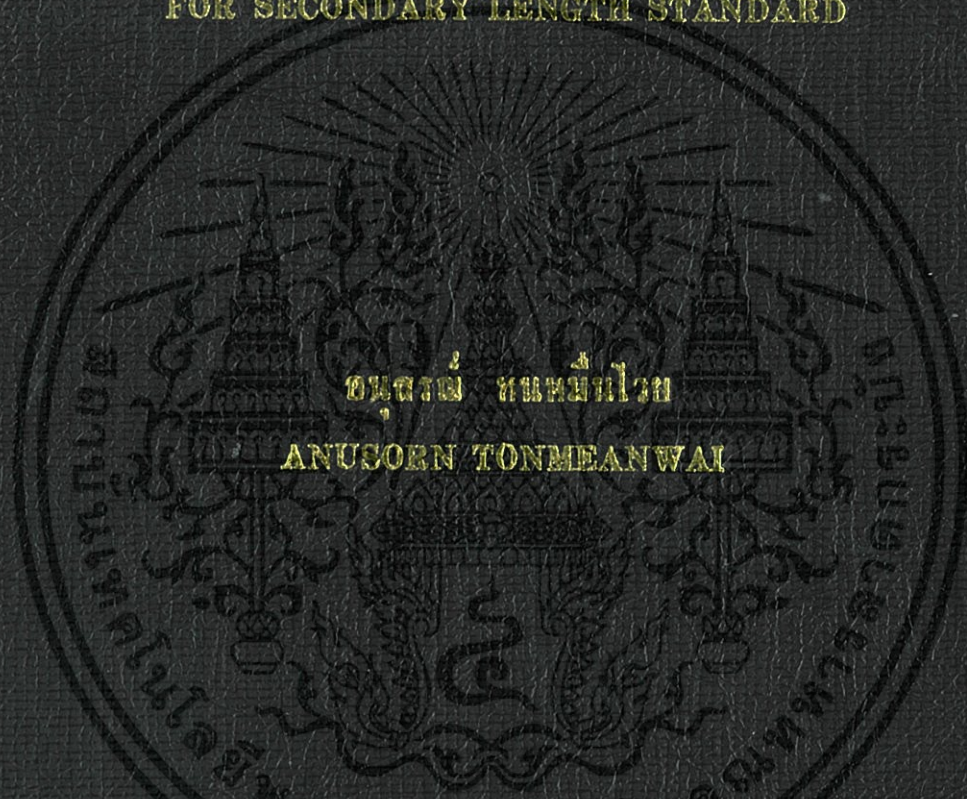


การสอบเทียบค่าความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของฮีเลียมนีออนเลเซอร์  
เพื่อเป็นความยาวมาตรฐานขั้นทุติยภูมิ

FREQUENCY CALIBRATION BY IODINE-STABILIZED HE-NE LASER  
FOR SECONDARY LENGTH STANDARD



อนุสรณ์ ทนหมั่นไวย  
ANUSORN TONMEANWAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่จัดทำตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-223-9

การสอบเทียบค่าความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของฮีเลียมนีออนเลเซอร์  
เพื่อเป็นความยาวมาตรฐานขั้นทุติยภูมิ

FREQUENCY CALIBRATION BY IODINE-STABILIZED HE-NE LASER  
FOR SECONDARY LENGTH STANDARD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย

เลขหมู่.....สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขทะเบียน...40624  
วัน, เดือน, ปี...18 ต.ค. 2544

พ.ศ.2544

ISBN 974-648-228-9

.b.....
.i.....

**FREQUENCY CALIBRATION BY IODINE-STABILIZED HE-NE LASER  
FOR SECONDARY LENGTH STANDARD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2001**

**ISBN 974-648-228-9**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2001**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสอบเทียบค่าความถี่ที่เสถียรด้วยไอ โอดีนของฮีเลียมนีออนเลเซอร์  
เพื่อเป็นความยาวมาตรฐานขั้นทุติยภูมิ  
FREQUENCY CALIBRATION BY IODINE-STABILIZED HE-NE  
LASER FOR SECONDARY LENGTH STANDARD

ชื่อนักศึกษา นายอนุสรณ์ ทนหมั่นไว  
รหัสประจำตัว 37064106  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วราวุฒิ เกาลัดคา  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม นายสม โภชน์ บัญสนิท

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.วิชาญ	เดชิตธีระ	
ผศ.ดร.วราวุฒิ	เกาลัดคา	
นายสม โภชน์	บุญสนิท	
รศ.ดร.อารีย์	วิเชียรฉาย	
ร.อ.บรรจบ	สุขทัต	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 18 พฤษภาคม 2544 เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป  
สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ ชั้น 3 ห้อง 307

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
  
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัคร)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 31 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2544

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสอบเทียบค่าความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของฮีเลียม นีออนเลเซอร์เพื่อเป็นความยาวมาตรฐานขั้นทุติยภูมิ
นักศึกษา	นายอนุสรณ์ ทนหมื่นไว
รหัสประจำตัว	37064106
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เถาถัดคา
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	นายสม โภชน์ บุญสนิท

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิธีการถ่ายทอดค่าความถูกต้องจากความยาวมาตรฐานขั้นปฐมภูมิมายังความยาวมาตรฐานขั้นทุติยภูมิโดยใช้วิธีการปิดความถี่ระหว่างความถี่ของเลเซอร์มาตรฐาน (Iodine Stabilized He-Ne Laser) กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ความถี่ของเลเซอร์มาตรฐานจะถูกมอดูเลตด้วยคลื่นความถี่ 2.5 kHz จากนั้นความถี่มาตรฐานจากโครงสร้างละเอียด d e f g h i และ j ของเลเซอร์มาตรฐานจะถูกล็อกโดยวิธีการตรวจจับฮาร์โมนิกที่ 3 ของสัญญาณ ผลของการวัดความถี่ที่ปิดโดยล็อกความถี่มาตรฐานจากโครงสร้างละเอียด d e f g h i และ j ของเลเซอร์มาตรฐานพบว่าได้ความถี่และความยาวคลื่นที่ถูกต้องของเลเซอร์ที่ถูกสอบเทียบคือ  $473612470.5121 \pm (3.55 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329910563289 nm) /  $473612457.6601 \pm (3.09 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329910735058 nm) /  $473612444.2944 \pm (2.17 \times 10^{-8})$  MHz (0.6329910913693 nm) /  $473612431.0825 \pm (4.62 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329911090273 nm) /  $473612327.3129 \pm (3.46 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329912477171 nm) /  $473612305.3777 \pm (2.50 \times 10^{-8})$  MHz (0.6329912770339 nm) /  $473612283.8248 \pm (2.93 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329913058398 nm) ตามลำดับ

<b>Thesis Title</b>	Frequency Calibration by Iodine-Stabilized He-Ne Laser for Secondary Length Standard
<b>Student</b>	Mr.Anusorn Tonmeanwai
<b>Student ID.</b>	37064106
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2001
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Dr.Warawoot Thowladda
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Mr.Sompote Boonsanit

### ABSTRACT

The dissemination method of the primary length standard through the secondary length standard by using beat frequency method was studied. The frequencies of iodine-stabilized He-Ne laser were modulated with wave of frequency 2.5 kHz. The frequencies of hyperfine structures : d, e, f, g, h, i and j were detected and locked by third-harmonic detection technique. These frequencies were then used as the primary standard reference frequencies. Frequencies of He-Ne laser needed to be calibrated was brought to beat against the primary standard reference frequencies for each hyperfine structure. The frequencies of investigated He-Ne laser can be found by measuring the beat frequencies. The measured frequencies and the calculated wavelengths of the investigated He-Ne laser are:  $473612470.5121 \pm (3.55 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329910563289 nm)/  $473612457.6601 \pm (3.09 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329910735058 nm)/  $473612444.2944 \pm (2.17 \times 10^{-8})$  MHz (0.6329910913693 nm)/  $473612431.0825 \pm (4.62 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329911090273 nm)/  $473612327.3129 \pm (3.46 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329912477171 nm)/  $473612305.3777 \pm (2.50 \times 10^{-8})$  MHz (0.6329912770339 nm)/  $473612283.8248 \pm (2.93 \times 10^{-9})$  MHz (0.6329913058398 nm) respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการของเลเซอร์ รวมทั้งได้เสนอแนะแนวทางในการทดลองจาก ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และคุณสมโภชน์ บุญสนิท ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รอ.บรรจบ สุขทัต ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิจากนอกภาควิชาและเป็นผู้บังคับบัญชาโดยตรง ดำรงตำแหน่งรองผู้อำนวยการสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ และคุณอัจฉรา เจริญสุข ดำรงตำแหน่งหัวหน้าฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ให้คำแนะนำเรื่องการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด ตลอดจนการให้คำปรึกษาเรื่องทั่ว ๆ ไปของระบบมาตรวิทยา

ขอขอบพระคุณรศ.สุรพล รักวิชัย ซึ่งเป็นอดีตอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ล่วงลับ และอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้สาขาต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ Dr.Jun Ishikawa ผู้เชี่ยวชาญด้านการสอบเทียบความถี่ของเลเซอร์จาก National Research Laboratory Metrology (NRLM) ประเทศญี่ปุ่นและ Dr.Nickorus Brown ผู้เชี่ยวชาญด้านการสอบเทียบความถี่ของเลเซอร์จาก National Measurement Laboratory (NML) ประเทศออสเตรเลีย ที่ให้คำแนะนำเทคนิคของการสอบเทียบเลเซอร์ การปรับตั้งระบบออปติคของเลเซอร์และการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณประยูร เชี่ยววัฒนา ผู้อำนวยการสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยเรื่อง “Wavelength Standard Measurement” ที่สถาบัน NRLM ประเทศญี่ปุ่น และให้เวลาสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบแก่ประเทศชาติ

อนุสรณ์ ทนหมื่นไว

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 หลักการทางฟิสิกส์ของเลเซอร์.....	6
2.1 หลักการของเลเซอร์.....	6
2.1.1 การดูดกลืนและการเปล่งแสง.....	7
2.1.1.1 การดูดกลืนแบบถูกกระตุ้น.....	8
2.1.1.2 การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง.....	8
2.1.1.3 การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น.....	9
2.2 การดูดกลืนแสง.....	10
2.3 การเกิดประชากรผกผัน.....	12
2.3.1 การเกิดเลเซอร์ 3 ระดับ.....	13
2.3.2 การเกิดเลเซอร์ 4 ระดับ.....	14
2.4 ออปติคัลโพรเซสเซอร์.....	14
2.5 เสถียรภาพของออปติคัลโพรเซสเซอร์.....	17
2.5.1 โมดตามขวาง.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 โมคตามยาว.....	21
2.6 การคัดเลือกความถี่ของแสงเลเซอร์.....	22
2.6.1 แลมป์ดีฟ.....	23
2.6.2 โมคล็อกเลเซอร์.....	24
2.7 สมบัติของแสงเลเซอร์.....	25
2.7.1 แสงสีเดียวและความเข้มสูง.....	25
2.7.2 โคฮีเรนซ์.....	26
2.7.3 การมีทิศทางเคลื่อนที่ที่แน่นอน.....	27
บทที่ 3 ระบบความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของฮีเลียมนีออนเลเซอร์.....	28
3.1 ระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์.....	28
3.2 ระบบโครงสร้างเชิงกล.....	30
3.2.1 ระบบโครงสร้างเชิงกลของระบบความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของฮีเลียมนีออนเลเซอร์.....	31
3.3 การทำความสะอาดระบบออปติก.....	34
3.3.1 วิธีการทำความสะอาดกระจกเลเซอร์.....	34
3.3.2 วิธีทำความสะอาดหน้าต่างบรูว์สเตอร์ของหลอดฮีเลียมนีออนเลเซอร์และไอโอดีนเซลล์.....	35
3.4 การติดตั้งและการปรับตั้งระบบออปติกเข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลของเลเซอร์.....	35
3.4.1 การจัดวางหลอดเลเซอร์ให้อยู่ในแนวแกนของแสง.....	35
3.4.2 การติดตั้งและการปรับตั้งกระจก $M_1$ .....	37
3.4.3 การติดตั้งและการปรับตั้งกระจก $M_2$ .....	38
3.4.4 การตรวจสอบการปรับตั้งกระจกเลเซอร์.....	39
3.4.5 การติดตั้งไอโอดีนเซลล์.....	40
3.4.6 การตรวจสอบความเสถียรของแสงเลเซอร์.....	40
3.5 การคัดเลือกความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีน.....	41
3.6 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	45

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.7 ความถี่บีต.....	46
3.8 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด.....	47
3.8.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด A.....	48
3.8.2 ความแปรปรวน Allan.....	48
3.8.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด B.....	49
3.8.3.1 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากเลเซอร์มาตรฐาน ( $U_{B1}$ ).....	49
3.8.3.2 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากเครื่องนับความถี่ ( $U_{B2}$ ).....	49
3.8.3.3 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความละเอียดของเครื่องนับ ความถี่ ( $U_{B3}$ ).....	50
3.8.4 ค่าความไม่แน่นอนรวม ( $U_C$ ).....	50
3.8.5 การคำนวณหาค่าตัวประกอบ $k_p$ .....	50
3.8.6 ค่าความไม่แน่นอนขยาย.....	51
บทที่ 4 การทดลอง.....	52
4.1 การทดสอบความเสถียรของระบบ โครงสร้างเชิงกลของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ กรณีไม่มีไอโอดีนเซลล์.....	52
4.1.1 วิธีการทดลอง.....	52
4.1.2 ผลการทดลอง.....	52
4.1.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	53
4.2 การทดสอบความเสถียรของระบบ โครงสร้างเชิงกลของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ กรณีมีไอโอดีนเซลล์.....	54
4.2.1 วิธีการทดลอง.....	54
4.2.2 ผลการทดลอง.....	54
4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
4.3 การทดสอบความเสถียรของ เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	56
4.3.1 วิธีการทดลอง.....	56
4.3.2 ผลการทดลอง.....	56
4.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 การสอบเทียบความถี่ของ เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	57
4.4.1 วิธีการทดลอง.....	57
4.4.2 ผลการทดลอง.....	59
4.4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	64
4.4.4 ตัวอย่างการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด.....	67
4.4.4.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด A.....	67
4.4.4.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด B เนื่องจากเลเซอร์ มาตรฐาน ( $U_{B1}$ ).....	67
4.4.4.3 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากเครื่องนับความถี่ ( $U_{B2}$ ).....	67
4.4.4.4 ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องนับ ความถี่ ( $U_{B3}$ ).....	68
4.4.4.5 ค่าความไม่แน่นอนรวม.....	68
4.4.4.6 การคำนวณค่าตัวประกอบ $k_p$ .....	68
4.4.4.7 ค่าความไม่แน่นอนขยาย.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
เอกสารอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	78

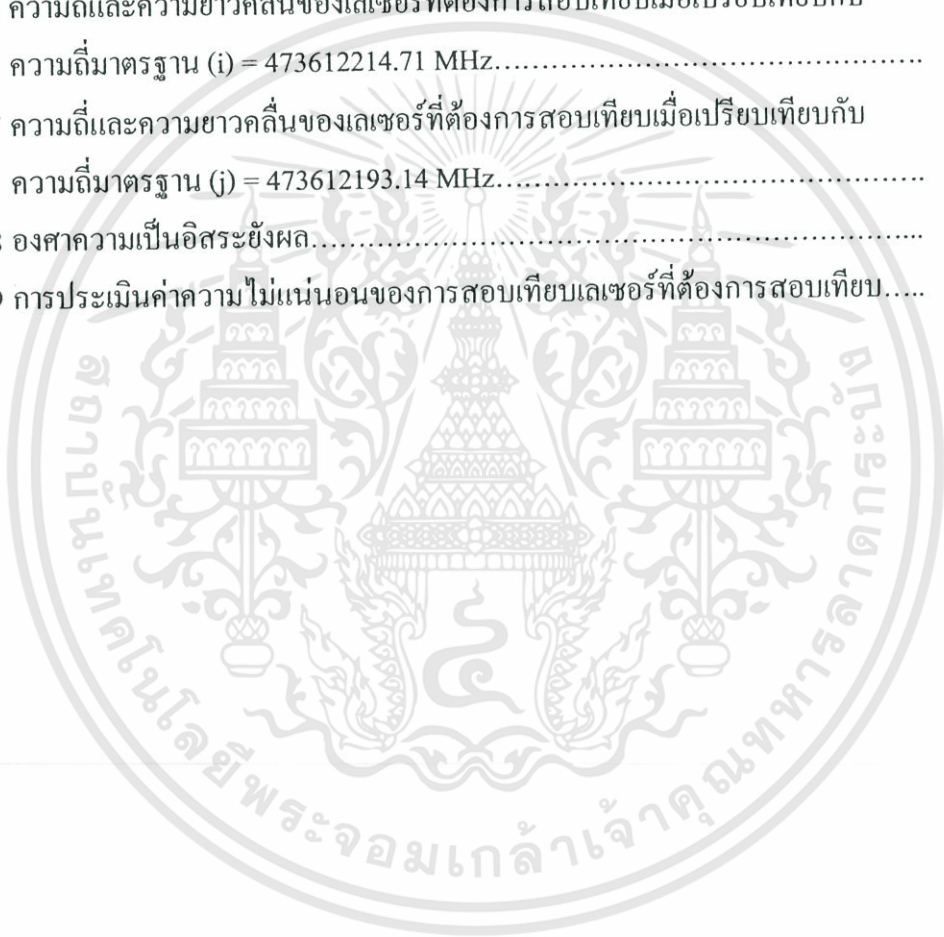
# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นของวัสดุ.....	30
3.2 สมบัติเฉพาะของระบบความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของซีเลียมเน็อนเลเซอร์.....	33
3.3 ความถี่และความยาวคลื่นของระบบความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของซีเลียมเน็อนเลเซอร์.....	33
3.4 อองศาความเป็นอิสระยังผล.....	51
4.1 บันทึกผลการวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีไม่มีไอโอดีนเซลล์.....	52
4.2 บันทึกผลการวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีมีไอโอดีนเซลล์.....	54
4.3 บันทึกผลการวัดกำลังของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	56
4.4 บันทึกผลการวัดความถี่ปีตรงหว่างการล็อกความถี่ d กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	59
4.5 บันทึกผลการวัดความถี่ปีตรงหว่างการล็อกความถี่ e กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	60
4.6 บันทึกผลการวัดความถี่ปีตรงหว่างการล็อกความถี่ f กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	61
4.7 บันทึกผลการวัดความถี่ปีตรงหว่างการล็อกความถี่ g กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	61
4.8 บันทึกผลการวัดความถี่ปีตรงหว่างการล็อกความถี่ h กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	62
4.9 บันทึกผลการวัดความถี่ปีตรงหว่างการล็อกความถี่ i กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	62
4.10 บันทึกผลการวัดความถี่ปีตรงหว่างการล็อกความถี่ j กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	63
4.11 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน (d) = 473612379.82 MHz.....	64
4.12 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน (e) = 473612366.96 MHz.....	65
4.13 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน (f) = 473612353.60 MHz.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับ ความถี่มาตรฐาน (g) = 473612340.40 MHz.....	65
4.15 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับ ความถี่มาตรฐาน (h) = 473612236.64 MHz.....	66
4.16 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับ ความถี่มาตรฐาน (i) = 473612214.71 MHz.....	66
4.17 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับ ความถี่มาตรฐาน (j) = 473612193.14 MHz.....	66
4.18 อองศาความเป็นอิสระยังผล.....	69
4.19 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	69



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทั่วไปของเลเซอร์.....	7
2.2 กระบวนการดูดกลืนแบบถูกกระตุ้น.....	8
2.3 กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง.....	9
2.4 กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น.....	9
2.5 การเดินทางของแสงผ่านตัวกลาง.....	10
2.6 การเกิดประชากรผกผัน.....	12
2.7 การเกิดเลเซอร์หลายระดับ.....	13
2.8 การจัดระบบเลเซอร์ที่ประกอบด้วยสารเลเซอร์และเรโซเนเตอร์.....	15
2.9 การขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบออปติคัลเรโซเนเตอร์ประกอบด้วย กระจก $M_1$ และ $M_2$ วางห่างกันเป็นระยะ $L$ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็น $R_1$ และ $R_2$ .....	15
2.10 เงื่อนไขของการมีเสถียรภาพของเลเซอร์ ( $0 < g_1, g_2 < 1$ ) เมื่อ $g_1 = 1 - \frac{L}{r_1}$ และ $g_2 = 1 - \frac{L}{r_2}$ บริเวณที่แรงคือบริเวณที่เลเซอร์มีเสถียรภาพ.....	17
2.11 ระบบออปติคัลเรโซเนเตอร์แบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระจกสะท้อน.....	19
2.12 ลักษณะการคูโมคของเลเซอร์.....	20
2.13 รูปแบบโมดตามขวางของเลเซอร์.....	21
2.14 ความถี่ภายในสเปกตรัมของโมดตามยาว.....	22
2.15 ปรัชญาการฉลิมบ่คคพ.....	23
2.16 โมคคคอกเลเซอร์.....	24
2.17 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงเลเซอร์กับแสงที่เปล่งจากวัตถุดำที่อุณหภูมิ 300 K...	26
2.18 เปรียบเทียบคลื่นที่มีโคฮีเรนซ์และไม่มีโคฮีเรนซ์.....	26
2.19 การลู่อกของแสงเลเซอร์.....	27
3.1 ระดับพลังงานอะตอมของระบบสี่เลเวลนีออนเลเซอร์.....	29
3.2 การกระจายของความถี่ภายในสเปกตรัม.....	29
3.3 ระบบเลเซอร์มาตรฐาน.....	31
3.4 วิธีทำความสะอาดกระจก $M_1$ และ $M_2$ .....	34
3.5 วิธีเตรียมกระดาษเซ็ดเลนส์.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 การติดตั้งหลอดเลเซอร์เข้ากับระบบ โครงสร้างเชิงกล.....	36
3.7 การติดตั้งกระจก $M_1$ .....	37
3.8 การติดตั้งกระจก $M_2$ .....	38
3.9 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีไม่มีไอโอดีนเซลล์.....	40
3.10 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์เมื่อติดตั้งไอโอดีนเซลล์ไว้ในเลเซอร์ควาวิตี.....	40
3.11 สเปกตรัมของแสงฮีเลียมนีออนที่ผ่านการดูกลืนอ้อมด้วยไอโอดีน.....	41
3.12 ความเข้มแสงที่ผ่านสารดูกลืนอ้อมตัว.....	42
3.13 ความเข้มแสงเลเซอร์ที่ผ่านการดูกลืนอ้อมตัว.....	44
3.14 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	45
3.15 ความถี่บีต.....	47
4.1 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีไม่มีไอโอดีนเซลล์.....	52
4.2 ความเสถียรของระบบ โครงสร้างเชิงกลกรณีที่มีไอโอดีนเซลล์.....	53
4.3 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีมีไอโอดีนเซลล์.....	54
4.4 ความเสถียรของแสงเลเซอร์กรณีมีไอโอดีนเซลล์.....	55
4.5 การวัดกำลังของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	56
4.6 ความเสถียรของแสงเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	57
4.7 การสอบเทียบความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ.....	58
4.8 การปรับลำแสงบนฉากรับ.....	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้วได้กำหนดคุณภาพของสินค้านำเข้าต้องเป็นไปตามมาตรฐานสากล (International Organization for Standardization; ISO) ทำให้สินค้าส่งออกของประเทศที่กำลังพัฒนาอย่างเช่นประเทศไทยได้รับผลกระทบโดยตรง สืบเนื่องจากปัญหาด้านมาตรวิทยาที่เป็นส่วนสำคัญของระบบควบคุมคุณภาพ กล่าวคือมีปัญหาในการเก็บรักษามาตรฐานแห่งชาติของหน่วยของการวัดปริมาณมูลฐานเช่น เมตร กิโลกรัม เป็นต้น อีกทั้งเทคโนโลยีการถ่ายทอดค่าความถูกต้อง (Dissemination) จากความยาวมาตรฐานขั้นปฐมภูมิ (Primary Length Standard) ไปยังความยาวมาตรฐานขั้นทุติยภูมิ (Secondary Length Standard) ยังไม่ได้รับความเชื่อถือในระดับสากล เนื่องจากยังไม่สามารถเข้าร่วมกิจกรรมการวัดเปรียบเทียบระหว่างประเทศ (Intercomparison) ได้ ทำให้ภาครัฐและเอกชนต่าง ๆ จำเป็นต้องส่งมาตรฐานที่ใช้งานอยู่ไปสอบเทียบ (Calibration) ยังต่างประเทศ ส่งผลให้ไม่สามารถพัฒนาระบบมาตรวิทยาภายในประเทศได้ ดังนั้นประเทศไทยจะต้องเร่งส่งเสริมและพัฒนาระบบมาตรวิทยาในด้านการเก็บรักษามาตรฐานขั้นปฐมภูมิให้มีค่าความถูกต้องและให้สามารถเป็นศูนย์กลางในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องจากมาตรฐานขั้นปฐมภูมิไปยังมาตรฐานขั้นทุติยภูมิภายในประเทศ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปัญหาดังกล่าว โดยเน้นการศึกษาไปที่การถ่ายทอดค่าความถูกต้องระหว่างความยาวมาตรฐานขั้นปฐมภูมิ (Iodine Stabilized He-Ne Laser) และความยาวมาตรฐานขั้นทุติยภูมิหรือความถี่ที่ต้องการสอบเทียบ (เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ; Model 5518A) ด้วยวิธีการบีบอัดความถี่ โดยให้ความถี่ของเลเซอร์มาตรฐานเป็นความถี่อ้างอิง

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาระบบโครงสร้างเชิงกลและระบบการควบคุมแบบป้อนกลับที่ทำให้ความถี่ของเลเซอร์มีเสถียรภาพ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการคัดเลือกความถี่ของเลเซอร์โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนอิมพัลส์ด้วยไอโอดีน ( $^{127}\text{I}_2$ ) เพื่อใช้เป็นความถี่มาตรฐาน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการถ่ายทอดค่าความถูกต้องโดยใช้เทคนิคการบีบอัดความถี่ระหว่างความถี่ของเลเซอร์มาตรฐานขั้นปฐมภูมิกับเลเซอร์มาตรฐานขั้นทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2.4 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาการถ่ายทอดค่าความถูกต้องและการเก็บรักษาความยาวมาตรฐานขั้นปฐมภูมิให้มีความถูกต้องในระดับสากล

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

#### 1.3.1 การทดสอบความเสถียรของระบบโครงสร้างเชิงกล

เมื่อทำการติดตั้งและปรับตั้งระบบอปติกเข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลของฮีเลียมนีออนเลเซอร์แล้ว จากสมบัติเฉพาะของเลเซอร์มาตรฐานกำหนดให้กำลังของเลเซอร์กรณีที่ยังไม่ติดตั้งไอโอดีนเซลล์มีค่า  $0.5-1.0 \text{ mW}$  และเมื่อติดตั้งไอโอดีนเซลล์เข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลของฮีเลียมนีออนแล้ว กำลังของเลเซอร์มีค่า  $0.05-0.10 \text{ mW}$

การทดลองวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีที่ไม่ติดตั้งไอโอดีนเซลล์ กำลังที่วัดได้ควรมีค่าอยู่ในช่วง  $0.5-1.0 \text{ mW}$  ด้วย ถ้ากำลังของแสงเลเซอร์ที่วัดได้น้อยกว่า  $0.5 \text{ mW}$  แสดงว่าการติดตั้งหรือการปรับตั้งระบบอปติกไม่อยู่ในแนวแกนอปติก หรือการทำความสะอาดระบบอปติกไม่สมบูรณ์ จะต้องทำความสะอาด และทำการติดตั้งปรับตั้งระบบอปติกจนกระทั่งได้กำลังของแสงเลเซอร์ไม่น้อยกว่า  $0.5 \text{ mW}$  ในกรณีที่ติดตั้งไอโอดีนเซลล์เข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลแล้ว กำลังที่วัดได้ควรมีค่าไม่น้อยกว่า  $0.05 \text{ mW}$  ถ้ากำลังของแสงเลเซอร์ที่วัดได้น้อยกว่า  $0.05 \text{ mW}$  แสดงว่าการติดตั้งหรือการปรับตั้งระบบอปติกไม่อยู่ในแนวแกนอปติก หรือการทำความสะอาดระบบอปติกไม่สมบูรณ์ จะต้องทำความสะอาดและทำการติดตั้ง ปรับตั้งระบบอปติกใหม่จนกระทั่งได้กำลังของแสงไม่น้อยกว่า  $0.05 \text{ mW}$

ในการทดสอบความเสถียรของระบบโครงสร้างเชิงกลของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ โดยทำการวัดกำลังของเลเซอร์เทียบกับเวลา ถ้าระบบโครงสร้างเชิงกลนี้มีความเสถียร กำลังของแสงเลเซอร์ที่วัดได้เมื่อเวลาผ่านไป 9 ชั่วโมงจะต้องอยู่ในพิสัยที่กำหนดข้างต้น

#### 1.3.2 การสอบเทียบ

จากหลักการของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ พบว่าความถี่หรือความยาวคลื่นของแสงอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ถ้าระยะห่างระหว่างกระจกของออปติคอลลาวิตีซึ่งติดตั้งด้วยระบบโครงสร้างเชิงกลมีการเปลี่ยนแปลง และเนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำระบบโครงสร้างเชิงกลของเลเซอร์อาจมีการเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา ดังนั้นในแต่ละปีจึงต้องสอบเทียบเลเซอร์นี้เพื่อให้รู้ค่าความถี่หรือความยาวคลื่นที่ถูกต้องของเลเซอร์

การสอบเทียบความถี่ระหว่างความถี่ของเลเซอร์มาตรฐานกับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ซึ่งทำได้โดยการวัดความถี่บีต เมื่อนำมาคำนวณหาความถี่ที่ถูกต้องของเลเซอร์ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการสอบเทียบควรมีค่าประมาณ 473 THz และค่าความไม่แน่นอนของการวัดควรมีค่าประมาณ  $\pm 1 \times 10^{-7}$  kHz

#### 1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

จากโครงสร้างของระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์พบว่าโมดตามยาวหรือความยาวคลื่นของเลเซอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ถ้าระยะห่างระหว่างกระจกหน้าและกระจกหลัง (L) มีการเปลี่ยนแปลง การแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยการเลือกใช้วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (Thermal Expansion Coefficient) ต่ำ มาทำเป็นโครงสร้างสำหรับจับยึดระบบออปติก

