การถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐาน โดยใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

TRACEABILITY OF STANDARD GAUGE BLOCK USING GAUGE BLOCK INTERFEROMETER

เยาวลักษณ์ ล้อมรื่น
YAOWALUX LOUMRUEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545
ISBN 974-648-647-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐาน โดยใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

TRACEABILITY OF STANDARD GAUGE BLOCK USING GAUGE BLOCK INTERFEROMETER

เยาวลักษณ์ ล้อมรื่น

YAOWALUX LOUMRUEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-847-3

เลขหมู่.............................

เลขทะเบียน 49646

วัน, เดือน, ปี 25 ก.พ. 2547

TRACEABILITY OF STANDARD GAUGE BLOCK USING GAUGE BLOCK INTERFEROMETER

YAOWALUX LOUMRUEN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2002

ISBN 974-648-847-3

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐาน โดยใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

นักศึกษา นางสาวเยาวลักษณ์ ล้อมรื่น

รหัสประจำตัว 38064006

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ. 2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม นายสมโภชน์ บุญสนิท

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการถ่ายทอดความถูกต้องให้กับแท่งเทียบมาตรฐาน โดยใช้เทคนิคการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสันที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอรฟีรอมิเตอร์ที่ใช้แหล่งกำเนิดความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเท่ากับ 632.990844 nm และประเมินค่าความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานจากสัดส่วนของฟริงจ์ที่เกิดจากการแทรกสอดบนผิวหน้าของแท่งเทียบมาตรฐานเปรียบเทียบกับฟริงจ์ที่ปรากฏบนเบสเพลตชนิดโลหะผิวเรียบที่ประกบกับแท่งเทียบมาตรฐาน ผลการศึกษานี้แสดงถึงขีดความสามารถของถ่ายทอดค่าความถูกต้องของแท่งเทียบมาตรฐานระดับ K ขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm ด้วยค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ ±0.014 μm และ ±0.028 μm ที่ระดับความเชื่อมั่นทั้ง 68% และ 95% โดยลำดับ

Thesis Title	Traceability of Standard Gauge Block using Gauge Block Interferometer
Student	Miss Yaowalux Loumruen
Student ID.	386064006
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2002
Thesis Advisor	Assistance Professor Dr.Warawoot Thowladda
Thesis Co-Advisor	Mr.Sompote Boonsanit

ABSTRACT

A Michelson interferometry method for determining the length of Gauge Blocks was studied. This method is based on measuring a fringe fraction of the interference fringes on a gauge block measuring face and its wringing platen. The reference standard of measurement is the wavelength of a He-Ne Laser 632.990844 nm which is traceable to the international standard of metre. The study demonstrats that the measurement capability for gauge block calibration, grade K sizes 5, 15, 25 ,50 and 75 mm, can be achieved with measurement uncertainty of ± 0.014 μm and ± 0.028 μm at confidence level at 68% and 95% respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาทางวิชาการรวมทั้งได้เสนอแนะแนวทางในการทดลองและการจัดทำวิทยานิพนธ์จาก ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และคุณสมโภชน์ บุญสนิท ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้สาขาต่างๆ

ขอระลึกถึงและขอบพระคุณ คุณยาย บิดา มารดา น้าๆ ที่ให้การอุปการะและพี่น้องทุกคนเป็นกำลังให้กับข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ กรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้กำลังใจพร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือทั้งด้านวิชาการและคำแนะนำปรึกษา

และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่เรียนด้วยกันที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นกำลังให้กับข้าพเจ้าตลอดเวลา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอมอบแด่ประเทศชาติ

เยาวลักษณ์ ล้อมรื่น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการทำวจัย	5
1.5 วิธีการดำเนินการทำวิจัย	5
1.6 ระยะเวลาดำเนินการทำวิจัย	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 นิยามความยาวหนึ่งเมตร	7
2.2 สมบัติเฉพาะของแสงเลเซอร์	8
2.3 เลเซอร์อินเตอร์ฟีรอเมตรี	10
2.3.1 หลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสัน	10
2.4 แท่งเทียบมาตรฐาน	12
2.5 การถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐาน	13
2.5.1 การถ่ายทอดค่าความถูกต้องด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์หลายความยาวคลื่น	13
2.5.2 การถ่ายทอดค่าความถูกต้องด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ความยาวคลื่นเดียว	19
2.5.3 การวิเคราะห์เศษส่วนฟริงจ์	22
2.5.4 การสแกนฟริงจ์	24
2.5.5 ผลกระทบจากสภาวะแวดล้อม	28

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 โครงสร้างเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์และอุปกรณ์.. 32

3.1 ระบบทางแสงของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์.. 33

3.1.1 ชุดกำเนิดแสงเลเซอร์.. 35

3.1.2 ชุดมองภาพทางช่องมอง.. 35

3.1.3 แผงควบคุมแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐาน.. 36

3.2 ระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องวัดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์.. 37

3.2.1 ชุดคอมพิวเตอร์.. 38

3.2.2 ตู้ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์.. 39

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.. 42

4.1 การทดลอง. 42

4.1.1 การจัดเตรียมแท่งเทียบมาตรฐาน.. 42

4.1.2 การทดลองวัดแท่งเทียบมาตรฐานที่สัมประสิทธิ์การขยายตัว..............

$1.08 \times 10^{-5}/^{\circ}C$.. 43

4.1.3 การทดลองวัดแท่งเทียบมาตรฐานที่สัมประสิทธิ์การขยายตัว..............

$1.15 \times 10^{-5}/^{\circ}C$.. 50

4.1.4 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวแท่งเทียบมาตรฐาน..........

ระหว่าง $1.08 \times 10^{-5}/^{\circ}C$ กับ $1.15 \times 10^{-5}/^{\circ}C$.. 56

4.2 ประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด.. 57

4.2.1 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของความยาวคลื่นแสง..............

เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน.. 59

4.2.2 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวิเคราะห์เศษส่วนฟริงจ์.............. 59

4.2.3 ค่าดัชนีหักเหของอากาศ.. 59

4.2.4 ความไม่แน่นอนของอุณหภูมิแท่งเทียบมาตรฐานขณะทำการวัด.............. 62

4.2.5 ความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐาน...... 62

4.2.6 ความไม่แน่นอนของการแก้พินโฮล.. 62

4.2.7 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากแนวลำแสง.. 63

4.2.8 ค่าแก้การเปลี่ยนเฟส.. 63

4.2.9 ค่าแก้การประกบแท่งเทียบมาตรฐาน.. 63

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.......... 65

5.1 สรุปผลการทดลอง.......... 65

5.2 ข้อเสนอแนะ.......... 67

เอกสารอ้างอิง.......... 68

ภาคผนวก ก 69

ภาคผนวก ข 70

ภาคผนวก ค 82

ภาคผนวก ง 83

ประวัติผู้เขียน.......... 85

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ชนิดของเลเซอร์.. 9

2.2 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากเครื่องพิตเตอร์ เอ็นพีแอล อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์... 18

2.3 ช่วงเวลาที่วางแท่งเทียบมาตรฐานเพื่ออุณหภูมิคงที่... 29

2.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุที่อุณหภูมิ 20 °C... 30

4.1 ค่า pre-measurement แท่งเทียบมาตรฐาน.. 43

4.2 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5 mm.................................... 44

4.3 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm.................................. 45

4.4 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 25 mm.................................. 46

4.5 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 50 mm.................................. 47

4.6 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 75 mm.................................. 48

4.7 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน...............
ของแท่งเทียบมาตรฐาน.. 48

4.8 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5 mm.................................... 50

4.9 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm.................................. 51

4.10 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 25 mm................................ 52

4.11 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 50 mm................................ 53

4.12 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 75 mm................................ 54

4.13 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน.............
ของแท่งเทียบมาตรฐาน.. 54

4.14 ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่สัมประสิทธิ์การขยายตัว...............
1.08×10^{-5}/°C กับ สัมประสิทธิ์การขยายตัว 1.15×10^{-5}/°C..................................... 56

4.15 ค่าความไม่แน่นอน.. 64

5.1 Error Normalization Ratio... 66

5.2 เปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนขยาย (k = 2)..
ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm ระหว่างนานาประเทศ.. 66

ข ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานจำนวน 112 ชิ้นของสถาบันมาตร......
วิทยาแห่งชาติ(ประเทศไทย)เทียบกับสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ(ประเทศเยอรมัน)......... 70

ค Students' T-distribution.. 82

ง หน้าต่างกำหนดเงื่อนไขค่าชดเชยพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนการวัด..................................... 83

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ลำดับการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐาน	4
2.1	หลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสัน	11
2.2	แท่งเทียบมาตรฐานชนิดเหล็ก	12
2.3	ลักษณะโครงสร้างของแท่งเทียบมาตรฐาน	12
2.4	หลักการทำงานของเครื่อง พิตเตอร์ เอ็นพีแอล อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	14
2.5	(a) ระยะขจัดระหว่างแท่งเทียบมาตรฐานและเบสเพลต (b) การวัดเศษส่วนฟริงจ์	15
2.6	สเกลของบรรทัดคำนวณครึ่งความยาวคลื่นที่ใช้กับเครื่องพิตเตอร์ อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	18
2.7	โครงสร้างของเครื่องวัดเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน	20
2.8	เครื่องวัดเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน	21
2.9	ทางเดินแสงของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	21
2.10	การวัดเศษส่วนฟริงจ์บนเบสเพลตและแท่งเทียบมาตรฐาน	22
2.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะการเคลื่อนที่ของลิ่มกระจก	23
2.12	แผนผังการสแกนฟริงจ์	24
2.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะทางของลิ่มกระจกของแท่งเทียบมาตรฐาน	25
2.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะทางของลิ่มกระจกของเบสเพลต 1	26
2.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะทางของลิ่มกระจกของเบสเพลต 2	27
2.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะการเคลื่อนที่ของลิ่มกระจกที่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศ	30
3.1	เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	32
3.2	หลักการทำงานของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	33
3.3	โครงสร้างแชมเบอร์ภายนอกตัวเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	34
3.4	ชุดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน	35
3.5	ชุดเลนส์ ชุดพินโฮลและสวิตซ์ออโตคอลลิเมชั่น	35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6	แผงควบคุมแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐานของ เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	36
3.7	แผนผังระบบควบคุมและประมวลผลของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	37
3.8	ชุดควบคุมและประมวลผลของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	39
3.9	ชุดควบคุมอิเล็คทรอนิกส์ของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	39
3.10	เครื่องดิจิตอลมานอมิเตอร์	40
3.11	ชุดสวิตซ์ตรวจจับอุณหภูมิ	41
3.12	ตัวตรวจจับอุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐาน	41
4.1	ผลการวัดค่าความคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางของแท่งเทียบมาตรฐาน ขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm ที่สัมประสิทธิ์การขยายตัว 1.08×10^{-5}/°C	49
4.2	ผลการวัดค่าความคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางของแท่งเทียบมาตรฐาน ขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm ที่สัมประสิทธิ์การขยายตัว 1.15×10^{-5}/°C	55
4.3	แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัว แท่งเทียบมาตรฐาน 1.08×10^{-5}/°C กับสัมประสิทธิ์การขยายตัวแท่งเทียบ มาตรฐาน 1.15×10^{-5}/°C	57

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งของความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีคือความสามารถด้านการวัด เพราะการวัดเป็นเครื่องมือของมนุษย์ในการไขความลับของธรรมชาติ ยิ่งมนุษย์สามารถพัฒนาให้เครื่องมือวัดมีความถูกต้องได้เท่าใด มนุษย์ก็ยิ่งมีศักยภาพในการศึกษาธรรมชาติได้เท่านั้น อย่างไรก็ตามความสามารถก้าวทันเทคโนโลยีของแต่ละประเทศมีความแตกต่างกัน ประเทศไทยได้รับการจัดอันดับความสามารถทางเทคโนโลยีในระดับต่ำมากคือ ลำดับที่ 49 จาก 49 ประเทศ(ข้อมูลปี พ.ศ. 2544) การศึกษาเทคโนโลยีสมัยใหม่ในระดับนำไปประยุกต์ใช้กับวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งจำเป็น

การสร้างเสริมศักยภาพด้านวิทยาศาสตร์ของการวัดหรือมาตรวิทยาถือเป็นความจำเป็นเร่งด่วน ประเทศไทยยังขาดความพร้อมในเทคโนโลยีด้านนี้ กล่าวคือหน่วยงานด้านมาตรวิทยาที่ทำหน้าที่ดูแลและเก็บรักษามาตรฐานแห่งชาติของหน่วยการวัดปริมาณพื้นฐานมีไม่ครบถ้วน และเทคโนโลยีการถ่ายทอดค่าความถูกต้องจากมาตรฐานดังกล่าวไปสู่เครื่องมือวัดยังไม่ได้รับความเชื่อถือในระดับสากล ดังนั้นประเทศไทยจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีด้านมาตรฐานขั้นปฐมภูมิ และการถ่ายทอดค่าความถูกต้องไปยังมาตรฐานขั้นทุติยภูมิและมาตรฐานใช้งาน เพื่อแสดงศักยภาพและเป็นพื้นฐานการพัฒนาวิทยาศาสตร์ของประเทศ

วิทยาศาสตร์ทางด้านการวัดความยาวถือว่าเป็นศาสตร์ที่ได้รับการพัฒนาอย่างมากและเป็นศาสตร์ที่ประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางฟิสิกส์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการนำเอาความรู้ด้านเลเซอร์ฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ใน ค.ศ.1960 ทำให้วิทยาศาสตร์การวัดพัฒนาจากระดับความถูกต้องที่ 10^{-6} เมตร มาสู่ที่ระดับ 10^{-8} เมตร ปัจจุบันประเทศไทยได้จัดให้มีมาตรฐานแห่งชาติด้านการวัดความยาว แต่ยังไม่สามารถแสดงขีดความสามารถในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องของมาตรฐานดังกล่าวให้เป็นที่ยอมรับของนานาประเทศได้ การศึกษาและวิจัยเพื่อเป็นการวัดระดับความสามารถของมาตรวิทยาด้านการวัดความยาว โดยถ่ายทอดค่าความถูกต้องของมาตรฐานนี้ไปยังแท่งเทียบมาตรฐาน ซึ่งเป็นมาตรฐานขั้นทุติยภูมิ

แท่งเทียบมาตรฐาน (Standard Gauge Block) เป็นมาตรฐานความยาวชนิดหนึ่งที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากแท่งเทียบมาตรฐานมีความถูกต้องสูง สามารถสอบเทียบเครื่องมือได้หลายชนิด เช่น ยูนิเวอร์แซลเมเชอร์ริ่งแมชีน (Universal Measuring

Machine), ไมโครมิเตอร์ (Micrometer), เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Caliper), ไฮท์มาสเตอร์ (Height Master), ปลั๊กเกจ(Plug Gauge) เป็นต้น

การสอบเทียบแท่งเทียบมาตรฐานทั่วไป มี 2 วิธี

1. วิธีการวัดแบบเปรียบเทียบ (Comparison Measurement Method) เป็นการวัดเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐานด้วยเครื่องวัดเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน โดยเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐานที่มีความถูกต้องสูงกว่าเช่นระดับ 0 กับแท่งเทียบมาตรฐานที่มีความถูกต้องต่ำกว่าเช่น 1 และ 2

2. วิธีการวัดแบบสัมบูรณ์ (Absolute Measurement Method) เป็นวิธีการวัดแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้เทคนิคการวัดของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ และใช้ความยาวคลื่นแสงของแสงสีเดียว เช่นแสงเลเซอร์ หรือแคดเมี่ยม เป็นมาตรฐานอ้างอิง

การวัดแบบสัมบูรณ์จะได้ความถูกต้องมากกว่าวิธีการวัดแบบเปรียบเทียบเพราะต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์เศษส่วนของริ้วการแทรกสอดทางแสงช่วงครึ่งความยาวคลื่นแสง วิธีการวัดนี้จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความรู้ประสบการณ์ ทักษะ และความชำนาญสูงจึงจะได้ผลการวัดที่ถูกต้อง สำหรับสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ของประเทศไทยการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์(Gauge Block Interferometer : GBI) ซึ่งเป็นการวัดแบบสัมบูรณ์

ปัจจุบันประเทศไทยเรายังขาดแคลนผู้ที่มีความรู้ประสบการณ์ ทักษะ และความชำนาญสูงในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ทัดเทียมระดับสากล จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยเพื่อเป็นการพัฒนาขีดความสามารถด้านมาตรวิทยาของประเทศ ซึ่งได้ทำการศึกษา วิจัยเรื่องการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ โดยโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ซึ่งถือว่าเป็นมาตรฐานขั้นทุติยภูมิของการวัดด้านความยาว โดยใช้ทฤษฎีการแทรกสอดทางแสงไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Michelson Interferometer) ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน 632.990844 nm เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการถ่ายทอดค่าความถูกต้อง เพื่อยืนยันผลการสอบเทียบเที่ยงตรงในระดับที่ยอมรับของนานาประเทศ

ห้องปฏิบัติการความยาวมาตรฐานสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศไทย และห้องปฏิบัติการความยาวระดับทุติยภูมิ ปัจจุบันยังคงต้องส่งแท่งเทียบมาตรฐานระดับ K ไปสอบเทียบยังห้องปฏิบัติการความยาวมาตรฐานแห่งชาติอื่นๆ เช่น NIMJ (National Institute Metrology of Japan), PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany), NIST (National Institute Science and Technology, USA), NML (National Metrology Laboratory, Australia) และ NIM (National Institute Metrology, China) เป็นต้น ซึ่งห้องปฏิบัติการดังกล่าวได้พัฒนาการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ด้วยความยาวคลื่นแสงสี

เดียวหรือเลเซอร์แบบหลายความยาวคลื่น(633nm, 544nm และ 780nm) ซึ่งจะได้รับใบรับรองค่าความถูกต้องและค่าความไม่แน่นอนของแท่งเทียบมาตรฐานที่ส่งไปสอบเทียบ

จากปัญหาและอุปสรรคดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยนี้ โดยทำการวัดแท่งเทียบมาตรฐานด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่นเดียว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการถ่ายทอดค่าความถูกต้อง โดยใช้ความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ฮีเลียม -นีออน 632.990844 nm เป็นมาตรฐานอ้างอิง โดยใช้หลักการไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ถ่ายทอดค่าความถูกต้องมาตรฐานขั้นทุติยภูมิมายังแท่งเทียบมาตรฐานระดับ K ที่มีค่าการยอมรับได้ตามขนาดของแท่งเทียบมาตรฐาน ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3650:1998 (ภาคผนวก ก)[1]

1.2.3 ศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางการแก้ไขปัญหา และอุปสรรคในภาคปฏิบัติการ การถ่ายทอดค่าความถูกต้องจากเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ไปยังแท่งเทียบมาตรฐาน

1.2.4 ใช้ทฤษฎีทางฟิสิกส์ประเมินค่าความไม่แน่นอนในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน

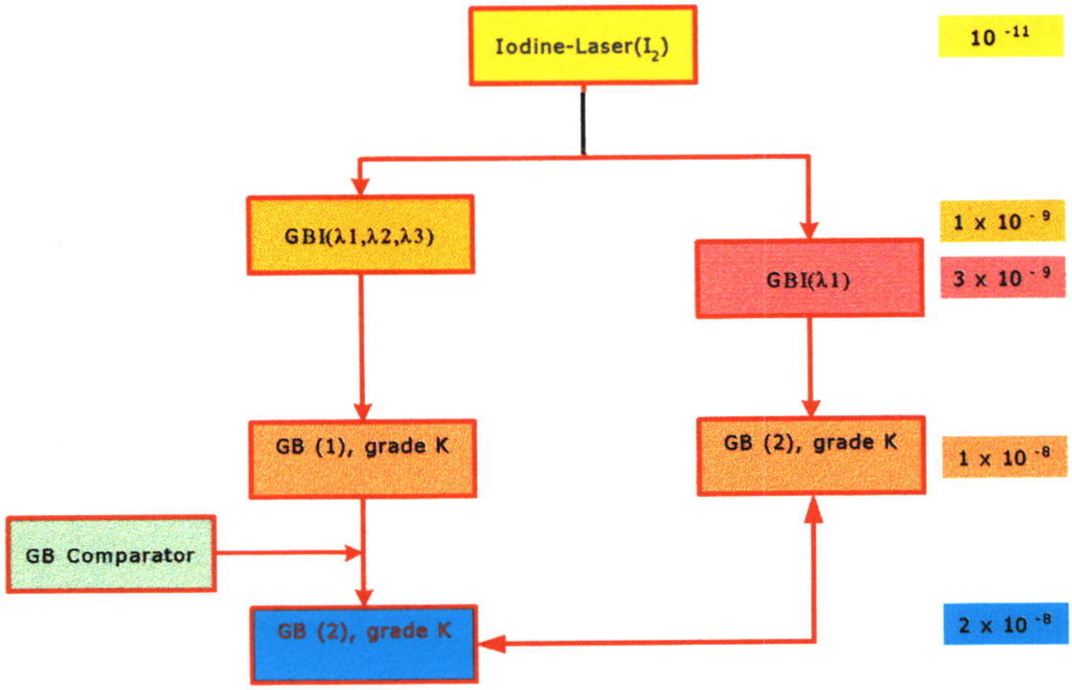
1.2.5 ประเมินความสามารถของมาตรวิทยาทางด้านความยาว โดยการเปรียบเทียบกับต่างประเทศ

1.3 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

หัวใจสำคัญของวิทยานิพนธ์นี้คือการศึกษาการถ่ายทอดค่าความถูกต้องของแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้ทฤษฎีการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสัน[2] ซึ่งเป็นทฤษฎีที่นำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ มีแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นแสงอ้างอิงมาตรฐาน(λ = 632.990844 nm) เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดผ่านระบบทางแสงด้วยหลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสัน ทำให้เกิดริ้วของการแทรกสอดหรือฟริงจ์(fringe) ขึ้นที่เบสเพลตที่ใช้เป็นผิวอ้างอิงกับผิวของแท่งเทียบมาตรฐาน ค่าความแตกต่างของฟริงจ์ระหว่างผิวทั้งสองแสดงได้ในรูปของเศษส่วนฟริงจ์มีค่าของครึ่งความยาวคลื่น ($\lambda/2$) สามารถนำเศษส่วนฟริงจ์ไปคำนวณหาค่าความถูกต้องของแท่งเทียบมาตรฐานได้

ในการสอบเทียบแท่งเทียบมาตรฐานวิธีวัดแบบเปรียบเทียบ เป็นการถ่ายทอดค่าความถูกต้องจากแท่งเทียบมาตรฐานที่มีระดับความถูกต้องสูงสุด(ระดับ K หรือ Calibration Gauge) แท่งเทียบมาตรฐานที่มีค่าความถูกต้องต่ำกว่า (ระดับ 0) นั่นคือระดับ K เป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับสอบเทียบให้กับระดับ 0 และระดับ 0 เป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับห้องปฏิบัติการระดับทุติยภูมิและเป็นมาตรฐานสอบเทียบให้กับระดับ 1 และ 2 ซึ่งเป็นมาตรฐานใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเครื่องมือวัดเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐานมีค่าความไม่แน่นอน ±0.03 μm มีความจำแนกชัด [มอก. 235/2531] 0.01 μm พบว่าเครื่องมือนี้มีความสามารถแบ่งแยกความแตกต่างของแท่งเทียบมาตรฐานในระดับความถูกต้องระดับ 0,1 และ 2 เท่านั้น ส่วนแท่งเทียบมาตรฐานที่มีความถูกต้องระดับ K ที่มีระดับความถูกต้องสูงกว่าระดับ 0 พบว่าต้องใช้การวัดแบบสัมบูรณ์จึงจะทำให้แท่งเทียบมาตรฐานระดับ K มีค่าความถูกต้องสูงกว่าระดับ 0 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานระดับ K กับเครื่องวัดแท่งเทียบมาตรฐานแบบเชิงกล (Mechanical Comparator) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดนี้เป็นไปตามข้อแนะนำของ ISO 10012 นั่นคือ อัตราส่วนค่าความถูกต้องของเครื่องมือวัดเทียบกับแท่งเทียบมาตรฐานต้องเท่ากับ 1:10

จากเหตุผลข้างต้นจึงไม่สามารถวัดแท่งเทียบมาตรฐานระดับ K ด้วยวิธีเปรียบเทียบไม่ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวัดแบบสัมบูรณ์เท่านั้น จึงจะทำให้ค่าที่ถูกต้องของแท่งเทียบมาตรฐานระดับ K เป็นไปตามข้อกำหนดของ ISO 10012 /1992(E)



