

การหาผลต่างของความยาวระหว่างแถบสเปกตรัมสองชิ้นโดยอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน

นายเจษฎา วงศาโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชามาตรวิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DETERMINATION OF LENGTH DIFFERENCE BETWEEN TWO GAUGE BLOCKS  
USING MICHELSON INTERFEROMETER

Mr. Jedsada Wongsaroj

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Metrological Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาผลต่างของความยาวระหว่างเกอเบิลส์ออกสองชั้นโดย  
อินเตอร์พีรอมิเตอร์แบบไมเคลสัน

โดย

นายเจษฎา วงศาโรจน์

สาขาวิชา

มาตรวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.มนต์เทียน เทียนประทีป

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.มนต์เทียน เทียนประทีป)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรฉัตร รัตนธรรมพันธ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เดชะกำพูช)

เจษฎา วงศาโรจน์ : การหาผลต่างของความยาวระหว่างเกจบล็อกสองชิ้นโดยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคลสัน. (DETERMINATION OF LENGTH DIFFERENCE BETWEEN TWO GAUGE BLOCKS USING MICHELSON INTERFEROMETER) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.มนต์เทียน เทียนประทีป, 73 หน้า.

เกจบล็อกเป็นแท่งเทียบมาตรฐานที่ใช้ถ่ายค่าความถูกต้องโดยตรงของความยาวตามมาตรฐาน ISO 3650:1998 เมื่อต้องการสอบเทียบเครื่องเปรียบเทียบเกจบล็อก (GBCM) ด้วยการเปรียบเทียบความต่างความยาวของเกจบล็อก 5 คู่ตามมาตรฐานของ EURAMET/cg-02/v.01 ปกติแล้ว GBCM จะหาความต่างความยาวของเกจบล็อกสองชิ้นด้วยการวัดชิ้นตัวอย่างของเกจบล็อกเดี่ยว (SGB) สองชิ้นด้วยวิธีอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคลสัน (MI) และวิเคราะห์รบกวนการแทรกสอดด้วยการเลื่อนเฟส (PSM) แต่การวัดดังกล่าวให้ค่าความไม่แน่นอนขยาย (U) สูง เพื่อลดค่า U ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีหาค่าความต่างความยาวของเกจบล็อกสองชิ้นด้วยการใช้ MI และ PSM กับชิ้นตัวอย่างของเกจบล็อกคู่ (DGB) นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังหาค่าความต่างความยาวของเกจบล็อกทั้ง 5 คู่ด้วยการวัด DGB 5 ชิ้นด้วย MI และการวิเคราะห์รบกวนการแทรกสอดแบบการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับแบบเร็ว (Fast fourier transform: FFT) ด้วย จากการเปรียบเทียบค่า U ที่ได้จากการวัด SGB ด้วย MI และ PSM กับค่า U ที่ได้จากการวัด DGB ด้วย MI และ PSM พบว่า ค่า U ที่ได้จากการวัด DGB ให้ค่าที่น้อยกว่าค่า U ที่วัดจาก SGM นอกจากนี้ค่า U ที่วัด DGB ด้วย MI และ FFT ยังให้ค่าที่น้อยกว่าค่า U ที่วัด DGB ด้วย MI และ PSM อีกด้วย จากการเปรียบเทียบความต่างความยาวของเกจบล็อก 5 คู่ระหว่างการวัด SGB และการวัด DGB ที่ใช้ทั้ง PSM และ FFT แล้ว พบว่า  $E_n$  ที่ได้จากทุกกรณีมีค่าน้อยกว่า 1.0 นั้นหมายความว่าความต่างความยาวของเกจบล็อกทั้ง 5 คู่ที่หาจากทุกวิธีให้ค่าอยู่ในช่วงความต่างที่ยอมรับได้ และจากการเปรียบเทียบความต่างความยาวของเกจบล็อก 5 คู่ระหว่างการวัด DGB ด้วยวิธี PSM และการวัด DGB ด้วยวิธี FFT พบว่า ค่า  $E_n$  ที่ได้ในทุกๆ กรณีมีค่าน้อยกว่า 1.0 ด้วยเช่นกัน

สาขาวิชา..... มาตรฐานวิทยา..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
ปีการศึกษา ..... 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

# # 5172250923: MAJOR METROLOGICAL SCIENCE

KEYWORDS: GAUGE BLOCKS / PHASE SHIFT INTERFEROMETER /  
FAST FOURIER TRANSFORM /

JEDSADA WONGSAROJ : DETERMINATION OF LENGTH DIFFERENCE  
BETWEEN TWO GAUGE BLOCKS USING MICHELSON

INTERFEROMETER. ADVISOR: MONTIAN TIANPRATEEP, Ph.D., 73 pp.

Gauge block is a reference standard block, used for transferring a standard length unit of ISO 3650:1998. Since a gauge block comparator machine (GBCM) is needed to be calibrated by comparing a different length of 5 pairs of gauge block according to a standard of EURAMET/cg-02/v.01. Normally, GBCM defines the different length of two gauge blocks by measuring two single gauge block samples (SGB) with Michelson interferometer (MI) and phase shift method (PSM), but this method causes a high expanded uncertainty (U). For decreasing the value of U, in this research a different length of two gauge blocks is defined by using MI and PSM with a double gauge block sample (DGB). Also, the different length of 5 pairs of gauge blocks are defined by measuring 5 DGBs with MI and a fast Fourier transform method (FFT) in this research. By comparing U from measuring SGB by using MI and PSM with one from measuring DGB by using MI and PSM, U from DGB is less than one from SGB. Also, U from DGB by using MI and FFT is less than the one from DGB by using MI and PSM. By comparing the different length of 5 pairs of gauge blocks between the one from SGB and the one from DGB with both PSM and FFT,  $E_n$  in every cases are less than 1.0, which means the different length of 5 pairs of gauge blocks, defined by all three methods, are in acceptable different range. By comparing the different length of 5 pairs of gauge blocks between the one from DGB with PSM and the one from DGB with FFT,  $E_n$  in every cases are also less than 1.0.

Field of Study : .. Metrological Science .. Student's Signature : .....

Academic Year : .. 2011 .. Advisor's Signature : .....

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่ต้องอาศัยองค์ความรู้และทักษะความเชี่ยวชาญในหลายสาขา โดยลำพังผู้วิจัยคงไม่สามารถดำเนินการวิจัยและทำให้ผลงานนี้ประสบความสำเร็จออกมาเป็นรูปธรรมได้ หากขาดซึ่งคุณูปการจากบุคคลและหน่วยงานที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

ลำดับแรก ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.มนต์เทียน เทียนประทีป อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยให้ได้ทำงานวิจัยในหัวข้อนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและชี้แนะแก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือสนับสนุนส่งผลให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยดี

ลำดับที่สอง ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชชาติ มงคลนาวิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เฉชะกำพูน ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกมหาวิทยาลัย

ลำดับที่สาม ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนา ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (โครงการ ผนวท.) สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่สนับสนุนทุนในการดำเนินงานวิจัย

ลำดับที่สี่ ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยเฉพาะ นายอนุสรณ์ ทนหมื่นไวย รักษาการหัวหน้าฝ่ายมาตรวิทยามิติ และเป็นนักวิจัยของหน่วยงานสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่สนับสนุนและให้โอกาสระดมได้ใช้ช่วงเวลาส่วนหนึ่งของการทำงานเพื่อใช้ในการศึกษาต่อในครั้งนี้

ลำดับที่ห้า ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางมลฤดี เรณูสวัสดิ์ นักมาตรวิทยา ห้องปฏิบัติการความยาวคลื่น ฝ่ายมาตรวิทยามิติ และ นางสาวโรจนา ลีเจริญ นักมาตรวิทยา ห้องปฏิบัติการแสง ฝ่ายมาตรวิทยาแสง สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาคำแนะนำและ ช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรมการประมวลผลของงานวิจัยนี้จนแล้วเสร็จลงได้ด้วยดี

ลำดับสุดท้าย ผู้วิจัยขอขอบคุณกำลังใจจาก คุณพ่อ คุณแม่ ทุกคนในครอบครัว ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ที่ส่งกำลังใจให้มาด้วยดีโดยตลอดช่วงเวลาของการศึกษา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ

## บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 คำนิยามศัพท์.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....6

2.1 การแทรกสอดของแสง.....	6
2.2 อินเตอร์เฟอเมตรีแบบไมเคลสัน.....	9
2.3 มาตรฐานค่าของเกจบล็อก.....	12
2.4 เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน.....	15
2.5 วิธีวิเคราะห์การแทรกสอด.....	15
2.5.1 การวิเคราะห์การแทรกสอดแบบการเลื่อนเฟส.....	15

2.5.2 การวิเคราะห์หริ้วการแทรกสอดด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว.....	18
2.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด.....	23
2.7 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการหาผลต่างของความยาวระหว่าง แถบสีกสองชิ้น.....	28
2.7.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส.....	28
2.7.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบฟูเรียร์ ย้อนกลับเร็ว.....	35
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>38</b>
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.2 วิธีการทดลอง.....	42
3.2.1 การหาค่าความต่างของความยาวคู่แถบสีกด้วยวิธีการเลื่อนเฟส.....	42
3.3.2 การหาค่าความต่างของความยาวคู่แถบสีกด้วยวิธีการแบบแปลง ฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว.....	45
<b>บทที่ 4 วิธีการวิเคราะห์ผล.....</b>	<b>49</b>
4.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมการเลื่อนเฟส.....	49
4.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว.....	56
4.3 การเปรียบเทียบผลการวัด.....	63
<b>บทที่ 5 .....</b>	<b>66</b>
5.1 วิธีการวัดและวิเคราะห์ข้อมูลอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ด้วยการเลื่อนเฟส.....	67
5.2 วิธีการวัดและวิเคราะห์ข้อมูลอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบแปลงฟูเรียร์ย้อน กลับเร็ว.....	67
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	68
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>69</b>



ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวกก โปรแกรมการประมวลผล: โปรแกรมแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	76

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนยอมให้ได้ของเกจบล็อก.....	14
ตารางที่ 2.2 แสดงตารางการกระจายแบบที่ .....	27
ตารางที่ 2.3 แสดงตารางค่ามุมเฟสจากทฤษฎีกับมุมเฟสจากการคำนวณ .....	36
ตารางที่ 4.1 แสดงตารางผลการวัดจากวิธีการเลื่อนเฟส.....	52
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 0.5 มิลลิเมตร กับ 0.5 มิลลิเมตร.....	52
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 1 มิลลิเมตร กับ 1.005 มิลลิเมตร.....	53
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 1 มิลลิเมตร กับ 1.010 มิลลิเมตร.....	53
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 4 มิลลิเมตร กับ 4 มิลลิเมตร.....	54
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 100 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร.....	54
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวัดและค่าความไม่แน่นอนขยาย.....	55
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดเกจบล็อกคู่ระหว่างสถาบันมาตรฐานวิทยาแห่งชาติกับ โปรแกรมการเลื่อนเฟส.....	55
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวัดจากวิธีการฟูรีเยร์ย้อนกลับเร็ว.....	59
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 0.5 มิลลิเมตร กับ 0.5 มิลลิเมตร.....	60
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 1 มิลลิเมตร กับ 1.005 มิลลิเมตร.....	61
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 1 มิลลิเมตร กับ 1.010 มิลลิเมตร.....	61
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 4 มิลลิเมตร กับ 4 มิลลิเมตร.....	62

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น ขนาด 100 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร.....	62
ตารางที่ 4.15 ผลการวัดและค่าความไม่แน่นอนขยายด้วยวิธีแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว.....	63
ตารางที่ 4.16 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดเกจบล็อกคู่ระหว่าง สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กับโปรแกรมการเลื่อนเฟส.....	63
ตารางที่ 4.17 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดเกจบล็อกคู่ระหว่าง สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กับโปรแกรมการวิธีแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว.....	64
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดเกจบล็อกคู่ระหว่าง สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กับโปรแกรมการเลื่อนเฟสและวิธีแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว.....	64
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดเกจบล็อกคู่ระหว่าง โปรแกรมการเลื่อนเฟส และวิธีแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว.....	65

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงหลักการของอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์แบบไมเคลสัน.....	10
รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดการแทรกสอดในระบบอินเตอร์ฟิรอมิเตอร์แบบไมเคลสัน.....	11
รูปที่ 2.3 แสดงการย้อนสอบกลับได้ของมาตรฐานความยาว.....	13
รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งของการวัดเกจบล็อกสองชิ้นและค่าเฟสที่ได้.....	16
รูปที่ 2.5 แสดงกราฟความถี่จากการแปลงฟูรีเยร์ .....	18
รูปที่ 2.6 แสดงกราฟความถี่หลังกรองสัญญาณแล้ว.....	18
รูปที่ 2.7 (ก) เป็นตัวอย่างของเฟสที่คำนวณได้จากสมการที่ (2-28).....	19
(ข) ค่าของ $\phi_0(x)$ ของรูป (ก).....	19
(ง) ผลรวมเฟสจากรูป (ก) และ (ข).....	19
รูปที่ 2.8 แสดงคลื่นแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวเกจบล็อก.....	22
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการกระจายค่าความไม่แน่นอนแบบโค้งปกติ.....	24
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการกระจายค่าความไม่แน่นอนแบบสี่เหลี่ยม.....	25
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของจุดกึ่งกลางของเกจบล็อกที่นำมาคำนวณ.....	34
รูปที่ 3.1 แสดงแหล่งกำเนิดแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ และชุดควบคุมกระแสไฟฟ้า.....	38
รูปที่ 3.2 แสดงตัวกรองแสง.....	39
รูปที่ 3.3 แสดงเลนส์รวมแสง.....	39
รูปที่ 3.4 แสดงรูรับแสง .....	40
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของตัวแยกลำแสงชนิดกลมแบน .....	41
รูปที่ 3.6 แสดงกระจกอ้างอิงที่อยู่บนตัวเพียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์.....	41
รูปที่ 3.7 แสดงแสดงชิ้นงานตัวอย่างเกจบล็อกสองชิ้นที่ติดอยู่บนแผ่นเรียบมาตรฐาน.....	42
รูปที่ 3.8 แสดงด้านซ้ายมือเป็นเลนส์รวมแสงและด้านขวามือเป็นกล้องซีซีดี .....	43
รูปที่ 3.9 แสดงชุดคอมพิวเตอร์ควบคุม.....	43
รูปที่ 3.10 แสดงการจัดระบบแสงที่ใช้ PZT เป็นตัวเลื่อนเฟส.....	45
รูปที่ 3.11 แสดงภาพถ่ายของระบบแสงที่วิเคราะห์ข้อมูลแบบฟูรีเยร์ย้อนกลับแบบเร็ว.....	45
รูปที่ 3.12 แสดงภาพถ่ายของระบบแสงที่ใช้วัดเกจบล็อกสองชิ้น.....	46

รูปที่ 4.1 แสดงภาพของเกจบล็อกก่อนทำการวัด.....	48
รูปที่ 4.2 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมการเลื่อนเฟส.....	49
รูปที่ 4.3 แสดงภาพวีวรอยการแทรกสอด $I_1(x, y)$ .....	50
รูปที่ 4.4 แสดงภาพวีวรอยการแทรกสอด $I_2(x, y)$ .....	50
รูปที่ 4.5 แสดงภาพวีวรอยการแทรกสอด $I_3(x, y)$ .....	51
รูปที่ 4.6 แสดงภาพวีวรอยการแทรกสอด $I_4(x, y)$ .....	51
รูปที่ 4.7 แสดงการรวมภาพวีวรอยการแทรกสอดที่เกิดการเลื่อนเฟส .....	52
รูปที่ 4.8 แสดงภาพวีวรอยการแทรกสอดจากโปรแกรมการเลื่อนเฟส.....	53
รูปที่ 4.9 แสดงตำแหน่งของการวัดจากโปรแกรมการเลื่อนเฟส .....	53
รูปที่ 5.1 แสดงภาพของเกจบล็อกก่อนทำการวัด .....	61
รูปที่ 5.2 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมฟูรีเยร์ย้อนกลับ .....	62
รูปที่ 5.3 แสดงภาพที่ต้องการเป็นภาพแรกเริ่ม.....	63
รูปที่ 5.4 แสดงการกำหนดพื้นที่และตำแหน่งที่ต้องการ.....	64
รูปที่ 5.5 แสดงสัดส่วนพื้นที่ที่ต้องการ.....	64
รูปที่ 5.6 แสดงข้อมูลแปลงฟูรีเยร์.....	65
รูปที่ 5.7 แสดงการกรองสัญญาณฟูรีเยร์ย้อนกลับเร็ว.....	64
รูปที่ 5.8 แสดงการทำรีเกรสชันเส้นตรงของความต่างเฟส.....	65

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SI Units	หน่วยพื้นฐานของหน่วยวัดระบบสากล (International System of Units)
EURAMET	สมาคมมาตรวิทยาแห่งชาติยุโรป (European Association of - National Metrology Institutes)
PSI	อินเตอร์เฟอเมตรีแบบเลื่อนเฟส (Phase shift interferometry)
FFT	การแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว (Fast Fourier Transform)
PZT	ตัวเลื่อนเฟส เพียโซอิเล็กทริก ทราสดิวเซอร์ (Piezoelectric - Transducer )
SD	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)
$c_i$	สัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity coefficient)
$u_c$	ค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined standard uncertainty)
$U$	ค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty)
$k$	ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor)
$\nu$	ค่าองศาแห่งความอิสระ (Effective degree of freedom)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ยานยนต์ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ อุตสาหกรรมตัดเย็บเสื้อผ้า อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเส้น หรือแม้แต่มาตรวิทยาด้านมิติ การวัดความยาวจัดเป็นมาตรฐานที่สำคัญยิ่งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ยิ่งชิ้นงานมีค่าความละเอียดพิถีพิถัน (Tolerance) มากเท่าใดมูลค่าของชิ้นงานก็มากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้การวัดชิ้นงานที่ผลิตขึ้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เทคโนโลยีในการวัดที่มีความละเอียดและความถูกต้องเที่ยงตรงสูง

เกจบล็อก (Gauge Block) เป็นแท่งเทียบมาตรฐานที่ใช้ถ่ายทอดค่าความถูกต้องโดยตรงของความยาวในหน่วยเมตรซึ่งเป็นหน่วยมาตรฐานความยาวพื้นฐานในระบบหน่วย SI (International System of Units; SI Units) อีกทั้งเกจบล็อกยังใช้เป็นมาตรฐานสากลในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องของความยาวให้กับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดด้านมาตรวิทยามิติของ ISO 3650:1998 (International Organization for Standardization) [1] ซึ่งได้รับการยอมรับและมีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานด้านมาตรวิทยามิติและภาคอุตสาหกรรม

ความยาวมาตรฐานในระบบ SI ที่มาตรวิทยาด้านมิติใช้ในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องของเกจบล็อกนั้น ได้แก่ ความยาวด้านตัดขวางของเกจบล็อก เกจบล็อกที่ได้มาตรฐานในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องของความยาวดังกล่าวจะต้องมีด้านตัดขวางเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลให้ค่าระยะความยาวของเกจบล็อกเปลี่ยนไปมีหลายประการ อาทิ ค่าความยาวที่แตกต่าง (Deviation) จากค่าความยาวที่ระบุ (Nominal Length) บนชิ้นเกจบล็อก เกจบล็อกที่ใช้ถ่ายทอดค่าความถูกต้องด้านความยาวต้องมีค่าที่ถูกต้องตามเกณฑ์ของมาตรฐานที่กำหนดไว้ใน ISO 3650:1998 นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวแล้วการใช้งานและการดูแลรักษาชิ้นเกจบล็อกก็ส่งผลให้ค่าความถูกต้องของระยะความยาวของเกจบล็อกเปลี่ยนไปด้วย

เครื่องเปรียบเทียบเกจบล็อก (Gauge block comparator machine) เป็นเครื่องมือที่ใช้เปรียบเทียบความยาวของเกจบล็อกที่ไม่ทราบค่า (Unknown gauge block) กับเกจบล็อกอ้างอิง (Reference gauge block) เพื่อหาค่าความยาวที่แท้จริงของเกจบล็อกที่ไม่ทราบค่า นั้น เกจบล็อกอ้างอิงที่ใช้กับเครื่องมือเปรียบเทียบเกจบล็อกต้องเป็นเกจบล็อกมาตรฐานในระดับ K เท่านั้น ด้วยข้อจำกัดของการสอบเทียบหรือการเปรียบเทียบค่ามาตรฐานทำให้การเปรียบเทียบค่ามาตรฐานของ

เกจบล็อกดังกล่าวกระทำได้กับเกจบล็อกตั้งแต่ระดับ 0, 1 และ 2 ได้เท่านั้น ส่วนการวัดความยาวของเกจบล็อกระดับ K ซึ่งเป็นเกจบล็อกดีที่สุดในมาตรฐานเกจบล็อกนั้นจำเป็นต้องใช้ระบบการวัดเชิงแสงด้วยวิธีอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ตามมาตรฐาน ISO 3650:1998 ซึ่งปกติจะวัดเกจบล็อกมาตรฐานครั้งละหนึ่งชิ้นเท่านั้น

มาตรฐานการสอบเทียบเครื่องเปรียบเทียบเกจบล็อกของ EURAMET/cg-02/v.01 (European Association of National Metrology Institute) [2] ระบุว่าเกจบล็อกระดับ K ที่ใช้สอบเทียบเครื่องเปรียบเทียบเกจบล็อกนั้นต้องทำทั้งหมดหกคู่ได้แก่ เกจบล็อกคู่ 0.5 มิลลิเมตร กับ 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร กับ 1.005 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร กับ 1.01 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร กับ 4 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร ส่วน เกจบล็อกคู่ 6 มิลลิเมตร กับ 6 มิลลิเมตร นั้นมีรูปร่างลักษณะเป็นขั้นประสาน (Bridge-shaped gauge block) ซึ่งใช้ในการตรวจสอบเบื้องต้นของหัววัดด้านล่างของเครื่องเปรียบเทียบเกจบล็อกดังนั้นเกจบล็อกคู่ดังกล่าวจึงไม่ต้องสอบเทียบ

