดใดๆ
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่น
	$R$	คือ	รัศมีความโค้งของเลนส์

รัศมีของแถบสว่าง

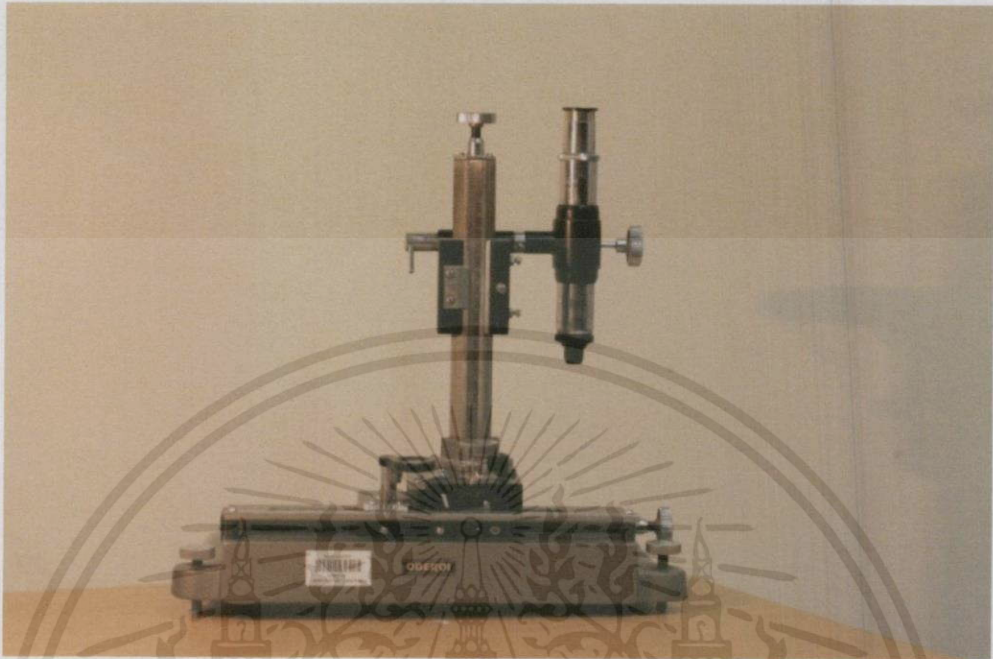
$$r_m = \sqrt{(2m+1)R \frac{\lambda}{2}}$$
 (16)

เมื่อ	$r_m$	คือ	รัศมีของแถบสว่างที่ $m$
	$m$	คือ	ลำดับของแถบสว่างใดๆ
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่น
	$R$	คือ	รัศมีความโค้งของเลนส์

โดยรัศมีของแถบมืดจะเป็นสัดส่วนกับรัศมีของเลนส์นูนคือ  $r_m \propto \sqrt{R}$  และสามารถหารัศมีของเลนส์และความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

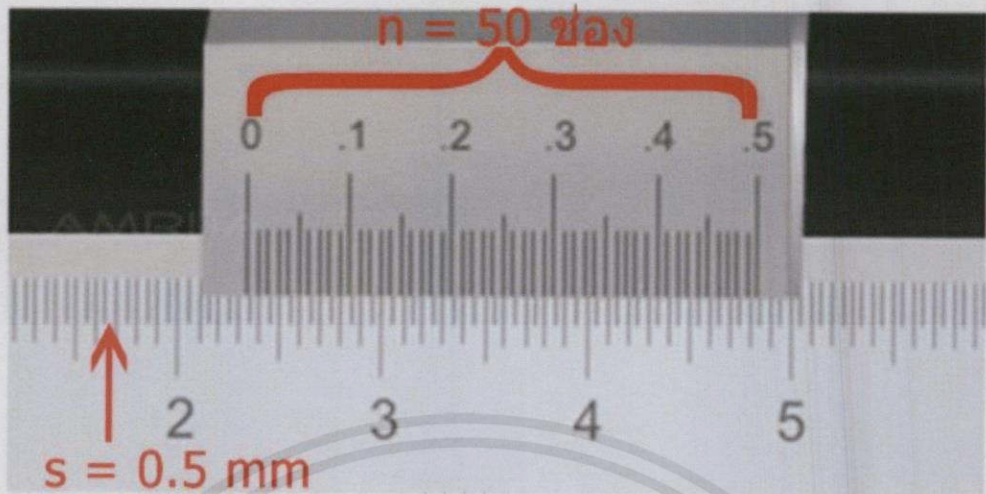
## 2.5 กล้องจุลทรรศน์แบบปรับเลื่อนได้



รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบปรับเลื่อนได้ (Traveling Microscope)

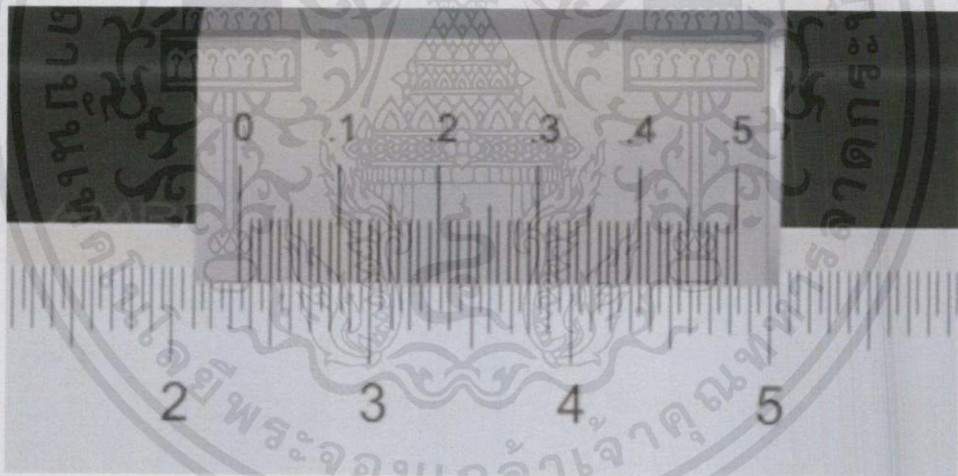
จากรูปที่ 2.9 เราสามารถปรับเลื่อนตัวกล้องไปบนระนาบแกนนอนและแกนตั้งได้และสามารถปรับหาความชัดของภาพโดยเลื่อนกล้องขึ้นหรือลงเพื่อให้ตรงกับความยาวโฟกัสของตัวกล้องจุลทรรศน์และมีวิธีการอ่านค่าดังนี้ จากแท่นสเกลจะแบ่งสเกลเป็นสเกลหลักและสเกลเวอร์เนียร์ซึ่งบนสเกลหลักนั้นจะถูกแบ่งสเกลให้อ่านค่าละเอียดที่สุดอยู่ที่ครึ่งมิลลิเมตร (0.5 mm) ส่วนความละเอียดของสเกลเวอร์เนียร์จะอยู่ (0.01 mm) และขีดบนสเกลเวอร์เนียร์จะมีทั้งหมด 50 ขีดแต่จะมีทั้งหมด 100 ส่วนซึ่งก็คือ 1 mm นั้นเองและจากรูปที่ 2.10 แสดงวิธีหาค่า Least count ของสเกลเวอร์เนียร์โดยนำจำนวนขีด 20 ช่องของสเกลหลักมาคูณเศษส่วนและนำจำนวน 50 ช่องของสเกลเวอร์เนียร์มาหารจะได้เป็นค่า Least count ( $\frac{1}{20} \div 50 = 0.001$  cm) ซึ่งค่านี้จะอ่านในหน่วยของเซนติเมตรและหมายความว่าสเกลเวอร์เนียร์นี้สามารถอ่านค่าได้ละเอียดที่สุดคือ 0.001 เซนติเมตรนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงวิธีหาค่า Least count ของกล้องจุลทรรศน์

เมื่อรู้ค่า Least count ของสเกลเวอร์เนียแล้วเราก็สามารถอ่านค่าที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์ได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างการวัดค่าของสเกลบนกล้องจุลทรรศน์

จากรูปที่ 2.11 เราจะศึกษาการอ่านค่าของสเกลหลักและเวอร์เนียโดยให้ดูที่ขีด 0 บนสเกลเวอร์เนียว่าตรงกับขีดใดบนสเกลหลักจากรูปที่ 2.11 จะสังเกตเห็นว่าขีด 0 บนสเกลเวอร์เนียอยู่เลยขีดที่ 2.300 เซนติเมตร แต่ไม่ถึงขีด 2.350 เซนติเมตร โดยค่าของทศนิยมตำแหน่งที่ 2 และ 3 นี้จะอ่านแบบละเอียดโดยใช้สเกลเวอร์เนียซึ่งวิธีการอ่านคือดูว่าขีดไหนบนสเกลเวอร์เนียตรงกับขีดบนสเกลหลักอย่างเช่นในรูปขีดที่ถูกคือขีดที่ 29 บนสเกลเวอร์เนียดังนั้นนำค่านี้ไปคูณกับค่า Least count จะได้เป็น  $0.029$  ( $29 \times 0.001$ ) เซนติเมตร แล้วนำค่าไปนี้ไปบวกกับค่าที่อ่านได้บนหลักอยู่ก่อนแล้วนั่นก็คือ  $2.300$  จะได้เป็น  $2.300 + 0.029 = 2.329$  เซนติเมตรนั่นเอง

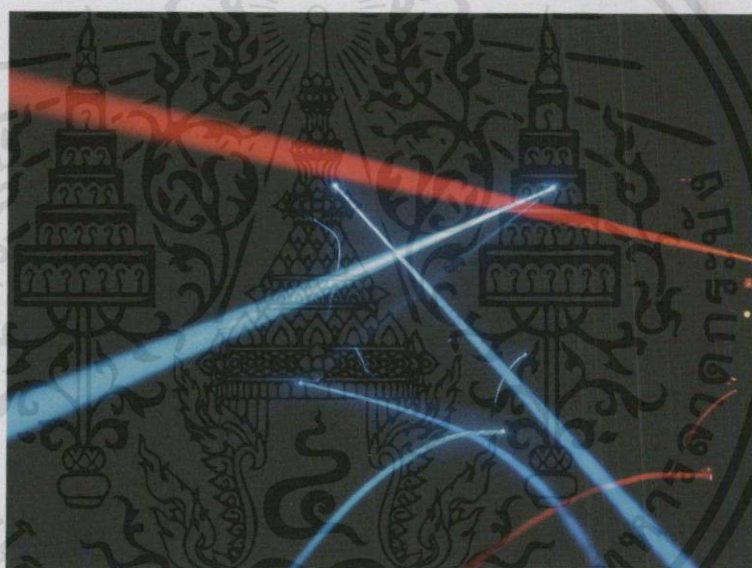
## 2.6 เลเซอร์

เลเซอร์ (Laser : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ในทางฟิสิกส์ คือ อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดลำแสงที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่รวมกันระหว่างกลศาสตร์ควอนตัมกับอุณหพลศาสตร์ ซึ่งพลังงานแสงเลเซอร์สามารถมีคุณสมบัติได้หลากหลายขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ เลเซอร์ส่วนมากจะเป็นลำแสงที่มีขนาดเล็ก มีการเบี่ยงเบนน้อยและสามารถระบุมความยาวคลื่นได้ง่ายโดยดูจากสีของเลเซอร์ ถ้าอยู่ในสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งเลเซอร์นี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นการรวมพลังงานแสงที่ส่งออกมาจากหลายความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน

### 2.6.1 คุณสมบัติของเลเซอร์

#### 1) มีทิศทางเดียวที่แน่นอน (Directionality)

ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกลๆไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ



รูปที่ 2.12 คุณสมบัติของเลเซอร์ที่มีทิศทางเดียวที่แน่นอน

#### 2) เป็นแสงเอกรงค์ (Monochromaticity)

แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว แหล่งกำเนิดแสงที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้าและดวงอาทิตย์จะเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึมจะเห็นแถบสีต่างๆเรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่า แถบสเปกตรัมของแสงเลเซอร์

#### 3) มีความเจิดจ้า (Brightness)

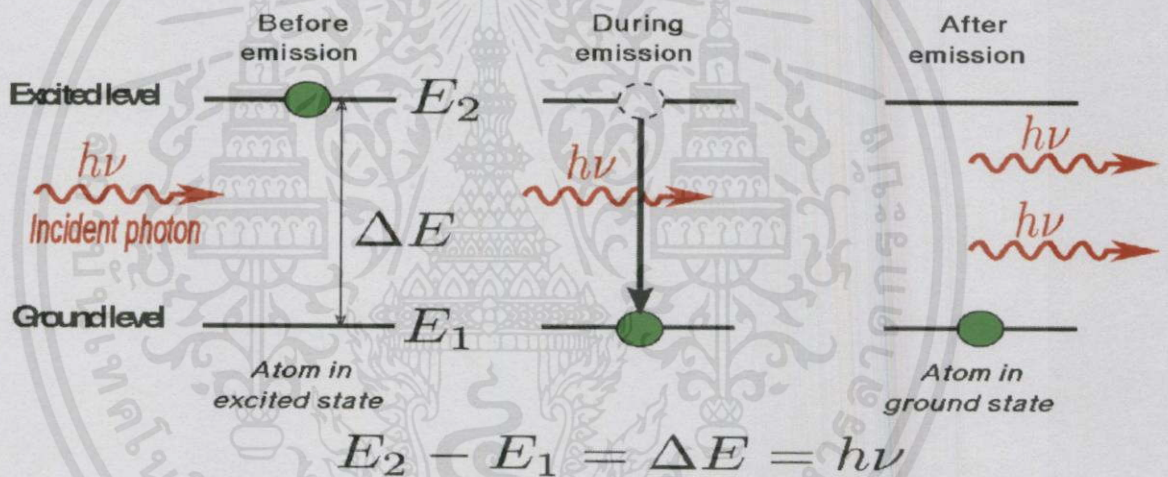
แสงเลเซอร์มีลักษณะโดดเด่นไม่ซ้ำแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นในเชิงความเข้มสูง และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้นโดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความหยาบหรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่อย่างอิสระ

#### 4) มีความเป็นอาพันธ์ (Coherence)

หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็เปล่งแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟส และความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอนแสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนต์ (Incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียวทุก ๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่าแสงโคฮีเรนต์ (Coherence light)