รูปที่ 1.1 ลำดับการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐาน

จากแผนภาพในรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นแนวทางการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานทั้งระบบ เริ่มต้นด้วยเงื่อนไขที่ว่านำแท่งเทียบมาตรฐานระดับ K ที่มีอยู่ 2 ชุด โดยแท่งเทียบมาตรฐาน 1 ใน 2 ชุด จะถูกส่งไปสอบเทียบยังสถาบัน PTB ด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบ 3 ความยาวคลื่น (633 nm, 544nm และ 780 nm) เพื่อทราบค่าความถูกต้องและค่าความไม่แน่นอนที่แท้จริงก่อน(ที่นัยสำคัญ $1x10^{-9}$) จากนั้นนำผลที่ได้จากใบรับรองมาถ่ายทอดค่าความถูกต้องให้กับแท่งเทียบมาตรฐานระดับ K อีกชุดหนึ่งที่ยังไม่ทราบค่าความถูกต้องและค่าความไม่แน่นอนด้วยวิธีเปรียบเทียบเพื่อทราบค่าความถูกต้องโดยประมาณ(ที่นัยสำคัญ $1x10^{-8}$)ก่อน จากนั้นจึงใช้วิธีการวัดแบบสัมบูรณ์ด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แบบความยาวคลื่นแสงเดียว (633 nm) เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้อง(ที่นัยสำคัญ $1x10^{-9}$) และค่าความไม่แน่นอนที่แท้จริงอีกครั้งหนึ่ง

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานในระดับทุติยภูมิจำเป็นต้องทราบค่าความถูกต้องของแท่งเทียบมาตรฐานในระดับ K อย่างละเอียดหรือที่นัยสำคัญ 1×10^{-9} เพื่อให้ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องของแท่งเทียบมาตรฐานเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3650:1998

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ และทำการทดลองถ่ายทอดค่าความถูกต้องให้กับแท่งเทียบมาตรฐาน โดยใช้หลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ซึ่งใช้ความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นมาตรฐานในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องให้กับแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm ภายใต้สภาวะแวดล้อมอุณหภูมิ (20 ± 0.5)°C ความชื้นสัมพัทธ์ (50 ± 15)%RH ความดันบรรยากาศ (1013 ± 50) hPa และประมวลผลโดยชุดประมวลผล พร้อมทั้งมีการชดเชยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการวัดเพื่อลดความผิดพลาด

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยจะเป็นข้อมูลสำหรับการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคในการสอบเทียบให้กับแท่งเทียบมาตรฐาน เพื่อยืนยันผลการสอบเทียบในระดับที่ยอมรับของนานาประเทศ

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

ขั้นตอนที่ 2 วางแผนการทดลองและหาค่า pre-measurement ของแท่งเทียบมาตรฐาน

ขั้นตอนที่ 3 ทดลองประกบแท่งเทียบมาตรฐานเข้ากับเบสเพลต เพื่อนำไปทำการวัด โดยใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

ขั้นตอนที่ 4 ทดลองการวัดค่าซ้ำ (Repeatability) ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5, 15, 25, 50, 75 mm

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ขั้นตอนที่ 6 ประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด

ขั้นตอนที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.6 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

เดือน	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
ขั้นตอนที่ 1								
ขั้นตอนที่ 2								
ขั้นตอนที่ 3								
ขั้นตอนที่ 4								
ขั้นตอนที่ 5								
ขั้นตอนที่ 6								
ขั้นตอนที่ 7								

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการศึกษาวิจัยนี้ จะเป็นแนวทางในการพัฒนาขีดความสามารถรวมทั้งเพิ่มทักษะ ความชำนาญ และความเชี่ยวชาญให้กับบุคคลากรในงานมาตรวิทยาด้านการวัดความยาวมาตรฐาน โดยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์นี้สามารถลดค่าความไม่แน่นอนลงและเพิ่มค่าความถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้เทคนิคการวัดด้วยเครื่องดังกล่าวยังสามารถแก้ไขปัญหาและลดอุปสรรคเนื่องจากสภาวะแวดล้อมขณะทำการถ่ายทอดค่าความถูกต้องให้กับแท่งเทียบมาตรฐาน อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการสอบกลับแท่งเทียบมาตรฐานไปยังต่างประเทศ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยในปัจจุบัน และเป็นตัวบ่งชี้ระดับความสามารถของห้องปฏิบัติการมาตรวิทยาด้านความยาวและมิติเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างห้องปฏิบัติการในระดับนานาชาติ (Interlaboratory Comparison) ได้อีกด้วย

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีนำเทคนิคของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์มาประยุกต์ใช้ในงานมาตรวิทยาทางด้านความยาวและมิติ เพื่อให้ผลการวัดมีค่าความถูกต้องสูงขึ้น โดยใช้แสงเลเซอร์เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการถ่ายทอดค่าความถูกต้อง ตามนิยามความยาว 1 เมตร ซึ่งการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแบ่งตามระดับความละเอียดของเครื่องมือวัด ตั้งแต่มาตรฐานขั้นปฐมภูมิถ่ายทอดมายังมาตรฐานขั้นทุติยภูมิ และขั้นทุติยภูมิถ่ายทอดลงไปยังมาตรฐานใช้งาน

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงวิธีการถ่ายทอดค่าความถูกต้องขั้นทุติยภูมิ โดยใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

2.1 นิยามความยาวหนึ่งเมตร (Definition of the metre)

มาตรวิทยาเป็นศาสตร์เกี่ยวข้องกับการวัดปริมาณรากฐานแขนงต่างๆ เช่น มวล ความยาว แรง ความดัน ไฟฟ้า ความถี่ อุณหภูมิ เสียงและวัสดุอ้างอิง เพื่อรักษาความเป็นมาตรฐานและการถ่ายทอดค่าความถูกต้องไปยังระดับต่างๆ

หน่วยความยาวมาตรฐาน คือ เมตร ซึ่งเป็นระบบหน่วยระหว่างประเทศ (ระบบเอสไอ) กำหนดโดยที่คณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยการชั่ง ตวง วัด (Committe Intenational des Poids et Mesures: CIPM) มาตรฐานความยาวระหว่างประเทศสิ่งแรก คือ แท่ง (Bar) ของโลหะผสมระหว่างแพลตทินัมกับอิริเดียม เรียกว่า เมตรมาตรฐาน (Standard Meter) ได้เก็บรักษาไว้ที่สำนักงานมาตรฐาน ชั่ง ตวง วัด ระหว่างประเทศ (Bureau International of Poids et Mesures: BIPM) ที่กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส ปี ค.ศ. 1889 เป็นมาตรฐานความยาว ซึ่งมีความยาว 1 เมตร เป็นแท่งโลหะลักษณะเป็นรูปตัวเอ็กซ์ (X)

ต่อมามีเหตุผลหลายประการที่คัดค้านการใช้แท่งโลหะเป็นมาตรฐานขั้นปฐมภูมิความยาว เนื่องจากอาจถูกทำลายด้วยไฟหรือสงคราม เป็นภาพจำลองที่ไม่ถูกต้องและไม่เป็นที่ยอมรับ ที่สำคัญที่สุดความถูกต้องที่จำเป็นในการเปรียบเทียบความยาวระหว่างกัน ซึ่งวัดด้วยไมโครมิเตอร์นั้น ไม่สามารถใช้ได้กับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ ในปี ค.ศ. 1894 ฮิปโปไลต์ หลุยส์ ฟีโซ (Hippolyte Louis Fizeau) ได้แนะนำว่าควรใช้ความยาวคลื่นแสงเป็นมาตรฐานความยาว ผลที่ได้มีความถูกต้องและมีเสถียรดีที่สุดจนกระทั่ง BIPM ยอมรับและนำไปใช้ และได้พิสูจน์แล้วว่าความยาวคลื่นของการแผ่รังสีแสงสีเดียวอยู่บนพื้นฐานของหน่วยความยาวระหว่างประเทศได้ดี ซึ่งต่อมา แฟ็บบี้ (Fabry) และ เปโรต์ (Perot) ชาวฝรั่งเศสก็ได้ค้นพบงานอย่างเดียวกัน

ในปี ค.ศ. 1960 จึงได้นิยาม เมตร เป็นความยาวที่ 1650763.73 เท่าของความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศของการแผ่รังสีที่สมนัยกับการเปลี่ยนแปลงระหว่างระดับชั้นพลังงาน $^{2}p_{10}$ กับ $^{5}d_{5}$ ของอะตอมคริปตอน-86 (605.780 210 nm)

ในการประชุมของ CIPM ครั้งที่ 12 ปี ค.ศ. 1964 ได้แนะนำให้ใช้สเปกตรัมระดับพลังงานอื่นของ คริปตรอน-86, เมอร์คิวรี-198 และแคดเมี่ยม-114 เป็นมาตรฐานขั้นทุติยภูมิทางด้านความยาว

ต่อมาได้มีการแนะนำว่ามาตรฐานทั้งหมดรวมถึงความยาว มวล และอุณหภูมิ ควรจะได้นิยามใหม่ โดยเชื่อมให้มีมาตรฐานที่ถูกต้องที่สุด นั่นคือเวลา ซึ่งมีความถูกต้องถึง 10^{13} ดังนั้นในการประชุมของ CIPM ครั้งที่ 17 ในปี ค.ศ. 1983 จึงได้กำหนดความยาวมาตรฐานระหว่างประเทศขึ้นใหม่ว่า 1 เมตรคือ ระยะทางที่แสงเดินทางไปได้ในสุญญากาศในระหว่างช่วงเวลา 1/299,792, 458 วินาที ซึ่งหมายความว่าความเร็วของแสง (c) ในสุญญากาศขณะนั้น คงตัวเท่ากับ 299,792, 458 เมตรต่อวินาที

2.2 สมบัติเฉพาะของแสงเลเซอร์

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเดินทางผ่านสุญญากาศและวัตถุโปร่งแสง มีความเร็วที่เดินทางในสุญญากาศเท่ากับ 299,792,458 m/s

ความหมายของที่ทำให้นิยาม 1 เมตรเป็นจริงมีอยู่ 2 ประการ คือ

1) ระยะทางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในสุญญากาศเป็นเวลา 1 วินาที คาบเวลา(T) ที่วัดได้จาก 1 คาบเวลา มีค่าเท่ากับ 1=ct ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วที่แสงเดินทางในสุญญากาศ c = 299,792,458 m/s
2) ความยาวคลื่นในสุญญากาศ (λ) ในระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวคลื่นสามารถคำนวณได้จากความถี่ซึ่งเป็นค่าที่สามารถวัดได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$c = f\lambda \tag{2.1}$$

เมื่อ c = ความเร็วแสง

f = ความถี่

λ = ความยาวคลื่นในสุญญากาศ

สมบัติเฉพาะของเลเซอร์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ทำชุดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ มีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของเลเซอร์

ชนิดของเลเซอร์	ความยาวคลื่น, μm	เอาท์พุท
ฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser)	3.39, 1.15, 0.63, 0.61, 0.54	0.5-25 mW
อาร์กอนอิออน (Ar^{+} Laser)	0.51, 0.49	0.5 – 2-3W
ไดโอด ($GaAlA_S$ Laser)	~0.87, ~0.75, ~0.67	~5 – 10mW
ดาย(Dye Laser)	~1.08 - ~ 0.41	~10-100 mW
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Laser)	~10.6, ~9.0	2-3W –2-3kW
รูบี้หรือทับทิม (Ruby Laser)	0.69	0.6-10 J
เอ็นดี-แย็ก (Nd-YAG Laser)	1.06	0.1 – 0.15 J

เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เป็นที่นิยมใช้ในการทำชุดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์อย่างกว้างขวางเพราะลำแสงที่ออกมาสามารถมองเห็นได้ ย่านที่นิยมมากที่สุดคือช่วงความยาวคลื่น 633 nm

เลเซอร์อาร์กอนอิออน เป็นเลเซอร์ที่ให้เอาท์พุทที่มีกำลังสูง สามารถทำงานที่ช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็น

เลเซอร์ไดโอดใช้สารกึ่งตัวนำ เป็นโครงสร้างรวมสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟาเรดและแสงสีแดง สามารถปรับความยาวคลื่นได้หลายย่านโดยการปรับกระแสให้เหมาะกับความยาวคลื่นที่ต้องการ

เลเซอร์ดาย สามารถทำงานที่ช่วงความยาวคลื่นในย่านที่มองเห็นคือความยาวคลื่น 1.08 ถึง 0.41 μm ซึ่งถ้าต้องการใช้จะต้องเลือกเลเซอร์ดายที่ความยาวคลื่นให้เหมาะสม

เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ สามารถทำงานในช่วงความยาวคลื่นได้สองย่านในช่วงของแสงอินฟาเรด เพราะว่าความยาวคลื่นแสงยาวและเป็นประโยชน์มากในการนำเอามาใช้วัดระยะทางไกล

เลเซอร์รูบี้หรือทับทิมและเลเซอร์เอ็นดี-แย็กเป็นพัลส์แคบๆ ของแสงที่ใช้วัด (< 20 ns) ให้กำลังออกสูงมาก

2.3 เลเซอร์อินเตอร์ฟีรอเมตรี (Laser Interferometry)

ปี ค.ศ. 1675 โรเมอร์ (Romer) นักดาราศาสตร์ชาวเดนมาร์ก ได้ทำการวัดความเร็วแสงครั้งแรกโดยการศึกษาปรากฏการณ์ของการเกิดจันทรคราสที่เกิดจากดาวพฤหัสส่วนการวัดความเร็วแสงโดยใช้เครื่องมือบนพื้นโลกนั้นมักอาศัยหลักการมอดูเลตคลื่นแสง แล้ววัดหาระยะทางที่คลื่นแสงนั้นเดินทางไปในระยะทางที่ทราบค่า นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามวัดหาค่าความเร็วแสงนี้โดยอาศัยหลักการและวิธีดังกล่าว ต่อมาในปี ค.ศ. 1927 อัลเบิร์ต. เอ. ไมเคิลสัน (Albert A. Michelson) หรือรู้จักกันในชื่อว่าไมเคิลสัน นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกาได้วัดความเร็วแสงที่เดินทางเป็นระยะทาง 35 กิโลเมตร ได้ค่าความเร็วแสงเป็น 299,796 $\pm$ 4 km/s และปีต่อมาเบิร์กรานด์ (Bergsrand) ได้วัดค่าความเร็วแสงเป็น 299,792.458 km/s เป็นต้น

จากการพัฒนาเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่มีเสถียรภาพดี ซึ่งเป็น Iodine - stabilized He-Ne Laser จึงทำให้การวัดหาค่าความถี่สัมบูรณ์ได้อย่างแน่นอน ที่ค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 2.5×10^{-11} ตามข้อกำหนดของ CIPM จึงทำให้หาค่าความเร็วแสงที่วัดได้มีค่าความถูกต้องขึ้น การพัฒนาเลเซอร์ไม่เพียงแต่ช่วยให้เราสามารถกำหนดนิยามเท่านั้น แต่ยังมีส่วนพัฒนาโดยตรงต่อเทคนิคการวัดขนาดและสัดส่วนของวัตถุได้แม่นยำ โดยใช้เทคนิคอินเตอร์ฟีรอเมตรี เลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

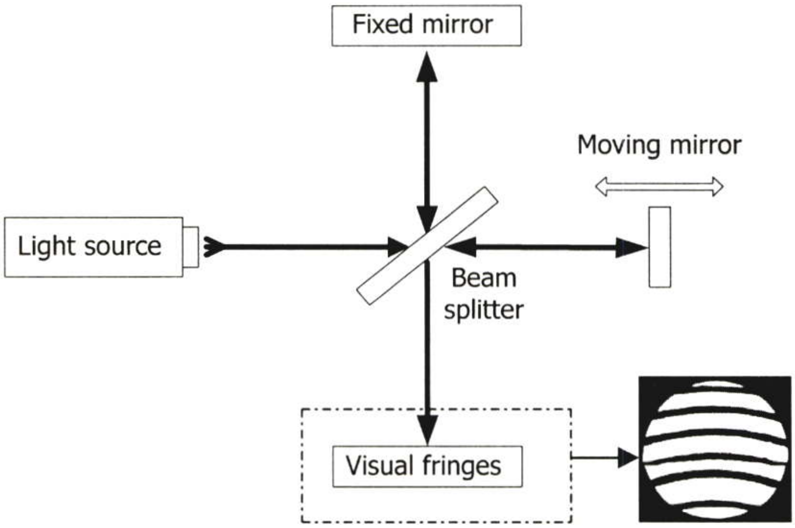
ปัจจุบันมีการนำเทคนิคของอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์มาประยุกต์ในงานมาตรวิทยาด้านความยาวและมิติ เช่น ที่ Dimensional Metrology Section สถาบัน NPL (National Physical Laboratoty) ประเทศอังกฤษ ใช้เครื่องเอ็นพีแอล ทีซ่า ออโตเมตริก เกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (NPL - TESA Automatic Gauge Block Interferometer) ตามหลักการของไทม์มานส์-กรีน อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Twyman - Green Interferometer), ที่ Precision Engineering Division Dimensional Metrology Group สถาบัน NIST ประเทศอเมริกา ใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ โดยใช้หลักการของครอสเตอร์อินเอตร์ฟีรอมิเตอร์ (Kosters Interferometer) เป็นต้น

2.3.1 หลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสัน (Michelson's Interferometry principle)

ในปี ค.ศ. 1887 ไมเคิลสัน เป็นผู้ประดิษฐ์อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ครั้งแรก สำหรับใช้วัดปริมาณของอีเธอร์ ต่อมาไมเคิลสันใช้เทคนิคนี้ตรวจจับโครงสร้างอะตอมของโซเดียม การทดลองทั้งสองนับว่าเป็นการบุกเบิกศึกษาทางด้านควอนตัมฟิสิกส์ครั้งยิ่งใหญ่ ไมเคิลสันเป็นคนแรกที่แสดงให้เห็นว่าการวัดความยาวโดยการใช้อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์จากแถบสเปคตรัมแสงสีแดงของแคดเมี่ยม

และได้ถูกพัฒนาให้มีความถูกต้องและเป็นที่ยอมรับของการวัดความยาวมาตรฐาน หลังจากนั้นได้มีการค้นคว้าเพิ่มเติมเพื่อหาเส้นสเปคตรัมที่เหมาะสมมากขึ้น

สำหรับเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสันดังรูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) จะถูกส่งมายังผลึกแยกลำแสง (Beam Splitter) แบบ 50% ทำการแยกลำแสงออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนจะมีความเข้มแสงลดลงครึ่งหนึ่ง ลำแสงส่วนที่หนึ่งเป็นลำแสงอ้างอิงจะไปสะท้อนยังกระจกที่ยึดติดอยู่กับที่ (Fixed mirror) ลำแสงส่วนที่สองจะไปยังสะท้อนกระจกที่เคลื่อนที่ได้ (Moving mirror) ลำแสงที่สะท้อนกลับจากกระจกที่ยึดติดอยู่กับที่และ กระจกที่เคลื่อนที่ได้มายังผลึกแยกลำแสงอีกครั้งหนึ่ง เปรียบเสมือนว่ามีแหล่ง

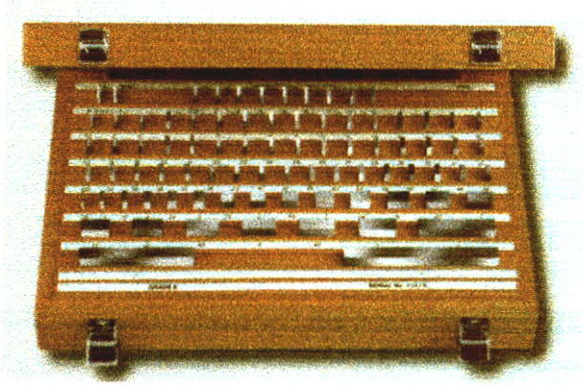


รูปที่ 2.1 หลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสัน

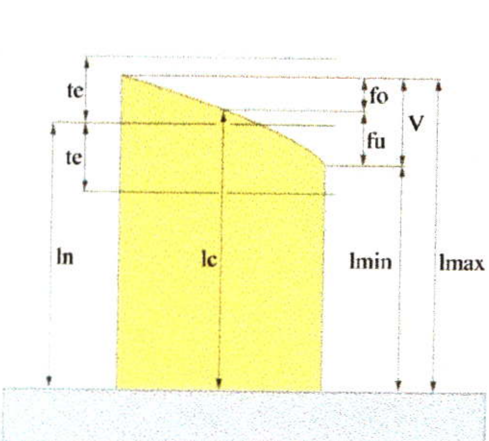
กำเนิดแสงสองแหล่งที่มารวมกัน ทำให้เกิดฟริงจ์ของการแทรกสอดขึ้นที่ฉากรับแสง (Visual fringes) ระยะห่างระหว่างฟริงจ์มีค่าเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ เมื่อทำการเลื่อนกระจกที่เคลื่อนที่ได้ เข้า-ออกจะพบว่าฟริงจ์ที่ฉากรับมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ โดยหลักการนี้ทำให้สามารถคำนวณหาระยะระหว่างกระจกทั้งสองได้

2.4 แท่งเทียบมาตรฐาน

แท่งเทียบมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบันแสดงดังรูปที่ 2.2 เป็นมาตรฐานความยาวอ้างอิง ประกอบด้วยผิวหน้าสัมผัสทั้งสองด้านเรียบและขนานกัน เนื่องจากผิวหน้า (Measuring face) มีความสำคัญมากสำหรับการประกบ (Wring) ของแท่งเทียบมาตรฐานเข้าด้วยกัน ซึ่งบอกขนาดความยาวได้จากส่วนปลายด้านหนึ่งถึงปลายอีกด้านหนึ่ง มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 9 mm ยาว 30 mm (ขนาดต่ำกว่า 10 mm) ถึง 35 mm (ขนาดตั้งแต่ 10 mmขึ้นไป) ทำจากวัสดุที่แข็งแรง ทนทานต่อการเสียดสีและสึกหรอ ไม่เป็นสนิมง่าย ผิวหน้าสัมผัสทั้งสองด้านเรียบและขนานกัน สามารถนำมาประกบเข้าด้วยกันได้ ความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานจะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปโดยอุณหภูมิที่ใช้อ้างอิงคือ 20°C วัสดุที่ใช้ทำแท่งเทียบมาตรฐานได้แก่ เหล็ก, เซรามิก, ทังสเตนคาร์ไบด์และโครเมี่ยมคาร์ไบด์ เป็นต้น ความยาวหรือความหนาของแท่งเทียบมาตรฐานที่จุดใดๆ คือระยะที่ตั้งฉากระหว่างจุดนั้นๆ กับจุดบนผิวหน้าสัมผัสที่แท่งเทียบมาตรฐานประกบอยู่ ดังรูปที่ 2.3, ความเรียบของแท่งเทียบมาตรฐานและการแบ่งระดับชั้นของแท่งเทียบมาตรฐานตาม ISO 3650 - 1998 แสดงดังตารางในภาคผนวก ก



รูปที่ 2.2 แท่งเทียบมาตรฐานชนิดเหล็ก



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของแท่งเทียบมาตรฐาน

2.4.1 **ความยาวของแท่งเทียบมาตรฐาน** (Length of Gauge Block : ln) ความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานที่จุดใดๆ บนผิวหน้า คือระยะที่ตั้งฉากระหว่างจุดนั้นๆ กับพื้นที่แท่งเทียบนั้นประกบอยู่ ดังรูปที่ 2.3

2.4.2 **ความยาวที่จุดกึ่งกลางของแท่งเทียบมาตรฐาน** (Central Length : lc) คือความยาวของแท่งเทียบมาตรฐาน ณ จุดกึ่งกลางของผิวหน้าการวัด ดังรูปที่ 2.3

2.4.3 **ส่วนเบี่ยงเบนจากความเรียบ** (Deviation from Flatness : te) คือระยะทางที่น้อยที่สุดระหว่างผิวหน้าที่ขนานกัน ดังรูปที่ 2.3

2.4.4 **ความปรวนแปรในความยาว** (Variation in Length : v) คือ ผลต่างของความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด ที่ทุกๆ จุดบนพื้นผิวหน้าของแท่งเทียบมาตรฐาน ดังรูปที่ 2.3

2.4.5 **ระดับของแท่งเทียบมาตรฐาน** (Grade of Gauge Block) แท่งเทียบมาตรฐานแบ่งระดับความถูกต้องออกเป็น 4 ระดับตามความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ตามตารางในภาคผนวก ก ดังนี้

1) ระดับ K เป็นระดับที่มีค่าความถูกต้องสูงที่สุด
2) ระดับ 0 เป็นระดับที่มีค่าความถูกต้องน้อยกว่าระดับ K
3) ระดับ 1 เป็นระดับใช้งานที่มีค่าความถูกต้องอยู่ในช่วง 0.2 μm
4) ระดับ 2 เป็นระดับใช้งานที่มีค่าความถูกต้องอยู่ในช่วง 0.2 μm

2.5 การถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐาน

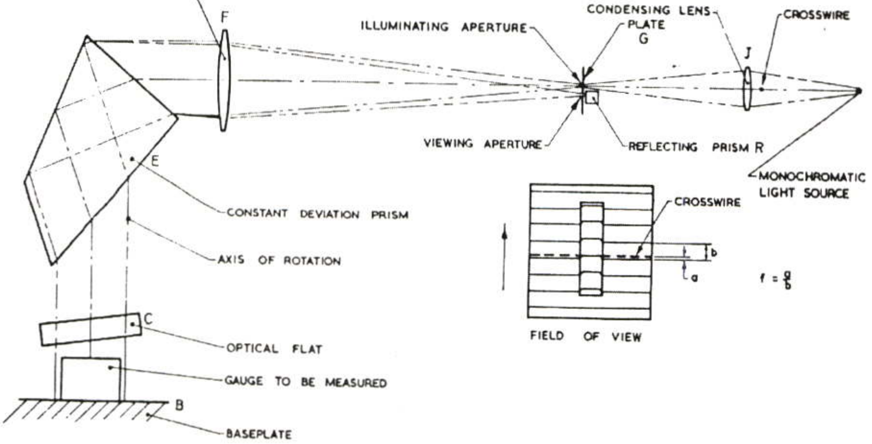
การถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานมีวิธีการทำได้ 2 วิธีดังได้กล่าวมาแล้ว ในที่นี้จะกล่าวถึงการทอดค่าความถูกต้องจากเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีการวัดแบบสัมบูรณ์ คือ