โดยทั่วไปการวัดความยาวเกจบล็อกระดับ K เริ่มจากการวัดเกจบล็อกด้วยเครื่องเปรียบเทียบเกจบล็อกเพื่อหาค่าจำนวนเต็มของระยะความยาวของชิ้นเกจบล็อกก่อน จากนั้นจึงนำเกจบล็อกชิ้นดังกล่าวไปวัดด้วยเครื่องมือวัดเชิงแสงซึ่งนิยมใช้ระบบการวัดแบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เพื่อให้ได้มาซึ่งการแทรกสอด แม้ว่าระบบการวัดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้วัดความยาวชิ้นเกจบล็อกนั้นมีมากมายหลายระบบแต่ทุกระบบใช้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน (Helium-Neon Laser) เนื่องจากแสงดังกล่าวเป็นแสงที่มีความถี่เดียว (Monochromatic Light) และมีความอาพันธ์ (Coherence) สูง เมื่อได้การแทรกสอดจากระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แล้วการวัดดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ซึ่งหลักการวิเคราะห์นั้นก็ขึ้นอยู่กับหลายวิธีและวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์การแทรกสอดได้แก่วิธีการวิเคราะห์แบบเลื่อนเฟส สำหรับระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่นิยมใช้นั้นได้แก่อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสันซึ่งทำงานได้โดยเริ่มจากการแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดออกเป็นสองลำแสง ส่วนที่หนึ่งจะเคลื่อนไปยังผิวของกระจกอ้างอิงที่มีความเรียบสูง แล้วสะท้อนกลับมารวมกับลำแสงอีกลำที่หนึ่งเดินทางไปสะท้อนกับชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งเป็นชิ้นเกจบล็อกที่ติดอยู่บนและแผ่นเรียบมาตรฐานที่ต้องการทดสอบ จนเกิดเป็นรบกวนการแทรกสอดขึ้น

จากการวิจัยที่ผ่านมามีกลุ่มผู้วิจัยใช้ระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สร้างรบกวนการแทรกสอดและวิเคราะห์รบกวนการแทรกสอดนั้นเพื่อหาระยะความยาวของเกจบล็อกมากมาย อาทิ Youichi Bitou และคณะ [3] วัดเกจบล็อกโดยใช้ระบบสแกนอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Gauge block measurement using a wavelength scanning interferometer) และ J. E. Decker และคณะ [4] ใช้ระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สอบเทียบเกจบล็อก (Gauge block calibration by optical interferometry at the national research council of canada) แต่การวัดเกจบล็อกด้วยวิธีอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ดังกล่าว



นิยมวัดเกจบล็อกที่ละชั้นเท่านั้น การวัดดังกล่าวส่งผลให้การวัดเปรียบเทียบจะต้องเกจบล็อกคู่ทำกันถึงสองครั้งจึงจะได้ค่าผลต่างของระยะความยาวของเกจบล็อก ส่งผลให้ค่าความไม่แน่นอนของผลต่างความยาวของเกจบล็อกที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการวัดทั้งสองครั้ง

ในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะลดค่าความไม่แน่นอนของการเปรียบเทียบคู่เกจบล็อกด้วยการหาความยาวที่แตกต่างของเกจบล็อกสองชั้นพร้อมกันเพียงครั้งเดียว ด้วยเทคนิคการเตรียมชิ้นงานที่ใช้จากการประกบเกจบล็อกคู่ลงบนแผ่นเรียบมาตรฐาน (Base plate) และใช้ระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน (Michelson) ที่มีแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนชนิดคงที่ (Stabilized He-Ne Laser) เป็นแหล่งกำเนิดแสง รวบรวมการแทรกสอดที่ได้จากระบบดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วรอยการแทรกสอดแบบเลื่อนเฟส (Phase shift method) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวัดความยาว (ความสูง) ของเกจบล็อกเดี่ยวที่มีระยะความยาวที่อยู่ในระดับนาโนเมตร โดยในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลการวัดระยะต่างของเกจบล็อกสองชั้นที่ทำพร้อมกันกับการวัดวัดเกจบล็อกที่ละชั้น

แต่จากงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ร่วรอยการแทรกสอดแบบการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับแบบเร็ว (Fast fourier transform หรือ FFT) พบว่าวิธีวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถหาความขรุขระของพื้นผิวได้ในระดับนาโนเมตร และเนื่องจากผลต่างของความยาวเกจบล็อกคู่อยู่ในระดับไม่กี่นาโนเมตรได้ ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีวิเคราะห์ร่วรอยการแทรกสอดแบบการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับแบบเร็วมาหาผลต่างของเกจบล็อกคู่ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดเกจบล็อกที่ละชั้นและการวัดเกจบล็อกแบบคู่ด้วยการวิเคราะห์แบบเลื่อนเฟสด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 วิเคราะห์ร่วรอยการแทรกสอดด้วยวิธีการเลื่อนเฟสกับเกจบล็อกคู่ เพื่อหาผลต่างของความยาวเกจบล็อกทั้งสองดังกล่าวขึ้น โดยใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน ที่มีแหล่งกำเนิดแสงคงที่เป็นเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน
- 1.2.2 วิเคราะห์ร่วรอยการแทรกสอดด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับแบบเร็วกับเกจบล็อกคู่ เพื่อหาผลต่างของความยาวเกจบล็อกสองชั้น โดยใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน ที่มีแหล่งกำเนิดแสงคงที่เป็นเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน
- 1.2.3 เปรียบเทียบผลการวัดเกจบล็อกคู่ที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการวัดดังกล่าวกับผลที่ได้จากการวัดเกจบล็อกที่ละชั้น

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เน้นการหาค่าผลต่างของความยาวระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น โดยใช้การวัดเชิงแสงด้วยระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสันและนำรีวรอยการแทรกสอดที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลื่อนเฟสและวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว ชิ้นงานที่เตรียมไว้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นเกจบล็อกคู่ที่ต้องการหาค่าผลต่างของความยาวซึ่งคิดไว้บนแผ่นเรียบมาตรฐานเดียวกัน สำหรับเกจบล็อกที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 3650:1998 กล่าวคือในงานวิจัยนี้จะหาผลต่างของความยาวเกจบล็อกห้าคู่ได้แก่ เกจบล็อกคู่ 0.5 มิลลิเมตร กับ 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร กับ 1.005 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร กับ 1.01 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร กับ 4 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร

จากนั้นในงานวิจัยนี้จะนำผลต่างของระยะความยาวและค่าความไม่แน่นอนในการวัดในแต่ละวิธี ของเกจบล็อกคู่ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องมือวัดเกจบล็อกที่วัดที่ละชิ้นด้วยแสงแบบอัตโนมัติที่เรียกว่า Automatic Gauge block interferometer รุ่น GBI ของบริษัท มิตูโตโย ที่ใช้ในสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งวัดคู่เกจบล็อกได้ที่ละชิ้นแล้วนำมาหาค่าผลต่างความยาวของเกจบล็อกคู่ที่ต้องการเปรียบเทียบในภายหลัง

### 1.4 คำนิยามศัพท์

- เกจบล็อกเดี่ยว หมายถึง เกจบล็อกชิ้นเดียวที่ติดบนแผ่นเรียบมาตรฐาน
- เกจบล็อกคู่ หมายถึง เกจบล็อกสองชิ้นบนแผ่นเรียบมาตรฐาน
- ค่าความยาวที่ระบุ (Nominal length) หมายถึง ค่าตัวเลขที่บอกขนาดความยาวของเกจบล็อกชิ้นนั้น

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้วิธีหาค่าผลต่างความยาวของเกจบล็อกที่ให้ค่าการวัดที่ถูกต้องแม่นยำและให้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดลดลง

1.5.2 ได้วิธีวิเคราะห์รีวรอยการแทรกสอดที่เหมาะสมในการหาผลต่างความยาวของเกจบล็อก

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เน้นการพัฒนาวิธีการวัดเชิงแสงและวิเคราะห์หาค่าผลต่างของความยาวระหว่างแถบสีกสองชั้น ด้วยเทคนิคอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคลสันและวิธีวิเคราะห์ร็วรอยการแทรกสอดแบบเลื่อนเฟสและวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับแบบเร็ว โดยมีขั้นตอนการวิจัยตามลำดับดังนี้

- 1.5.1 ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดด้วยเทคนิคอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคลสันและการวัดความยาวของแถบสีกแบบต่างๆ รวมถึงการวิเคราะห์ภาพร็วรอยการแทรกสอดที่ได้ด้วยวิธีการวัดแบบเลื่อนเฟสและการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว
- 1.5.2 ติดตั้งระบบแสงที่ใช้ในการวิจัยสำหรับวัดชั้นตัวอย่างที่เป็นแถบสีกคู่
- 1.5.3 วัดแถบสีกคู่โดยวิธีการแบบเลื่อนเฟสวิเคราะห์ร็วรอยการแทรกสอดเพื่อคำนวณหาผลต่างของความยาวแถบสีกคู่
- 1.5.4 วัดแถบสีกคู่โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพร็วรอยการแทรกสอดแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วเพื่อคำนวณหาผลต่างของความยาวแถบสีกคู่
- 1.5.5 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้จาก 1.4.3 และ 1.4.4 กับวิธีการวัดชั้นแถบสีกเดี่ยว
- 1.5.6 สรุปผลและเขียนรายงาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การแทรกสอดของแสง

ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงอธิบายได้ด้วยหลักการซ้อนทับ (Superposition) ของคลื่น ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่น 2 ขบวนขึ้นไปเคลื่อนรวมกัน การแทรกสอดที่ส่งผลให้แอมพลิจูดของคลื่นรวมเพิ่มขึ้นเรียกว่า การแทรกสอดแบบเสริม (Constructive interference) ส่วนการแทรกสอดที่ส่งผลให้แอมพลิจูดของคลื่นรวมลดลงเรียกว่า การแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive interference) ผลที่เกิดจากการแทรกสอดสังเกตได้จากภาพริ้วการแทรกสอด (Interference fringe)

เมื่อพิจารณาการแทรกสอดของแสง 2 ลำที่มีสนามไฟฟ้าเป็น  $\vec{E}_1$  และ  $\vec{E}_2$  โดยกำหนดให้คลื่นแสงทั้งสองเกิดจากแหล่งกำเนิดที่มีความถี่เดียวกัน แต่มีเฟสเป็น  $\phi_1, \phi_2$  ต่างกันตามลำดับ และเคลื่อนที่เป็นระยะทางที่แตกต่างกัน นั่นคือลำแสงทั้ง 2 ลำ มี  $\vec{k}_1$  และ  $\vec{k}_2$  ที่แตกต่างกัน [5], [6], [7] ดังสมการ

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \omega t + \phi_1) \quad (2-1)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \omega t + \phi_2) \quad (2-2)$$

เมื่อคลื่นแสงทั้งสองมารวมกันที่ตำแหน่งหนึ่งๆ สนามไฟฟ้ารวม  $\vec{E}$  ของคลื่นทั้งสองหาได้จาก

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (2-3)$$

เนื่องจากปริมาณของคลื่นแสงวัดได้ด้วยการใช้เครื่องมือวัดปริมาณความหนาแน่นของพลังงาน หรือ ความเข้มของแสง  $I$  ซึ่งเป็นปริมาณที่หาได้จาก

$$I = \langle E^2 \rangle \quad (2-4)$$

เมื่อ  $\langle x \rangle$  คือ ค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาใดๆ ของปริมาณ  $x$  และ  $E^2 = \vec{E} \cdot \vec{E}$  จากสมการ (2.3) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
E^2 &= \vec{E} \cdot \vec{E} \\
&= (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \\
&= E_1^2 + E_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \\
\text{หรือ} \quad \langle E^2 \rangle &= \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle
\end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (2-5)$$

เมื่อ  $I_{12}$  ความเข้มแสงที่เกิดจากการกระทำระหว่าง  $\vec{E}_1$  และ  $\vec{E}_2$  ซึ่งเป็นพจน์ที่ความเข้มแสงของคลื่นรวมเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ  $I_{12}$  เป็นพจน์ที่ทำให้เกิดการแทรกสอดของแสงนั่นเอง

จากสมการข้างต้นพบว่า

$$I_{12} = 2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle \quad (2-6)$$

โดยที่  $I_{12}$  จะมีค่าสูงสุด ถ้า  $\vec{E}_1$  และ  $\vec{E}_2$  ขนานกันและ  $I_{12}$  จะเป็นศูนย์ ถ้า  $\vec{E}_1$  และ  $\vec{E}_2$  ตั้งฉากซึ่งกันและกัน จากการพิจารณาในลักษณะนี้ทำให้ทราบว่า เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ 2 ลำมารวมกัน แสงรวมจะเกิดการแทรกสอดขึ้นจากองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของแสงที่มีทิศขนานกันนั่นเอง

ถ้าแทนค่า  $\vec{E}_1$  และ  $\vec{E}_2$  จากสมการ (2-1) และ (2-2) ลงไปในสมการ (2-6) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 &= (\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}) \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \omega t + \phi_1) \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \omega t + \phi_2) \\
&= \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} [\cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1) \cos \omega t + \sin(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1) \sin \omega t] \\
&\quad \times [\cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi_2) \cos \omega t + \sin(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi_2) \sin \omega t]
\end{aligned} \quad (2-7)$$

หรือ

$$\begin{aligned}
\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} [\cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1) \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi_2) + \sin(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1) \sin(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi_2)] \\
\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \phi_2) \\
\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle &= \frac{1}{2} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta \quad (2-8)
\end{aligned}$$

เมื่อ  $\langle \cos^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$ ,  $\langle \sin^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$ ,  $\langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = 0$  และ  $\delta = (\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2) + (\phi_1 - \phi_2)$   
เป็นความต่างเฟสระหว่าง  $\vec{E}_1$  และ  $\vec{E}_2$

จากสมการ (2-6) และ (2-8) ทำให้ได้ว่า

$$I_{12} = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos \delta \quad (2-9)$$

สำหรับค่า  $I_1$  และ  $I_2$  นั้น คำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของ  $\langle E_1^2 \rangle$  และ  $\langle E_2^2 \rangle$  ซึ่งพบว่า

$$\begin{aligned} I_1 &= \langle E_1^2 \rangle = \frac{1}{2} E_{01}^2 \\ I_2 &= \langle E_2^2 \rangle = \frac{1}{2} E_{02}^2 \end{aligned} \quad (2-10)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ (2-10) เราจึงเขียนสมการ (2-9) ได้ใหม่เป็น

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2-11)$$

เมื่อแทนสมการ (2-11) ลงในสมการที่ (2-5) ทำให้ได้ว่า

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2-12)$$

จากสมการ (2-12) พบว่าค่าของ  $I$  ขึ้นอยู่กับค่าของ  $\cos \delta$  กล่าวคือ ถ้า  $\cos \delta > 0$  จะทำให้  $I$  มีค่ามากกว่า  $I_1 + I_2$  ซึ่งเป็นการแทรกสอดแบบเสริมกัน แต่ถ้า  $\cos \delta < 0$  จะทำให้  $I$  มีค่าน้อยกว่า  $I_1 + I_2$  ซึ่งหมายถึงการเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันนั่นเอง

เมื่อพิจารณาค่า  $\delta$  หรือความต่างเฟสของคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสอง พบว่า  $\delta$  มีองค์ประกอบ 2 ส่วนด้วยกันคือ  $\phi_1 - \phi_2$  ซึ่งเป็นความต่างเฟสอันเนื่องมาจากเฟสเริ่มต้นและ  $\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2$  ซึ่งเป็นความต่างของค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ (Propagation constant vector) ถ้า  $\phi_1 - \phi_2$  มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบ หรือแหล่งกำเนิดทั้งสองเป็นแหล่งกำเนิดไม่อาพันธ์ (Incoherent source) ซึ่งกันและกันจะส่งผลให้  $\langle \cos \delta \rangle$  มีค่าเป็นศูนย์ หรือไม่มีการแทรกสอดเกิดขึ้น นั่นหมายความว่าสิ่งที่เรามองเห็นคือการแทรกสอดของแสงได้ แหล่งกำเนิดแสงทั้งสองจะต้องมีความอาพันธ์อยู่บ้างบางส่วนหรือ  $\langle \cos \delta \rangle$  ต้องมีค่าไม่เป็นศูนย์ ในส่วนของค่า  $\delta$  ที่เป็นผล

เนื่องจาก  $\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2$  นั้น จะมีค่าเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงของ  $\vec{r}$  ทำให้  $\cos \delta$  มีค่าเปลี่ยนจากค่าสูงสุดไปถึงค่าต่ำสุด ซึ่งมีผลทำให้เกิดภาพริ้วการแทรกสอดขึ้นได้เช่นกัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า ที่ตำแหน่งต่างๆ ผลลัพธ์ของ  $I$  รวมอาจจะน้อยกว่าหรือมากกว่า  $I_1 + I_2$  ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า  $I_2$  เมื่อพิจารณาความต่างเฟส  $\delta$  ที่เกิดขึ้นแล้วพบว่า

- 1)  $I$  มีค่ามากที่สุด เมื่อ  $\cos \delta = 1$  ซึ่งเป็นการแทรกสอดแบบเสริม หรือ

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2-13)$$

เมื่อ  $\delta = 2m\pi$  โดยที่  $m$  เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

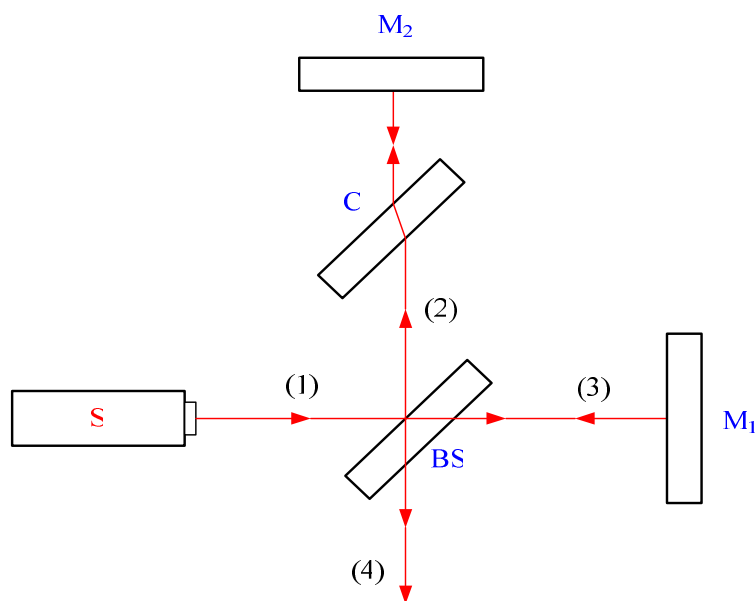
- 2)  $I$  มีค่าน้อยที่สุด เมื่อ  $\cos \delta = -1$  ซึ่งเป็นการแทรกสอดแบบหักล้าง หรือ

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2-14)$$

เมื่อ  $\delta = (2m+1)\pi$  โดยที่  $m$  เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

## 2.2 อินเตอร์เฟอเมตรีแบบไมเคลสัน (Michelson interferometry)

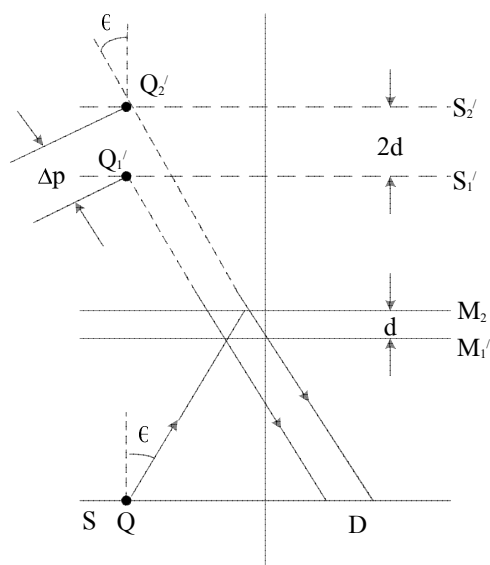
ไมเคลสัน เสนอหลักการของระบบอินเตอร์เฟอเมตรีแบบไมเคลสันขึ้นในปี พ.ศ. 2424 (ค.ศ.1881) [5] อินเตอร์เฟอเมตรีแบบไมเคลสันนี้เป็นการแทรกสอดแบบแบ่งหน้าคลื่นซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 กำหนดให้ S เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ลำแสง (1) ออกมา เมื่อลำแสงที่ (1) เคลื่อนไปตกกระทบกับตัวแยกลำแสง (Beam splitter ; BS) ลำแสงที่ (1) จะแยกออกเป็นลำแสง 2 ลำที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน คือ ลำแสงสะท้อน (2) และลำแสงส่งผ่าน (3) ลำแสงทั้งสองลำนี้เมื่อเคลื่อนออกจาก BS แล้ว ลำแสงที่ (2) และ (3) จะเคลื่อนไปสะท้อนที่กระจก  $M_2$  และ  $M_1$  ตามลำดับก่อนที่จะเคลื่อนกลับมาตามแนวเดิมสู่ BS อีกครั้งที่บริเวณ BS นี้ลำแสงที่ (2) จะทะลุผ่านและลำแสงที่ (3) จะรวมกันเป็นลำแสงที่ (4) ที่มีริ้วรอยการแทรกสอดขึ้น