กำลังของแสงเลเซอร์สูงหรือต่ำอาจเกิดจากการติดตั้งหรือการปรับตั้งระบบออปติกไม่อยู่ในแนวแกนออปติก หรืออาจเกิดจากการทำความสะอาดกระจกเลเซอร์ หน้าต่างบรูว์สเตอร์ของหลอดเลเซอร์และไอโอดีนเซลล์ไม่สมบูรณ์ งานวิจัยนี้จะทำการทดลองวัดกำลังของแสงเลเซอร์โดยการปรับตั้งกระจกเลเซอร์ และแสดงวิธีการทำความสะอาดระบบออปติกด้วยสารละลายอะซิโตน เมื่อทำการทดลองจนกระทั่งได้กำลังของแสงเลเซอร์ตามวัตถุประสงค์แล้วจะทำการทดสอบความเสถียรของระบบโครงสร้าง โดยทำการวัดกำลังของแสงเลเซอร์เทียบกับเวลา ถ้าระบบโครงสร้างนี้มีความเสถียรกำลังของแสงเลเซอร์ที่วัดได้ควรจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป แต่ถ้ากำลังของแสงเลเซอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาที่ทำการวัดแสดงว่าระบบโครงสร้างนี้ไม่มีความเสถียร

แสงเลเซอร์ที่ได้จากระบบโครงสร้างที่เสถียรนี้ยังไม่เพียงพอสำหรับการถ่ายทอดค่าความถูกต้องของความยาวมาตรฐานชั้นปฐมภูมิ เพื่อที่จะให้ได้ความถี่ของแสงเลเซอร์มีความเสถียรตลอดเวลาจะต้องควบคุมให้ระยะห่างระหว่างกระจก (L) ให้มีค่าคงที่ โดยระบบโครงสร้างของเลเซอร์นี้ใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control)

ในการคัดเลือกความถี่ใด ๆ ภายในสเปกตรัมของแสงฮีเลียมนีออนเลเซอร์ ใช้การดูคลื่นอิมิตต์ด้วยอะตอมของไอโอดีน ความถี่ของการดูคลื่นอิมิตต์นี้ใช้เป็นความถี่มาตรฐานอ้างอิงในการสอบเทียบให้กับเลเซอร์มาตรฐานชั้นทุติยภูมิ เพื่อให้การทดลองมีความถูกต้อง (Accuracy) และมีความเที่ยง (Precision) สูง ดังนั้นการทดลองวัดความถี่นี้จะใช้เวลาในการวัดที่ 0.1 วินาที 1 วินาที 10 วินาที และ 100 วินาที และทำการวัด 10 ครั้งในแต่ละช่วงเวลาตามลำดับ

เพื่อที่จะยืนยันผลของการสอบเทียบว่ามีความถูกต้องตามสมบัติเฉพาะที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดจะต้องทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด โดยอ้างอิงวิธีการประเมินตามมาตรฐาน EAL-04/2 (EAL; European Cooperation for Accreditation of Laboratories)

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 การศึกษาทฤษฎี หลักการของระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์
- 1.5.2 การศึกษาระบบโครงสร้างที่เสถียรของระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์ การติดตั้งและปรับตั้งระบบอปติกเข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกล
- 1.5.3 การทดลองวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีที่ไม่มีไอโอไดเนียมเซลล์และมีไอโอไดเนียมเซลล์ เพื่อศึกษาความเสถียรของระบบโครงสร้างเชิงกล
- 1.5.4 การศึกษาวิธีการคัดเลือกความถี่ด้วยการดูคลื่นอิมพัลส์ด้วยไอโอไดเนียม
- 1.5.5 การศึกษาวิธีการบีตความถี่

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

**ขั้นตอนที่ 1** ศึกษาข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำให้เลเซอร์มีความเสถียร โดยเป็นการศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานของการเกิดเลเซอร์ หลักการทำให้ความถี่ของเลเซอร์มีความเสถียรในส่วนของระบบโครงสร้างเชิงกลและระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ

**ขั้นตอนที่ 2** ศึกษาวิธีการทำความสะอาด การติดตั้งและปรับตั้งระบบอปติก

**ขั้นตอนที่ 3** การตรวจสอบความเสถียรของระบบโครงสร้างเชิงกลในกรณีที่ยังไม่ได้ติดตั้งไอโอไดเนียมเซลล์ไว้ในเลเซอร์ควาวิตี และกรณีติดตั้งไอโอไดเนียมเซลล์ไว้ในเลเซอร์ควาวิตี

**ขั้นตอนที่ 4** ศึกษาการคัดเลือกความถี่ด้วยการดูคลื่นอิมพัลส์ด้วยไอโอไดเนียมเพื่อใช้เป็นความถี่มาตรฐานอ้างอิง

**ขั้นตอนที่ 5** ศึกษาวิธีการบีตความถี่ระหว่างความถี่ของเลเซอร์มาตรฐานขั้นปฐมภูมิกับเลเซอร์มาตรฐานขั้นทุติยภูมิ

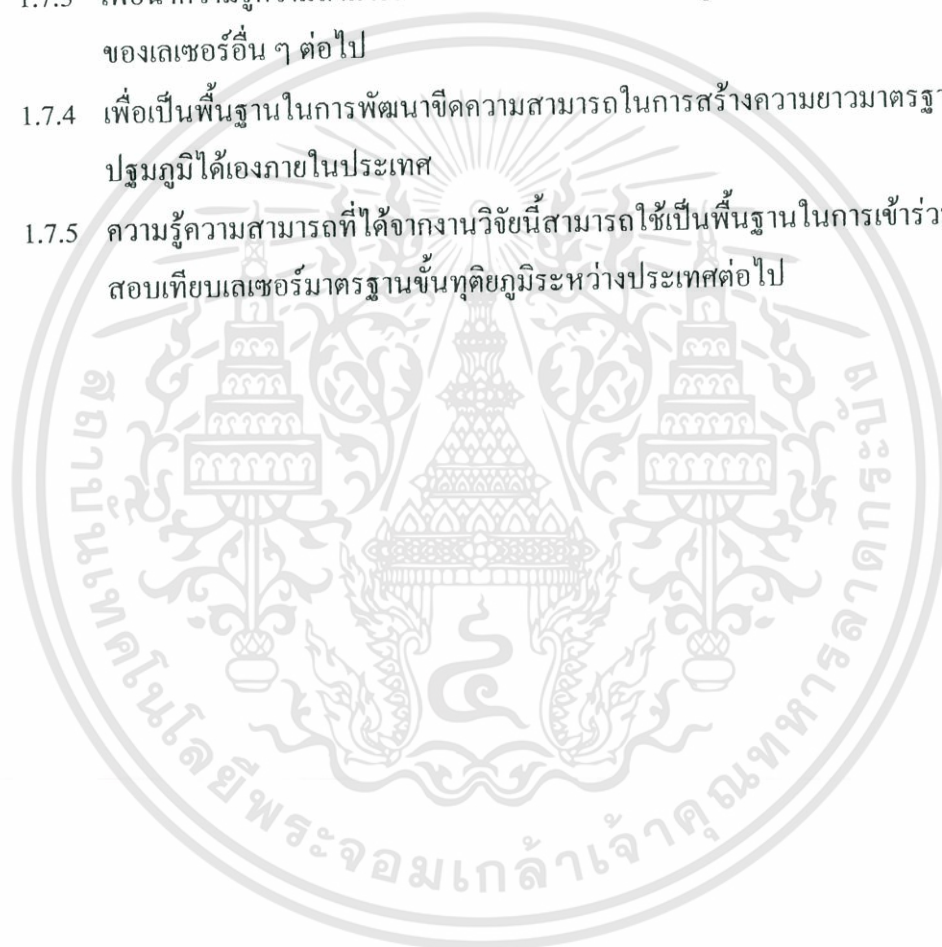
**ขั้นตอนที่ 6** การทดลองวัดความถี่บีตโดยใช้ช่วงเวลา 0.1 วินาที 1 วินาที 10 วินาที และ 100 วินาที โดยทำการวัด 10 ครั้งในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนด

**ขั้นตอนที่ 7** ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง

**ขั้นตอนที่ 8** สรุปการทำวิทยานิพนธ์ และแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 เพื่อใช้เป็นความยาวมาตรฐานขั้นปฐมภูมิอ้างอิงในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องให้กับมาตรฐานขั้นทุติยภูมิ ไปจนถึงเครื่องมือวัดละเอียดในห้องปฏิบัติการทั่วไป ที่ต้องการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามระบบคุณภาพ
- 1.7.2 เพื่อลดภาระในการส่งมาตรฐานขั้นทุติยภูมিরวมทั้งเครื่องมือวัดละเอียดต่าง ๆ ไปสอบเทียบยังต่างประเทศ
- 1.7.3 เพื่อนำความรู้ความสามารถที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานในการสอบเทียบความถี่ของเลเซอร์อื่น ๆ ต่อไป
- 1.7.4 เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาขีดความสามารถในการสร้างความยาวมาตรฐานขั้นปฐมภูมิได้เองภายในประเทศ
- 1.7.5 ความรู้ความสามารถที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการเข้าร่วมการสอบเทียบเลเซอร์มาตรฐานขั้นทุติยภูมิระหว่างประเทศต่อไป



## บทที่ 2

# หลักการทางฟิสิกส์ของเลเซอร์

เลเซอร์มีรากฐานมาจากการพัฒนาค้นคว้าวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแขนงอื่น ๆ มาก่อนซึ่งทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถนำความรู้ทางวิชาการและข้อมูลจากการวิจัยเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้จนสามารถผลิตเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์สำเร็จเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1960 โดย Maiman โดยใช้ผลึกของทับทิม เลเซอร์ชนิดนี้เรียกว่าเลเซอร์ทับทิม (Ruby Laser) คำว่าเลเซอร์ย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER) บอกให้ทราบว่าจะต้องมีการขยายสัญญาณทางแสง ซึ่งจะทำให้แสงมีความเข้มสูงขึ้น โดยที่ความถี่และโพลาไรเซชันยังคงไว้ จึงทำให้แสงเลเซอร์มีลักษณะเฉพาะคือ มีความเข้มสูง (Brightness) เป็นแสงสีเดียว (Monochromaticity) เป็นแสงโคฮีเรนซ์ (Coherence Light) และมีทิศทางเคลื่อนที่ที่แน่นอนหรือมีทิศทางเดียว (Directionality)

ต่อมาได้มีการสร้างฮีเลียมนีออนเลเซอร์โดย Javan, Bennett และ Herriott จากนั้นได้มีการพัฒนาชนิดต่าง ๆ อีกมากมาย โดยใช้ตัวกลางชนิดต่าง ๆ ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยเลเซอร์เหล่านี้จะให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตั้งแต่ไมโครเวฟจนถึงย่านอัลตราไวโอเล็ต

### 2.1 หลักการของเลเซอร์

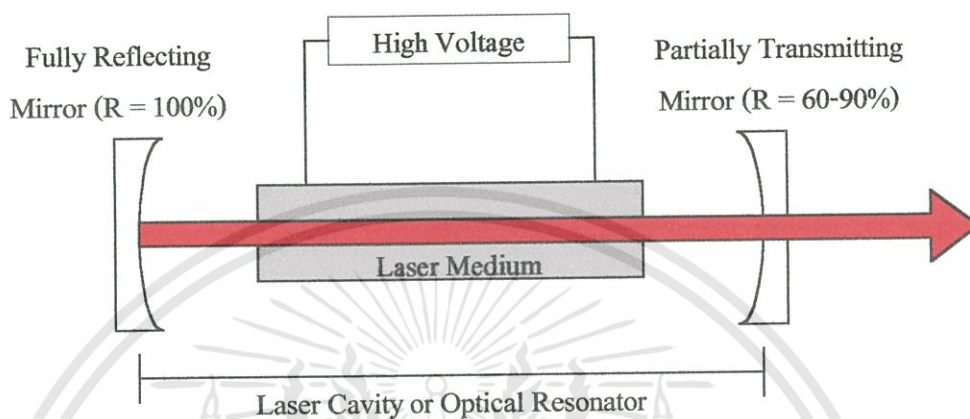
กระบวนการในการทำให้เกิดแสงเลเซอร์จำเป็นต้องให้พลังงานภายนอกมากระตุ้นให้อะตอมหรือโมเลกุลของสารเลเซอร์เปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น (Ground State) ไปยังสถานะถูกกระตุ้น (Excited State) และจะต้องมีกระบวนการที่สำคัญดังนี้

1. การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission)
2. การเกิดประชากรผกผัน (Population Inversion)
3. ออปติคอลลาวิตี (Optical Cavity)

องค์ประกอบทั่วไปของเลเซอร์แสดงดังรูปที่ 2.1 คือจะประกอบไปด้วยสารเลเซอร์ (Laser Medium) แหล่งกำเนิดพลังงานจากภายนอกเพื่อกระตุ้นสารเลเซอร์ (Energy Pumping) จะเกิดกระบวนการดูดกลืนแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Absorption) กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) และกระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) โดยจะต้องทำให้อยู่ในสภาพของการเกิดประชากรผกผัน กระบวนการเหล่านี้ทำหน้าที่สะท้อนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์ภายในเลเซอร์ควิตี้ (Laser Cavity) โดยกระจกหลังจะเคลือบสารไดอิเล็กทริกให้มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนหมด ( $R = 100\%$ ) และกระจกหน้าจะเคลือบสารไดอิเล็กทริกให้มีค่าการสะท้อนกลับได้บางส่วน ( $R = 60 - 90\%$ ) โดยส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านกระจกเลเซอร์ออกไปเป็นแสงเลเซอร์



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบทั่วไปของเลเซอร์

### 2.1.1 การดูดกลืนและการเปล่งแสง

จำนวนอะตอม ( $N_1$ ) ที่ระดับพลังงานสถานะพื้น  $E_1$  และจำนวนอะตอม ( $N_2$ ) ที่ระดับพลังงานที่ถูกกระตุ้น  $E_2$  ที่สภาวะสมดุลระดับพลังงาน  $E_1 < E_2$  และจำนวนประชากรที่ระดับพลังงานทั้งสองจะเป็นไปตามกฎการกระจายของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann) คือ

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left[\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right] \quad (2.1)$$

เมื่อ  $N_1$  และ  $N_2$  คือ จำนวนอะตอมที่ระดับพลังงาน  $E_1$  และ  $E_2$  ตามลำดับ

$g_1$  และ  $g_2$  คือ สถานะช้อนทับของระดับพลังงาน  $E_1$  และ  $E_2$  ตามลำดับ

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

จากกฎการกระจายของโบลต์ซมันน์ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน จะทำนายได้ว่าจำนวนอะตอมที่สถานะพื้นจะมีความหนาแน่นของประชากรมากกว่าที่ระดับพลังงานสถานะถูกกระตุ้น ดังนั้นจำนวนประชากรที่ระดับพลังงาน  $E_2$  จึงมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนประชากรที่ระดับพลังงาน  $E_1$  เมื่อมีโฟตอนผ่านเข้าไปในตัวกลางจะเกิดกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.1 การดูดกลืนแบบถูกกระตุ้น

เมื่อมีพลังงานที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่  $\nu$  ไปกระตุ้นสารเลเซอร์ แล้วทำให้สารเลเซอร์ดูดกลืนพลังงาน ทำให้อะตอมเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะถูกกระตุ้นดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นจำนวนประชากรที่สถานะพื้นจะลดลงโดยอัตราการลดลงของประชากรที่สถานะพื้นจะเป็นไปตามสมการ

$$\left. \frac{dN_1}{dt} \right|_{\text{abs}} = -B_{12}\rho(\nu)N_1 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $B$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนของไอออนส์ไดน์  
 $\rho(\nu)$  คือ ความหนาแน่นของพลังงานในการแผ่รังสี



รูปที่ 2.2 กระบวนการดูดกลืนแบบถูกกระตุ้น

### 2.1.1.2 การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง

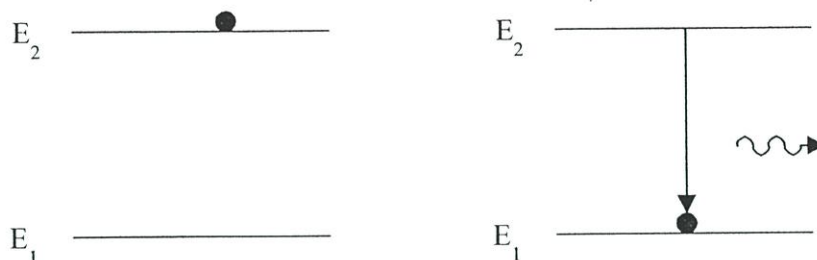
การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองนี้จะเกิดขึ้นหลังจากที่สารเลเซอร์ได้เกิดการดูดกลืนพลังงานทำให้อะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะถูกกระตุ้น หลังจากนั้นจำนวนประชากรที่สถานะกระตุ้นจะลดลงโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา และอะตอมนั้นจะกลับมาอยู่ที่สถานะพื้นดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากอะตอมที่สถานะถูกกระตุ้นจะไม่สามารถอยู่ที่ระดับพลังงานนี้ได้ยาวนานเพราะมีระยะเวลาของการอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเท่ากับชั่วชีวิต (Spontaneous lifetime;  $t_{\text{spn}}$ ) เท่านั้น เมื่อหมดอายุของมันอะตอมก็จะตกลงสู่สถานะพื้น อัตราการลดลงของจำนวนประชากรที่สถานะกระตุ้นจะเป็นไปตามสมการ

$$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{\text{spn}} = -A_{21} N_2 = \frac{N_2}{t_{\text{spn}}} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $A_{21}$  คือ สัมประสิทธิ์ของการเปล่งแสงของไอออนส์ไดน์

$N_2$  คือ จำนวนอะตอมที่สถานะถูกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง

### 2.1.1.3 การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น

การเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นนี้เป็นกระบวนการที่เกิดจากสารเลเซอร์ได้รับพลังงานโดยการดูดกลืน และอะตอมเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น หลังจากนั้นจำนวนประชากรที่สถานะกระตุ้นจะลดลง โดยการกระตุ้นจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เกิดการปล่อยพลังงานออกมาดังรูปที่ 2.4 อะตอมที่สถานะกระตุ้นยังอยู่ไม่ครบชั่วชีวิตของมันแต่มีโฟตอนเข้าไปกระตุ้นทำให้อะตอมนั้นตกลงมา โดยอัตราการลดลงของจำนวนประชากรที่สถานะถูกกระตุ้นเป็นไปตามสมการ

$$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{\text{stim}} = -B_{21} \rho(\nu) N_2 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $B_{21}$  คือ สัมประสิทธิ์ของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นของอินส์ไตน์



รูปที่ 2.4 กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น

ถ้ารวมการดูดกลืนแบบถูกกระตุ้น การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง และการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น สามารถเขียนให้อยู่ของการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้นและสถานะพื้นของจำนวนอะตอมใน 2 สถานะนี้ได้ รูปแบบของกระบวนการทั้ง 3 ชนิดดูได้จากรูปที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ จะทำให้ได้สมการดังนี้

$$\frac{dN_1}{dt} = B_{21}\rho(\nu)N_2 - B_{12}\rho(\nu)N_1 + A_{21}N_2 = 0 \quad (2.5)$$

ดังนั้นสมการ (2.5) สามารถเขียนได้เป็น

$$N_2 A_{21} + N_2 \rho(\nu) B_{21} = N_1 \rho(\nu) B_{12} \quad (2.6)$$

เมื่อนำการกระจายของโบลต์ซมันน์ที่แสดงอัตราส่วน  $\frac{N_2}{N_1}$  มาใช้ประกอบกับสมการ (2.6)

สามารถเขียนได้เป็น

$$\rho(\nu) = \frac{(A_{21}/B_{21})}{(g_1/g_2)(B_{12}/B_{21}) \exp(h\nu/kT) - 1} \quad (2.7)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับกฎการแผ่รังสีของวัตถุดำซึ่งมีสมการคือ

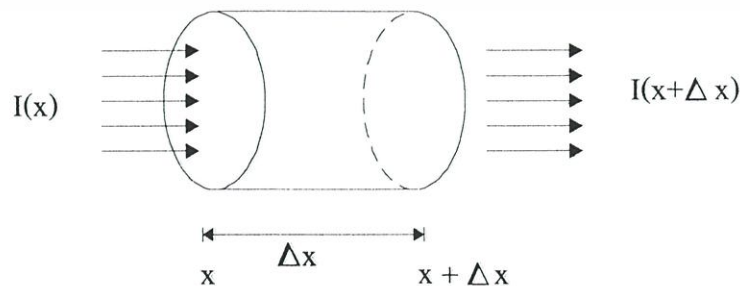
$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left( \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \right) \quad (2.8)$$

จะได้  $\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi V^2 h\nu}{c^3}$  และ  $B_{21} = \frac{g_1 B_{12}}{g_2}$  (2.9)

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ

สำหรับระบบที่ไม่มีการซ้อนทับของระดับพลังงานซึ่งจะทำให้  $g_1 = g_2$  ดังนั้นจะได้ค่า  $B_{12} = B_{21}$  ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของอินทิกรัลของการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นเท่ากับการดูดกลืน

## 2.2 การดูดกลืนแสง (Absorption of Radiation)



### รูปที่ 2.5 การเดินทางของแสงผ่านตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาแสงที่วิ่งผ่านวัตถุที่มีเนื้อที่โปร่งใสเท่ากัน โดยตลอดจะพบว่าความเข้มแสงในตอนเริ่มต้น  $I_0$  จะมีค่าเปลี่ยนไป เมื่อแสงเดินทางผ่านวัตถุนั้นจะพบว่าผลต่างของความเข้มคือ  $\Delta I_x$  ตามสมการ

$$\Delta I_x = I(x + \Delta x) - I(x) \quad (2.10)$$

สำหรับตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน  $\Delta I_x$  เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับระยะ  $\Delta x$  และความเข้ม  $I(x)$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta I_x = -\alpha I(x) \Delta x \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน (Absorption Coefficient)

เนื่องจาก  $\alpha$  มีค่าเป็นบวกดังนั้นเครื่องหมายลบในสมการที่ (2.11) แสดงว่าแสงมีความเข้มลดลงตามระยะทางเนื่องจากกระบวนการดูดกลืนแสง สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\alpha I(x) \quad (2.12)$$

ผลเฉลยของสมการที่ (2.12) คือ

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.13)$$

เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ

$I$  คือ ความเข้มแสงที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ

จากสมการที่ (2.13) ถ้าให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่เดียวมีความเข้ม  $I$  เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ประกอบไปด้วยอะตอม โดยระบบอะตอมดังกล่าวนี้มีจำนวนอะตอม  $N_1$  ตัวที่ระดับพลังงาน  $E_1$  และมีจำนวนอะตอม  $N_2$  ตัวที่ระดับพลังงาน  $E_2$  จะได้สัมประสิทธิ์การดูดกลืน ( $\alpha$ ) ตามสมการ

$$\alpha = \left( \frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \frac{B_{21} h \nu_{21} n}{c} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $n$  คือ ดัชนีหักเหของตัวกลาง

$g_1$  คือ สภาพซ้อนสถานะ (Degeneracy) ของสถานะพื้น

$g_2$  คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะถูกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.14) สามารถพิจารณาได้ว่าถ้า  $N_1 > N_2$  จะทำให้  $\alpha$  มีค่าเป็นบวกคั้งนั้นจะเกิดการดูดกลืนแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวกลาง แต่ถ้าสามารถทำให้  $N_2 > N_1$  แล้วพบว่า  $\alpha$  มีค่าเป็นลบทำให้พจน์  $-\alpha x$  กลายเป็นบวกคั้งนั้นจะเกิดการขยายของแสงในตัวกลาง คั้งนั้นสมการ (2.13) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

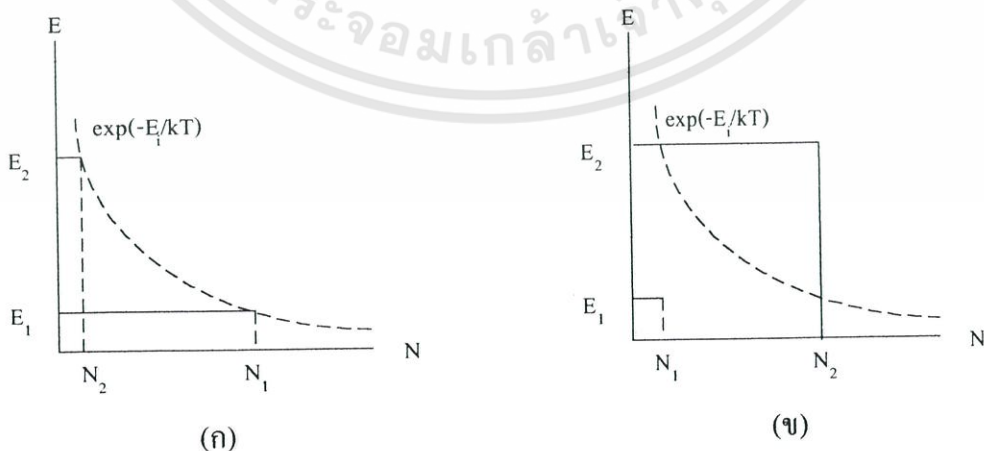
$$I = I_0 \exp(kx) \quad (2.15)$$

โดย  $k = -\alpha$  และเรียก  $k$  ว่าสัมประสิทธิ์อัตราการขยายสัญญาณ (Small Signal Gain Coefficient) สามารถเขียนได้ว่า

$$k = \left( N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) \frac{B_{21} h \nu_{21} \rho}{c} \quad (2.16)$$

### 2.3 การเกิดประชากรผกผัน (Population Inversion)

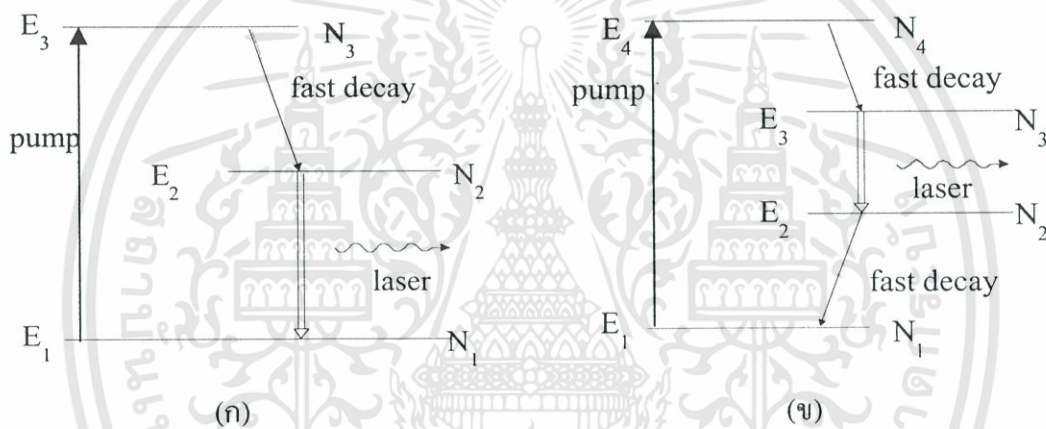
การทำให้เกิดสภาพประชากรผกผัน ( $N_2 > N_1$ ) ทำได้โดยการเพิ่มพลังงานให้แก่อะตอม ทำให้อะตอมหรือประชากร  $N_1$  ในระดับพลังงานสถานะพื้น  $E_1$  ถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานสถานะกระตุ้น  $E_2$  โดยจำนวนอะตอม  $N_2$  ที่ระดับพลังงาน  $E_2$  มีจำนวนมากกว่าปกติ ซึ่งสภาพ  $N_2 > N_1$  ก็คือสภาพประชากรผกผัน จากรูปที่ 2.6(ก) สมการเอ็กซ์โปเนนเชียลที่มีค่าลบบ่งชี้ให้เห็นว่า สภาพสมดุลทางความร้อน  $N_2 \ll N_1$  นั่นคืออะตอมส่วนใหญ่อยู่ที่ระดับพลังงานสถานะพื้น  $E_1$  รูปที่ 2.6(ข) พบว่าที่ระดับพลังงาน  $E_2$  จำนวนประชากร  $N_2 > N_1$  เป็นสภาวะของการเกิดจำนวนประชากรผกผัน



**รูปที่ 2.6** การเกิดประชากรผกผัน ก) จำนวนประชากรที่ระดับพลังงาน  $E_1$  และ  $E_2$  ที่เกิดแบบปกติ  
ข) จำนวนประชากรที่ระดับพลังงาน  $E_1$  และ  $E_2$  ที่เกิดสภาพแบบประชากรผกผัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 เมื่อทำการเพิ่มพลังงานในการกระตุ้นอะตอมสูงให้ขึ้น จำนวนอะตอมที่สถานะถูกกระตุ้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองมีค่าเท่ากัน ( $B_{12}=B_{21}$ ) ดังนั้นอัตราการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองจะมากขึ้นตามด้วย เป็นเหตุให้ไม่สามารถทำให้เกิดจำนวนประชากรผกผันในเลเซอร์ 2 ระดับ เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการเลือกสารเลเซอร์ที่สามารถทำให้เกิดประชากรผกผันได้ง่ายเช่น การเลือกสารเลเซอร์ที่มีระดับพลังงาน 3 ระดับ หรือ 4 ระดับ และการเลือกวิธีเพิ่มพลังงานที่เหมาะสมให้แก่อะตอมทำได้หลายวิธีเช่น การเพิ่มพลังงานโดยใช้แสง (Optical Pumping) การเพิ่มพลังงานโดยใช้อิเล็กตรอนดิสชาร์จ (Electron Discharge) หรือการเพิ่มพลังงานโดยใช้แสงเลเซอร์ชนิดอื่นมาส่องกระทบทำให้มีการเปลี่ยนค่าระดับพลังงานในสารเลเซอร์เป็นต้น



รูปที่ 2.7 การเกิดเลเซอร์หลายระดับ (ก) การเกิดเลเซอร์ 3 ระดับ (ข) การเกิดเลเซอร์ 4 ระดับ

### 2.3.1 การเกิดเลเซอร์ 3 ระดับ

การทำให้เกิดประชากรผกผันดังแสดงในรูปที่ 2.7(ก) เป็นลักษณะการใช้สารเลเซอร์ที่มีระดับพลังงาน 3 ระดับ ในการทำให้จำนวนอะตอม  $N_2 > N_1$  กล่าวคืออะตอม  $N_1$  จะถูกให้พลังงานแล้วเปลี่ยนค่าระดับพลังงาน ไปอยู่ที่ระดับพลังงาน  $E_3$  เป็นจำนวน  $N_3$  จากนั้นอะตอมที่  $N_3$  จะลดค่าพลังงานอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ในระดับพลังงาน  $E_2$  เป็นจำนวน  $N_2$  ซึ่งที่ระดับพลังงาน  $E_2$  นี้อะตอมมีชั่วชีวิต ( $t_{\text{spont}}$ ) ที่ยาวกว่าที่ระดับพลังงาน  $E_3$  ( $t_{2\text{spont}} > t_{3\text{spont}}$ ) จึงทำให้อะตอม  $N_2$  ที่ระดับพลังงาน  $E_2$  มีจำนวนมากกว่าอะตอมที่ระดับพลังงาน  $E_3$  และ  $E_1$  วิธีการที่จะทำให้จำนวนอะตอม  $N_2$  มากกว่า  $N_1$  นั้นจะต้องมีการเพิ่มพลังงานในการกระตุ้นให้กับอะตอมในอัตราที่สูงมาก ซึ่งมีความยุ่งยากในทางปฏิบัติ จึงมีการเลือกใช้ตัวกลางเลเซอร์ที่มีระดับพลังงาน 4 ระดับแทน