2.5.1 การถ่ายทอดค่าความถูกต้องด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์หลายความยาวคลื่น

พิจารณาจากตัวอย่าง การวัดแท่งเทียบมาตรฐานด้วยเครื่องพิตเตอร์ เอ็นพีแอล อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์[4] (The Pitter - NPL Interferometer) ดังรูปที่ 2.4 แสดงการวัดขนาดแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้แสงจากหลอดแคดเมี่ยมที่ทำให้เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดและเพิ่มความเข้มแสงโดยการรวมแสงด้วยเลนส์รวมแสง (J) ที่อยู่บนแผ่นเจาะรู (Pin-hole plate: G) ก็จะได้จุดกำเนิดแสงตกอยู่

บนคอลลิเมเตอร์เลนส์ (F) ทำให้แสงที่ผ่านออกมาจากคอลลิเมเตอร์เลนส์เป็นลำแสงขนาน โดยขนาดของลำแสงนั้นครอบคลุมถึงขนาดของแท่งเทียบมาตรฐานและเบสเพลตที่ต้องการจะวัด เมื่อได้ลำแสงขนานก็ส่งผ่านตรงไปยังปริซึม (E) ทำให้ลำแสงขนานหักเหเกิดเป็นแสงสีต่างๆ ตามช่วงความยาวคลื่นของแสง เมื่อต้องการจะเลือกช่วงความยาวคลื่นใดก็ปรับมุมเอียงของการสะท้อนแสงที่ผิวของปริซึมสัมพันธ์กับเบสเพลตที่ประกบติดกับแท่งเทียบมาตรฐานลำแสงสะท้อนกลับทำมุม 90° ไปยังกระจกเอียง (Proof -plane : C) โดยผิวด้านล่างของแผ่นอ็อฟติคอลแฟล็ต(Optical flat) (C) จะถูกทำแบบกึ่งแสงผ่านได้และกึ่งแสงผ่านไม่ได้ เคลือบด้วยสารอลูมิเนียม ซึ่งลำแสงที่ผ่านไปได้กับลำแสงสะท้อนมีเศษส่วนเท่ากัน ส่วนหนึ่งของลำแสงที่สะท้อนกลับขึ้นไป และอีกส่วนหนึ่งผ่านแผ่นกระจกเอียงไปสะท้อนที่ผิวหน้าของแท่งเทียบมาตรฐานและผิวของเบสเพลตซึ่งใช้เป็นพื้นผิวอ้างอิง แสงสะท้อนกลับของผิวทั้งสองผ่านระบบทางแสง แต่เนื่องจากแนวแกนแสงทั้งสองเบี่ยงเบนไปเล็กน้อย เนื่องจากความเอียงของกระจกเอียง (C) ดังนั้นจะถูกแก้ด้วยกระจกปริซึม (R) ทำให้ลำแสงสะท้อนกลับทำมุม 90° เข้าสู่ช่องมองภาพ

ภาพการแทรกสอดหรือฟริงจ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนที่พื้นผิวอ้างอิงของเบสเพลตและถูกซ้อนทับด้วยภาพฟริงจ์จากการสะท้อนผิวของแท่งเทียบมาตรฐาน โดยทั่วไปภาพเศษส่วนฟริงจ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะบอกให้ทราบถึงระยะขจัดของแท่งเทียบมาตรฐาน ซึ่งระยะขจัดจะแปรตามความยาวคลื่นแสง เพราะฉะนั้นความยาวคลื่นของแสงจะถูกแยกออกด้วยกระจกปริซึมระยะขจัดที่วัดได้เป็นเศษส่วนของ b และ a ในรูปของเศษส่วนฟริงจ์ f = b/a ก็พอเพียงที่จะคำนวณเศษส่วนฟริงจ์ได้ แต่เครื่องหมายครอสไวร์(Crosswire) จะช่วยให้การตรวจวัดฟริงจ์ง่ายขึ้นโดยเคลื่อนผ่านระบบทางแสงในส่วนช่องมองภาพ ภาพฟริงจ์ที่ปรากฏสามารถคำนวณค่า f ได้จากทั้งสี่ช่วงความยาวคลื่นของแสง สีแดง สีเขียว สีฟ้า สีม่วง ด้วยแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแคดเมี่ยมจะถูกแยกออกโดยการหมุนปริซึมอย่างเหมาะสม



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเครื่อง พิตเตอร์ เอ็นพีแอล อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

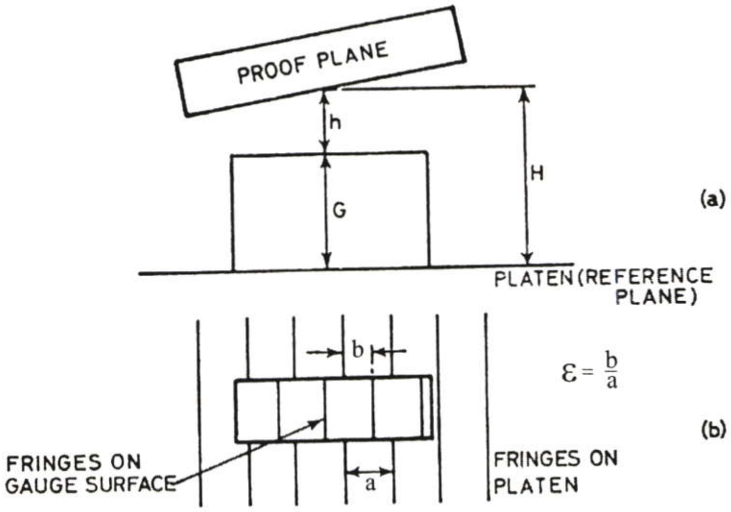
วิธีการวัด (Method of Measurement)

โดยทั่วไปการวัดแท่งเทียบมาตรฐานด้วยอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์จำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะอากาศให้ได้ตามมาตรฐานอ้างอิงได้แก่ อุณหภูมิ 20 °C ความดันบรรยากาศ 760 มม.ปรอท ความดันไอน้ำ 7 มม.ปรอท และมีปริมาณของคาร์บอนไดออกซ์ 0.03% ถ้าสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงไปจากนี้ต้องมีการแก้ไขสภาวะอากาศเพื่อชดเชยค่าให้ได้ใกล้เคียงค่าสภาวะอากาศมาตรฐานอ้างอิง

ตัวอย่างเช่น

พิจารณาการวัดแท่งเทียบมาตรฐาน ขนาด 3 mm โดยใช้สามความยาวคลื่นดังนี้

แสงสีแดง	0.643 850 37 μm หรือ 1 mm จะได้ค่า 3106.311 80 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น
แสงเขียว	0.508 584 83 μm หรือ 1 mm จะได้ค่า 3932.480 64 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น
แสงเหนือม่วง	0.467 817 43 μm หรือ 1 mm จะได้ค่า 4275.172 05 เท่าของครึ่งความยาวคลื่น



รูปที่ 2.5 (a) ระยะขจัดระหว่างแท่งเทียบมาตรฐานและเบสเพลต (b) การวัดเศษส่วนฟริงจ์

รูปที่ 2.5(a) แสดงแผนผังการทำงานของเครื่องการวัดเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ด้วยวิธีของพิตเตอร์ เอ็นพีแอล เบสเพลต แท่งเทียบมาตรฐานและลิ่มกระจก ส่วนรูปที่ 2.5 (b) แสดงความ

สัมพันธ์เศษส่วนฟริงจ์เท่ากับ 0.65 สำหรับแสงสีแดง เมื่อมองผ่านช่องมองภาพของเครื่องมือ สำหรับความยาวคลื่นต่างๆ ที่เลือกใช้ก็จะมีค่าเศษส่วนฟริงจ์ที่ได้จากการตรวจวัดแตกต่างกัน

ความสูงของแท่งเทียบมาตรฐาน (G) จะเท่ากับจำนวนเท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสง(n) รวมเศษส่วน b/a ของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสงของแหล่งกำเนิดที่ใช้ นั่นคือ

$$G = H - h = n.\frac{\lambda}{2} + \frac{b}{a}.\frac{\lambda}{2} \tag{2.2}$$

เราจะได้เศษส่วนฟริงจ์ต่างๆ b_1/a_1, b_2/a_2 และ b_3/a_3 ของแต่ละช่วงความยาวคลื่นให้มีค่าเป็น f_1, f_2 และf_3 โดยลำดับ ความสูงของแท่งเทียบมาตรฐานที่ประกบกับแผ่นเบสเพลตที่หาได้จากแต่ละค่าความยาวคลื่น มีค่าดังนี้

$$G = \frac{\lambda_1}{2}(n_1 + f_1);\ G = \frac{\lambda_2}{2}(n_2 + f_2);\ G = \frac{\lambda_3}{2}(n_3 + f_3) \tag{2.3}$$

เมื่อ f เป็นค่าที่ได้จาก b/a และเป็นค่าที่ไม่จำเป็นที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าระบุของแท่งเทียบมาตรฐาสำหรับค่าของความยาวคลื่นทั้งสามความยาวคลื่นแสง เพราะฉะนั้นค่าระบุเป็น

$$\begin{aligned} G_N &= \frac{\lambda_1}{2}(N_1 + \varepsilon_1) \\ G_N &= \frac{\lambda_2}{2}(N_2 + \varepsilon_2) \\ G_N &= \frac{\lambda_3}{2}(N_3 + \varepsilon_3) \end{aligned} \tag{2.4}$$

เมื่อ

G_N = ค่าความยาวแท่งเทียบมาตรฐานที่ระบุ

N = เลขจำนวนเต็มของครึ่งความยาวคลื่นในค่าความยาวแท่งเทียบมาตรฐานระบุ

ε = เศษส่วนฟริงจ์สำหรับความยาวคลื่นใดๆ ที่ได้จากการคำนวณความยาวแท่งเทียบมาตรฐาน G_N

$$G - G_N = \frac{\lambda}{2}\left[(n - N) + (f - \varepsilon)\right] \tag{2.5}$$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมมติให้ค่าเศษส่วนฟริงจ์ที่วัดได้ (f) เป็น $f_1 = 0.23$; $f_2 = 0.33$ และ $f_3 = 0.71$ และค่าที่คำนวณได้ของ ε เป็น $\varepsilon_1 = 0.94$; $\varepsilon_2 = 0.44$; $\varepsilon_3 = 0.52$ สำหรับทั้งสามความยาวคลื่นสีแดง สีเขียว และสีม่วงโดยลำดับ แทนค่าลงใน(2.5) จะได้

$$\begin{aligned} G - G_N &= \frac{0.643}{2}\left[\left(n_1 - N_1\right) + \left(0.23 - 0.94\right)\right]\mu\text{m} \\ &= \frac{0.508}{2}\left[\left(n_2 - N_2\right) + \left(0.33 - 0.44\right)\right]\mu\text{m} \\ &= \frac{0.467}{2}\left[\left(n_3 - N_3\right) + \left(0.71 - 0.52\right)\right]\mu\text{m} \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned} \therefore G - G_N &= \frac{0.643}{2}\left[\left(n_1 - N_1\right) + \left(0.29\right)\right]\mu\text{m} \quad \text{note : } (1 - 0.71) = 0.29 \\ &= \frac{0.508}{2}\left[\left(n_2 - N_2\right) + \left(0.89\right)\right]\mu\text{m} \quad \text{note : } (1 - 0.11) = 0.89 \\ &= \frac{0.467}{2}\left[\left(n_3 - N_3\right) + \left(0.19\right)\right]\mu\text{m} \end{aligned} \tag{2.7}$$

ค่า $(n_1 - N_1)$, $(n_2 - N_2)$ และ $(n_3 - N_3)$ เป็นค่าที่ยังไม่ทราบค่า แต่ทราบว่าต้องเป็นจำนวนเต็มและมีค่าน้อยๆ เมื่อใช้วิธีทดสอบค่า (trial and error) พบว่า

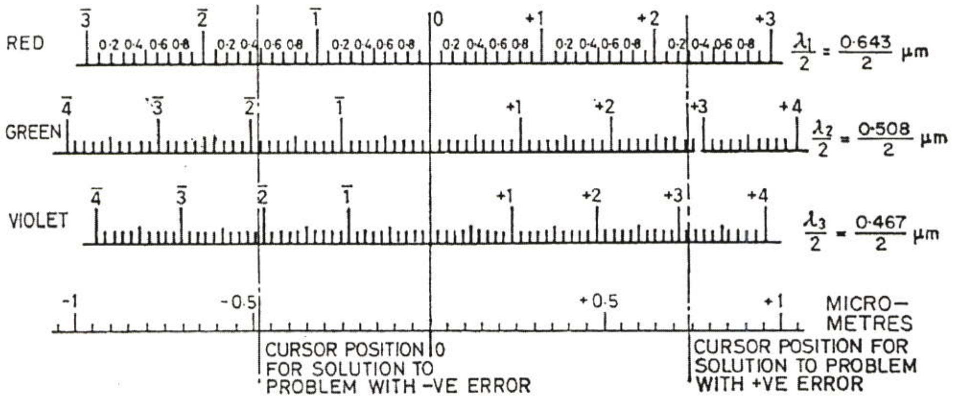
$$\begin{aligned} (n_1 - N_1) &= 2 \\ (n_2 - N_2) &= 2 \\ (n_3 - N_3) &= 3 \end{aligned} \tag{2.8}$$

เมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (2.7) พบว่าได้ผลใกล้เคียงกัน ผลการคำนวณตามขั้นตอนข้างต้น สำหรับ $G_N = 3.0$ mm สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากเครื่องพิตเตอร์ เอ็นพีแอล อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

1	2	3	4	5	6	7
ความยาวคลื่น (λ) μm	เศษส่วนฟริงจ์ (f) ที่วัดได้ μm	ค่า $\frac{\lambda}{2}$ ที่ขนาด 3.0 มม.	เศษส่วนฟริงจ์จากการคำนวณ μm	คอลัมน์ 2 - คอลัมน์ 4 μm	เทียบสเกล μm	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด
0.643(สีแดง)	0.23	9318.9354	0.94	0.29	2.29	
0.508(สีเขียว)	0.33	11 796.44192	0.44	0.89	2.84	0.74 μm
0.467(สีม่วง)	0.71	12 825.5165	0.52	0.19	3.13	

ค่าที่แสดงในคอลัมน์ที่ 6 และ 7 ได้จากการเทียบสเกล เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการได้มาซึ่งจำนวนค่าครึ่งความยาวคลื่นและเศษส่วนต่างๆ ทั้งหมด ซึ่งมีค่าความผิดพลาดของแท่งเทียบมาตรฐานรวมอยู่ด้วย เพราะฉะนั้นจะใช้บรรทัดคำนวณในรูปที่ 2.6 ที่ความยาวคลื่นสีแดง สีเขียว และสีม่วงเทียบสเกลที่จุดศูนย์ ค่าที่ได้จากตารางในคอลัมน์ที่ 5 เมื่อทำโดยใช้บรรทัดคำนวณจะได้ค่าดังแสดงในคอลัมภ์ที่ 6 ที่สเกลด้านล่างของบรรทัดคำนวณมีขีดสเกลเท่ากับ 1 ไมโครเมตรและแนวเส้นทาบผ่านค่า 2.29, 2.84 และ 3.13 ที่สเกลความยาวคลื่นจะตัดเส้นสเกลที่ 0.74 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดของความสูงของแท่งเทียบมาตรฐาน



รูปที่ 2.6 สเกลของบรรทัดคำนวณครึ่งความยาวคลื่นที่ใช้กับเครื่องพิตเตอร์ อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

ในทางปฏิบัติพบว่าค่าของ f ไม่สามารถอ่านได้ดีไปกว่า 0.05 ของช่องว่างฟริงจ์ รวมถึงเศษส่วนน้อยๆ ที่ไม่ตรงกันกับเศษส่วนฟริงจ์ในช่องที่ 6 เปรียบเทียบกับเศษส่วนฟริงจ์ในช่องที่ 5 เพราะว่าผลลัพธ์ค่าความผิดพลาดเชิงเส้นจากการตรวจวัดในลำดับนี้จะน้อยกว่า 0.02 ไมโครเมตรมากจึงสามารถยอมรับได้

สังเกตว่าหน่วยที่ครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านลบของสเกลเป็น $\bar{n}$ นั่นคือจำนวนเต็มมีค่าเป็นลบแต่เศษส่วนฟริงจ์จะยังคงเป็นบวกเมื่อพิจารณาที่แนวเส้นเคอร์เซอร์แสดงไปทางซ้ายของจุดศูนย์ค่าระยะขจัดตามลำดับดังนี้

สีแดง $\bar{2}.48 = (-2+0.48) = -1.52$ half wavelengths

สีเขียว $\bar{2}.09 = (-2+0.09) = -1.91$ half wavelengths

สีม่วง $\bar{3}.92 = (-3+0.92) = -2.08$ half wavelengths

ดังนั้นค่าความผิดพลาดแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับค่าต่างๆ ข้างบนที่ได้คูณด้วยครึ่งความยาวคลื่นตามลำดับ

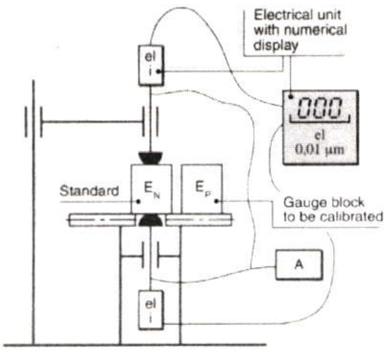
$$\therefore \text{Error} = \begin{Bmatrix} -1.52 \times \dfrac{0.643}{2}\,\mu\text{m} = -0.488\,\mu\text{m} \\ -1.91 \times \dfrac{0.508}{2}\,\mu\text{m} = -0.485\,\mu\text{m} \\ -2.08 \times \dfrac{0.467}{2}\,\mu\text{m} = -0.486\,\mu\text{m} \end{Bmatrix} \tag{2.9}$$

ดังนั้นค่าผิดพลาดเฉลี่ย = -0.486 μm

2.5.2 การถ่ายทอดค่าความถูกต้องด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ความยาวคลื่นเดียว

ในการการถ่ายทอดค่าความถูกต้องด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ความยาวคลื่นเดียว มีเทคนิคที่สำคัญคือจำเป็นต้องใส่ค่าความถูกต้องของแท่งเทียบมาตรฐานที่ต้องการวัดในระดับ 0.01 μm ก่อน ด้วยวิธีการวัดแบบเปรียบเทียบ ซึ่งจะเรียกว่าค่า Pre-measurement หรืออาจใช้ผลการสอบเทียบครั้งก่อน โดยใช้เครื่องวัดเปรียบเทียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน

เครื่องวัดเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน (Gauge Block Comparator) ลักษณะของเครื่องสอบเทียบมาตรฐานประกอบด้วย เฟรม แท่นวาง แท่งเทียบมาตรฐาน ทรานสดิวเซอร์ สไตลัสบนและล่าง แอมปลิไฟล์



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเครื่องวัดเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน

หลักการสอบเทียบแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้เครื่องวัดเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน ดังรูป 2.7 ต้องคำนึงถึงระดับชั้นของแท่งเทียบมาตรฐานเป็นสำคัญ หลักการนี้ใช้วิธีการเปรียบเทียบโดยใช้แท่งเทียบมาตรฐานระดับสูงกว่า(ระดับ K) มาเปรียบเทียบระดับชั้นที่ต่ำกว่า ตั้งแต่ 0, 1 และ 2 ตามลำดับ ค่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นค่าแตกต่างระหว่างมาตรฐานกับตัวอย่างที่ต้องการทราบค่า จากการวัดด้วยเครื่องสอบเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน ดังรูปที่ 2.8 สามารถคำนวณค่าผลต่างของความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานที่อุณหภูมิใดๆ ได้จากสมการ

$$d\ell = L(1+\alpha\Delta T) - L_0 \tag{2.10}$$

เมื่อ

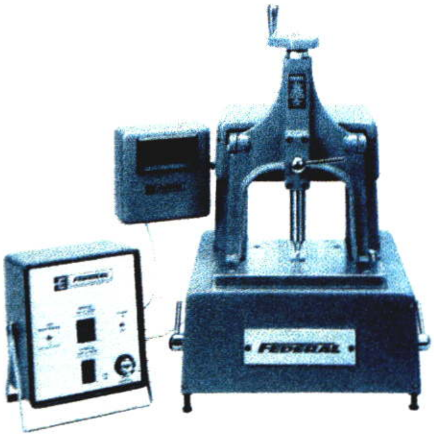
$d\ell$ = ผลต่างระหว่างค่าความยาวแท่งเทียบมาตรฐานที่อุณหภูมิใดๆ กับความยาวแท่งเทียบมาตรฐานที่อุณหภูมิ 20°C

L_0 = ความยาวแท่งเทียบมาตรฐานที่อุณหภูมิ 20°C

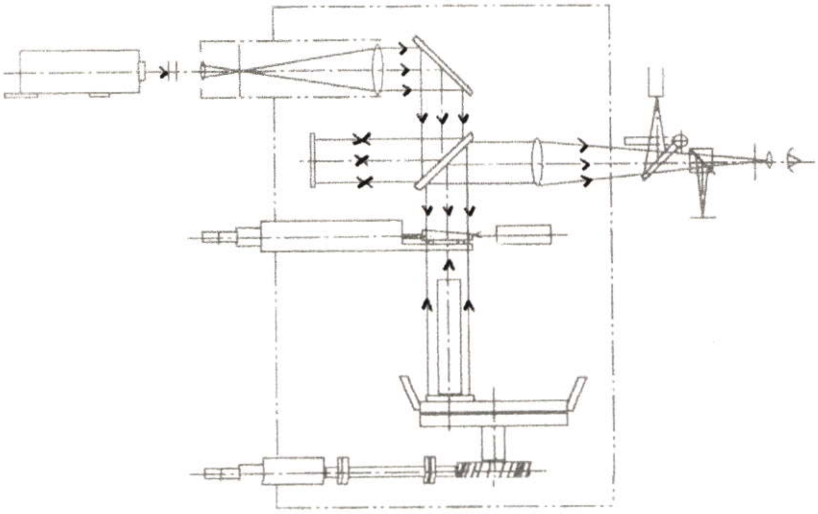
α = สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

ΔT = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิใดๆ กับอุณหภูมิที่ 20°C

L = ความยาวแท่งเทียบมาตรฐานที่ระบุ



รูปที่ 2.8 เครื่องวัดเปรียบเทียบแท่งเทียบมาตรฐาน



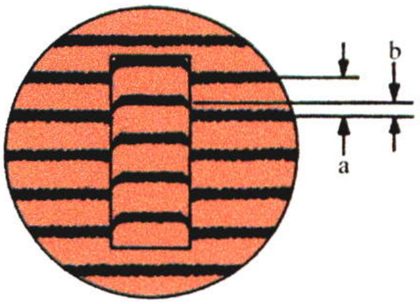
รูปที่ 2.9 ทางเดินแสงของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

เมื่อทราบค่า Pre-measurement แล้วนำค่าที่ได้มาเป็นค่าเปรียบเทียบในการหาค่าความถูกต้องที่ได้จากเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ โดยใช้หลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสัน ดังรูปที่ 2.9 มีแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่น 632.990844 nm ลำแสงนี้จะถูกส่งผ่านแผ่นความยาวคลื่นเพื่อปรับแนวโพลาไรซ์ของแสงออโต้คอลลิเมเตอร์ทำหน้าที่ขยายลำแสงจากเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 45 mm ซึ่งมีขนาดลำแสงครอบคลุมทั่วผิวหน้าแท่งเทียบมาตรฐานที่ต้องการวัดลำแสงที่ผ่านเลนส์ออโต้คอลลิเมเตอร์จะถูกส่งผ่านไปยังกระจกสะท้อน โดยปรับให้ลำแสงสะท้อนผ่านผลึกแยกลำแสง ลำแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนจะมีความเข้มลดลง 50% ของลำแสงที่ส่องผ่านและความเข้มที่ถูกแยกออกที่มีความเข้มเท่ากัน ลำแสงส่วนที่ 1 สะท้อนไปยังกระจกที่ยึดอยู่กับที่ และลำแสงส่วนที่ 2 สะท้อนไปยังกระจก

เบสเพลตที่ประกบกับแท่งเทียบมาตรฐานที่ต้องการวัด หลังจากนั้นลำแสงทั้ง 2 ส่วนจะสะท้อนกลับมายังผลึกแยกลำแสงอีกครั้งเสมือนกับมีแหล่งกำเนิด 2 แหล่งมารวมกัน ทำให้เกิดฟริงจ์ซึ่งสังเกตได้จากช่องมองภาพ

2.5.3 การวิเคราะห์เศษส่วนฟริงจ์ (The Fraction fringe method)