#### 2.6.2 การปลดปล่อยโดยการกระตุ้น

ในมุมมองแบบฟิสิกส์คลาสสิก พลังงานของอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสมีขนาดใหญ่มากสำหรับวงโคจรที่ห่างจากนิวเคลียสของอะตอม อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ทางกลศาสตร์ควอนตัมบังคับให้อิเล็กตรอนอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในวงโคจร ดังนั้นอิเล็กตรอนจะถูกพบว่าอยู่ในระดับพลังงานที่เฉพาะเจาะจงของอะตอมสองแห่งดังรูปที่ 2.13



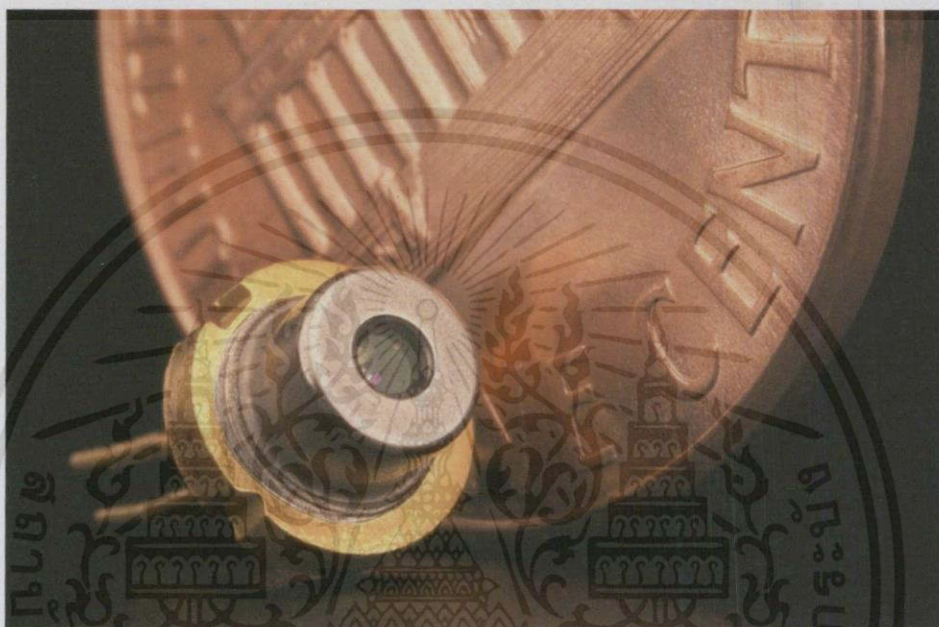
รูปที่ 2.13 แสดงการปลดปล่อยของพลังงานโดยการกระตุ้น

เมื่ออิเล็กตรอนดูดซับพลังงานทั้งจากแสง (โฟตอน) หรือความร้อน (โฟนอนส์) เข้าไว้ซึ่งเป็นอุบัติการณ์ทางควอนตัมของพลังงาน แต่มีการเปลี่ยนแปลงที่ได้รับอนุญาตเท่านั้นในระหว่างระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องเช่น ระดับพลังงานสองระดับดังแสดงไว้ด้านบน ที่จะทำให้เกิดเส้นการปลดปล่อย (Emission lines) และเส้นการดูดกลืน (Absorption lines) ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 เลเซอร์ไดโอด

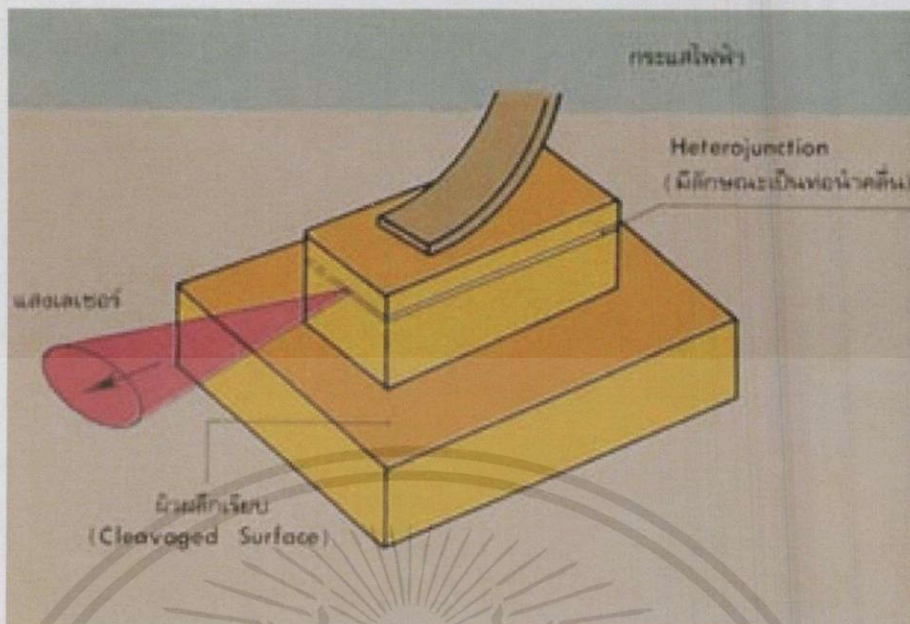
เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำจากสารประกอบ เช่น GaAs (แกลเลียมอาร์เซไนด์) GaAlAs (แกลเลียมอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์) In GaAsP (อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสฟายด์) ซึ่งมีค่าแถบพลังงานต่างๆกันจึงเป็นตัวกำหนดค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ เลเซอร์ไดโอดแต่ละชนิดจึงมีการใช้งานที่แตกต่างกันตามลักษณะ และคุณสมบัติของค่าความยาวคลื่นนั้นๆ เช่น เลเซอร์ไดโอดที่ให้สีแดงจะใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.14 แพ็คเกจเลเซอร์ไดโอดขนาดเล็ก

โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดซึ่งได้แก่ หัวต่อพีเอ็นแบบเฮเทอโรจังชัน (Heterojunction) เช่น GaAlAs/GaAs ทำให้ประสิทธิภาพของเลเซอร์ไดโอดมีค่าสูงขึ้น เพราะใช้กระแสที่เลเซอร์ไดโอดเริ่มทำงานน้อยลง การฉีดกระแสไฟฟ้าผ่านหัวต่อพีเอ็นของเลเซอร์ไดโอด เป็นวิธีการปั๊มพลังงาน เพื่อให้เกิดการรวมตัวของพาหะนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ และนำมาสู่การเปล่งแสงที่เปล่งออกมาจะถูกขยายสัญญาณให้มีความเข้มสูงขึ้นด้วยแควิตี้แสงที่เกิดจากผิวมันสะท้อนแสงของผิวฉีกที่ทำให้แตกโดยธรรมชาติ (Cleaved Surface)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่มีขนาดเล็กจิ๋ว กินไฟน้อย สามารถผลิตได้จำนวนมากๆ ด้วย เทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำเลเซอร์ไดโอดถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่การใช้เป็นเลเซอร์พอยน์เตอร์ (Laser Pointer) ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ใช้เป็นหัวอ่านของเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องวีดีโอเลเซอร์ดิสก์ และเครื่องถ่ายเอกสารประเภทเลเซอร์ พรีนเตอร์ (Laser Printer)

เลเซอร์ไดโอดมีกำลังแสงต่ำตั้งแต่ระดับไมโครวัตต์จนถึงวัตต์ (W) และเป็นเลเซอร์ที่มีจุดเด่นคือสามารถโมดูเลตสัญญาณได้โดยตรง โดยผ่านเข้าไปทางด้านกระแสไฟฟ้าที่ฉีดผ่านตัวสิ่งประดิษฐ์จึงสะดวกต่อการใช้งานโดยเฉพาะการสื่อสารทางด้านแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยของโครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน โดยใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นทั้งที่แน่นอนและไม่แน่นอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และทำให้เกิดการแทรกสอดกันบนเลนส์ จากนั้นจะทำการคำนวณหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ และนำมาคำนวณย้อนกลับหาค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ไดโอดที่มีสีแตกต่างกัน โดยจะแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

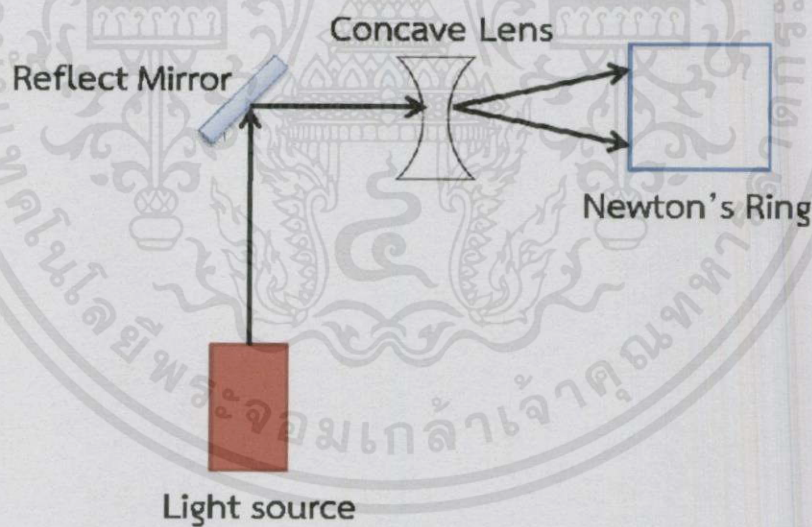
ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน

ขั้นตอนที่ 2 ติดตั้งชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันบนแผนงานสำหรับงานทางทรนศศาสตร์ และทดสอบการทำงาน

โดยมีรายละเอียดของการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนดังนี้

### 3.1 ออกแบบ และสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน

จากการสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน ได้ออกแบบชุดการทดลองและทางเดินแสง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพทางเดินแสงในการสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน

จากรูปที่ 3.1 ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน และเลเซอร์ไดโอด เมื่อเจอกระจกสะท้อนลำแสงจะสะท้อนเพื่อเปลี่ยนทิศทางของลำแสงเลเซอร์ เนื่องจากแผนงานทางทรนศศาสตร์ที่มีเป็นแผ่นขนาดเล็ก และใช้เลนส์เว้าเพื่อขยายลำแสงเลเซอร์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อความสะดวกในการทำการทดลอง เมื่อแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์แล้วจะเจอกระจกใสทำมุม 45° เพื่อให้เปอร์เซ็นต์การสะท้อนและการส่งผ่านมีอัตราส่วนเท่ากันหรือไม่ต่างกันมาก แสงเลเซอร์ที่ผ่านเลนส์แล้ว

เจอกระจกใสชั้นแรกแสงจะสะท้อนลงไปทีชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตันที่เราต้องการให้เกิดริ้วแทรกสอด เมื่อเกิดการแทรกสอดกันก็จะมีแสงสะท้อนกลับขึ้นไปยังกระจกใสตัวเดิมทำให้แสงเข้าสู่กล้องจุลทรรศน์ โดยเราจะใช้กล้องจุลทรรศน์ในการมองริ้วของการแทรกสอดและนำไปคำนวณหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ใช้ในชุดทดลองและความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดที่ไม่ทราบค่าในขั้นตอนต่อไป ซึ่งการสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันจะต้องมีอุปกรณ์ดังนี้

#### 1.) แหล่งกำเนิดแสง

- เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

ในการทดลองตอนแรกจะทำการใช้เลเซอร์ที่ทราบค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากเลเซอร์มีคุณสมบัติที่มีความเป็นโคฮีเรนต์และมีทิศทางเดียวที่แน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขและหลักการแทรกสอดของแสง โดยในโครงการนี้จะใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดตั้งต้นเพื่ออ้างอิงค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ในชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

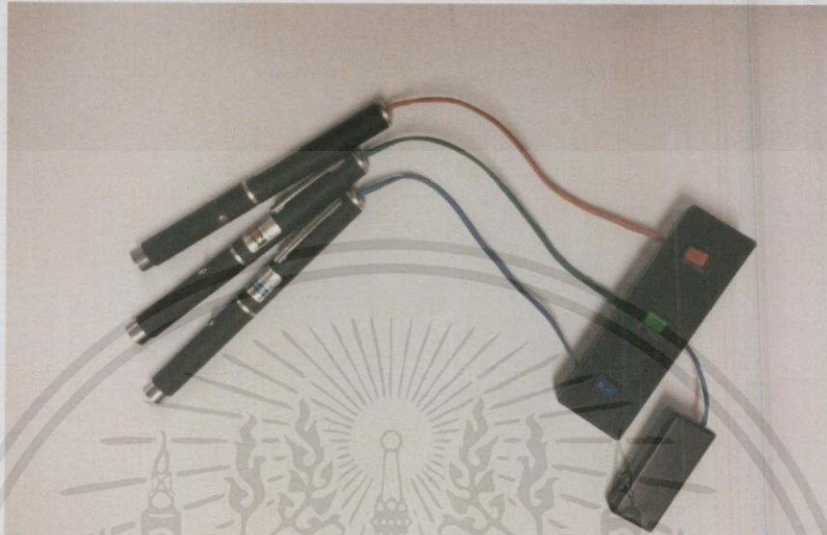


รูปที่ 3.2 เลเซอร์ฮีเลียม - นีออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลเซอร์ไดโอด

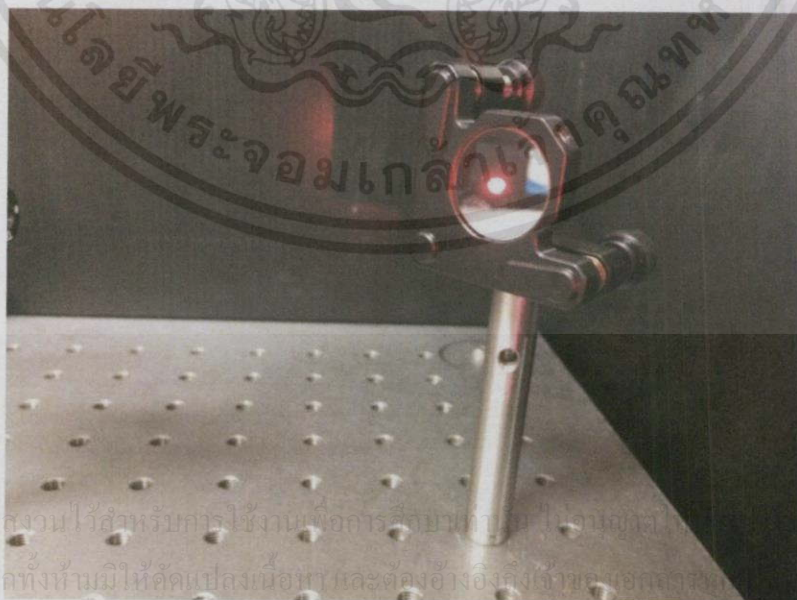
ในการทดลองส่วนที่สอง จะใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีสีและค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเป็นแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 3.3 เลเซอร์ไดโอดที่มีสีและค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