### 2.3.2 การเกิดเลเซอร์ 4 ระดับ

เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานสูงในการกระตุ้นอะตอมให้เกิดสภาพจำนวนประชากรผกผันในเลเซอร์ 3 ระดับ จึงเลือกใช้สารเลเซอร์ที่มีระดับพลังงาน 4 ระดับ จากรูปที่ 2.7(ข) การทำให้จำนวนอะตอม  $N_3 > N_2$  โดยการเลือกอะตอมที่ชั่วชีวิตของระดับพลังงาน  $E_4$  สั้นกว่า  $E_3$  และชั่วชีวิตของระดับพลังงาน  $E_3$  ยาวกว่า  $E_2$  ( $t_{\text{spont4}} < t_{\text{spont3}} > t_{\text{spont2}}$ ) กล่าวคืออะตอม  $N_1$  จะถูกให้พลังงานแล้วเปลี่ยนค่าระดับพลังงานไปที่  $E_4$  เป็นจำนวน  $N_4$  อะตอมที่ระดับพลังงาน  $E_4$  จะลดระดับลงมาที่ระดับพลังงาน  $E_3$  อย่างรวดเร็วเป็นจำนวน  $N_3$  จากนั้นจึงเปลี่ยนระดับพลังงานมาสู่  $E_2$  เป็นจำนวน  $N_2$  จึงเกิดจำนวนประชากรผกผันขึ้นระหว่างระดับพลังงาน  $E_3$  กับระดับพลังงาน  $E_2$  และจะลดลงอย่างรวดเร็วตกลงมายังระดับพลังงาน  $E_1$  วิธีการใช้สารเลเซอร์ที่มีระดับพลังงาน 4 ระดับนี้นิยมใช้มาก เพราะไม่ต้องใช้กระบวนการกระตุ้นอะตอมที่ต้องใช้พลังงานสูงและระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์ก็เป็นไปตามขบวนการการเกิดเลเซอร์แบบ 4 ระดับ

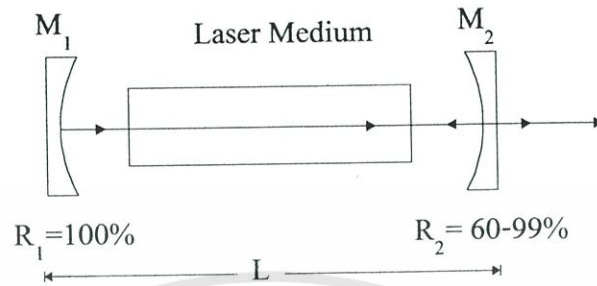
## 2.4 ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical Resonator)

ระบบออปติคัลเรโซเนเตอร์ คือการนำกระจกเลเซอร์มาปิดหัวปิดท้ายหลอดเลเซอร์ที่ภายในหลอดบรรจุสารเลเซอร์โดยวางห่างกันเป็นระยะ  $L$  มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการขยายแสง ระยะห่างระหว่างกระจกทั้งสองเรียกว่าเลเซอร์ควิตี้ ในการเกิดเลเซอร์นั้นจำนวนประชากรผกผัน ( $N_2 - N_1$ ) จะต้องมีค่าน้อยที่สุดค่าหนึ่งเรียกว่า ประชากรผกผันขีดเริ่ม (Threshold Population Inversion,  $N_2 - N_1 = N_{th}$ ) เพื่อให้ระบบมีอัตราการขยาย  $k$  (สมการ 2.16) มีค่ามากพอที่จะชนะอัตราการสูญเสียในระบบ อัตราการขยายนี้เรียกว่า อัตราการขยายขีดเริ่ม (Threshold Gain,  $k_{th}$ ) และเมื่อเกิดเลเซอร์ขึ้นแล้วอัตราการขยายแสงจะมีค่าเท่ากับอัตราการสูญเสียเรียกว่า สถานะคงตัว (Steady State) การสูญเสียรวมทั้งหมดมีสาเหตุจาก

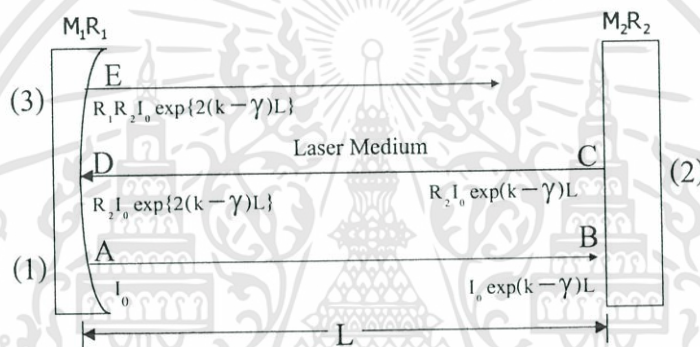
1. การสูญเสียจากการที่แสงเลเซอร์ทะลุผ่านกระจก
2. การสูญเสียจากการดูดกลืนและการกระเจิง (Scattering) ที่กระจกเลเซอร์
3. การสูญเสียจากการดูดกลืนของสารเลเซอร์
4. การสูญเสียจากการกระเจิงเนื่องจากการชนกันของแสงกับอะตอมของสารเลเซอร์
5. การสูญเสียจากการเลี้ยวเบนที่กระจกเลเซอร์

การสูญเสียรวมทั้งหมดนี้เมื่อถูกส่งผ่านไปยังกระจกเลเซอร์คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียยังผล (Effective Loss Coefficient;  $\gamma$ ) ซึ่งจะลดทอนสัมประสิทธิ์อัตราการขยาย ( $k - \gamma$ ) จากรูปที่ 2.8 เป็นการวางหลอดเลเซอร์ (สารเลเซอร์) ไว้ระหว่างกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  ห่างกันเป็นระยะ  $L$  โดยที่

กระจก  $M_1$  มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $R_1=100\%$  และกระจก  $M_2$  มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $R_2 = 60-99 \%$



รูปที่ 2.8 การจัดระบบเลเซอร์ที่ประกอบด้วยสารเลเซอร์และเรโซเนเตอร์



รูปที่ 2.9 การขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบออปติคอลเรโซเนเตอร์ประกอบไปด้วยกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  วางห่างกันเป็นระยะ  $L$  มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็น  $R_1$  และ  $R_2$

จากรูปที่ 2.9 เป็นวิธีการขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบออปติคอลเรโซเนเตอร์ ที่ตำแหน่ง A มีความเข้มแสงเริ่มต้นเป็น  $I_0$  หลังจากทีลำแสงสะท้อนไปที่กระจก  $M_2$  ที่ตำแหน่ง B ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเป็น  $I_0 \exp(k-\gamma)L$  เมื่อลำแสงสะท้อนออกจากกระจก  $M_2$  ที่ตำแหน่ง C ความเข้มแสงลดลงเป็น  $R_2 I_0 \exp\{(k-\gamma)L\}$  และเมื่อลำแสงเดินทางมาถึงกระจก  $M_1$  ณ ตำแหน่ง D ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเป็น  $R_2 I_0 \exp\{2(k-\gamma)L\}$  และเมื่อลำแสงสะท้อนออกจากกระจก  $M_1$  ที่ตำแหน่ง E ความเข้มแสงลดลงเป็น  $R_1 R_2 I_0 \exp\{2(k-\gamma)L\}$  ดังนั้นอัตราการขยายครบรอบ (Round Trip Gain; G) เขียนได้ดังสมการ

$$G = \frac{\text{ความเข้มแสงที่เดินทางครบ 1 รอบ}}{\text{ความเข้มแสงเริ่มต้น}} \tag{2.17}$$

$$= R_1 R_2 \exp\{2(k - \gamma)L\}$$

ถ้า  $G$  มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ามีอัตราการขยายมากกว่าการสูญเสียเกิดมีการขยายสุทธิและเกิดการออสซิลเลชันได้ ถ้า  $G$  มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าอัตราการขยายมีค่าน้อยกว่าอัตราการสูญเสียจึงไม่เกิดการออสซิลเลชัน ดังนั้นที่สถานะขีดเริ่ม (Threshold condition) สามารถเขียนได้ว่า

$$G = R_1 R_2 \exp\{2(k_{th} - \gamma)L\} = 1 \quad (2.18)$$

เมื่อ  $k_{th}$  คือ อัตราการขยายขีดเริ่ม

ในกรณีที่เกิดเลเซอร์จากระบบอย่างต่อเนื่อง พบว่าอัตราการขยายของระบบจะมีค่าคงตัว (Steady State Gain,  $k_{ss}$ ) โดยมีค่าเท่ากับอัตราการขยายขีดเริ่ม ( $k_{th} = k_{ss}$ ) ปฏิกิริยาการณนี้เรียกว่า อัตราการขยายอิ่มตัว (Gain Saturation) ซึ่งเกิดเนื่องจากในสถานะเริ่มต้นของการเกิดเลเซอร์ อัตราการขยายของระบบมีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่มมาก อย่างไรก็ตามผลของกระบวนการแปลงแสงแบบถูกกระตุ้นจะทำให้ปริมาณประชากรผกผันลดลง เป็นผลให้อัตราการขยายคงตัวด้วย ในช่วงนี้อัตราการขยายครบรอบสุทธิจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอาจมากกว่าหรือน้อยกว่าหนึ่งได้ เมื่อเวลาผ่านไประบบจะเข้าสู่สถานะคงตัว  $G$  จะมีค่าเท่ากับ 1 ที่สถานะนี้อัตราการขยายจะมีค่าเท่ากับอัตราการสูญเสีย ประชากรผกผันจะมีค่าเท่ากับ  $N_{th}$  และอัตราการขยายจะมีค่าเท่ากับ  $k_{th}$  และถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มพลังงานให้แก่ระบบในอัตราที่สูงขึ้น ประชากรผกผันก็จะยังคงมีค่าคงที่เท่ากับค่าประชากรผกผันขีดเริ่ม ทำให้อัตราการขยายมีค่าคงตัวที่ค่าของอัตราการขยายขีดเริ่มด้วย กำลังงานส่วนเกินจะออกมาในรูปของกำลังของแสงเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้น

อัตราการขยายขีดเริ่มที่ทำให้ระบบทำงานที่สถานะคงตัวได้นี้ สามารถหาได้จากสมการ (2.18) โดย

$$k_{th} = \gamma + \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (2.19)$$

พจน์แรกแสดงปริมาณของการสูญเสียและพจน์ที่สองแสดงการสูญเสียเนื่องจากลำแสงเลเซอร์ทะลุผ่านกระจกเลเซอร์ จากสมการที่ (2.16) ค่า  $k$  มีค่าอยู่ในช่วงกว้าง นอกจากจะขึ้นกับ  $[N_2 - (g_2/g_1)N_1]$  แล้วยังขึ้นอยู่กับการสมบัติของสารเลเซอร์ ถ้า  $k$  มีค่าสูงนั่นคือมีจำนวนอะตอมในสถานะกระตุ้นมากหรือทำให้เกิดประชากรผกผันได้ง่าย ทำให้เกิดแสงเลเซอร์ได้ง่ายตามไปด้วย ถ้าอัตราการขยายในตัวกลางต่ำ การทำให้เกิดแสงเลเซอร์ได้นั้นจะต้องใช้กระจกเลเซอร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสูง บริเวณที่สะท้อนต้องสะอาด การติดตั้งและการปรับตั้งต้องอยู่ในแนวแกนออปติคัลอย่างแท้จริง ดังนั้นการทำให้เกิดแสงเลเซอร์ได้ง่ายนั้นจะต้องเลือกสารเลเซอร์ที่สามารถทำให้เกิดประชากรผกผันได้ง่ายและใช้พลังงานในการกระตุ้นต่ำ

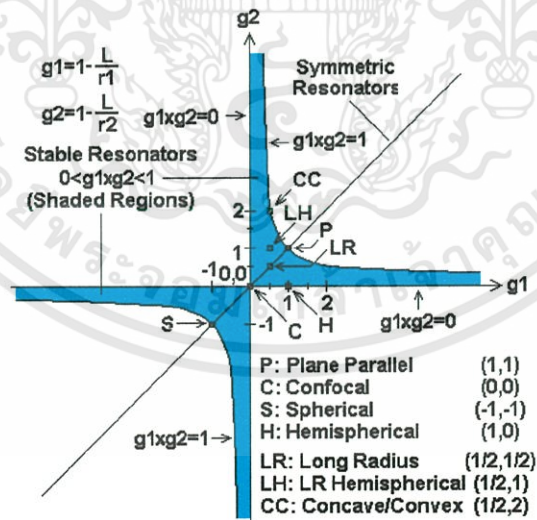
2.5 เสถียรภาพของออปติคอลเรโซเนเตอร์ [1 4]

การเลือกใช้กระจกทั้งสองนี้จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของเลเซอร์ เพื่อที่จะลดการสูญเสียต่าง ๆ ถ้าเลือกใช้กระจกที่มีรัศมีความโค้งมากเกินไปก็จะทำให้แสงภายในควาวิตีมีความเข้มสูงเฉพาะบริเวณแกนของแสงเท่านั้น หมายถึงพื้นที่การใช้สารเลเซอร์ก็จะน้อยลงตามไปด้วย ทำให้การขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มากพอที่จะเกิดเป็นแสงเลเซอร์ได้ หรือถ้าเกิดเป็นแสงเลเซอร์ได้กำลังของเลเซอร์ก็อาจจะต่ำเกินไป ซึ่งจะมีปัญหาต่อการนำแสงเลเซอร์นี้ไปใช้งานต่อไป ดังนั้นในการเลือกใช้กระจกสะท้อนทั้งสองควรคำนึงถึงการนำแสงเลเซอร์ไปใช้งานด้วย จากระบบออปติคอลเรโซเนเตอร์ที่ประกอบไปด้วยกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  วางห่างกันเป็นระยะ  $L$  กำหนดให้มีรัศมีความโค้งเป็น  $r_1$  และ  $r_2$  ตามลำดับ โดยที่ศูนย์กลางของความโค้งของกระจกอยู่บนแกนของแสง เพื่อที่จะพิจารณาถึงความมีเสถียรภาพของเลเซอร์ จะใช้พารามิเตอร์  $g$  เป็นตัวกำหนดถึงระดับการมีเสถียรภาพของเลเซอร์ตามสมการ

$$g = 1 - \frac{L}{r} = 1 - \frac{L}{2f} \tag{2.20}$$

เมื่อ

- $r$  = รัศมีความโค้งของกระจก  $M_1$  และ  $M_2$
- $f$  = ระยะความยาวโฟกัส
- $L$  = ระยะห่างระหว่างกระจก  $M_1$  และ  $M_2$



(LR,LH,CC typical; H,LH,CC with  $r_1/r_2$  swapped not shown)

Laser Resonator Stability Diagram

รูปที่ 2.10 เงื่อนไขของการมีเสถียรภาพของเลเซอร์ ( $0 < g_1 g_2 < 1$ ) เมื่อ  $g_1 = 1 - \frac{L}{r_1}$  และ

$$g_2 = 1 - \frac{L}{r_2}$$

บริเวณที่แรเงาคือบริเวณที่เลเซอร์มีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์จากการแก้ปัญหาวางคณิตศาสตร์จากสมการที่ (2.20) จะมี 2 ชุดคือ  $g_1$  และ  $g_2$  ตามสมการ

$$\text{เมื่อ } g_1 = 1 - \frac{L}{r_1} \text{ สำหรับกระจก } M_1 \quad (2.21)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{r_2} \text{ สำหรับกระจก } M_2 \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.21) และ (2.22) ค่าของ  $g_1$  และ  $g_2$  เป็นเงื่อนไขที่สำคัญของการมีเสถียรภาพของเลเซอร์คือ  $0 < g_1 g_2 < 1$  เมื่อนำเงื่อนไขนี้ไปเขียนกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 2.10 กำหนดให้แกนนอนเป็นแกนของ  $\frac{L}{r_1}$  และแกนตั้งเป็นแกนของ  $\frac{L}{r_2}$  แสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$0 < g_1 g_2 < 1 \equiv 0 < \left(1 - \frac{L}{r_1}\right) \left(1 - \frac{L}{r_2}\right) < 1 \quad (2.23)$$

จากรูปที่ 2.10 ประกอบไปด้วยเส้นโค้งหลายเส้น สามารถที่จะจำแนกออกเป็นระบบต่าง ๆ ได้ดังนี้คือ

- 1) ระบบที่มีศูนย์กลางความโค้งร่วม (Concentric System)
- 2) ระบบที่มีจุดโฟกัสร่วม (Confocal System)
- 3) ระบบที่มีออปติคอลเรโซเนเตอร์วางขนานกัน (Plane Parallel System)

พื้นที่บริเวณที่แรเงาจากรูปที่ 2.10 คือบริเวณที่บ่งบอกว่าเลเซอร์มีเสถียรภาพดี ในกรณีที่ผลคูณระหว่างพารามิเตอร์  $g_1 \times g_2 = 0$  หรือ 1 ระบบออปติคอลเรโซเนเตอร์นี้จะอยู่ที่จุดวิกฤตทางเสถียรภาพ ปกติแล้วถือว่าไม่มีเสถียรภาพ เรียกสภาพเช่นนี้ว่ามีเสถียรภาพแบบอ่อน ๆ (Marginally stable) กรณีนี้เป็นกรณีพิเศษ ได้แก่กรณีที่กระจก  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นกระจกราบมีรัศมีความโค้งเป็นอนันต์ ( $r_1, r_2 = \infty$ ) ระบบออปติคอลเรโซเนเตอร์แบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.11

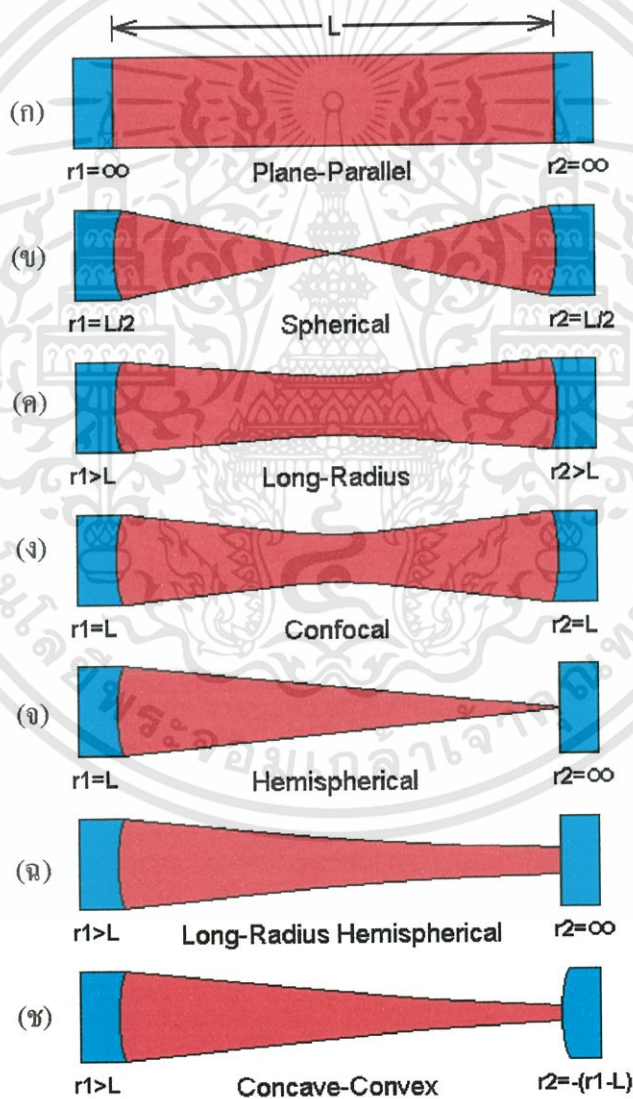
สมมติว่าการสะท้อนกลับภายในเรโซเนเตอร์ไม่มีการล้นออก (Spilt Over) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในการออกแบบสร้างระบบออปติคอลเรโซเนเตอร์จะต้องออกแบบให้มีความเหมาะสมทุกประการ มิฉะนั้นจะมีการสูญเสียของพลังงานมากจนเกินไป อาจจะทำให้เกิดอัตราการขยายขีดเริ่ม  $k_{th}$  ยาก เพื่อที่จะทำให้เกิดค่าอัตราการขยายอิมพัลส์  $k_{th}$  อย่างเพียงพอจำเป็นต้องทำการกระตุ้นโดยเพิ่มพลังงานให้กับสารเลเซอร์มากขึ้นอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่สารเลเซอร์และอุปกรณ์อื่น ๆ

ในกรณีที่ระบบเรโซเนเตอร์เป็นแบบจุดศูนย์กลางความโค้งร่วม จะต้องเลือกกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  ที่มีรัศมีความโค้งเป็น  $r_1 = r_2 = \frac{L}{2}$  และในกรณีที่ระบบเรโซเนเตอร์เป็นแบบจุดโฟกัสร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องเลือกกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  ที่มีรัศมีความโค้งเป็น  $r_1 = r_2 = L$  ดังนั้นในทุกกรณีของระบบเรโซเนเตอร์จะเป็นระบบที่มีเสถียรภาพแบบอ่อน ๆ (Marginally Stable) โดยที่กระจก  $M_1$  และ  $M_2$  จะต้องไม่ขยับผิดไปจากตำแหน่งในแนวแกนของแสง ถ้าหากมีการขยับผิดไปจากตำแหน่งในแนวแกนอปติกเพียงเล็กน้อยก็จะไม่เกิดเลเซอร์หรือเกิดแสงเลเซอร์ได้ยาก

ระบบออปติคอลลเรโซเนเตอร์มีอยู่หลายลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.11 ในทางปฏิบัติควรจะเลือกกระจกที่มีความยาวโฟกัสยาว 1 อัน และกระจกที่มีความยาวโฟกัสสั้นอีก 1 อัน ทั้งนี้ก็เพื่อความสะดวกในการปรับระนาบของกระจกทั้งสองให้อยู่ในแนวแกนอปติกได้ง่าย สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบออปติคอลลเรโซเนเตอร์ตามข้อ (ฉ) โดยกระจกหลังมีรัศมีความโค้งเป็นอนันต์ ( $r_2 = \infty$ ) และกระจกหน้ามีรัศมีความโค้งเท่ากับระยะห่างระหว่างกระจกทั้งสอง ( $r_1 > L$ )



Common Laser Resonator Configurations

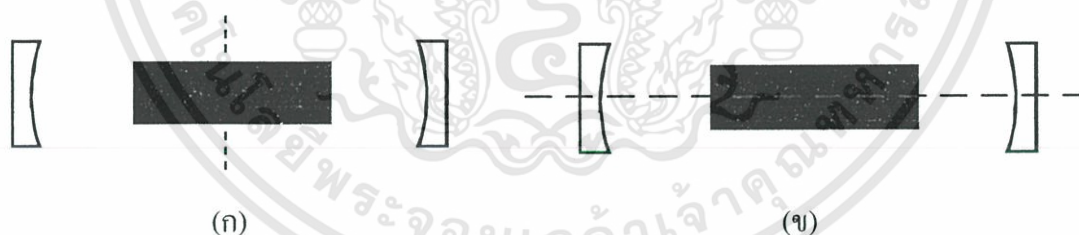
รูปที่ 2.11 ระบบออปติคอลลเรโซเนเตอร์แบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระจกสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการในการปลดปล่อยแสงเลเซอร์นั้นจะต้องมีการกระตุ้นอะตอมที่สถานะกระตุ้นหรือสถานะกึ่งเสถียร (Metastable State) โดยโฟตอนที่ไปกระตุ้นนั้นจะเกิดจากกระบวนการปลดปล่อยแบบเกิดขึ้นเองของระดับพลังงานกึ่งเสถียรออกมาก่อน จากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมานี้จะเกิดการสะท้อนภายในเลเซอร์ควาวิตี โดยสะท้อนที่กระจกหน้าและหลัง และโฟตอนเหล่านี้ก็จะไปกระตุ้นอะตอมที่อยู่สถานะเสถียรที่เหลืออยู่ให้ตกลงมาและสะท้อนกลับไปที่กระจกหน้าและหลังในเลเซอร์ควาวิตีกระบวนการนี้ก็คือ กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นนั่นเอง โฟตอนที่เคลื่อนที่ภายในควาวิตีนี้จะมีรูปแบบของโมดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ 2 ลักษณะ คือ










### 2.5.1 โมดตามขวาง (Transverse Mode)

โมดตามขวาง คือ โมดของการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงเลเซอร์ที่มีลักษณะของคลื่นที่ขวางกับเลเซอร์ควาวิตีดังรูปที่ 2.12(ก) สัญลักษณ์ของโมดของเลเซอร์ชนิดนี้คือ  $TEM_{mn}$  (Transverse Electromagnetic Mode) โดยค่า  $m$  และ  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็มของคลื่นตามขวางที่คู่ตามภาคตัดขวางของแกน  $x$  และ แกน  $y$  ของลำแสงเลเซอร์ โมดพื้นฐานที่รู้จักคือ  $TEM_{00}$  นอกจากนี้ยังมีรูปแบบต่าง ๆ อีก เช่น  $TEM_{01}$   $TEM_{10}$   $TEM_{11}$  เป็นต้นซึ่งจะเกิดขึ้นกับการหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเรโซเนเตอร์ โมดเหล่านี้จะเกิดจากควาวิตีที่มีเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังมีเลเซอร์หลายโมด (Multimode) เลเซอร์หลายโมดนี้จะให้กำลังสูงกว่า แต่คุณภาพของลำแสงจะต่ำ การเลือกรูปแบบของ โมดที่จะนำไปใช้นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน



รูปที่ 2.12 ลักษณะการควโมดเลเซอร์ (ก) การควโมดแบบตามขวางภายในควาวิตี (ข) การควโมดแบบตามยาวภายในควาวิตี

โมดตามขวางรูปแบบต่าง ๆ นั้นสามารถดูได้จากการนำจากไปรับแสงเลเซอร์ (ในกรณีที่เลเซอร์มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้) แต่ถ้าความยาวคลื่นอยู่ในย่านอัลตราไวโอเลต (uv) หรือย่านอินฟราเรด (IR) จะต้องนำจากที่ตอบสนองย่านความยาวคลื่นช่วงนั้นมารับค่าแสง ทั้งนี้รูปแบบโมดต่างๆ สามารถดูได้จากรูปที่ 2.13

 TEM <sub>00</sub>	 TEM <sub>01</sub>	 TEM <sub>02</sub>
 TEM <sub>10</sub>	 TEM <sub>11</sub>	 TEM <sub>12</sub>
 TEM <sub>20</sub>	 TEM <sub>21</sub>	 TEM <sub>22</sub>

รูปที่ 2.13 รูปแบบโหมดตามขวางของเลเซอร์

### 2.5.2 โหมดตามยาว (Longitudinal Mode)

โหมดตามยาว คือ โหมดการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเลเซอร์ที่มีลักษณะของคลื่นตามความยาวของควาวิตีดังรูปที่ 2.12(ข) จะพบว่าในควาวิตีจะเกิดจากการที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มียาวคลื่นต่าง ๆ เกิดการออสซิลเลตภายในควาวิตีตามแนวยาว ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเลเซอร์ไม่ได้เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียวจริงๆ แต่จะมีความยาวคลื่นต่างๆ กระจายอยู่ภายในสเปกตรัม สมมติว่าให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น  $1 \mu\text{m}$  ( $10^{-6} \text{ m}$ ) เกิดการออสซิลเลตชันภายในควาวิตีที่มีระยะ  $L$  เท่ากับ  $30 \text{ cm}$  จำนวนคลื่นที่เกิดขึ้นระหว่างกระจกทั้งสองเป็นคลื่นนิ่ง (Standing Wave) คือ

$$M = \frac{L}{\lambda} = \frac{3 \times 10^{-1}}{1 \times 10^{-6}} = 3 \times 10^5 \quad (2.24)$$

พบว่าภายในเลเซอร์ควาวิตีสามารถมีจำนวนเต็มของความยาวคลื่นเท่ากับ  $3 \times 10^5$  เพื่อให้การพิจารณาจะพิจารณาที่จำนวนเต็มครึ่งของความยาวคลื่นเมื่อเกิดการแทรกสอดของแสงตามสมการ

$$m = \frac{L}{\lambda/2} \quad \text{หรือ} \quad \lambda = \frac{2L}{m} \quad (2.25)$$

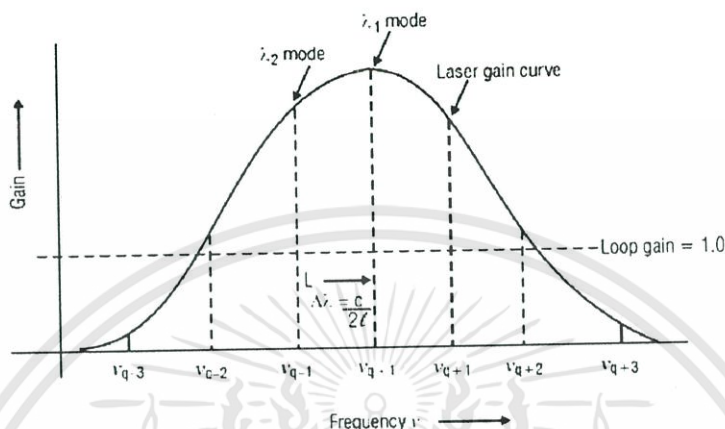
เมื่อ  $v = c/\lambda$  ดังนั้นจะได้

$$v_m = \frac{mc}{2L} ; m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ผลต่างของความถี่คลื่นทั้งสองคลื่นที่ติดกันเรียกว่าระยะห่างของโหมด (Mode Spacing) แสดงดังรูปที่ 2.15 และคำนวณได้ดังสมการ

$$\Delta\nu = \nu_{m+1} - \nu_m = \frac{c}{2L} \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.14 ความถี่ภายในสเปกตรัมแบบโหมดตามยาว

จากสมการที่ 2.27 และรูปที่ 2.14 พบว่าระยะห่างของความถี่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างกระจก  $L$  ทั้งสองเท่านั้น เช่นระยะห่างของความถี่ของฮีเลียมนีออนเลเซอร์และนีโอดีเมียมแฮกเลเซอร์ที่มีคาบถี่เท่ากันคือ 32 cm พบว่าระยะห่างระหว่างความถี่ของเลเซอร์ทั้งสองเท่ากัน คำนวณได้ตามสมการ

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} = \frac{299792458 \text{ m/s}}{2(0.32) \text{ m}} = 46845716 \text{ Hz} \quad (2.28)$$

## 2.6 การคัดเลือกความถี่ของแสงเลเซอร์

แสงเลเซอร์ที่ออกมา นั้นมีความยาวคลื่นหรือความถี่มากมากระจายอยู่ภายในสเปกตรัมดังรูปที่ 2.14 สมมติว่าต้องการให้เลเซอร์ปล่อยความถี่  $\nu_{q+1}$  ออกมา จะต้องทำให้อัตราการขยายของสารเลเซอร์มีค่าอัตราการขยายสูงสุดที่  $k_{(\nu_{q+1})}$  เท่านั้น ส่งผลให้เกิดการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นและคายความถี่  $\nu_{q+1}$  เท่านั้น วิธีการที่จะทำให้เกิดอัตราการขยายสูงสุดที่  $k_{(\nu_{q+1})}$  นั้นสามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ทางแสงเช่น ปริซึม (Prism) ตัวกรองแสง (Filter) เกรตติ้ง (Grating) และตัวคูคกลิ่นอ้อมตัว เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ทำการคัดเลือกความถี่โดยใช้ตัวคูคกลิ่นอ้อมตัวเป็นอะตอมของไอโอดีน เมื่อวางตัวคูคกลิ่นอ้อมตัวนี้ไว้ภายในเลเซอร์คาบถี่ แสงเลเซอร์จะเกิดการชนกับอะตอมของตัวคูคกลิ่นอ้อมตัว ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์แลมพ์ดีพ (Lamp Dip)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 แลัมบ์ดิว