การวัดความยาวแท่งเทียบมาตรฐานต้องวิเคราะห์เศษส่วนฟริงจ์ที่ปรากฏอยู่บนเบสเพลตรอบแท่งเทียบมาตรฐานกับบนผิวปลายอีกด้านหนึ่งของแท่งเทียบมาตรฐานรูปที่ 2.10 จากรูปจะเห็นว่ามีการเหลื่อมกันระหว่างฟริงจ์ที่ปรากฏบนเบสเพลตกับฟริงจ์ที่ปรากฏบนแท่งเทียบมาตรฐานและสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเบสเพลตและแท่งเทียบมาตรฐานดังรูปที่ 2.11



$$\varepsilon = \frac{b}{a}$$

รูปที่ 2.10 การวัดเศษส่วนฟริงจ์บนเบสเพลตและแท่งเทียบมาตรฐาน

ความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานสามารถหาได้จากการคำนวณฟริงจ์ที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงบนเบสเพลตและแท่งเทียบมาตรฐานคูณกับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสง ซึ่งจำนวนฟริงจ์ที่สมนัยกับความยาวแท่งเทียบมาตรฐานที่คำนวณได้จะมีค่าเป็นเลขทศนิยม ซึ่งไม่สามารถทราบความยาวที่แท้จริงได้ ดังนั้นในการวัดด้วยวิธีการแทรกสอดทางแสงจะเป็นการหาค่าเศษส่วนฟริงจ์บนเบสเพลตกับฟริงจ์บนแท่งเทียบมาตรฐาน ในที่นี้เศษส่วนฟริงจ์มีค่า $\frac{b}{a}$ ดังนั้นความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานจะมีค่า

$$L = \frac{\lambda_v}{2n}\left(N + \frac{b}{a}\right) \tag{2.11}$$

เมื่อ

L = ความยาวแท่งเทียบมาตรฐานที่ระบุ

n = ค่าดัชนีหักเหของอากาศ

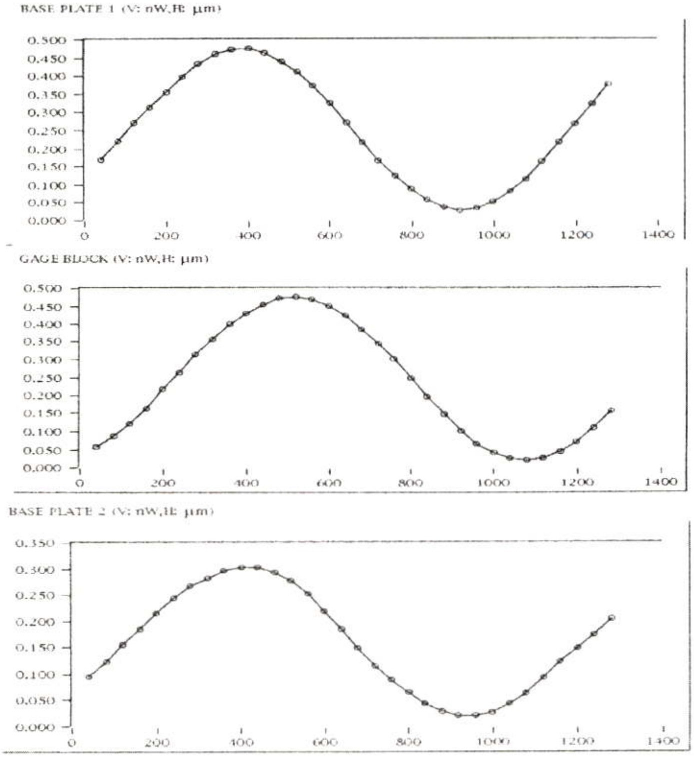
λ_v = ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ = $n\lambda$

λ = ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการวัด(ในอากาศ)

N = จำนวนเต็มของฟริงจ์ที่สมนัยกับความยาวของแท่งเทียบมาตรฐาน

b = ระยะห่างระหว่างแถบมืดบนเบสเพลตกับแถบมืดบนแท่งเทียบมาตรฐาน

a = ระยะระหว่างแถบมืดบนเบสเพลต

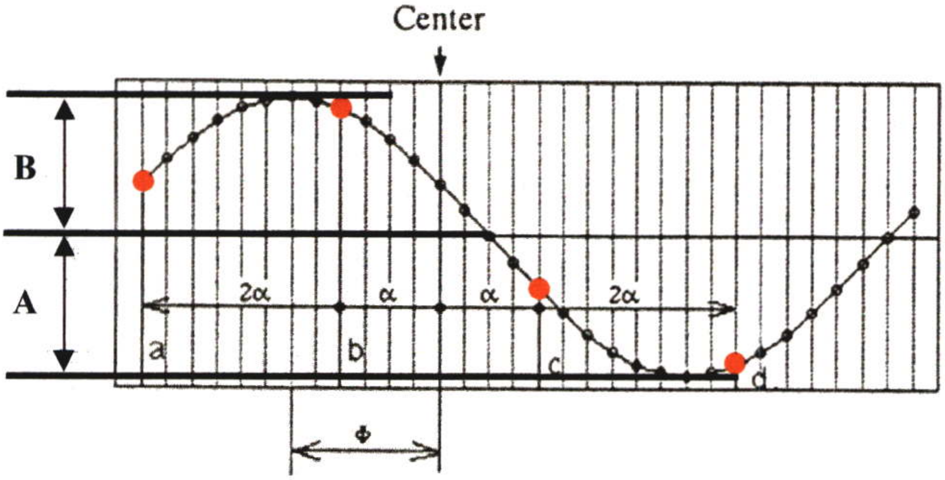


รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะการเคลื่อนที่ของลิ่มกระจก

จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.11 เป็นการวัดระยะที่ลิ่มกระจกเคลื่อนที่ด้วยชุดวัดระยะลิเนียร์เกจ ประมาณ 1 mm ของการเคลื่อนที่ของลิ่มกระจก ซึ่งแบ่งจุดการสแกนฟริงจ์เป็นจำนวน 32 จุด มีระยะห่างในการสแกนฟริงจ์แต่ละจุดเท่ากับ 40 μm ฉะนั้นระยะทางที่ลิ่มกระจกเคลื่อนที่เท่ากับ 1280 μm ทั้งบนเบสเพลตและบนแท่งเทียบมาตรฐาน

2.5.4 การสแกนฟริงจ์ (Fringe scanning)

การสแกนฟริงจ์เป็นขั้นตอนหนึ่งในการวิเคราะห์เศษส่วนฟริงจ์โดยการกำหนดจุดตรวจวัดความเข้มแสงบนแนวฟริงจ์



รูปที่ 2.12 แผนผังการสแกนฟริงจ์

หลักการสแกนฟริงจ์ จากรูปที่ 2.12 ให้ A และ B เป็นแอมปลิจูลของคลื่น โดยมีตำแหน่ง a, b, c, d เป็นเฟสที่จุดต่างๆ ของคลื่น สามารถทราบค่าได้จากการตรวจวัดความเข้มแสงตลอดแนวฟริงจ์ โดยกำหนดให้ระยะตั้งแต่จุด a จนถึงจุด b ตั้งแต่จุด b จนถึงจุด c และตั้งแต่ จุด c จนถึงจุด d มีช่วงเฟสต่างเท่ากับ 2α โดยใช้จุดกึ่งกลางระหว่างจุด b และ c เป็นจุดกึ่งกลางในการสแกนฟริงจ์ และค่ามุมเฟส (ϕ) เป็นระยะจากจุดกึ่งกลาง (Center) ถึงระยะจุดสูงสุดของยอดคลื่นในการสแกนฟริงจ์ไปจนถึงจุดตรวจวัดความเข้มแสงสูงสุดของรูปคลื่น ตามความสัมพันธ์ของสมการต่อไปนี้ [5]

$$\phi = \arctan\sqrt{\frac{np}{m^2}} \tag{2.12}$$

เมื่อ

$$m = -a+b+c-d = 8B\cos\phi\sin^2\alpha\cos\alpha \tag{2.13}$$

$$n = -a+3b-3c+d = 8B\sin\phi\sin^3\alpha \tag{2.14}$$

$$p = a+b-c-d = 8B\sin\phi\sin\alpha\cos^2\alpha \tag{2.15}$$

เมื่อ

$$a = A + B\cos(\phi - 3\alpha) \quad (2.16)$$

$$b = A + B\cos(\phi - \alpha) \quad (2.17)$$

$$c = A + B\cos(\phi + \alpha) \quad (2.18)$$

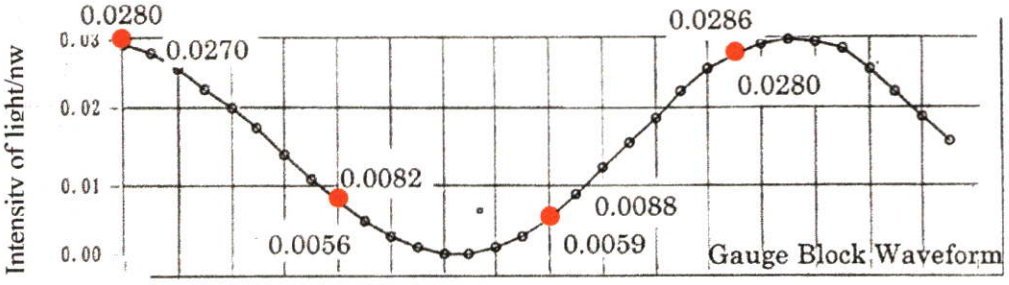
$$d = A - B\cos(\phi + 3\alpha) \quad (2.19)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปร a, b, c และ d ลงใน สมการ (2.12) m, n, และ p จะได้ค่ามุมเฟสเท่ากับ $\tan^2\phi = np/m^2$

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{\phi bL + \phi bR}{2} - \phi g\right)}{2\pi} \quad (2.20)$$

เมื่อ ϕbL, ϕbR และ ϕg เป็นเฟสของฟริงจ์ที่ปรากฏบนเบสเพลตซ้ายขวาและบนแท่งเทียบมาตรฐาน สมการที่เป็นการคำนวณหาเศษส่วนฟริงจ์จากการผลต่างมุมเฟสระหว่างแท่งเทียบมาตรฐานกับเบสเพลตที่ระยะขจัด 2π หรือประมาณ 1 λ

ตัวอย่างการคำนวณเศษส่วนฟริงจ์ เมื่อความเข้มแสงที่ตรวจวัดจากเครื่องวัดความเข้มแสงบนแท่งเทียบมาตรฐาน โดยที่ความเข้มแสงที่จุด a = 0.0280 nw, b = 0.0082 nw, c = 0.0059 nw, d = 0.0280 nw



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะขจัดลิ่มกระจกของแท่งเทียบมาตรฐาน

$$m = -a+b+c-d \quad (2.21)$$

$$= -0.0280+0.0082+0.0059-0.0280$$

$$= -0.0419$$

$$n = -a+3b-bc+d \tag{2.22}$$

$$= -0.0280 + (3 \times 0.0082) - (0.0082 \times 0.0059) + 0.0280$$

$$= 0.0069$$

$$P = a + b - c - d \tag{2.23}$$

$$= 0.0280 + 0.0082 - 0.0059 - 0.0280$$

$$= 0.0023$$

$$\phi_g = \arctan\sqrt{\frac{nP}{m^2}}$$

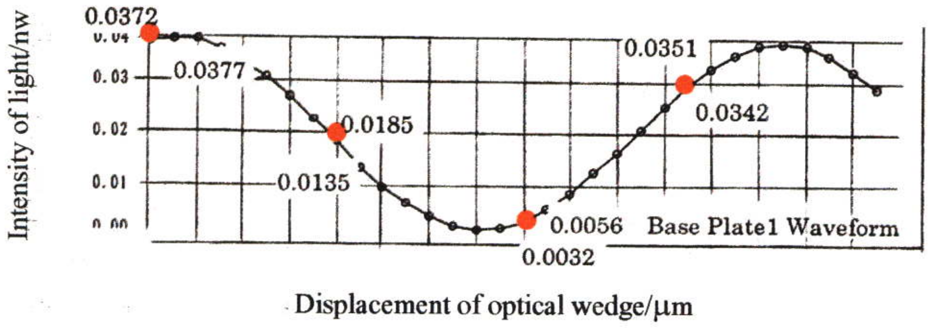
$$\therefore = \arctan\sqrt{\frac{(0.0069 \times 0.0023)}{0.0419^2}} \tag{2.24}$$

$$= 0.948 \text{ rad}$$

$$\phi_g = \frac{0.0948 \text{ rad}}{\pi} \times 180 \tag{2.25}$$

$$= 5.43 \text{ deg}$$

ความเข้มแสงที่ตรวจวัดจากเครื่องวัดความเข้มแสงบนเบสเพลต 1 โดยที่ความเข้มแสงที่จุด a = 0.0372 nw, b = 0.0185 nw, c = 0.0032 nw, d = 0.0342 nw



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะทางของลิ่มกระจกของเบสเพลต 1

$$m = -a+b+c-d \tag{2.26}$$

$$= -0.0372+0.0185+0.0032-0.0342$$

$$= -0.0497$$

$$n = -a+3b-bc+d \quad (2.27)$$

$$= -0.0372 + (3 \times 0.0185) - (0.0185 \times 0.0032) + 0.0342$$

$$= 0.0429$$

$$P = a + b - c - d \quad (2.28)$$

$$= 0.0372 + 0.0185 - 0.0032 - 0.0342$$

$$= 0.0183$$

$$\phi bL = \arctan\sqrt{\frac{nP}{m^2}}$$

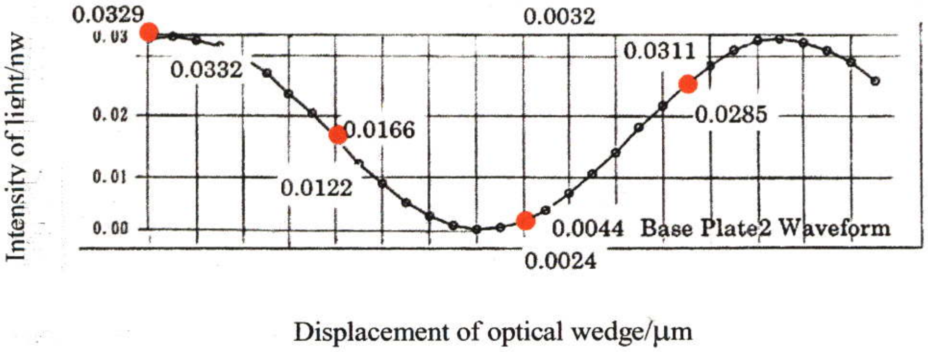
$$\therefore = \arctan\sqrt{\frac{(0.0429 \times 0.0183)}{(-0.0497)^2}} \quad (2.29)$$

$$= 0.51335 \text{ rad}$$

$$\phi bL = \frac{0.51335 \text{ rad}}{\pi} \times 180 \quad (2.30)$$

$$= 29.41 \text{ deg}$$

ความเข้มแสงที่ตรวจวัดจากเครื่องวัดความเข้มแสงบนเบสเพลต 2 โดยที่ความเข้มแสงที่จุด a = 0.0329 nw, b = 0.0166 nw, c = 0.0024 nw, d = 0.0285 nw



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะทางของลิ่มกระจกของเบสเพลต 2

$$m = -a+b+c-d \quad (2.31)$$

$$= -0.0329+0.0166+0.0024-0.0285$$

$$= -0.0424$$

$$n = -a+3b-bc+d \tag{2.32}$$

$$= -0.0329+ (3 \times 0.0166) - (0.0166 \times 0.0024)+0.0285$$

$$= 0.0382$$

$$P = a + b - c - d \tag{2.33}$$

$$= 0.0329+0.0166-0.0024-0.0285$$

$$= 0.0186$$

$$\phi bR = \arctan\sqrt{\frac{nP}{m^2}}$$

$$\therefore = \arctan\sqrt{\frac{(0.0382 \times 0.0186)}{(-0.0424)^2}} \tag{2.34}$$

$$= 0.56123 \text{ rad}$$

$$\phi bR = \frac{0.56123 \text{ rad}}{\pi} \times 180 \tag{2.35}$$

$$= 32.16 \text{ deg}$$

ค่าเศษส่วนฟริงจ์ที่คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับความต่างเฟส จะได้

$$\frac{b}{a} = \frac{\left(\frac{(29.41 + 32.16)}{2} - 5.43\right)}{2\pi} \tag{2.36}$$

$$= 0.07 \ \mu\text{m}$$

2.5.5 ผลกระทบจากสภาวะแวดล้อม (Environmental Effects)

เทคนิคการวัดนี้จะต้องมีการควบคุมสภาวะอากาศให้เหมาะสมที่อุณหภูมิ (20 ± 0.5) °C, ความชื้นสัมพัทธ์ (50 ± 15)% และความดันบรรยากาศ (1013 ± 50) hPa เป็นองค์ประกอบของค่าดัชนีหักเหของอากาศ ซึ่งมีผลต่อความยาวคลื่นแสง เพื่อเป็นการลดค่าความผิดพลาดของการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานไปจากอุณหภูมิ 20°C และเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความไม่แน่นอนของแท่งเทียบมาตรฐานสูงขึ้น อันเนื่องมาจากผลกระทบจากสภาวะอากาศแวดล้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจัดเตรียมแท่งเทียบมาตรฐานและเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ให้อยู่ใน

สภาวะที่ใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการวางแท่งเทียบมาตรฐานเพื่ออุณหภูมิคงที่ (Thermal Equalization Time) หลังทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วแสดงค่าดังตารางที่ 2.3 รวมทั้งควบคุมพื้นที่ใช้งานให้ปราศจากฝุ่นละออง

ตารางที่ 2.3 ช่วงเวลาที่วางแท่งเทียบมาตรฐานเพื่ออุณหภูมิคงที่

ขนาดของแท่งเทียบมาตรฐาน, mm	ช่วงเวลาเพื่อให้อุณหภูมิเท่ากัน, นาที
0.5 – 6.5	30
7.5 – 25	60
50 – 100	90

จากสมการที่ 2.37 ซึ่งเป็นสมการคำนวณค่าดัชนีหักเหอากาศ ที่มีผลกระทบของสภาวะอากาศ สามารถหาค่าดัชนีหักเหอากาศได้โดยแทนค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศที่วัดได้ ดังนี้

$$
\begin{aligned}
(n-1)\times 10^{8} = & \left[8342.54+\frac{2406147}{130-\left(\gamma/\mu\text{m}^{-1}\right)^{2}}+\frac{15998}{38.9-\left(\gamma/\mu\text{m}^{-1}\right)^{2}}\right] \\
& \times\left[\frac{p/\text{Pa}}{96095.43}\right]\left[\frac{1+10^{-8}\left(0.601-0.00972\,t/^{\circ}\text{C}\right)\left(p/\text{Pa}\right)}{1+0.0036610\left(t/^{\circ}\text{C}\right)}\right] \\
& -R\left[8.753+0.036588\left(t/^{\circ}\text{C}\right)\right]\left[0.037345-0.000401\left(\gamma/\mu\text{m}^{-1}\right)^{2}\right]
\end{aligned}
\qquad (2.37)
$$

เมื่อ

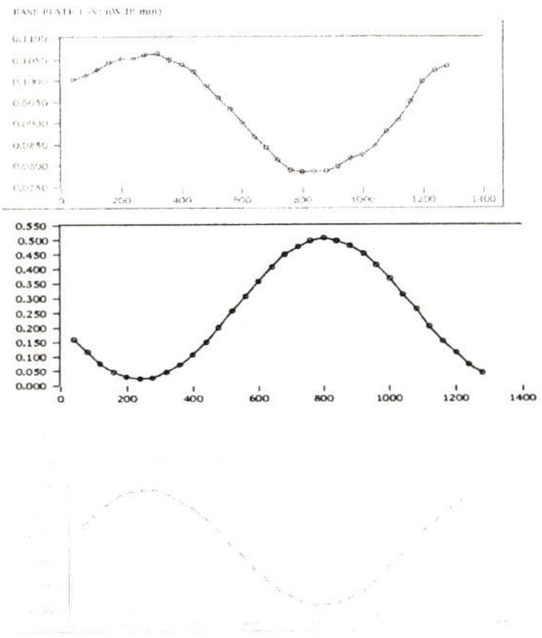
n = ดัชนีหักเห

γ = จำนวนคลื่นในสุญญากาศ

P = ความดันบรรยากาศ, Pa

t = อุณหภูมิ, °C

R = ความชื้นสัมพัทธ์, %RH



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับระยะการเคลื่อนที่ของลิ่มกระจกที่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศ

รูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิ และความสะอาดซึ่งส่งผลทำให้ค่าดัชนีหักเหของอากาศเปลี่ยนไปและมีผลต่อความเข้มแสงคลื่น ทำให้รูปคลื่นซายน์ออกมาไม่ราบรื่นเป็นผลให้ค่าการวัดครั้งนั้นผิดพลาดไป

ตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุที่อุณหภูมิ

Material	$\alpha \times 10^{-6}/^{\circ}C$
อินวา (นิกเกิล36%, ไอออน64%)	1.2
อลูมิเนียม	23
เหล็ก	10 – 15
ทิไทเนียม	8.6
ทังสเตน	4.5

วัสดุที่ใช้ทำแท่งเทียบมาตรฐานจะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวค่าหนึ่ง ความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานก็จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนขนาดของวัสดุแต่ละชนิดมีการขยายตัวไม่เท่ากัน สำหรับแท่งเทียบมาตรฐานที่เป็นชนิดเหล็กมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอยู่ในช่วง 10 – 15 $\times 10^{-6}/^{\circ}C$ ซึ่งหากสภาวะอากาศเปลี่ยนไปจาก 20°C ขนาดของแท่งเทียบการจะขยายตัวหรือหดตัว

ได้ ดังนั้นผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้สามารถคำนวณหาค่าความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$ ได้จากสมการ

$$L_0 = \frac{\lambda_v}{2n}\left(N + \frac{b}{a}\right)\left(1 - \alpha\left(T - 20\right)\right) - (-dP) \tag{2.38}$$

เมื่อ

L_0 = ความยาวแท่งเทียบมาตรฐานที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$

$\frac{\lambda_v}{2n}\left(N + \frac{b}{a}\right)$ = ความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานที่อุณหภูมิ T ใดๆ

$L_0\alpha(T\text{-}20)$ = การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐานอุณหภูมิ T ใดๆ

N = ค่า pre-measurement หารด้วย $\frac{\lambda_v}{2n}$

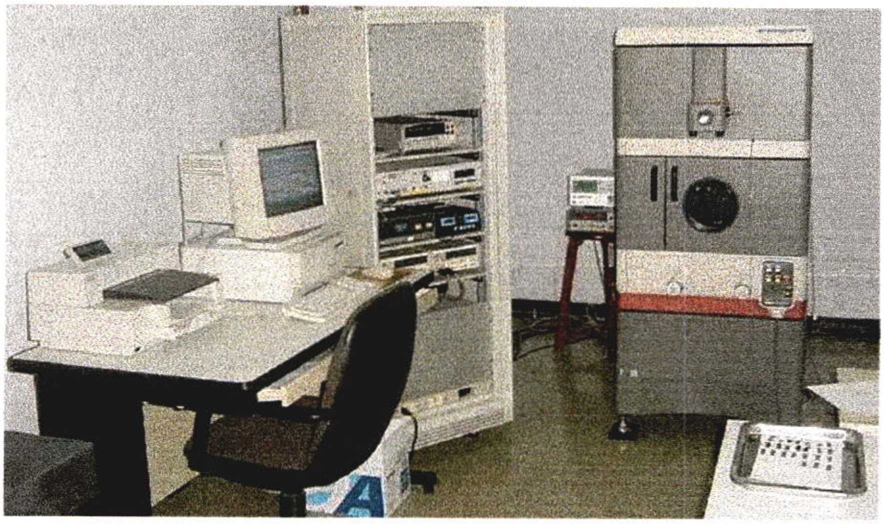
$\frac{b}{a}$ = ค่าเศษส่วนฟริงจ์ที่วัดได้จาก GBI

-dP เป็นค่าความต่างเฟสของเบสเพลตที่ใช้เป็นวัสดุต่างชนิดกันกับแท่งเทียบมาตรฐาน เช่น แท่งเทียบมาตรฐานชนิดเหล็กประกบกับเบสเพลตชนิดแก้วจะมีค่าของความต่างเฟส เนื่องจากแสงที่ตกกระทบมายังเบสเพลตที่เป็นแก้วจะทะลุผ่านลงไปแล้วสะท้อนกลับขึ้นมา สำหรับงานวิจัยนี้เบสเพลตที่ใช้เป็นชนิดเหล็ก ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับแท่งเทียบมาตรฐาน ฉะนั้นค่าความต่างเฟสเป็นศูนย์ จากสมการ 2.38 จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความถูกต้องและค่าความไม่แน่นอนของแท่งเทียบมาตรฐานจากเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ต่อไป

บทที่ 3
โครงสร้างเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์และอุปกรณ์