รูปที่ 2.1 หลักการของอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคลสัน

การเลื่อนกระจกบานใดบานหนึ่งตามแนวลำแสงระหว่างกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  ที่ถูกปรับให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน จะก่อให้เกิดความต่างของทางเดินเชิงแสง (Optical path difference ; OPD) ของลำแสงที่ (2) และ (3) ได้ เมื่อพิจารณารูปที่ 2.1 อีกครั้งจะพบว่าลำแสงที่ (2) และ (3) มีการเคลื่อนที่ผ่าน BS ไม่เท่ากัน กล่าวคือลำแสงที่ (2) เคลื่อนผ่าน BS เพียง 1 ครั้ง ในขณะที่ลำแสงที่ (3) เคลื่อนผ่าน BS ผ่านถึง 3 ครั้ง เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวในระบบอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคลสัน จึงได้เพิ่มอุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวชดเชย (Compensator; C) ที่วางขนานกับ BS ไว้ระหว่างแนวลำแสงที่ (2) โดยให้ C เป็นแก้วชนิดเดียวกันและมีความหนาเท่ากับ BS ซึ่งมีผลให้ลำแสงที่ (2) มีการเคลื่อนที่ผ่านแผ่นแก้วชนิดเดียวกัน 3 ครั้งเท่ากับลำแสงที่ (3)





รูปที่ 2.2 แผนภาพจำลองทางเดินแสงที่ทำให้เกิดการแทรกสอดในระบบอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบไมเคลสัน

แม้ว่าลำแสงที่เกิดขึ้นในระบบอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบไมเคลสันในรูปที่ 2.1 มีแนวการเคลื่อนที่ 2 แนวที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน แต่ระบบดังกล่าวอาจเขียนแผนภาพจำลองที่ใช้แทนแนวทางเดินของแสงในรูปที่ 2.1 ให้มีแนวแกนของแสงเพียง 1 แกนได้โดยหมุนแนว  $SM_1$  ไปในทิศทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม 90 องศา รอบจุดตัดของลำแสงที่เกิดขึ้นในบริเวณ BS ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดย  $M_1'$  เป็นตำแหน่งใหม่ของกระจก  $M_1$  การเขียนแผนภาพแทนในลักษณะนี้ช่วยให้ง่ายต่อการพิจารณาความต่างของทางเดินเชิงแสงของลำแสงที่ (2) และ (3) ซึ่งตำแหน่งของ  $M_2$  อาจอยู่ได้ทั้งก่อนหลัง หรือเท่ากันกับตำแหน่งของ  $M_1'$  พอดี ถ้า  $M_1'$  อยู่ห่างจาก  $M_2$  เป็นระยะ  $d$  และ  $S_1'$  กับ  $S_2'$  เป็นภาพเสมือนที่เกิดจากกระจก  $M_1'$  และ  $M_2$  ตามลำดับ จะได้ว่าระยะที่  $S_1'$  ห่างจาก  $S_2'$  มีค่าเป็น  $2d$  และเมื่อพิจารณาแสงจากจุด  $Q$  บนแหล่งกำเนิดแสง  $S$  แสงดังกล่าวจะสะท้อนจากทั้ง  $M_1'$  และ  $M_2$  ลำแสงสะท้อนทั้งสองนี้เสมือนเป็นลำแสงจากภาพเสมือน  $Q_1'$  และ  $Q_2'$  ของจุด  $Q$  ที่เกิดที่ตำแหน่งของ  $S_1'$  และ  $S_2'$  ตามลำดับ และเคลื่อนเข้าสู่ตัวรับภาพ  $D$  โดย  $Q_1'$  และ  $Q_2'$  นี้เกิดจากระยะห่างระหว่าง  $S_1'$  และ  $S_2'$  มีค่าเท่ากับ  $2d$  ดังนั้นความต่างของทางเดินเชิงแสงของลำแสงสะท้อนทั้งสองจึงมีค่าเป็น

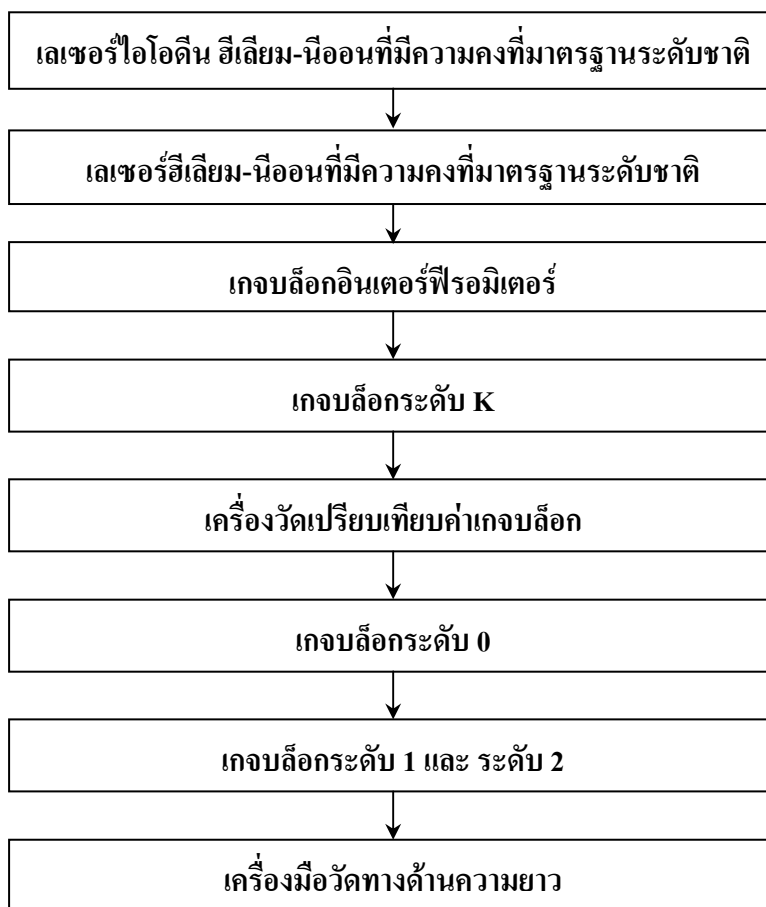
$$\Delta p = 2d \cos \theta \quad (2-15)$$

เมื่อ  $\theta$  เป็นมุมที่ลำแสงตกกระทบบนหน้าผิวตั้งฉากกับแนวตั้งฉากกับกระจก  $M_1$  ในกรณีที่แสงตกกระทบบนแนวตั้งฉากกับกระจก  $M_1$  จะได้  $\Delta p = 2d$  ซึ่งมีความหมายว่าถ้ากระจก  $M_1$  กับ  $M_2$  อยู่ห่างจากตัวแยกลำแสงเป็นระยะที่ต่างกันเท่ากับ  $d$  เมื่อมีแสงจากตัวแยกลำแสงเคลื่อนไปตกกระทบบน  $M_1$  และ  $M_2$  ในแนวตั้งฉากกับกระจกแล้ว แสงที่สะท้อนกลับมาไปพบกันที่ตัวแยกลำแสงจะมีระยะต่างกันเป็น  $2d$  ซึ่งรั้วรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะสังเกตเห็นได้ก็ต่อเมื่อความต่างของทางเดินเชิงแสงของลำแสงมีค่าน้อยกว่าความยาวอาพันธ์ของแสงเท่านั้น

### 2.3 มาตรฐานค่าของเกจบล็อก

เกจบล็อกที่ผลิตออกมาทุกชิ้นจะมีค่าความยาวที่ระบุที่ขึ้นเกจบล็อก ค่าความยาวดังกล่าวจะต้องผ่านการสอบเทียบค่าเพื่อให้รู้ค่าที่แท้จริงของเกจบล็อกชิ้นนั้นว่ามีความถูกต้องแม่นยำเพียงใด ทั้งนี้วัสดุที่นำมาผลิตเกจบล็อก กรรมวิธีการผลิต รวมถึงรูปร่างและลักษณะการใช้งานของเกจบล็อกจะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3650:1998 ด้วย และด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเน้นการหาค่าผลต่างของความยาวของกลุ่มเกจบล็อก ซึ่งเป็นมาตรฐาน EURAMET/cg-02/v.01 ที่กำหนดให้เปรียบเทียบความยาวของกลุ่มเกจบล็อกทั้งสี่กลุ่ม เนื่องจากกลุ่มเกจบล็อกทั้งสี่กลุ่มจะเป็นมาตรฐานถ่ายค่าความถูกต้องให้กับเครื่องวัดเปรียบเทียบค่าเกจบล็อกตามมาตรฐาน EURAMET/cg-02/v.01 และค่าของกลุ่มเกจบล็อกที่ใช้จะต้องมีความแม่นยำสูงด้วย เพราะเหตุนี้การใช้เกจบล็อกระดับ K และระดับ 0, 1 และ 2 จึงมีความสำคัญต่อการถ่ายค่าความถูกต้องให้กับเครื่องเปรียบเทียบค่าเกจบล็อกดังกล่าวข้างต้น รวมทั้งยังใช้เป็นมาตรฐานในการถ่ายค่าความถูกต้องไปยังเครื่องมือวัดด้านความยาวอื่นๆ ด้วย

เกจบล็อกตามมาตรฐาน ISO 3650:1998 ที่ใช้เป็นตัวถ่ายเทค่าความยาวมาตรฐานซึ่งเป็นหน่วยพื้นฐาน 1 ใน 7 หน่วยของระบบ SI (International System of Units) มีขั้นตอนการสอบกลับค่ามาตรฐานความยาว (Traceability of meter) ดังแผนภาพที่แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพขั้นตอนการสอบกลับได้ของมาตรฐานความยาว

ค่าความยาวของเกจบล็อกที่เป็นมาตรฐานระดับ (Grade) K, 0, 1 และ 2 และค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้มากและน้อยที่สุดตามข้อกำหนดของ ISO 3650:1998 แบ่งตามระดับเกรดแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของเงาปลอก (Limit deviation of length at any point from nominal length Maximum) ในมาตรฐาน ISO 3650:1998 [1]

ความยาว ที่ระบุ *	สอบเทียบระดับ K **		ระดับ 0 **		ระดับ 1 **		ระดับ 2 **	
	ขอบเขตของ ผลต่างความ ยาวทุกจุด ของค่าความ ยาวที่ระบุ *** ± mm	เกณฑ์ ความคลาด เคลื่อนของ ความยาวที่มี การ เปลี่ยนแปลง **** μm	ขอบเขตของ ผลต่างความ ยาวทุกจุด ของค่าความ ยาวที่ระบุ *** ± μm	เกณฑ์ ความคลาด เคลื่อนของ ความยาวที่มี การ เปลี่ยนแปลง **** μm	ขอบเขตของ ผลต่างความ ยาวทุกจุด ของค่าความ ยาวที่ระบุ *** ± μm	เกณฑ์ ความคลาด เคลื่อนของ ความยาวที่มี การ เปลี่ยนแปลง **** μm	ขอบเขตของ ผลต่างความ ยาวทุกจุด ของค่าความ ยาวที่ระบุ *** ± μm	เกณฑ์ ความคลาด เคลื่อนของ ความยาวที่มี การ เปลี่ยนแปลง **** μm
0.5 < 10	0.2	0.05	0.12	0.1	0.2	0.16	0.45	0.3
10 < 25	0.3	0.05	0.14	0.1	0.3	0.16	0.6	0.3
25 < 50	0.4	0.06	0.2	0.1	0.4	0.18	0.8	0.3
50 < 75	0.5	0.06	0.25	0.12	0.5	0.18	1	0.35
75 < 100	0.6	0.07	0.3	0.12	0.6	0.2	1.2	0.35
100 < 150	0.8	0.08	0.4	0.14	0.8	0.2	1.6	0.4
150 < 200	1	0.09	0.5	0.16	1	0.25	2	0.4
200 < 250	1.2	0.1	0.6	0.16	1.2	0.25	2.4	0.45
250 < 300	1.4	0.1	0.7	0.18	1.4	0.25	2.8	0.5
300 < 400	1.8	0.12	0.9	0.2	1.8	0.3	3.6	0.5
400 < 500	2.2	0.14	1.1	0.25	2.2	0.35	4.4	0.6
500 < 600	2.6	0.16	1.3	0.25	2.6	0.4	5	0.7
600 < 700	3	0.18	1.5	0.3	3	0.45	6	0.7
700 < 800	3.4	0.2	1.7	0.3	3.4	0.5	6.5	0.8
800 < 900	3.8	0.2	1.9	0.35	3.8	0.5	7.5	0.9
900 < 1000	4.2	0.25	2	0.4	4.2	0.6	8	1

\* Nominal length

\*\* Calibration Grade K, 0, 1, 2

\*\*\* Limit deviation of length at any point from nominal length

\*\*\*\* Tolerance for the variation in length

## 2.4 เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่เสถียรความยาวคลื่น 632 นาโนเมตร (Stabilized Helium-Neon Laser 632.991432 nm)

เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนนิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงในระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบความยาวเกจบล็อก เนื่องจากเลเซอร์ดังกล่าวเป็นแสงที่เสถียรที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic Light) และมีความเป็นระเบียบหรือความเป็นอาพันธ์ (Coherence) สูง นอกจากนี้แสงดังกล่าวยังมีความเข้มแสงสูง มีการเคลื่อนที่แน่นอนและเคลื่อนที่ได้ไกลมาก เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนใช้ตัวกลางเลเซอร์ (Laser medium) เป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สฮีเลียม (Helium) และนีออน (Neon) ในอัตราส่วน 10 ต่อ 1 และมีแหล่งกำเนิดพลังงานสำหรับกระตุ้น (Pumping source) ที่กระตุ้นให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านและชนกับแก๊สตัวกลางเลเซอร์ที่บรรจุอยู่ในหลอดเลเซอร์ แสงเลเซอร์ที่ได้เป็นแสงในช่วงของแสงสีแดงที่มีช่วงความยาวคลื่นเป็น 632.991432 นาโนเมตร ค่าความยาวคลื่นนี้ได้มาจากการสอบเทียบตามวิธีมาตรฐานที่จัดทำขึ้นโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

## 2.5 วิธีวิเคราะห์หรือการแทรกสอด

วิธีวิเคราะห์หรือการแทรกสอดเพื่อให้ได้มาซึ่งผลต่างของความยาวของคู่เกจบล็อกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสองวิธีได้แก่

1. วิธีวิเคราะห์หรือการแทรกสอดด้วยวิธีการเลื่อนเฟส (Phase shift interferometer method)
2. การวิเคราะห์หรือการแทรกสอดด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว (Fast fourier transforms หรือ FFT)

วิธีวิเคราะห์ทั้งสองวิธีมีรายละเอียดดังนี้

### 2.5.1 วิธีวิเคราะห์หรือการแทรกสอดแบบการเลื่อนเฟส (Phase shift interferometer method)

ความยาวที่แตกต่างกันระหว่างคู่เกจบล็อกก่อให้เกิดการแทรกสอดที่เกิดขึ้นตามลักษณะภาพที่บันทึกได้ด้วยกล้องซีซีดี ซึ่งมีความเข้มที่ตำแหน่งต่างๆของภาพเป็นดังสมการ

$$I(x, y) = I_o + I' \cos[\phi(x, y) + \phi(t)] \quad (2-16)$$

เมื่อ  $\phi(x, y)$  คือ ความต่างเฟสที่ตำแหน่ง  $x, y$  ใดๆของภาพไปยังพื้นผิวของชิ้นงานส่วน  $\phi(t)$  คือ ความต่างเฟสที่เปลี่ยนไปตามระยะทางที่ชิ้นงานเปลี่ยนไป ซึ่งขึ้นกับเวลาที่แสงเคลื่อนที่ไปตกกระทบกับชิ้นงาน

ภาพที่เกิดจากการเลื่อนตำแหน่งของชิ้นงานตัวอย่างที่มี  $\phi(t)$  ต่างกันเท่ากับ 90 องศาของแต่ละภาพจะมีความเข้มซึ่งแสดงได้ด้วยสมการดังนี้ [8], [9], [10]

$$\text{ภาพที่ 1 } \phi(t) = 0$$

$$I_1(x, y) = I_o + I' \cos[\phi(x, y)] \quad (2-17)$$

$$\text{ภาพที่ 2 } \phi(t) = \pi/2$$

$$I_2(x, y) = I_o + I' \cos[\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}] \quad (2-18)$$

$$\text{ภาพที่ 3 } \phi(t) = \pi$$

$$I_3(x, y) = I_o + I' \cos[\phi(x, y) + \pi] \quad (2-19)$$

$$\text{ภาพที่ 4 } \phi(t) = 3\pi/2$$

$$I_4(x, y) = I_o + I' \cos[\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}] \quad (2-20)$$

จากความเข้มของภาพทั้งสี่ตามสมการ (2-17) ถึง (2-20) พบว่า  $\phi(x, y)$  ที่บริเวณต่างๆหาได้จาก การนำความเข้มที่ตำแหน่งต่างๆของภาพทั้งสี่ในตำแหน่งเดียวกันคำนวณตามสมการ

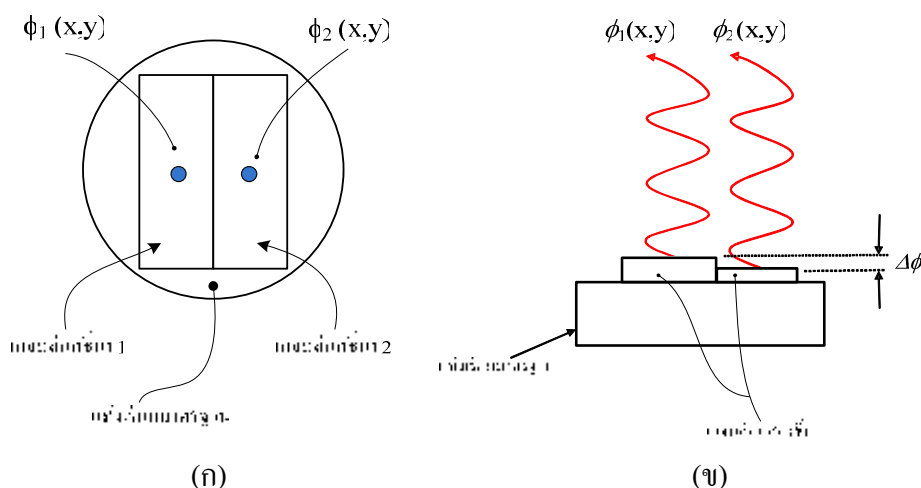
$$\tan[\phi(x, y)] = \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (2-21)$$

หรือ

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (2-22)$$

วิธีการดังกล่าวเป็นการหาเฟสด้วยการใช้ภาพสี่ภาพที่มีวิธีการแทรกสอดที่มีเฟส  $\phi(t)$  ต่างกันหรือที่เรียกว่าวิธีการเลื่อนเฟสแบบสี่เฟส (Four phase method) [8] นั่นเอง

เมื่อได้  $\phi(x, y)$  ที่ตำแหน่งต่างๆตามสมการที่ (2-22) แล้วเราสามารถหาเฟสที่ต่างกันของแถบลิธอกซ์ขึ้นที่หนึ่งและสองซึ่งเกิดจากความสูงของชั้นแถบลิธอกซ์ที่แตกต่างกันได้ โดยเริ่มจากการกำหนดตำแหน่งของเฟสที่เป็นตัวแทนเฟสของแถบลิธอกซ์ทั้งสอง ตำแหน่งที่นิยมใช้เป็นค่าเฟสของแถบลิธอกซ์ทั้งสองได้แก่ตำแหน่งที่อยู่กึ่งกลางของแถบลิธอกซ์ทั้งสองขึ้น ซึ่งในรูปที่ 2.4 (ก) เป็นภาพของ  $\phi(x, y)$  ที่คำนวณได้จากสมการ (2-22) และตำแหน่งที่ใช้เฟสในการคำนวณผลต่างความยาวของคู่แถบลิธอกซ์ซึ่งก็คือ  $\phi_1(x, y)$  และ  $\phi_2(x, y)$  ที่เป็นเฟสตัวแทนของแถบลิธอกซ์ขึ้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับนั่นเอง



รูปที่ 2.4 ก) ภาพตำแหน่งของเฟส  $\phi_1(x,y)$  และ  $\phi_2(x,y)$  ที่ใช้คำนวณค่าความต่างเฟสระหว่างผิวแถบลิธอกซ์ทั้งสองชั้นเมื่อมองจากด้านบนของชิ้นงานตัวอย่าง

ข) ค่าผลต่างของเฟสของแถบลิธอกซ์สองชั้น ( $\Delta\phi$ ) เกิดจากความสูงค่าที่ต่างกัน

เมื่อได้ค่าเฟสที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแถบลิธอกซ์ทั้งสองชั้นแล้วความต่างเฟส ( $\Delta\phi$ ) ที่เกิดจากความสูงค่าของแถบลิธอกซ์ทั้งสองชั้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) คำนวณได้จาก

$$\Delta\phi = [\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)] \quad (2-23)$$

จากการคำนวณตามสมการ (2-23) จะได้ค่าผลต่างของความยาวคู่เกจบล็อกสองชั้นกับ  $(\Delta\phi)$  ดังสมการ

$$\Delta l = \frac{\lambda}{4\pi} (\Delta\phi) \quad (2-24)$$

เมื่อ  $\Delta l$  คือ ค่าความยาวของเกจบล็อกสองชั้น  
 $(\Delta\phi)$  คือ ความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

### 2.5.2 การวิเคราะห์รีวิการแทรกสอดด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว (Fast fourier transforms ; FFT)