2.) กระจกสำหรับสะท้อนลำแสงเลเซอร์

เนื่องจากแผ่นงานสำหรับงานทางทัศนศาสตร์มีขนาดเล็กจึงต้องใช้กระจกเพื่อสะท้อนลำแสงเลเซอร์ให้เปลี่ยนทิศทางเพื่อเข้าสู่การทดลองในส่วนต่อไป



รูปที่ 3.4 กระจกสำหรับสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ระโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร  
มีการนำไปใช้

### 3.) เลนส์ส่วนขยายลำแสง

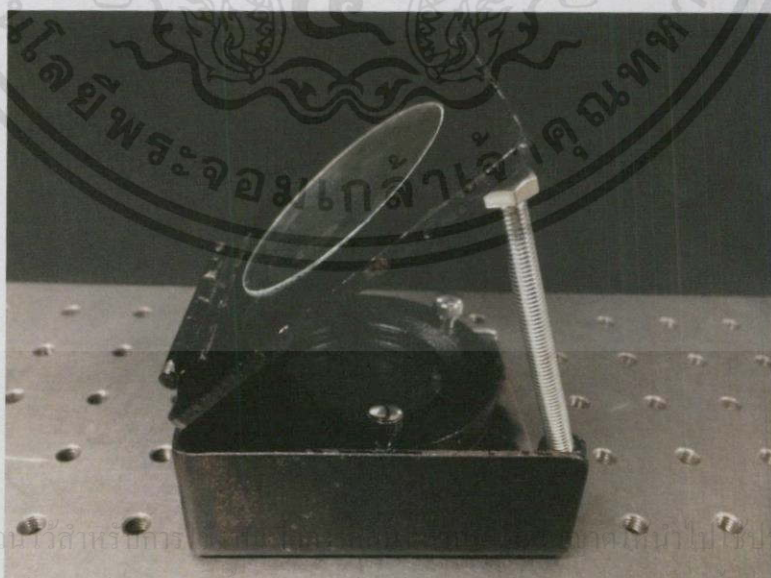
ในการออกแบบการสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน ใช้เลนส์เว้าเพื่อขยายลำแสงเลเซอร์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อความสะดวกในการทำการทดลอง



รูปที่ 3.5 เลนส์เว้าที่ใช้ขยายลำแสงเลเซอร์

### 4.) กระจกใสสำหรับเปลี่ยนทิศทางของลำแสงเลเซอร์

กระจกใสจะถูกวางเพื่อให้แหล่งกำเนิดแสงตกลงสู่อุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน และวางกระจกใสทำมุม  $45^\circ$  เพื่อให้เปอร์เซ็นต์การสะท้อนและการส่งผ่านมีอัตราส่วนเท่ากันหรือไม่ต่างกันมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่ใช่ว่าจะเปิดเผยหรือเผยแพร่  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 กระจกใสวางทำมุม  $45^\circ$

### 5.) ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตันที่ประกอบไปด้วยเลนส์นูนแกมราบประกบกับแผ่นแก้วเรียบเพื่อทำให้เกิดริ้วการแทรกสอด



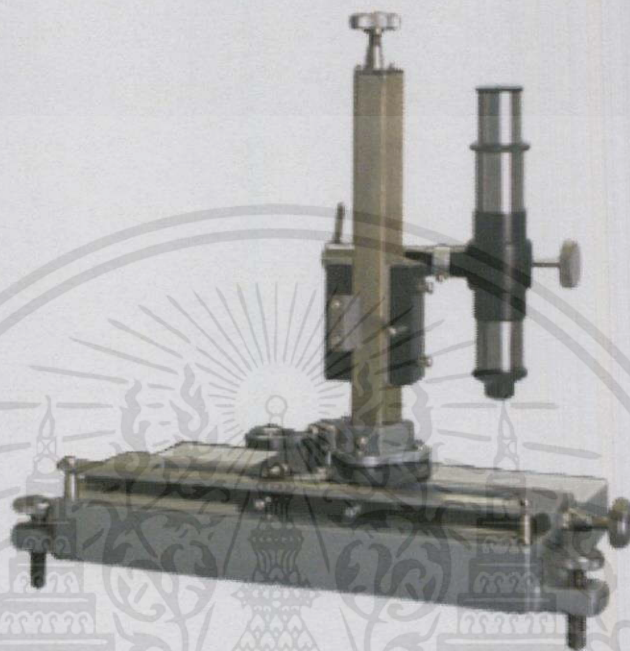
รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน



รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตันที่ประกอบไปด้วยเลนส์นูนแกมราบและแผ่นแก้วเรียบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.) กล้องจุลทรรศน์

ในการออกแบบการสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน กล้องจุลทรรศน์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับใช้ในการวัดขนาดของริ้วการแทรกสอดเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณตลอดทั้งการทดลอง

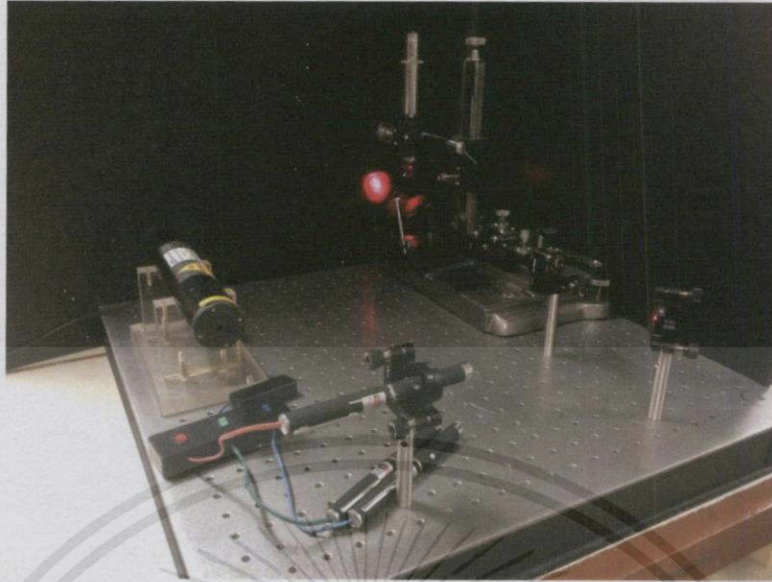


รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์

### 3.2 ติดตั้งชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันบนแผ่นงานสำหรับงานทางทรศนศาสตร์ และทดสอบการทำงาน

การติดตั้งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองลงบนแผ่นงานสำหรับงานทางทรศนศาสตร์สามารถติดตั้งได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3.1 โดยในการทดลองนี้จะกำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันตลอดทั้งการทดลอง

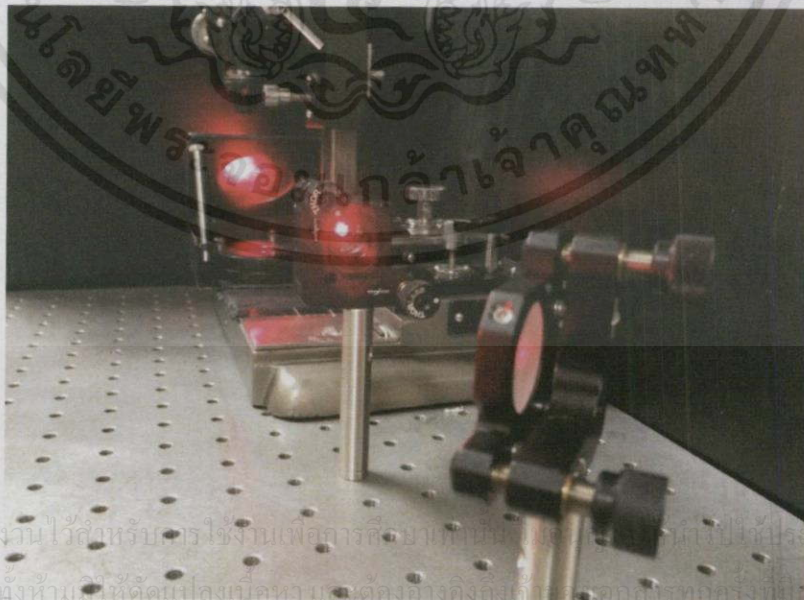
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดบนแผ่นงานสำหรับงานทางทัศนศาสตร์

### 3.2.1 ติดตั้งชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันบนแผ่นงานสำหรับงานทางทัศนศาสตร์ ส่วนที่ 1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

ในการสร้างชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันในตอนแรกจะใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน และตอนที่สองใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีคุณสมบัติเป็นแสงสีแดง สีเขียว และสีม่วง ติดตั้งอยู่บนแผ่นงานสำหรับงานทางทัศนศาสตร์ เนื่องจากแผ่นงานทางทัศนศาสตร์ที่ใช้มีขนาดเล็กจึงต้องใช้กระจกเพื่อสะท้อนลำแสงที่ออกมาจากเลเซอร์ให้เปลี่ยนทิศทางไปในทางที่ต้องการ และใช้เลนส์เว้าขยายลำแสงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการทดลอง

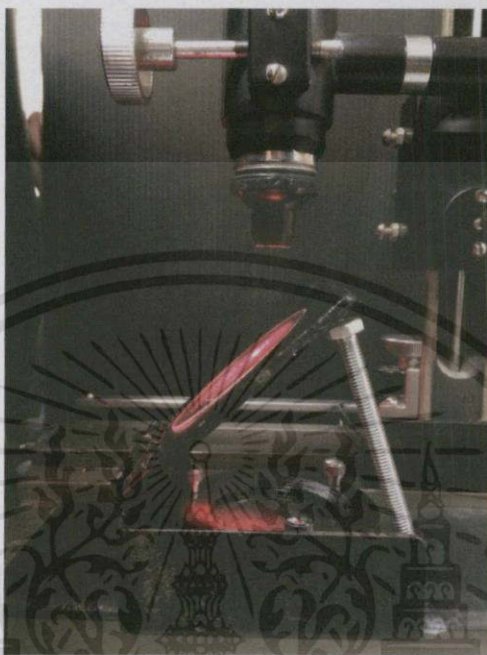


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์ลงนิตยสารหรือสิ่งพิมพ์ใดๆที่มิใช่เอกสารที่ออกโดยทางการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 แหล่งกำเนิดแสงเมื่อผ่านกระจกและเลนส์เว้า

ส่วนที่ 2 กระจกใสสำหรับสะท้อนและส่งผ่าน

ลำแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์จะถูกกระจกใสที่วางทำมุม  $45^\circ$  สะท้อนทำให้เปลี่ยนทิศทางของแสงเข้าสู่ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตันและเข้าสู่กล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 3.12 ลำแสงที่ถูกทำให้สะท้อนโดยกระจกใส

ส่วนที่ 3 การวางชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตันเพื่อให้เกิดริ้วการแทรกสอด

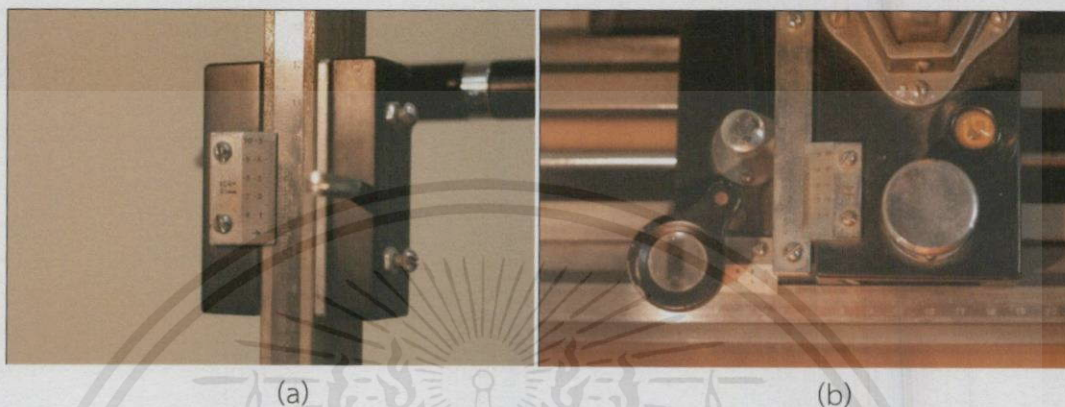
ลำแสงที่สะท้อนจากกระจกใสจะสะท้อนเข้าสู่ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน โดยการวางส่วนที่เกิดริ้วการแทรกสอดให้อยู่กึ่งกลางของลำแสงที่สะท้อนลงมา เพื่อให้ริ้วการแทรกสอดปรากฏในกล้องจุลทรรศน์อย่างชัดเจน



รูปที่ 3.13 ลำแสงที่สะท้อนลงสู่ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

ส่วนที่ 4 การใช้กล้องจุลทรรศน์ในการวัดรี้วการแทรกสอด

เมื่อเกิดรี้วการแทรกสอดบนเลนส์แล้ว จะใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อดูรี้วการแทรกสอด และวัดขนาดของรี้วการแทรกสอด ซึ่งวิธีการอ่านค่าตามสเกลเวอร์เนียบนกล้องจุลทรรศน์ได้แนะนำไว้แล้วในบทที่ 2

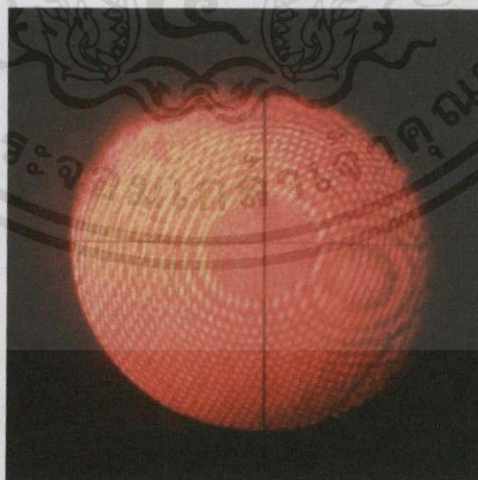


รูปที่ 3.14 สเกลที่ใช้วัดของกล้องจุลทรรศน์ (a) สเกลวัดในแนวแกน Z (b) สเกลการวัดในแนวแกน X และแกน Y