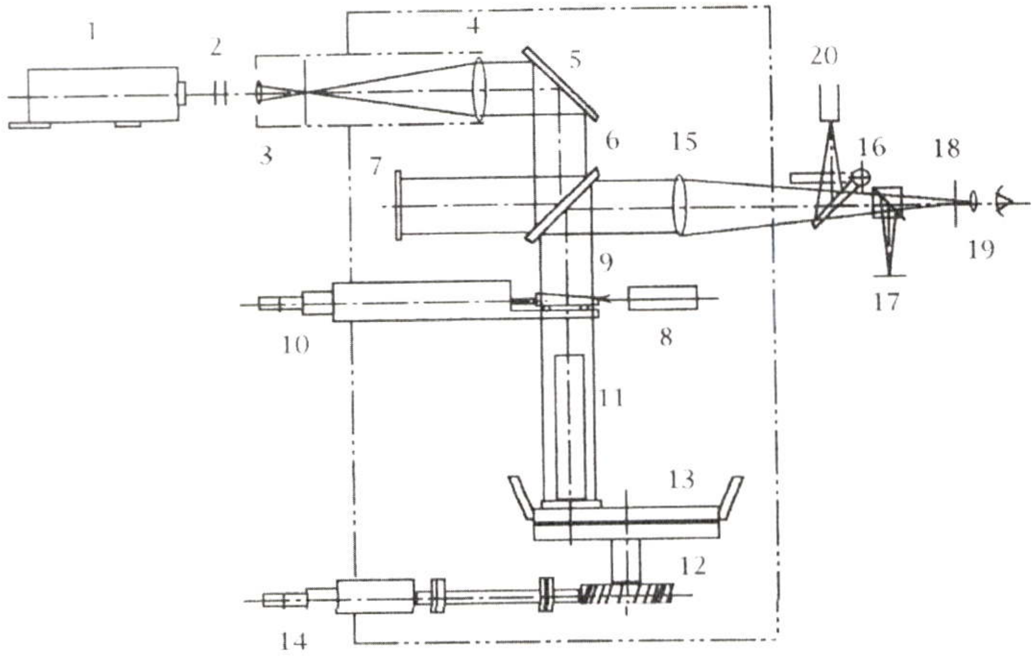
วิทยานิพนธ์นี้ใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ศึกษาเกี่ยวกับการสอบเทียบแท่งเทียบมาตรฐานด้วยเครื่องซึ่งเป็นเครื่องต้นแบบสำหรับถ่ายทอดค่าความถูกต้องจากมาตรฐานขั้นทุติยภูมิมายังมาตรฐานขั้นใช้งานในงานด้านมาตรวิทยา โดยใช้หลักการของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนความยาวคลื่นแสง 632.990844 nm เป็นมาตรฐานอ้างอิง ระบบการทำงานของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์เป็นระบบอัตโนมัติ ประกอบด้วย ระบบทางแสงและส่วนควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนประมวลผล รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังจะกล่าวถึงต่อไป

ระบบการสอบเทียบด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.1 เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

3.1 ระบบทางแสงของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์



รูปที่ 3.2 หลักการทำงานของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

รายละเอียดอุปกรณ์ระบบทางแสงของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ มีดังนี้

1. He-Ne Laser Source
2. Wave Plate
3. Condenser Lens
4. Collimation Lens
5. Refelecting Mirror
6. Beam Splitter
7. Reference Mirror
8. Linear Gauge
9. Optical Wedge
10. Wedge Drive Motor
11. Gauge Block to be measured
12. Rotary Table
13. Rotary Stage
14. Table Drive Motor
15. Observatory Telephoto Lens
16. Light Path Switching Mirror
17. Auto-Collimator System
18. Pinhole
19. Eyepiece
20. Light Intensity Detection Fiber

ชุดอุปกรณ์และโครงสร้างภายในส่วนประกอบระบบทางแสงของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.2 เริ่มจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน(1) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ถูกติดตั้งอยู่ด้านหลังของชุดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ดังรูปที่ 3.2 มีความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 632.990844 nm กำลังขนาด 1.2 mw เส้นผ่านศูนย์กลางลำแสง 0.6 mm ระดับclass 3B(LIS-50) ผ่านตัว wave plate(2) ซึ่งทำหน้าที่ปรับระนาบโพลาไรซ์ของแสงเลเซอร์ผ่านมายังเลนส์รวมแสงและเลนส์กระจายแสงขนาน(3 และ 4) ทำหน้าที่เป็นชุดขยายลำแสงจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 mm เป็นลำแสงขนานขนาดเส้นผ่าศูนย์

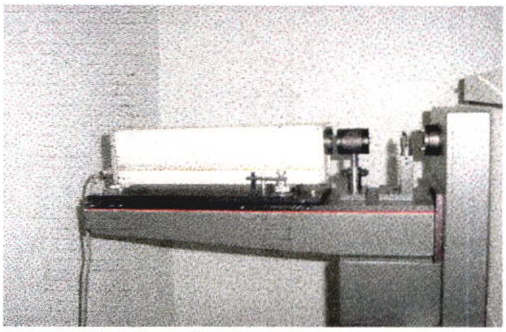
กลาง 45 mm เพื่อให้เกิดฟริงจ์เต็มพื้นที่ผิวของแท่งเทียบและสะท้อนกระจกเงา(5) ไปยังผลึกแยกลำแสงขนาด 50% เพื่อให้ลำแสงส่วนหนึ่งผ่านลิ่มกระจก(9) แทนการปรับมุมเอียงของแท่งเทียบมาตรฐานไปตกกระทบบนผิวของแท่งเทียบที่ประกบกับเบสเพลต(11) วางอยู่บนแท่นวาง(13) แล้วสะท้อนกลับมาเปรียบเทียบกับลำแสงอีกส่วนหนึ่งที่ถูกแบ่งออกไปตกกระทบยังกระจกเงา(7) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการทำให้เกิดการแทรกสอด และผ่านไปยังเลนส์รวมแสง(15) ซึ่งทำหน้าที่สะท้อนฟริงจ์ที่เกิดขึ้นไปยังตัวตรวจจับความเข้มแสง(20) และชุดมองภาพฟริงจ์ทางช่องมอง(16-19) ที่ใช้สำหรับมองภาพฟริงจ์ขณะทำการตรวจวัด โดยความเข้มแสงของฟริงจ์นี้และสภาวะสิ่งแวดล้อมจะตรวจวัดด้วย ระบบอิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ 3.3 โครงสร้างแชมเบอร์ภายนอกตัวเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

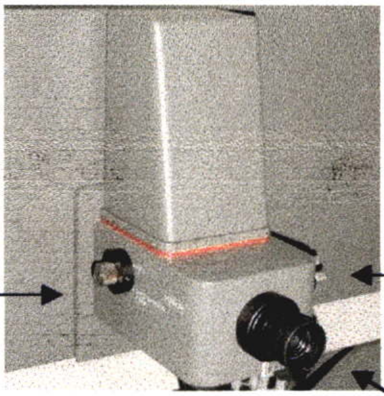
โครงสร้างแชมเบอร์ของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ประกอบด้วย 3 ส่วนดังรูปที่ 3.3 ส่วนแรกเป็นชุดอุปกรณ์ทางแสงที่ทำให้เกิดการแทรกสอดจะอยู่ส่วนบน ส่วนที่สองเป็นแท่นติดตั้งแท่งเทียบมาตรฐานอยู่ส่วนกลางของเครื่อง และส่วนที่สามอยู่ข้างล่างซึ่งเป็นขาตั้งที่แยกจากกันเป็นขาตั้งลดความสั่นสะเทือนมีแผ่นยางรองกันสะเทือน 3 ชิ้น ขาตั้งส่วนแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐานมีสกรูสามารถปรับระดับของเครื่องทั้ง 4 ตัว ส่วนประกอบภายในมีอุปกรณ์ทางแสงและอุปกรณ์ต่อพ่วงกับชุดอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวรายละเอียดต่อไป

3.1.1 ชุดกำเนิดแสงเลเซอร์

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนดังรูปที่ 3.4 เป็นแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นมีความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 632.990844 nm กำลังขนาด 1.2 mw มีความยาวคลื่นแสงที่เสถียรเท่ากับ 3 x 10^{-9} เส้นผ่านศูนย์กลางลำแสง 0.6 mm ระดับclass 3B(LIS-50) ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานที่เหมาะสมระหว่าง 0 ถึง 40°C ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านหลังเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์



รูปที่ 3.4 ชุดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน



รูปที่ 3.5 ชุดเลนส์ชุดพินโฮลและสวิตซ์ออโตคอลิเมชั่น

3.1.2 ชุดมองภาพทางช่องมอง

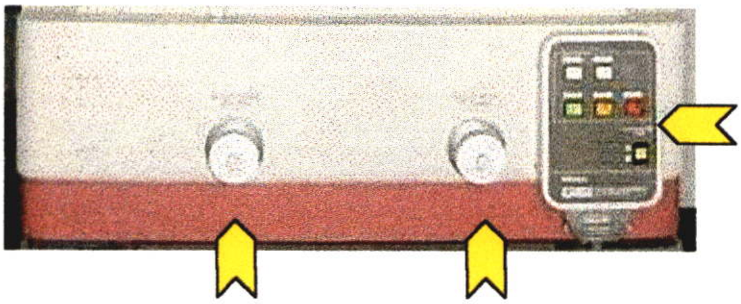
3.1.2.1 **ชุดเลนส์** ดังรูปที่ 3.5 ใช้สำหรับมองภาพฟริงจ์ที่เกิดการแทรกสอดหรือตรวจสอบแนวของแสงด้วยคอลลิเมเตอร์ฟังก์ชั่น (Collimator Function) ต้องปรับ eyepiece ก่อนใช้งานโดยหมุนไดอ็อปเตอร์แอ็ดจัสเมนท์ริงค์ (Diopter Adjustment Ring) ซึ่งเป็นแหวนปรับกำลังขยาย

3.1.2.2 **ชุดพินโฮลและสวิตซ์ออโตคอลิเมชั่น** ดังรูปที่ 3.5 ใช้ปรับเพื่อเลือกตำแหน่ง Auto/Fringe และ Autocollimation ดังนี้

1) ตำแหน่ง Auto/Fringe เพื่อวัดฟริงจ์
2) ตำแหน่ง Autocollimation เพื่อจัดแนวฟริงจ์ที่ปรากฏบนแท่งเทียบมาตรฐานกับเบสเพลตให้ตั้งฉากกับแนวแกนวัด

3.1.2.3 **คานหมุนเลือกเลนส์** (Lens Switching Lever) ใช้ปรับเพื่อเลือกวัดแบบอัตโนมัติและวัดแบบดูฟริงจ์ วิธีเลือกปรับทำได้ดังนี้

1) ตำแหน่ง Auto/Fringe ให้หมุนสวิตซ์มายังตำแหน่ง Auto/Fringe เป็นตัวปิดเปิดลำแสงและเป็นชุดตัวกรองแสงในการตรวจวัด ฟริงจ์ในช่องของระบบแสง
2) ตำแหน่ง Autocollimation ปรับให้สวิตซ์อยู่ในตำแหน่ง Autocollimation เพื่อสวิตซ์ปิดเปิดกระจกสำหรับช่องแสงที่ใช้ในการปรับระนาบแท่งเทียบมาตรฐาน



รูปที่ 3.6 แผงควบคุมแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐานของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

3.1.3 แผงควบคุมแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐาน รูปที่ 3.6 ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกชุดปรับระยะแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐาน และชุดควบคุมการหมุนแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐาน (Table Rotation) มีปุ่มควบคุมการหมุนทิศทางของแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.3.1 **ชุดปรับระยะแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐาน**

1) ไมโครมิเตอร์ปรับระยะพิทของแท่น (Micrometer Head for Setting The Pitch of Table) รูปที่ 3.6 ทำหน้าที่ปรับระยะฟริงจ์บนแท่งเทียบมาตรฐานและเบสเพลตที่ปรากฏให้มีแนวฟริงจ์จำนวน 5 – 6 ฟริงจ์

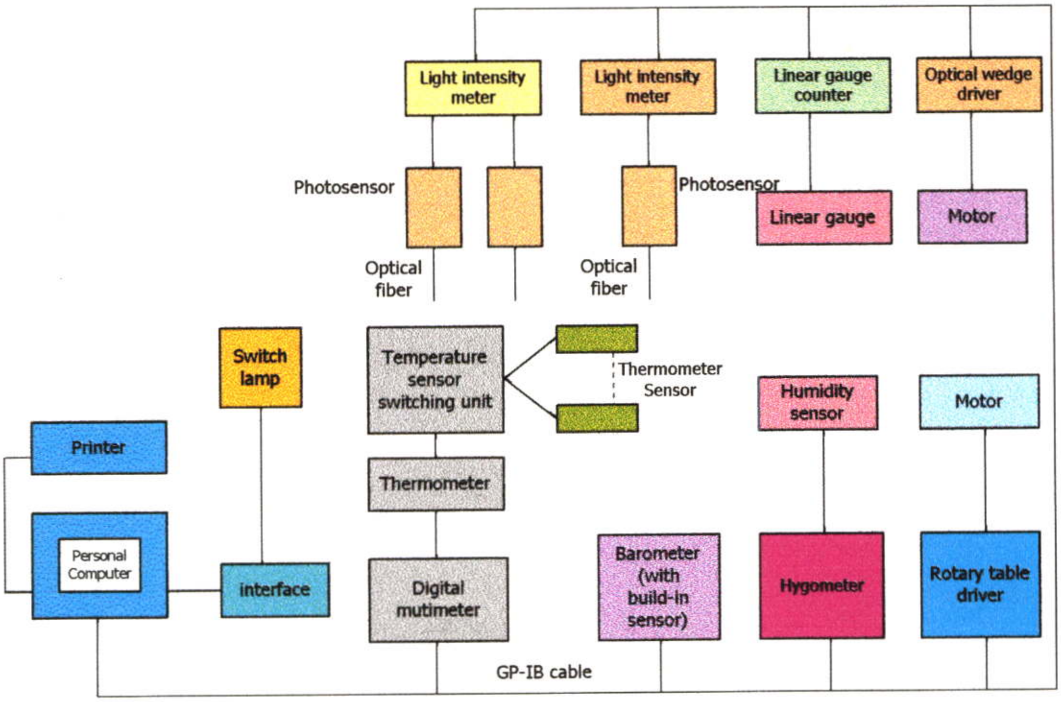
2) ไมโครมิเตอร์ปรับระยะโรลของแท่น ทำหน้าที่ปรับความเอียงของฟริงจ์ที่ปรากฏ โดยให้ฟริงจ์บนเบสเพลตมีแนวขนานมากที่สุด

3.1.3.2 **ชุดควบคุมการหมุนของแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐาน**

1) ปุ่ม CW ทำหน้าที่ควบคุมให้แท่นวางแท่งเทียบมาตรฐานหมุนทิศทางตามเข็มนาฬิกา
2) ปุ่ม CCW ทำหน้าที่ควบคุมให้แท่นวางแท่งเทียบมาตรฐานหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
3) ปุ่ม Indexing ทำหน้าที่ควบคุมให้แท่นหมุนๆ ไปได้ที่ละตำแหน่งของแท่งเทียบมาตรฐานทีละชิ้นจนครบ 12 ชิ้น
4) ปุ่ม Reset ทำหน้าที่ปรับให้ตำแหน่งของแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐานหมุนกลับไปอยู่ที่จุดเริ่มต้น
5) ปุ่ม Stop ทำหน้าที่หยุดการทำงานของแท่นหมุน

3.2 ระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องวัดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

การทำงานของเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์จะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic control unit) ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.7 แผนผังระบบควบคุมและประมวลผลของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

ระบบควบคุมและประมวลผลของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.7 แสดงการเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ รวมทั้งส่งผ่านข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมายังส่วนประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โดยส่งสัญญาณผ่านอินเตอร์เฟสการ์ดประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่หนึ่งเป็นชุดอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มแสงที่เชื่อมต่อกันกับชุดควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์มีรายละเอียดดังนี้ เริ่มต้นจากอุปกรณ์ตรวจจับความเข้มแสง (Photosensor) แบบเส้นใยแก้วนำแสง (Fibre Optic) ประกอบด้วยตัวตรวจจับความเข้มแสง 3 ตัว สองตัวแรกตรวจจับความเข้มแสงจากฟริงจ์ที่ปรากฏบนเบสเพลต ส่วนตัวที่สามจะตรวจจับความเข้มแสงจากฟริงจ์ที่ปรากฏบนบริเวณกึ่งกลางของแท่งเทียบมาตรฐาน ตัวตรวจจับความเข้มแสงบนเบสเพลตมีระยะห่างจากขอบแท่งเทียบมาตรฐานประมาณ 1.5 mm ความเข้มแสงจะถูกส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงมายังเครื่องวัดความเข้มแสงทั้งสองชุดการตรวจจับความเข้มแสงของแนว ฟริงจ์จะสัมพันธ์กันกับอุปกรณ์วัดระยะชุดลิเนียร์เกจที่ติดตั้งอยู่บนลิ่มกระจก ขับเคลื่อนด้วยระบบมอเตอร์ ซึ่งถูกกำหนดให้วัดระยะจุดตรวจจับความเข้มบนแถบฟริงจ์จำนวน 32 จุด โดยแต่ละจุดมีระยะการเคลื่อนที่ของลิ่มกระจกห่างเท่ากับ 40 μm ระยะตลอดแถบฟริงจ์ประมาณ 1280 μm หรือประมาณ 1.28 mm สามารถดูช่วงการตรวจจับความเข้มแสงดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11

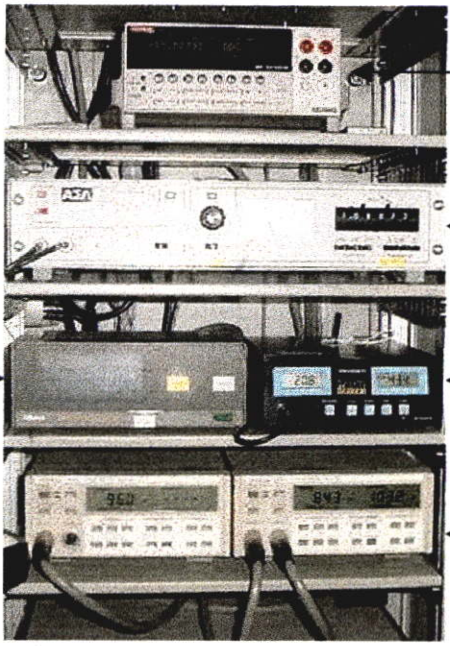
ส่วนที่สองเป็นอุปกรณ์ชุดตรวจวัดสภาวะอากาศภายในตู้วางแท่งเทียบมาตรฐานและอุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐานเชื่อมต่อกันกับชุดอิเล็กทรอนิกส์มีรายละเอียดดังนี้ เริ่มต้นที่ตัวตรวจจับความชื้น ภายในตู้จะส่งสัญญาณไปยังเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ มีตัวตรวจจับความดันบรรยากาศและชุดตรวจวัดอุณหภูมิมีตัวตรวจจับอุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐาน 2 ชุด ชุดที่หนึ่งใช้วัดอุณหภูมิแท่งเทียบมาตรฐานขนาดเล็กกว่า 20 mm ชุดที่สองใช้วัดอุณหภูมิแท่งเทียบมาตรฐานขนาดตั้งแต่ 20 mm ขึ้นไป เป็นแบบแพลตตินั่มชนิด K ผ่านชุดสวิตซ์ควบคุมตัวตรวจจับอุณหภูมิเชื่อมต่อเข้ากับเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแบบบริดจ์สมดุลย์แสดงผลดิจิตอลโวลต์มิเตอร์

ทั้งสองส่วนจะส่งผ่านข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์โดยส่งผ่านอินเตอร์เฟสการ์ด เพื่อทำการประมวลผลและแสดงที่จอมอนิเตอร์ด้วยโปรแกรมคอมแลปวิว (LabView)

3.2.1 ชุดคอมพิวเตอร์ รูปที่ 3.8 ประกอบด้วยชุดประมวลผลข้อมูล จอภาพ คีย์บอร์ด เม้าท์และเครื่องพิมพ์ โดยมีการรับ-ส่งข้อมูลผ่านทางอินเตอร์เฟสการ์ด และดิจิตอลอินพุท/เอาท์ พุทบอร์ด

รูปที่ 3.8 ชุดควบคุมและประมวลผลของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

3.2.2 ตู้ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Controller Rack) รูปที่ 3.9 ประกอบด้วย



รูปที่ 3.9 ชุดควบคุมอิเล็คทรอนิกส์ของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

3.2.2.1 **ชุดจ่ายไฟ** (Power Unit) ประกอบด้วยภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับอุปกรณ์ภายในตู้ได้แก่ ชุดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้กับกระจกลิ่ม (Optical Wedge) แท่นหมุนและตัวกำเนิดพัลส์

3.2.2.2 **ภาคจ่ายไฟเลเซอร์** (Laser Power Supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ควรเปิดเพื่อให้มีสภาวะคงที่ก่อนการใช้งานหนึ่งชั่วโมง

3.2.2.3 **เครื่องมัลติมิเตอร์** (2001 Multimeter) ทำหน้าที่แปลงค่า DC Voltage จากชุดตัวต้านทานบริดจ์ เป็นสัญญาณดิจิตอลไปยังส่วนประมวลผลผ่านทางอินเตอร์เฟสการ์ด

3.2.2.4 **ชุดตัวต้านทานบริดจ์** (Resistance Bridge) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิแท่งเทียบมาตรฐานขณะทำการวัดประกอบด้วยชุดลวดต้านทานแพลทตินัม รีซีสแตนท์เทอร์โมมิเตอร์

3.2.2.5 **ชุดตรวจนับเชิงเส้น** (Linear Guage Counter) ทำหน้าที่ตัวตรวจนับและแสดงผลการเคลื่อนที่ของลิ่มกระจกแล้วส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผล

3.2.2.6 **เครื่องวัดความเข้มแสง** (Optical Power Meter) ทำหน้าที่วัดความเข้มแสงในการวัดฟริงจ์ 3 ตำแหน่งบนแท่งเทียบมาตรฐานและบนเบสเพลต และส่งสัญญาณในการวัดไปยังส่วนประมวลผลและผ่านทางอินเตอร์เฟสการ์ด

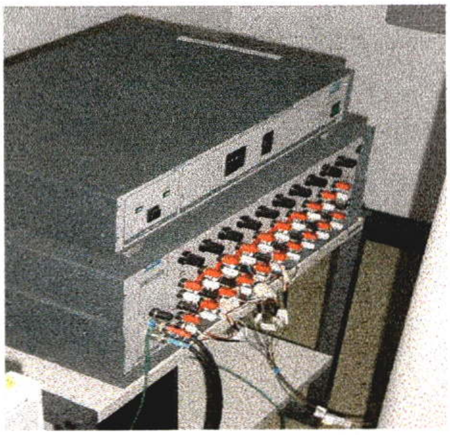
3.2.2.7 **เครื่องเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์** (Thermo-Hygrometer) ทำหน้าที่วัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ขณะทำการวัดและส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผลผ่านทางอินเตอร์เฟสการ์ด มีตัวตรวจจับความชื้น (Thermo-Hygro Sensor) เป็นตัววัดความชื้นภายในตัวเครื่อง โดยติดตั้งภายในผนังใกล้แท่นหมุน

3.2.2.8 **เครื่องดิจิตอลมานอมิเตอร์** (2655 Digital Manometer) รูปที่ 3.10 ใช้วัดและแสดงผลความดันบรรยากาศโดยส่งไปยังชุดประมวลผลผ่านอินเตอร์เฟสการ์ด

รูปที่ 3.10 เครื่องดิจิตอลมานอมิเตอร์

3.2.2.9 **ชุดสวิตซ์ตรวจจับอุณหภูมิ** (Temperature Sensor Switch Unit) เป็นแผงควบคุมสวิตซ์บล็อคเมื่อมีการเลือกใช้ตัวตรวจจับอุณหภูมิ ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

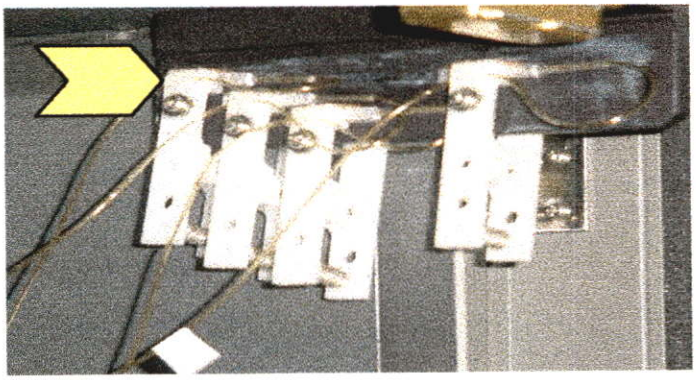
1) ชุดสวิตซ์ควบคุม (Switch Box Controller) ดังรูปที่ 3.11 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการรับคำสั่งการเลือกตัวตรวจจับเพลททินัมจากเครื่องประมวลผลและเชื่อมต่อไปยังกล่องสวิตซ์ตามคำสั่งชุดประมวลผล



รูปที่ 3.11 ชุดสวิตซ์ตรวจจับอุณหภูมิ

2) ตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature Sensor) ดังรูปที่ 3.12 ตัวตรวจจับอุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐานประกอบด้วยบล็อกอลูมิเนียมติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิชนิดแพลททินัม (Platinum Resistance Bulb) สายไฟทองแดงและขั้วต่อ
3) ตัวคลิปตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature Sensor Clip) ตัวคลิปจะใช้ยึดตัวตรวจจับอุณหภูมิที่ยังอยู่ภายในตัวคลิปใช้จับกับด้านข้างแท่งเทียบมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 3.12