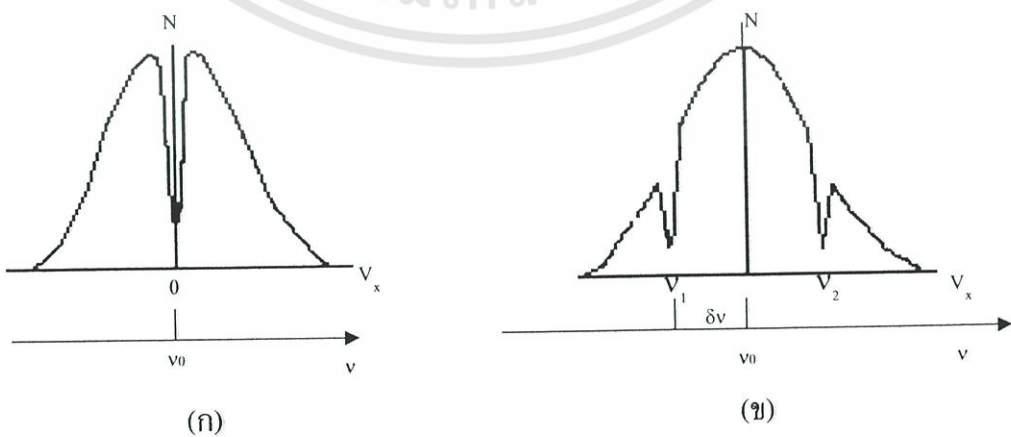
แลัมบ์ดิวเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแก๊สเลเซอร์ทั่วไป โดยแสงเลเซอร์เมื่อวิ่งผ่านสารเลเซอร์จะเกิดการชนกัน ทำให้อะตอมของแก๊สเลเซอร์มีความเร็วต่างกันเป็นกลุ่ม ๆ จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์คอปเพลอร์ตามสมการ

$$v_0 = v_c \left( 1 \pm \frac{v_z}{c} \right)^{-1} ; v_c > v_0 \quad (2.29)$$

เมื่อ  $v_c$  = โมดของเลเซอร์ควาวิตี  
 $v_0$  = ความถี่ตรงกลางของไลน์เซฟฟิงก์ชัน  
 $v_z$  = ความเร็วของอะตอมในแนวแกนออปติก

ในกรณีที่อะตอมในแนวแกน  $z$  เกิดการชนกันและอะตอมนั้นหยุดนิ่ง ( $v_z = 0$ ) พบว่าโมดของเลเซอร์ควาวิตีของโมดตามยาวมีค่าเท่ากับความถี่ตรงกลางของไลน์เซฟฟิงก์ชัน ทำให้อัตราการขยายความถี่ตรงกลางไลน์เซฟฟิงก์ชันลดลงเกิดเป็นหลุมลึก (Hole Burning) ดังรูปที่ 2.15(ก) เลเซอร์จะมีโมดตามยาวโมดเดียวคือที่ความถี่  $v_0$

ในกรณีที่ความเร็วของอะตอม  $v_z \neq 0$  ความถี่ของเลเซอร์ควาวิตี ( $v_0 \neq v_c$ ) ทำให้อัตราการขยายของเลเซอร์ลดลงเกิดเป็นหลุมลึกที่ความถี่  $v_1$  และ  $v_2$  ดังรูปที่ 2.15(ข) ที่สมมาตรทางด้านซ้ายและด้านขวาของความถี่ตรงกลางไลน์เซฟฟิงก์ชัน ( $v_0$ ) ในกรณีนี้เลเซอร์จะมีโมดตามยาว 2 โมดคือ  $v_1$  และ  $v_2$  จากรูปที่ 2.15(ข) ถ้าปรับให้โมดของเลเซอร์ควาวิตี ( $v_1$  หรือ  $v_2$ ) ตรงกับความถี่ตรงกลางไลน์เซฟฟิงก์ชัน ( $v_0$ ) พบว่าแสงเลเซอร์มีความถี่เดียวคือ  $v_0$  โดยความถี่อื่น ๆ รอบ ๆ  $v_0$  จะไม่เกิดแสงเลเซอร์ ดังนั้นความถี่ของแสงเลเซอร์จึงเป็นความถี่ที่มีเสถียรภาพ

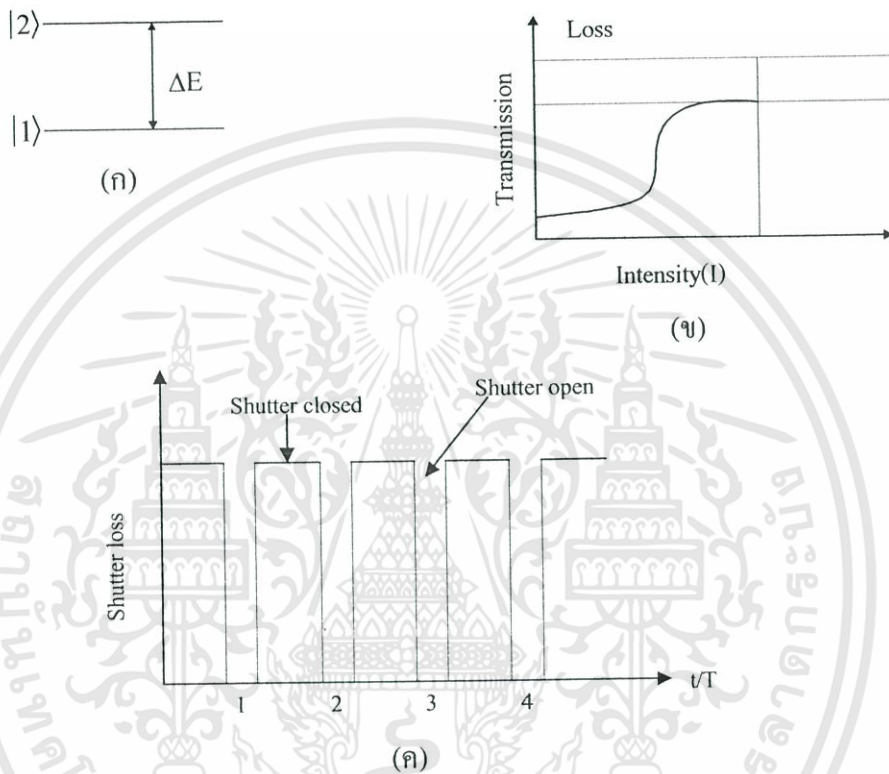


รูปที่ 2.15 ปรากฏการณ์แลัมบ์ดิว ก)  $v_z = 0$  ข)  $v_z \neq 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 โมคัลลอกเลเซอร์

โมคัลลอกเลเซอร์ คือการทำให้เลเซอร์มีกำลังสูง มีระยะเวลาสั้น เป็นแสงที่ปล่อยออกมาเป็นช่วง ๆ (Laser Pulses) โดยที่แสงเลเซอร์เป็นฟังก์ชันของเวลาขึ้นอยู่กับเฟส ความถี่ และแอมพลิจูดของโมคัล การทำให้เกิดโมคัลลอกทำได้โดยการนำตัวดูดกลืนอิมพัลส์วางไว้ในเลเซอร์ควาวิตีเพื่อทำหน้าที่ในการเกิดโมคัลลอกเลเซอร์



รูปที่ 2.16 โมคัลลอกเลเซอร์ (ก) ค่าระดับพลังงานของสารละลายคาย (ข)แสดงการทำงานของ การดูดกลืนอิมพัลส์ (ค) ยอดจากการดูดกลืนเปรียบเสมือนการปิด-เปิด ของชัตเตอร์

พิจารณาการทำงานของตัวดูดกลืนอิมพัลส์ที่มีระดับพลังงาน 2 ระดับดังรูปที่ 2.16(ก) ที่เกี่ยวข้องกับ การดูดกลืนและการปลดปล่อยโฟตอนที่ความถี่  $\nu_{21} = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$  ซึ่งเท่ากับความถี่ของ เลเซอร์ที่ปล่อยออกมา โดยความถี่ที่ไม่เท่ากับความถี่  $\nu_{21}$  จะไม่สามารถผ่านตัวดูดกลืนนี้ไปได้ เมื่อ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวดูดกลืนอิมพัลส์นี้ ส่วนหน้าคลื่นจะถูกดูดกลืนทำให้อะตอมของตัวดูดกลืน อิมพัลส์เปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น ไปยังสถานะถูกกระตุ้นแสดงดังรูปที่ 2.16(ข) จนกระทั่ง เกิดการอิมพัลส์ ทำให้ตัวดูดกลืนอิมพัลส์นี้ไม่สามารถดูดกลืนต่อไปได้อีก ดังนั้นส่วนท้ายของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าก็จะวิ่งผ่านตัวดูดกลืนอิมพัลส์ไปได้โดยไม่ถูกดูดกลืน (Shutter open, เปรียบเสมือนชัตเตอร์เปิด) ดังรูปที่ 2.16(ค) ซึ่งจะทำให้เกิดหลุมของการดูดกลืนขึ้น เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวดูดกลืนอิมพัลส์ไปแล้วยังไม่ทันสะท้อนกลับจากกระจกเลเซอร์ตัวดูดกลืนอิมพัลส์ก็จะปลดปล่อยพลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานที่ดูคลืนไป เนื่องจากเวลาในการปลดปล่อยพลังงานสั้นกว่าเวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสะท้อนกลับจากกระจกเลเซอร์ ทำให้ตัวดูคลืนนี้กลับคืนสู่สถานะเดิมและมีขีดความสามารถในการดูคลืนได้อีกครั้งหนึ่ง (Shutter closed, เปรียบเสมือนชัตเตอร์ปิด) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิ่งผ่านตัวดูคลืนอิมตัวนี้อีกครั้งหนึ่งก็จะเกิดขบวนการนี้ซ้ำเดิม เนื่องจากมีจำนวนโมดเกิดขึ้นในเลเซอร์ควิตีมาก เพราะฉะนั้นทุกโมดที่วิ่งผ่านตัวดูคลืนอิมตัวจะเกิดเป็นหลุมของการดูคลืนอิมตัวที่มีความแตกต่างระหว่างเฟสคงที่ แสงเลเซอร์ที่ออกจึงออกมาเป็นช่วงๆ มีกำลังสูงและมีเฟสคงที่ตลอด แสงเลเซอร์ที่ได้นี้จึงเป็นแสงที่มีความเสถียร

## 2.7 สมบัติของแสงเลเซอร์

จากหลักการของเลเซอร์ที่เป็นการขยายสัญญาณแสงภายในออปติคอลลิวิตีด้วยกระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น จึงทำให้เกิดแสงสีเดียวและมีทิศทางเคลื่อนที่ที่แน่นอนหรือมีทิศทางเดียว จึงเป็นเหตุผลที่ใช้อธิบายว่าทำไมเลเซอร์ จึงมีความเข้มสูงได้ แม้ประสิทธิภาพของเลเซอร์บางชนิดจะมีค่าต่ำ แต่พลังงานของระบบจะเปลี่ยนเป็นแสงที่มีสีเดียว หรือมีสเปกตรัมแคบมาก ๆ จำนวนโฟตอนที่ความถี่นั้นจึงมีค่าสูง ประกอบทั้งโฟตอนเหล่านั้นมีทิศทางเคลื่อนที่ไปทางเดียวกันหมดภายในพื้นที่หน้าตัดแคบๆ ดังนั้นจำนวนโฟตอนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยจึงสูงมาก หากมีการโฟกัสลำแสงด้วยแล้วแสงเลเซอร์จะมีความเข้มเพิ่มสูงขึ้นหลายเท่า

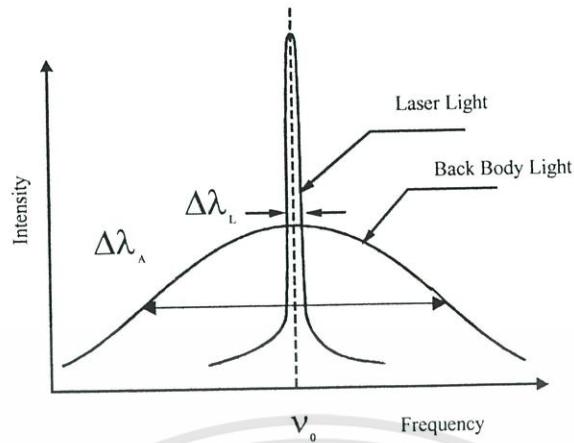
เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความเข้มสูงมากนี้เอง การป้องกันอุบัติเหตุเนื่องจากการใช้แสงเลเซอร์ จึงเป็นสิ่งสมควรระมัดระวังเช่น ผู้ที่ทำการทดลองเกี่ยวกับแสงเลเซอร์ ควรใส่แว่นที่ตัดแสงที่ความถี่ นั้น ๆ ในขณะที่ทำงาน และไม่มองแสงเลเซอร์โดยตรงโดยเด็ดขาด

### 2.7.1 แสงสีเดียวและความเข้มสูง

แสงเลเซอร์มีคุณสมบัติเป็นแสงสีเดียว เพราะเป็นแสงที่เปล่งออกมาจากการเปลี่ยนระดับพลังงานในระบบอะตอมหรือโมเลกุล ความถี่ของแสงมีค่าแน่นอนตามผลต่างของระดับพลังงานทั้งสอง  $v = \Delta E/h$  และยังมีส่วนในการกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นโดยอาศัยกลไกของการขยายสัญญาณแสงด้วยออปติคอลลิวิตี

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงเลเซอร์กับแสงที่เปล่งจากวัตถุจะเห็นข้อแตกต่างอย่างเห็นชัดเจนในรูปที่ 2.17 จากสมมติฐานพลังงานที่ป้อนให้แก่แหล่งกำเนิดทั้งสองมีค่าเท่ากันและประสิทธิภาพในการกำเนิดแสงของระบบมีค่าเท่ากันด้วย พื้นที่ใต้กราฟของวัตถุในรูปที่ 2.17 ย่อมเท่ากับพื้นที่ภายใต้กราฟของเลเซอร์ ดังนั้นที่ความถี่ตรงกลางจึงมีความเข้มสูงที่สุด จึงเป็นที่มาของการเป็นแสงที่มีความเข้มสูงที่ค่าความถี่ใดความถี่หนึ่ง การเป็นแสงสีเดียวจึงมีส่วนสัมพันธ์กับคุณสมบัติความเข้มสูงของแสงเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 เปรียบเทียบสเปกตรัมของแสงเลเซอร์กับแสงที่เปล่งจากวัตถุดำ

### 2.7.2 โคฮีเรนซ์

โคฮีเรนซ์ คือ ความเป็นระเบียบของคลื่น การที่คลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีเฟสเหมือนกันหรือเสริมเฟส (In Phase) จึงมีหน้าคลื่นพร้อมกัน คล้ายกับแถวทหารที่เดินเป็นระเบียบพร้อมๆ กันดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบคลื่นที่มีโคฮีเรนซ์และไม่มีโคฮีเรนซ์

คลื่นที่เป็นระเบียบย่อมมีพลังงานและ โมเมนตัมสูง เพราะพลังงานและ โมเมนตัมของโฟตอนแต่ละตัวจะเสริมกันไปในทิศทางเดียวกัน ถ้าจะเปรียบเทียบกับความพร้อมเพียงในการพายเรือ ถ้ามีความพร้อมเพียงกันดีและออกแรงเท่าๆ กันย่อมสามารถนำเรือวิ่งไปได้เร็วกว่าฝีพายที่พายแบบต่างคนต่างพาย โคฮีเรนซ์จึงเป็นสมบัติเฉพาะของแสงเลเซอร์

ในอุดมคติถ้าต้องการให้แสงเลเซอร์ที่อยู่ในออปติคัลควิตี้มีโคฮีเรนซ์สมบูรณ์ ถึงแม้ว่าแสงเลเซอร์นั้นจะออกจากตัวเลเซอร์และเคลื่อนที่ไปในบรรยากาศหรือตัวกลางอื่นใดก็ตาม แต่ในความเป็นจริงแล้วแสงที่วิ่งผ่านตัวกลางของเลเซอร์หรือตัวกลางใดๆ จะเกิดอันตรกิริยากับวัตถุเหล่านั้นซึ่งอาจสูญเสียพลังงาน หรือเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่ไปบ้างทำให้ความเป็นโคฮีเรนซ์ลด

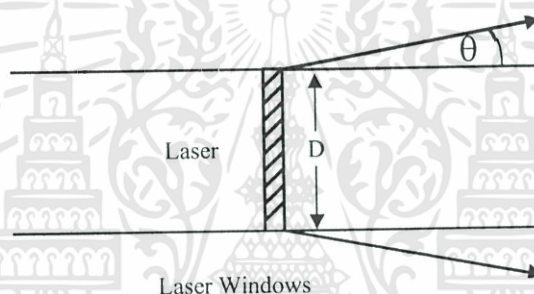
ลง ระยะทางที่แสงยังคงความเป็น โคฮีเรนซ์อยู่ได้อย่างสมบูรณ์นี้เรียกว่า ความยาวโคฮีเรนซ์ (Coherent Length)

### 2.7.3 การมีทิศทางการเคลื่อนที่ที่แน่นอน

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้แสงเป็นลำขนาน ความขนานของลำแสงดีมากคือมีการลู่ออก (Beam Divergence) เพียงเล็กน้อย ตามสมการ

$$\theta = \frac{\lambda}{D} \quad (2.30)$$

โดยที่  $\theta$  เป็นมุมที่ลำแสงลู่ออก  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ และ  $D$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสง เช่น  $D = 1 \text{ cm}$  และ  $\lambda = 1 \text{ }\mu\text{m}$  ค่าของลำแสงที่ลู่ออกมีค่าเพียง  $10^{-4}$  เรเดียน



รูปที่ 2.19 การลู่ออกของแสงเลเซอร์

การที่แสงเลเซอร์มีลำแสงขนานกันนี้มีประโยชน์มากมายในการนำไปใช้งาน เช่น ด้านเรดาร์ การชี้เป้าในด้านการทหาร ลำแสงขนานอย่างสมบูรณ์นี้หากนำไปโฟกัสเพื่อรวมแสงแล้ว จะได้จุดรวมแสงที่มีขนาดเล็กและมีความเข้มสูงมากจึงมีประโยชน์ในด้านการเจาะตัดวัสดุที่ต้องการความแม่นยำสูงและรอยเจาะตัดที่คมชัด

สาเหตุที่เลเซอร์มีลำแสงขนานกันมากๆ นี้ สามารถอธิบายได้จากรูปที่ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการขยายในออปติคอลลาวิตี โฟตอนที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ในแกนออปติกเท่านั้นที่จะถูกขยายสัญญาณเป็นแสงเลเซอร์ ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเป็นแสงที่อยู่ในแนวแกนออปติกและตั้งฉากกับกระจกที่เป็นออปติคอลลาวิตี การลู่ออกของลำแสงเลเซอร์นี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น

## บทที่ 3

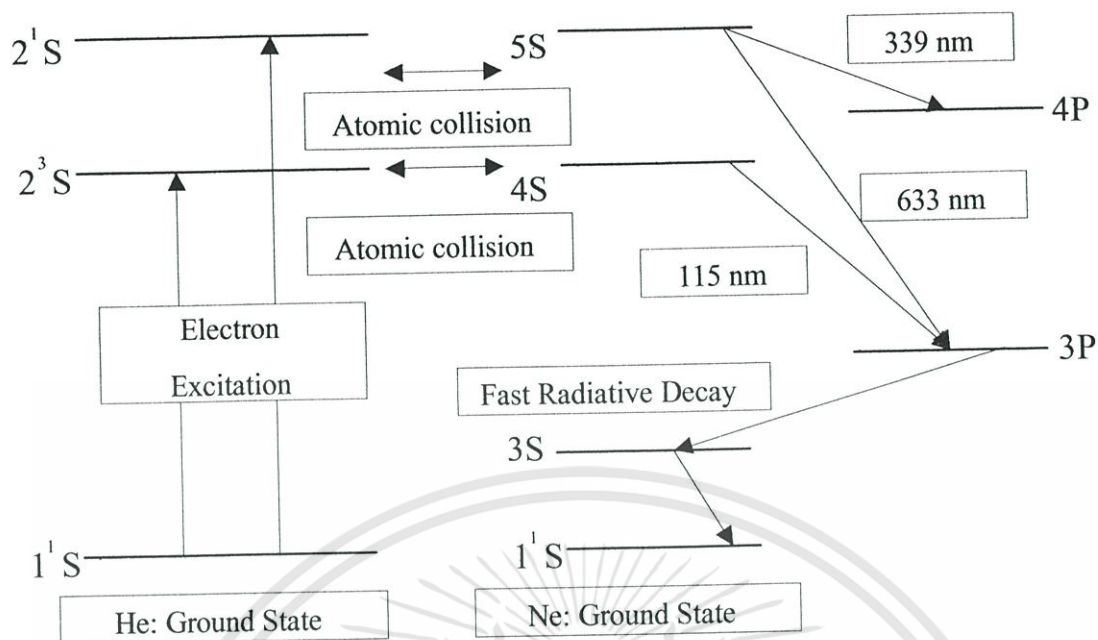
# ระบบความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของฮีเลียมนีออนเลเซอร์

จากหลักการของเลเซอร์พบว่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) หรือความถี่ ( $\nu$ ) แปรผันกับระยะห่างระหว่างกระจก (L) เพื่อที่จะควบคุมให้เลเซอร์ปล่อยความถี่ที่เสถียรออกมาจะต้องควบคุมให้ระยะห่างระหว่างกระจก (L) คงที่ โดยแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) การควบคุมที่ระบบโครงสร้างเชิงกล 2) การควบคุมแบบป้อนกลับ

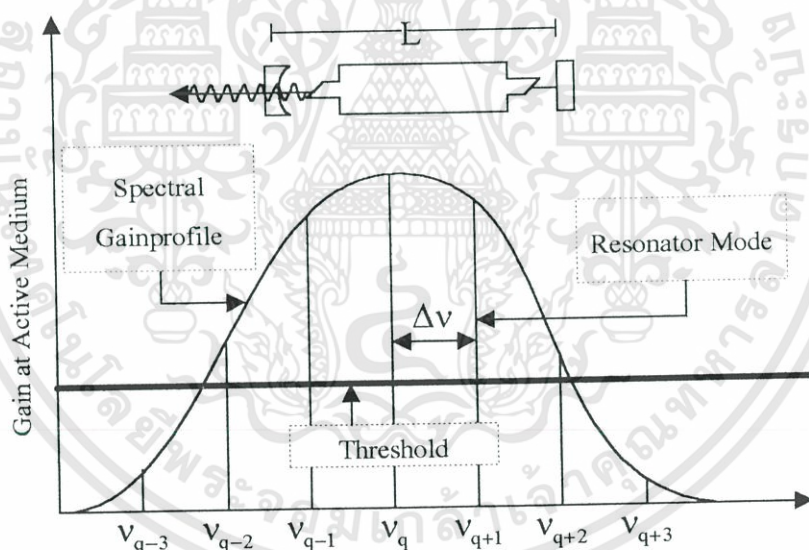
หลังจากที่ควบคุมความถี่ให้มีความเสถียรแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการคัดเลือกความถี่ใด ความถี่หนึ่งภายในสเปกตรัม ซึ่งการคัดเลือกความถี่สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการดูดกลืนอ้อมตัวด้วยไอโอดีน ( $^{127}\text{I}_2$ ) ความถี่ที่ได้นำมาใช้เป็นความถี่มาตรฐานอ้างอิง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ โดยใช้เทคนิคการปิดความถี่

### 3.1 ระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์

จากหลักการของระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์ การทำให้เกิดแสงเลเซอร์จะต้องให้พลังงานกับสารเลเซอร์ โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง เมื่ออิเล็กตรอนจากการคิซาร์ทวิ่งไปชนกับอะตอมของฮีเลียมที่สถานะพื้น ทำให้อะตอมของฮีเลียมมีระดับพลังงานสูงขึ้น และกระโดดไปอยู่ที่ระดับพลังงาน  $2^1\text{S}$  และ  $2^3\text{S}$  ตามลำดับ จากนั้นจะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่นีออนอะตอมโดยการชนกันระหว่างอะตอม ทำให้อะตอมของนีออนที่ระดับพลังงานกระตุ้นอยู่ในสภาพประชากรผกผันเนื่องจากระยะเวลารออยู่ของอะตอมที่ระดับพลังงาน  $5\text{S}$  และ  $4\text{S}$  ของนีออนอะตอมยาวนานกว่าระยะเวลาในระดับพลังงาน  $4\text{P}$  และ  $3\text{P}$  ทำให้มีจำนวนอะตอมเหลืออยู่ที่ระดับพลังงาน  $5\text{S}$  และ  $4\text{S}$  มากกว่าที่ระดับพลังงาน  $4\text{P}$  และ  $3\text{P}$  ดังนั้นจึงเกิดประชากรผกผันขึ้นระหว่างระดับพลังงาน  $5\text{S}$  กับ  $4\text{P}$  และ  $3\text{P}$  และระหว่างระดับพลังงาน  $4\text{S}$  กับ  $3\text{P}$  ตามลำดับ จากนั้นจะเกิดขบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นระหว่างระดับพลังงาน  $5\text{S} \rightarrow 4\text{P}$  เป็นผลให้เกิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 339 nm และเมื่อเกิดขบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นระหว่างระดับพลังงาน  $4\text{S} \rightarrow 3\text{P}$  เป็นผลให้เกิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 115 nm และเมื่อเกิดขบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้นระหว่างระดับพลังงาน  $5\text{S} \rightarrow 3\text{P}$  ซึ่งจะให้แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่น 633 nm จากนั้นนีออนอะตอมที่ระดับพลังงาน  $4\text{P}$  และ  $3\text{P}$  จะลดระดับพลังงานอย่างรวดเร็วมาสู่ระดับพลังงาน  $3\text{S}$  และจากระดับพลังงาน  $3\text{S}$  ลงมายังระดับพลังงานที่สถานะพื้นโดยการชนกับผนังของหลอดเลเซอร์และการลดระดับพลังงานตามธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระดับพลังงานอะตอมของระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์



รูปที่ 3.2 การกระจายของความถี่ภายในสเปกตรัม

เพื่อที่จะให้จำนวนนีออนอะตอมในระดับ 3S ลดลงอย่างรวดเร็วจึงได้มีการออกแบบให้หลอดเลเซอร์มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมาก (ประมาณ 1 mm) ทำให้อะตอมที่ไม่อยู่ในแนวแกนของแสงชนกับผนังของหลอดเลเซอร์ ส่งผลให้จำนวนนีออนอะตอมในระดับ 4P และ 3P มีจำนวนอะตอมมากกว่าระดับพลังงาน 3S ทำให้เกิดจำนวนประชากรผกผันระหว่างระดับพลังงาน 5S กับ 4P และ 3P กับ 4S และ 3P เกิดอยู่ตลอดเวลา แสงของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่ออกมา นั้นประกอบไปด้วยความถี่ต่าง ๆ กระจายอยู่ภายในสเปกตรัมที่เหมาะสมกับสภาพเรโซเนเตอร์ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ระบบโครงสร้างเชิงกล

เนื่องจากความถี่ ( $V$ ) แปรผันกับระยะห่างระหว่างกระจก ( $L$ ) เพื่อที่จะทำให้ความถี่ที่ได้มีความเสถียร จะต้องควบคุมตัวแปรที่มีผลทำให้ระยะห่างระหว่างกระจก ( $L$ ) เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา คือ อุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้โลหะที่ใช้ทำระบบโครงสร้างเชิงกลเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยตามสมการ (3.1) ดังนั้นระหว่างทำการทดลองจะต้องควบคุมให้อุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการให้คงที่ที่  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  ถึงแม้จะมีการควบคุมให้อุณหภูมิคงที่แล้วก็ตาม แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 1^\circ\text{C}$  ซึ่งมีผลทำให้ความถี่ของเลเซอร์ไม่มีเสถียรภาพได้

เพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จะเลือกวัสดุอินวาสำหรับทำระบบโครงสร้างเชิงกลเพื่อใช้จับยึดกระจกทั้งสอง เนื่องจากวัสดุอินวา มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ จากตารางที่ 3.1 พบว่าวัสดุอินวา ซึ่งเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมระหว่างนิกเกิล (Ni) 36% กับเหล็ก (Fe) 64% มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน  $1.2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำระบบโครงสร้างเชิงกล

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T \quad (3.1)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = (1.2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) \times 1^\circ\text{C}$$

$$= 1.2 \times 10^{-6}$$

ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นของวัสดุ (อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$ )

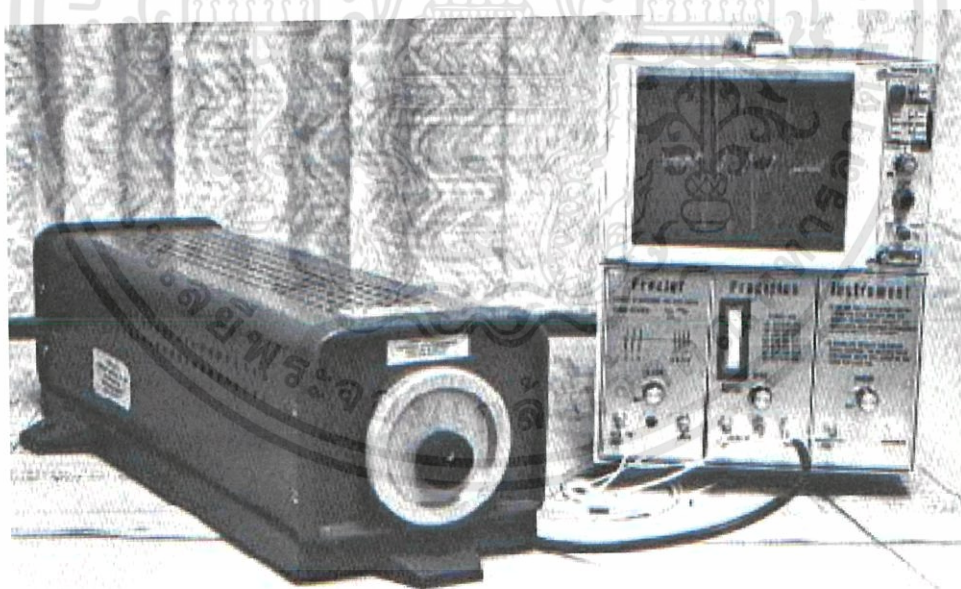
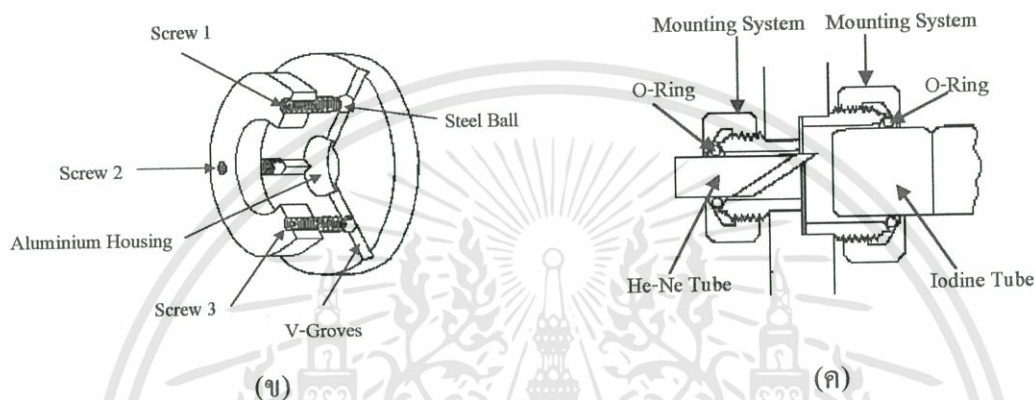
Material	$\alpha \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$
Invar (36% Ni, 64% Fe)	1.2
Aluminum	23
Brass	19
Steel	11-15
Titanium	8.6
Tungsten	4.5