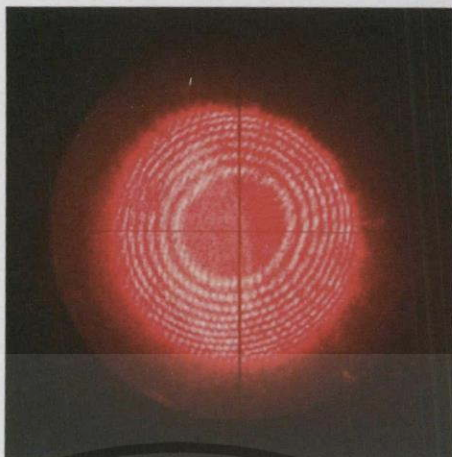
### 3.2.2 ทดสอบการทำงานของชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน

ส่วนที่ 1 การเกิดรี้วการแทรกสอด

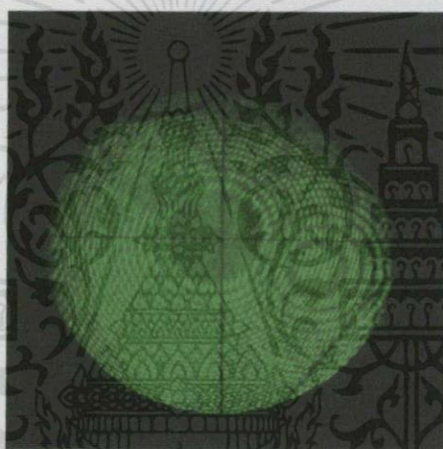
เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดบนแผ่นงานสำหรับงานทางทัศนศาสตร์ ดังรูปที่ แล้ว เมื่อเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ชนิดต่างๆ รี้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดแสงนั้นๆ



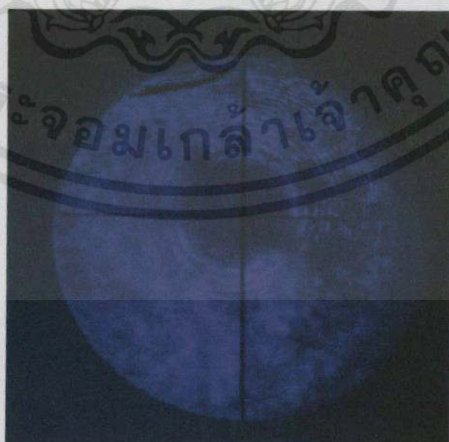
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.15 รี้วการแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 รังการแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดสีแดง



รูปที่ 3.17 รังการแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดสีเขียว



รูปที่ 3.18 รังการแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดสีม่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 2 การคำนวณค่าที่ได้จากรีวการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

1.) การคำนวณค่ารัศมีของเลนส์ในชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

- การหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์จากสเฟียโรมิเตอร์

ทำการทดลองโดยใช้สเฟียโรมิเตอร์วัดรัศมีความโค้งของเลนส์ ทำการทดลองซ้ำห้าครั้งและบันทึกผลการทดลอง สุดท้ายหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้งห้าครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ โดยสมการที่ใช้หารัศมีความโค้งของเลนส์หาได้จากสมการดังกล่าวนี้

$$R = \frac{L^2}{6d} + \frac{d}{2} \quad (17)$$

เมื่อ	R	คือ	รัศมีความโค้งของเลนส์
	L	คือ	ระยะห่างระหว่างขาทั้งสามขาของสเฟียโรมิเตอร์
	d	คือ	ค่าที่อ่านได้จากสเฟียโรมิเตอร์

- การหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์จากชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน

ทำการทดลองโดยใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนมีความยาวคลื่นที่แน่นอนคือ 632.8 นาโนเมตร เพื่อหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ จัดการทดลองตั้งแผนภาพในรูปที่ 3.1 ทำการทดลองซ้ำห้าครั้งและบันทึกผลการทดลอง สุดท้ายหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้งห้าครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ โดยสมการที่ใช้หารัศมีความโค้งของเลนส์หาได้จากสมการดังกล่าวนี้

$$R = \frac{d_{m+p}^2 - d_m^2}{4p\lambda} \quad (18)$$

เมื่อ	R	คือ	รัศมีความโค้งของเลนส์
	$d_{m+p}^2$	คือ	ขนาดของรีวการแทรกสอดวงนอก
	$d_m^2$	คือ	ขนาดของรีวการแทรกสอดวงใน
	p	คือ	ระยะห่างลำดับของรีวการแทรกสอด
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากสเปียร์โรมิเตอร์และชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน

เมื่อได้ค่าเฉลี่ยของรัศมีความโค้งของเลนส์จากทั้งสเปียร์โรมิเตอร์และจากชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันสามารถนำมาอ้างอิงเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างได้จากสมการดังกล่าว

$$\% \text{ ความแตกต่าง} = \frac{2 | \text{ค่าที่ได้จากสเปียร์โรมิเตอร์} - \text{ค่าที่ได้จากชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน} |}{\text{ค่าที่ได้จากสเปียร์โรมิเตอร์} + \text{ค่าที่ได้จากชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตัน}} \times 100\% \quad (19)$$

## 2.) การคำนวณค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดที่มีสีและค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

ทำการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ที่มีสีแตกต่างกันไดโอดแล้วคำนวณย้อนกลับหาค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนของเลเซอร์ไดโอดว่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของสีนั้นๆ จัดการทดลองดังแผนภาพในรูปที่ 3.1 ทำการทดลองซ้ำห้าครั้งและบันทึกผลการทดลองสุดท้ายหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้งห้าครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ โดยสมการที่ใช้ความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดหาได้จากสมการดังกล่าวนี้

$$\lambda = \frac{d_{m+p}^2 - d_m^2}{4pR} \quad (20)$$

เมื่อ	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง
	R	คือ	รัศมีความโค้งของเลนส์
	$d_{m+p}^2$	คือ	ขนาดของรีวการแทรกสอดวงนอก
	$d_m^2$	คือ	ขนาดของรีวการแทรกสอดวงใน
	p	คือ	ระยะห่างลำดับของรีวการแทรกสอด

## 3.) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความไม่แน่นอนในการวัด

- ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : SD)

ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือค่าทางสถิติที่บ่งบอกถึงการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูล ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่ามากหากข้อมูลมีการกระจายตัวสูงและจะมีค่าเป็นศูนย์หากข้อมูลไม่มีการกระจายตัวเลย โดยมีสมการการคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (21)$$

เมื่อ	$\sigma$	คือ	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	$x_i$	คือ	ข้อมูลลำดับที่ $i$
	$\bar{x}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด
	$n$	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด

- ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty or Standard Error of Mean)

ค่าความไม่แน่นอนในการวัด คือค่าทางสถิติที่บ่งบอกถึงความไม่แน่นอนในการวัดหรือความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดค่าการทดลอง โดยมีสมการการคำนวณดังนี้

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (22)$$

เมื่อ	$\sigma_{\bar{x}}$	คือ	ค่าความไม่แน่นอนในการวัด
	$\sigma$	คือ	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	$n$	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการทดสอบเพื่อหารัศมีของเลนส์จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

จากการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่มีค่าความยาวคลื่นที่แน่นอน 632.8 นาโนเมตร เข้าสู่อุปกรณ์วงแหวนของนิวตันที่มีเลนส์ที่เราต้องการทราบค่ารัศมีความโค้ง และบันทึกขนาดของริ้วการแทรกสอดริ้วที่ 2, 4, 8 และ 10 ตามลำดับ และคำนวณค่าที่จะนำไปใช้ในการหารัศมีต่อไป ซึ่งการใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนจะทำบันทึกผลการทดลองซ้ำห้าครั้งเพื่อความถูกต้องและแม่นยำ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 1

ลำดับของริ้วการแทรกสอด, m	ขนาดของริ้วการแทรกสอดด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของริ้วการแทรกสอดด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ ((cm) <sup>2</sup> )
2	5.026	5.383	0.357	0.1274
4	4.982	5.423	0.441	0.1945
6	4.933	5.455	0.522	0.2725
8	4.904	5.486	0.582	0.3387
10	4.875	5.514	0.639	0.4083

จากตารางที่ 4.1 จะนำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการที่ 20 เพื่อคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์ โดยการจับคู่ค่าความระหว่างริ้วการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จะได้ค่ารัศมีความโค้งเป็นหน่วยเซนติเมตรตามลำดับดังนี้ 132.5458, 154.0771, 130.7680 และ 137.4842 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.1 ได้ค่า 138.7188 เซนติเมตร

และนำค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาคำนวณย้อนกลับหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเพื่อยืนยันว่าค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาเป็นค่าที่ถูกต้อง โดยการจับคู่ค่าความระหว่างริ้วที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 เช่นเดียวกับการคำนวณหารัศมีของเลนส์ จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 604.6405, 702.8608, 596.5305 และ 627.1681 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.1 ได้ค่า 632.8000 นาโนเมตร

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 2

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((\text{cm})^2)$
2	5.014	5.380	0.366	0.1340
4	4.975	5.424	0.449	0.2016
6	4.936	5.455	0.519	0.2694
8	4.907	5.483	0.576	0.3318
10	4.877	5.511	0.634	0.4020

จากตารางที่ 4.2 จะนำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการที่ 20 เพื่อคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์ โดยการจับคู่ค่ามุมระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จะได้ค่ารัศมีความโค้งเป็นหน่วยเซนติเมตรตามลำดับดังนี้ 133.5335, 133.9286, 123.2617 และ 138.6694 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.2 ได้ค่า 132.3483 เซนติเมตร

และนำค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาคำนวณย้อนกลับหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเพื่อยืนยันว่าค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาเป็นค่าที่ถูกต้อง โดยการจับคู่ค่ามุมระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 เช่นเดียวกับการคำนวณหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 638.4668, 640.3558, 589.3540 และ 663.0233 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.2 ได้ค่า 632.8000 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 3

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((\text{cm})^2)$
2	5.012	5.381	0.369	0.1362
4	4.980	5.423	0.443	0.1962
6	4.934	5.459	0.525	0.2756
8	4.906	5.483	0.577	0.3329
10	4.880	5.517	0.637	0.4058

จากตารางที่ 4.3 จะนำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการที่ 20 เพื่อคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์ โดยการจับคู่ค่านวระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จะได้ค่ารัศมีความโค้งเป็นหน่วยเซนติเมตรตามลำดับดังนี้ 118.5208, 156.8426, 113.1874 และ 143.8053 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.3 ได้ค่า 133.0890 เซนติเมตร

และนำค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาคำนวณย้อนกลับหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเพื่อยืนยันว่าค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาเป็นค่าที่ถูกต้อง โดยการจับคู่ค่านวระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 เช่นเดียวกับการคำนวณหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 563.5707, 745.7920, 538.2100 และ 683.7992 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.3 ได้ค่า 632.8430 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 4

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((\text{cm})^2)$
2	5.020	5.381	0.361	0.1303
4	4.975	5.424	0.449	0.2016
6	4.933	5.458	0.525	0.2756
8	4.906	5.483	0.577	0.3329
10	4.877	5.511	0.634	0.4020

จากตารางที่ 4.4 จะนำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการที่ 20 เพื่อคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์ โดยการจับคู่ค่านวระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จะได้ค่ารัศมีความโค้งเป็นหน่วยเซนติเมตรตามลำดับดังนี้ 140.8422, 146.1757, 113.1874 และ 136.2989 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.4 ได้ค่า 134.1261 เซนติเมตร

และนำค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาคำนวณย้อนกลับหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเพื่อยืนยันว่าค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาเป็นค่าที่ถูกต้อง โดยการจับคู่ค่านวระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 เช่นเดียวกับการคำนวณหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 664.4871, 689.6500, 534.0127 และ 643.0520 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.4 ได้ค่า 632.8004 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนครั้งที่ 5

ลำดับของรีวกการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวกการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวกการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
2	5.018	5.381	0.363	0.1318
4	4.975	5.424	0.449	0.2016
6	4.933	5.455	0.522	0.2725
8	4.906	5.483	0.577	0.3329
10	4.874	5.514	0.640	0.4096

จากตารางที่ 4.5 จะนำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการที่ 20 เพื่อคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์ โดยการจับคู่ค่านวณระหว่างรีวกการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จะได้ค่ารัศมีความโค้งเป็นหน่วยเซนติเมตรตามลำดับดังนี้ 118.5208, 156.8426, 113.1874 และ 143.8053 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.5 ได้ค่า 133.08 เซนติเมตร

และนำค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาคำนวณย้อนกลับหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเพื่อยืนยันว่าค่ารัศมีความโค้งของเลนส์เป็นค่าที่ถูกต้อง โดยการจับคู่ค่านวณระหว่างรีวกการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 เช่นเดียวกับการคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์ จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 636.6713, 644.8688, 551.0532 และ 698.6079 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.5 ได้ค่า 632.8003 นาโนเมตร

จากการทดลองเก็บผลการทดลองทั้งห้าครั้งสามารถนำค่าทั้งห้าครั้งมาเฉลี่ยเพื่อให้ค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นจะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน 632.8087 นาโนเมตร และค่ารัศมีความโค้งของเลนส์มีค่า 135.1021 เซนติเมตร ซึ่งเราจะนำค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้ไปใช้ในการทดลองส่วนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์

การทดลองครั้งที่	รัศมีความโค้ง ของเลนส์	ค่าเฉลี่ย	Standard Deviation	Uncertainty
1	138.7188	135.1021	2.2080	0.9875
2	132.3483			
3	133.0890			
4	134.1261			
5	133.0800			

ตารางที่ 4.7 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

การทดลองครั้งที่	ความยาวคลื่น ของเลเซอร์ ฮีเลียม-นีออน	ค่าเฉลี่ย	Standard Deviation	Uncertainty
1	632.8000	632.8087	0.0167	0.0075
2	632.8000			
3	632.8430			
4	632.8004			
5	632.8003			