ตัวคลิปตัวตรวจ
จับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.12 ตัวตรวจจับอุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐาน

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์เครื่องนี้ ใช้หลักการของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์และการวัดวิเคราะห์ค่าเศษส่วนฟริงจ์แบบอัตโนมัติ โดยจะต้องกำหนดค่าความชดเชยต่างๆ ในส่วนประมวลผล และคำนวณด้วยโปรแกรมแลปวิวที่เขียนซอฟแวร์สำหรับคำนวณค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางของแท่งเทียบมาตรฐาน ดังจะกล่าวต่อไป

การถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ มีการทดลองและผลการทดลองดังนี้

4.1 การทดลอง

4.1.1 การจัดเตรียมแท่งเทียบมาตรฐาน

การวัดความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐาน เริ่มต้นล้างทำความสะอาดแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm จากนั้นทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ ประกบแท่งเทียบมาตรฐานกับเบสเพลต จากนั้นทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ เนื่องจากขณะที่ประกบแท่งเทียบมาตรฐานกับเบสเพลต อุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐานจะมีการเปลี่ยนแปลง นำแท่งเทียบมาตรฐานวางบนแท่นวาง จากนั้นนำเข้ามาไว้ในแชมเบอร์เพื่อทำให้อุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐานบนแท่นวางเข้าสู่สภาวะคงที่ กำหนดตำแหน่งแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐาน จากนั้นตรวจดูฟริงจ์จากช่องมองภาพโดยจัดตำแหน่งแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐานให้อยู่ตรงกึ่งกลางของช่องวางแท่งเทียบมาตรฐานบนแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐาน ปรับไมโครมิเตอร์เพื่อปรับระยะการพิทและโรลของแท่นหมุน เพื่อให้ฟริงจ์ที่เบสเพลตปรากฏอยู่ในแนวราบ และมีจำนวนฟริงจ์ 5 ถึง 6 ฟริงจ์ ติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิที่เลือกไว้ โดยใส่ซิลิโคนเล็กน้อยที่ผิวสัมผัสของตัวตรวจจับอุณหภูมิ ควรทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีก่อนทำการวัด เพื่อให้อุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแชมเบอร์มากที่สุด เพื่อเป็นการลดความผิดพลาดเนื่องจากผลกระทบของสภาวะแวดล้อม ป้อนค่าชดเชยต่างๆ ของแท่งเทียบมาตรฐานที่ติดตั้งอยู่บนแท่นวางแท่งเทียบมาตรฐานสำหรับการประมวลผล เช่น หมายเลข, ค่าที่ระบุ, ค่า pre-measurement, RTS No. เป็นต้น ตามตารางในภาคผนวก ง ตั้งค่าควบคุมอุณหภูมิ (Control Temperature) โดยใช้สวิตซ์ (Ratio Rt/Rs) ที่อยู่บนหน้าปัดของเครื่องต้านทานบริดจ์ โดยค่อยๆ ปรับเพื่อให้เข็มมิเตอร์ของบริดจ์อยู่ตรงกลางและให้เครื่องมัลติมิเตอร์อ่านอยู่ในช่วง ± 30 mVDC ใส่ค่าที่ปรับสวิตซ์ลงใน C.Temp จากนั้นกำหนดค่าค่าสัมประสิทธิ์

การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐานลงในช่อง CTE เพื่อเป็นพารามิเตอร์หนึ่งในการคำนวณผลค่าความคลาดเคลื่อนของผลการวัด เมื่อกำหนดค่าต่างลงในตารางเงื่อนไขตามภาคผนวก ง เรียบร้อยร้อยให้ดำเนินการวัดแท่งเทียบมาตรฐาน ตามหลักการของเครื่องที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

ในการทดลองนี้ได้กำหนดเงื่อนไขสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐานไม่เท่ากัน โดยเงื่อนไขที่ 1 กำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1.08×10^{-5}/°C เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ทราบจากใบรับรองจากสถาบัน PTB และเงื่อนไขที่ 2 กำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1.15×10^{-5}/°C เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุที่กำหนดตามมาตรฐาน ISO 3650 : 1998 และมีค่า pre-measurement ดังตาราง 4.1 จากนั้นดำเนินการทดลองและนำผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องจากผลการทดลองทั้งสองมาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องใกล้เคียงกับผลที่ส่งแท่งเทียบมาตรฐานไปวัดกับสถาบัน PTB จากนั้นคำนวณค่าความไม่แน่นอนและเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนที่คำนวณได้กับสถาบันมาตรวิทยานานาประเทศ

ตารางที่ 4.1 ค่า pre-measurement แท่งเทียบมาตรฐาน

ค่าที่ระบุ mm	ค่าความคลาดเคลื่อน µm
5	-0.02
15	-0.02
25	-0.01
50	+0.05
75	-0.09

4.1.2 การทดลองวัดแท่งเทียบมาตรฐานที่สัมประสิทธิ์การขยายตัว 1.08×10^{-5}/°C

จากผลการวัดแท่งเทียบมาตรฐานที่ทำด้วยเหล็กขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm ซึ่งกำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเท่ากับ 1.08×10^{-5}/°C จำนวน 8 ครั้ง พบว่าค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐาน มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง ± 70 nm

ตารางที่ 4.2 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5 mm

จำนวนครั้ง การวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดันบรรยากาศ Pa × 10^2	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง μm
1	20.3041	46.4	1004.31	-0.024
2	20.1548	46.3	1004.08	-0.018
3	20.1673	46.4	1003.97	-0.017
4	20.1771	46.3	1003.87	-0.018
5	20.1932	46.3	1003.70	-0.016
6	20.2120	46.2	1003.51	-0.018
7	20.5493	46.4	1000.68	-0.021
8	20.5549	46.4	1000.60	-0.024
ค่าเฉลี่ย	20.2891	46.34	1003.09	-0.020
ค่าความเบี่ยงมาตรฐาน	0.16867	0.07440	1.53101	0.00312

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.2891 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 46.34 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1003.09 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.020 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.00312 μm

ตารางที่ 4.3 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm

จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดันบรรยากาศ Pa × 10^2	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง μm
1	20.8877	44.0	1004.33	-0.017
2	20.8973	44.0	1004.13	-0.014
3	20.9076	44.0	1004.00	-0.013
4	20.9192	44.0	1003.92	-0.013
5	20.9309	43.9	1003.80	-0.013
6	20.9545	43.9	1003.73	-0.017
7	20.5493	43.9	1003.69	-0.021
8	20.9658	43.9	1003.53	-0.019
ค่าเฉลี่ย	20.8765	43.95	1003.89	-0.016
ค่าความเบี่ยงมาตรฐาน	0.13492	0.05345	0.25843	0.00309

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.8765 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 43.95 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1003.89 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.016 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.00309 μm

ตารางที่ 4.4 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 25 mm

จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดันบรรยากาศ Pa × 10^2	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง μm
1	20.9041	42.5	1004.53	-0.017
2	20.9125	42.5	1004.58	-0.014
3	20.8962	42.6	1004.55	-0.012
4	20.8883	42.6	1004.59	-0.014
5	20.8606	42.6	1004.68	-0.008
6	20.8742	42.6	1004.71	-0.012
7	20.8683	42.6	1004.74	-0.014
8	20.8626	42.6	1004.83	-0.010
ค่าเฉลี่ย	20.8834	42.58	1004.651	-0.013
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.01974	0.04629	0.10548	0.00277

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 25 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.8834 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 42.58 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1004.651 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.013 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.00277 μm

ตารางที่ 4.5 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 50 mm

จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดันบรรยากาศ $Pa \times 10^2$	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง µm
1	20.4746	47.7	1005.40	0.082
2	20.4876	47.7	1005.37	0.074
3	20.4989	47.7	1005.28	0.075
4	20.5097	47.7	1005.12	0.071
5	20.5208	47.6	1005.02	0.065
6	20.5328	47.6	1004.91	0.064
7	20.5438	47.6	1004.82	0.061
8	20.5619	47.5	1004.74	0.059
ค่าเฉลี่ย	20.51626	47.64	1005.083	0.069
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.02937	0.07440	0.25178	0.00792

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 50 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.51626 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 47.64 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1005.083 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ 0.069 µm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.00792 µm

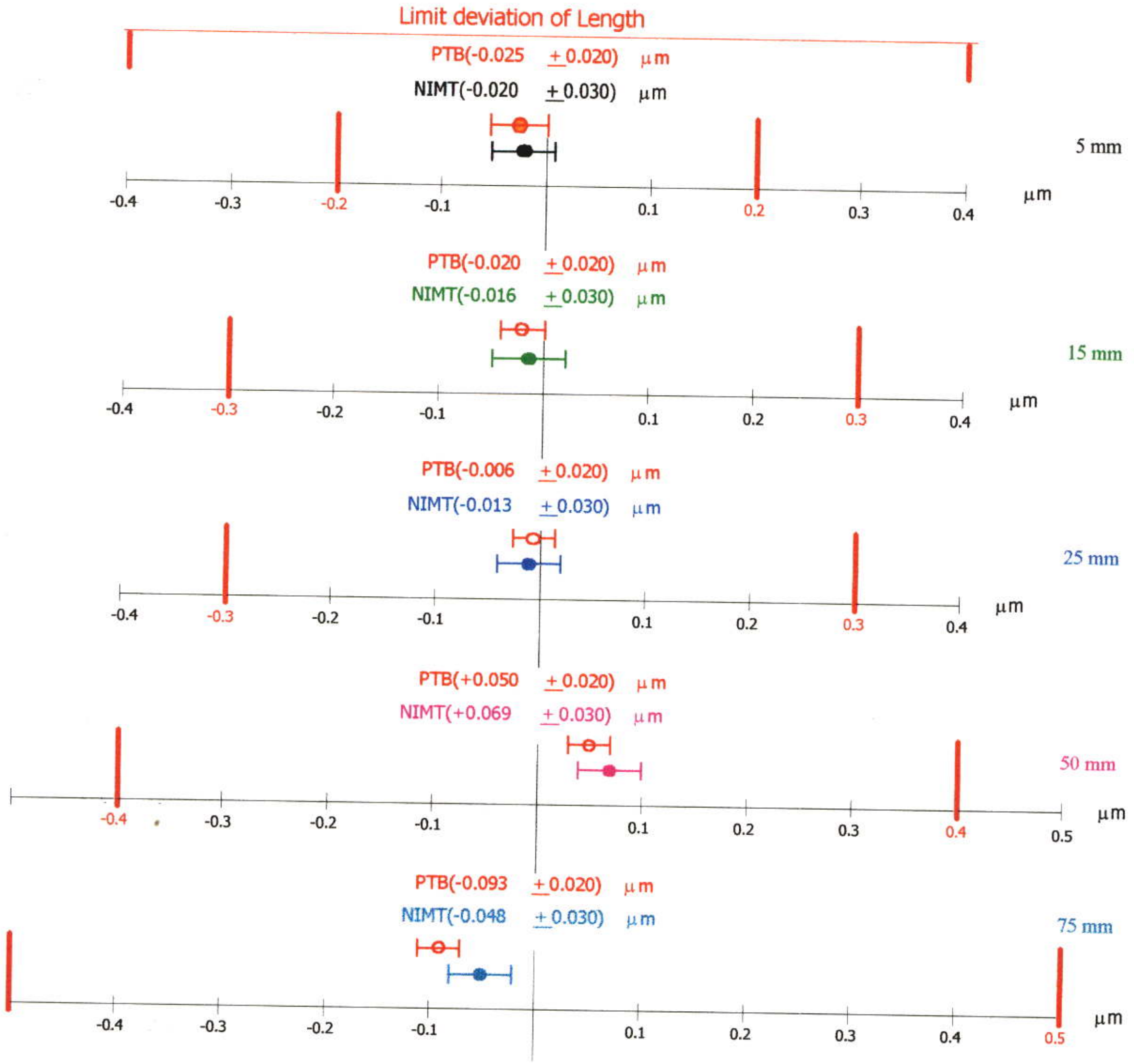
ตารางที่ 4.6 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 75 mm

จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดันบรรยากาศ Pa × 10^2	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง µm
1	20.4392	48.0	1005.91	-0.034
2	20.9006	48.1	1005.93	-0.053
3	20.8951	48.1	1006.00	-0.071
4	20.8904	48.1	1006.04	-0.074
5	20.8807	48.4	1006.09	-0.070
6	20.8791	48.5	1006.13	-0.071
7	20.4011	48.0	1005.88	-0.004
8	20.4177	47.9	1005.79	-0.005
ค่าเฉลี่ย	20.71299	48.14	1005.971	-0.048
ค่าความเบี่ยงมาตรฐาน	0.24348	0.20659	0.11432	0.02982

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 75 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.71299 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 48.14 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1005.971 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.048 µm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.02982 µm

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแท่งเทียบมาตรฐาน

ค่าที่ระบุ mm	ค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย µm	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน µm
5	-0.020	0.00312
15	-0.016	0.00309
25	-0.013	0.00277
50	+0.069	0.00792
75	-0.048	0.02982



รูปที่ 4.1 ผลการวัดค่าความคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางของแท่งเทียบมาตรฐาน ขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm ที่สัมประสิทธิ์การขยายตัว 1.08×10^{-5}/°C

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางของแท่งเทียบมาตรฐาน มีค่าอยู่ในช่วงของเกณฑ์การยอมรับได้ตามมาตรฐาน ISO 3650: 1998 ตามตารางในภาคผนวก ก

ช่วง 0.5 mm ถึง 10 mm มีค่าการยอมรับได้อยู่ในช่วง ± 0.2 µm ค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5 mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.020 µm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 µm

ช่วง 10 mm ถึง 25 mm มีค่าการยอมรับได้อยู่ในช่วง ± 0.3 µm ค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.016 µm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 µm และค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 25

mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.013 μm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 μm

ช่วง 25 mm ถึง 50 mm มีค่าการยอมรับได้อยู่ในช่วง ± 0.4 μm ค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 50 mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ +0.069 μm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 μm

ช่วง 50 mm ถึง 75 mm มีค่าการยอมรับได้อยู่ในช่วง ± 0.3 μm ค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 75 mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.048 μm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 μm

4.1.3 การทดลองวัดแท่งเทียบมาตรฐานที่สัมประสิทธิ์การขยายตัว 1.15 × 10^{-5}/°C

จากผลการวัดแท่งเทียบมาตรฐานที่ทำด้วยเหล็กขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm ซึ่งกำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเท่ากับ 1.08 × 10^{-5}/°C จำนวน 8 ครั้ง พบว่าค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐาน มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง ± 75 nm

ตารางที่ 4.8 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5 mm

จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดันบรรยากาศ Pa × 10^{2}	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง μm
1	20.6418	46.6	1001.20	-0.028
2	20.6298	46.6	1001.20	-0.022
3	20.6359	46.6	1001.15	-0.022
4	20.6234	46.6	1001.16	-0.026
5	20.6166	46.6	1001.20	-0.020
6	20.6096	46.5	1001.07	-0.026
7	20.6019	46.5	1000.82	-0.025
8	20.5881	46.5	1000.70	-0.025
ค่าเฉลี่ย	20.61839	46.56	1001.063	-0.024
ค่าความเบี่ยงมาตรฐาน	0.01805	0.05175	0.19426	0.00266

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.61839 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 46.56 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1001.063 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ -0.024 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.00266 μm

ตารางที่ 4.9 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm

จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดันบรรยากาศ $Pa \times 10^2$	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง μm
1	20.7625	46.3	1000.75	-0.030
2	20.7243	46.3	1000.73	-0.028
3	20.7227	46.3	1000.76	-0.027
4	20.7137	46.3	1000.77	-0.025
5	20.7051	46.3	1000.77	-0.029
6	20.6971	46.3	1000.72	-0.026
7	20.6890	46.3	1000.72	-0.026
8	20.6784	46.4	1000.73	-0.028
ค่าเฉลี่ย	20.7116	46.3125	1000.74	-0.027
ค่าความเบี่ยงมาตรฐาน	0.02604	0.03536	0.02134	0.00169

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.7116 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 46.31 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1000.74 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.027 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.00169 μm

ตารางที่ 4.10 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 25 mm

จำนวนครั้ง การวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดัน บรรยากาศ Pa × 10^2	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง μm
1	20.5811	42.6	1008.96	-0.006
2	20.5448	42.6	1008.99	0.006
3	20.5601	42.6	1009.07	-0.003
4	20.5505	42.7	1009.08	0.001
5	20.5412	42.7	1009.11	0.003
6	20.5324	42.7	1009.16	0.003
7	20.5093	42.8	1009.26	0.009
8	20.5164	42.8	1009.26	0.006
ค่าเฉลี่ย	20.5420	42.69	1009.111	0.002
ค่าความเบี่ยงมาตรฐาน	0.02316	0.08345	0.11141	0.00496

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 25 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.5420 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 48.69 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1005.111 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ +0.002 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.00496 μm

ตารางที่ 4.11 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 50 mm

จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดันบรรยากาศ Pa × 10^2	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง μm
1	20.4902	47.0	1006.28	0.058
2	20.4789	47.0	1006.29	0.064
3	20.4684	47.0	1006.34	0.066
4	20.4575	47.1	1006.33	0.071
5	20.4488	47.1	1006.38	0.074
6	20.4387	47.2	1006.42	0.077
7	20.4289	47.2	1006.39	0.080
8	20.4198	47.3	1006.35	0.082
ค่าเฉลี่ย	20.4539	47.11	1006.348	0.072
ค่าความเบี่ยงมาตรฐาน	0.02453	0.11260	0.04833	0.00835

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 50 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.4539 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 47.11 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1006.348 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ +0.072 μm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.00835 μm

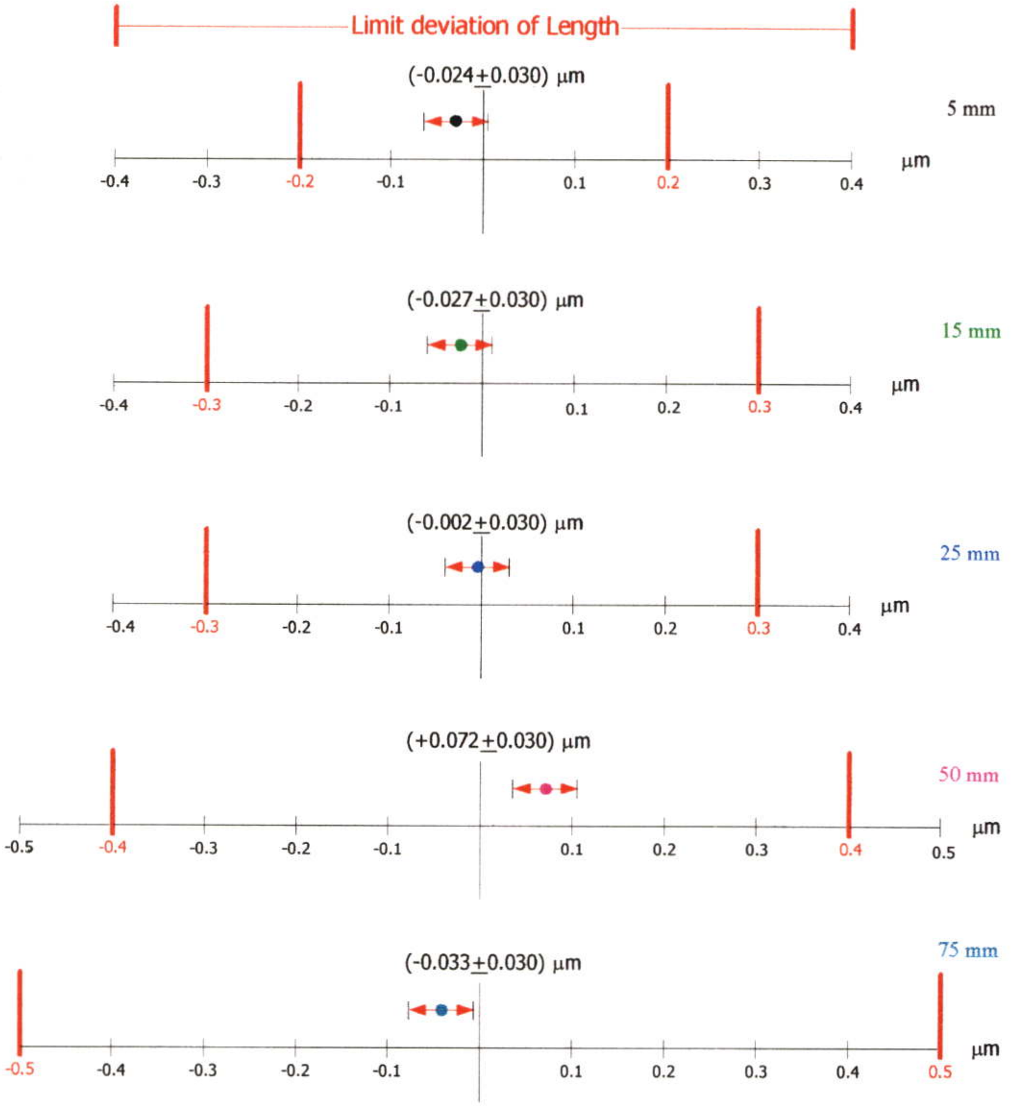
ตารางที่ 4.12 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 75 mm

จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ °C	ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	ความดันบรรยากาศ Pa × 10^2	ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง µm
1	20.8876	47.3	1001.80	-0.015
2	20.8975	47.3	1001.94	-0.039
3	20.9029	47.3	1002.00	-0.011
4	20.8078	47.2	1001.60	-0.049
5	20.7979	47.2	1001.64	-0.031
6	20.7792	47.2	1001.79	-0.033
7	20.7692	47.2	1001.80	-0.036
8	20.7603	47.2	1001.79	-0.048
ค่าเฉลี่ย	20.8253	47.24	1001.795	-0.033
ค่าความเบี่ยงมาตรฐาน	0.06056	0.05175	0.13374	0.01382

จากผลการทดลองการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 75 mm จำนวน 8 ครั้ง มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 20.8253 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 47.24 %RH ความดันบรรยากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1001.795 hPa ค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.033 µm และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.01382 µm

ตารางที่ 4.13 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแท่งเทียบมาตรฐาน

ค่าที่ระบุ mm	ค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย µm	ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน µm
5	-0.024	0.00266
15	-0.027	0.00169
25	+0.002	0.00496
50	+0.072	0.00835
75	-0.033	0.01382



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวัดค่าความคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางของแท่งเทียบมาตรฐาน มีค่าอยู่ในช่วงของเกณฑ์การยอมรับได้ตามมาตรฐาน ISO 3650 : 1998 ตามตารางในภาคผนวก ก

ช่วง 0.5 mm ถึง 10 mm มีค่าการยอมรับได้อยู่ในช่วง ± 0.2 µm ค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5 mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.024 µm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 µm

ช่วง 10 mm ถึง 25 mm มีค่าการยอมรับได้อยู่ในช่วง ± 0.3 µm ค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.027 µm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 µm และค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 25

mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ +0.002 µm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 µm

ช่วง 25 mm ถึง 50 mm มีค่าการยอมรับได้อยู่ในช่วง ± 0.4 µm ค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 50 mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ +0.072 µm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 µm

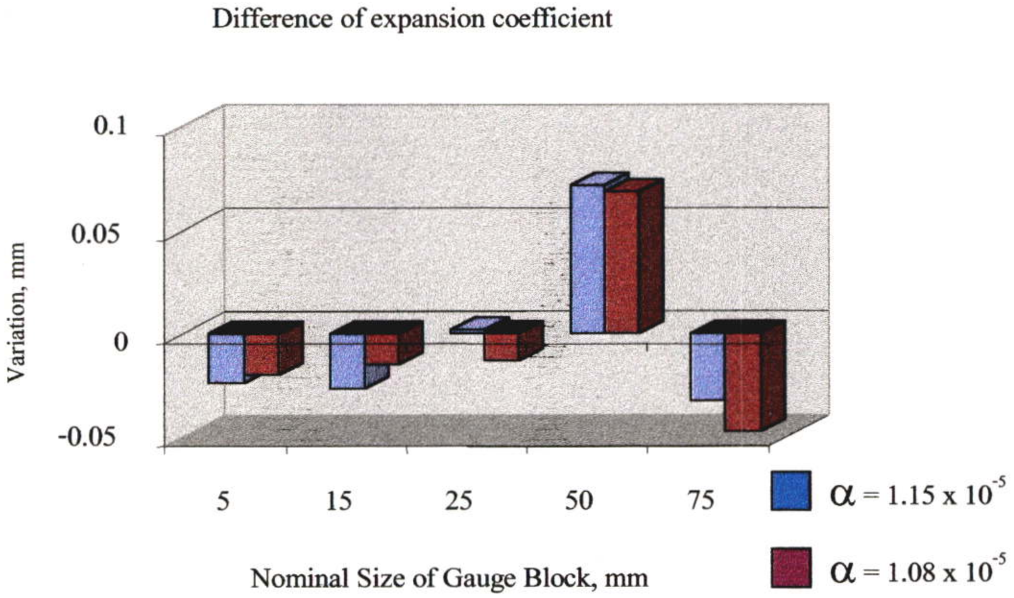
ช่วง 50 mm ถึง 75 mm มีค่าการยอมรับได้อยู่ในช่วง ± 0.3 µm ค่าที่วัดได้ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 75 mm มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางแท่งเทียบมาตรฐานเท่ากับ –0.033 µm มีค่าความไม่แน่นอน ± 0.03 µm