จากสมการ (3.1) พบว่าอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการที่เปลี่ยนไปเพียง  $1^\circ\text{C}$  ก็สามารถทำให้ระบบโครงสร้างเชิงกลมีความยาวสัมพัทธ์  $1.2 \times 10^{-6}$  เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ของฮีเลียมนีออน เลเซอร์ จะเห็นว่าอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะมีอิทธิพลสูงมากที่จะทำให้แสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- |                                    |                        |                      |
|------------------------------------|------------------------|----------------------|
| 1) Invar rod                       | 6) Large PZT           | 11) He Ne Cavity     |
| 2) Screw                           | 7) Brewster Windows    | 12) Aluminum Housing |
| 3) Aluminum Housing                | 8) Iodine Cell         | 13) Cathode (-)      |
| 4) Flat Mirror $M_1$ and Small PZT | 9) Thermostatic Shield | 14) High Voltage     |
| 5) Curved Mirror $M_2$             | 10) Brewster Angle     | 15) Anode (+)        |



(ง)

### รูปที่ 3.3 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติเฉพาะของระบบความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของฮีเลียมนีออนเลเซอร์

1	He-Ne Tube	
	Total Length	30 cm
	Active Length	23 cm
	Fill	7 Part $^3\text{He}$ , 1 Part $^{20}\text{Ne}$
	Pressure	2.9 Torr
2	Iodine Cell Length	10 cm
3	Cavity Length	40 cm
4	Mirror	
	Iodine Cell End	Flat , $r = \infty$ , $R = 100\%$
	Output End	Curve , $r = 60\text{ cm}$ , $R = 99\%$
5	Modulation Frequency	2.5 kHz
6	Servo Bandwidth	400 Hz
7	Axial Mode Spacing	375 MHz
8	Power Output	
	Iodine Cell Removed	0.5 to 1.0 mW
	Iodine Cell Inplace	0.05 to 0.1 mW

ตารางที่ 3.3 ความถี่และความยาวคลื่นของระบบความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีนของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ [12]

โครงสร้างละเอียด	ความถี่ (V) MHz	ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) nm
d	473612379.821	632.99117754
e	473612366.960	632.99119473
f	473612353.597	632.99121259
g	473612340.399	632.99123023
h	473612236.644	632.99136890
i	473612214.705	632.99139822
j	473612193.140	632.99142704

หมายเหตุ ความเร็วแสงในสุญญากาศเท่ากับ 299792458 m/s

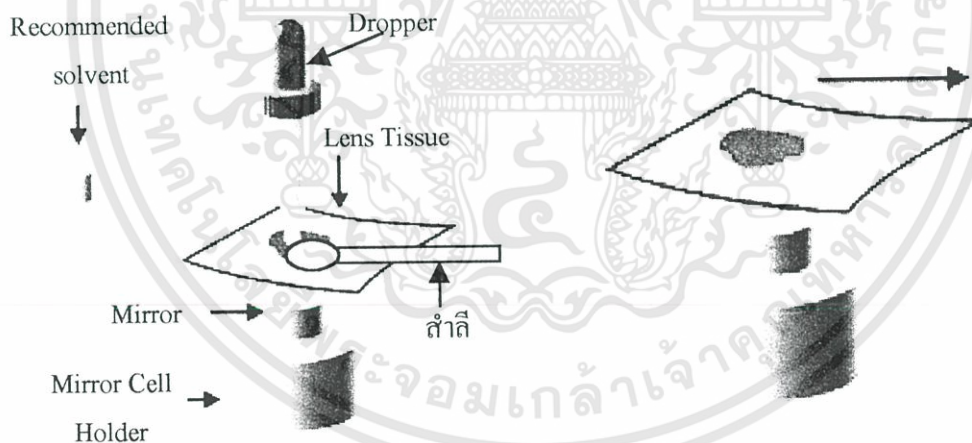
### 3.3 การทำความสะอาดระบบออปติก

อุปกรณ์สำหรับทำความสะอาดระบบออปติกมีดังต่อไปนี้

1. อะซิโตน (Acetone 99.5%)
2. กระดาษเช็ดเลนส์ (Lens Tissue)
3. คีมคีบ (Hemostat, Surgical Pliers)
4. หลอดหยด (Dropper)
5. สำลีพันปลายไม้ (ดูรูปที่ 3.4)

#### 3.3.1 วิธีการทำความสะอาดกระจกเลเซอร์

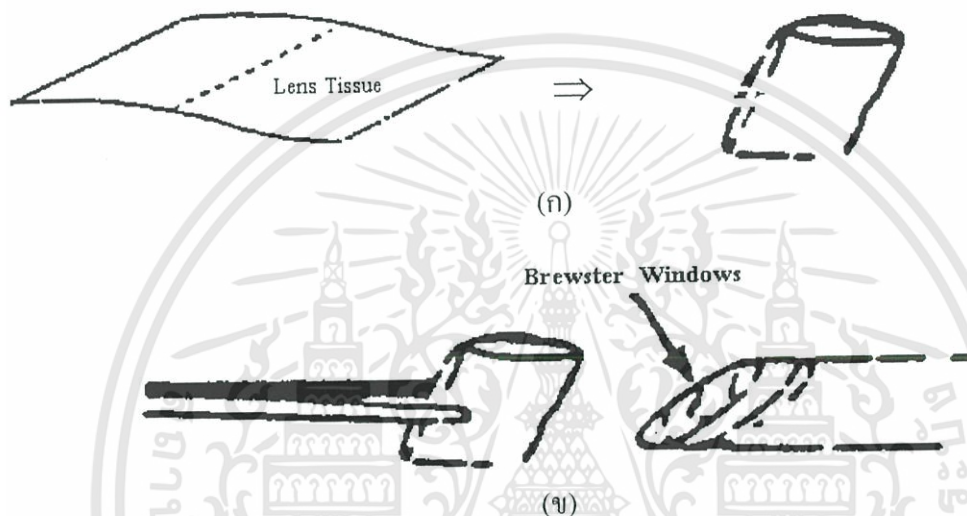
ใช้สำลีพันปลายไม้จุ่มลงในอะซิโตน หรือใช้หลอดหยดดูดอะซิโตนแล้วหยดลงบนสำลีนำไปเช็ดกระจก  $M_1$  หรือ  $M_2$  โดยมีกระดาษเช็ดเลนส์อยู่ตรงกลางดังรูปที่ 3.4 แล้วค่อย ๆ ดึงกระดาษเช็ดเลนส์ออกช้า ๆ ไปในทิศทางเดียวกันทุกครั้ง แล้วสังเกตว่ามีคราบสกปรก หรือมีแผ่นฟิล์มบาง ๆ เกาะอยู่บนกระจก  $M_1$  หรือ  $M_2$  หรือไม่ ถ้ามีให้ทำซ้ำจนกระทั่งสะอาด



รูปที่ 3.4 วิธีการทำความสะอาดกระจก  $M_1$  และ  $M_2$

### 3.3.2 วิธีทำความสะอาดหน้าต่างบรูว์สเตอร์ของหลอดซีเลียมนีออนเลเซอร์และไอโอดีนเซลล์

ตัดกระดาษเช็ดเลนส์และพับให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังรูป 3.5(ก) แล้วใช้กิมทึบกระดาษเช็ดเลนส์ดังรูป 3.5(ข) จุ่มลงในอะซิโตนหรือใช้หลอดหยดดูดอะซิโตนหยดลงบนกระดาษเช็ดเลนส์ แล้วเช็ดบริเวณหน้าต่างบรูว์สเตอร์ของหลอดซีเลียมนีออนเลเซอร์และไอโอดีนเซลล์ การเช็ดควรเช็ดไปในทิศทางเดียวกันตลอดจนกระทั่งสะอาด



รูปที่ 3.5 วิธีการเตรียมกระดาษเช็ดเลนส์ (ก) การพับกระดาษเช็ดเลนส์เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ข) วิธีการทำความสะอาดหน้าต่างบรูว์สเตอร์

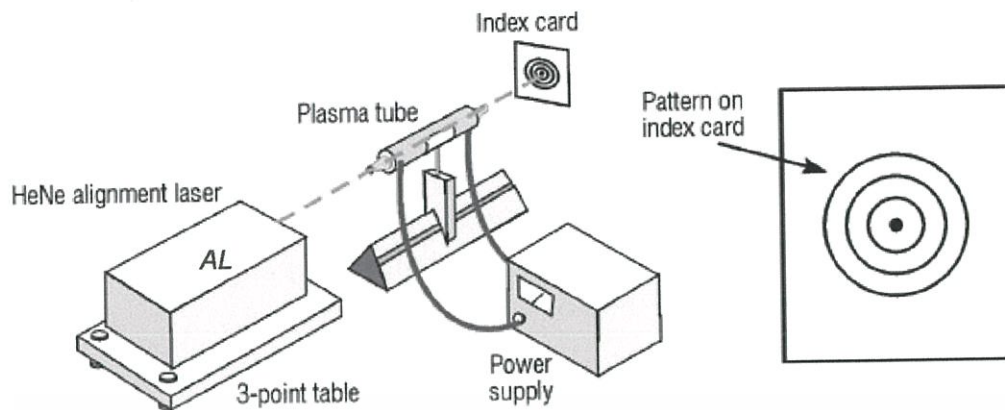
### 3.4 การติดตั้งและการปรับตั้งระบบออปติกเข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลของเลเซอร์

วิธีการในการติดตั้งและปรับตั้งระบบออปติกมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

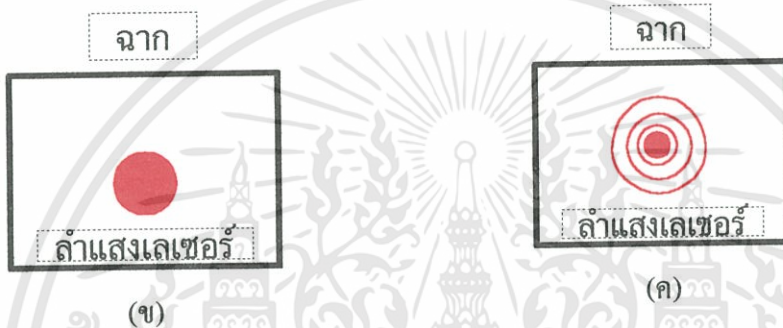
#### 3.4.1 การจัดวางหลอดเลเซอร์ให้อยู่ในแนวแกนของแสง

วิธีการติดตั้งและปรับตั้งหลอดเลเซอร์เข้ากับโครงสร้างเชิงกลดังรูปที่ 3.6 ให้แสงเลเซอร์ (Alignment Laser; AL) ส่องผ่านหลอดเลเซอร์ นำจากมารับแสงเลเซอร์ที่ทะลุผ่านมาทางด้านท้าย ถ้าการจัดวางหลอดเลเซอร์อยู่ในแนวแกนของแสงอย่างสมบูรณ์ ถ้าแสงบนฉากรับจะมีเพียงจุดเดียว ดังรูปที่ 3.6(ข) แต่ถ้าการจัดวางหลอดเลเซอร์ไม่อยู่ในแนวแกนของแสง ถ้าแสงบนฉากรับจะเห็นเป็นวงดังรูปที่ 3.6(ค) แสดงว่าถ้าแสงเลเซอร์ที่ส่องเข้ามาเกิดการชนกับผนังของหลอดเลเซอร์ ซึ่งจะต้องปรับระดับของแสงเลเซอร์ AL จนกระทั่งแสงเลเซอร์บนฉากรับเห็นเพียงจุดเดียวแสดงว่าหลอดเลเซอร์อยู่ในแนวแกนของแสงสมบูรณ์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

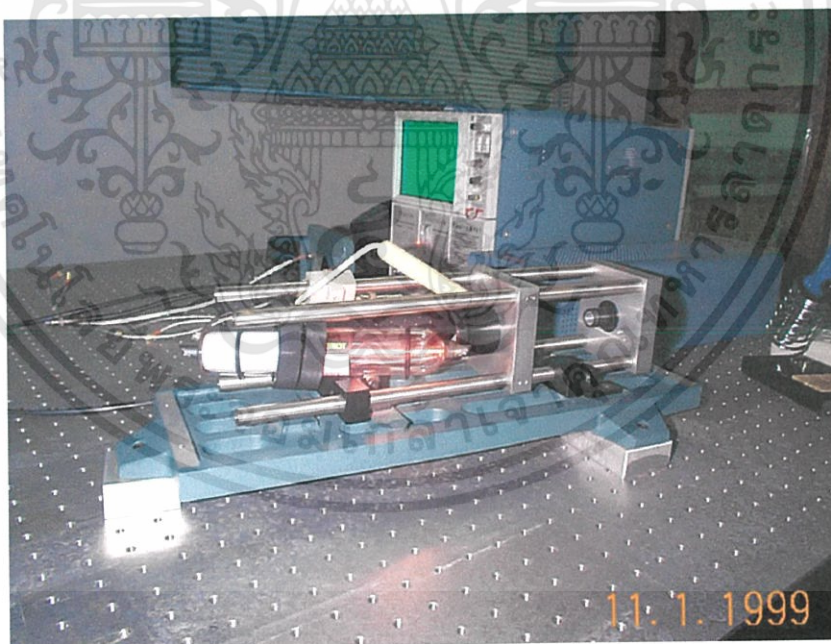


(ก)



(ข)

(ค)



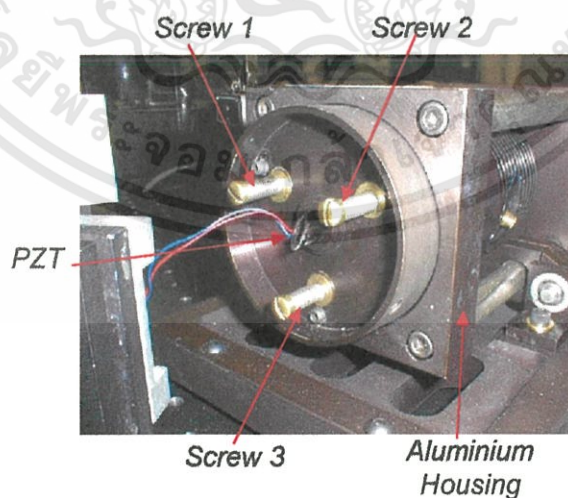
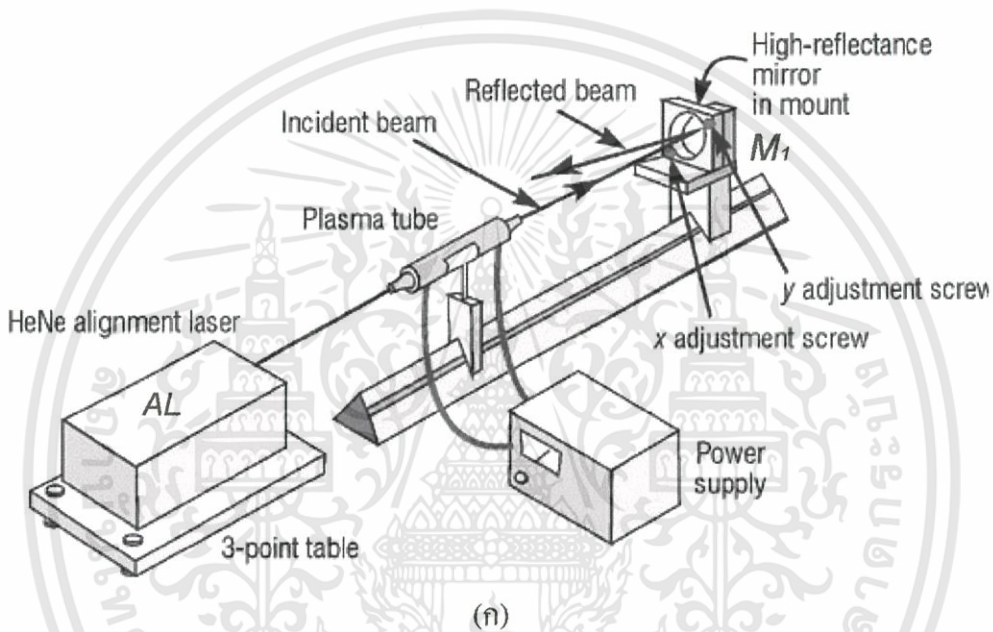
(ง)

**รูปที่ 3.6** การติดตั้งหลอดเลเซอร์เข้ากับระบบ โครงสร้างเชิงกล ก) วิธีการปรับตั้งหลอดเลเซอร์ให้อยู่ในแนวแกนของแสง ข) ลักษณะของลำแสงที่ผ่านหลอดเลเซอร์ได้อย่างสมบูรณ์ ค) ลักษณะของลำแสงที่ผ่านหลอดเลเซอร์ไม่สมบูรณ์ ง) ภาพถ่ายการติดตั้งหลอดเลเซอร์เข้ากับระบบ โครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การติดตั้งและปรับตั้งกระจก $M_1$

ติดตั้งกระจก  $M_1$  เข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลดังรูปที่ 3.7 ถ้าการติดกระจก  $M_1$  ตั้งฉากกับแนวแกนของแสงพอดิ ลำแสงที่สะท้อนกลับจากกระจก  $M_1$  จะต้องสะท้อนกลับในทิศทางเดิมสังเกตจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของลำแสงโดยการนำฉากที่เจาะรูเล็ก ๆ กันลำแสง ถ้าการติดกระจก  $M_1$  ไม่ตั้งฉากกับแนวแกนของแสง ลำแสงที่สะท้อนกลับก็จะไม่ผ่านเข้ารูเดิมที่ฉาก จะต้องทำการปรับระนาบของกระจก  $M_1$  ที่ตำแหน่งของสกรู (2) และ (3) สำหรับสกรู (1) ใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิง ดังรูปที่ 3.7(ข) จนกระทั่งลำแสงที่สะท้อนกลับจากกระจก  $M_1$  ผ่านเข้ารูเดิม



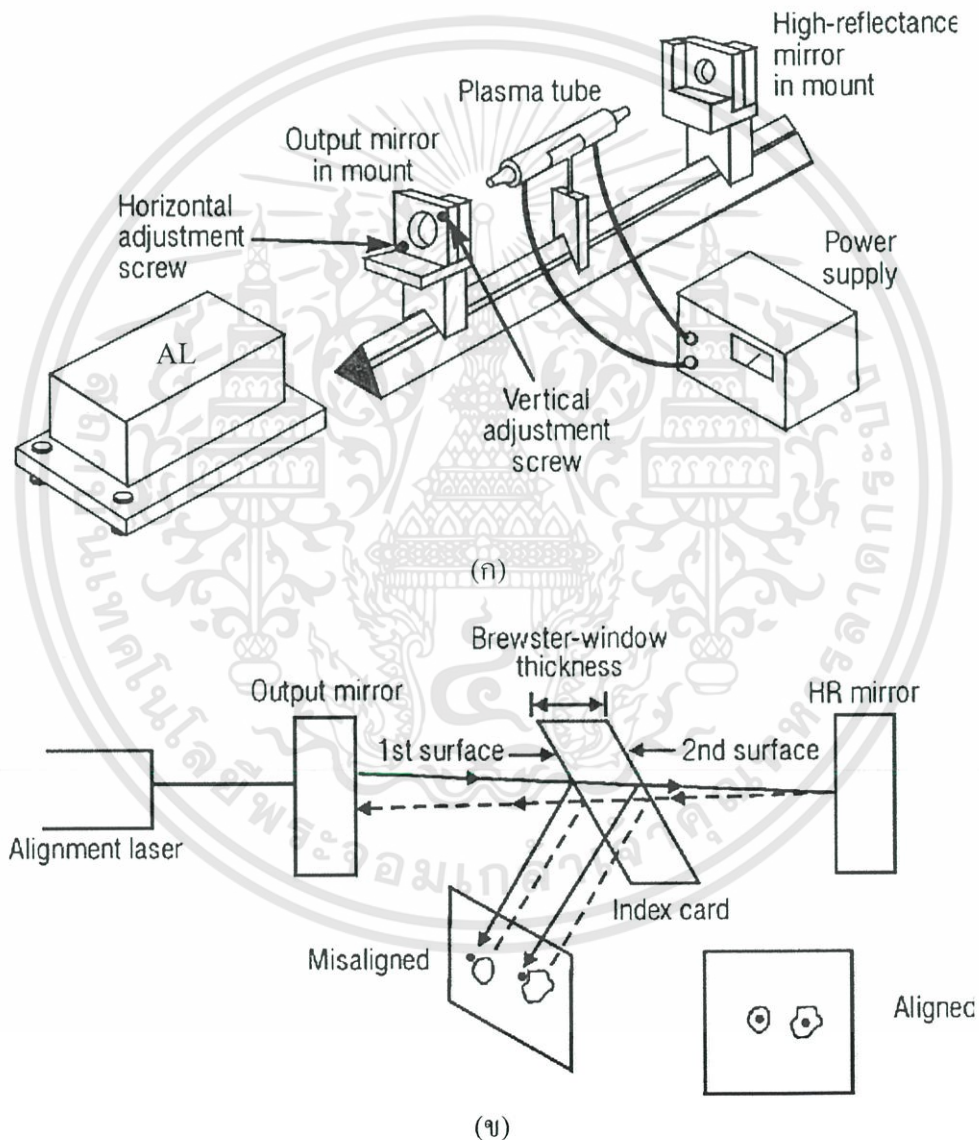
(ข)

รูปที่ 3.7 การติดตั้งกระจก  $M_1$  ก) การปรับตั้งกระจก  $M_1$  ข) ภาพถ่ายกระจก  $M_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

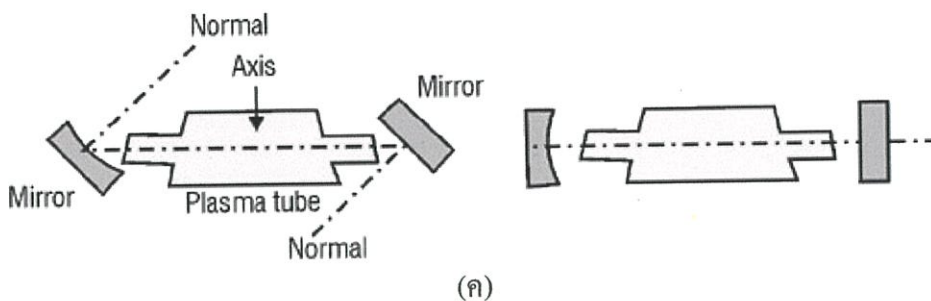
### 3.4.3 การติดตั้งและปรับตั้งกระจก $M_2$

ติดตั้งกระจก  $M_2$  เข้ากับระบบ โครงสร้างเชิงกลดังรูปที่ 3.8 ถ้าการติดตั้งกระจก  $M_2$  ตั้งฉากกับแนวแกนของแสงพอดี ลำแสงที่สะท้อนกลับจากกระจก  $M_2$  จะต้องสะท้อนกลับในทิศทางเดิม สังเกตจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนของลำแสงโดยการนำฉากที่เจาะรูเล็ก ๆ กันลำแสง ถ้าการติดตั้งกระจก  $M_2$  ไม่ตั้งฉากกับแนวแกนของแสง ลำแสงที่สะท้อนกลับก็จะไม่ผ่านเข้ารูเดิมที่ฉาก จะต้องทำการปรับระนาบของกระจก  $M_2$  ที่ตำแหน่งของสกรู (2) และ (3) สำหรับสกรู (1) ใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงดังรูปที่ 3.8(ข) จนกระทั่งลำแสงที่สะท้อนกลับจากกระจก  $M_2$  ผ่านเข้ารูเดิม

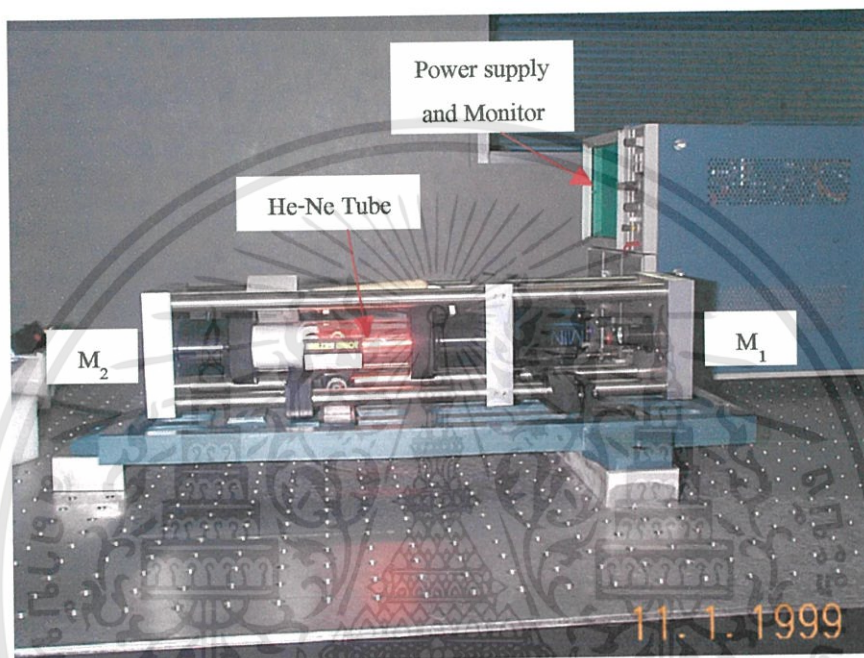


**รูปที่ 3.8** การติดตั้งและปรับตั้งกระจก  $M_2$  (ก) การติดตั้งและปรับระนาบของกระจก  $M_2$  (ข) การปรับตั้งกระจก  $M_2$  ไม่ตั้งฉากกับแนวแกนของแสง (ค) เปรียบเทียบการติดตั้งกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  ตั้งฉากกับแนวแกนของแสง (ง) ภาพถ่ายการติดตั้งกระจก  $M_1$  และ  $M_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

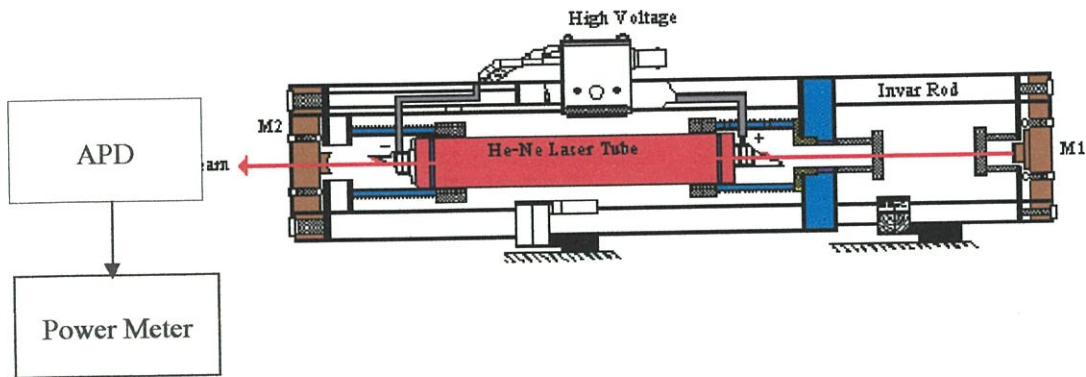
### รูปที่ 3.8 (ต่อ)

ถ้าหากการติดตั้งกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  สมบูรณ์ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับสารเลเซอร์ภายในหลอดเลเซอร์ จะเกิดแสงเลเซอร์ออกมาทางด้านกระจก  $M_2$  แต่ถ้าการติดตั้งกระจกทั้งสองไม่สมบูรณ์ก็อาจจะไม่เกิดแสงเลเซอร์ โดยจะต้องทำการปรับระนาบของกระจก  $M_2$  อีกครั้งหนึ่งเปรียบเสมือนเป็นการปรับละเอียด

#### 3.4.4 การตรวจสอบการปรับตั้งกระจกเลเซอร์

วิธีทดลองแสดงดังรูปที่ 3.9 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์สามารถวัดโดยให้แสงเลเซอร์ตกกระทบบนโฟโตดีเทคเตอร์ (Avalanche Photo Detector; APD) และอ่านค่าที่เครื่องวัดกำลัง (Power Meter) ผลการทดลองในบทที่ 4 ข้อ 4.1 ถ้าหากกำลังของแสงเลเซอร์ที่วัดได้น้อยกว่า 0.5 mW แสดงว่าการปรับตั้งหรือการทำความสะอาดระบบบออปติกไม่สมบูรณ์ ให้ทำตามขั้นตอน 3.3.1 ถึง 3.3.4 จนกระทั่งได้กำลังของแสงเลเซอร์ไม่น้อยกว่า 0.5 mW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



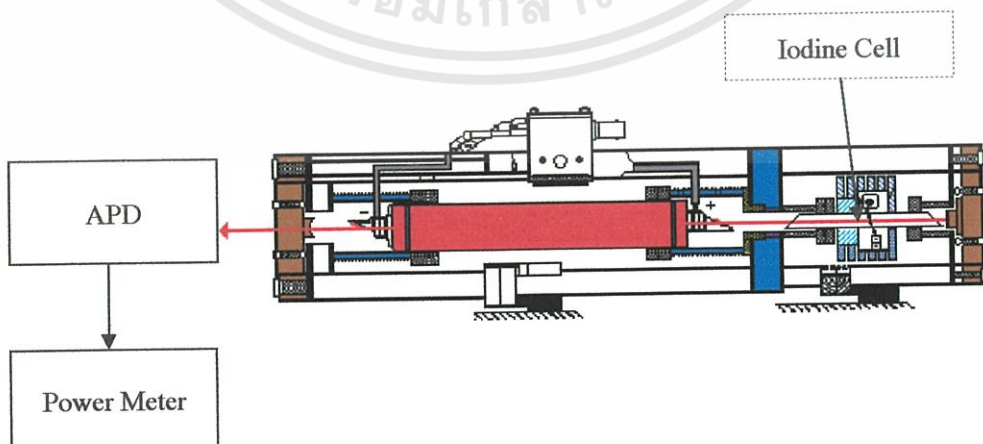
รูปที่ 3.9 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีไม่มีไอโอดีนเซลล์

### 3.4.5 การติดตั้งไอโอดีนเซลล์

การติดตั้งไอโอดีนเซลล์เข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลจะต้องอาศัยกรูทั้ง 4 ตัว ที่จับยึดแผ่นอลูมิเนียมออก แล้วติดตั้งไอโอดีนเซลล์ดังรูปที่ 3.10 ถ้าการติดตั้งสมบูรณ์เมื่อเปิดสวิตช์แล้วจะต้องมีแสงเลเซอร์ออกมา แต่ถ้าไม่มีแสงเลเซอร์ให้ทำการปรับระนาบกระจก  $M_2$  ตามข้อที่ 3.4.3 จนกระทั่งเกิดแสงเลเซอร์

### 3.4.6 การตรวจสอบความเสถียรของแสงเลเซอร์

วิธีการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 3.10 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์สามารถวัดได้โดยให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนโฟโตดีเทคเตอร์และอ่านค่าที่เครื่องวัดกำลัง ผลการทดลองในบทที่ 4 ข้อ 4.2 ถ้าการติดตั้งระบบอปติกสมบูรณ์ เมื่อวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีติดตั้งไอโอดีนเซลล์ไว้ในเลเซอร์ควาวิตี กำลังของแสงเลเซอร์ควรมีค่าประมาณไม่น้อยกว่า 0.05-0.1 mW แต่ถ้ากำลังของแสงเลเซอร์น้อยกว่า 0.05 mW ให้ทำตามข้อที่ 3.4.1-3.4.6 จนกระทั่งได้กำลังของแสงเลเซอร์ไม่น้อยกว่า 0.05 mW

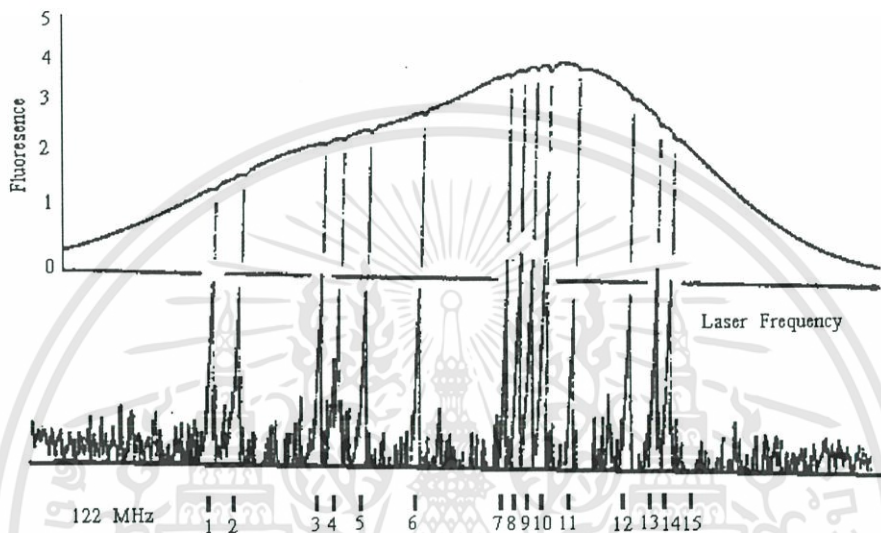


รูปที่ 3.10 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์เมื่อติดตั้งไอโอดีนเซลล์ไว้ในเลเซอร์ควาวิตี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การคัดเลือกความถี่ที่เสถียรด้วยไอโอดีน

การคัดเลือกความถี่ที่เสถียรสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการนำไอโอดีนเซลล์วางไว้ภายในเลเซอร์ควาวิตี โดยอะตอมของไอโอดีนทำหน้าที่เป็นสารดูดกลืนอิมตัววงที่กว่าสารดูดกลืนในหัวข้อที่ 2.6.2 สเปกตรัมของแสงฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่ถูกดูดกลืนอิมตัวด้วยไอโอดีนแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สเปกตรัมของแสงฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่ผ่านการดูดกลืนอิมตัวด้วยไอโอดีน

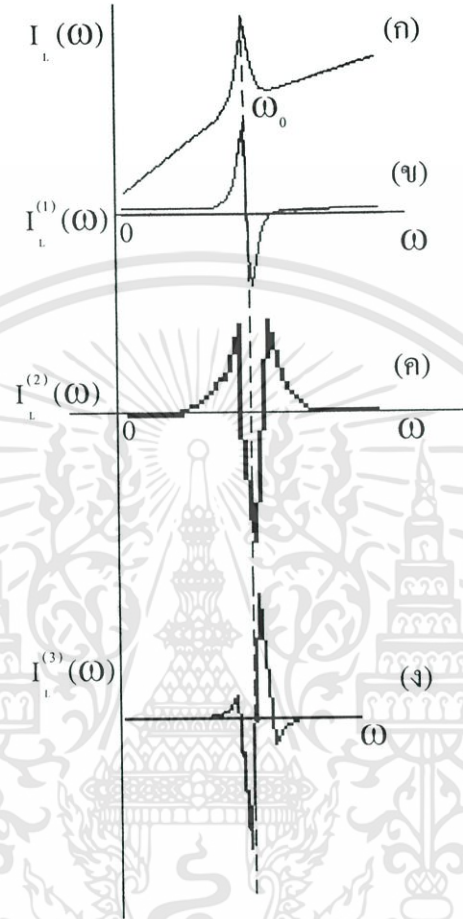
จากรูปที่ 3.11 บริเวณที่ถูกดูดกลืนอิมตัวจะเกิดเป็นหลุมลึก (แลมบ์ดิก) ตามระดับชั้นพลังงานของสารดูดกลืนอิมตัว (อะตอมไอโอดีน) เส้นของการดูดกลืนอิมตัวนี้กำหนดให้เป็น d e f g h i และ j ตามลำดับ

ถ้าความถี่ตรงกลาง  $\omega_0$  ของการดูดกลืนอิมตัวไม่ตรงกับความถี่  $\omega_l$  ของอัตราการขยาย  $G(\omega - \omega_l)$  ของสารเลเซอร์ เมื่อเกิดแลมบ์ดิกจากสารดูดกลืนอิมตัวที่วางไว้ภายในเลเซอร์ควาวิตี ความเข้มของเลเซอร์ที่ออกมาเป็น  $I_L(\omega)$  เป็นความเข้มแสงที่อยู่บนความชัน (Slope) ของอัตราการขยายสารเลเซอร์ดังรูปที่ 3.12 (ก) ยอดความเข้มแสงจากรูปที่ 3.12(ข) อาจมีการเลื่อนไหล ในทางปฏิบัติอาจจะแยกไม่ออกเนื่องจากความเข้มของการดูดกลืนอิมตัวกับความเข้มของอัตราการขยายมีค่าใกล้เคียงกัน อาจทำให้ลึกลับความถี่ของเลเซอร์ผิดตำแหน่ง นั่นคือความถี่ของเลเซอร์ในอนุพันธ์อันดับที่ 1 ไม่เสถียร

จากปัญหาดังกล่าวแก้ไขได้โดยการปรับระยะของเลเซอร์ควาวิตีด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับให้ตรงกับความถี่อนุพันธ์อันดับที่สูงขึ้นของการดูดกลืนอิมตัว ทำให้ความถี่ของอัตราการขยายลดต่ำลงมาอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์และเป็นจุดตัดกับอนุพันธ์  $dI_L/d\omega$  ค่าอนุพันธ์อันดับที่สูงขึ้นนี้พิจารณาได้จากการที่ความเข้ม  $I_L(\omega)$  เป็นฟังก์ชันของความถี่ซึ่งความเข้มแสงนี้เป็นความเข้มแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอัตราการขยาย  $G(\omega - \omega_1)$  ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสารเลเซอร์และจากการเกิดแลมเบิร์ตดิฟฟิที่สารดูดกลืนอิมิตัวที่วางไว้ภายในเลเซอร์ควาวิตีที่ความถี่  $\omega_0$  ความเข้มแสงของเลเซอร์สามารถเขียนได้ดังสมการ



รูปที่ 3.12 ความเข้มแสงที่ผ่านสารดูดกลืนอิมิตัว ก) ความเข้มแสงจากสารดูดกลืนอิมิตัววางอยู่บนความชันของแสงเลเซอร์ ข) อนุพันธ์อันดับที่ 1 ค) อนุพันธ์อันดับที่ 2 ง) อนุพันธ์อันดับที่ 3

$$I_L(\omega) \propto \left[ G(\omega - \omega_1) - \alpha_0(\omega) \left( 1 - \frac{\gamma S_0}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2} \right) \right] \quad (3.2)$$

เมื่อ  $G(\omega - \omega_1)$  คือ อัตราการขยายของแสงเลเซอร์

$\alpha_0(\omega)$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

$\gamma$  คือ ไลน์วิดเอกพันธุ์ (Homogeneous linewidth)

$S_0$  คือ พารามิเตอร์อิมิตัวที่ศูนย์กลางเส้น (Saturation parameter at the line center)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่รอบ ๆ อาจประมาณได้ว่าเกิดจากคอปเปอเรอร์โพรไฟล์ (Dopple Profile) ของอัตราการขยาย  $G(\omega - \omega_0)$  และ  $\alpha_0(\omega)$  จากสมการที่ (3.2) สามารถเขียนให้โดยใช้สมการพีชคณิตกำลังสอง (Quadratic function) เป็น

$$I_L(\omega) = A\omega^2 + B\omega + C + \frac{D}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $A$   $B$   $C$  และ  $D$  เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับ  $\omega_0$   $\omega_1$   $\gamma$  และ  $S$  เมื่ออนุพันธ์  $I_L^{(n)}(\omega) = [d^n I_L(\omega)/d\omega^n]$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3.3) ได้เป็น

$$\begin{aligned} I_L^{(1)}(\omega) &= 2A\omega + B - \frac{2D(\omega - \omega_0)}{[(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2]^2} \\ I_L^{(2)}(\omega) &= 2A + \frac{6D(\omega - \omega_0)^2 - D\gamma^2/2}{[(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2]^3} \\ I_L^{(3)}(\omega) &= \frac{4D\gamma^2(\omega - \omega_0)}{[(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2]^4} \end{aligned} \quad (3.4)$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์ความเข้มแสงโดยอนุพันธ์อันดับที่ 1 2 และ 3 พบว่าความชันของพื้นหลังลดต่ำลงดังรูปที่ 3.12(ข กง) โดยอนุพันธ์อันดับที่ 3 ค่าคงที่ต่าง ๆ จะหายไป นั่นคือความถี่อื่นรอบ ๆ ความถี่  $\omega_0$  จะหมดไปทำให้จุดตัด  $\omega_0$  อยู่บนแกนของความถี่ที่เสถียร (แกนศูนย์)

ถ้าผสมความถี่  $\Omega$  กับความถี่  $\omega_0$  ดังนั้นความเข้มของแสงที่ผสมความถี่แล้วเป็นตามสมการ

$$I_L(\omega) = I_L(\omega_0 + a \sin \Omega t) \quad (3.5)$$

เมื่อ  $a$  คือ แอมพลิจูดของความถี่ที่ผสม

$\Omega$  คือ ความถี่ที่ผสม

กระจายสมการ (3.5) ให้อยู่ในรูปของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series) จะได้

$$\begin{aligned} I_L(\omega) &= I_L(\omega_0) + a \sin \Omega t I_L^{(1)}(\omega_0) + \frac{a^2}{2} \sin^2 \Omega t I_L^{(2)}(\omega) \\ &+ \frac{a^3}{2} \sin^3 \Omega t I_L^{(3)}(\omega) + \dots \end{aligned} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนสมการที่ (3.6) ใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์ตรีโกณมิติจะได้

$$\begin{aligned}
 I_L(\omega) = & I_L(\omega_0) + \frac{a^2}{4} I_L^{(2)}(\omega_0) + \frac{a^4}{64} I_L^{(4)}(\omega_0) + \dots \\
 & + \left[ a I_L^{(1)}(\omega_0) + \frac{a^3}{8} I_L^{(3)}(\omega_0) + \dots \right] \sin \Omega t \\
 & + \left[ -\frac{a^2}{4} I_L^{(2)}(\omega_0) - \frac{a^4}{48} I_L^{(4)}(\omega_0) + \dots \right] \sin 2\Omega t \\
 & + \left[ -\frac{a^3}{24} I_L^{(3)}(\omega_0) - \frac{a^5}{384} I_L^{(5)}(\omega_0) + \dots \right] \sin 3\Omega t
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

จากสมการที่ (3.7) เลขยกกำลังในเครื่องหมายปีกกาคือฮาร์โมนิก (Harmonic) อันดับต่าง ๆ ที่ได้จากการผสมความถี่  $\Omega$  สัญญาณความถี่ที่  $3\Omega$  เป็นค่าเฉพาะของอนุพันธ์อันดับที่ 3 ( $I_L^{(3)}(\omega_0)$ ) เนื่องจากแอมพลิจูดที่ใช้ในการผสมความถี่  $\Omega$  มีค่าน้อย ดังนั้นแอมพลิจูด  $a$  เมื่อยกกำลังสูงขึ้นจึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก ความเข้มแสงอนุพันธ์อันดับที่ 1 2 และ 3 ดังรูปที่ 3.13 วิธีการควบคุมให้ความถี่ของเลเซอร์ที่ผ่านการคูกกลืนอิมพัลส์ด้วยไอโอดีนปล่อยความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 กระจายละเอียดในหัวข้อ 3.6

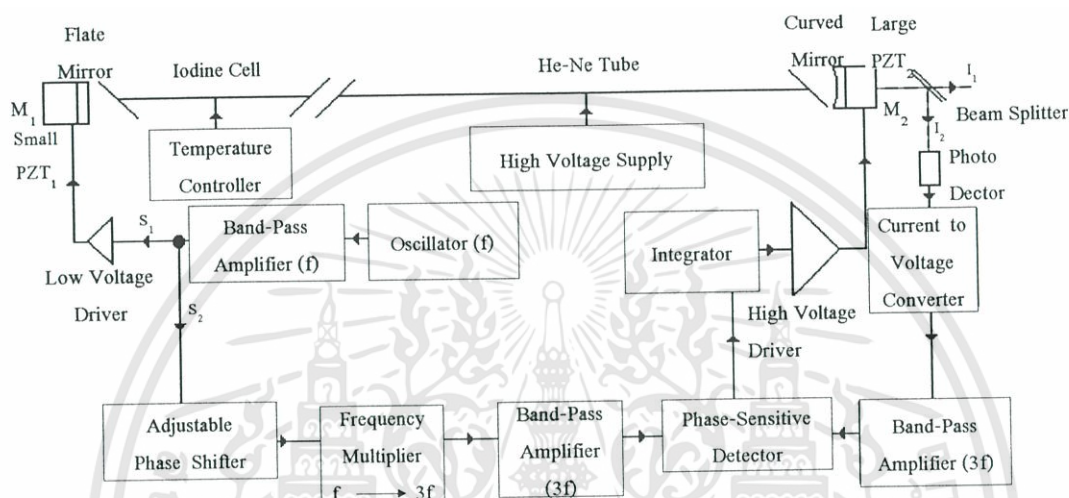


**รูปที่ 3.13** ความเข้มแสงเลเซอร์ที่ผ่านการคูกกลืนอิมพัลส์ (ก) ความเข้มแสงอนุพันธ์อันดับที่ 1 (ข) ความเข้มแสงอนุพันธ์อันดับที่ 2 (ค) ความเข้มแสงอนุพันธ์อันดับที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

เมื่อทำให้ระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์ปล่อยแสงเลเซอร์และมีความเสถียรเป็นไปตามสมบัติเฉพาะดังตารางที่ 3.2 แล้ว ขั้นตอนนี้เป็นการทำงานให้แสงเลเซอร์มีความเสถียรเพิ่มขึ้น โดยการชดเชยความแปรปรวนของระยะห่างระหว่างกระจก (L) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระบบโครงสร้าง เนื่องจากอุณหภูมิ การชดเชยนี้สามารถทำได้โดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

จากรูปที่ 3.14 ถ้าแสงเลเซอร์ที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยผลึกแยกลำแสง (Beam Splitter) ลำแสงส่วนที่หนึ่งจะถูกตรวจจับด้วยโฟโตดีเทคเตอร์ส่งผ่านไปยังชุดแปลงกระแสให้เป็นแรงดัน (Current to Voltage Converter) แล้วส่งผ่านไปยังวงจรถ่าย (Band-Pass Amplifier; 3f) ซึ่งจะทำให้เป็นความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 (Third Harmonic) ส่งผ่านไปยังวงจรถ่ายเฟสเซ็นซิทีฟดีเทคเตอร์ (Phase-Sensitive Detector; PSD) เพื่อทำการเปรียบเทียบกับเฟสที่สร้างขึ้นจากชุดออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) ภายใน จากนั้นจะส่งความถี่นี้ไปยังวงจรถ่าย (f) โดยแบ่งสัญญาณออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนทำหน้าที่ดังนี้ สัญญาณส่วนที่หนึ่ง ( $S_1$ ) ส่งสัญญาณไปยังชุดขับแรงดันต่ำ (Low Voltage Driver) เพื่อไปขับชุด PZT<sub>1</sub> สำหรับการผสมความถี่ขณะทำการสอบเทียบ สัญญาณส่วนที่สอง ( $S_2$ ) ส่งสัญญาณไปยังชุดปรับเฟส (Adjustable Phases Shift) แล้วส่งผ่านไปยังชุดขยายความถี่ (Frequency Multiplier;  $f \Rightarrow 3f$ ) เพื่อทำให้เป็นความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 ความถี่ที่ได้ส่งผ่านไปยังวงจรถ่าย 3f เพื่อให้เหลือเฉพาะความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 เท่านั้น แล้วส่งผ่านไปยังวงจรถ่าย PSD เพื่อเปรียบเทียบกับเฟส ผลที่ได้ส่งต่อไปยังวงจรถ่ายเบ็ดเสร็จ (Integrator) แล้วส่งต่อไปยังวงจรถ่ายแรงดันสูง (High Voltage Driver) เพื่อที่จะไปขับชุด PZT<sub>2</sub> ให้ปรับกระจก M<sub>2</sub> ขับไปยังตำแหน่งของเฟสที่ต้องการชดเชยในตอนต้น ทำให้ระยะห่างระหว่างกระจก L คงที่ตลอดเวลา ส่งผลให้ความถี่ของเลเซอร์ที่ออกมามีค่าคงที่ตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 ความถี่บีต

ความถี่บีตคือผลต่างระหว่างความถี่ 2 ความถี่ ณ ตำแหน่งใด ๆ กำหนดให้ความถี่ของแสงเลเซอร์มาตรฐานมีค่าตามสมการ (3.8) และความถี่ของแสงเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบมีค่าตามสมการ (3.9)

$$y_1 = A \cos \omega_1 t = A \cos 2\pi V_1 t \quad (3.8)$$

$$y_2 = A \cos \omega_2 t = A \cos 2\pi V_2 t \quad (3.9)$$

เมื่อ  $A$  คือ แอมพลิจูดของเลเซอร์มาตรฐานและ เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบตามลำดับ  $V_1, V_2$  คือ ความถี่ของเลเซอร์มาตรฐานและ เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบตามลำดับ  $\omega_1, \omega_2$  คือ ความถี่เชิงมุมของเลเซอร์มาตรฐานและ เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบตามลำดับ

เมื่อความถี่ของแสงเลเซอร์ทั้งสองมารวมกันจะได้

$$Y = y_1 + y_2 = A(\cos 2\pi V_1 t + \cos 2\pi V_2 t) \quad (3.10)$$

จากเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ

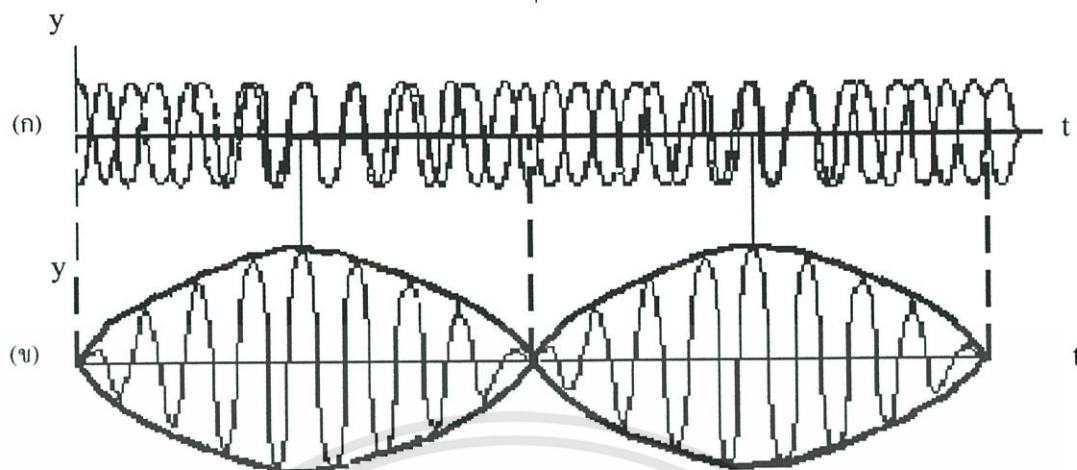
$$\cos a + \cos b = 2 \cos \left( \frac{a-b}{2} \right) \cos \left( \frac{a+b}{2} \right) \quad (3.11)$$

ฉะนั้นสมการที่ (3.9) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$Y = \left[ 2A \cos 2\pi \left( \frac{V_1 - V_2}{2} \right) t \right] \cos 2\pi \left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right) t \quad (3.12)$$

ตัวประกอบในสมการที่ (3.12) พบว่าความถี่ยังผลเท่ากับความถี่เฉลี่ย  $\left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right)$  และแอมพลิจูดในเครื่องหมายปีกกาสี่เหลี่ยมแปรผันกับเวลา ความถี่บีตแสดงดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ความถี่บีต

จากสมการที่ 3.12 พบว่าแอมพลิจูดมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยค่าแอมพลิจูดสูงสุดจะปรากฏเมื่อ

$$\cos 2\pi \frac{v_1 - v_2}{2} t = \pm 1 \quad (3.13)$$

หมายความว่า จะมีค่าแอมพลิจูดสูงสุด 2 ครั้งใน 1 คาบของคลื่นรวม เนื่องจากแอมพลิจูดมีการเปลี่ยนแปลงด้วยความถี่  $\frac{v_1 - v_2}{2}$  ดังนั้นจำนวนของบีตต่อวินาทีหรือความถี่บีตคือ

$$v_b = |v_1 - v_2| \quad (3.14)$$

เนื่องจากโฟโตดีเทคเตอร์ไม่สามารถตอบสนองความถี่ของสนามไฟฟ้าของแสงได้เนื่องจากมีความถี่สูงมาก สิ่งที่สามารถวัดได้โดยโฟโตดีเทคเตอร์คือความถี่บีต ดังนั้นถ้าทราบความถี่ของคลื่นใดคลื่นหนึ่งก็นำมาบีตกันก็จะทราบความถี่ของอีกคลื่นหนึ่งได้

### 3.8 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด

ในการแสดงผลของการวัดหรือผลของการสอบเทียบจะสมบูรณ์ไม่ได้ถ้าไม่รวมเอาค่าความไม่แน่นอนของการวัดมาประเมินไว้ด้วย ความไม่แน่นอนของการวัดเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงการกระจายของค่าของการวัดอย่างสมเหตุสมผล ที่บ่งบอกถึงค่าพิสัยของค่าของการวัดว่าสิ่งที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกวัดอยู่ภายในค่าที่ประเมินนี้ด้วยระดับความเชื่อมั่นที่บอกไว้ จากรูปแบบดั้งเดิมองค์ประกอบของความไม่แน่นอนจะเป็นแบบสุ่ม (Random) หรือแบบระบบ (Systematic) เป็นข้อดีที่มีเฉพาะเจาะจงไปในขบวนการวัดที่บ่งบอกภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ในกระบวนการของการวัดค่าความไม่แน่นอนที่มาจากห้องปฏิบัติการสอบเทียบจะมีทั้งแบบสุ่มและแบบระบบ ตามธรรมชาติแล้วความไม่แน่นอนมีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีข้อกำหนดให้มีการแบ่งจำพวกของความไม่แน่นอนออกเป็น 2 ชนิดเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา

### 3.8.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด A

การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด A มีปัจจัยความไม่แน่นอนที่สามารถประเมินได้โดยวิธีการทางสถิติ เมื่อมีปริมาณอินพุต  $x_i$  ที่ได้จากการสังเกตหรือการวัดจำนวน  $n$  ครั้ง ภายใต้การวัดที่สภาวะแวดล้อมเดียวกัน คำนวณหาค่าเฉลี่ยของการวัดจะเป็นดังสมการ

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.15)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \text{ค่าเฉลี่ยจากการวัด } n \text{ ครั้ง} \\ X_i &= \text{ค่าของผลการวัดครั้งที่ } i \\ n &= \text{จำนวนครั้งของการวัด} \end{aligned}$$

### 3.8.2 ความแปรปรวน Allan (Allan variance)

ปัญหาความไวของการวัดของระบบและความแปรปรวนของค่าที่ปรากฏในสนามของการวัดอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ในการทดสอบระบบใด ๆ เมื่อระยะห่างระหว่างตำแหน่งมีผลกระทบต่อการทำซ้ำ ณ ตำแหน่งอื่น ๆ นั่นคือการวัดคุณภาพของระบบ พิจารณาเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงโดยการเคลื่อนไปของความถี่ การคำนวณค่าความแปรปรวน Allan คำนวณได้ตามสมการ

$$s_{\text{Allan}}^2 = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (v_i - v_{i+1})^2 \quad (3.16)$$

เมื่อ  $v_i$  = ความถี่ที่วัดได้ครั้งที่  $i$

$N$  = จำนวนครั้งของการวัด

ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน Allan (Allan Standard Deviation;  $s_{\text{Allan}}$ ) สามารถคำนวณได้

ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{Allan} = \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (v_i - v_{i+1})^2} \quad (3.17)$$

สามารถคำนวณค่าความไม่แน่นอนชนิด A ได้ตามสมการ

$$U_A = \frac{S_{Allan}}{\sqrt{n}} \quad (3.18)$$

### 3.8.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด B

การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด B ปัจจัยความไม่แน่นอนทั้งหลายที่สามารถประเมินได้โดยวิธีอื่น ๆ โดยทั่วไปมักจะเป็นความไม่แน่นอนที่ทราบค่าในลักษณะของ การแจกแจงในครั้งก่อน ประสบการณ์ ความรู้ในพฤติกรรมและสมบัติของวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ ข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต ข้อมูลในการรับรองการสอบเทียบ ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง หรือหนังสือคู่มือ (Handbook) เป็นต้น จากการทดลองพบว่าสาเหตุของค่าความไม่แน่นอนของการวัดมีดังนี้

- 1 ความไม่แน่นอนจากเลเซอร์มาตรฐาน
- 2 ความไม่แน่นอนจากเครื่องนับความถี่
- 3 ความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องนับความถี่

#### 3.8.3.1 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากเลเซอร์มาตรฐาน ( $U_{B1}$ )

ค่าความไม่แน่นอนของเลเซอร์มาตรฐานพิจารณาจากข้อกำหนดเฉพาะของบริษัทผู้ผลิต โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของลักษณะการกระจายของความคลาดเคลื่อนเป็นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนชนิด B ( $U_{B1}$ ) คำนวณได้ดังสมการ

$$U_{B1} = \frac{\text{Accuracy}}{\sqrt{3}} \quad (3.19)$$

#### 3.8.3.2 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากเครื่องนับความถี่ ( $U_{B2}$ )

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากเครื่องนับ ( $U_{B2}$ ) พิจารณาจากข้อกำหนดเฉพาะตามคู่มือของเครื่องนับความถี่ โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของลักษณะการกระจายของความคลาดเคลื่อนเป็นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนชนิด B ( $U_{B2}$ ) คำนวณได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_{B2} = \frac{\text{Accuracy}}{\sqrt{3}} \quad (3.20)$$

### 3.8.3.3 ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องนับความถี่ ( $U_{B3}$ )

ในการวัดความถี่ปีตอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเลขนัยสำคัญของความละเอียดที่หลักสุดท้ายของเครื่องนับความถี่ โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของลักษณะการกระจายของความคลาดเคลื่อนเป็นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนชนิด B ( $U_{B3}$ ) คำนวณได้ดังสมการ

$$U_{B3} = \frac{\text{Resolution of Counter}}{2\sqrt{3}} \quad (3.21)$$

### 3.8.4 ค่าความไม่แน่นอนรวม (Combine Uncertainty; $U_C$ )

ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม  $U_C$  ของผลการวัด ใช้แสดงความเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยประมาณของผลการวัดค่านี้ได้จากการรวมค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานแต่ละตัวไม่ว่าจะเกิดจากการประเมินชนิดค่าความไม่แน่นอนชนิด A และชนิด B ใช้กฎการกระจายความไม่แน่นอน (Low of propagation of uncertainty) ดังสมการ

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_{B3}^2} \quad (3.22)$$

เรียกการรวมค่าความไม่แน่นอนจากสมการ (3.21) ว่าเป็นวิธีการที่สองของผลบวกยกกำลังสอง (Root-sum-of-square)

### 3.8.5 การคำนวณหาค่าตัวประกอบ $k_p$

ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนตามวิธีการของ EAL-04/2 สามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบ  $k_p$  (Coverage factor;  $k_p$ ) สามารถคำนวณโดยใช้สมการ Welch-Satterwaite

$$v_{\text{eff}} = \frac{U_C^4}{\sum_{i=1}^n \frac{U_i^4}{v_i}} = \frac{U_C^4}{\frac{U_A^4}{n-1} + \frac{U_{B1}^4}{\infty} + \frac{U_{B2}^4}{\infty} + \frac{U_{B3}^4}{\infty} + \dots + \frac{U_{B...}^4}{\infty}} \quad (3.23)$$

นำค่า  $v_{\text{eff}}$  ที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่า  $v_{\text{eff}}$  จากตารางที่ 3.4 จะได้ค่า  $k_p$  ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 องศาความเป็นอิสระยังผล (Effective degree of freedom)

$V_{\text{eff}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
$k_p$	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.23	2.20	2.17

$V_{\text{eff}}$	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	$\infty$
$k_p$	2.15	2.13	2.11	2.09	2.07	2.06	2.06	2.05	2.04	2.03	2.02	2.00

### 3.8.6 ค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty)

ถึงแม้ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม  $U_c$  จะถูกนำไปใช้ในการแสดงผลของการวัดอย่างกว้างขวางแต่มีอยู่บ่อยครั้งที่ผู้ใช้มีความต้องการช่วงของความเชื่อมั่นแตกต่างไปจากความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม  $U_c$  แสดงดังสมการ

$$U_{(\text{Exp})} = k_p \times U_c \quad (3.24)$$

เมื่อ  $U_{(\text{exp})}$  คือ ค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