การวิเคราะห์รีวิการแทรกสอดที่เกิดขึ้นเพื่อหาผลต่างของความยาวคู่เกจบล็อกสองชั้น ด้วยวิธีการแบบฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว [11], [12], [13], [14], [15] เริ่มจากการพิจารณาความเข้มที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ เมื่อกำหนดให้  $y$  คงที่ ซึ่งเขียนแทนด้วยสมการ  $g(x)$  ที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง  $x$  ได้เป็น

$$g(x) = a(x) + b(x) \cos[2\pi f_o x + \phi(x)] \quad (2-25)$$

โดยที่  $g(x)$  คือ ความเข้มแสงรวมที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ  
 $a(x)$  คือ ความเข้มแสงรวมที่เกิดจากความเข้มของแสงลำที่หนึ่งและลำแสงที่สอง  
 $b(x)$  คือ ความเข้มแสงที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงลำที่หนึ่งและลำแสงที่สอง  
 $f_o$  คือ ความถี่เชิงตำแหน่ง (Spatial frequency) ของภาพรีวิการแทรกสอดที่ความเข้มของรีวิการแทรกสอดมีการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งแกน  $x$   
 $\phi(x)$  คือ ความต่างเฟสของลำแสงสองลำที่มีระยะทางเดินแสงที่แตกต่างกัน



วิธีการแปลงฟูรีเยร์เริ่มจากการเปลี่ยนพจน์  $b(x)\cos[2\pi f_0 x + \phi(x)]$  ให้อยู่ในรูปของผลคูณของคอนจูเกตจะได้

$$g(x) = a(x) + c(x)\exp(i2\pi f_0 x) + c^*(x)\exp(-i2\pi f_0 x) \quad (2-26)$$

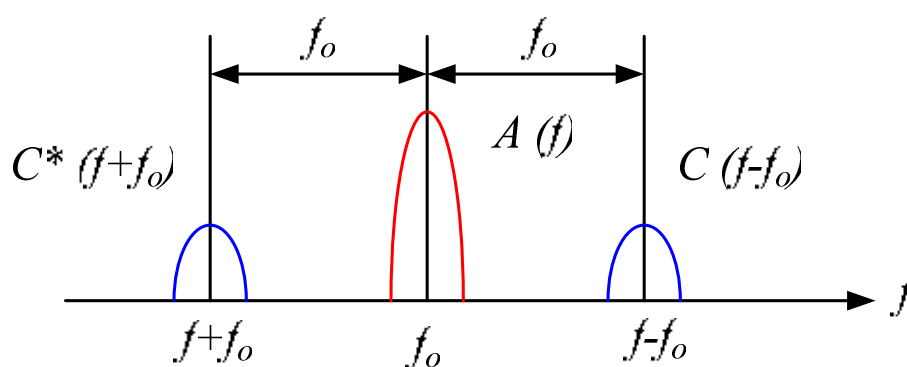
โดยที่

$$c(x) = \frac{1}{2}b(x)\exp(i\phi(x)) \quad (2-27)$$

เมื่อนำสมการ (2-25) มาแปลงฟูรีเยร์จะได้

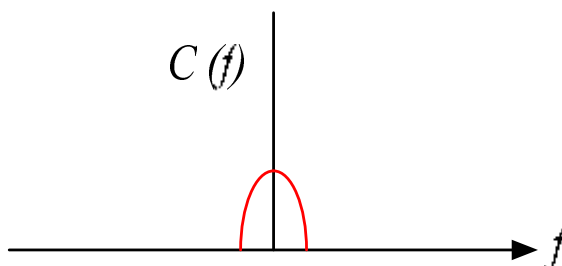
$$G(f) = A(f) + C(f - f_0) + C^*(f + f_0) \quad (2-28)$$

เมื่อ  $A(f)$  คือ พจน์ที่เป็นความถี่ค่ากลางซึ่งเกิดจากการแปลงฟูรีเยร์ของ  $a(x)$  ส่วน  $C^*(f + f_0)$  และ  $C(f - f_0)$  คือพจน์ที่เกิดจากการแปลงฟูรีเยร์ของพจน์ที่ 2 และ 3 และของสมการที่ (2.25) ตามลำดับกราฟของฟังก์ชันในสมการ (2.27) มีลักษณะดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟสมการ  $G(f)$  จากการแปลงฟูรีเยร์แล้วในโดเมนของความถี่  
เชิงตำแหน่ง

จากกราฟในรูปที่ 2.6 พบว่าปริมาณ  $A(f)$  เป็นปริมาณที่เกิดจากความเข้มแสงสองลำ ด้วยเหตุนี้ปริมาณดังกล่าวจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนเฟส  $\phi(x)$  ส่วน  $C^*(f + f_0)$  เป็นพจน์ที่เป็นคอนจูเกตของ  $C(f - f_0)$  ซึ่งมีค่า  $f_0$  เป็นลบซึ่งเป็นค่าที่ไม่ต้องใช้ในการหาค่า  $f_0$  ดังนั้นเราจึงกรองสัญญาณของพจน์  $C^*(f + f_0)$  และ  $A(f)$  ออกให้เหลือเพียงแต่พจน์ของ  $C(f - f_0)$  ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟของสัญญาณหลังจากกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการออกแล้ว

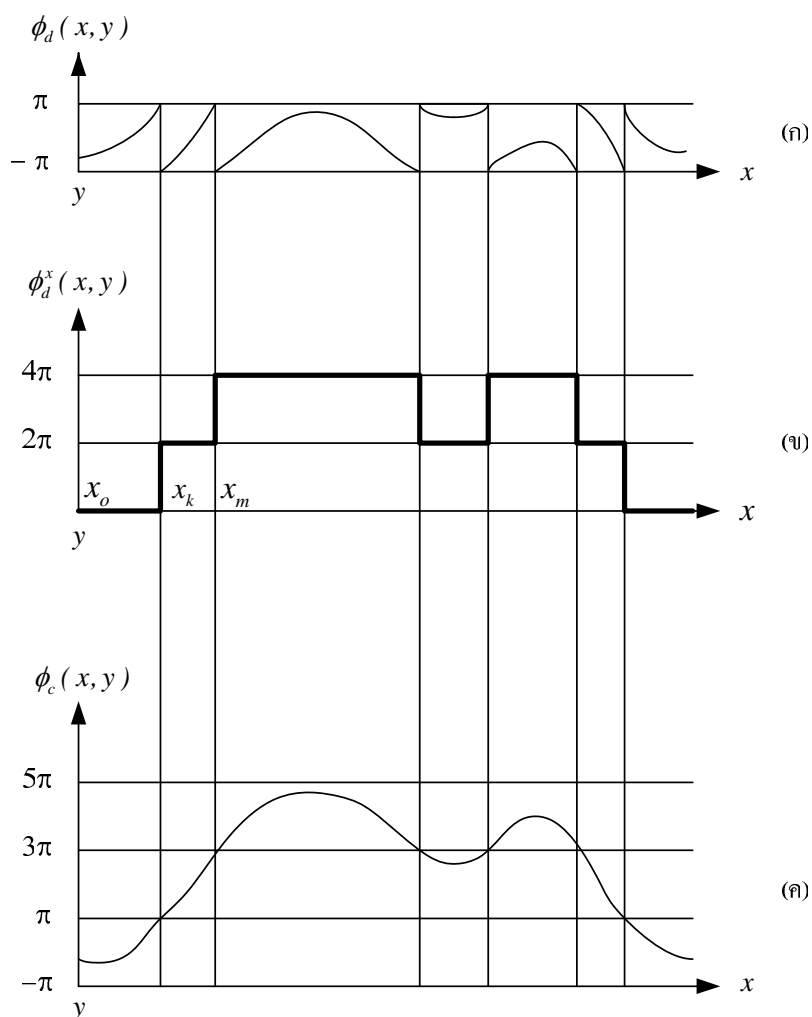
จากนั้นนำสัญญาณ  $C(f)$  มาแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับอีกครั้งพบว่า

$$c(x) = \frac{1}{2} b(x) \exp[i\phi(x)] \quad (2-29)$$

จากสมการ (2-28) ทำให้หา  $\phi(x)$  ได้จากความสัมพันธ์

$$\tan[\phi(x)] = \frac{\text{Im}[c(x)]}{\text{Re}[c(x)]} \quad (2-30)$$

แต่จากข้อจำกัดของฟังก์ชัน  $\tan^{-1}$  ทำให้ค่ามุมที่คำนวณได้จากสมการ (2-30) มีค่าอยู่ในช่วง  $-\pi$  ถึง  $\pi$  เท่านั้น ซึ่งค่า  $\phi(x)$  ที่ได้จากสมการดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) จึงไม่ใช่ค่าที่แท้จริงของ  $\phi(x)$  ดังนั้นค่า  $\phi(x)$  ที่ได้จากสมการ (2-30) จึงต้องผ่านกระบวนการการแปลงเฟสให้ต่อเนื่อง (Phase unwrap method) ดังในแสดงรูปที่ 2.8 (ข) และ (ค) ก่อนจึงจะสามารถนำไปใช้หาค่าความต่างเฟสระหว่างผิวเวกเตอร์ทั้งสองขึ้นได้



รูปที่ 2.8 (ก) ตัวอย่างของเฟสที่คำนวณได้จากสมการที่ (2-30)

(ข) ค่าของ  $\phi_o(x)$  ของรูป (ก)

(ค) ผลรวมเฟสจากรูป (ก) และ (ข)

กระบวนการแปลงเฟสให้ต่อเนื่อง เริ่มจากการพิจารณา  $\phi(x)$  ที่ได้จากสมการ (2-30) ซึ่งมีค่าเฟสอยู่ในช่วง  $-\pi$  ถึง  $\pi$  โดยกำหนดให้  $\phi_d(x)$  เป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่องซึ่งเมื่อนำไปรวมกับ  $\phi_o(x)$  จากรูปที่ 2.8 (ข) แล้วจะให้ผลเป็นเฟสที่ต่อเนื่อง  $\phi_c(x)$  ดังสมการ

$$\phi_c(x) = \phi_d(x) + \phi_o(x) \quad (2-31)$$

เพื่อที่จะหาค่า  $\phi_o(x)$  ในขั้นแรกเราจะเริ่มจากการหาค่าความต่างเฟสระหว่างจุดที่ใกล้เคียงกันก่อน ถ้ากำหนดให้ตำแหน่งที่พิจารณาเป็นตำแหน่งที่  $i$  และ  $i-1$  ตามลำดับความต่างเฟส  $\Delta\phi_d(x_i)$  จะหาได้จาก

$$\Delta\phi_d(x_i) = \phi_d(x_i) - \phi_d(x_{i-1}) \quad (2-32)$$

โดยที่  $i$  มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $n$  ซึ่งครอบคลุมทุกตำแหน่งของชิ้นงานตามแนวแกน  $x$  ค่าสัมบูรณ์ของความต่างเฟส  $|\Delta\phi_d(x_i)|$  จะมีค่าไม่เกิน  $2\pi$  แต่จะมีค่าเกือบ  $2\pi$  ณ ตำแหน่งดังกล่าว และเฟสที่ตำแหน่งทั้งสองจะมีการเปลี่ยนค่าเฟสอย่างกะทันหัน เมื่อ  $|\Delta\phi_d(x_i)|$  มีค่าเท่ากับ  $2\pi$  ด้วยเหตุนี้เราจึงกำหนดเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับค่าสัมบูรณ์ของการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นอย่างกะทันหันโดยมีเงื่อนไขว่าค่าดังกล่าวจะต้องมากกว่า  $2\pi$  หรือน้อยกว่า  $-2\pi$

ขั้นตอนต่อมาเราจะหาค่า  $\phi_o(x_i)$  ที่ทุกตำแหน่งของภาพ โดยในขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการกำหนดให้  $\phi_o(x_0) = 0$  จากนั้นสมมติให้

$$\phi_o(x_i) = \phi_o(x_0) \quad \text{ทุกค่า } i = 1, 2, 3, \dots, k-1 \quad (2-33)$$

เมื่อพบว่าเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างทันทีทันใดครั้งแรกที่ตำแหน่ง  $k$  โดยทิศทางในการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของเฟสมีค่ามากกว่า  $2\pi$  จะได้ว่า

$$\phi_o(x_k) = \phi_o(x_{k-1}) - 2\pi \quad (2-34)$$

ถ้าการเปลี่ยนเฟสดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า  $2\pi$  จะได้ว่า

$$\phi_o(x_k) = \phi_o(x_{k-1}) + 2\pi \quad (2-35)$$

จากนั้นทำซ้ำวิธีการดังกล่าวโดยกำหนดให้  $\phi_o(x_i) = \phi_o(x_k)$  ทุกค่า  $i = k+1, k+2, k+3 \dots m-1$  จนกระทั่งมีการเปลี่ยนอย่างทันทีทันใดของเฟสอีกครั้งที่ตำแหน่ง  $m$  ซึ่งจะเพิ่มหรือลดค่า  $2\pi$  ตามสมการ (2-34) และ (2-35) แบบเดียวกับที่ตำแหน่ง  $k$  และทำซ้ำกระบวนการนี้ไปเรื่อยๆ ก็จะได้ค่า  $\phi_o(x)$  ที่ตำแหน่งต่างๆออกมา ค่า  $\phi_o(x_k)$  ที่ได้ เมื่อนำไปแทนในสมการ (2-30) ก็จะหาค่าของเฟสต่อเนื่อง  $\phi_o(x_k)$  เมื่อได้ค่าเฟสต่อเนื่องในทุกๆ จุดของ  $x$  แล้วเราจะหาค่า  $\phi_1(x)$  และ  $\phi_2(x)$  ซึ่ง

เป็นตัวแทนของเฟสของพื้นผิวเกือบล็อกทั้งสองชั้นดังที่นิยามไว้ในรูปที่ 2.4 (ข) ได้โดยการหาสมการเชิงเส้นที่เป็นตัวแทนของเฟสที่ขึ้นกับตำแหน่ง  $x$  ของภาพจากข้อมูลเฟสทั้งสองช่วงของผิวเกือบล็อกสองชั้น ความต่างระดับกันระหว่างสมการเชิงเส้นทั้งสองช่วงที่ได้ก็คือ  $\Delta\phi$  ที่จะนำไปคำนวณค่าผลต่างความยาวของเกือบล็อกคู่  $\Delta l$  ดังสมการที่ (2-24) นั่นเอง

## 2.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) [16]

การรายงานผลการวัดทุกประเภท ต้องประกอบด้วยปริมาณที่วัดได้และค่าความไม่แน่นอนในการวัดซึ่งก็คือ ปริมาณที่บ่งบอกถึงความถูกต้องแม่นยำของผลการวัด และบอกลักษณะการกระจายเชิงสถิติของผลที่วัดได้ รวมถึงระดับความเชื่อมั่นในผลการวัด ระดับความเชื่อมั่นสากลของผลการวัดโดยปกติกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 95% และมีค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor):  $k = 2$  ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดมีแหล่งที่มาได้หลายแหล่ง อาทิ การวัดทวนซ้ำ (Repeatability) ใบรับรองผลการสอบเทียบ (Certificate) และ ผลกระทบเนื่องจากสภาวะแวดล้อม (Effects of environment)

องค์การระบบคุณภาพ (International Organization for Standardization; ISO) แนะนำให้ใช้ความไม่แน่นอนของการวัดเป็นมาตรการในการบอกความน่าเชื่อถือของผลการวัด โดยใช้หลักการพื้นฐานของ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) และ European Cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL) ซึ่งมีแนวคิดดังนี้

ปริมาณ “ $Y$ ” ที่เป็นผลจากการวัดจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณที่วัดได้ซึ่งเรียกว่า ปริมาณตัวแปรเหตุ (Input;  $x_i$ ) ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการวัดหรือ

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติเราไม่อาจทราบค่าที่แท้จริงของตัวแปรเหตุเหล่านี้ได้ เนื่องจากตัวแปรเหตุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวัดนั้นล้วนแล้วแต่มีค่าความไม่แน่นอนติดมาด้วยเสมอ ดังนั้นผลการวัด “ $Y$ ” จึงเป็นเพียงค่าประมาณ “ $y$ ” พร้อมกับค่าความไม่แน่นอนของการวัด “ $U$ ” ที่เกิดจากตัวแปรเหตุเหล่านั้นด้วย ในการรายงานผลปริมาณที่วัดได้ “ $Y$ ” จึงอยู่ในรูปของ

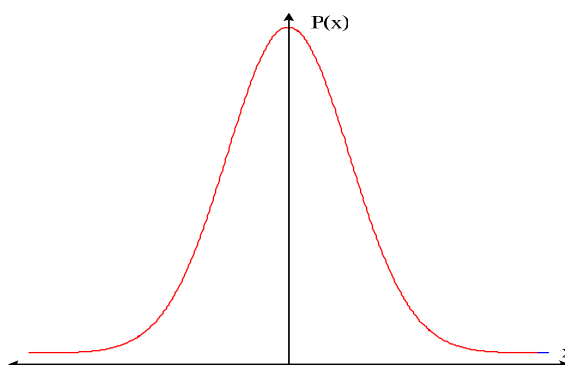
$$Y = y \pm U$$

ค่าความไม่แน่นอน  $U$  ได้มาจากการประเมินองค์ประกอบรวมของความไม่แน่นอน การประเมินค่าความไม่แน่นอนของปริมาณตัวแปรเหตุทั้งหมดในการสอบเทียบนั้นประกอบด้วยความไม่แน่นอน 2 ประเภท คือ ความไม่แน่นอนประเภท A (Type A) และ ประเภท B (Type B) การประเมินความไม่แน่นอนประเภท A นั้น ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากการวัดหลายๆ ครั้ง หรือการทวนซ้ำที่อยู่ในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขณะที่ประเภท B คือ ความไม่แน่นอนในการวัดที่เป็นผลมาจากองค์ประกอบอื่นๆ ในการสอบเทียบที่ไม่ใช่การประเมินทางสถิติ โดยจะอยู่ในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มาจากใบรับรองผลการสอบเทียบ หรือ ข้อกำหนดเฉพาะของเครื่องมือ เป็นต้น

ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด ผู้วัดจำเป็นต้องวินิจฉัยว่าความไม่แน่นอนนั้นมาจากปัจจัยมีสาเหตุใดบ้าง ปัจจัยแต่ละปัจจัยส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนขนาดเท่าใด และมีโอกาสมากน้อยเพียงไรที่จะก่อให้เกิดความไม่แน่นอนขนาดที่ระบุ ในการวินิจฉัยดังกล่าวผู้วัดจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลหรือสมมติฐานที่บ่งบอกถึงลักษณะการกระจายของค่าความไม่แน่นอนของแต่ละสาเหตุ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงลักษณะการกระจาย 2 แบบ คือ การกระจายแบบโค้งปกติ (Normal distribution) และ การกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular distribution)

- การกระจายแบบโค้งปกติ (Normal curve)

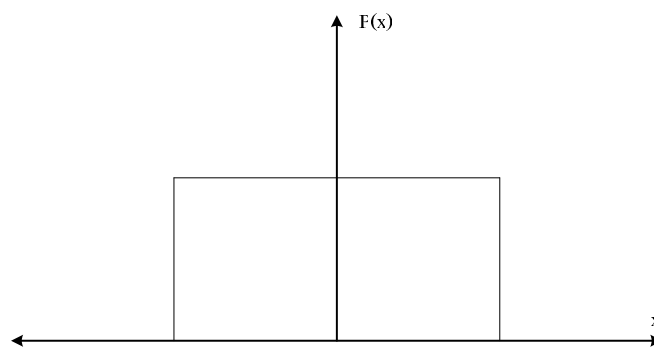
การกระจายแบบโค้งปกติมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำที่สมมาตรซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ในกรณีนี้ผลการวัดส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย ดังนั้นในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลชนิดนี้จึงใช้ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองหารด้วยตัวหาร (Divisor) มีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 2.9 ลักษณะการกระจายค่าความไม่แน่นอนแบบโค้งปกติ

- การกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular)

การกระจายแบบสี่เหลี่ยมมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ผลการวัดมีโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนมากหรือคลาดเคลื่อนน้อยในขอบเขตหนึ่งได้เท่าๆกัน เช่น ค่าของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง ค่าของอุณหภูมิของห้อง ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นงาน เป็นต้น ค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลชนิดนี้จะหารด้วยตัวหารที่มีค่าเท่ากับ  $\sqrt{3}$



รูปที่ 2.10 ลักษณะการกระจายค่าความไม่แน่นอนแบบสี่เหลี่ยม

เมื่อได้ค่าความไม่แน่นอนย่อยในแต่ละปัจจัยแล้ว ผู้วัดจำเป็นต้องนำค่าความไม่แน่นอนในแต่ละปัจจัยมาคำนวณค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined standard uncertainty;  $u_c(y)$ ) โดยอาศัยหลักเกณฑ์ว่า ค่าความไม่แน่นอนแต่ละสาเหตุนั้นจะต้องมีหน่วยเดียวกัน และมีระดับความเชื่อมั่นเท่ากัน และการรวมค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดจะต้องเป็นการรวมแบบรากที่สองของผลรวมของค่าที่ยกกำลังสอง (Root sum of the square) จากหลักเกณฑ์ดังกล่าวจะทำให้เขียนสมการการหาค่าของ  $u_c(y)$  ได้เป็น

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \quad (2-36)$$

เมื่อ  $c_i$  คือ สัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity coefficient) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้หน่วยของ

ตัวแปรเหตุ (Input) แต่ละตัวสามารถนำมารวมกันได้ผลลัพธ์สุดท้ายคือหน่วยของตัวแปรผล (Output)

$u(x_i)$  คือ ค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรเหตุแต่ละตัว

ในการรายงานผลค่าความไม่แน่นอนของการวัดจำเป็นต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95.5 % ถึง 99.7% ซึ่งเป็นการรายงานค่าความไม่แน่นอนส่วนขยาย (Expanded uncertainty;  $U$ ) หรือปริมาณที่กำหนดช่วงที่มีการกระจายของผลการวัดอยู่ภายใน ค่าเหล่านี้แสดงลักษณะของสิ่งที่วัดและคาดหวังว่าจะได้ค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดด้วยระดับความเชื่อมั่นสูง ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$U = k u_c(y) \quad (2-37)$$

เมื่อ  $k$  คือ ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้คูณกับค่าความไม่แน่นอนรวมเพื่อให้ได้ความไม่แน่นอนส่วนขยายค่า  $k$  นี้ขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นที่กำหนดโดยทั่วไป กำหนดให้ ค่า  $k = 2$  ถึง  $3$  ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.5% ถึง 99.7%

การประเมินค่าความไม่แน่นอนส่วนขยายในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ค่า  $u_c(y)$  มีการกระจายแบบโค้งปกติและนิยมนำรายงานค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95.5 % หรือตัวประกอบครอบคลุมที่เหมาะสมมีค่า  $k=2$  ซึ่งหมายความว่า ค่าองศาแห่งความอิสระ (Degree of freedom;  $\nu_{eff}$ ) มีค่าเท่ากับค่าอนันต์ (Infinity;  $\infty$ )

แต่ถ้าองศาแห่งความอิสระไม่เท่ากับค่าอนันต์เราจำเป็นต้องตรวจสอบค่าตัวประกอบครอบคลุมจากสมการของ Welch-Satterthwaite [17] ที่ว่า

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 u_i^4(x_i)}{\nu_i}} \quad (2-38)$$

เมื่อ  $u_i(y)$  คือ ค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรเหตุแต่ละตัว ซึ่งรวมค่าสัมประสิทธิ์ความไว

$\nu_i$  คือ ค่าองศาแห่งความอิสระของตัวแปรเหตุแต่ละตัว สำหรับความไม่แน่นอนประเภท A จะมีค่าเท่ากับ  $n-1$

$N$  คือ จำนวนตัวแปรเหตุ



ตารางที่ 2.2 ตารางการกระจายแบบที [16]

ค่าองศาแห่ง ความอิสระ $\nu$	$p = 68.27\%$	$p = 90\%$	$p = 95\%$	$p = 95.45\%$	$p = 99\%$	$p = 99.73\%$
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
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
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	1.01	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

จากนั้นจึงนำค่าองศาแห่งความอิสระและระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการไปเทียบกับตารางการกระจายแบบที (t-distribution) ที่แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 เพื่อหาตัวประกอบครอบคลุมค่า ( $k$ ) ที่เหมาะสมต่อไป

## 2.7 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการหาผลต่างของความยาวระหว่างเกจบล็อกสองชิ้น

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคลสัน [18] ที่ใช้วิธีวิเคราะห์รีวิการแทรกสอดที่เกิดขึ้นสองวิธี คือ การวิเคราะห์แบบการเลื่อนเฟสและแบบการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วเพื่อหาค่าผลต่างของความยาวเกจบล็อกคู่ ดังนั้นการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการหาความยาวที่แตกต่างกันของเกจบล็อกสองชิ้นที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละวิธีจึงมีแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนแตกต่างกันไป ดังมีรายละเอียดดังนี้

### 2.7.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส

วิธีการเลื่อนเฟสมีการประเมินค่าของความไม่แน่นอนของการวัดเกจบล็อกคู่ โดยมีสมการและแหล่งที่มาดังนี้

$$d = L - l \quad (2-39)$$

เมื่อ	$d$	คือ	ความยาวที่เบี่ยงเบนไปของเกจบล็อก (Deviation from nominal length of the gauge blocks)
	$L$	คือ	ค่าความยาวที่ระบุของชิ้นเกจบล็อก (Nominal length of the gauge block)
	$l$	คือ	ค่าความยาวผันแปร (Variability) ของแหล่งที่มาของเกจบล็อก โดยที่

$$l = l_x + l_\lambda + l_\varepsilon + l_\alpha + l_{\Delta t} + l_w + l_A + l_\Omega + l_{FP} \quad (2-40)$$

เมื่อ $u(l_x)$	คือ ค่าการวัดคู่เกจบล็อกซ้ำ 10 ครั้ง
$u(l_\lambda)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดความยาวคลื่นแสง
$u(l_\varepsilon)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนเศษส่วนของการแทรกสอด
$u(l_a)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเกจบล็อก
$u(l_{\Delta t})$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ
$u(l_w)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของการติดเกจบล็อกบนแผ่นเรียบมาตรฐาน
$u(l_A)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าความคลาดเคลื่อนของฟิวกระจก
$u(l_\Omega)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของการปรับมุมกระจก
$u(l_{FP})$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดความยาวคลื่นแสง

ค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดมีรายละเอียดของการคำนวณดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนของการวัดคู่เกจบล็อกซ้ำ 10 ครั้ง:  $u(l_x)$  คำนวณได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดคู่เกจบล็อกซ้ำ 10 ครั้ง ตามสมการ

$$u(l_x) = \sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-41)$$

เมื่อ

$\sigma_{n-1}$	คือ	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัด
$\bar{x}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของการวัด
$x_i$	คือ	ค่าที่ได้จากการวัดครั้งที่ $i$ หรือ $i = 1, 2, 3, \dots, n$
$n$	คือ	จำนวนครั้งของการวัด

- ค่าความไม่แน่นอนของการวัดความยาวคลื่นแสง:  $u(l_\lambda)$  เป็นค่าความไม่แน่นอนของการวัดความยาวคลื่นแสงที่ได้จากการสอบเทียบความยาวคลื่นแสงที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$l_\lambda = \frac{\text{Expanded Uncertainty}}{k} \quad (2-42)$$

$$l_\lambda = \frac{6.1 \times 10^{-9}}{2} \quad (2-43)$$

เมื่อ Expanded Uncertainty คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดความยาวคลื่นแสงจากการสอบเทียบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ในที่นี้มีค่าเท่ากับ  $6.1 \times 10^{-9}$  หรือ 0.061 นาโนเมตร  $k=2$  คือ ระดับความเชื่อมั่นที่ 95.45 % มีค่าองศาแห่งความเป็นอิสระเป็นอนันต์ (Infinity);  $\infty$  ดังแสดงในตารางที่ 2.2 การกระจายแบบที่

- ค่าความไม่แน่นอนเศษส่วนของการแทรกสอด:  $u(l_\varepsilon)$  โดย  $u(l_\varepsilon)$  คำนวณได้จากการสมการ

$$u(l_\varepsilon) = u(l_E) \times \frac{\lambda}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2-44)$$

เมื่อ  $u(l_E)$  คือค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากการทดลองที่วัดเศษส่วนของการแทรกสอดจำนวน 10 ครั้ง  $\lambda$  คือค่าความยาวคลื่นที่ได้จากการสอบเทียบ และ  $\sqrt{3}$  ตัวหารสำหรับการหาค่า  $u(l_\varepsilon)$  เนื่องจากการกระจายของข้อมูลดังกล่าวเป็นสี่เหลี่ยม

เพื่อที่จะหาค่า  $u(l_E)$  เราจึงต้องทดลองวัดส่วนของการแทรกสอดจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดซ้ำดังกล่าว ข้อมูลการวัดเศษส่วนการแทรกสอดซ้ำ 10 ครั้ง และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงได้ดังตาราง

จำนวนครั้งของการวัด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เศษส่วนการแทรกสอด (nm)	0.710	0.715	0.704	0.712	0.717	0.713	0.715	0.722	0.702	0.697	0.00760

จากตารางพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเศษส่วนการแทรกสอดที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.007602 นาโนเมตร เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมดังนั้นตัวหารที่ใช้จึงมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{3}$

$$u(l_E) = \frac{0.007602}{\sqrt{3}} = 0.0044 \quad (2-45)$$

เมื่อนำค่า  $u(l_E)$  และ  $\lambda$  แทนค่าในสมการ (2-44) พบว่า

$$u(l_\varepsilon) = 0.0044 \times \left( \frac{632.991432}{2} \right) \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2-46)$$

$$u = \frac{1.39}{\sqrt{3}} \text{ nm} \quad (2-47)$$

- ค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแถบสีก:  $u(l_\alpha)$  คือค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแถบสีกทั้งสองชั้นซึ่งคำนวณได้จากข้อมูล

$$u(l_\alpha) = \frac{u(\bar{\alpha}) \times L}{\sqrt{3}} \quad (2-48)$$

เมื่อ  $u(\bar{\alpha})$  คือ ค่าผลรวมของความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแถบสีกทั้งสองชั้น เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide) มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแถบสีกชั้นที่หนึ่งเท่ากับ  $(4.5 \pm 0.5) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  และแถบสีกชั้นที่สองเท่ากับ  $(4.5 \pm 0.5) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ดังนั้น  $u(\bar{\alpha}) = 0.5 \times 10^{-6} + 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

$L$  คือ ระยะความยาวของชั้นแถบสีกที่แตกต่างกันที่สุดในที่นี้คือคู่แถบสีก 1 มิลลิเมตร กับ 1.01 มิลลิเมตร ซึ่งต่างกัน 0.01 มิลลิเมตร และ  $\sqrt{3}$  เป็นค่าของตัวหารที่คิดว่าข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยม

จากสมการแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการ (2-48) ทำให้ได้ว่า

$$u(l_\alpha) = \frac{((0.5 + 0.5) \times 10^{-6}) \times 0.01 \text{ mm}}{\sqrt{3}}$$

$$u(l_\alpha) = \frac{(1 \times 10^{-6}) \times 0.01 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \quad (2-49)$$

- ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ:  $u(l_{\Delta t})$  เป็นค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอุณหภูมิห้องปฏิบัติการที่ทำการทดลอง ซึ่งหาได้จากสมการ

$$u(l_{\Delta t}) = \frac{\Delta t \times (\bar{\alpha}) \times L}{\sqrt{3}} \quad (2-50)$$

เมื่อ  $\Delta t$  คือ ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิห้องปฏิบัติการควบคุมไว้ที่  $1^\circ\text{C}$  โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเกจบล็อกสองชิ้น  $\bar{\alpha}$  เท่ากับ  $4.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$   
 $L$  คือ ระยะความยาวของชิ้นเกจบล็อกที่แตกต่างกันมากที่สุด ในที่นี้คือคู่เกจบล็อก 1 มิลลิเมตร กับ 1.01 มิลลิเมตร ซึ่งต่างกัน 0.01 มิลลิเมตร  
 และ  $\sqrt{3}$  คือตัวหารเมื่อพิจารณาว่าการกระจายของข้อมูลดังกล่าวเป็นแบบสี่เหลี่ยม

$$\text{ดังนั้น} \quad u(l_{\Delta t}) = \frac{1 \times (4.5 \times 10^{-6}) \times 0.01 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \quad (2-51)$$

- ค่าความไม่แน่นอนของการติดเกจบล็อกบนแผ่นเรียบมาตรฐาน:  $u(l_w)$  สำหรับการติดเกจบล็อกสองชิ้นกับแท่งเรียบมาตรฐานในแต่ละครั้งนั้นจะมีระยะการเปลี่ยนแปลงในผลการวัดเนื่องจาก Wringing film ที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นเกจบล็อกกับแผ่นเรียบมาตรฐาน ซึ่งคำนวณได้จากการประเมินโดยทดลองติดเกจบล็อกสองชิ้นบนแท่งเรียบมาตรฐานและวัดค่าที่จุดกึ่งกลางของชิ้นเกจบล็อกซ้ำกัน 4 ครั้ง เพื่อคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการติดคู่เกจบล็อกกับแผ่นเรียบมาตรฐานใน งานวิจัยนี้คำนวณค่าดังกล่าวได้เท่ากับ 11 นาโนเมตร เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมดังนั้นจึงใช้  $\sqrt{3}$  เป็นตัวหารสำหรับการหาค่า  $u(l_w)$  ซึ่งมีค่าเป็น

$$u(l_w) = \frac{11}{\sqrt{3}} \text{ nm} \quad (2-52)$$

- ค่าความไม่แน่นอนของค่าความคลาดเคลื่อนของผิวกระจก:  $u(l_A)$  เนื่องจากกระจกที่

ใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้ความเรียบผิวที่ผู้ผลิตกำหนดไว้มีค่าเท่ากับ  $\lambda/20$  ซึ่งเป็นเหตุให้ความยาวของเงาที่วัดได้ อาจถูกบิดเบือนหน้าคลื่นไป โดยที่ยังมีค่าความไม่แน่นอนของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความไม่เรียบผิวของกระจกอ้างอิงด้วย อย่างไรก็ตามผลจากการชดเชยการบิดเบือนหน้าคลื่นที่ทดสอบโดยการวัดสัดส่วนของรีฟลักซ์การแทรกสอดที่เป็นกระจกอ้างอิง ค่าชดเชยจากการบิดเบือนหน้าคลื่นหาได้เท่ากับ 6 nm เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนที่ได้ในกรณีนี้จึงมีตัวหารเป็น  $\sqrt{3}$  ด้วยเหตุนี้

$$u(l_A) = \frac{6nm}{\sqrt{3}} \quad (2-53)$$

- ค่าความไม่แน่นอนของการปรับมุมกระจก:  $u(l_\Omega)$  เนื่องจากการปรับมุมกระจกทำให้แสงมีความขนานในระบบเรียลไทม์ (Real time) แหล่งที่มาความไม่แน่นอนในกรณีนี้ได้แก่ รัศมีของรู ระยะความยาวของเลนส์จัดลำแสง (Collimator lens) และมุมกระจกซึ่งอาจเอียงไปในทิศทางอื่นได้ จากการทดลองปรับระยะมุมกระจก พบว่าความไม่ขนานของแสงอาจทำให้เฟสที่ได้ไม่สมบูรณ์มากที่สุดเท่ากับ  $2.847 \times 10^{-7}$  นาโนเมตร ซึ่งเนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยม ตัวหารในกรณีนี้จึงมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{3}$  ดังนั้น

$$u(l_\Omega) = \frac{2.847 \times 10^{-7} nm}{\sqrt{3}} \quad (2-54)$$

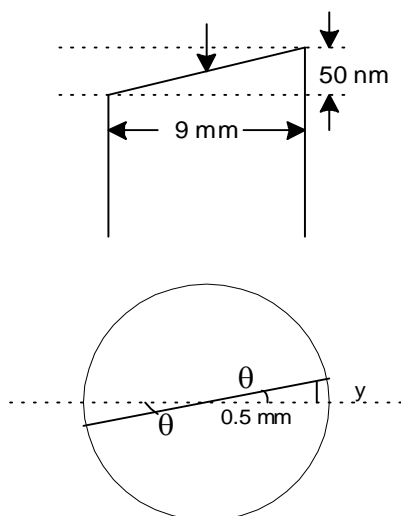
- ค่าความไม่แน่นอนของความไม่เรียบและความขนานของชิ้นเงาที่วัด;  $u(l_{FP})$  คำนวณได้จากปริมาณ  $u(l_G)$  ซึ่งประเมินจากการเบี่ยงเบนในเชิงเรขาคณิตที่วัดจากความไม่สมบูรณ์ของความขนานและความไม่เรียบผิว โดยจะพิจารณาความผันแปร (Inconstancy) ของระยะที่วัดตรงกึ่งกลางของเงาที่วัด สำหรับเงาที่วัดระดับ K ISO 3650:1998 ระบุไว้จะต้องมีค่าพิสัยความเผื่อของความเรียบผิวอยู่ที่ 50 nm โดยช่วงค่าความไม่แน่นอนของการวัดความเรียบผิวจะมีความกว้างของชิ้นเงาที่วัดเท่ากับ 9 mm ดังนั้น  $u(l_G)$  จึงคำนวณได้จากสมการ

$$\tan \theta = \frac{100 nm}{9 nm} = \frac{u(l_G)}{50 nm} \quad (2-56)$$

หรือ  $u(l_G)$  ซึ่งเป็นความผันแปรของระยะกึ่งกลางเนื่องจากความขนานและความเรียบผิวมีค่าเท่ากับ 28 nm

แต่เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นตัวหารสำหรับ  $u(l_{FP})$  นี้จึงมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{3}$  ดังนั้น  $u(l_{FP})$  จึงคำนวณได้จาก

$$u(l_{FP}) = \frac{u(l_G)}{\sqrt{3}} = \frac{2.8 \text{ nm}}{\sqrt{3}} \quad (2-55)$$



รูปที่ 2.11 ลักษณะของจุดกึ่งกลางของเกจบล็อกที่นำมาคำนวณ

## 2.7.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว

วิธีการวิธีการแบบฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วมีการประเมินค่าของความไม่แน่นอนของการวัดเกจบล็อกคู่ โดยมีสมการและแหล่งที่มาเช่นเดียวกับการประเมินค่าของความไม่แน่นอนของการวัดเกจบล็อกคู่ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส ดังสมการ

$$d = L - l \quad (2-57)$$

เมื่อ  $d$  คือ เป็นความยาวที่เบี่ยงเบนไปของเกจบล็อก (Deviation from nominal length of the gauge blocks)

$L$  คือ ค่าความยาวที่ระบุของชิ้นเกจบล็อก (Nominal length of the gauge block)



$l$  คือ ค่าความยาวผันแปรของแหล่งที่มาของเกจบล็อกแต่  $l$  นี้มีแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนแตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส กล่าวคือ

$$l = l_x + l_\lambda + l_\varepsilon + l_\alpha + l_{\Delta t} + l_F + l_A + l_\Omega + l_\phi \quad (2-58)$$

เมื่อ $u(l_x)$	คือ ค่าการวัดคู่เกจบล็อกซ้ำ 10 ครั้ง
$u(l_{C\lambda})$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดความยาวคลื่นแสง
$u(l_\varepsilon)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนเศษส่วนของการแทรกสอด
$u(l_\alpha)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเกจบล็อก
$u(l_{\Delta t})$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ
$u(l_F)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของความเรียบผิวของเกจบล็อกสองชิ้น
$u(l_A)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าความคลาดเคลื่อนของผิวกระจก
$u(l_\Omega)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของการปรับมุมกระจก
$u(l_\phi)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของมุมเฟส

สำหรับค่าความไม่แน่นอน  $u(l_x)$ ,  $u(l_\lambda)$ ,  $u(l_\varepsilon)$ ,  $u(l_\alpha)$ ,  $u(l_{\Delta t})$ ,  $u(l_A)$ ,  $u(l_\Omega)$  นั้นคำนวณได้เช่นเดียวกับวิธีที่แสดงไว้ในหน้า 29 ถึง หน้า 33 แต่มีแหล่งที่มาของความไม่แน่นอน  $u(l_F)$  และ  $u(l_\phi)$  เท่านั้นที่ใช้วิธีการพิจารณาที่แตกต่างกัน ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ค่าความไม่แน่นอนของความเรียบผิวของเกจบล็อกสองชิ้น:  $u(l_F)$  การวัดความเรียบผิวของเกจบล็อกสองชิ้นจำนวน 10 ครั้งเพื่อให้ได้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเรียบของเกจบล็อกทั้งสองชิ้น จากการทดลองพบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังกล่าวเท่ากับ 0.00910 นาโนเมตร และเนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมดังนั้นจึงใช้  $\sqrt{3}$  เป็นตัวหาร ด้วยเหตุนี้

$$u(l_F) = \frac{0.00910}{\sqrt{3}} \text{ nm} \quad (2-59)$$

- ค่าความไม่แน่นอนของความมุมเฟส  $u(l_\phi)$  เนื่องจากการคำนวณระยะความต่าง

ของกลุ่มเกจบล็อก คำนวณได้จาก

$$l(x) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x) \quad (2-60)$$

ดังนั้นจึงเกิดค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากมุมเฟสหรือ  $u(l_\phi)$  ที่เกิดจากการคำนวณขึ้น ซึ่งคำนวณได้จาก

$$u(l_\phi) = \frac{SD_{\Delta\phi}}{\sqrt{3}} \quad (2-61)$$

เมื่อค่า  $SD_{\Delta\phi}$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างระหว่างมุมเฟสจากทฤษฎีกับมุมเฟสจากการคำนวณ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และคิดว่าข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นในกรณีนี้จึงใช้  $\sqrt{3}$  เป็นตัวหารดังนั้น

$$u(l_\phi) = \frac{0.0009}{\sqrt{3}} \quad (2-62)$$

ตารางที่ 2.3 ตารางค่ามุมเฟสจากทฤษฎีกับมุมเฟสจากการคำนวณ

มุมเฟสจากทฤษฎี (rad)	มุมเฟสจากการคำนวณ (rad)	ค่าความแตกต่าง (rad)
0.1745	0.1741	0.0004
0.1963	0.1959	0.0004
0.2244	0.2239	0.0005
0.2618	0.2612	0.0006
0.3142	0.3134	0.0007
0.3927	0.3917	0.0009
0.5236	0.5223	0.0013
0.7854	0.7834	0.0020
1.5710	1.5680	0.0031
0.0000	0.0000	0.0000
-1.5710	-1.5680	0.0031
-0.7854	-0.7834	0.0020
-0.5236	-0.5223	0.0013
-0.3927	-0.3917	0.0009
-0.3142	-0.3134	0.0007
-0.2618	-0.2612	0.0006
-0.2244	-0.2239	0.0005
-0.1963	-0.1959	0.0004
-0.1745	-0.1741	0.0004
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0009

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

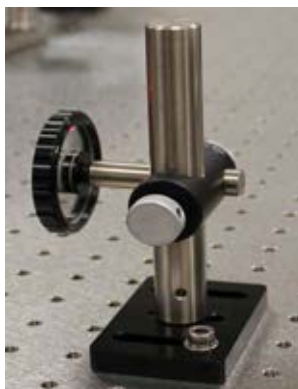
#### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (Stabilized He-Ne Laser) แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท Neoark Corporation รุ่น NEO-262-SF มีความยาวคลื่น 632.991432 nm ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่ใช้ นี้มีความยาวคลื่นที่เสถียรซึ่งเป็นผลจากการใช้หลักการของซีมาน (Zeeman-stabilized He-Ne laser) ทั้งนี้ความถูกต้องของความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์นี้อยู่ที่ระดับ  $10^{-9}$  นาโนเมตร ซึ่งได้จากผลการสอบเทียบกับเลเซอร์ไอโอดีน ฮีเลียม-นีออน (Iodine stabilized He-Ne laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นที่มีความเสถียรสูง เพื่อให้ระบบการวัดเกบสื่อกดังกล่าวสามารถสอบย้อนกลับไปที่หน่วยวัดสากลได้



รูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนและชุดควบคุมกระแสไฟฟ้า

3.1.2 ตัวกรองแสง (Filter Polarization Plate) ตัวกรองแสงทำหน้าที่กรองแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่มีความเข้มสูง ตัวกรองแสงนี้สำคัญยิ่งต่อภาพที่ถ่ายได้ เนื่องจากข้อจำกัดของความเข้มแสงที่กล้องถ่ายภาพรับได้ ถ้าความเข้มแสงมีมากหรือน้อยเกินไปภาพที่กล้องรับภาพได้อาจไม่คมชัดเท่าที่ควร

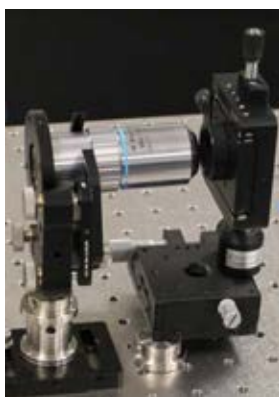


รูปที่ 3.2 ตัวกรองแสง (Filter/ Polarization Plate)

3.1.3 กระจกสะท้อนแสง (Reflector)

3.1.4 เลนส์รวมแสง (Objective Lens) เลนส์รวมแสงใช้ที่ใช้งานวิจัยนี้เป็นของ Mitutoyo ซึ่งมีค่าของระยะ  $f = 5$  มิลลิเมตร

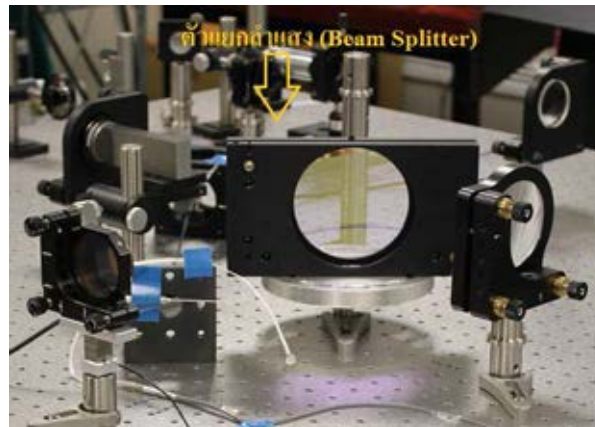
3.1.5 รูรับแสง (Pinhole)



รูปที่ 3.4 เลนส์รวมแสง(ซ้าย) ที่ใช้ร่วมกับรูรับแสง (ขวา)

3.1.6 เลนส์จัดลำแสง (Collimator Lens) เลนส์จัดลำแสงช่วยให้ลำแสงเป็นลำขนาน

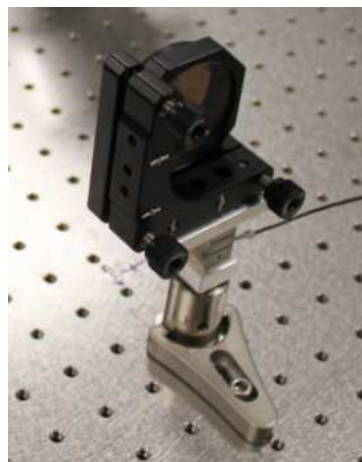
3.1.7 ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter) ตัวแยกลำแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ 50:50 ซึ่งทำหน้าที่แบ่งลำแสงออกเป็นสองส่วนเท่ากัน



รูปที่ 3.5 ลักษณะของตัวแยกลำแสงชนิดกลมแบน

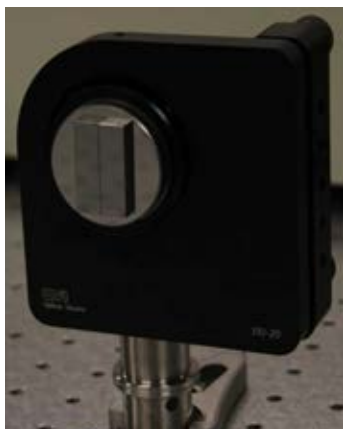
3.1.8 กระจกอ้างอิง (*Reference Mirror*) กระจกอ้างอิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกระจกเงาราบที่มีความเรียบเป็น  $\frac{\lambda}{20}$

3.1.9 เพียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์ (*Piezoelectric Transducer; PZT*) ใช้สำหรับเลื่อนระยะของกระจกอ้างอิงเพื่อถ่ายภาพรีวการแทรกสอดที่มีเฟสแตกต่างกัน PZT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลื่อนระยะได้ในระดับนาโนเมตร



รูปที่ 3.6 กระจกอ้างอิงที่อยู่บนตัวเพียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์

3.1.10 ชิ้นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ชิ้นตัวอย่างคือคู่เกจบล๊อคบนที่ติดบนแผ่นเรียบมาตรฐาน ในที่มีทั้งหมดห้าคู่ ได้แก่ เกจบล๊อคคู่ 0.5 มิลลิเมตร กับ 0.5 มิลลิเมตร เกจบล๊อคคู่ 1 มิลลิเมตร กับ 1.005 มิลลิเมตร เกจบล๊อคคู่ 1 มิลลิเมตร กับ 1.01 มิลลิเมตร เกจบล๊อคคู่ 4 มิลลิเมตร กับ 4 มิลลิเมตร เกจบล๊อคคู่ 100 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.7 ชิ้นงานตัวอย่างเกจบล็อกสองชั้นที่ติดอยู่บนแผ่นเรียบมาตรฐาน

3.1.11 แผ่นเรียบมาตรฐาน (*Base Plate* หรือ *Auxiliary Plate*) เป็นแผ่นเรียบมาตรฐานที่มีความเรียบของพื้นผิวไม่เกิน 0.025 ไมโครเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ISO 3650:1998 ที่กำหนดไว้

3.1.12 เลนส์รวมแสง (*Focusing Lens*) รวมแสงเลเซอร์ให้กล้องซีซีดีบันทึกภาพ



รูปที่ 3.8 เลนส์รวมแสง (ซ้าย) และกล้องซีซีดี (ขวา)

3.1.13 กล้องซีซีดี (*CCD Camera*) เป็นอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพรีวการแทรกสอดของแสงที่เกิดจากคู่เกจบล็อก

3.1.14 คอมพิวเตอร์ (*Computer*) ชุดคอมพิวเตอร์ใช้สำหรับควบคุมการทำงานบันทึกภาพรีวการแทรกสอดและประมวลผล

### 3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.2.1 การหาค่าความต่างของความยาวคู่เกอบล็อกด้วยวิธีการเลื่อนเฟส มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมเกอบล็อกห้าคู่ได้แก่ เกอบล็อกคู่ 0.5 มิลลิเมตร กับ 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร กับ 1.005 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร กับ 1.01 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร กับ 4 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร ติดลงบนแผ่นเรียบมาตรฐาน โดยแผ่นเรียบมาตรฐานหนึ่งชิ้นใช้สำหรับเกอบล็อกหนึ่งคู่เท่านั้น เกอบล็อกสองชิ้นซึ่งจะหาค่าความยาวระหว่างโดยอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคลสันดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยใช้กล้องซีซีดีเป็นตัวรับภาพ



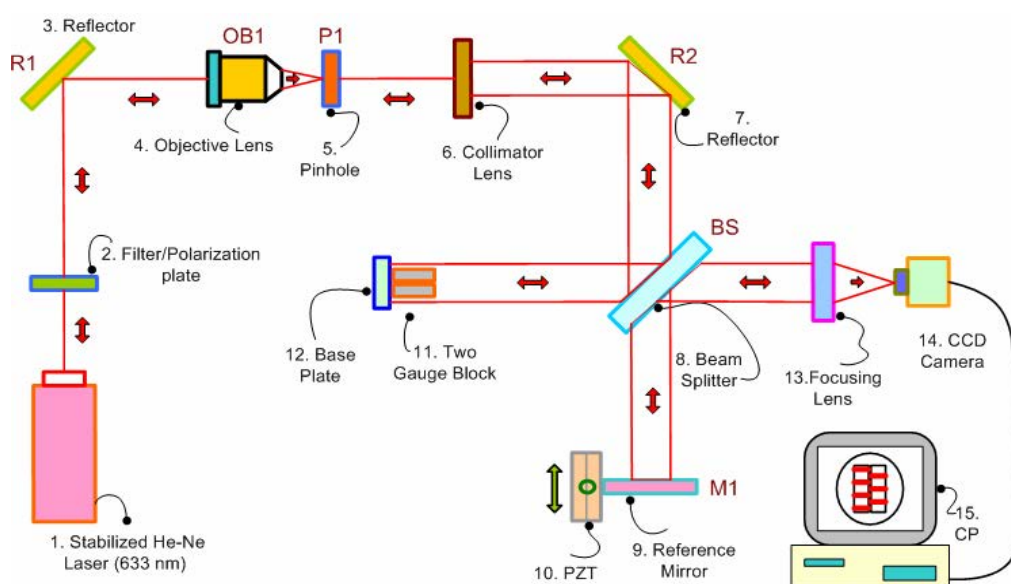
รูปที่ 3.9 ภาพคู่เกอบล็อกก่อนทำการวัด

#### 2. ติดตั้งระบบการวัดเกอบล็อกสองชิ้นแบบไมเคลสัน

ระบบอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคลสันติดตั้งอยู่บนโต๊ะทดลองทางแสงที่ป้องกันการสั่นสะเทือน ในลักษณะดังภาพที่ 3.12 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ได้แก่ เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนจะติดตั้งด้วยอุปกรณ์จับยึดและปรับระดับของแสงได้ โดยแสงจะส่งผ่านตัวกรองแสงเพื่อปรับระดับความเข้มของแสง จากนั้นแสงส่งผ่านไปยังกระจกสะท้อนแสงแล้วแสงสะท้อนไปยังเลนส์รวมแสง (Objective Lens) ทำให้แสงขยายบานออก จากนั้นลำแสงส่งผ่านไปยังรูรับแสง (Pinhole) แล้วแสงส่งผ่านไปที่เลนส์จัดลำแสง (Collimator Lens) ทำให้แสงเป็นลำแสงขนานและมีเส้นผ่านศูนย์กลางตามความต้องการได้และแสงส่งผ่านไปที่กระจกสะท้อนแสง (Reflector) แสงสะท้อนไปยังตัวแยกลำแสง (Beam Splitter) แบบ 50:50 เพื่อแยกลำแสงออกเป็น 2 ส่วน ในลำแสงส่วนที่ 1 เป็นลำแสงอ้างอิงจะ



เคลื่อนที่ไปสะท้อนกับกระจกอ้างอิง (Reference Mirror) ซึ่งจะติดอยู่กับตัวเลื่อนที่เรียกว่าเพียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์ PZT (Piezoelectric Transducer) จากนั้นลำแสงส่วนที่ 1 จะสะท้อนกลับไปยังตัวแยกลำแสง (Beam Splitter) ในลำแสงส่วนที่ 2 จะถูกส่งผ่านไปยังตัวเก็บล้องสองชั้นและแผ่นเรียบมาตรฐาน (Base Plate/Auxiliary Plate) แล้วสะท้อนกลับมายังตัวแยกลำแสง (Beam Splitter) เช่นกันและเมื่อลำแสงทั้งสองมารวมกันจะทำให้เกิดริ้วรอยของการแทรกสอดโดยดูจากลำแสงอีกส่วนหนึ่งสะท้อนผ่านตัวแยกลำแสง (Beam Splitter) แล้วเข้าเลนส์รวมแสง (Focusing Lens) จากนั้นแสงส่งผ่านไปยังตัวกล้องซีซีดี (CCD Camera) เพื่อส่งผ่านภาพของริ้วการแทรกสอดนี้ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อใช้โปรแกรมประมวลผลจากภาพที่ได้ต่อไปอุปกรณ์ที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



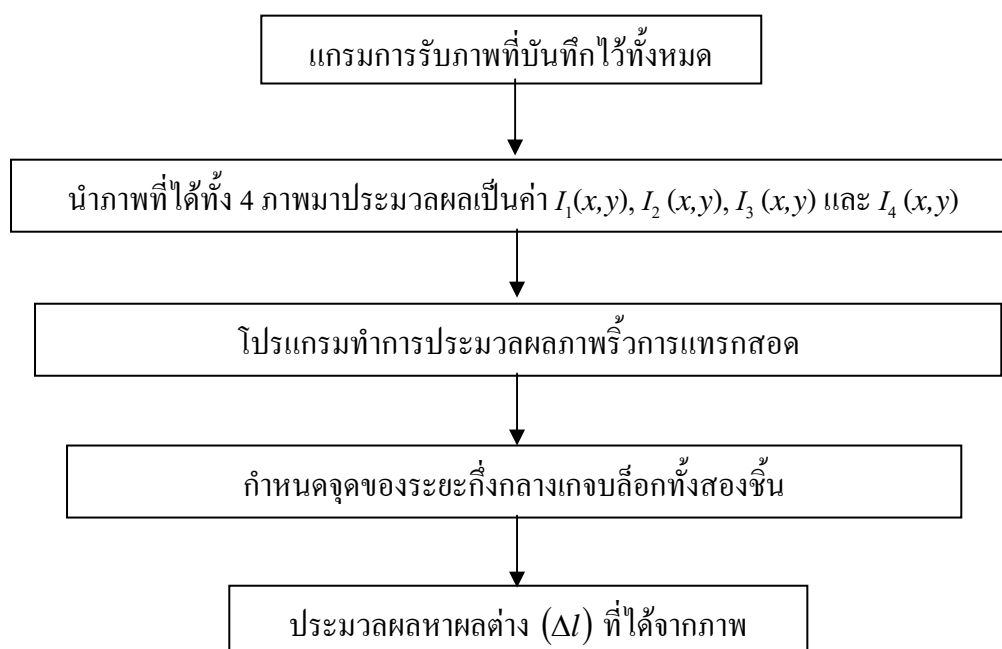
รูปที่ 3.10 การจัดระบบแสงที่ใช้ PZT เป็นตัวเลื่อนเฟส

3. การหาผลต่างความยาวด้วยวิธีการเลื่อนเฟสถ่ายภาพริ้วการแทรกสอดของคู่เก็บล้องทั้งหมด เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แต่ละชิ้นเรียบร้อยแล้ว จึงเปิดสวิตซ์อุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่างๆ เพื่อเตรียมพร้อม โดยจะดูที่ชุดควบคุมกระแสจะมีไฟสีเขียวติดแสดงว่าแสงที่ออกมามีความเสถียร ปรับลำแสงจนได้ตำแหน่งที่ลำแสงทั้ง 2 ลำซ้อนทับกันพอดี แล้วก็จะจัดให้ลำแสงดังกล่าวเข้าสู่กล้องซีซีดี จากนั้นปรับระยะของตัวจับยึดแผ่นเรียบมาตรฐานจนลำแสงทั้งสองเกิดริ้วรอยการแทรกสอดขึ้นแล้วจึงสั่งให้ เพียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์ (PZT) เคลื่อนที่ไปที่ละขั้นของระยะการเลื่อนซึ่งใช้

คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน โดยจะทำการเลื่อนเฟสเป็นสี่ครั้งด้วยกัน ในแต่ละครั้งจะเลื่อน 90 องศา ในการบันทึกภาพวีการแทรกสอดของแถบสีสองชั้นที่มีการเลื่อนเฟสทั้งสี่ครั้งจะบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ ในส่วนพิกเซลของภาพที่บันทึกโดยกล้องซีซีดีจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับแต่ละตัวของแหล่งกำเนิดแสงที่พื้นที่ต่างๆ กัน

#### 4. นำภาพมาประมวลผล

นำภาพที่ได้ทั้งหมดมาประมวลผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วีการแทรกสอดแบบการเลื่อนเฟส โดยมีขั้นตอนการทำงานดังแผนภาพที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 เมื่อได้ความต่างเฟสของแถบสีทั้งสองชั้นแล้วจึงนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่า  $\Delta l$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2-22) หน้า 17



รูปที่ 3.11 แผนผังการทำงานโปรแกรมการเลื่อนเฟส

#### 5. คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดด้วยวิธีการเลื่อนเฟส

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการหาความยาวที่แตกต่างกันของแถบสีสองชั้นในการวิเคราะห์แต่ละวิธีจึงมีแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนแตกต่างกันไปดังสมการ (2-28) ถึงสมการ (2-34)

6. การเปรียบเทียบผล

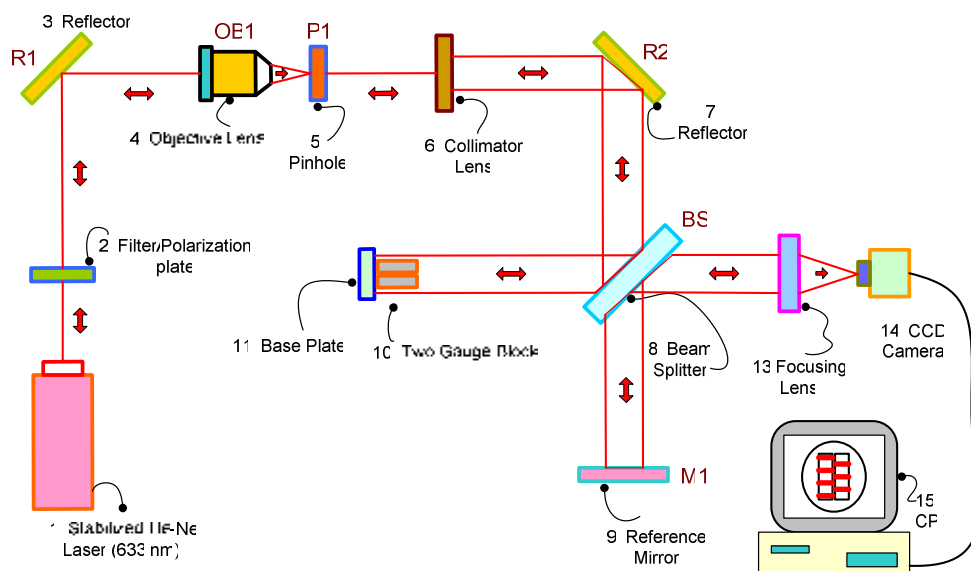
ผลการเปรียบเทียบข้อมูลด้วยวิธีการเลื่อนเฟสผลการวัดกับทางห้องปฏิบัติการความยาว สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) ซึ่งในการเปรียบเทียบผลการวัดจะทำการคำนวณค่า  $E_n$  ตามมาตรฐาน ISO/IEC Guide 43-1 [16] ตามสมการ (3-1)

$$E_n = \frac{lab_{result} - ref_{value}}{\sqrt{(U_{95}lab)^2 + (U_{95}ref)^2}} \tag{3-1}$$

3.2.2 การหาค่าความต่างของความยาวคู่งอบล็อกด้วยวิธีการแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมเกจบล็อกหัวคู่ ขั้นตอนนี้จะเหมือนกับหัวข้อที่ 3.2.1 ในขั้นตอนที่ 1
2. ติดตั้งระบบการวัดเกจบล็อกสองชิ้นแบบไมเคลสัน

การติดตั้งระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคลสันนี้จะเหมือนระบบการเลื่อนเฟสจะแตกต่างกันตรงที่ระบบการวิเคราะห์ข้อมูลแบบฟูเรียร์ย้อนกลับแบบเร็วและไม่ใช้ตัวเลื่อนเฟส PZT ดังแสดงในรูปที่ 3.12



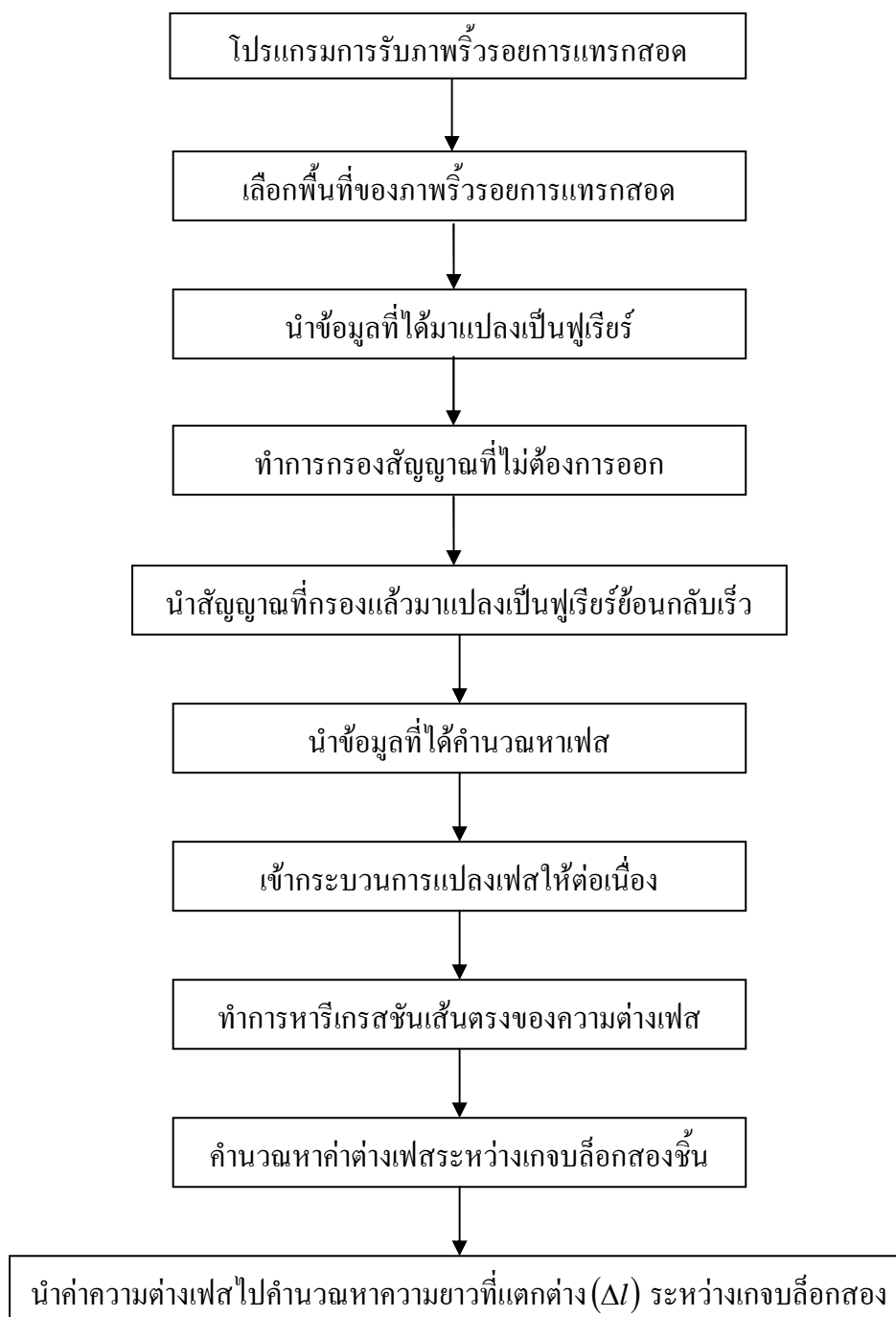
รูปที่ 3.12 การจัดระบบแสงที่วิเคราะห์ข้อมูลแบบฟูเรียร์ย้อนกลับแบบเร็ว

3. การหาผลต่างความยาวด้วยวิธีการวิเคราะห์รีวิรอยการแทรกสอดแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วของคู่เกจบล็อก

ขั้นตอนนี้เริ่มจากการเก็บภาพรีวิการแทรกสอดที่มีรีวิเอียงประมาณ 45 องศา หนึ่งภาพไว้ในคอมพิวเตอร์ สำหรับการวัดด้วยระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และใช้การวิเคราะห์ข้อมูลแบบฟูเรียร์ย้อนกลับแบบเร็ว

4. นำภาพมาประมวลผล นำภาพที่ได้ทั้งหมดมาประมวลผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์รีวิการแทรกสอดแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วซึ่งมีวิธีการทำงานดังรูปที่ 3.13 โดยหา  $\Delta l$  ได้จากสมการ (2-24) หน้า 18

การทำงานของโปรแกรม FFT เขียนเป็นแผนผังการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 แผนผังการทำงานของโปรแกรมฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว

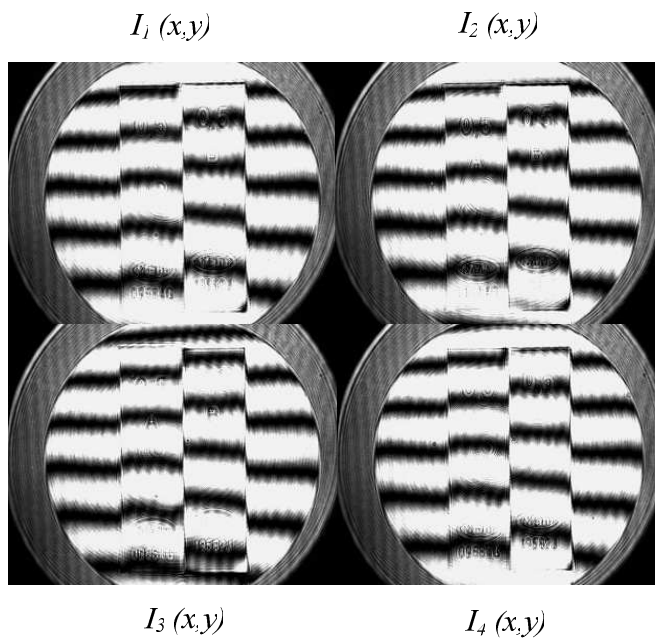
5. *คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดด้วยวิธีการแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว* การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการหาความยาวที่แตกต่างกันของแถบสีกสองชั้น ในการวิเคราะห์แต่ละวิธีจึงมีแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนแตกต่างกันไป ดังแสดงไว้ใน (2-29) ถึงหน้า (2-36)
6. *การเปรียบเทียบผล* ผลการเปรียบเทียบข้อมูลแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วกับการวัดกับทางห้องปฏิบัติการความยาว สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) ซึ่งในการเปรียบเทียบผลการวัดจะทำการคำนวณค่า  $E_n$  ตามมาตรฐาน ISO/IEC Guide 43-1 [16] ตามสมการ (3-1)
7. *การเปรียบเทียบผล* ผลการเปรียบเทียบข้อมูลวิธีการแบบการเลื่อนเฟสและวิธีการแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว ซึ่งในการเปรียบเทียบผลการวัดจะทำการคำนวณค่า  $E_n$  ตามมาตรฐาน ISO/IEC Guide 43-1 [16] ตามสมการ (3-1)

## บทที่ 4

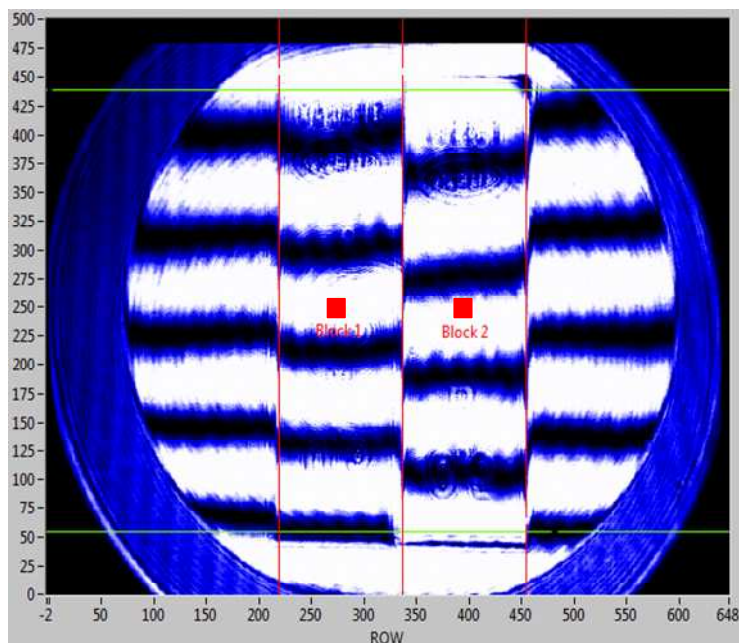
### ผลการทดลอง

#### 4.1 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมการเลื่อนเฟส

หลังการถ่ายภาพจากรีวการแทรกสอดของชิ้นตัวอย่างซึ่งเป็นคู่เกจบล๊อคจากอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบไมเคลสันด้วยกล้องซีซีดีมาวิเคราะห์ทั้ง 4 ภาพตามเทคนิคการเลื่อนเฟสโดยใช้โปรแกรม PSI ที่ประมวลผลตามสมการ (2-22) ซึ่งจะแปลงภาพให้เป็นค่าความเข้มแสง (Intensity) ของรีวรอยการแทรกสอดของแสงในแต่ละตำแหน่งพิกเซล  $(x,y)$  ของภาพทั้งหมด โดยภาพทั้งสี่ที่ตำแหน่ง  $(x,y)$  ใดๆจะมีค่าเป็น  $I_1(x,y)$ ,  $I_2(x,y)$ ,  $I_3(x,y)$  และ  $I_4(x,y)$  ตามลำดับเมื่อ  $I_1(x,y), I_2(x,y), I_3(x,y), I_4(x,y)$  คือ ความเข้มของรีวการแทรกสอดของคู่เกจบล๊อคที่  $\phi = 0, \phi = \pi/2, \phi = \pi, \phi = 3\pi/2$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 การรวมภาพรีวรอยการแทรกสอดที่เกิดจากการเลื่อนเฟส



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของการวัดจากโปรแกรมการเลื่อนเฟส

ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PSI แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยจุดสี่เหลี่ยมสองจุดคือตำแหน่งที่ต้องการหาค่าผลต่าง เมื่อได้  $\phi(x, y)$  ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามสมการที่ (2-22) แล้วเราสามารถหาเฟสที่ต่างกันของแถบสีที่หนึ่งและสองซึ่งเกิดจากความสูงของชิ้นแถบสีที่แตกต่างกันได้ ด้วยวิธีดังกล่าวทำให้ได้ค่าความต่างความยาวของแถบสี 5 คู่ด้วยระบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และวิธีการเลื่อนเฟสแสดงได้ดังตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 ผลการวัดจากวิธีการเลื่อนเฟส

เกจบล็อกสองชั้น mm	ผลต่างของเกจบล็อกสองชั้น ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส PSI
0.5 – 0.5	0.065 $\mu\text{m}$
1.0 – 1.005	4.803 $\mu\text{m}$
1.0 – 1.01	9.940 $\mu\text{m}$
4.0 – 4.0	0.095 $\mu\text{m}$
100 - 100	0.034 $\mu\text{m}$

ตารางที่ 4.2 ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชั้นขนาด 0.5 มิลลิเมตร กับ 0.5 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจาย ของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความ ไว	ค่าความไม่แน่นอน ของแต่ละอินพุท ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00060	ปกติ	1	1	-0.000600	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ชั้นเกจบล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าการบิดเกจบล็อกบนแท่งขนาน	0.01100	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.006351	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระจกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระจก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าความเรียบและความขนานของชั้น เกจบล็อก	0.00280	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001617	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม <sup>7</sup>		ปกติ			0.00693	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย <sup>8</sup>		$k = 2$			0.014	2.00

<sup>1</sup> Source of uncertainty

<sup>2</sup> Probability distribution

<sup>3</sup> Divisor

<sup>4</sup> Sensitivity coefficient

<sup>5</sup> Standard uncertainty

<sup>6</sup> Effective degree of freedom

<sup>7</sup> Combined standard uncertainty

<sup>8</sup> Expanded uncertainty

ตารางที่ 4.3 ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชั้นขนาด 1 มิลลิเมตร กับ 1.005 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจาย ของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอน ของแต่ละอินพุท ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00042	ปกติ	1	1	-0.000420	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ชั้นเกจบล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าการบิดเกจบล็อกบนแท่งขนาน	0.01100	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.006351	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระจกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระจก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าความเรียบและความขนานของชั้น เกจบล็อก	0.00280	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001617	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.00691	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.014	2.00

ตารางที่ 4.4 ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชั้นขนาด 1 มิลลิเมตร กับ 1.010 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน <sup>1</sup>	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจาย ของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอน ของแต่ละอินพุท ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00074	ปกติ	1	1	-0.000740	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ชั้นเกจบล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าการบิดเกจบล็อกบนแท่งขนาน	0.01100	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.006351	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระจกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระจก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าความเรียบและความขนานของชั้น เกจบล็อก	0.00280	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001617	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.00694	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.014	2.00

ตารางที่ 4.5 ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชั้นขนาด 4 มิลลิเมตร กับ 4 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจาย ของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอน ของแต่ละอินพุท ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00042	ปกติ	1	1	-0.000420	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ชั้นเกจบล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าการบิดเกจบล็อกบนแท่งขนาน	0.01100	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.006351	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระจกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระจก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าความเรียบและความขนานของชั้น เกจบล็อก	0.00280	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001617	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.00691	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.014	2.00

ตารางที่ 4.6 ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชั้นขนาด 100 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจาย ของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอน ของแต่ละอินพุท ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00048	ปกติ	1	1	-0.000480	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ชั้นเกจบล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าการบิดเกจบล็อกบนแท่งขนาน	0.01100	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.006351	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระจกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระจก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าความเรียบและความขนานของชั้น เกจบล็อก	0.00280	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001617	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.00691	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.014	2.00

ผลที่วัดได้จาก การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการเลื่อนเฟสและค่าความไม่แน่นอนขยายแสดงได้ดัง ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวัดและค่าความไม่แน่นอนขยายด้วยวิธีการเลื่อนเฟส

ความยาว ที่ระบุ (mm)	ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส PSI	
	ค่าที่วัด ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความไม่แน่นอนขยาย $k=2$ ( $\mu\text{m}$ )
0.5-0.5	0.065	0.014
1-1.005	4.803	0.014
1-1.01	9.940	0.014
4-4	0.095	0.014
100-100	0.034	0.014

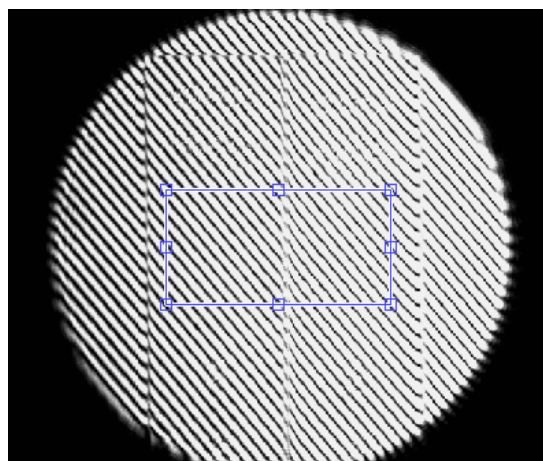
เมื่อเปรียบเทียบผลที่วัดได้จากตารางที่ 4.7 กับผลที่ใช้วิธีการเลื่อนเฟสกับการวัดเกจบล็อก ที่ละชั้นพบว่า มีค่าต่างกันดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการวัดเกจบล็อกคู่ระหว่าง สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กับ โปรแกรมการเลื่อนเฟส

ความยาว ที่ระบุ (mm)	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ		โปรแกรมการเลื่อนเฟส, PSI		$E_n$
	ค่าที่วัด ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความไม่แน่นอน ขยาย, $k=2$ ( $\mu\text{m}$ )	ค่าที่วัด ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความไม่แน่นอน ขยาย, $k=2$ ( $\mu\text{m}$ )	
0.5-0.5	0.063	0.028	0.065	0.014	0.1
1-1.005	4.779	0.028	4.803	0.014	0.8
1-1.01	9.905	0.028	9.940	0.014	1.0
4-4	0.092	0.028	0.095	0.014	0.1
100-100	0.047	0.028	0.034	0.014	0.4

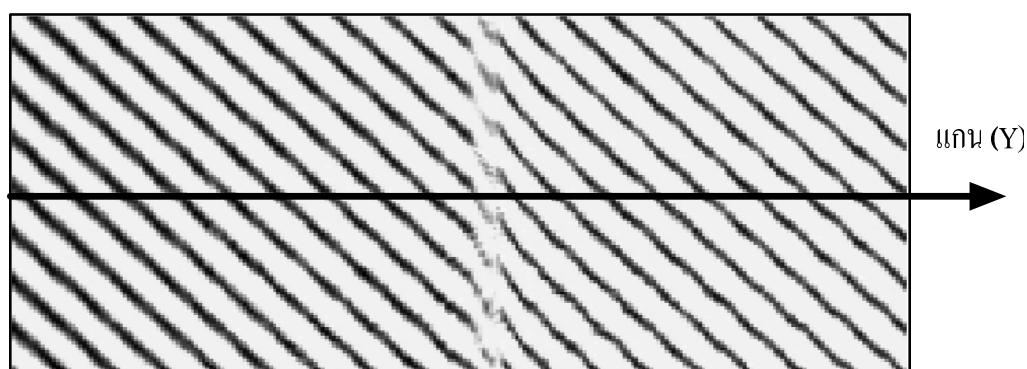
## 4.2 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลแบบแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว

งานวิจัยในส่วนนี้เริ่มจากการนำภาพวีวรอยการแทรกสอดได้ที่ส่งผ่านกล้อง CCD บันทึกลงในคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมจะรับภาพแรกเริ่มก่อน จากนั้นโปรแกรมวิเคราะห์จะให้กำหนดพื้นที่และตำแหน่งของภาพวีวรอยการแทรกสอดที่ต้องการหาค่าความแตกต่างของแถบสีออกสองชั้น ดังรูปที่ 4.4 และสัดส่วนพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.5



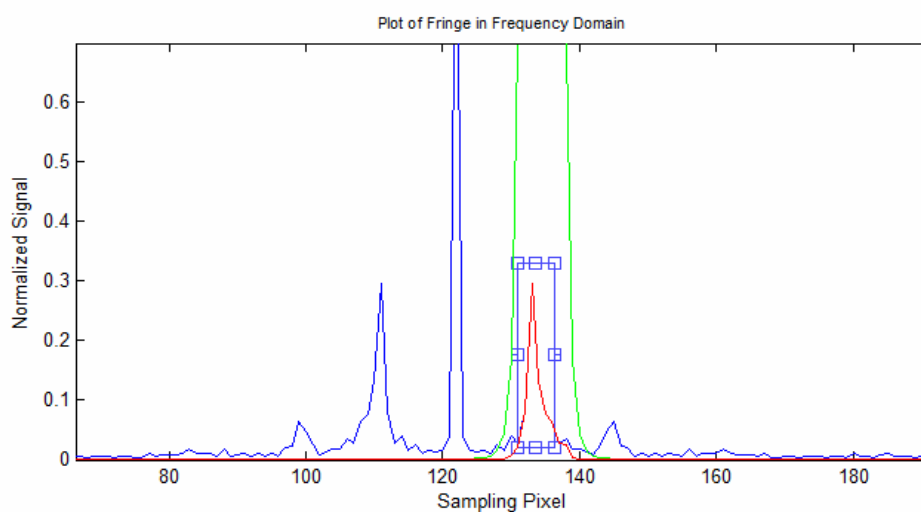
รูปที่ 4.4 การกำหนดพื้นที่และตำแหน่งที่ต้องการ

จากนั้นโปรแกรมจะเลือกแถวของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจากภาพที่แสดงในรูปที่ 4.5

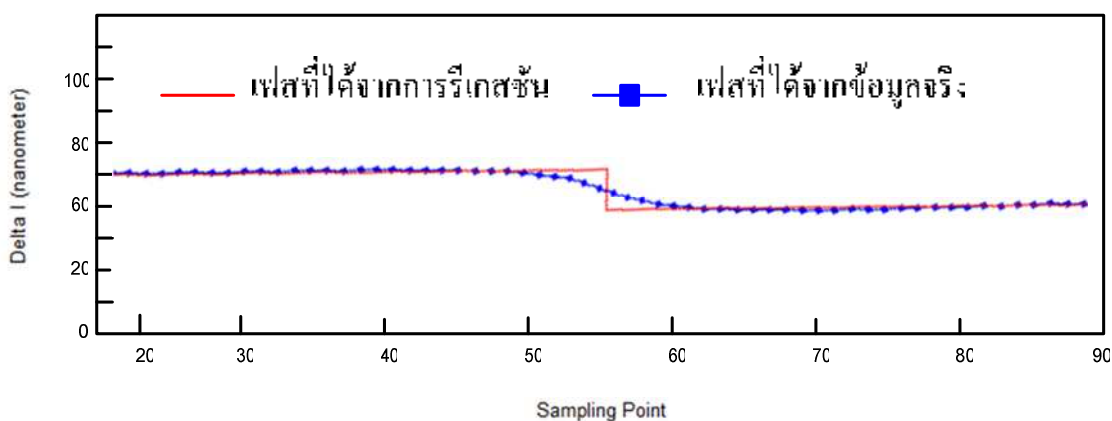


รูปที่ 4.5 สัดส่วนพื้นที่ที่ต้องการและตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณ (เส้นสีดำแสดงเส้นที่ค่า  $y$  คงที่)

ขั้นตอนต่อมาเป็นการกำหนดพื้นที่ในการกรองสัญญาณและนำสัญญาณที่กรองแล้วมาแปลงเป็นฟูเรียร์ย้อนกลับ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาเฟสและเข้ากระบวนการแปลงเฟสอย่างต่อเนื่อง โดยขั้นตอนต่อไปจะวิเคราะห์หาค่าการถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear regression) ที่เป็นเส้นสีแดง บอกถึงของความต่างเฟสที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ข้อมูลการแปลงและการกรองสัญญาณฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว



รูปที่ 4.7 ค่าความต่างเฟสของระหว่างชั้นเงอบล็อกสองชั้น

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการรีเกสชันมาหาความต่างเฟสแล้วนำมาคำนวณค่าผลต่างของความยาวเกลบล็อกจากระหว่างเกลบล็อกสองชั้น แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดจากวิธีการฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว

เกลบล็อกสองชั้น mm	ผลต่างของเกลบล็อกสองชั้น ด้วยวิธีฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว FFT
0.5 – 0.5	0.075 $\mu\text{m}$
1.0 – 1.005	4.785 $\mu\text{m}$
1.0 – 1.01	9.925 $\mu\text{m}$
4.0 – 4.0	0.097 $\mu\text{m}$
100 - 100	0.054 $\mu\text{m}$

จากแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนของวิธีฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วที่สรุปไว้ในหน้า 35-37 ทำให้คำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีฟูเรียร์ย้อนกลับของเกลบล็อกคู่ต่างๆได้ดังตารางที่ 4.10



ตารางที่ 4.10 ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้นขนาด 0.5 มิลลิเมตร กับ 0.5 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน <sup>1</sup>	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจาย ของข้อมูล <sup>2</sup>	ตัวหาร <sup>3</sup>	สัมประสิทธิ์ความ ไว <sup>4</sup>	ค่าความไม่แน่นอน ของแต่ละอินพุต ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ <sup>6</sup>
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00057	ปกติ	1	1	-0.000570	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเกจบล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าความเรียบผิวเกจบล็อก	0.00910	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.005254	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระบอกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระบอก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.00090	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000520	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม <sup>7</sup>		ปกติ			0.00573	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย <sup>8</sup>		$k = 2$			0.011	2.00

<sup>1</sup> Source of uncertainty

<sup>2</sup> Probability distribution

<sup>3</sup> Divisor

<sup>4</sup> Sensitivity coefficient

<sup>5</sup> Standard uncertainty

<sup>6</sup> Effective degree of freedom

<sup>7</sup> Combined standard uncertainty

<sup>8</sup> Expanded uncertainty

**ตารางที่ 4.11** ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้นขนาด 1 มิลลิเมตร กับ 1.005 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจายของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละอินพุท ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองค์ประกอบความอิสระ
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00067	ปกติ	1	1	-0.000670	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเกจบล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าการบิดเกจบล็อกบนแท่งขนาน	0.01100	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.006351	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระจกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระจก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.00090	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000520	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.00676	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.014	2.00

**ตารางที่ 4.12** ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกจบล็อกสองชิ้นขนาด 1 มิลลิเมตร กับ 1.010 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจายของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละอินพุท ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองค์ประกอบความอิสระ
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00063	ปกติ	1	1	-0.000630	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเกจบล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าการบิดเกจบล็อกบนแท่งขนาน	0.01100	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.006351	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระจกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระจก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.00090	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000520	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.00676	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.014	2.00

**ตารางที่ 4.13** ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกบ์ล็อกสองชั้นขนาด 4 มิลลิเมตร กับ 4 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจาย ของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอน ของแต่ละอินพุท ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00074	ปกติ	1	1	-0.000740	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ชั้นเกบ์ล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าการบิดเกบ์ล็อกบนแท่งขนาน	0.01100	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.006351	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระจกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระจก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.00090	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000520	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.00677	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.014	2.00

**ตารางที่ 4.14** ค่าความไม่แน่นอนของค่าความแตกต่างระหว่างเกบ์ล็อกสองชั้นขนาด 100 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตร

แหล่งที่มาของ ค่าความไม่แน่นอน	ค่าจากแหล่งที่มา ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะการกระจาย ของข้อมูล	ตัวหาร	สัมประสิทธิ์ความไว	ค่าความไม่แน่นอน ของแต่ละอินพุท ( $\mu\text{m}$ )	ค่าองศาแห่ง ความอิสระ
ค่าการวัดซ้ำ 10 ครั้ง	0.00070	ปกติ	1	1	-0.000700	9
ค่าความยาวคลื่นแสง	0.00006	ปกติ	2	1	0.000031	$\infty$
ค่าเศษส่วนการแทรกสอด	0.00139	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000804	$\infty$
ค่าอุณหภูมิที่ชั้นเกบ์ล็อก	0.00006	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	0.000033	$\infty$
ค่าการบิดเกบ์ล็อกบนแท่งขนาน	0.01100	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.006351	$\infty$
ค่าความเรียบผิวกระจกอ้างอิง	0.00346	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.001998	$\infty$
ค่าการปรับมุมกระจก	0.00028	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000164	$\infty$
ค่าการคำนวณมุมเฟส	0.00090	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	1	-0.000520	$\infty$
ค่าความไม่แน่นอนรวม		ปกติ			0.00676	>500
ค่าความไม่แน่นอนขยาย		$k = 2$			0.014	2.00

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลแบบฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลการวัดและค่าความไม่แน่นอนขยายด้วยวิธีการฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว

ความยาว ที่ระบุ (mm)	วิธีการฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว FFT	
	ค่าที่วัด ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความไม่แน่นอนขยาย, $k=2$ ( $\mu\text{m}$ )
0.5-0.5	0.075	0.011
1-1.005	4.785	0.011
1-1.01	9.925	0.011
4-4	0.097	0.011
100-100	0.054	0.011

เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากตารางที่ 4.15 กับผลที่ใช้วิธีการเลื่อนเฟสกับการวัดเกจบล็อกทีละชิ้นพบว่ามามีค่าดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าเปรียบเทียบผลการวัดเกจบล็อกจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กับโปรแกรมการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว

ความยาว ที่ระบุ (mm)	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ		โปรแกรมฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว, FFT		$E_n$
	ค่าที่วัด ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความไม่แน่นอน ขยาย, $k=2$ ( $\mu\text{m}$ )	ค่าที่วัด ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความไม่แน่นอน ขยาย, $k=2$ ( $\mu\text{m}$ )	
0.5-0.5	0.063	0.028	0.075	0.011	0.4
1-1.005	4.779	0.028	4.785	0.011	0.2
1-1.01	9.905	0.028	9.925	0.011	0.7
4-4	0.092	0.028	0.097	0.011	0.2
100-100	0.047	0.028	0.054	0.011	0.2

จากการนำผลความต่างความยาวที่ได้จากการวัดคู่เกจบล็อกด้วยวิธีการเลื่อนเฟสกับวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว พบว่า ได้ผลดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ค่าเปรียบเทียบผลการวัดเกจบล็อกคู่ระหว่าง โปรแกรมการเลื่อนเฟส กับ โปรแกรมฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว

ความยาว ที่ระบุ (mm)	โปรแกรมการเลื่อนเฟส, PSI		โปรแกรมฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว, FFT		$E_n$
	ค่าที่วัด ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความไม่แน่นอน ขยาย, $k=2$ ( $\mu\text{m}$ )	ค่าที่วัด ( $\mu\text{m}$ )	ค่าความไม่แน่นอน ขยาย, $k=2$ ( $\mu\text{m}$ )	
0.5-0.5	0.065	0.014	0.075	0.011	0.6
1-1.005	4.803	0.014	4.785	0.011	1.0
1-1.01	9.940	0.014	9.925	0.011	0.8
4-4	0.095	0.014	0.097	0.011	0.1
100-100	0.034	0.014	0.054	0.011	1.0

## บทที่ 5

### อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ค่าความถูกต้องของเกจบล็อกตามมาตรฐานความยาวใน ISO 3650:1998 กำหนดให้ใช้เกจบล็อกถ่ายค่าความถูกต้องให้กับเครื่องมือต่างๆ ในการสอบเทียบเกจบล็อกระดับ K นี้ตามมาตรฐาน ISO 3650:1998 นี้จำเป็นต้องใช้ระบบการวัดเชิงแสงด้วยวิธีอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ ส่วนการสอบเทียบเครื่องเปรียบเทียบเกจบล็อกตามมาตรฐานของ EURAMET/cg-02/v.01 ต้องใช้เกจบล็อกคู่จำนวน 5 คู่ ได้แก่ เกจบล็อกคู่ 0.5 มิลลิเมตร กับ 0.5 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร กับ 1.005 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร กับ 1.01 มิลลิเมตร 4 มิลลิเมตร กับ 4 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร กับ 100 มิลลิเมตรในการสอบเทียบ ซึ่งปกติการสอบเทียบดังกล่าวจะวัดคู่เกจบล็อกมาตรฐานด้วยวิธีอินเตอร์เฟอริมิเตอร์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลแบบการเลื่อนเฟส และนิยมวัดเกจบล็อกทีละชิ้นเท่านั้น การวัดดังกล่าวส่งผลให้การวัดเปรียบเทียบจะต้องเกจบล็อกคู่ทำกันถึงสองครั้งจึงจะได้ค่าผลต่างของระยะความยาวของเกจบล็อก ส่งผลให้ค่าความไม่แน่นอนของผลต่างความยาวของเกจบล็อกที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการวัดทั้งสองครั้ง

ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะลดค่าความไม่แน่นอนของการเปรียบเทียบคู่เกจบล็อกด้วยการหาความยาวที่แตกต่างของเกจบล็อกสองชิ้นจากการวัดพร้อมกันเพียงครั้งเดียว ด้วยเทคนิคการเตรียมชิ้นงานที่ใช้จากการประกบเกจบล็อกคู่ลงบนแผ่นเรียบมาตรฐาน (Base plate) และใช้ระบบอินเตอร์เฟอริมิเตอร์แบบไมเคลสัน (Michelson) ที่มีแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนชนิดคงที่ (Stabilized He-Ne Laser) เป็นแหล่งกำเนิดแสง รังสีการแทรกสอดที่ได้จากระบบดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการแทรกสอดแบบเลื่อนเฟส (Phase shift method) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวัด ความยาว (ความสูง) ของเกจบล็อกเดี่ยวที่มีระยะความยาวที่อยู่ในระดับนาโนเมตร

แต่จากการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์รังสีการแทรกสอดแบบการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับแบบเร็ว (Fast fourier transform หรือ FFT) พบว่า วิธีวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถหาความขรุขระของพื้นผิวได้ในระดับนาโนเมตร และเนื่องจากผลต่างของความยาวเกจบล็อกคู่อยู่ในระดับไม่กี่นาโนเมตร ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีวิเคราะห์รังสีการแทรกสอดแบบการแปลงฟูเรียร์

ย้อนกลับแบบเร็วมาหาผลต่างของขึ้นตัวอย่างชนิดเกจบล็อกคู่ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวัด เกจบล็อกทีละชิ้นและการวัดเกจบล็อกแบบคู่ด้วยการวิเคราะห์แบบเลื่อนเฟสด้วย

จากการวิเคราะห์และประมวลผลด้วยการวัดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และวิธีเลื่อนเฟสกับขึ้น ตัวอย่างที่เป็นเกจบล็อกคู่ทั้ง 5 คู่ พบว่า ค่าความไม่แน่นอนขยาย (U) ของวิธีดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า U ที่ได้จากการวัดขึ้นเกจบล็อกที่เป็นเกจบล็อกเดี่ยวด้วยการวัดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และวิธีเลื่อนเฟส โดยการวัดขึ้นตัวอย่างที่เป็นเกจบล็อกคู่ค่า U ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.014 นาโนเมตร ส่วนค่า U ที่ได้จากการวัดขึ้นตัวอย่างที่เป็นเกจบล็อกเดี่ยวมีค่าเท่ากับ 0.028 นาโนเมตร ในส่วนของผลต่างความยาวเกจบล็อกพบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดขึ้นตัวอย่างชนิดเกจบล็อกคู่กับการวัดขึ้นตัวอย่าง ชนิดเกจบล็อกเดี่ยวพบว่าค่า  $E_n$  ที่ได้มีค่าไม่เกิน 1.0 ซึ่งหมายความว่าผลการวัดจากขึ้นตัวอย่างทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

จากการวิเคราะห์และประมวลผลด้วยการวัดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วกับขึ้นตัวอย่างที่เป็นเกจบล็อกคู่ทั้ง 5 คู่ พบว่า ค่าความไม่แน่นอนขยาย (U) ของวิธีดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า U ที่ได้จากการวัดขึ้นเกจบล็อกที่เป็นเกจบล็อกเดี่ยวและขึ้นตัวอย่างที่เป็นเกจบล็อกคู่ด้วยการวัดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และวิธีเลื่อนเฟสด้วยเช่นกัน โดยการวัดขึ้นตัวอย่างที่เป็นเกจบล็อกคู่ที่ใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบย้อนกลับเร็วมีค่า U ที่ได้เท่ากับ 0.011 นาโนเมตร ส่วนการวัดขึ้นตัวอย่างที่เป็นเกจบล็อกคู่และเดี่ยวด้วยวิธีการเลื่อนเฟสมีค่าเป็น 0.014 นาโนเมตร และ 0.028 นาโนเมตร ตามลำดับ

ในส่วนของผลต่างความยาวเกจบล็อกพบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดขึ้นตัวอย่าง ชนิดเกจบล็อกคู่ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบย้อนกลับเร็วกับการวัดขึ้นตัวอย่างชนิดเกจบล็อกเดี่ยว ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส กับการเปรียบเทียบการวัดขึ้นตัวอย่างชนิดเกจบล็อกคู่ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วกับขึ้นตัวอย่างชนิดเกจบล็อกคู่ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส พบว่า ค่า  $E_n$  ของทั้งสองกรณีมีค่าไม่เกิน 1.0 ด้วย ซึ่งหมายความว่าผลการวัดที่ได้จากทั้งสามวิธีมีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ด้วยเช่นกัน

จากการทดลองด้วยวิธีอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วิธีการเลื่อนเฟสและวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว ได้วิธีการหาค่าผลต่างของความยาวของเกจบล็อกคู่ที่มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดลดลง แต่มีค่าผลต่างของระยะความยาวคู่เกจบล็อกที่มีค่าต่างออกไปบ้างเป็นอาจเพราะวิธีการวิเคราะห์ผลที่แตกต่างกัน ในส่วนข้อวิธีการเลื่อนเฟสจะต้องใช้ภาพสี่ภาพมาวิเคราะห์หรือการแทรกสอดและหาค่าผลต่างของความยาวจากจุดกึ่งกลางของคู่เกจบล็อกเพียงแค่สองจุด ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ส่วนวิธีการแปลงฟูเรียร์ย้อนกลับเร็วใช้ภาพหนึ่งภาพมาวิเคราะห์หรือการแทรกสอดและหาค่า

ผลต่างของความยาวในแกน Y ด้วยวิธีเรขาคณิตแบบเส้นตรง ซึ่งเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งของคู่เก  
จบสื่อ จึงให้ค่าความถูกต้องที่แม่นยำกว่าวิธีการเลื่อนเฟส



## รายการอ้างอิง

- [1] ISO 3650. Geometrical Product Specifications (GPS) - Length standards - Gauge -blocks, 1998.
- [2] EURAMET/cg-02/v.01 Calibration of Gauge block comparator, 2007.
- [3] Youichi Bitou and Katou Seta Jpa. J. Appl. Phys. 39 (2000): 6084-6088.
- [4] J. E. Decker and J. R. Pekelsky Presented at the Measurement Science Conference Pasadena, NRC Internal Report No. 40002.
- [5] E. Hecht. Optics. 4<sup>th</sup> ed. USA: Addison Wesley, 2001.
- [6] สุวรรณ คูสำราญ. ทัศนศาสตร์กายภาพ. สถานที่พิมพ์ : พิมพ์ครั้งที่ 1. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.
- [7] F. L. Pedrotti and L. S. Pedrotti. Introduction to Optics. 2<sup>nd</sup> ed. USA: Prentice Hall, 1993.
- [8] Wyant J C. Interferometric optical metrology: basic principles and new systems. Laser Focus 18 65-71, 1982.
- [9] V Alvarez-Valado, H Gonzalez-Jorge, B V Dorrio, M Miranda, F Rodriguez, J L Valencia, F J Yebra and J Rodriguez. Testing phase-shifting algorithms for uncertainty evaluation in interferometric gauge block calibration. Metrologia 46 (2009) 637-645.
- [10] Babak N. Saif, James Millerd, Ritva Keski-Kuha & Lee Feinberg, J. C. Wyant. Instantaneous phase-shifted Speckle Interferometer for measurement of large Optical structures. Proceedings of SPIE Vol. 5494, 2004.
- [11] Canan Karaalioglu, Yani Skarlatos. Fourier transform method for measurement of thin film Thickness by speckle interferometry. Opt. Eng. 42(6) 1694-1698, 2003.
- [12] Jonghan jin, Young-Jin Kim, Yunseok Kim and Seung-Woo Kim. Absolute length Calibration of gauge blocks using optical com of a femtosecond pulse laser. OPTICS EXPRESS 5968/ Vol. 14, No.13, 2006.
- [13] Mitsuo Takeda, Hideki Ina and Seiji Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-Pattern analysis for computer-based topography and interferometry, J. Opt. Soc. Am./ Vol. 72, No. 1, 1982.
- [14] The Image Processing Handbook. chapter 4. CRC Press, 1992

- [15] Addison-Wesley Publishing Company. Digital Image Processing, chapter 3 and chapter 8.3.2, 1993.
- [16] United Kingdom Accreditation Service. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. 2<sup>nd</sup> ed. London: UKAS, 2007.
- [17] J. E. Decker and J. R. Pekelsky. Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry. *Metrologia*, 1997, 34, 479-493.
- [18] ISO/IEC Guide 43-1 Proficiency Testing by Interlaboratory Comparisons, 1999.
- [19] Willink, R., A generalization of the Welch-Satterthwaite formula for use with correlated uncertainty components, *Metrologia*, 44, 2007: 340-349.

ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก

#### โปรแกรมการประมวลผล : โปรแกรมฟูเรียร์ย้อนกลับเร็ว

```

close all

lambda=632.991432; %wavelength of the light source used

tra=lambda/(4*pi);

[filename, pathname] = uigetfile( ...
    {'*.png'; '*.jpg'}, ...
    'Pick a graphic file');

fullname=[pathname, filename];

rgb=imread(fullname);

%gray=rgb2gray(rgb);

gray=rgb;

gray=flipud(gray);

org_image_fH=figure('color','white','unit','normal','position',[0.05,
0.1,0.9,0.8]);

subplot(2,2,1);

org_image_aH=imshow(gray);

crop_h=imrect(gca);

crop_p=wait(crop_h);

crop=imcrop(gray,crop_p);

%crop_id = addNewPositionCallback(crop_h,Diagonal_Fringe_001_recrop);

set(org_image_aH,'UserData',gray);

subplot(2,2,2);

crop_image_aH=imshow(crop);

[row,col]=size(crop);

center_line=floor(row/2);

titlestr=strvcat('Cropped Image from File ',fullname);

titleH2=title(titlestr,'fontsize',8);

subplot(2,2,1);

```

### ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

titlestr=strvcat('Image from File ',fullname);
titleH1=title(titlestr,'fontsize',8);
fringeline=mean(crop(center_line-0:center_line+0,:),1);
sampling_rate=2*length(fringeline);
ft=fft(fringeline);
fts=fftshift(ft);
fts = fts/max(abs(fts));
subplot(2,2,3);
plot(abs(fts),'-b');
xlabel('Sampling Pixel');
ylabel('Normalized Signal')
title('Plot of Fringe in Frequency Domain','fontsize',8);
h=imrect;
position=wait(h);
w1=round(position(1));
w2=round(position(1)+position(3));
Wn1=[w1,w2]./(sampling_rate/2);
[B1,A1] = BUTTER(7,Wn1);
[H1,F1] = FREQZ(B1,A1,sampling_rate/2,sampling_rate);
filtered_fts_01=fts'.*H1;
filtered_fts_02=circshift(filtered_fts_01,[0,0]);
filtered_fts_03=fftshift(filtered_fts_02);
hold on;
plot(abs(H1),'-g')
plot(abs(filtered_fts_01),'-r')
processed_fringe_01=ifft(filtered_fts_03);
processed_fringe_02=(ifftshift(processed_fringe_01));

```

### ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

wrapped_phase_angle_1=angle(processed_fringe_02);
unwrapped_phase_angle_1=unwrap(wrapped_phase_angle_1);
delta_l=unwrapped_phase_angle_1*tra;
subplot(2,2,4);
plot(delta_l,'.b');
xlabel('Sampling Point');
ylabel('Delta l (nanometer)');
xdata=1:1:length(delta_l);
xdata=xdata';
initial_fit=polyfit(xdata,delta_l,1);
m=initial_fit(1);
a=initial_fit(2);
diff_delta_l=diff(delta_l);
check_l=abs(diff_delta_l-m);
[max_m,I]=max(check_l);
x1=xdata(I);
b=a;
delta_l_ini=fit_delta_l(xdata,m,a,b,x1);
hold on
plot(delta_l_ini,':g');
delta_l_fit=xdata;
fitpara0=[m,a,b,x1];
[fitpara_opt,fval,exitflag,output]=fminsearch(@(fitpara)
error_delta_l(fitpara,delta_l,xdata),fitpara0);
delta_l_opt=fit_delta_l(xdata,fitpara_opt(1),fitpara_opt(2),fitpara_o
pt(3),fitpara_opt(4));
plot(delta_l_opt,'-r');
m_str=sprintf('%7.2f',fitpara_opt(1));

```

### ภาคผนวก ข (ต่อ)

```

b_str=sprintf('%+7.2f',fitpara_opt(2));
c_str=sprintf('%+7.2f',fitpara_opt(3));
x1_str=sprintf('%+7.2f',fitpara_opt(4));
txt_1=['y = ',m_str,'x',b_str,' for x <= ',x1_str];
txt_2=['y = ',m_str,'x',c_str,' for x > ',x1_str];
txt_disp=strvcat('Delta l Plot',txt_1,txt_2);
title(txt_disp,'fontsize',8);
sdate=datestr(now,'yyyymmddHHMMSS');
strI=findstr(fullname,'\');
sname=fullname(strI(length(strI)-1)+1:length(fullname));
strI=findstr(sname, '.');
sname=sname(1:strI-1);
sname=regexprep(sname, '\', '_');
filename=[sname, '_', sdate, '.jpg'];
set(titleH1,'fontsize',6);
set(titleH2,'fontsize',6);
saveas(gcf,filename,'jpg');

```

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล	นายเจษฎา วงศาโรจน์
วัน เดือน ปี และสถานที่เกิด	17 ตุลาคม พ.ศ.2513 กรุงเทพมหานคร
การศึกษา	ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ประสบการณ์ทำงาน	นักมาตรวิทยา ห้องปฏิบัติการความยาว ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พ.ศ. 2543 ถึง ปัจจุบัน