4.1.4 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวแท่งเทียบมาตรฐานระหว่าง 1.08×10^{-5}/°C กับ 1.15×10^{-5}/°C

ผลการเปรียบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวแท่งเทียบมาตรฐานระหว่าง 1.08×10^{-5}/°C กับ 1.15×10^{-5}/°C ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐาน เป็นผลให้มีการเปลี่ยนความยาวของขนาดแท่งเทียบมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวแท่งเทียบมาตรฐาน 1.08×10^{-5}/°C เป็นค่าที่ทราบจากการวัดจริงจาก PTB ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวแท่งเทียบมาตรฐาน 1.15×10^{-5}/°C เป็นค่าที่ทราบจากเอกสารอ้างอิง ISO 3650 ซึ่งเป็นเอกสารมาตรฐานของแท่งเทียบมาตรฐาน

ตารางที่ 4.14 ผลต่างระหว่างค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่สัมประสิทธิ์การขยายตัว 1.08×10^{-5}/°C กับ สัมประสิทธิ์การขยายตัว 1.15×10^{-5}/°C

ค่าที่ระบุ mm	ค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย ส.ป.ส. 1.08×10^{-5}/°C µm	ค่าผิดพลาดที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ย ส.ป.ส. 1.15×10^{-5}/°C µm	ผลต่างระหว่าง ส.ป.ส. 1.08×10^{-5}/°C กับ ส.ป.ส. 1.15×10^{-5}/°C µm
5	-0.020	-0.024	0.004
15	-0.015	-0.027	0.012
25	-0.013	0.002	0.015
50	0.069	0.072	0.003
75	-0.048	-0.033	0.015



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวแท่งเทียบมาตรฐาน 1.08×10^{-5}/°C กับสัมประสิทธิ์การขยายตัวแท่งเทียบมาตรฐาน 1.15×10^{-5}/°C

จากกราฟรูปที่ 4.3 พบว่าค่าผลต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐาน 1.08×10^{-5}/°C กับ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐาน 1.15×10^{-5}/°C มีค่าผลต่างสูงสุดเท่ากับ 0.015 μm ซึ่งมีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ISO 3650 : 1998 แต่ในทางมาตรวิทยาการวัดของแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้แสงเป็นมาตรฐานนั้น ควรทราบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวแท่งเทียบมาตรฐานที่ถูกต้องมากที่สุด เนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการขยายตัวของเหล็กกล้า ดังนั้นการวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศขณะทำการวัด เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในระหว่างทำการวัดจึงมีความจำเป็นสำหรับการวดแบบสัมบูรณ์

4.2 ประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด

(Estimation of Uncertainty of Measurement)

ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้ชุดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์นี้ เป็นไปตามตารางที่ 4.14 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดเป็นไปตาม ISO/TAG 4 (ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) ดังจะอธิบายเป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$L_{20} = L - L\alpha(T-20) - (-dP)$$
$$= L(1-\alpha(T-20) + dP \quad (4.1)$$
$$= \left(\frac{\lambda_v}{2n}(N+\varepsilon)\right)\left(1-\alpha(T-20)\right) + dP$$

เมื่อจัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน f จะได้

$$f\left(\lambda_v, n_{tpR}, \varepsilon, \alpha, T, dP\right) \quad (4.2)$$

ค่าความแปรปรวนของความไม่แน่นอนสามารถหาได้ดังสมการ

$$u_c^2(y) = \sum_{f=1}^{n}\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right]^2 u^2\left(x_i\right) \quad (4.3)$$

การประยุกต์สมการ (4.3) เพื่อหาค่าความแปรปรวนของความไม่แน่นอนต่างๆ ตามพารามิเตอร์ โดยมีค่า c_i เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไวหรือตัวแปลงหน่วยสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$u_c^2\left(L_{20}\right) = c_{\lambda_v}^2\left(\lambda_0\right) + c_\varepsilon^2 u^2(\varepsilon) + c_t^2 u^2(t) + c_p^2 u^2(p) + c_R^2 u^2(R) + c_\alpha^2 u^2(\alpha)$$
$$+ c_T^2 u^2(T) + c_r^2 u^2(r) + c_s^2 u^2(s) + c_{dP}^2 u^2(dP) + c_w^2(w) \quad (4.4)$$

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความไวแต่ละตัวสามารถหาได้ดังนี้

$$c_{\lambda_v} = \partial f/\partial\lambda_v = L/\lambda \quad (4.5)$$

$$c_\varepsilon = \partial f/\partial\varepsilon = \lambda/2 \quad (4.6)$$

$$c_t = \partial f/\partial t = 9.5\times10^{-7}L \quad (4.7)$$

$$c_p = \partial f/\partial p = 2.7\times10^{-9}L \quad (4.8)$$

$$c_R = \partial f/\partial R = 8.5\times10^{-9}L \quad (4.9)$$

$$c_\alpha = \partial f/\partial\alpha = (T-20)L \quad (4.10)$$

$$c_T = \partial f/\partial T = \alpha L \quad (4.11)$$

$$c_r = \partial f/\partial r = \left(r/2F^2\right)L \quad (4.12)$$

$$c_s = \partial f/\partial s = \left(s/F^2\right)L \quad (4.13)$$

$$c_{dP} = \partial f/\partial dP = 1 \quad (4.14)$$

$$c_w = \partial f/\partial w = 1 \quad (4.15)$$

4.2.1 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน (Wavelength of Laser Source Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบเลเซอร์และการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่น

$$U(\lambda) = 1.2\times10^{-9}\left(\frac{L}{\lambda}\right) \qquad (4.16)$$

$$= 0.0012\ (L/mm)\ nm$$

4.2.2 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวิเคราะห์เศษส่วนฟริงจ์ (Measurement of Interference Fringe Fraction Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวิเคราะห์เศษส่วนอัตราส่วนฟริงจ์ ประเมินได้จากจำนวนการวัดโดยพิจารณาจากผลการวัดแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 75 mm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.01382 สำหรับชุดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ค่าเฉลี่ยของการวัดฟริงจ์ 8 ครั้ง เพราะฉะนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวัดฟริงจ์ที่ประเมินไว้เท่ากับ

$$U(\varepsilon) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}\left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

$$= \frac{0.01382}{\sqrt{8}}\left(\frac{0.632990844\ \mu m}{2}\right) \qquad (4.17)$$

$$= 1.55\ \ nm$$

4.2.3 ค่าดัชนีหักเหอากาศ (Refractive Index of air)

วัดแท่งเทียบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการภายใต้เงื่อนไขสภาวะห้องมีความยาวหนึ่งเมตร กำหนดให้เทอมของระยะทางที่แสงเดินทางในสุญญากาศ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ n เปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่น ตามที่ $\lambda_v = n\lambda_{air}$ ในห้องปฏิบัติการต่างๆ ค่าดัชนีหักเหถูกหาได้จากการวัด คุณสมบัติที่มีผลกระทบจากความหนาแน่นอากาศ และต่อมาคำนวณค่าดัชนีโดยใช้การดัดแปลงสมการ Edlen

การดัดแปลงสมการ Edlen ที่ใช้ในการวัดแท่งเทียบมาตรฐานด้วยชุดอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ที่ p แทนความดันอากาศ, t แทนอุณหภูมิอากาศ, R% แทนความชื้นสัมพัทธ์ และ $\gamma = 1/\lambda$

จำนวนคลื่นในสุญญากาศ การหาค่าความไม่แน่นอนจากประสบการณ์ของจำนวนสัมประสิทธิ์ ในการดัดแปลงสมการ Edlen เท่ากับ 1×10^{-8} ที่ระดับความเชื่อมั่น 68%

4.2.3.1 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมและสัมประสิทธิ์ความไว (Combined Standard Uncertainty and Sensitivity Coefficients)

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม $U_c(l_n)$ ในค่าแก้ความยาว $l_n = (n-1)L$ พิจารณา (n-1) ตามสมการที่ 4.8 ดังนั้น

$$(n-1)\times 10^{8} = \begin{array}{l}\left[8342.54+\dfrac{2406147}{130-\left(\gamma/\mu m^{-1}\right)^2}+\dfrac{15998}{38.9-\left(\gamma/\mu m^{-1}\right)^2}\right] \\ \times\left[\dfrac{p/Pa}{96095.43}\right]\left[\dfrac{1+10^{-8}\left(0.601-0.00972t/^{\circ}C\right)\left(p/Pa\right)}{1+0.0036610\left(t/^{\circ}C\right)}\right] \\ -R\left[8.753+0.036588\left(t/^{\circ}C\right)\right]\left[0.037345-0.000401\left(\gamma/\mu m^{-1}\right)^2\right]\end{array} \quad (4.18)$$

สัมประสิทธิ์ความไวถูกประเมินจากครั้งแรกทำอนุพันธ์ย่อยของสมการที่ 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22 โดยใช้สมการที่ 4.18 แทนค่าสภาวะต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ t = 20°C, λ = 0.633 μm, p =101325 Pa และความชื้นสัมพันธ์ 44% ดังสมการต่อไปนี้

$$\left.\frac{\partial l_n}{\partial t}\right|_{t,\lambda,p,R} = -9.5 \times 10^{-7}\ L/C \quad (4.19)$$

$$\left.\frac{\partial l_n}{\partial p}\right|_{t,\lambda,p,R} = 2.7 \times 10^{-9} L/Pa \quad (4.20)$$

$$\left.\frac{\partial l_n}{\partial R}\right|_{t,\lambda,p,R} = -8.5 \times 10^{-9} L \quad (4.21)$$

$$\left.\frac{\partial l_n}{\partial \lambda}\right|_{t,\lambda,p,R} = -1.2 \times 10^{-9} L/\mu m \quad (4.22)$$

4.2.3.2 ดัชนีหักเหของอากาศที่มีอิทธิพลต่อการวัดแท่งเทียบมาตรฐาน (Measured Parameters Influencing the Reference Index of Air)

ค่าความไม่แน่นอนรวมมีผลมาจากอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศและความชื้นสัมพัทธ์ ค่าความไม่แน่นอนของตัวตรวจจับได้มาจากการสอบเทียบและความสามารถในการอ่านของตัวตรวจจับในการสอบเทียบ ดังต่อไปนี้

อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature) ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ได้จากการสอบเทียบตัวตรวจจับอุณหภูมิมีค่า0.01°C คูณด้วยสัมประสิทธิ์ความไวของสมการที่ 4.19 เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$U(t) = \frac{0.01^{\circ}C}{\sqrt{3}}\left(9.5\times10^{-7}\right)L \qquad (4.23)$$

$$= -0.005\ (L/mm)\ nm$$

ความดันบรรยากาศ (Air Pressure) ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากการสอบเทียบความดันบรรยากาศจากมานอมิเตอร์มีค่า 20 Pa การคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความไว 2.7 x 10^{-9}L/Pa จากสมการที่ 4.20 เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าความไม่แน่นอนขึ้นกับความยาวของแท่งเทียบมาตรฐานมีค่าเท่ากับ

$$u(p) = \frac{20Pa}{\sqrt{3}}\left(2.7\times10^{-9}\ Pa\right)L \qquad (4.24)$$

$$= 0.031\ (L/mm)\ nm$$

ความชื้นสัมพัทธ์ มีความแม่นได้จากผู้ผลิตเซ็นเซอร์วัดความชื้น 3% ของช่วงการวัดที่ใช้ในการวัด เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้สัมประสิทธิ์ความไว –8.5 x $10^{-9}L$ จากสมการที่ 4.21 การรวบรวมความไม่แน่นอนรวมของการวัดความยาว เป็นดังต่อไปนี้

$$u(R) = \frac{0.03}{\sqrt{3}}\left(8.5\times10^{-9}L\right) \qquad (4.25)$$

$$= -0.015\ (L/mm)\ nm$$

4.2.4 ความไม่แน่นอนของอุณหภูมิแท่งเทียบมาตรฐานขณะทำการวัด (Temperature Measurement of Gauge Block uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดอุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐาน การแจกแจงอุณหภูมิของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ชุดบริดจ์ตัวต้านทานและค่าความปรวนแปรขณะการวัด ค่าผิดพลาดจากการสัมผัส และพิจารณาจากความร้อนภายในเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

$$
\begin{aligned}
U(T) &= \frac{0.01^{\circ}C}{\sqrt{3}}(\alpha L) \\
&= \left(\frac{0.01^{\circ}C}{\sqrt{3}}\right)\left(11.5\times 10^{-6} L\right) \qquad (4.26) \\
&= 0.06\ (L/mm)\ nm
\end{aligned}
$$

4.2.5 ความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐาน (Thermal Expansion Coefficient of Gauge Block)

ค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐานให้นำ 10% จากค่าที่ผู้ผลิตกำหนด แจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากค่าอุณหภูมิแท่งเทียบมาตรฐานที่คำนวณได้ เช่นอุณหภูมิที่วัดได้ 20.1°C แล้วแทนลงในสมการที่ 4.27 ค่า ส.ป.ส. การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของแท่งเทียบมาตรฐานชนิดเหล็ก $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$

$$
\begin{aligned}
U(T) &= \frac{0.1\alpha}{\sqrt{3}}(T-20)L \\
&= \frac{\left(0.1\times 11.5\times 10^{-6}/^{\circ}C\right)}{\sqrt{3}}\left(0.1^{\circ}C\right)L \qquad (4.27) \\
&= 0.07\ (L/mm)\ nm
\end{aligned}
$$

4.2.6 ความไม่แน่นอนของการแก้พินโฮล (Correction of Pinhole)

คำนวณจากค่าที่ยอมรับได้อ้างถึงเรเดียส(Radius)ของพินโฮล เป็นค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต เมื่อ r เป็นระยะเส้นผ่านศูนย์กลางพินโฮล 50 μm, F เป็นระยะโฟกัสของเลนส์ประมาณ 500 μm

$$u(r) = 0.00073\frac{r}{2F^2}L \quad (4.28)$$
$$= 0.07\ (L/mm)\ nm$$

4.2.7 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากแนวลำแสง (Optical Alignment of Beam Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากแนวลำแสงเป็นค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต เมื่อ s เป็นระยะผิดพลาดของแนวลำแสงมีค่าไม่มากกว่า 1 mm, F เป็นระยะโฟกัสของเลนส์ประมาณ 500 μm

$$u(s) = \left(0.015mm\right)\left(\frac{s}{F^2}L\right) \quad (4.29)$$
$$= 0.06\ (L/mm)\ nm$$

4.2.8 ค่าแก้การเปลี่ยนเฟส (Correction of Phase Change)

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าแก้การเปลี่ยนเฟสมีค่าเท่ากับ 4.5 nm มีค่าสัมประสิทธิ์ความไวเท่ากับ 1

$$U(dP) = 4.5\ \ nm \quad (4.30)$$

4.4.9 ค่าแก้การประกบแท่งเทียบมาตรฐาน (Wringing)

ผลการวัดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากฟิล์มจากการประกบจะถูกประเมินโดยการวัดซ้ำด้วย L = 5 mm แท่งเทียบมาตรฐานทั้งการวัดจากการประกบครั้งเดียว (Single Wring) และการวัดจากการประกบหลายครั้ง (Re-wringing) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ 1δ จากการประกบได้ $U(w)$ = 9 nm ซึ่งค่าความไม่แน่นอนจากผิวหน้าการวัดของแท่งเทียบมาตรฐานมีค่าสัมประสิทธิ์ความไวเท่ากับ 1

ตารางที่ 4.15 ค่าความไม่แน่นอน

Standard uncertainty components	Source of uncertainty	Value of standard uncertainty $u(x_i)$	$Ci = \left\|\partial f/\partial xi\right\|$	$u_i(L) = C_i \times u(x_i)$ nm
$u(\lambda)$	Wavelength of Laser Source	$1.2 x 10^{-9} \lambda$	$\frac{L}{\lambda}$	0.0012L
$u(\varepsilon)$	Measurement of interference fringe fraction	0.005mm	$\frac{\lambda}{2}$	1.55 nm
$u(t)$	Temperature Measurement of air	$0.006^{\circ}C$	$9.5 \times 10^{-7} L$	0.005L
$u(p)$	Atmospheric Pressure Measurement	11.5 Pa	$2.7 \times 10^{-9} L$	0.03L
$u(R)$	Water Vapor Pressure Measurement of air	0.017 Pa	$8.5 \times 10^{-9} L$	0.001L
$u(\alpha)$	Thermal Expansion Coefficient of Gauge Block	$0.66 \times 10^{-6} {}^{\circ}C^{-1}$	$(T-20)L$	0.06L
$u(T)$	Temperature Measurement of Gauge Block	$0.006^{\circ}C$	αL	0.07L
$u(r)$	Correction of Pinhole	0.00073 mm	$\frac{r^2}{2F^2} L$	0.07L
$u(s)$	Optical Alignment of Beam	0.015 mm	$\frac{s^2}{F^2} L$	0.06L
$u(dP)$	Correction of Phase Change	4.5 nm	1	4.3
$u(w)$	Wringing	9 nm	1	9
Combined standard uncertainty		$u_c = \sqrt{14.85\,nm^2 + 6.12 \times 10^{-14} L^2}$		
Expanded uncertainty		$U = 2u_c = 2\sqrt{14.85\,nm^2 + 6.12 \times 10^{-14} L^2}$		

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการถ่ายทอดค่าความถูกต้องให้กับแท่งเทียบมาตรฐานระดับ K โดยใช้เทคนิคการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสันด้วยเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเท่ากับ 632.990844 nm ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องให้กับแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm ที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐานชนิดเหล็ก $1.08 \times 10^{-5}/^{\circ}C$ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศเยอรมัน (PTB) จะได้ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง เท่ากับ -0.020, -0.016, -0.013, +0.069 และ -0.048 μm ตามลำดับ และผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องให้กับแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 5, 15, 25, 50 และ 75 mm ที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐานชนิดเหล็ก $1.15 \times 10^{-5}/^{\circ}C$ ตามมาตรฐาน ISO 3650 : 1998 จะได้ค่าผิดพลาดคลาดเคลื่อนที่จุดกึ่งกลาง เท่ากับ -0.024, -0.027, +0.002, +0.072 และ -0.033 μm ตามลำดับ มีค่าความไม่แน่นอน ±0.014 μm ที่ระดับความเชื่อมั่น 68% หรือที่ k = 1 และมีค่าความไม่แน่นอน ±0.028 μm ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ที่ k = 2 จะเห็นได้ว่าค่าความไม่แน่นอนเป็นไปตามคุณลักษณะของเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ที่ระบุไว้ว่าขนาดแท่งเทียบมาตรฐาน (*L*) ใดๆ จะมีค่าเท่ากับ $U = 2u_c = 2\sqrt{14.85nm^2 + 6.12 \times 10^{-14} L^2}$ nm ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อนำค่าความไม่แน่นอนของการถ่ายทอดค่าความถูกต้องที่ได้จากการปฏิบัติทดลองข้างต้นมาเปรียบเทียบกับค่าความไม่แน่นอนของการถ่ายทอดค่าความถูกต้องที่ได้จากห้องปฏิบัติการทางด้านความยาวมาตรฐานสถาบัน PTB จะเห็นได้ว่าสอดคล้องกับค่าความไม่แน่นอนที่ระบุไว้ว่าขนาดแท่งเทียบมาตรฐาน (*L*) ใดๆ จะมีค่าเท่ากับ $U = \sqrt{(20\ nm)^2 + (0.18 \times 10^{-6} \times L)^2}$ nm ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 5.1 Error Normalization Ratio(EN)

ค่าความยาวแท่งเทียบมาตรฐานที่ระบุ mm	PTB µm	NIMT µm	EN
5	-0.025	-0.020	0.14
15	-0.020	-0.016	0.11
25	-0.006	-0.013	0.20
50	+0.050	0.069	0.53
75	-0.093	-0.048	1.65

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนขยาย (k=2) ของแท่งเทียบมาตรฐานขนาด 15 mm ระหว่างนานาประเทศ

National Institute of Metrology	Country	Uncertainty of measurement, nm
KRISS	Korea	22
NIM	China	22
NIST	USA	24
NMi	Netherlands	24
NPL	England	29
NRC	Canada	24
NRLM	Japan	24
OFMET	Switzerland	18
PTB	Germany	14
NIMT	Thailand	28

ชื่อย่อสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติแต่ละประเทศ

KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science
NIM	National Institute of Metrology
NIST	National Institute of Standards and Technology

NMi	National Metrology Institute
NPL	National Physical Laboratory
NRC	National research Council
NRLM	National research Laboratory of Metrology
OFMET	Swiss Federal Office of Metrology
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
NIMT	National Institute of Metrology(Thailand)

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานพอสรุปได้ว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผลกระทบโดยตรงต่อค่าความคลาดเคลื่อนและค่าความไม่แน่นอนที่ค่อนข้างมากมีดังนี้

1. ในลำดับขั้นตอนการจัดเตรียมแท่งเทียบมาตรฐานและประกบแท่งเทียบมาตรฐานกับเบสเพลต ผู้ปฏิบัติควรมีการฝึกทักษะให้มีความชำนาญสูง เพื่อลดความผิดพลาดในส่วนของการจัดเตรียมเบื้องต้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนผิดได้

2. ในการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานโดยใช้เครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ควรมีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศรวมทั้งปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในขณะทำการวัดให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยแยกส่วนชุดควบคุมกับตัวเครื่องเกจบล็อกอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ และในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ออกจากกันโดยมีแผ่นกระจกกั้นหรือห้องควบคุม เพื่อลดค่าผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิลงได้ เนื่องจากอุณหภูมิเป็นส่วนให้มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุอย่างเห็นชัดเจน

3. การจัดแนวฟริงจ์ที่ปรากฏบนเบสเพลตและแท่งเทียบมาตรฐานก็มีส่วนทำให้เกิดค่าความผิดพลาดได้สูง ถ้าแนวฟริงจ์ของทั้งสองระนาบไม่อยู่ในแนวขนานกันจะทำให้เกิดความผิดพลาดในส่วนของความแตกต่างเฟส

4. ควรตรวจสอบค่าชดเชยต่างๆ ก่อนมีการวัดค่า เนื่องจากค่าชดเชยต่างๆ ที่ใส่เป็นค่าที่ในไปคำนวณโดยอัตโนมัติ โดยเฉพาะค่าชดเชยของเบสเพลตต่างชนิดกัน เช่นเบสเพลตที่เป็นแก้วเมื่อประกบกับแท่งเทียบมาตรฐานที่เป็นเหล็กจำเป็นต้องมีค่าชดเชยความต่างเฟสเบสเพลต

5. ในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุหรือแท่งเทียบมาตรฐานที่จะนำมาสอบเทียบควรทราบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุหรือแท่งเทียบแต่ละแหล่งผลิตมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่างๆ กัน ดังนั้นควรทราบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแท่งเทียบมาตรฐานก่อน

เอกสารอ้างอิง

[1] Hariharan P. **Basics of Interferometry Academic.** Press, Inc., New york. 1991.

[2] Ted Busch. **Fundamentals of Dimensional Metrology.** 3rd edition 1966.

[3] W.H.Steel **Interferometry.** 2nd Ed., Cambridge University Press. New York. 1983.

[4] ISO 3650-1998(E) **Gauge Blocks.** ISO Standard Handbook. 1998.

[5] J.F.W. Galyer and C.R.Shotbolt **Metrology for Engineers**. 4th ed., 3rd impression August 1983.

[6] Edlen B. **The refractive index of air.** Metrologia 1966, pp.71-80.

[7] Jennifer E. Decker and James R. Pekelsky **Uncertainty Evaluation for the Measurement of Gauge Blocks by Optical Interferometry.** Metrologia, Vol. 34, 1997. pp.479-493.

[8] Mitutoyo **Automatic Gauge Block Interferometer Measuring Systems.** Manual No.4763

[9] JICA **Length Standards and their calibration.** Group Training Course in Metrology and Measurement Standards., NRLM, Japan.

[10] Tatsuya N., Shunji S., Taizo N. Junichi I. And Masaji S. **Development of New Automatic Gauge Block Interferometer up to 250 mm.** SPIE, Vol. 3477, July 1998. pp.76-81.

[11] Yu-ping Lan, Wei-ceng Chang **Uncertainty in the measurement of gauge block by Inteferometer.** SPIE, Vol. 3477, July 1998. pp.252-259.

[12] ISO/TAG 4 **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. 1st Edition, International Organization for Standardization, Switzerland, 1993.

ภาคผนวก ก.