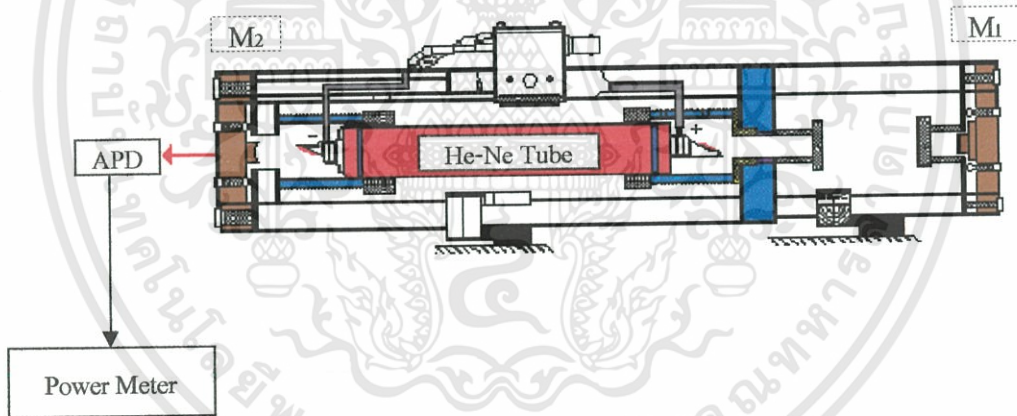
## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 การทดสอบความเสถียรของระบบโครงสร้างเชิงกลของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ กรณีที่ไม่มีไอโอดีนเซลล์

##### 4.1.1 วิธีการทดลอง

การติดตั้งหลอดเลเซอร์ กระจก  $M_1$  และ  $M_2$  เข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลดังรูปที่ 4.1 และปรับตั้งจนกระทั่งเกิดแสงเลเซอร์ การตรวจวัดกำลังของแสงเลเซอร์ทำได้โดยให้แสงเลเซอร์ตกกระทบบนโฟโตดีเทคเตอร์ (APD) และอ่านค่าด้วยเครื่องวัดกำลัง (Power Meter) จากนั้นให้ทำการปรับกระจก  $M_2$  ด้วยสกรูหมายเลข 2 หรือ 3 (ดูรูปที่ 3.7ข) จนกระทั่งได้กำลังของแสงเลเซอร์สูงสุด ปิดเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงเปิดเครื่องบันทึกผลลงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีไม่มีไอโอดีนเซลล์

##### 4.1.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีไม่มีไอโอดีนเซลล์

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าที่อ่านได้ ( $\mu\text{W}$ )			$\bar{X}$ $\mu\text{W}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	994.0	994.4	994.2	994.2
2	994.2	994.3	994.5	994.3
3	994.7	994.5	994.1	994.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

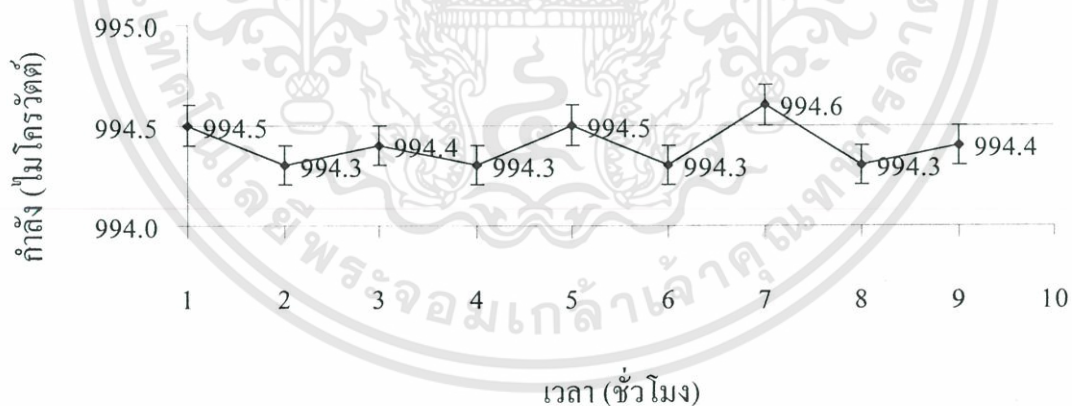
ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าที่อ่านได้ ( $\mu\text{W}$ )			$\bar{X}$ $\mu\text{W}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
4	994.3	994.6	993.9	994.3
5	994.6	994.6	994.2	994.5
6	994.3	994.5	994.2	994.3
7	994.6	994.7	994.5	994.6
8	994.3	994.1	994.5	994.3
9	994.6	994.4	994.2	994.4

#### 4.1.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

นำค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) จากตารางที่ 4.1 มาเขียนกราฟ กำหนดให้แกน x เป็นแกนของเวลา และแกน y เป็นแกนของกำลังของเลเซอร์จะได้

การทดสอบความเสถียรของระบบ โครงสร้างเชิงกลกรณีไม่มีไอโอดีนเซลล์



#### รูปที่ 4.2 ความเสถียรของระบบ โครงสร้างเชิงกลกรณีไม่มีไอโอดีนเซลล์

สรุปผลการทดลอง จากรูปที่ 4.2 พบว่ากำลังเฉลี่ยของแสงเลเซอร์มีค่าอยู่ในช่วง 994.2  $\mu\text{W}$  ถึง 994.8  $\mu\text{W}$  ในชั่วโมงที่ 7 กำลังของแสงเลเซอร์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 994.6  $\mu\text{W}$  และกำลังเฉลี่ยของแสงเลเซอร์ในชั่วโมงที่ 2 4 6 8 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 994.3  $\mu\text{W}$  ผลต่างของกำลังเฉลี่ยของแสงเลเซอร์ตลอดระยะเวลา 9 ชั่วโมงเท่ากับ 0.3  $\mu\text{W}$  เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง (ค่า

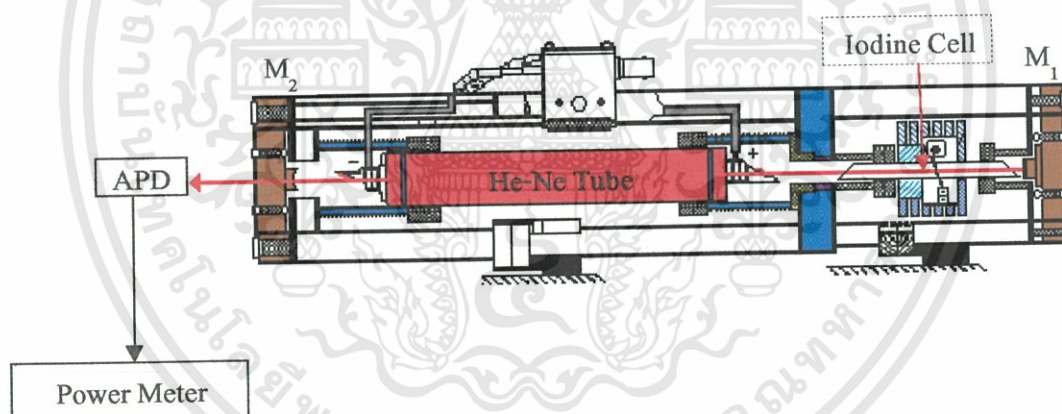
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากที่สุด) 994.7  $\mu\text{W}$  กับค่าที่กำหนดให้จากบริษัทผู้ผลิตจากตารางที่ 3.2 (0.5-1 mW) พบว่ากำลังของแสงเลเซอร์มีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนด แสดงว่าการติดตั้งและการปรับตั้งระบบอปติกเข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลสมบูรณ์และสามารถที่จะนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไปได้

## 4.2 การทดสอบความเสถียรของระบบโครงสร้างเชิงกลของฮีเลียมนีออนเลเซอร์กรณีมีไอโอดีนเซลล์

### 4.2.1 วิธีการทดลอง

ติดตั้งไอโอดีนเซลล์เข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลดังรูปที่ 4.3 และปรับตั้งจนกระทั่งเกิดแสงเลเซอร์ การตรวจวัดกำลังของแสงเลเซอร์ทำได้โดยให้แสงเลเซอร์ตกกระทบบนโฟโตดีเทคเตอร์ (APD) และอ่านค่าด้วยเครื่องวัดกำลัง (Power Meter) จากนั้นให้ทำการปรับกระจก  $M_2$  ด้วยสกรูหมายเลข 2 หรือ 3 (ดูรูปที่ 3.7ข) จนกระทั่งได้กำลังของแสงเลเซอร์สูงสุด ปิดเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงเปิดเครื่องบันทึกผลลงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 การวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีที่มีไอโอดีนเซลล์

### 4.2.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการวัดกำลังของแสงเลเซอร์กรณีมีไอโอดีนเซลล์

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าที่อ่านได้ ( $\mu\text{W}$ )			$\bar{X}$ $\mu\text{W}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	70.6	70.4	70.2	70.4
2	69.8	69.9	69.6	69.8
3	70.8	70.6	70.4	70.6

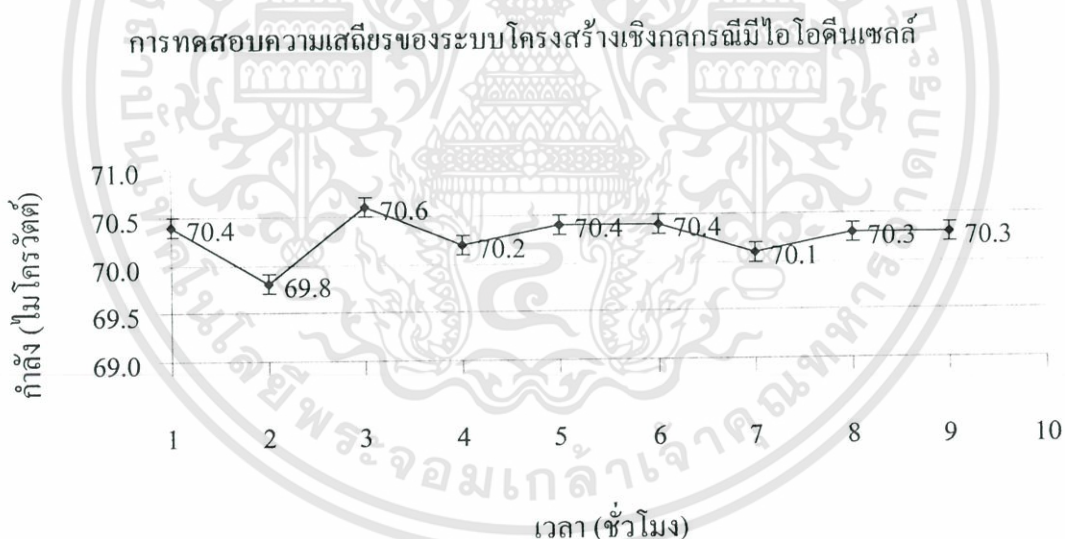
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าที่อ่านได้ ( $\mu\text{W}$ )			$\bar{X}$ $\mu\text{W}$
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
4	70.1	70.2	70.4	70.2
5	70.5	70.2	70.5	70.4
6	70.6	70.2	70.3	70.4
7	70.0	70.3	69.9	70.1
8	70.4	70.2	70.3	70.3
9	70.4	70.1	70.5	70.3

#### 4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

นำค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) จากตารางที่ 4.2 มาเขียนกราฟ กำหนดให้แกน x เป็นแกนของเวลา และแกน y เป็นแกนของกำลังของเลเซอร์จะได้



รูปที่ 4.4 ความเสถียรของแสงเลเซอร์กรณีมีไอโอดีนเซลล์

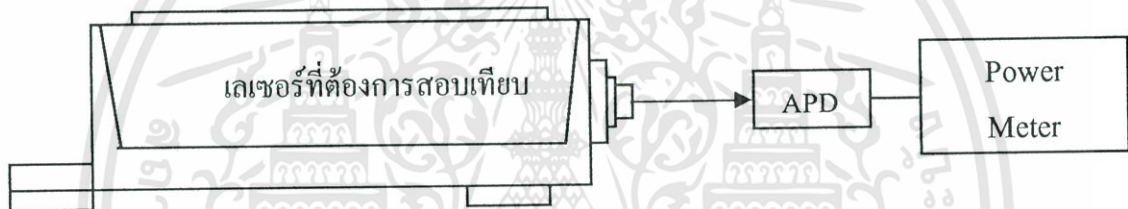
สรุปผลการทดลอง จากรูปที่ 4.4 พบว่ากำลังเฉลี่ยของแสงเลเซอร์มีค่าอยู่ในช่วง 69.8  $\mu\text{W}$  ถึง 70.6  $\mu\text{W}$  ในชั่วโมงที่ 3 มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 70.6  $\mu\text{W}$  และกำลังเฉลี่ยของแสงเลเซอร์ในชั่วโมงที่ 2 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 69.8  $\mu\text{W}$  ผลต่างของกำลังของแสงเลเซอร์ตลอดระยะเวลา 9 ชั่วโมงเท่ากับ 0.8  $\mu\text{W}$  เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง (ค่ามากที่สุด) 70.8  $\mu\text{W}$  กับค่าที่กำหนดให้จากบริษัทผู้ผลิตจากตารางที่ 3.2 (0.05-0.1 mW) พบว่ากำลังของแสงเลเซอร์มีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนด แสดงว่าเลเซอร์นี้สามารถที่จะนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไปได้ และตลอดระยะเวลา 9 ชั่วโมง กำลังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลี่ยของแสงเลเซอร์มีความแตกต่างกันระหว่างค่ามากที่สุดกับค่าน้อยที่สุดเท่ากับ  $0.8 \mu\text{W}$  อาจกล่าวได้ว่าระบบโครงสร้างเชิงกลนี้เริ่มเข้าสู่ภาวะเสถียรภาพหลังจากเปิดเลเซอร์ประมาณ 1 ชั่วโมง แสดงว่าการติดตั้งระบบออปติกเข้ากับระบบโครงสร้างเชิงกลได้สมบูรณ์

### 4.3 การทดสอบความเสถียรของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

#### 4.3.1 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 การตรวจวัดกำลังของแสงเลเซอร์ทำได้โดยใช้แสงเลเซอร์ตกกระทบบนโฟโตดีเทคเตอร์ (APD) และอ่านค่าด้วยเครื่องวัดกำลัง (Power Meter) จะต้องปรับตั้งโฟโตดีเทคเตอร์จนกระทั่ง เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบอ่านค่าได้สูงสุด ปิดเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงเปิดเครื่องบันทึกผลลงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.5 การวัดกำลังของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

#### 4.3.2 ผลการทดลอง

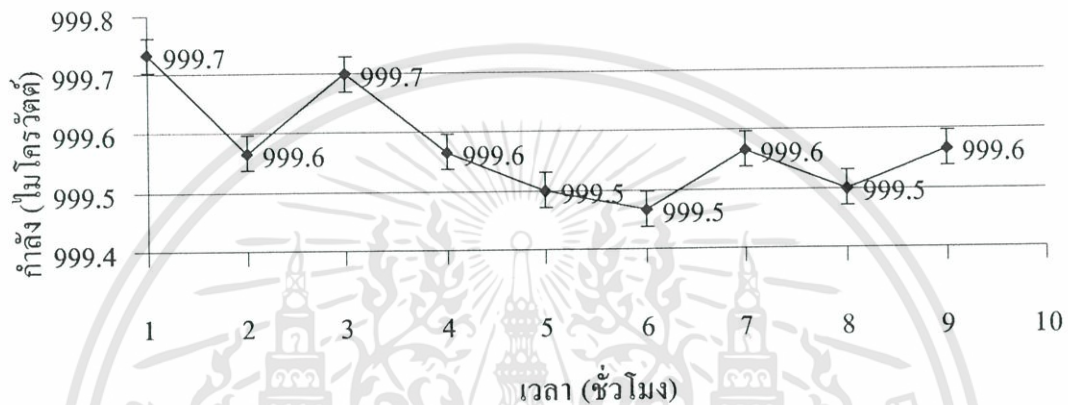
ตารางที่ 4.3 บันทึกผลการวัดกำลังของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าที่อ่านได้ ( $\mu\text{W}$ )			$\bar{X}$ ( $\mu\text{W}$ )
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	999.8	999.6	999.8	999.73
2	999.6	999.7	999.4	999.57
3	999.5	999.9	999.7	999.70
4	999.6	999.7	999.4	999.57
5	999.8	999.4	999.3	999.50
6	999.7	999.4	999.3	999.47
7	999.7	999.6	999.4	999.57
8	999.8	999.3	999.4	999.50
9	999.4	999.6	999.7	999.57

### 4.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

นำค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) จากตารางที่ 4.3 มาเขียนกราฟ กำหนดให้แกน x เป็นแกนของเวลา และแกน y เป็นแกนของกำลังของเลเซอร์จะได้

การทดสอบความเสถียรของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ



รูปที่ 4.6 ความเสถียรของแสง เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

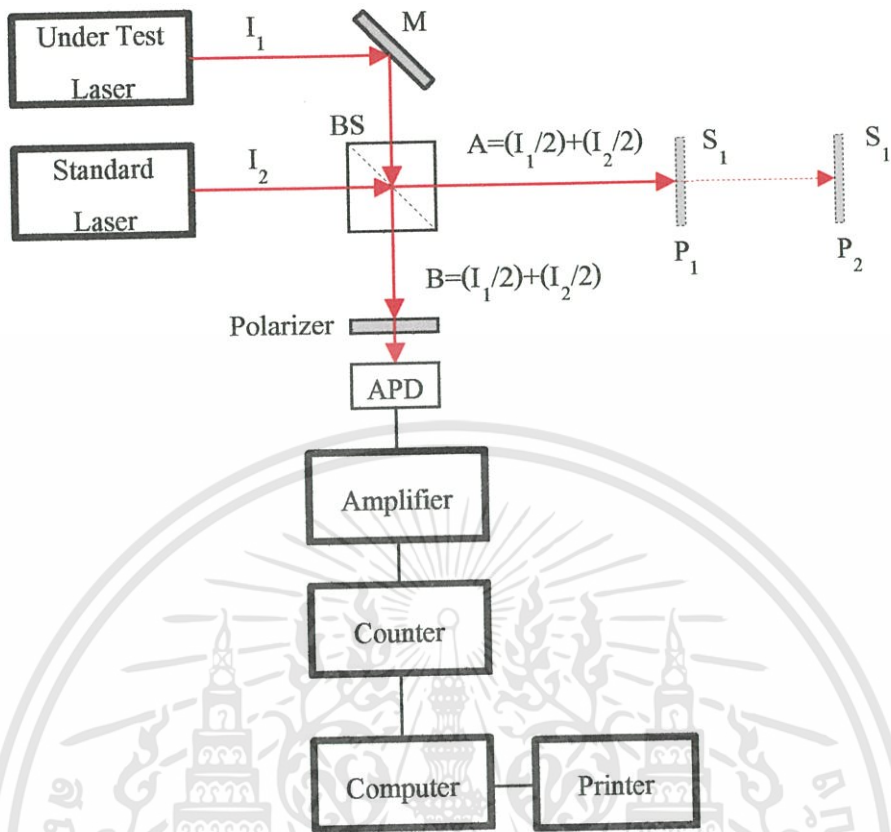
สรุปผลการทดลอง จากรูปที่ 4.6 พบว่ากำลังเฉลี่ยของแสงเลเซอร์มีค่าอยู่ในช่วง 999.5  $\mu\text{W}$  ถึง 999.7  $\mu\text{W}$  ในชั่วโมงที่ 1 กำลังเฉลี่ยของแสงเลเซอร์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 999.7  $\mu\text{W}$  และกำลังเฉลี่ยของแสงเลเซอร์ในชั่วโมงที่ 6 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 999.5  $\mu\text{W}$  ผลต่างของกำลังของแสงเลเซอร์ตลอดระยะเวลา 9 ชั่วโมงเท่ากับ 0.2  $\mu\text{W}$  เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง (ค่ามากที่สุด) 999.9  $\mu\text{W}$  กับค่าที่กำหนดให้จากบริษัทผู้ผลิตเท่ากับ 1 mW พบว่ากำลังของแสงเลเซอร์มีค่าอยู่ในพิสัยที่กำหนด นั่นคือเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเริ่มเข้าสู่สภาวะของการมีเสถียรภาพหลังจากเปิดเลเซอร์ไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง และสามารถใช้เวลาเลเซอร์นี้ติดต่อกันเป็นเวลานานได้

## 4.4 การสอบเทียบความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

### 4.4.1 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยจัดให้ระนาบของลำแสงของเลเซอร์มาตรฐาน และเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (Under Test Laser; UTL) มารวมกันที่ผลึกแยกลำแสง (BS) โดยผลึกแยกลำแสงจะทำหน้าที่แบ่งลำแสงออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน กำหนดให้ลำแสงส่วนที่ 1 เป็น A และลำแสงส่วนที่ 2 เป็น B ตามลำดับ

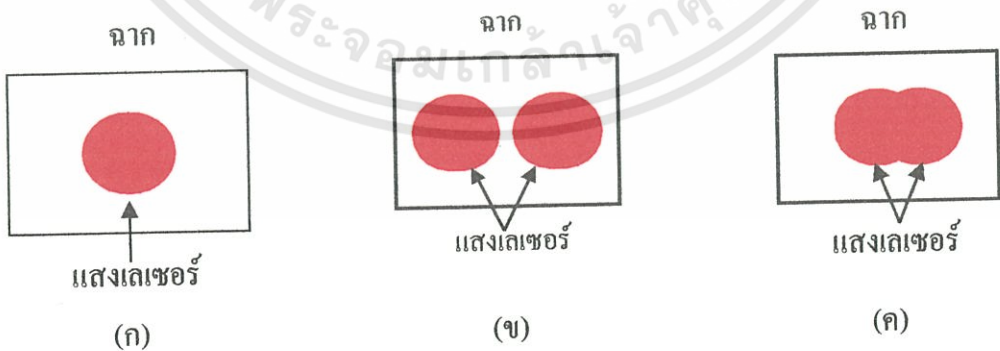
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การสอบเทียบความถี่ของ เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

ลำแสงส่วนที่ 1 ใช้ตรวจสอบการจลระนาบของหน้าคลื่นของเลเซอร์ทั้ง 2 ซ้อนทับกันสนิทหรือไม่ วิธีการตรวจสอบมีขั้นตอนดังนี้

4.4.1.1 นำฉาก  $S_1$  มารับลำแสงที่ตำแหน่ง  $P_1$  ถ้าลำแสงทั้งสองซ้อนทับกันสนิท จะเห็นลำแสงของเลเซอร์มีเพียงจุดเดียว (รูปที่ 4.8 ก) โดยมีขนาดเท่ากับแสงที่ยังไม่นำมารวมกัน



รูปที่ 4.8 การปรับลำแสงบนฉากรับ (ก) ลักษณะของลำแสงที่ซ้อนทับกันสนิท (ข) และ (ค) ลักษณะของลำแสงที่ซ้อนทับกันไม่สนิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.2 เลื่อนจาก  $S_1$  ไปที่ตำแหน่ง  $P_2$  ถ้าการปรับระนาบของหน้าคลื่นของเลเซอร์ทั้งสองซ้อนทับกันสนิทลำแสงบนฉากรับ  $S_1$  ที่ตำแหน่ง  $P_2$  จะต้องเห็นเพียงจุดเดียว (รูปที่ 4.8 ก) แต่ถ้าเห็นลำแสงเป็นวงหรือมีขนาดใหญ่มากกว่าลำแสงที่ยังไม่นำมารวมกัน (รูปที่ 4.8 ข, ค) แสดงว่าการปรับระนาบของหน้าคลื่นของเลเซอร์ทั้งสองยังซ้อนทับกันไม่สมบูรณ์ ให้ทำการปรับตั้งระนาบของหน้าคลื่นของเลเซอร์ทั้งสองที่กระจกสะท้อน  $M$  จนกระทั่งลำแสงของเลเซอร์ทั้งสองซ้อนทับกันสนิท

4.4.1.3 เลื่อนจาก  $S_1$  ไปที่ตำแหน่ง  $P_1$  ถ้าลำแสง ณ ตำแหน่ง  $P_1$  มีเพียงจุดเดียว (รูปที่ 4.8 ก) แสดงว่าลำแสงของเลเซอร์ทั้งสองซ้อนทับกันสนิท ถ้าลำแสงที่ตำแหน่ง  $P_1$  ซ้อนทับกันไม่สนิทจะเห็นลำแสงใหญ่กว่าลำแสงที่ยังไม่รวมกัน (รูปที่ 4.8 ข, ค) ให้ทำการปรับที่ผลึกแยกลำแสง (BS) จนกระทั่งลำแสงทั้งสองซ้อนทับกันสนิท

ลำแสงส่วนที่ 2 จะถูกส่งผ่านแผ่นโพลาริไรเซอร์และผ่านไปยังโฟโตดีเทคเตอร์ (ADP) แล้วส่งสัญญาณไปยังเครื่องขยาย (Amplifier) เพื่อขยายสัญญาณของความถี่บีต สัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังเครื่องนับความถี่ (Counter) ทำหน้าที่นับความถี่บีต ความถี่บีตที่นับได้จะถูกเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้สามารถตั้งค่าเวลาการนับความถี่ได้ งานวิจัยนี้กำหนดช่วงเวลาของการวัดเป็น 0.1 วินาที 1 วินาที 10 วินาที หรือ 100 วินาที ตามลำดับ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้สามารถตั้งค่าจำนวนครั้งในการนับในแต่ละช่วงเวลาปรับตั้งค่าความถี่มาตรฐานได้ งานวิจัยนี้กำหนดจำนวนครั้งในการวัดเป็น 10 ครั้งในแต่ละช่วงเวลา และทำการเลือกความถี่ d, e, f, g, h, i, และ j เป็นความถี่มาตรฐานอ้างอิง (ตารางที่ 3.3) บันทึกลงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.10

#### 4.4.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.4 บันทึกผลการวัดความถี่บีตระหว่างการเลือกความถี่ d กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
1	-90.686232	-90.700728	-90.685120	-90.702144
2	-90.686328	-90.697744	-90.685368	-90.703032
3	-90.686416	-90.699048	-90.685144	-90.704416
4	-90.686488	-90.698952	-90.684864	-90.701024
5	-90.686424	-90.686472	-90.686280	-90.703552
6	-90.686544	-90.699280	-90.685352	-90.701840

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
7	-90.686688	-90.698472	-90.681672	-90.703360
8	-90.686768	-90.696216	-90.681400	-90.703440
9	-90.686736	-90.690680	-90.679096	-90.700656
10	-90.686752	-90.696288	-90.686272	-90.700584
$\bar{X}$	-90.6865376	-90.6963880	-90.6840568	-90.7024048
$S_{Allan}^2$	3.84E-09	2.21E-05	4.08E-06	1.87E-06
$S_{Allan}$	6.19E-05	4.70E-03	2.02E-03	1.37E-03

หมายเหตุ; ความถี่ที่วัดได้มีค่าเป็นบวกหรือลบเพื่อบ่งชี้ว่าค่าความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบมากกว่าหรือน้อยกว่าความถี่ของเลเซอร์มาตรฐาน

ตารางที่ 4.5 บันทึกผลการวัดความถี่ปีระหว่างการถือความถี่ c กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
1	-90.700192	-90.702752	-90.700560	-90.703400
2	-90.700056	-90.702856	-90.698312	-90.700280
3	-90.700368	-90.700784	-90.696584	-90.698560
4	-90.698896	-90.700992	-90.700368	-90.691488
5	-90.701504	-90.701056	-90.694752	-90.700608
6	-90.702792	-90.703040	-90.701096	-90.702992
7	-90.701360	-90.702376	-90.694512	-90.700424
8	-90.702800	-90.698176	-90.696920	-90.701504
9	-90.700848	-90.702504	-90.701088	-90.694376
10	-90.701680	-90.701784	-90.696584	-90.703952
$\bar{X}$	-90.7010496	-90.7016320	-90.6980776	-90.6997584
$S_{Allan}^2$	1.08E-06	2.53E-06	1.01E-05	1.68E-05
$S_{Allan}$	1.04E-03	1.59E-03	3.17E-03	4.09E-03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 บันทึกผลการวัดความถี่ปีระหว่างการล็อกความถี่ f กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการ  
สอบเทียบ

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
1	-90.699048	-90.698976	-90.694896	-90.700280
2	-90.699840	-90.698352	-90.686936	-90.692872
3	-90.699944	-90.700144	-90.687000	-90.690072
4	-90.700096	-90.698728	-90.694264	-90.701176
5	-90.699768	-90.697880	-90.681400	-90.697248
6	-90.699176	-90.697952	-90.694344	-90.690720
7	-90.698448	-90.697624	-90.682528	-90.693328
8	-90.697992	-90.695728	-90.691176	-90.700440
9	-90.700472	-90.695552	-90.670296	-90.691024
10	-90.700632	-90.695400	-90.787856	-90.696192
$\bar{X}$	-90.6995416	-90.6976336	-90.6970696	-90.6953352
$s_{Allan}^2$	4.46E-07	5.60E-07	8.29E-04	2.32E-05
$S_{Allan}$	6.68E-04	7.49E-04	2.88E-02	4.81E-03

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลการวัดความถี่ปีระหว่างการล็อกความถี่ g กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการ  
สอบเทียบ

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
1	-90.693864	-90.667680	-90.659032	-90.702768
2	-90.691464	-90.665184	-90.660648	-90.703152
3	-90.691352	-90.679392	-90.655544	-90.702240
4	-90.693784	-90.673248	-90.651256	-90.704104
5	-90.696224	-90.669672	-90.658136	-90.704240
6	-90.697512	-90.687472	-90.667696	-90.703512
7	-90.695344	-90.694672	-90.668728	-90.704312
8	-90.694464	-90.691416	-90.658736	-90.696216
9	-90.697248	-90.690904	-90.644472	-90.699936

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7.(ต่อ)

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
10	-90.695992	-90.684656	-90.642976	-90.700344
$\bar{X}$	-90.6947248	-90.6804296	-90.6567224	-90.7020824
$S_{Allan}^2$	1.89E-06	3.76E-05	2.74E-05	4.73E-06
$S_{Allan}$	1.38E-03	6.13E-03	5.23E-03	2.18E-03

ตารางที่ 4.8 บันทึกผลการวัดความถี่ปีระหว่างการลือกความถี่ h กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการ  
สอบเทียบ

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
1	-90.665736	-90.646808	-90.651928	-90.692456
2	-90.666968	-90.645136	-90.663976	-90.690328
3	-90.668416	-90.646656	-90.660848	-90.697192
4	-90.669272	-90.650160	-90.655848	-90.700200
5	-90.669816	-90.652888	-90.667568	-90.697912
6	-90.670104	-90.650008	-90.664328	-90.701328
7	-90.670352	-90.650680	-90.658040	-90.702728
8	-90.670200	-90.647688	-90.658776	-90.701976
9	-90.670584	-90.645936	-90.656904	-90.703640
10	-90.670736	-90.645552	-90.654184	-90.703568
$\bar{X}$	-90.6692184	-90.6481512	-90.6592400	-90.6991328
$S_{Allan}^2$	2.77E-07	2.54E-06	2.10E-05	4.61E-06
$S_{Allan}$	5.26E-04	1.59E-03	4.59E-03	2.15E-03

ตารางที่ 4.9 บันทึกผลการวัดความถี่ปีระหว่างการลือกความถี่ i กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการ  
สอบเทียบ

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
1	-90.669696	-90.661968	-90.667352	-90.680016
2	-90.669736	-90.662408	-90.663632	-90.683432

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
3	-90.669864	-90.663456	-90.664688	-90.687144
4	-90.669944	-90.663808	-90.660360	-90.689608
5	-90.670112	-90.664848	-90.671392	-90.689312
6	-90.670488	-90.665720	-90.669512	-90.690088
7	-90.671040	-90.664496	-90.667824	-90.690280
8	-90.671256	-90.664408	-90.673200	-90.688984
9	-90.671368	-90.664160	-90.675848	-90.686776
10	-90.671304	-90.665752	-90.675544	-90.686192
$\bar{X}$	-90.6704808	-90.6641024	-90.6689352	-90.6871832
$S_{Allan}^2$	3.12E-08	4.09E-07	1.10E-05	2.17E-06
$S_{Allan}$	1.77E-04	6.39E-04	3.31E-03	1.47E-03

ตารางที่ 4.10 บันทึกผลการวัดความถี่ปีระหว่างการถือความถี่  $f_0$  กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (MHz)			
	0.1 วินาที	1 วินาที	10 วินาที	100 วินาที
1	-90.674968	-90.681168	-90.690464	-90.684784
2	-90.676816	-90.681536	-90.686688	-90.699504
3	-90.676568	-90.681360	-90.680272	-90.701696
4	-90.674880	-90.681784	-90.680944	-90.702712
5	-90.673720	-90.682624	-90.688376	-90.703840
6	-90.672616	-90.682656	-90.688064	-90.703992
7	-90.671392	-90.679216	-90.684256	-90.703744
8	-90.671016	-90.678568	-90.687184	-90.696888
9	-90.670936	-90.677984	-90.687088	-90.696752
10	-90.670944	-90.676304	-90.690760	-90.695368
$\bar{X}$	-90.6733856	-90.6803200	-90.6864096	-90.6989280
$S_{Allan}^2$	5.85E-07	9.15E-07	8.21E-06	1.52E-05
$S_{Allan}$	7.65E-04	9.57E-04	2.87E-03	3.89E-03

#### 4.4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองวัดความถี่บีตระหว่างความถี่ของเลเซอร์มาตรฐานกับค่าของความถี่ที่ต้องการสอบเทียบตามสมการ

$$V_{\text{beat}} = V_{\text{ISL}} - V_{\text{UTL}} \quad (4.1)$$

- เมื่อ  $V_{\text{beat}}$  คือ ความถี่บีต  
 $V_{\text{ISL}}$  คือ ความถี่ของเลเซอร์มาตรฐาน (ค่าที่ถูกต้องจากตารางที่ 3.3)  
 $V_{\text{UTL}}$  คือ ความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

จากการทดลองค่าของความถี่บีตในตารางที่ 4.4 ถึง 4.10 ค่าของความถี่บีตมีค่าเป็นบวก (+) หรือเป็นลบ (-) เพื่อบ่งชี้ว่าความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบน้อยกว่าหรือมากกว่าความถี่ของเลเซอร์มาตรฐานตามสมการที่ (4.1) ดังนั้นความถี่ที่ถูกต้องของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบคำนวณได้ดังสมการ

$$V_{\text{UTL}} = V_{\text{ISL}} - V_{\text{beat}} \quad (4.2)$$

เนื่องจากค่าความเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าคงที่เท่ากับ 299792458 m/s โดยสามารถคำนวณหาความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ( $\lambda_{\text{UTL}}$ ) ได้ดังสมการ

$$\lambda_{\text{UTL}} = \frac{c}{V_{\text{UTL}}} \quad (4.3)$$

จากการคำนวณตามสมการที่ (4.2) และ (4.3) โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.4 ถึง 4.10 จะได้ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบแสดงดังตารางที่ 4.11 ถึง 4.17

ตารางที่ 4.11 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน ( $d$ ) = 473612379.82 MHz

เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ	เวลาที่ใช้ในการวัด (วินาที)			
	0.1	1	10	100
$V$ (MHz)	473612470.508	473612470.517	473612470.500	473612470.523
$\bar{V}$ (MHz)	473612470.5121			
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.632991056335	0.632991056322	0.632991056345	0.632991056314
$\bar{\lambda}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.6329910563289			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน (e) = 473612366.96 MHz

เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ	เวลาที่ใช้ในการวัด (วินาที)			
	0.1	1	10	100
V (MHz)	473612457.661	473612457.662	473612457.658	473612457.660
$\bar{V}$ (MHz)	473612457.6601			
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.632991073505	0.632991073504	0.632991073509	0.632991073506
$\bar{\lambda}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.6329910735058			

ตารางที่ 4.13 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน (f) = 473612353.60 MHz

เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ	เวลาที่ใช้ในการวัด (วินาที)			
	0.1	1	10	100
V (MHz)	473612444.297	473612444.295	473612444.294	473612444.292
$\bar{V}$ (MHz)	473612444.2944			
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.632991091366	0.632991091369	0.632991091370	0.632991091372
$\bar{\lambda}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.6329910913693			

ตารางที่ 4.14 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน (g) = 473612340.40 MHz

เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ	เวลาที่ใช้ในการวัด (วินาที)			
	0.1	1	10	100
V (MHz)	473612431.094	473612431.079	473612431.056	473612431.101
$\bar{V}$ (MHz)	473612431.0825			
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.632991109012	0.632991109031	0.632991109063	0.632991109002
$\bar{\lambda}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.6329911090273			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน (h) = 473612236.64 MHz

เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ	เวลาที่ใช้ในการวัด (วินาที)			
	0.1	1	10	100
V (MHz)	473612327.313	473612327.292	473612327.303	473612327.343
$\bar{V}$ (MHz)	473612327.3129			
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.632991247717	0.632991247745	0.632991247730	0.632991247677
$\bar{\lambda}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.6329912477171			

ตารางที่ 4.16 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน (i) = 473612214.71 MHz

เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ	เวลาที่ใช้ในการวัด (วินาที)			
	0.1	1	10	100
V (MHz)	473612305.375	473612305.369	473612305.374	473612305.392
$\bar{V}$ (MHz)	473612305.3777			
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.632991277037	0.632991277045	0.632991277039	0.632991277015
$\bar{\lambda}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.6329912770339			

ตารางที่ 4.17 ความถี่และความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐาน (j) = 473612193.14 MHz

เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ	เวลาที่ใช้ในการวัด (วินาที)			
	0.1	1	10	100
V (MHz)	473612283.813	473612283.820	473612283.826	473612283.839
$\bar{V}$ (MHz)	473612283.8248			
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.632991305855	0.632991305846	0.632991305838	0.632991305821
$\bar{\lambda}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.6329913058398			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 ตัวอย่างการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด

##### 4.4.4.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด A

พิจารณาข้อมูลในตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นการวัดความถี่บีระหว่างเลเซอร์มาตรฐาน (d) กับความถี่ของ เลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ จากการวัดซ้ำ 10 ครั้ง ที่ช่วงเวลา 1 วินาที ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน Allan ( $s_{\text{Allan}}$ ) เท่ากับ  $4.73 \times 10^{-3}$  MHz ( $4.73 \times 10^{-6}$  kHz) ค่าความไม่แน่นอนชนิด A คำนวณได้ตามสมการ

$$\begin{aligned} U_A &= \frac{S_{\text{Allan}}}{\sqrt{n}} \\ &= \frac{4.73 \times 10^{-6}}{\sqrt{10}} \\ &= 1.49 \times 10^{-6} \text{ kHz} \end{aligned} \quad (4.4)$$

##### 4.4.4.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด B เนื่องจากเลเซอร์มาตรฐาน ( $U_{B1}$ )

จากข้อกำหนดเฉพาะของบริษัทผู้ผลิตระบุให้ค่าความไม่แน่นอนมีค่าเท่ากับ  $\pm 2.5 \times 10^{-11}$  kHz กำหนดให้ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดมีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนชนิด B ( $U_{B1}$ ) คำนวณได้ตามสมการ

$$\begin{aligned} U_{B1} &= \frac{\text{Accuracy}}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{2.5 \times 10^{-11}}{\sqrt{3}} \\ &= 1.44 \times 10^{-11} \text{ kHz} \end{aligned} \quad (4.5)$$

##### 4.4.4.3 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากเครื่องนับความถี่ ( $U_{B2}$ )

จากคู่มือของเครื่องนับความถี่รุ่น HP 53131A มีค่าความถูกต้องเท่ากับ  $1 \times 10^{-12}$  kHz กำหนดให้ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดมีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนชนิด B ( $U_{B2}$ ) คำนวณได้ตามสมการ

$$\begin{aligned}
 U_{B2} &= \frac{\text{Accuracy}}{\sqrt{3}} \\
 &= \frac{1 \times 10^{-12}}{\sqrt{3}} \\
 &= 5.77 \times 10^{-13} \text{ kHz}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

#### 4.4.4.4 ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องนับความถี่ ( $U_{B3}$ )

เครื่องนับความถี่รุ่น HP 53131 A มีความละเอียด 9 หลัก (Digit;  $1 \times 10^{-9}$  Hz) กำหนดให้ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดมีลักษณะการกระจายเป็นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนชนิด B ( $U_{B3}$ ) คำนวณได้ตามสมการ

$$\begin{aligned}
 U_{B3} &= \frac{\text{Resolution of Counter}}{2\sqrt{3}} \\
 &= \frac{1 \times 10^{-9}}{2\sqrt{3}} \text{ Hz} \\
 &= 2.89 \times 10^{-10} \text{ Hz หรือ } 2.89 \times 10^{-13} \text{ kHz}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

#### 4.4.4.5 ค่าความไม่แน่นอนรวม (Combine Uncertainty; $U_c$ )

แทนค่าสมการ (4.4), (4.5), (4.6) และ (4.7) ลงในสมการ (4.8) จะได้

$$\begin{aligned}
 U_c &= \sqrt{(1.49 \times 10^{-6})^2 + (1.44 \times 10^{-11})^2 + (5.77 \times 10^{-13})^2 + (2.89 \times 10^{-13})^2} \\
 &= 1.49 \times 10^{-6} \text{ kHz}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

#### 4.4.4.6 การคำนวณหาค่าตัวประกอบ $k_p$

ตัวประกอบ  $k_p$  คำนวณโดยใช้สมการ Welch-Satterwaite

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{U_c^4}{\frac{U_A^4}{n-1} + \frac{U_{B1}^4}{\infty} + \frac{U_{B2}^4}{\infty} + \frac{U_{B3}^4}{\infty} + \dots + \frac{U_{Bn}^4}{\infty}} \\
 &= \frac{(1.49 \times 10^{-6})^4}{\left(\frac{(1.49 \times 10^{-6})^4}{10-1}\right) + \left(\frac{(1.44 \times 10^{-11})^4}{\infty}\right) + \left(\frac{(5.77 \times 10^{-13})^4}{\infty}\right) + \left(\frac{(2.89 \times 10^{-13})^4}{\infty}\right)} \\
 &= 9.00
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบค่า  $V_{\text{eff}} = 9.00$  ที่ได้จากการคำนวณกับค่า  $V_{\text{eff}} = 10$  จากตารางที่ 3.4 จะได้ค่า  $k_p = 2.28$

ตารางที่ 4.18 องศาความเป็นอิสระยังผล (Effective degree of freedom)

$V_{\text{eff}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
$k_p$	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.23	2.20	2.17
$V_{\text{eff}}$	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	$\infty$
$k_p$	2.15	2.13	2.11	2.09	2.07	2.06	2.06	2.05	2.04	2.03	2.02	2.00

#### 4.4.4.7 ค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนขยาย  $U_{95\%}$  คำนวณได้ตามสมการ

$$\begin{aligned}
 U_{(95\%)} &= k_p \times U_c \\
 &= 2.28 \times 1.49 \times 10^{-6} \\
 &= 1.12 \times 10^{-5} \text{ kHz}
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดจากข้อ 4.4.4.2 ถึง 4.4.4.6 เป็นตัวอย่างการพิจารณาจากผลการวัดโดยใช้ความถี่มาตรฐาน (d) เท่านั้น แต่งานวิจัยนี้ใช้ความถี่มาตรฐานถึง 7 ความถี่ในการสอบเทียบ เพื่อให้การประเมินค่าความไม่แน่นอนสะดวกสามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 4.19 โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 4.4 ถึง 4.10

ตารางที่ 4.19 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

$V_{\text{beat}}$	$U_A(\text{max.})$ kHz	$U_{B1}$ kHz	$U_{B2}$ kHz	$U_{B3}$ kHz	$U_C$ kHz	$V_{\text{eff}}$	$t_{95\%}(k_p)$	$U_{95\%}$ kHz
$V_d - V_{\text{UTL}}$	1.49E-06	1.44E-11	5.77E-13	2.89E-10	1.49E-06	9.00	2.38	3.55E-06
$V_c - V_{\text{UTL}}$	1.29E-06	1.44E-11	5.77E-13	2.89E-10	1.29E-06	9.00	2.38	3.09E-06
$V_f - V_{\text{UTL}}$	9.10E-06	1.44E-11	5.77E-13	2.89E-10	9.10E-06	9.00	2.38	2.17E-05
$V_g - V_{\text{UTL}}$	1.94E-06	1.44E-11	5.77E-13	2.89E-10	1.94E-06	9.00	2.38	4.62E-06
$V_h - V_{\text{UTL}}$	1.45E-06	1.44E-11	5.77E-13	2.89E-10	1.45E-06	9.00	2.38	3.46E-06
$V_i - V_{\text{UTL}}$	1.05E-06	1.44E-11	5.77E-13	2.89E-10	1.05E-06	9.00	2.38	2.50E-06
$V_j - V_{\text{UTL}}$	1.23E-06	1.44E-11	5.77E-13	2.89E-10	1.23E-06	9.00	2.38	2.93E-06

หมายเหตุ:  $U_A(\text{max}) =$  ค่าความไม่แน่นอนชนิด A มากที่สุดในช่วงเวลา 0.1 1 10 และ 100 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์จะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ 1) สารเลเซอร์จะต้องทำให้เกิดกระบวนการการดูดกลืนแบบถูกกระตุ้น กระบวนการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง กระบวนการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น โดยจะต้องทำให้เกิดจำนวนประชากรผกผัน 2) แหล่งพลังงานจากภายนอก เพื่อใช้กระตุ้นให้อิเล็กตรอนของสารเลเซอร์มีระดับพลังงานสูงขึ้น และ 3) ระบบออปติคอลเรโซเนเตอร์ที่ทำหน้าที่ขยายจำนวนโฟตอนให้เพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดเป็นแสงเลเซอร์ แสงเลเซอร์นี้มีสมบัติเฉพาะเช่น เป็นแสงสีเดียว มีความเข้มสูง เป็นแสงโคฮีเรนต์ มีทิศทางเคลื่อนที่ที่แน่นอน ระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีกำลัง 1 mW

ระบบ โครงสร้างเชิงกลของระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์ทำจากวัสดุอินวา ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างนิกเกิล (Ni 36%) กับเหล็ก (Fe 64%) มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว  $1.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$  เหตุผลที่เลือกใช้วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ก็เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของเลเซอร์ควาวิตีอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้แสงของฮีเลียมนีออนมีความเสถียรสูงขึ้นระดับหนึ่งยังไม่เพียงพอ เพื่อที่จะทำให้ระบบโครงสร้างมีความเสถียรสูงขึ้นจำเป็นต้องขอความร่วมมือในการเปลี่ยนแปลงของออปติคอลควาวิตีด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ วิธีนี้จะมีราคาถูกกว่าการควบคุมให้อุณหภูมิห้องคงที่

การคัดเลือกความถี่ที่กระจายอยู่ภายในสเปกตรัมทำโดยการติดตั้งไอโอดีน ( $^{127}\text{I}_2$ ) เซลล์ไว้ในเลเซอร์ควาวิตี ความถี่ที่ถูกดูดกลืนอิมตัวจะขึ้นอยู่กับระดับชั้นพลังงานของไอโอดีนที่เหมาะสมกับความถี่ของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ การเลือกความถี่จากการดูดกลืนอิมตัวในแต่ละโครงสร้างละเอียด (d e f g h i และ j) ของอะตอมของไอโอดีน (ดูตารางที่ 3.3) ทำได้โดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับไปขับให้เพียโซอิเล็กทริก (PZT) เคลื่อนที่โดยไปดันกระจกเลเซอร์ให้ขยับไปยังตำแหน่งที่ต้องการเป็นเทคนิคการทำโมดล็อกเลเซอร์ ส่งผลให้เลเซอร์ปล่อยความถี่ในช่วงที่ทำการออกมาและใช้เป็นความถี่มาตรฐานอ้างอิงในการสอบเทียบให้กับความถี่ของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ความถี่ของเลเซอร์เมื่อทำการสอบเทียบแล้วมีค่าความถี่ที่ถูกต้องและมีค่าความไม่แน่นอนเป็น  $473612470.5121 \pm 3.55 \times 10^{-9} \text{ MHz}$   $473612457.6601 \pm 3.09 \times 10^{-9} \text{ kHz}$  /  $473612444.2944 \pm 2.17 \times 10^{-8} \text{ MHz}$  /  $473612431.0825 \pm 4.62 \times 10^{-9} \text{ MHz}$  /  $473612327.3129 \pm 3.46 \times 10^{-9} / \text{MHz}$   $473612305.3777 \pm 2.50 \times 10^{-8} \text{ MHz}$  /  $473612283.8248 \pm 2.93 \times 10^{-9} \text{ MHz}$  ตามลำดับ เมื่อนำค่าความถี่ต่าง ๆ ข้างต้นมาคำนวณหาค่าความยาวคลื่นพบว่าความยาวคลื่นของเลเซอร์มีค่าเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.6329910563289 nm / 0.6329910735058 nm / 0.6329910913693 nm / 0.6329911090273 nm / 0.6329912477171 nm / 0.6329912770339 nm / 0.6329913058398 nm ตามลำดับ

ความถี่ที่ถูกต้องของเลเซอร์ที่ได้จากการเปรียบเทียบกับความถี่มาตรฐานที่โครงสร้างละเอียดต่าง ๆ มีค่าโดยประมาณเป็น 473.612 THz และเมื่อคำนวณหาค่าความยาวคลื่นมีค่าประมาณ 0.632991 nm มีค่าความถูกต้องอยู่ในพิสัยที่ยอมรับได้สำหรับมาตรฐานขั้นทุติยภูมิ และการประเมินค่าความไม่แน่นอนพบว่าค่าความไม่แน่นอนที่มีค่ามากที่สุดมาจากผลการวัด ดังนั้นในการทดลองจะต้องมีระบบป้องกันการสั่นสะเทือนและการควบคุมสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการสอบเทียบเลเซอร์มาตรฐานขั้นทุติยภูมิในสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติต่าง ๆ นั้น โดยทั่วไปมักจะเลือกความถี่มาตรฐานเพียงหนึ่งค่าและใช้ช่วงเวลาในการวัด 1 วินาที ดังนั้นผู้ที่จะสามารถสอบเทียบความถี่ของเลเซอร์ให้มีความถูกต้องในระดับสากลจะต้องมีความชำนาญสูง
2. เพื่อให้ผลการสอบเทียบมีความน่าเชื่อถือ ควรมีการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด โดยสามารถอ้างอิงวิธีการประเมินตามมาตรฐานสากลเช่น ISO TAG4 หรือ EAL-04/2 เป็นต้น
3. จากการทดลองค่าความไม่แน่นอนชนิด A ที่ได้จากการวัดซ้ำ 10 ครั้ง เป็นค่าความไม่แน่นอนที่มีค่ามากที่สุด ดังนั้นในการสอบเทียบความถี่ของเลเซอร์จะต้องระมัดระวังเรื่องการควบคุมสภาวะแวดล้อม ประสิทธิภาพและความถูกต้องของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โฟโตดีเทคเตอร์ และเครื่องนับความถี่
4. การนำแสงของเลเซอร์ระดับทุติยภูมิที่สอบเทียบแล้วไปใช้ในงานซึ่งเป็นการวัดในชั้นบรรยากาศ โดยที่ค่าดัชนีหักเหของอากาศเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดที่ทำให้ความยาวคลื่นของเลเซอร์ เพื่อให้ผลการวัดมีความถูกต้องจำเป็นที่จะต้องมีการชดเชยค่าดัชนีหักเหของอากาศ การวัดค่าดัชนีหักเหของอากาศไม่ได้เป็นการวัดโดยตรงแต่จะทำการวัดสภาวะแวดล้อมเช่น วัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความดันบรรยากาศ แล้วแทนค่าลงในสมการที่ (5.1) เรียกว่า Edlen equation [19]

$$\begin{aligned}
 (n-1) \times 10^8 &= [8342.13 + 2406030(130 - \sigma^2)^{-1} + 15997(38.9 - \sigma^2)^{-1}] \\
 &\times \left[ \frac{p_t}{720.775} \times \frac{1 + 10^{-6} p_t (0.817 - 0.0133t)}{(1 + 0.0036610t)} \right] \\
 &- f [5.7224 - 0.0457\sigma^2]
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

- เมื่อ  $\sigma$  คือ เลขคลื่นในสูญญากาศ ( $2\pi/\lambda$ ,  $\mu\text{m}^{-1}$ )  
 $p_t$  คือ ความดันบรรยากาศ (mmHg)  
 $t$  คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $f_t$  คือ ความดันไอน้ำบรรยากาศ (mmHg)

สภาวะแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการมาตรฐานแห่งชาติมีการควบคุมอุณหภูมิที่  $20\pm 1^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $50\pm 10\%$  และความดันบรรยากาศเฉลี่ยระหว่างทำการสอบเทียบเป็น 763 mmHg และในกลุ่มมือของเลเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบจากบริษัทผู้ผลิตกำหนดให้  $\sigma = 1.5798$  และค่า  $f_t = 3.033 \times 10^{-3} \times R \exp(0.057627t)$  เมื่อ  $R$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%) เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการที่ (5.1) จะได้ค่าดัชนีหักเหของอากาศเป็น 1.00008232 ส่งผลให้ความยาวคลื่นของเลเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงในทศนิยมหลักที่สามของหน่วยไมโครเมตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การวัดมาตรฐานในขั้นสุดท้าย

เพราะฉะนั้นการสอบเทียบความถี่ของเลเซอร์ที่ใช้ในระบบเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ให้มีความสมบูรณ์จะต้องทำการสอบเทียบเครื่องรับรู้ (Sensor) ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ ให้มีความถูกต้องอยู่ในพิสัยที่ยอมรับได้ตามสมบัติเฉพาะที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด

5. ในการพัฒนาเลเซอร์มาตรฐานข้อควรระวังคือ การเลือกใช้วัสดุสำหรับทำระบบโครงสร้างเชิงกล วัสดุนั้นจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนต่ำ การชดเชยการเปลี่ยนแปลงของเลเซอร์ควาวิตีด้วยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของระบบการควบคุมแบบป้อนกลับในการที่จะทำให้เพียโซอิเล็กทริก (PZT) ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของเลเซอร์ได้อย่างรวดเร็ว

6. ควรเลือกใช้กระจกเลเซอร์ที่เป็นกระจกราบ 1 บานและกระจกโค้ง 1 บานเพื่อความสะดวกในการปรับตั้งให้เกิดแสงเลเซอร์ได้ง่าย

7. ค่าความถูกต้องของความถี่ของเลเซอร์มาตรฐานมาจากอะตอมของไอโอดีน ดังนั้น ไอโอดีนที่ใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูง และต้องได้รับการรับรองจากห้องปฏิบัติการมาตรวิทยาแห่งชาติหรือสามารถสอบย้อนกลับไปยังหน่วยมูลฐาน (Base unit) เพื่อให้เป็นไปตามระบบควบคุมคุณภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วุฑฒิ พันธุมนาวิน. **เลเซอร์ฟิสิกส์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์เอกซ์เพรสมีเดีย. 2536.
- [2] สุปานี ลีสมุวรรณ. **กลศาสตร์ควอนตัม**. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์เอกซ์เพรสมีเดีย. 2539.
- [3] A. Maitland and M.H. Dunn. **Laser Physics**. Lecturers in Physics. University of St.Andrews. Scotland. 1969.
- [4] B.B. Laud. **Lasers and Non-Linear Optics**. Wiley Eastern Limited. 1993.
- [5] Wolfgang Demtroder. **Laser Spectroscopy Basic Concept and Instrumentation**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York. 1981.
- [6] A. Razet and S. Picard. “**A tabulation of Calculation of the Hyperfine Structure in  $^{127}\text{I}_2$** ”. Metrologia. pp.19-27. 1996.
- [7] National Research Laboratory of Metrology. **Group Training Course in Metrology and Measurement Standards**. Japan International Cooperation Agency. Japan Measuring Instruments Federation. National Research Laboratory of Metrology (NRLM). 1986.
- [8] Howard P. Layer. “**A Portable Iodine Stabilized Helium-Neon Laser**”. IEEE Transactionas on Instrumentation and Measurement. Vol.IM-29, No.4, December, 1980.
- [9] Jack A. Stone. **A New Design for the Iodine Stabilized Laser and its Use For Calibration of Laser Vacuum Wavelength**. National Institute of Standard and Technology Precision Engineering Division Gaithersburg. MD 20899. 1996.
- [10] G.R. Hanes and C.E. Dahlstrom. “**Iodine Hyperfine Structure Observed in Saturated Absorption At 633 nm**”. Applied Physics Letters. Vol. 14. No. 11, 1969. pp.101-108.
- [11] A.J. Wallard. **Frequency Stabilization of the Helium-Neon Laser by Saturated Absorption in Iodine Vapour**. Division of Quantum Metrology. National Physics Laboratory. Teddington, Middlesex. 1972.
- [12] Bureau International des Poids et Mesures. **Definition of the Metre (1992)**. Metrologia. Vol. 30. 1994. pp-523-541.

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [13] Jong Wook Won. **Laser Applications in Dimensional Measurement at KSRI**. Length Laboratory. Korea Standards Research Institute. Taedok Science Town. Republic of Korea. 1986.
- [14] S. Fredin-Picard, A and J.-M. Chartier. **Laser Induced Fluorescence Technique Used to Study  $^{127}\text{I}_2$  Cells**. Bureau International des Poids et Mesures. France. 1989
- [15] International Organization for Standardization. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. 1993.
- [16] National Physics Laboratory. **The expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibrations**. NAMAS Executive. National Physics Laboratory. Teddington. Middlesex. TW110LW. England. 1995.
- [17] Morimasa Ueda, Akira Numata and Masaji Sawabe. **“Calibrated Wavelength Results of Commercial Stabilized He-Ne Laser”**. National Conference of Standard Laboratories. Success in the 21 st Century Depends on Modern Metrology. Hyatt Regency Atlanta. Atlanta. 1997.
- [18] W.G. Schweitzer, Jr., E.G. Kessler, Jr., R.D. Deslattes, H.P. Layer and J.R. Whetstone. **“Description Performance and Wavelengths of Iodine Stabilized Lasers”**. Applied Optics. Vol.12, 1973, pp 2927.
- [19] Hewlett Packard. **Service Manual 5528A Laser Measurement System**. Manual part Number:05528-90016. Copyright Hewlett Packard Company. 1986.
- [20] C.F. Dietrich. **Uncertainty, Calibration and Probability**. The Statistics of Scientific and Industrial Measurement. 1973.

## ภาคผนวก ก.

### ข้อกำหนดเฉพาะของเครื่องวัดกำลัง

Range Switch Position	1&2	3&4	5&6	7&8	9&10	11&12
Full scale measurement (divide value by calibration factor mantissa)						
Semiconductor	200 nA	2 $\mu$ A	20 $\mu$ A	200 $\mu$ A	2 mA	20 mA
Thermopile	2 mV	2 mV	20 mV	200 V	2 V	20 V
Pyroelectric	20 mV	200 mV	2 V	20 V	200 V	2 kV
Relative noise factor (peak-to-peak, measured relative to full scale)						
Semiconductor	0.2 %	0.02 %	0.1 %	0.01 %	0.01 %	0.01 %
Thermopile	0.03 %	0.03 %	0.2 %	0.02 %	0.02 %	0.01 %
Pyroelectric	0.3 %	0.09 %	0.2 %	0.02 %	0.01 %	0.01 %
Analog output bandwidth						
Semiconductor	150 Hz	150 Hz	25 kHz	25 kHz	150 kHz	150 kHz
Thermopile	5 Hz	5 Hz	20 kHz	20 kHz	100 kHz	100 kHz
Pyroelectric	75 kHz	75 kHz	75 kHz	75 kHz	200 kHz	200 kHz
Full scale analog output	2 V					
Analog output drift	< 0.2 % / 1 hour at constant temperature					
Analog output offset	10 mV					
Analog output noise	< 0.1% + relative noise factor $\times$ calibration factor mantissa					
Calibration accuracy	< 0.1% + 1% / calibration factor mantissa					
DC accuracy	< 0.2% + calibration accuracy					
Analog output accuracy	< 0.3% + DC accuracy					
Peak-to-Peak accuracy	< 0.5% + DC accuracy + analog output noise / 2					
Pulse accuracy	< 0.5% + DC accuracy + analog output noise / 2					
Integration accuracy	< 0.7% + DC accuracy + analog output noise / 2					
Display resolution full scale measurement	/ 2000					
Minimum pulse slope	10 V/sec					

## ภาคผนวก ข.

## องศาความเป็นอิสระและระดับความเชื่อมั่น

ตารางที่ ข1 Value of the coverage factor  $k_p$  that produces an interval having level of confidence  $p$  assuming a normal distribution

Level of confidence $p$ (percent)	Coverage factor $k_p$
68.27	1
90	1.945
95	1.960
99.45	2
99	2.576
99.73	3

ตารางที่ ข2 Value of  $t_p(V)$  from the t-distribution for degree of freedom  $V$  that defines an interval  $-t_p(V)$  to  $+t_p(V)$  that encompasses the fraction  $p$  of the distribution

Degree of freedom( $V$ )	Fraction $p$ in percent					
	68.27 <sup>(a)</sup>	90	95	95.45 <sup>(a)</sup>	99	99.73 <sup>(a)</sup>
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.8
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข2 (ต่อ)

12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
$\infty$	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

(a) For a quantity  $z$  described by a normal distribution with expectation  $\mu_z$  and standard deviation  $\sigma$ , the interval  $\mu_z \pm k\sigma$  encompasses  $p = 68.27, 95.45$  and  $99.73$  percent of the distribution for  $k = 1, 2$  and  $3$  respectively.

## ประวัติผู้เขียน

นายอนุสรณ์ ทนหมื่นไวย เกิดวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2510 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ การศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีการศึกษา 2532

ปี พ.ศ. 2534 เข้ารับราชการในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 3 สังกัดโครงการพัฒนาระบบ มาตรฐานวิทยาทางวิทยาศาสตร์ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม จนถึงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 5 ปี พ.ศ. 2541 ปัจจุบันดำรง ตำแหน่งนักมาตรวิทยา 7 ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้