#### 4.2 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ที่หาได้

ค่ารัศมีความโค้งของเลนส์สามารถหาค่าได้จากสเฟียโรมิเตอร์เช่นกัน ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองจากสเฟียโรมิเตอร์อีกห้าครั้ง ได้ผลการทดลองเป็นหน่วยเซ็นติเมตรตามลำดับดังนี้ 128.4325, 111.3100, 128.4325, 119.2597 และ 119.2597 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ใช้ผลการทดลองจากสเฟียโรมิเตอร์ได้ค่า 121.3389 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองที่ได้จากสเฟียโรมิเตอร์

การทดลอง ครั้งที่	L	d	R	ค่าเฉลี่ย	Standard Deviation	Uncertainty
1	31.65	0.13	128.4325	121.3389	6.4786	2.8973
2	31.65	0.15	111.3100			
3	31.65	0.13	128.4325			
4	31.65	0.14	119.2597			
5	31.65	0.14	119.2597			

เมื่อทราบค่ารัศมีของเลนส์ที่หาได้จากสเฟียโรมิเตอร์และจากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนแล้ว เราสามารถนำค่าทั้งสองค่านี้นำมาหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างซึ่งเมื่อคำนวณแล้วจะได้ค่าความแตกต่างอยู่ที่ 10.7340% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้เนื่องจากทั้งสองวิธีในการหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์เป็นการทดลองทั้งสองวิธี

#### 4.3 ผลการทดสอบเพื่อหาความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดง

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 1

ลำดับของรีวกการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวกการ		R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
	แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)		
2	5.062	5.422	0.360	0.1296
4	5.010	5.463	0.453	0.2052
6	4.979	5.493	0.514	0.2642
8	4.937	5.524	0.587	0.3446
10	4.919	5.547	0.628	0.3944

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดง โดยการจับคู่จำนวนระหว่างรีวกการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.9 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 699.4710, 545.8834, 743.8818 และ 460.7626 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.9 ได้ค่า 612.4997 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 2

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
2	5.057	5.416	0.359	0.1289
4	5.013	5.463	0.450	0.2025
6	4.977	5.493	0.516	0.2663
8	4.939	5.525	0.586	0.3434
10	4.919	5.547	0.628	0.3944

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดง โดยการจับคู่ค่านวณระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.10 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 680.9665, 590.2943, 713.3494 และ 471.8654 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.10 ได้ค่า 614.1189 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 3

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
2	5.058	5.422	0.364	0.1325
4	5.010	5.461	0.451	0.2034
6	4.978	5.495	0.517	0.2673
8	4.939	5.524	0.585	0.3422
10	4.916	5.548	0.632	0.3994

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดง โดยการจับคู่ค่านวณระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.11 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 655.9854,

591.2195, 692.9944 และ 529.2294 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.11 ได้ค่า 617.3572 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 4

ลำดับของริ้วการ แทรกสอด, m	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
2	5.056	5.421	0.365	0.1332
4	5.011	5.465	0.454	0.2061
6	4.978	5.495	0.517	0.2673
8	4.940	5.524	0.584	0.3411
10	4.918	5.550	0.632	0.3994

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดง โดยการจับคู่ค่านวณระหว่างริ้วการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.12 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 674.4899, 566.2384, 682.8169 และ 539.4069 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.12 ได้ค่า 615.7380 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีแดงครั้งที่ 5

ลำดับของริ้วการ แทรกสอด, m	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
2	5.058	5.422	0.364	0.1325
4	5.014	5.463	0.449	0.2016
6	4.979	5.493	0.514	0.2642
8	4.941	5.526	0.585	0.3422
10	4.923	5.556	0.633	0.4007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดง โดยการจับคู่จำนวนระหว่างริ้วการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.13 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 639.3313, 579.1916, 721.6764 และ 541.2573 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.13 ได้ค่า 620.3642 นาโนเมตร

จากการทดลองเก็บผลการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ไดโอดสีแดงทั้งห้าครั้งสามารถนำค่าทั้งห้าครั้งมาเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นจะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดงมีค่า 616.0156 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่นของแสงสีแดง

ตารางที่ 4.14 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีแดง

การทดลองครั้งที่	ความยาวคลื่น ของ เลเซอร์ไดโอด	ค่าเฉลี่ย	Standard Deviation	Uncertainty
1	612.4997	616.0156	2.7078	1.2110
2	614.1189			
3	617.3572			
4	615.7380			
5	620.3642			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการทดสอบเพื่อหาความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียวกครั้ง 1

ลำดับของริ้วการ แทรกสอด, m	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((\text{cm})^2)$
2	5.078	5.418	0.340	0.1156
4	5.037	5.454	0.417	0.1739
6	5.010	5.483	0.473	0.2237
8	4.981	5.512	0.531	0.2820
10	4.957	5.532	0.575	0.3306

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว โดยการจับคู่ค่านวณะหว่างริ้วการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.15 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 539.4069, 460.7626, 539.4069 และ 449.6599 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.15 ได้ค่า 497.3091 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียวกครั้ง 2

ลำดับของริ้วการ แทรกสอด, m	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((\text{cm})^2)$
2	5.057	5.400	0.343	0.1176
4	5.020	5.430	0.410	0.1681
6	4.983	5.464	0.481	0.2314
8	4.958	5.489	0.531	0.2820
10	4.932	5.516	0.584	0.3411

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว โดยการจับคู่ค่านวณระหว่างรั้วการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.16 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 467.2392, 585.6682, 468.1644 และ 546.8087 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.16 ได้ค่า 516.9701 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียครั้งที่ 3

ลำดับของรั้วการแทรกสอด, m	ขนาดของรั้วการแทรกสอดด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรั้วการแทรกสอดด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ ((cm) <sup>2</sup> )
2	5.057	5.394	0.337	0.1136
4	5.020	5.430	0.410	0.1681
6	4.984	5.468	0.484	0.2343
8	4.957	5.491	0.534	0.2852
10	4.930	5.516	0.586	0.3434

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม - นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว โดยการจับคู่ค่านวณระหว่างรั้วการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.17 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 504.2483, 612.4997, 470.9401 และ 538.4816 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.17 ได้ค่า 531.5424 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกร้นำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียวครั้งที่ 4

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((\text{cm})^2)$
2	5.059	5.39	0.331	0.1096
4	5.022	5.433	0.411	0.1689
6	4.984	5.464	0.480	0.2304
8	4.959	5.485	0.526	0.2767
10	4.933	5.515	0.582	0.3387

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว โดยการจับคู่ค่านวระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.18 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 548.6591, 569.0141, 428.3797 และ 663.3872 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.18 ได้ค่า 552.3600 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีเขียวครั้งที่ 5

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((\text{cm})^2)$
2	5.070	5.400	0.330	0.1089
4	5.022	5.433	0.411	0.1689
6	4.983	5.468	0.485	0.2352
8	4.973	5.488	0.515	0.2652
10	4.934	5.514	0.580	0.3364

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว โดยการจับคู่ค่านวระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.19 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 555.1357,

613.4250, 277.5679 และ 658.7610 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียวที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.19 ได้ค่า 526.2224 นาโนเมตร

จากการทดลองเก็บผลการทดลองทั้งห้าครั้งโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ไดโอดสีเขียวสามารถนำค่าทั้งห้าครั้งมาเฉลี่ยเพื่อให้ค่าที่ดีที่สุดดังนั้นก็จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว 524.8808 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่นของแสงสีเขียว

ตารางที่ 4.20 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว

การทดลองครั้งที่	ข้อมูล	ค่าเฉลี่ย	Standard Deviation	Uncertainty
1	497.3091	524.8808	18.0225	8.0599
2	516.9701			
3	531.5424			
4	552.3600			
5	526.2224			

#### 4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วง

ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 1

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
2	5.065	5.374	0.309	0.0955
4	5.032	5.408	0.376	0.1414
6	5.008	5.435	0.427	0.1823
8	4.983	5.464	0.481	0.2314
10	4.963	5.479	0.516	0.2663

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วง โดยการจับคู่ค่านวณระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.21 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 424.6788,

379.3427, 453.3608 และ 322.9039 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.21 ได้ค่า 395.0715 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.22 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 2

ลำดับของริ้วการ แทรกสอด, m	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
2	5.067	5.381	0.314	0.0986
4	5.033	5.415	0.382	0.1459
6	5.01	5.438	0.428	0.1832
8	4.983	5.463	0.480	0.2304
10	4.964	5.483	0.519	0.2694

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วง โดยการจับคู่ค่านวณะระหว่างริ้วการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.22 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 438.5572, 344.1841, 437.6319 และ 359.9129 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.22 ได้ค่า 395.0715 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 3

ลำดับของริ้วการ แทรกสอด, m	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของริ้วการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
2	5.068	5.375	0.307	0.0942
4	5.033	5.414	0.381	0.1452
6	5.008	5.435	0.427	0.1823
8	4.983	5.461	0.478	0.2285
10	4.962	5.481	0.519	0.2694

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับดูการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วง โดยการจับคู่จำนวนระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.23 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 470.9401, 344.1841, 426.5292 และ 378.4175 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.23 ได้ค่า 405.0177 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.24 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 4

ลำดับของรีวการแทรกสอด, m	ขนาดของรีวการแทรกสอดด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการแทรกสอดด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ ((cm) <sup>2</sup> )
2	5.080	5.394	0.314	0.0986
4	5.044	5.43	0.386	0.1490
6	5.024	5.455	0.431	0.1858
8	5.003	5.472	0.469	0.2200
10	4.98	5.494	0.514	0.2642

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วง โดยการจับคู่จำนวนระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.24 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 470.9401, 340.4832, 316.4273 และ 408.9499 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.24 ได้ค่า 384.2000 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ผลการทดลองที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดสีม่วงครั้งที่ 5

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2$ $((cm)^2)$
2	5.073	5.374	0.301	0.0906
4	5.033	5.418	0.385	0.1482
6	5.012	5.438	0.426	0.1815
8	4.983	5.465	0.482	0.2323
10	4.965	5.483	0.518	0.2683

เมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ได้มาจากการทดลองของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนคือ 135.1021 เซนติเมตร และทำการหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วง โดยการจับคู่จำนวนระหว่างรีวการแทรกสอดที่ 4 - 2, 6 - 4, 8 - 6 และ 10 - 8 จากตารางที่ 4.25 จะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่มีหน่วยเป็นนาโนเมตรตามลำดับต่อไปนี้ 532.9302, 307.1750, 470.9401 และ 333.0814 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงที่ใช้ผลการทดลองจากตารางที่ 4.25 ได้ค่า 411.0316 นาโนเมตร.

จากการทดลองเก็บผลการทดลองทั้งห้าครั้งโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ไดโอดสีม่วงสามารถนำค่าทั้งห้าครั้งมาเฉลี่ยเพื่อให้ค่าที่ดีที่สุด ดังนั้นจะได้ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วงมีค่า 398.0784 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีม่วง

ตารางที่ 4.26 การหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีม่วง

การทดลองครั้งที่	ความยาวคลื่น ของ เลเซอร์ไดโอด	ค่าเฉลี่ย	Standard Deviation	Uncertainty
1	395.0715	398.0784	9.2372	4.1310
2	395.0715			
3	405.0177			
4	384.2000			
5	411.0316			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำข้อมูลไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยโครงการพิเศษนี้ได้สร้างชุดทดลองวงแหวนของนิวตันขึ้น ซึ่งนำมาพัฒนาโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ไดโอดสีต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งในการทดลองนี้เราได้ นำเลเซอร์ไดโอดสีแดง, สีเขียว และสีม่วง และใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นตัวอ้างอิงว่าค่าที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำ และจะนำค่าที่ได้ไปหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์และความยาวคลื่นที่เราต้องการทราบค่า

ในส่วนของการบันทึกค่าที่จะนำมาใช้ในการหาค่ารัศมีของเลนส์จะต้องมีแว่นกันแสงเลเซอร์ เพราะเลเซอร์แต่ละสีมีความเข้มที่แตกต่างกัน ทำให้ในการบันทึกค่าที่ต้องการตรวจสอบความแม่นยำอย่างถี่ถ้วนมีความสะดวกและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

และการทดลองนี้ได้ถูกคิดค้นโดยนิวตันจึงเป็นที่มาของชื่อการทดลองวงแหวนของนิวตัน ซึ่งสามารถใช้หารัศมีความโค้งของเลนส์ได้ โดยปกติในการหารัศมีความโค้งของเลนส์จะใช้ สเฟียโรมิเตอร์ ซึ่งการหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์จากสเฟียโรมิเตอร์อาจทำให้เลนส์ที่ต้องการวัดมีการชำรุดเนื่องจากตัวเลนส์ได้สัมผัสกับขาแหลมทั้งสามขาของสเฟียโรมิเตอร์โดยตรง แต่ถ้าเราใช้การทดลองวงแหวนของ นิวตันซึ่งเป็นการทดลองทางแสงโดยใช้ทฤษฎีการแทรกสอดของแสงมาประยุกต์ ผิวเลนส์จะไม่ถูกสัมผัสเหมือนกับการใช้สเฟียโรมิเตอร์ โดยทฤษฎีของนิวตันสามารถคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์ได้จากสมการที่นำเสนอไปข้างต้นในหน่วยเซนติเมตร นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเมื่อทราบค่าที่แน่นอนของรัศมีความโค้งของเลนส์ได้อีกด้วย

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ชุดทดลองเรื่องวงแหวนของนิวตันอาจเป็นวิธีที่ใช้วัดรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ดีกว่าเนื่องจาก จะไม่มีการสัมผัสเลนส์จึงไม่ทำให้ผิวเลนส์เกิดการชำรุด แต่อาจมีข้อเสียเนื่องจากต้องใช้เวลาในการจัดแสงเพื่อนำไปบันทึกผลและคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์ และขนาดของรีวิการแทรกสอดของวงในจะมีขนาดกว้างกว่าวงนอก จึงต้องทำการวัดขนาดของรีวิการแทรกสอดอย่างรอบคอบ โดยการวัดขอบในและขอบนอกของรีวิการแทรกสอดแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนของขนาดของรีวิการแทรกสอดวงใน ซึ่งผู้ทดลองจะต้องระมัดระวังโดยการใส่แว่นกันแสงเลเซอร์ตลอดเวลาเนื่องจากแสงเลเซอร์บางช่วงความยาวคลื่นอาจมีความเข้มสูงที่สะท้อนเข้าตา และจะต้องระมัดระวังในการทำการทดลองต้องไม่สัมผัสอุปกรณ์บนแผ่นงานทางทรนศาสตร์เพราะจะทำให้รีวิการแทรกสอดที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. **ชนิดของเลเซอร์**. [Online]. Available :  
<http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=20&chap=5&page=t20-5-infodetail06.html>.
- ฟิสิกส์ราชมงคล. **ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)**. [Online]. Available :  
<http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/labphysics1/cal/1/b314.htm>.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. 2014. **สเฟียโรมิเตอร์ (Spherometer)**. [Online]. Available : <https://physiclab08.wordpress.com/spherometer/>.
- วิกิพีเดีย. 2015. **เลเซอร์**. [Online]. Available :  
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C>.
- วิลสันม, เจ. 2544. **ทฤษฎีและการประยุกต์ (Laser)**. แปลโดย สุรพล รักวิจัย. กรุงเทพฯ : เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า.
- สมบัติ พุทธจักร. 2555. **ทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์และการประยุกต์**. ปัตตานี : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- สุรศักดิ์ เชียงกา. 2557. **ทัศนศาสตร์เบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : แอคทีฟพริ้นท์.
- สุวรรณณ คูสำราญ. 2537. **ทัศนศาสตร์กายภาพ PHYSICAL OPTICS**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- C-H Tsai, K-C Tien, M-C Chen, K-M Chang, M-S Lin, H-C Cheng, Y-H Lin, H-W Lin, C-L Lin and C-C Wu. 2009. **“Organic Electronics.”** Taipei : National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, ROC.
- Chris Vuille, Raymond A. Serway and Jerry S. Faughn. 2009. **College Physic**. Australia : Brooks/Cole Cengage Learning.
- David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker. 2005. **Fundamentals of Physics**. Hoboken : John Wiley.
- Wikipedia. 2015. **Newton's rings**. [Online]. Available :  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s\\_rings](http://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s_rings).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Newton's Ring Apparatus

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของ Newton's Ring
2. เพื่อหาค่ารัศมีของเลนส์ในอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน
3. เพื่อหาค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนของเลเซอร์ไดโอด

### อุปกรณ์

1. เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนพร้อมอุปกรณ์จับยึด	1	ชุด
2. เลเซอร์ไดโอดพร้อมอุปกรณ์จับยึด	1	ชุด
3. กระจกสำหรับสะท้อนพร้อมอุปกรณ์จับยึด	1	ชุด
4. เลนส์สำหรับขยายลำแสงเลเซอร์พร้อมอุปกรณ์จับยึด	1	ชุด
5. กระจกใสสำหรับสะท้อนและแยกลำแสง	1	ชิ้น
6. ชุดอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน	1	ชุด
7. กล้องจุลทรรศน์สำหรับการวัด	1	ตัว
8. แวนตาสำหรับป้องกันแสงเลเซอร์	1	อัน

### ทฤษฎี

#### อุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

อุปกรณ์ของวงแหวนนิวตันประกอบด้วย 2 ส่วนคือ เลนส์นูน (convex lens) ซึ่งจะต้องเป็นเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสมากๆ และแผ่นแก้วเรียบเป็นส่วนที่เป็นฐานรองสำหรับวางเลนส์นูนไว้ด้านบน โดยทั้งเลนส์นูนแก้วและแผ่นแก้วเรียบควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันและความหนาใกล้เคียงกัน จากนั้นนำมาใส่ตัวยึดที่มีลักษณะเป็นวงกลมเพื่อขันเกลียวน็อตเพื่อปรับขนาดของช่องว่างระหว่างเลนส์กับแผ่นแก้วเรียบให้เกิดจุดที่เกิดเป็นริ้วการแทรกสอด (Fringe)

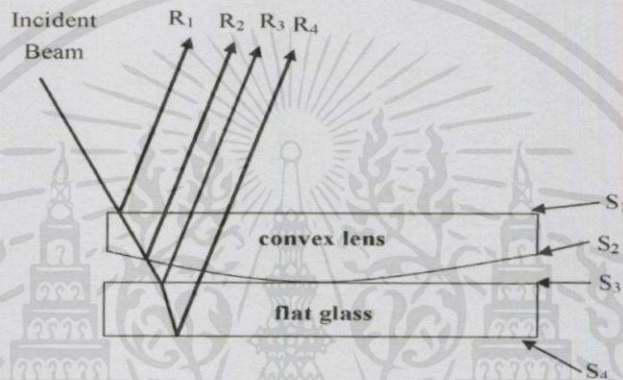


รูปที่ 1 อุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หลักการทำงานของอุปกรณ์วงแหวนนิวตัน

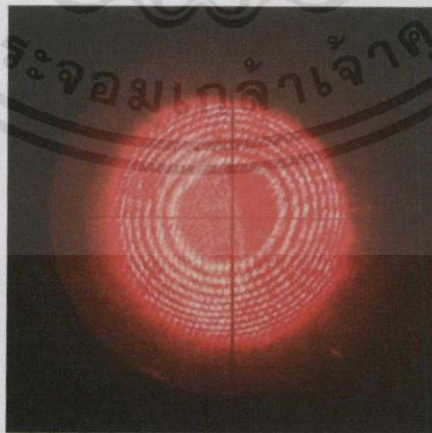
อุปกรณ์ของวงแหวนนิวตันประกอบด้วยเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสมากๆ และแผ่นแก้วเรียบ ซึ่งเลนส์นูนจะวางอยู่ด้านบนของแผ่นแก้วเรียบ จากอุปกรณ์นี้จะมีช่องที่สัมผัสกับอากาศสี่ช่องของเลนส์นูนกับแผ่นแก้วเรียบโดยกำหนดให้เป็นพื้นที่ ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ ) ดังรูปที่ 2 จากแหล่งกำเนิดแสงที่เป็น Monochromatic Light ลำแสงจะตกกระทบกับผิวเลนส์นูนจะเกิดการสะท้อนและหักเหผ่านรอยต่อ  $S_1$  และเดินทางต่อมาถึงบริเวณ  $S_2$  จะเกิดการสะท้อนและหักเหและบริเวณรอยต่อที่เหลือ ( $S_3, S_4$ ) ก็จะมีการสะท้อนและหักเหแบบเดียวกัน ซึ่งแสงที่สะท้อนจากรอยต่อ  $S_2$  และ  $S_3$  จะเกิดการแทรกสอดกัน แต่แสงที่สะท้อนจาก  $S_1$  และ  $S_4$  จะไม่เกิดการแทรกสอดกันเนื่องจากความหนาของแผ่นแก้วราบกับเลนส์นูนนั้นมากกว่าความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 2 การแทรกสอดของอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

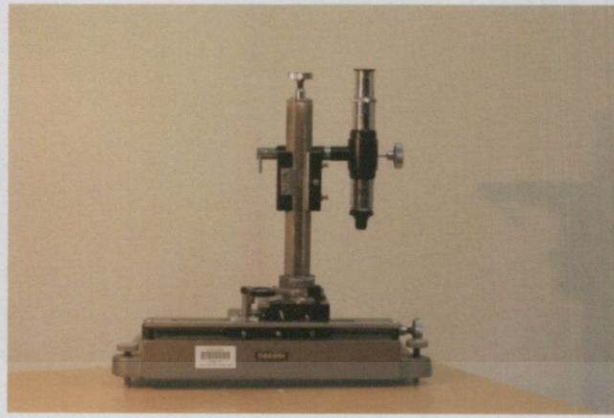
### วิธีการอ่านขนาดของริ้วการแทรกสอดจากกล้องจุลทรรศน์

จากการทดลองจะใช้กล้องจุลทรรศน์ในการอ่านริ้วการแทรกสอดและบันทึกผลทดลองจากค่าที่อ่านได้จากกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งจะได้จากการปรับเลื่อนตัวกล้องไปบนระนาบแกนนอนซ้ายและขวา และวัดขนาดของฟริ้งตามที่ได้กำหนดในตารางการทดลองที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3 ตัวอย่างของริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4 กล้องจุลทรรศน์แบบปรับเลื่อนได้

จากรูปที่ 4 เราสามารถปรับเลื่อนตัวกล้องไปบนระนาบแกนนอนและแนวตั้งได้และสามารถปรับหาความชัดของภาพโดยเลื่อนกล้องขึ้นหรือลงเพื่อให้ตรงกับความยาวโฟกัสของตัวกล้องจุลทรรศน์ และมีวิธีการอ่านค่าจากแท่นสเกล ซึ่งจะแบ่งสเกลเป็นสเกลหลักและสเกลเวอร์เนียซึ่งบนสเกลหลักนั้นจะถูกแบ่งสเกลให้อ่านค่าละเอียดที่สุดอยู่ที่ครึ่งมิลลิเมตร (0.5 mm) ส่วนความละเอียดของสเกลเวอร์เนียจะอยู่ (0.001 cm) และขีดบนสเกลเวอร์เนียจะมีทั้งหมด 50 ขีดแต่จะมีทั้งหมด 100 ส่วนซึ่งก็คือ 1 mm นั้นเองและจากรูปที่ 5 แสดงวิธีหาค่า Least count ของสเกลเวอร์เนียโดยให้  $s$  ในสมการแทน 1 ช่องที่เล็กที่สุดบนสเกลหลัก และ  $n$  แทนจำนวนช่องทั้งหมดบนสเกลเวอร์เนีย โดยช่องที่เล็กที่สุดบนสเกลหลัก  $s$  มีค่าเท่ากับ 0.5 mm และจำนวนช่องทั้งหมดบนสเกลเวอร์เนีย  $n$  มีค่าเท่ากับ 50 ช่อง โดยค่า Least count สามารถหาได้จากสมการดังกล่าวนี้

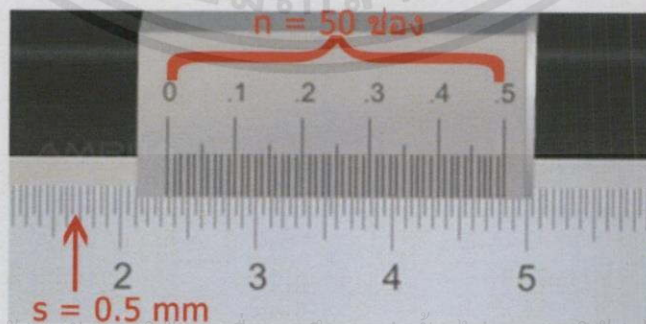
$$\frac{s}{n} = \frac{0.5}{50}$$

(1)

จะได้ค่า Least count ของสเกลเวอร์เนีย คือ 0.01 mm

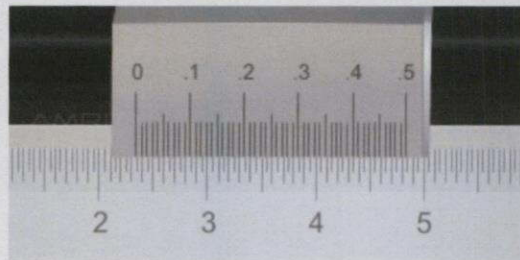
เมื่อ  $s$  คือ 1 ช่องที่เล็กที่สุดบนสเกลหลักมีค่าเท่ากับ 0.5 mm

$N$  คือ จำนวนช่องทั้งหมดบนสเกลเวอร์เนีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5 แสดงวิธีหาค่า Least count ของกล้องจุลทรรศน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลขบถนอกเหนือจากของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรู้ค่า Least count ของสเกลเวอร์เนียร์แล้วเราก็สามารถอ่านค่าที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์ได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการวัดค่าของสเกลบนกล้องจุลทรรศน์

จากรูปที่ 6 เราจะศึกษาการอ่านค่าของสเกลหลักและสเกลเวอร์เนียร์โดยให้ดูที่ขีด 0 บนสเกลเวอร์เนียร์ว่าตรงกับขีดใดบนสเกลหลักจากรูปที่ 6 จะสังเกตเห็นว่าขีด 0 บนสเกลเวอร์เนียร์อยู่เลยขีดที่ 2.300 เซนติเมตร แต่ไม่ถึงขีด 2.350 เซนติเมตร โดยค่าของทศนิยมตำแหน่งที่ 2 และ 3 นี้จะอ่านแบบละเอียดโดยใช้สเกลเวอร์เนียร์ซึ่งวิธีการอ่านคือดูว่าขีดไหนบนสเกลเวอร์เนียร์ตรงกับขีดบนสเกลหลักอย่างเช่นในรูปขีดที่ถูกต้องคือขีดที่ 29 บนสเกลเวอร์เนียร์ดังนั้นนำค่านี้ไปคูณกับค่า Least count จะได้เป็น  $0.029 (29 \times 0.001)$  เซนติเมตร แล้วนำค่าไปนี้ไปบวกกับค่าที่อ่านได้บนหลักอยู่ก่อนแล้ว นั่นก็คือ 2.300 จะได้เป็น  $2.300 + 0.029 = 2.329$  เซนติเมตรนั่นเอง

การคำนวณหารัศมีความโค้งจากเครื่องมือวงแหวนของนิวตัน

โดยสามารถคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์ที่ต้องการทราบค่าได้ดังนี้

$$R = \frac{d_{m+p}^2 - d_m^2}{4p\lambda} \quad (2)$$

เมื่อ	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง
	R	คือ	รัศมีความโค้งของเลนส์
	$d_{m+p}^2$	คือ	ขนาดของรีวกการแทรกสอดวงนอก
	$d_m^2$	คือ	ขนาดของรีวกการแทรกสอดวงใน
	p	คือ	ระยะห่างลำดับของรีวกการแทรกสอด

โดยแหล่งกำเนิดแสงเริ่มต้นคือเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน จะมีค่าความยาวคลื่นอยู่ที่ 632.8 นาโนเมตร และสมการนี้ยังสามารถนำไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงต่างๆได้เมื่อทราบค่ารัศมีความโค้งที่แน่นอนของเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

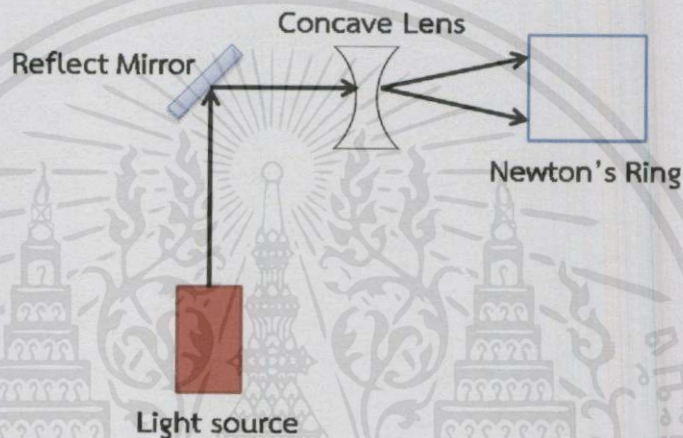
## วิธีการทดลอง

หมายเหตุ เมื่อจัดการทดลองเสร็จพยายามอย่าสัมผัสอุปกรณ์ต่างๆบนแผ่นงานทางทัศนศาสตร์

### ตอนที่ 1 การวัดรัศมีความโค้งของเลนส์ที่ใช้ในอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน

#### ตอนที่ 1.1 การหาค่ารัศมีความโค้งของเลนส์โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

1. ขันเกลียวน็อตบนอุปกรณ์วงแหวนของนิวตันเพื่อปรับขนาดของช่องว่างระหว่างเลนส์กับแผ่นแก้วเรียบให้เกิดจุดที่เกิดเป็นริ้วการแทรกสอด พยายามให้ริ้วการแทรกสอดเกิดบนกึ่งกลางอุปกรณ์เพื่อง่ายต่อการส่องกล้องจุลทรรศน์
2. ให้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่มีค่าความยาวคลื่นที่แน่นอน
3. จัดการทดลองดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ไดอะแกรมของการทดลอง

4. ปรับลำแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบบนอุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน โดยหมุนกระจกสะท้อนให้ลำแสงสะท้อนลงไปที่อุปกรณ์วงแหวนของนิวตัน
  5. ส่องดูขนาดของริ้วการแทรกสอดจากกล้องจุลทรรศน์
  6. บันทึกผลการทดลองโดยอ่านขนาดของริ้วการแทรกสอดในระนาบแกน  $x$  ทั้งทางด้านซ้ายและด้านขวาตามตารางที่ 1
  7. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
  8. นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหารัศมีความโค้งของเลนส์
- ตอนที่ 1.2 การหาค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เพื่อยืนยันว่าค่ารัศมีความโค้งของเลนส์มีความถูกต้องแม่นยำ

1. นำผลการทดลองจากในตอนที่ 1.1 มาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน
2. แทนค่ารัศมีความโค้งของเลนส์ด้วยผลการทดลองที่คำนวณได้จากตอนที่ 1.1
3. เช็คค่าความยาวคลื่นที่คำนวณออกมาได้ว่ามีค่าเท่ากับ 632.8 นาโนเมตร

### ตอนที่ 2 การวัดความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดที่มีสีแตกต่างกัน

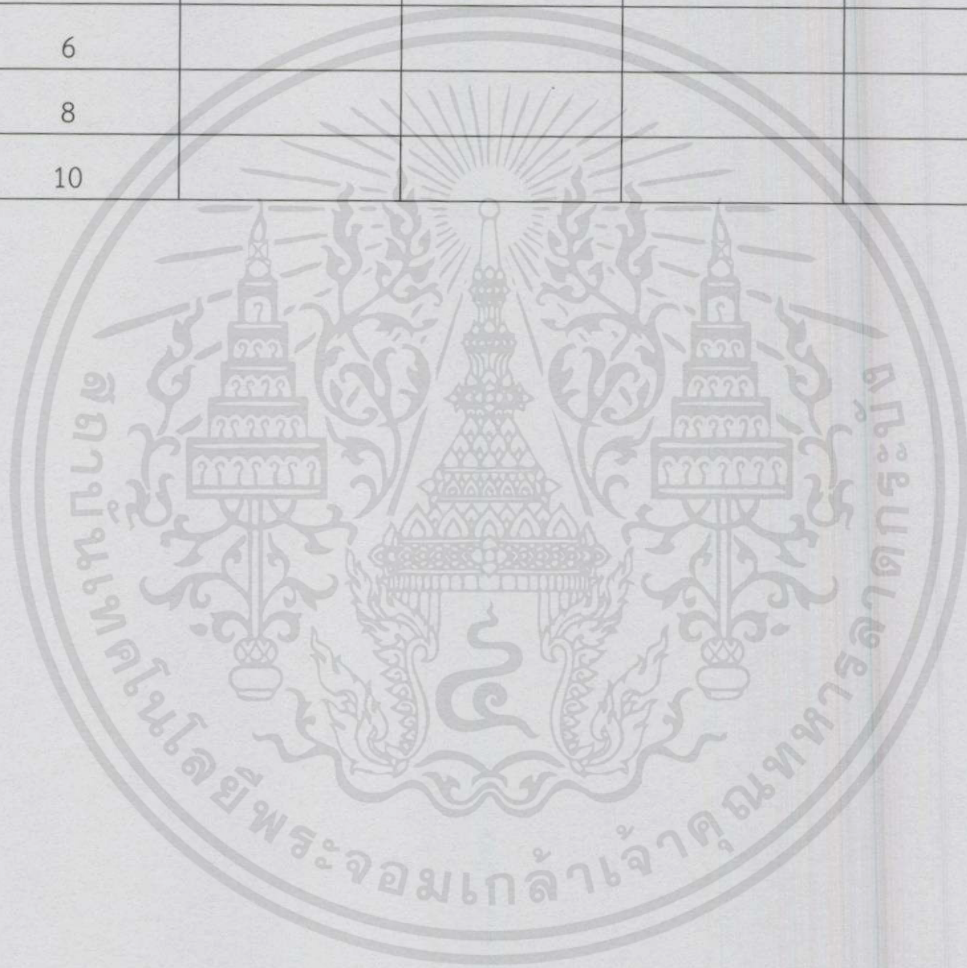
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

1. เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นเลเซอร์ไดโอดสีต่างๆ
2. ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 1.1
3. คำนวณหาค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดสีต่างๆ

### ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ตารางบันทึกผลสำหรับการทดลองทุกขั้นตอน

ลำดับของรีวการ แทรกสอด, m	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านซ้าย, L (cm)	ขนาดของรีวการ แทรกสอด ด้านขวา, R (cm)	R-L, d (cm)	$(R-L)^2, d^2 ((\text{cm})^2)$
2				
4				
6				
8				
10				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Helium-Neon Laser

## 1 Introduction

The Helium-Neon Laser, short HeNe-Laser, is one of the most common used laser for alignment, reference laser and optics demonstrations. Its most used wavelength is at 632.8nm (red). It also has lasing transition in IR, orange and green. This experiment will make you familiar with basic cavity alignment procedures, cavity characteristics, beam profile analysis and Gaussian optics.

## 2 Background

### 2.1 Helium-Neon Gain Medium

The Gain medium is a mixture of the two gases Helium and Neon. Mostly the mixture ranges from 5:1 to 20:1 ratios with relatively low pressure. A high voltage source (typical value of 1kV) is exciting the Helium atoms to long-lived, meta-stable states. Collisions of the excited Helium atoms with the ground state Neon atoms results in a transfer of the energy. The excited Neon atom can relax to ground state by spontaneous and stimulated emission of a photon. The strongest transitions are at 1.5  $\mu\text{m}$  and 3.39  $\mu\text{m}$ . In the visible, transitions at 543.5 nm (green, measured in vacuum), 594 nm (yellow) and 612 nm (orange) exists. The typical red laser uses the transition at 632.8 nm(measured in air).

### 2.2 Laser Cavity

A laser cavity is a resonant feedback system necessary for a laser. They can be setup in a ring or linear configuration. In this experiment, you will build a linear cavity composed of two curved mirrors. For resonance condition, there has to be integral numbers of half wavelength in between these two mirrors

$$L = q \frac{\lambda}{2n} \quad (1)$$

where L is the length of the cavity,  $\lambda$  the wavelength, n the refractive index and q an integer. Eqn (1) can be rewritten in terms of frequency  $\nu$

$$\nu = q \frac{c}{2nL}, \quad (2)$$

where c is the speed of light in vacuum. This means only discrete frequencies are resonant inside the cavity and contribute to the lasing. These frequencies are also called longitudinal modes. Eventually, the lasing modes are defined by the overlap of the gain medium spectrum and the cavity spectrum.

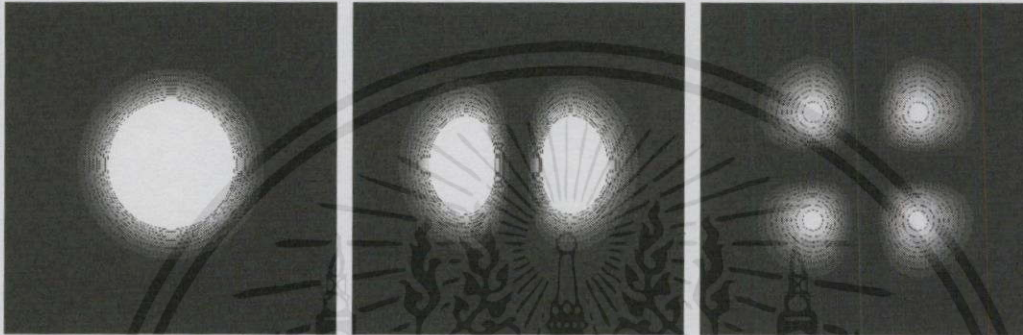
### 2.3 Hermite-Gaussian or tranverse Modes

In the paraxial approximation, the solution to the wave equation are pure transverse electric and magnetic (TEM) waves. In this experiment, you will investigate some properties of TEM<sub>00</sub> (Gaussian) and TEM<sub>01</sub> modes. These modes are called transverse modes in a laser. In figure 1 the three different TEM-modes are shown. These TEM modes also affect the longitudinal modes, since the phase shift of higher Hermit-Gaussian modes is more complicated when propagating

from one side of the cavity to the other one. (Note: the phase shift description is just a different interpretation of the integers half wavelength that fit inside the resonator). So the frequencies of the  $TEM_{m,p,q}$  can be written in the form:

$$\nu_{m,p,q} = \frac{c}{2nL} \left[ q + \frac{1+m+p}{\pi} \cos^{-1}(g_1 g_2)^{1/2} \right] \quad (3)$$

with  $g_{1,2} = 1 - \frac{L}{R_{1,2}}$  where  $R_{1,2}$  are the radius of curvatures of the mirrors.



**Figure 1:** The intensity profile of a  $TEM_{00}$  (left), the  $TEM_{10}$  (middle) and the  $TEM_{11}$  (right) are shown.

### 3 Experiments

#### 3.1 Basic cavity alignment

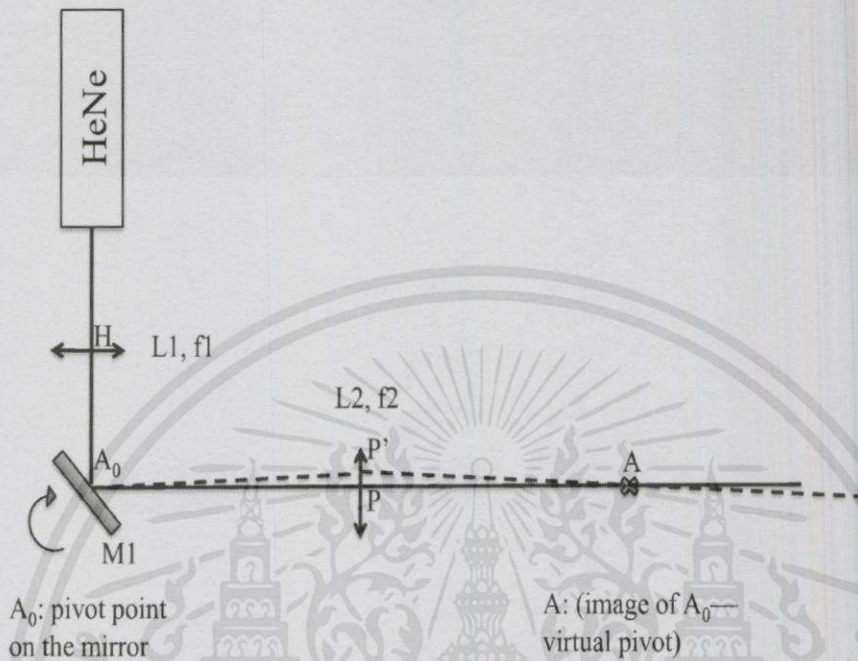
For the alignment, we will use another He-Ne laser to perform the alignment of this laser, which brings the question of the egg and the chicken: how were the first He-Ne lasers aligned? My old Boss at Philips Research Labs in Eindhoven had his technique. He looked down the tube, to center the image of the pupil of his eye. Then he placed the second mirror, lined it up, and ... jumped away when the laser oscillation started.

#### 3.2 Alignment of a Long Laser Tube: The Virtual Pivot

HeNe and Argon lasers typically have very small bore diameters. It is therefore difficult to send an alignment laser beam through these tubes. In addition, the laser manufacturer makes your life most difficult by locating the external cavity mirrors so close to the tube, that there is no way to insert any sophisticated mirror mount between the end mirror mount and the tube.

The solution is an optical arrangement that enables you to rotate the beam around a pivot point located at the tube entrance. The optical setup should also allow for independent positioning of this “pivot point”. The principle of such a setup is described below in Fig. 2.

A two lens combination can be used to obtain an ideal alignment beam: a diameter small enough to penetrate the capillary tube of the laser, yet not too small in order to have a reasonable divergence (say a waist of  $850\mu\text{m}$  over 3 meters). In order to align the beam with the axis of the tube, it should be rotated around a point A located at the tube entrance (where it is of course not possible to position a mirror). The solution is to have the point A (the “virtual pivot point”) be the image of a real pivot point  $A_0$  as sketched in Fig. 2.



**Figure 2:** The virtual pivot. Note: The HeNe symbol here refers to a combination of a HeNe laser and optics that ensure minimal divergence, i.e. a well-collimated beam.

Since A is the image of  $A_0$  in the geometrical optics approximation, one sees that:

$$\frac{1}{\overline{A_0P}} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{\overline{AP}} \quad (4)$$

Given  $f_2$  and  $\overline{AP}$  (a convenient working distance from the tube), one can determine  $\overline{A_0P}$ . To position the lens  $L_1$ , the telescope system of lenses  $L_1L_2$  should be **confocal** (in order to transform one collimated beam into another collimated beam). One determines the distance  $\overline{HA_0}$  from the relation  $\overline{HA_0} + \overline{A_0P} = f_1 + f_2$ .

Fine adjustment of the distance  $\overline{A_0P}$  is required to correct for the fact that the geometrical optics approximation was used to position the lenses (in order to obtain the minimum divergence for the beam).

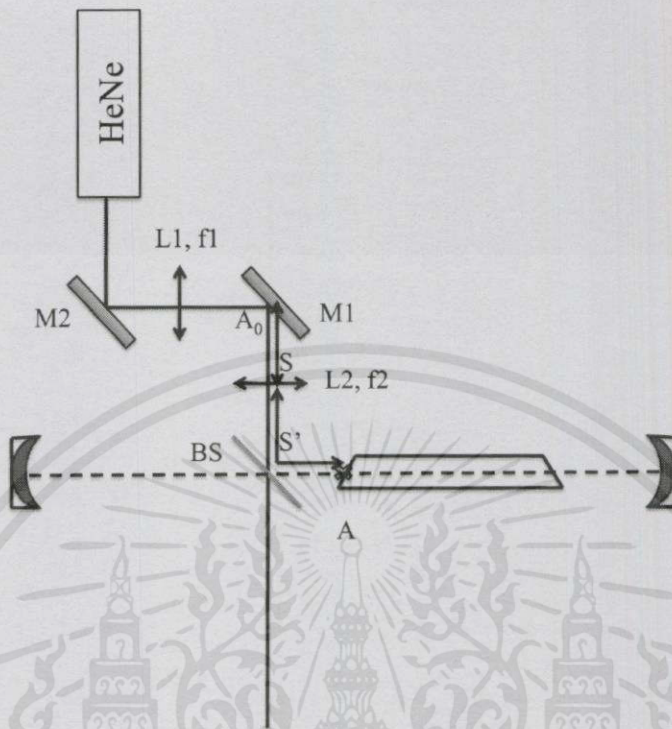
Verify the existence and position of a “virtual pivot point”.

Tips for alignment:

Make sure the HeNe alignment laser is horizontal all the way along the optics table, even after every optics (mirrors, lenses). You need to budget 10% of your time on this.

Make sure the HeNe alignment laser hit the pivot of mirror M1. It should be mounted on a mount with its pivot on the center of the mirror, but not outside. In this case you acquire an independent adjustment of beam direction.

Using a 50-50 beamsplitter, position the point A at the entrance face of the laser tube to be aligned (see Fig. 3). Lens  $L_2$  is mounted on a 3-dimension translation stage to provide an independent position adjustment of virtual pivot A. Now you have both beam direction adjustment (by M1) and position adjustment (by  $L_2$ ).



**Figure 3:** Laser alignment with the virtual pivot.

### 3.3 Beam Profile Measurements

1. Place a CCD camera with an appropriate choice of filters (neutral density and interference filters) near the exit of the output coupler (OC) with a weaker transmission. Be conscious of where the CCD array is located when positioning the camera with respect to the beam. Turn on the appropriate software and look at your beam. CCD's have a certain saturation level beyond which there is only a fixed amount of signal registered. By using the right filters you will be able to achieve a good signal that spans most if not all of the range of the camera without inducing saturation.
2. Make adjustments to the tip/tilt of the OC's to maximize the signal coming from the CCD and to make the profile appear as round as possible.
3. Insert a "mounted" hair inside the cavity pretty close to one of the output coupler's. With a little care and re-aligns of the laser you should be able to achieve the TEM(10) mode.
4. Remove the hair from cavity and play with the tip/tilt of the OC's. At some point it should be possible to observe a linear combination of the 00 and 10 modes. It will appear as an elongated elliptical like beam. Return the orientation of the OC's to the place where the beam is in the 00 mode.
5. Given  $R_1$ ,  $R_2$ , and by measuring  $L$  calculate the location and size of the minimum beam waist as well as the rayleigh range. Using the CCD camera measure the beam size at several locations far beyond the rayleigh range (7-15 times, You may need some folding mirrors to get that kind of distance). From the propagation theory of Gaussian beam,

you then can calculate both the size the position of the beam waist. Compare two results. (Please remember that the beam waist often denoted  $w_0$  is the radial distance from the peak to the place where the intensity reaches  $1/e^2$ .)

### 3.3.1 Questions:

1. Describe the basics on how a CCD array works.
2. Describe the basics on how an interference filter works.

## 3.4 Transverse and Longitudinal Modes

One of the common wavelengths emitted by the Helium-Neon Laser is 632.8 nm. Like all emission lines there is a finite bandwidth associated with this wavelength. The 1.5 GHz bandwidth of the Helium-Neon Laser is largely due to doppler broadening.

Another key feature of the Helium Neon laser is that it is a resonant cavity wherein you can have perhaps a 1,000,000 half-wavelengths ( $\lambda_1$ ) fit inside it. If 1,000,001 half-wavelengths fit inside the same cavity this would obviously correspond to a slightly shorter wavelength ( $\lambda_2$ ). Likewise due to the spatial structure of higher Hermite-Gaussian modes than just the 00 it is possible to obtain other wavelengths inside of the resonant cavity.

If various numbers of these wavelengths are permitted within the emission line of the laser you can often observe a beating between them. A beating of two (or more) wavelengths is really a periodic fluctuation in intensity due to the interference between two (or more) modes in time.

If you have enough wavelengths simultaneously beating against each other that are all locked in phase with respect to one another it is possible to achieve destructive interference in the vast majority of the cavity except in one place where a pulse is running. This locking of phases is appropriately called mode-locking, a deep and complex subject that is beyond the scope of this particular experiment.

The periodic beating of two wavelengths that are not separated by more than a few than  $10^{-3}$  Å is observable by a fast photodiode detector. This is the goal of this experiment.

Use a spectrum analyzer to observe the beating frequency between longitudinal modes.

Make adjustments to the cavity OC's such that you once again observe the linear combination of the 00 and 10 modes. Look to see if there is difference in the output of the spectrum analyzer. By zooming in on and translating the frequency span note the locations of the new peaks that have arisen with respect to those that occur when only the 00 mode is present.

### 3.4.1 Questions:

1. What are the limiting factors on the output power of the Helium-Neon laser?
2. Let's say that you have a He-Ne laser where  $q$  half-wavelengths of 632.8 nm fit inside the cavity. Furthermore let's assume you also have the next mode ( $q+1$ ) also riding along. Each of these has an electric field that goes with it that goes as  $E = \sin(kx - \omega t)$ . Plot  $I_{total}(t) = E^2(t)$  at a fix position  $x$  to see the effect of beating.
3. In Michelson Interferometer experiment, the intensity recorded by the photodiode is given by  $I = \frac{I_0}{2}[1 + \cos(\frac{\omega}{c}2\Delta d)]$ , in which  $\Delta d$  is the length variation of one arm. What will the intensity look like if the laser you are using has two adjacent longitudinal modes with equal intensity? How can you get the cavity length information from the intensity profile?

4. Create a table of the frequencies observed by the spectrum analyzer in this experiment. Compare what you measured with calculations (given the radius of curvature of two laser mirrors, measure the cavity length, then you can calculate the beat frequency).

### 3.5 Speed of Light measurement

Given the Eqns (1) and (2), develop a way to measure the speed of light by recording the beatnote of the longitudinal modes. Hint: There is no need to measure the total cavity length.

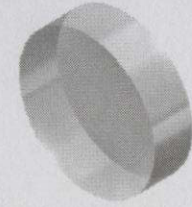


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

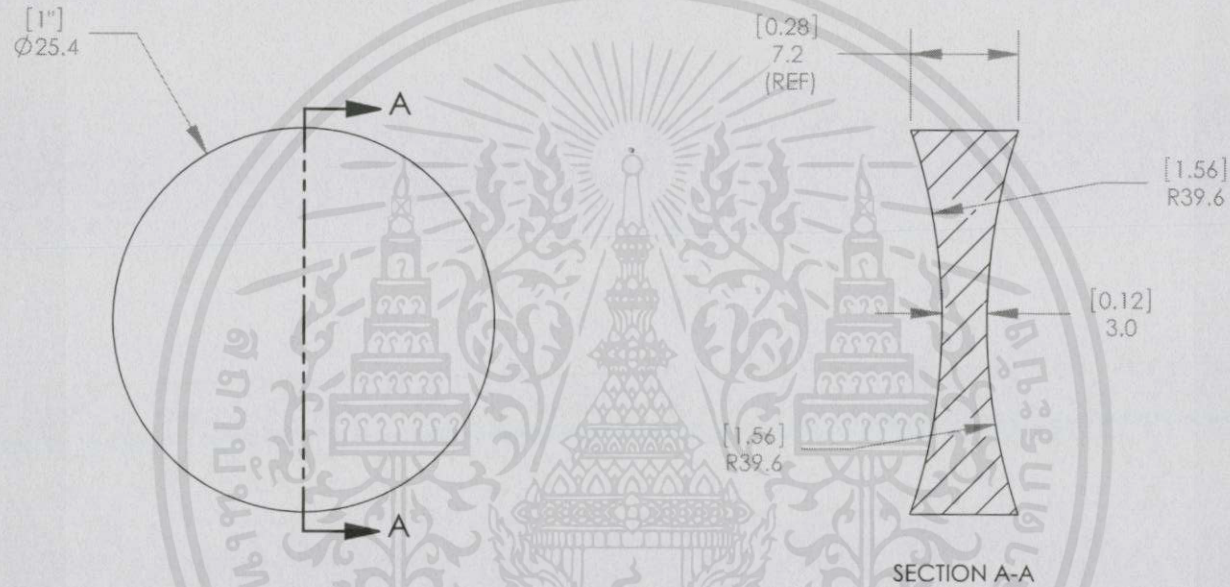
## ภาคผนวก ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1:1 ISOMETRIC VIEW FOR REFERENCE ONLY



NOTES/SPECIFICATIONS:

1. DESIGN WAVELENGTH: 587.6nm
2. FOCAL LENGTH:  $f = -25.0\text{mm} \pm 1\%$
3. BACK FOCAL LENGTH(REF):  $bf = -25.6\text{mm}$
4. CLEAR APERTURE:  $>90\%$
5. SURFACE QUALITY: 40-20 SCRATCH-DIG
6. CENTRATION:  $<3\text{arcmin}$
7. DIAMETER TOLERANCE:  $+0.0/-0.1\text{mm}$
8. THICKNESS TOLERANCE:  $\pm 0.1\text{mm}$
9. COATING: BBAR  $R_{\text{avg}} < 0.5\%$  FROM 350nm-700nm,  $0^\circ$  AOI, ON OUTER OPTICAL SURFACES

ALL DIMENSIONS ARE IN THE FORM  $\frac{\text{[in]}}{\text{mm}}$

THIS DRAWING IS FOR INFORMATION ONLY  
NOT INTENDED FOR MANUFACTURING

	NAME	DATE
DRAWN	BAG	12/14/2009
ENG APPR.	SG	12/22/2009
MFG APPR.	PM	12/23/2009

**PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL**

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF THORLABS, INC. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF THORLABS, INC. IS PROHIBITED.

**THORLABS INC.** PO BOX 366  
NEWTON NJ

TITLE: D= 25.4 F= -25.0 N-SF11 A  
COAT BI CONCAVE LENS

MATERIAL: N-SF11 SIZE A REV. B

SCALE: 2:1 SHEET 1 OF 1

DWG. NO. 5458-E01 PART NO. LD2297-A

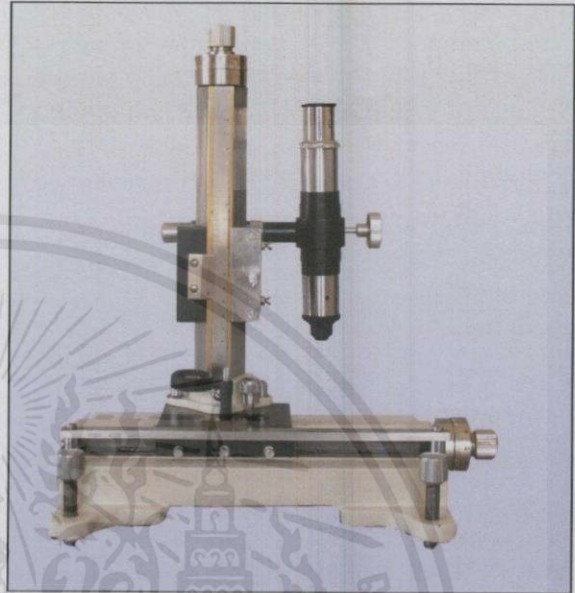
## ภาคผนวก ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**INTRODUCTION**

The bed is of a heavy casting, thoroughly aged and machined, is fitted with leveling screws. On the dovetail guide ways slides the horizontal carriage which can be clamped at any position by means of a thumbscrew. A second sliding carriage slides along a gunmetal vertical pillar fitted on the horizontal carriage. The slow motion guide bars are made of sturdy material and the motion is very smooth. For reading convenience, screw gauge arrangement is provided with a large dial.

**Microscope Tube**

Inclinable in any angle. True vertical and horizontal positions marked focussing.

**Guide Ways**

The guide ways over which slides the carriage is made of gunmetal and this makes the instrument Rust Proof, because this is the part which is directly exposed to the weather.

**Scales and Verniers**

Made of lifetime Stainless Steel.

**Optics**

- (i) True achromatic objective with 7.5 cm. focussing distance from object
- (ii) 10X Ramsden Eyepiece with fine cross wire

**Scale and Vernier**

- (i) Horizontal scale : 18cm divided at 1mm interval
- (ii) Vertical scale : 16cm divided at 1mm interval
- (iii) Screw gauge dial : 100 divisions with a least count of 0.01mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SES Instruments Pvt. Ltd.**

452, Adarsh Nagar, Roorkee-247 667, INDIA • Ph.: +91-1332-272852 • Fax: 277118  
email: [ses@sestechno.com](mailto:ses@sestechno.com) website: [www.sestechno.com](http://www.sestechno.com)