การแบ่งเกรดและช่วงการยอมรับของแท่งเทียบมาตรฐานตามมาตรฐาน ISO 3650 : 1998

Limit deviation, t_e, of the length at any point of the measuring face from nominal length and tolerance, t_v for the variation in length

	Calibration grade K		Grade 0		Grade 1		Grade 2	
Nominal length	Limit deviation of length at any point from nominal length	Tolerance for the variation in length	Limit deviation of length at any point from nominal length	Tolerance for the variation in length	Limit deviation of length at any point from nominal length	Tolerance for the variation in length	Limit deviation of length at any point from nominal length	Tolerance for the variation in length
	$\pm t_e$	t_v	$\pm t_e$	t_v	$\pm t_e$	t_v	$\pm t_e$	t_v
mm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm
$0,5 \geq l_n \leq 10$	0,2	0,05	0,12	0,1	0,2	0,16	0,45	0,3
$10 < l_n \leq 25$	0,3	0,05	0,14	0,1	0,3	0,16	0,6	0,3
$25 < l_n \leq 50$	0,4	0,06	0,2	0,1	0,4	0,18	0,8	0,3
$50 < l_n \leq 75$	0,5	0,06	0,25	0,12	0,5	0,18	1	0,35
$75 < l_n \leq 100$	0,6	0,07	0,3	0,12	0,6	0,2	1,2	0,35
$100 < l_n \leq 150$	0,8	0,08	0,4	0,14	0,8	0,2	1,6	0,4
$150 < l_n \leq 200$	1	0,09	0,5	0,16	1	0,25	2	0,4
$200 < l_n \leq 250$	1,2	0,1	0,6	0,16	1,2	0,25	2,4	0,45
$250 < l_n \leq 300$	1,4	0,1	0,7	0,18	1,4	0,25	2,8	0,5
$300 < l_n \leq 400$	1,8	0,12	0,9	0,2	1,8	0,3	3,6	0,5
$400 < l_n \leq 500$	2,2	0,14	1,1	0,25	2,2	0,35	4,4	0,6
$500 < l_n \leq 600$	2,6	0,16	1,3	0,25	2,6	0,4	5,0	0,7
$600 < l_n \leq 700$	3	0,18	1,5	0,3	3	0,45	6,0	0,7
$700 < l_n \leq 800$	3,4	0,2	1,7	0,3	3,4	0,5	6,5	0,8
$800 < l_n \leq 900$	3,8	0,2	1,9	0,35	3,8	0,5	7,5	0,9
$900 < l_n \leq 1000$	4,2	0,25	2,0	0,4	4,2	0,6	8	1

ภาคผนวก ข.

ตาราง ข.1 ผลการถ่ายทอดค่าความถูกต้องแท่งเทียบมาตรฐานจำนวน 112 ชิ้นของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ(ประเทศไทย)เทียบกับสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ(ประเทศเยอรมัน)

Unit = μm

Nominal Size Mm	Identity Number	Deviation from nominal of PTB	Deviation from nominal of NIMT
0.5000	930937	-0.032	-0.076
1.0000	930033	-0.017	-0.031
1.0005	930169	0.000	-0.094
1.0010	930278	-0.020	-0.017
1.0020	930283	-0.037	-0.014
1.0030	930814	-0.002	-0.009
1.0040	930709	-0.023	-0.025
1.0050	930135	-0.015	-0.048
1.0060	920817	+0.002	+0.011
1.0070	930783	-0.057	-0.044
1.0080	930852	-0.031	-0.073
1.0090	930171	-0.028	-0.027
1.0100	930357	+0.010	+0.017
1.0200	930541	-0.039	-0.023
1.0300	930829	-0.008	-0.012
1.0400	930814	-0.006	+0.003
1.0500	930420	-0.013	+0.005
1.0600	930346	-0.043	-0.027
1.0700	930068	0.000	-0.027
1.0800	930726	-0.007	+0.011
1.0900	930784	-0.029	-0.016
1.1000	940140	-0.010	-0.003
1.1100	930137	-0.006	+0.006
1.1200	930392	-0.004	-0.005

Table of Calibration (continued)

Unit = μm

Nominal Size Mm	Identity Number	Deviation from nominal of PTB	Deviation from nominal of NIMT
1.1300	930564	+0.017	+0.014
1.1400	930502	-0.025	-0.009
1.1500	930286	-0.019	-0.012
1.1600	930711	-0.045	-0.040
1.1700	930264	-0.055	-0.035
1.1800	930092	-0.016	+0.004
1.1900	930636	-0.028	-0.018
1.2000	930192	-0.010	-0.001
1.2100	930269	-0.010	-0.004
1.2200	930278	-0.012	0.000
1.2300	930191	-0.013	+0.010
1.2400	930530	-0.021	-0.010
1.2500	930083	-0.048	-0.041
1.2600	930786	-0.005	+0.004
1.2700	930411	-0.036	-0.032
1.2800	930157	-0.013	-0.004
1.2900	930039	-0.011	-0.001
1.3000	940532	-0.029	-0.022
1.3100	930540	-0.005	-0.003
1.3200	930200	-0.004	+0.010
1.3300	930279	-0.036	-0.015
1.3400	930190	+0.002	+0.020
1.3500	930227	-0.011	-0.063
1.3600	930348	-0.028	-0.016
1.3700	930530	+0.023	+0.028
1.3800	930154	-0.032	-0.011
1.3900	930192	-0.001	+0.015

Table of Calibration (continued)

Unit = μm

Nominal Size Mm	Identity Number	Deviation from nominal of PTB	Deviation from nominal of NIMT
1.4000	930227	-0.012	+0.002
1.4100	940592	-0.025	-0.009
1.4200	930700	-0.011	+0.006
1.4300	930870	-0.017	-0.035
1.4400	930407	-0.042	-0.023
1.4500	930951	-0.023	-0.016
1.4600	930880	-0.002	-0.002
1.4700	930651	-0.007	+0.001
1.4800	930741	-0.016	-0.013
1.4900	930566	-0.055	-0.051
1.5000	920111	-0.023	-0.052
2.0000	940178	-0.033	-0.051
2.5000	930379	+0.020	+0.018
3.0000	930688	-0.022	-0.014
3.5000	930201	-0.005	-0.009
4.0000	940120	+0.027	+0.037
4.5000	930060	-0.022	+0.008
5.0000	930012	-0.025	-0.020
5.5000	920792	-0.111	-0.109
6.0000	933167	+0.023	+0.025
6.5000	930364	+0.021	+0.011
7.0000	931932	+0.004	+0.022
7.5000	930132	+0.012	+0.029
8.0000	931535	+0.002	+0.011
8.5000	930469	+0.010	+0.025
9.0000	922647	+0.003	+0.029
9.5000	930395	+0.018	+0.021

Table of Calibration (continued)

Unit = μm

Nominal Size Mm	Identity Number	Deviation from nominal of PTB	Deviation from nominal of NIMT
10.0000	995918	+0.050	+0.064
10.5000	930593	0.000	+0.001
11.0000	931438	+0.032	+0.042
11.5000	930662	-0.004	+0.009
12.0000	931476	-0.010	-0.001
12.5000	930416	+0.012	+0.014
13.0000	931100	+0.008	+0.019
13.5000	930338	-0.008	+0.013
14.0000	931525	0.000	+0.014
14.5000	930527	+0.016	+0.030
15.0000	932752	-0.020	-0.023
15.5000	930302	+0.018	+0.024
16.0000	931092	-0.012	+0.003
16.5000	930414	-0.023	-0.021
17.0000	931194	-0.034	-0.040
17.5000	930137	+0.005	+0.022
18.0000	931653	-0.008	+0.010
18.5000	940162	+0.005	+0.030
19.0000	930800	-0.047	-0.025
19.5000	931119	-0.050	-0.028
20.0000	993027	+0.056	+0.088
20.5000	920078	-0.001	+0.009
21.0000	940144	-0.090	-0.049
21.5000	930686	-0.032	-0.013
22.0000	820612	-0.027	+0.002
22.5000	810472	-0.015	+0.023
23.0000	820896	-0.057	-0.012

Table of Calibration (continued)

Unit = μm

Nominal Size Mm	Identity Number	Deviation from nominal of PTB	Deviation from nominal of NIMT
23.5000	810857	+0.017	+0.046
24.0000	931123	-0.075	-0.060
24.5000	912353	+0.033	+0.051
25.0000	934613	-0.006	0.000
50.0000	991586	-0.024	+0.066
75.0000	931579	-0.093	-0.017
100.0000	993342	+0.068	+0.114

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin

PTB

Kalibrierschein
Calibration certificate

Gegenstand: 108 Parallelendmaße aus Stahl
Object: vom Nennmaß 0,5 mm bis einschließlich 75 mm

Hersteller: Firmenzeichen „Mitutoyo"
Manufacturer:

Typ: Parallelendmaße nach DIN 861
Type:

Kennummer: siehe Identifizierungsnummern
Serial number:

Auftraggeber: Ministry of Science, Technology and Evironment
Applicant: National Institute of Metrology
75/7 Rama VI Road, Rajthevi
Bangkok 10400, Thailand

Anzahl der Seiten: 7
Number of pages:

Geschäftszeichen: 5.13-17455/98
Reference No.:

Kalibrierzeichen: 0320 PTB 98
Calibration mark:

Datum der Kalibrierung: 02.11.98 - 18.11.98
Date of calibration:

Im Auftrag
By order
P. Franke

Braunschweig, 03.12.1998

Siegel

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT

Bearbeiter:
Examiner:

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.
Calibration certificates without signature and seal are not valid. This calibration certificate may not be reproduced other than in full

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 03.12.1998, Kalibrierzeichen: 0320 PTB 98

Page 2 of calibration certificate of 03.12.1998, calibration mark: 0320 PTB 98

Meßprinzip

Die Maße wurden mit dem Meßprinzip der Lichtinterferenz unter Verwendung einer ^{114}Cd-Wellenlängennormal-Lampe bzw. frequenzstabilisierter Laser (633 nm, 544 nm, 780 nm) an die Längeneinheit angeschlossen.
Die Längenangaben beruhen auf der von der 17. Generalkonferenz für Maß und Gewicht im Jahre 1983 beschlossenen Definition der Längeneinheit Meter.

Meßbedingungen

Die Messungen erfolgten in Übereinstimmung mit DIN 861, Januar 1980, Pos. 6.2.
Die Meßflächen genügten hinsichtlich der Anschiebbarkeit den Anforderungen von DIN 861, Pos. 6.2.3.
Die Parallelendmaße waren nacheinander mit beiden Meßflächen angeschoben.

Meßunsicherheit

Die Meßunsicherheit der Abweichung des Mittenmaßes vom Nennmaß beträgt $U = 0{,}015\ \mu m + 0{,}13 \cdot 10^{-6} \cdot l$, l ist die Länge des Maßes.
Angegeben ist die erweiterte Meßunsicherheit, die sich aus der Standardmeßunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor k = 2 ergibt. Sie wurde gemäß dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (ISO, 1995) ermittelt.

Meßergebnis

Die Längenangaben gelten für die Bezugstemperatur 20 °C (ITS-90) und für die meßtechnische Beschaffenheit der Endmaße, die während der Kalibrierung vorlag.
Zur Reduktion der Meßwerte auf 20 °C wurde als linearer thermischer Längenausdehnungskoeffizient der α-Wert in der Tabelle verwendet.

Bemerkungen

Jedes Maß trägt eine eindeutige Identifizierungsnummer.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

PTB

Tabelle der Kalibrierwerte

Nennmaß mm	Ident-Nr.	Abweichung des Mittenmaßes vom Nennmaß µm	Verwendeter α-Wert $10^{-6}K^{-1}$	Endmaßtemperatur °C
0,5000	930937	-0,032	10,8	19,951 - 19,952
1,0000	930033	-0,017	10,8	19,952 - 19,971
1,0005	930169	+0,000	10,8	19,976 - 19,984
1,0010	930278	-0,020	10,8	19,952 - 19,972
1,0020	930283	-0,037	10,8	19,948 - 19,989
1,0030	930814	-0,002	10,8	19,949 - 19,974
1,0040	930709	-0,023	10,8	19,951 - 19,985
1,0050	930135	-0,015	10,8	19,950 - 19,973
1,0060	920817	+0,002	10,8	19,951 - 19,953
1,0070	930783	-0,057	10,8	19,953 - 19,983
1,0080	930852	-0,031	10,8	19,952 - 19,954
1,0090	930171	-0,028	10,8	19,951 - 19,984
1,0100	930357	+0,010	10,8	19,956 - 19,998
1,0200	930541	-0,039	10,8	19,960 - 19,993
1,0300	930829	-0,008	10,8	19,960 - 19,993
1,0400	930814	-0,006	10,8	19,953 - 19,984
1,0500	930420	-0,013	10,8	19,957 - 19,984
1,0600	930346	-0,043	10,8	19,958 - 19,984
1,0700	930068	+0,000	10,8	19,954 - 19,987
1,0800	930726	-0,007	10,8	19,961 - 19,985
1,0900	930784	-0,029	10,8	19,955 - 19,985
1,1000	940140	-0,010	10,8	19,953 - 19,980
1,1100	930137	-0,006	10,8	19,955 - 19,981
1,1200	930392	-0,004	10,8	19,956 - 19,981
1,1300	930564	+0,017	10,8	19,956 - 19,979
1,1400	930502	-0,025	10,8	19,948 - 19,959
1,1500	930286	-0,019	10,8	19,956 - 19,979
1,1600	930711	-0,045	10,8	19,953 - 19,977
1,1700	930264	-0,055	10,8	19,955 - 19,978

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

PTB

Seite 4 zum Kalibrierschein vom 03.12.1998, Kalibrierzeichen: 0320 PTB 98

Page 4 of calibration certificate of 03.12.1998, calibration mark: 0320 PTB 98

Nennmaß mm	Ident-Nr.	Abweichung des Mittenmaßes vom Nennmaß µm	Verwendeter α-Wert $10^{-6}K^{-1}$	Endmaßtemperatur °C
1,1800	930092	-0,016	10,8	19,956 - 19,978
1,1900	930636	-0,028	10,8	19,948 - 19,984
1,2000	930192	-0,010	10,8	19,947 - 19,989
1,2100	930269	-0,010	10,8	19,947 - 19,988
1,2200	930278	-0,012	10,8	19,947 - 19,988
1,2300	930191	-0,013	10,8	19,945 - 19,983
1,2400	930530	-0,021	10,8	19,947 - 19,984
1,2500	930083	-0,048	10,8	19,954 - 19,961
1,2600	930786	-0,005	10,8	19,953 - 19,966
1,2700	930411	-0,036	10,8	19,954 - 19,964
1,2800	930157	-0,013	10,8	19,953 - 19,965
1,2900	930039	-0,011	10,8	19,957 - 19,958
1,3000	940532	-0,029	10,8	19,954 - 19,959
1,3100	930540	-0,005	10,8	19,954 - 19,958
1,3200	930200	-0,004	10,8	19,954 - 19,957
1,3300	930279	-0,036	10,8	19,962 - 19,964
1,3400	930190	+0,002	10,8	19,964 - 19,965
1,3500	930227	-0,011	10,8	19,959 - 19,962
1,3600	930348	-0,028	10,8	19,960 - 19,962
1,3700	930530	+0,023	10,8	19,959 - 19,963
1,3800	930154	-0,032	10,8	19,958 - 19,963
1,3900	930192	-0,001	10,8	19,964 - 19,968
1,4000	930227	-0,012	10,8	19,965 - 19,969
1,4100	940592	-0,025	10,8	19,967 - 19,967
1,4200	930700	-0,011	10,8	19,960 - 19,965
1,4300	930870	-0,017	10,8	19,957 - 19,965
1,4400	930407	-0,042	10,8	19,955 - 19,966
1,4500	930951	-0,023	10,8	19,965 - 19,966
1,4600	930880	-0,002	10,8	19,960 - 19,963
1,4700	930651	-0,007	10,8	19,961 - 19,962

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

PTB

Seite 5 zum Kalibrierschein vom 03.12.1998, Kalibrierzeichen: 0320 PTB 98

Page 5 of calibration certificate of 03.12.1998, calibration mark: 0320 PTB 98

Nennmaß mm	Ident-Nr.	Abweichung des Mittenmaßes vom Nennmaß µm	Verwendeter α-Wert $10^{-6}K^{-1}$	Endmaßtemperatur °C
1,4800	930741	-0,016	10,8	19,962 - 19,963
1,4900	930566	-0,055	10,8	19,957 - 19,961
1,5000	920111	-0,023	10,8	19,959 - 19,961
2,0000	940178	-0,033	10,8	19,958 - 19,962
2,5000	930379	+0,020	10,8	19,959 - 19,966
3,0000	930688	-0,022	10,8	19,965 - 19,968
3,5000	930201	-0,005	10,8	19,958 - 19,960
4,0000	940120	+0,027	10,8	19,961 - 19,962
4,5000	930060	-0,022	10,8	19,952 - 19,955
5,0000	930012	-0,025	10,8	19,957 - 19,965
5,5000	920792	-0,111	10,8	19,954 - 19,963
6,0000	933167	+0,023	10,8	19,960 - 19,965
6,5000	930364	+0,021	10,8	19,953 - 19,966
7,0000	931932	+0,004	10,8	19,954 - 19,986
7,5000	930132	+0,012	10,8	19,954 - 19,980
8,0000	931535	+0,002	10,8	19,956 - 19,979
8,5000	930469	+0,010	10,8	19,954 - 19,977
9,0000	922647	+0,003	10,8	19,947 - 19,989
9,5000	930395	+0,018	10,8	19,946 - 19,984
10,5000	930593	+0,000	10,8	19,956 - 19,958
11,0000	931438	+0,032	10,8	19,951 - 19,961
11,5000	930662	-0,004	10,8	19,961 - 19,962
12,0000	931476	-0,010	10,8	19,950 - 19,988
12,5000	930416	+0,012	10,8	19,976 - 19,984
13,0000	931100	+0,008	10,8	19,952 - 19,953
13,5000	930338	-0,008	10,8	19,955 - 19,984
14,0000	931525	+0,000	10,8	19,957 - 19,994
14,5000	930527	+0,016	10,8	19,951 - 19,952
15,0000	932752	-0,020	10,8	19,951 - 19,953
15,5000	930302	+0,018	10,8	19,952 - 19,965

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

PTB

Nennmaß mm	Ident-Nr.	Abweichung des Mittenmaßes vom Nennmaß µm	Verwendeter α-Wert $10^{-6}K^{-1}$	Endmaßtemperatur °C
16,0000	931092	-0,012	10,8	19,950 - 19,963
16,5000	930414	-0,023	10,8	19,954 - 19,965
17,0000	931194	-0,034	10,8	19,955 - 19,985
17,5000	930137	+0,005	10,8	19,955 - 19,981
18,0000	931653	-0,008	10,8	19,956 - 19,979
18,5000	940162	+0,005	10,8	19,954 - 19,973
19,0000	930800	-0,047	10,8	19,948 - 19,989
19,5000	931119	-0,050	10,8	19,946 - 19,984
20,5000	920078	-0,001	10,8	19,959 - 19,961
21,0000	940144	-0,090	10,8	19,960 - 19,960
21,5000	930686	-0,032	10,8	19,959 - 19,960
22,0000	820612	-0,027	10,8	19,955 - 19,959
22,5000	810472	-0,015	10,8	19,955 - 19,958
23,0000	820896	-0,057	10,8	19,956 - 19,985
23,5000	810857	+0,017	10,8	19,949 - 19,975
24,0000	931123	-0,075	10,8	19,950 - 19,987
24,5000	912353	+0,033	10,8	19,952 - 19,952
25,0000	934613	-0,006	10,8	19,952 - 19,972
75,0000	931579	-0,093	10,8	19,953 - 19,994

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das natur- und ingenieurwissenschaftliche Staatsinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Meßwesen und Teile der Sicherheitstechnik. Die PTB gehört zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien sowie an Zertifizierungs- und Akkreditierungsstellen auf der Grundlage der Normen der Reihe DIN EN 45000 bzw. der relevanten ISO/IEC-Leitfäden.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und - insbesondere im Rahmen des gesetzlichen und industriellen Meßwesens - weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Kalibrierscheine der PTB dokumentieren die Rückführung des Kalibriergegenstandes auf nationale Normale.

Zur Sicherstellung der weltweiten Einheitlichkeit der Maße arbeitet die PTB mit anderen nationalen metrologischen Instituten auf regionaler europäischer Ebene in EUROMET und auf internationaler Ebene im Rahmen der Meterkonvention zusammen. Das Ziel wird durch einen intensiven Austausch von Forschungsergebnissen und durch umfangreiche internationale Vergleichsmessungen erreicht.

The Physikalisch-Technische Bundesanstalt *(PTB) in Braunschweig and Berlin is the national institute for science and technology and the highest technical authority of the Federal Republic of Germany for the field of metrology and certain sectors of safety engineering. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics. It meets the requirements for calibration and testing laboratories, certification and accreditation bodies as defined in the EN 45000 series of standards and the relevant ISO/IEC guides.*

It is the fundamental task of the PTB to realize and maintain the legal units in compliance with the International System of Units (SI) and to disseminate them, above all within the framework of legal and industrial metrology. The PTB thus is on top of the metrological hierar... in Germany. Calibration certificates issued by it document that the object calibrated is trace... national standards.

To ensure worldwide coherence of measures, the PTB cooperates with other national metrology institutes within EUROMET on the regional European level and on the international level within the framework of the Metre Convention. The aim is achieved by an intensive exchange of results of research work carried out and by comprehensive international comparison measurements.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
D-38116 Braunschweig
Abbestraße 2-12
D-10587 Berlin
Fürstenwalder Damm 388
D-12587 Berlin

ภาคผนวก ค.

Students' T-distribution

ตาราง ค Value of $t_p(\nu)$ from the t-distribution for degree of freedom ν that defines an interval $-t_p(\nu)$ to $+t_p(\nu)$ that encompasses the fraction p of the distribution

Degree of Freedom(ν)	Fraction p in percent					
	68.27[(a)]	90	95	95.45[(a)]	99	99.73[(a)]
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.8
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
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
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
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
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

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

ภาคผนวก ง.

ภาคผนวก ง.1 หน้าต่างกำหนดเงื่อนไขค่าชดเชยพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนการวัด

ตาราง ง หน้าต่างกำหนดเงื่อนไขค่าชดเชยพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนการวัด

Condition Setup Screen

Optical Wedge Operation

Parameter	Value
Manual speed (mm/s)	0.300
Measuring speed (mm/s)	0.100
Resetting (mm/s)	0.200
Dwell period (s)	4.0

Rotary Table Operation

Parameter	Value
Manual speed (deg./s)	5.0
Measuring speed (deg./s)	10.0
Resetting (deg./s)	5.0
Dwell period (s)	2.0

Compensation Value Setting

Item	Setting value
Measured points	32
Meas. INTVL ([illegible])	40
Instr. error comp. (nm)	3.0
Pinhole comp. (nm)	0.0
Opt. phase comp. (nm)	0.0
Bar. error comp. (hPa)	-0.23
Wavelength (nm)	632.990844
Bridge gradient (Rt/Rs/V)	-0.00018552
Bridge offset (V)	0.000
Bridge ref. (Ω)	99.99400036

Setting of Resistance Thermometer Specific Values ATM RTS No. 1

Sensor No.	1	2	3	4	5	6
Ro	100.012622	100.004624	99.999625	99.995201	100.001551	100.001625
A	3.914400E-3	3.914711E-3	3.914905E-3	3.912908E-3	3.916999E-3	3.914827E-3
B	-6.0670E-7	-6.0670E-7	-6.0670E-7	-6.0670E-7	-6.0670E-7	-6.0670E-7
C (°C)	0	0	0	0	0	0

Quit

ภาคผนวก ง.2 ข้อกำหนดเฉพาะของเครื่องวัด

1) Personal Computer

CPU	1205 Centris 650 No. SG334E7CCA2
Color display	M1212 No. SG329KJPE09
Keyboard	M0487 No.SI324A7B03N
GP-IB	NB-DIO-24 & NI-DAQ SW,FD3 P/N 180525-01

LabView2 Run-Time Software(Version 2.2.1) P/N 422475-24

2) Electronic Controller Rack and Interferometer unit

Multimeter	2001 S/N : 0559483 Keithlay
Resistance bridge	F16
Linear gage counter	LG-S1 Mitutoyo Corp.
Digital temperature/humity tracer	TRH-5S Shinyei Corp.
Optical Power Meter	ML910B Anritsu Corp.
Rotary table driver	AK-BX52M Asahi Engineering Corp.
Optical wedge driver	HS-430G-05-100 Haromonic Drive System Corp.
Photosensor	MA9801A Anritsu Corp.
Humidity sensor	THP-54 Shinyei Corp.
Linear gage	LGB-110 Mitutoyo Corp.
Laser source	LIS-50 Mitutoyo Corp.
Digital barometer	2655-34 Yakogawa Corp.
Temperature sensor switch box	148.01
Switch box controller	158 Automatic System Laboratories Ltd.

3) Measurement uncertainty in calibration at 2 sigma

Sensor	**Measurement Uncertainty**
Temperature sensor	+/- 10 mK
Humidity sensor(Hygrometer probe)	+/- 3% RH
Barometer	0.2 hPa
Laser source	+/- 1×10^{-9}
Standard resitor	+/- 5 ppm
Reference Resitance bridge	+/- 5 ppm

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเยาวลักษณ์ ล้อมรื่น เกิดวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2513 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก ปีการศึกษา 2535

ปี พ.ศ. 2536 เข้ารับราชการในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 3 โครงการพัฒนาระบบมาตรวิทยาทางวิทยาศาสตร์ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

ปี พ.ศ. 2541 ช่วยราชการ ตำแหน่งนักมาตรวิทยา 5 สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ภายใต้การกำกับดูแลกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบัน ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 5 กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม