



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการสอบเทียบเกจบล็อก

A Study an Application of Michelson Laser Interferometer for Calibration Block Gauges

นามผู้วิจัย เรือเอกอัฐภูมิ เหลืองทองคำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชนะ รัชศิริ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์วิสุทธิ์ สุพิทักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการสอบเทียบเกจบล็อก

A Study an Application of Michelson Laser Interferometer for Calibration Block Gauges

โดย

เรือเอกอัฐภูมิ เหลืองทองคำ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัญญภูมิ เหลืองทองคำ, เรือเอก 2554: การศึกษาการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการสอบเทียบเกจบล็อก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ชนะ รัชศิริ, D.Eng. 111 หน้า

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอกระบวนการสอบเทียบเกจบล็อกด้วยการประยุกต์ใช้หลักการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ โดยอธิบายวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงตามทฤษฎีและหลักการแทรกสอดแบบไมเคลสัน ระบบการวัดที่นำเสนอประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงฮีเลียมนีออนเลเซอร์ ชุดอุปกรณ์เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ประยุกต์ขึ้นด้วยการติดตั้งกระจกสะท้อนแสงเลเซอร์ไว้กับหัวสัมผัสเคลื่อนที่ โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ทำการพัฒนาขึ้น และการสอบเทียบเกจบล็อก ซึ่งในการทดลองจะทำการสอบเทียบเกจบล็อกระดับ 2 ขนาดระบุ 70 mm, 80 mm, 90 mm, และ 100 mm ตามลำดับ ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของระบบที่ได้นำเสนอจะพิจารณาจากค่าความไม่แน่นอนของเกจบล็อก ค่าความไม่แน่นอนของแหล่งกำเนิดแสง อุปกรณ์เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ความคลาดเคลื่อนของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ทำการพัฒนาขึ้น และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยในการสอบเทียบเกจบล็อกนี้ให้เป็นไปตามข้อกำหนดขององค์กรระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization, ISO)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เกจบล็อกระดับ 2 ที่นำมาทดลองมีค่าความยาวอยู่ที่ 70.00048 mm, 79.99950 mm, 90.00396 mm และ 100.00279 mm มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ $\pm 0.692 \mu\text{m}$, $\pm 0.774 \mu\text{m}$, $\pm 1.325 \mu\text{m}$, และ $\pm 0.968 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดกับเครื่องมือวัดมาตรฐานด้วยวิธีอีเอ็นเรโซ (E_n Ratio) แล้วมีค่าอีเอ็นเรโซอยู่ที่ 0.172, 0.295, 2.51 และ 2.343 ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่างานวิจัยฉบับนี้ สามารถถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการสอบเทียบเกจบล็อกระดับ 2 ที่มีขนาดระบุ 70 mm และ 80 mm ได้

Auttapoom Loungthongkam, Lt. 2011: A Study an Application of Michelson Laser Interferometer for Calibration Block Gauges. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chana Raksiri, D.Eng. 111 pages.

This research proposes an application of Michelson laser interferometer for calibration block gauges. Michelson laser interferometer is the high precision length measurement in the resolution of one nanometer. The optical setup is described and the theory is derived. The measurement system composes of laser interferometer, an application machine and gauge blocks. There are 2 experiments in this research for calibration the machine and calibration grade 2 gauge blocks, the nominal length are 70 mm, 80 mm, 90 mm, and 100 mm. The uncertainty of this system is determined from the laser interferometer by direction measurement method, an application tool and environment. The experimental results refer to International Organization for Standardization, ISO.

Experimental results show that the length of grade 2 gauge blocks are 70.00048 mm, 79.99950 mm, 90.00396 mm and 100.00279 mm and measurement uncertainty of all experiments are $\pm 0.692 \mu\text{m}$, $\pm 0.774 \mu\text{m}$, $\pm 1.325 \mu\text{m}$, and $\pm 0.968 \mu\text{m}$. Refer to the standard measurement, the E_n Ratio are 0.172, 0.295, 2.51 and 2.343. So, the experiment results show the proposed approach can be applied for calibration grade 2 gauge blocks in length 70 mm and 80 mm.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ชนะ รักษ์ศิริ ผู้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัยโดยตลอด ขอขอบพระคุณ กรรมการที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร.วิสุทธิ สุพิทักษ์ รวมทั้งคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่เสียสละเวลามาเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้รับคำปรึกษาด้านการเรียนและการทำวิจัยจากอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรม อุตสาหกรรมการหลายๆ ท่าน จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณฝ่ายเครื่องมือวัด สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทาง อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งเอื้อเพื่อ เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณคุณกัมปนาท อ่วมกุล และพนักงานฝ่ายเครื่องมือวัด ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิจัย ขอขอบคุณสถาบันมาตรฐานแห่งชาติ ที่ให้ความช่วยเหลือในการสอบเทียบเกจบล็อกที่ใช้ในงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณกรมโรงงาน ฐานทัพเรือสัตหีบที่ให้การช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์และขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ศึกษาและทำ วิจัยด้วยกันตลอดมา ให้ความช่วยเหลือ เสนอแนะข้อคิดเห็นรวมถึงให้กำลังใจงานวิจัยฉบับนี้ สมบูรณ์

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุพการี ที่สนับสนุนทั้งกำลังทรัพย์และกำลังใจด้วยดี เสมอมา ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจจนสำเร็จ การศึกษา

อัญญภูมิ เหลืองทองคำ

มีนาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	52
ผลและวิจารณ์	81
ผล	81
วิจารณ์	98
สรุปและข้อเสนอแนะ	100
สรุป	100
ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	105
ภาคผนวก	107
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดทั่วไปของเกจบล็อกตามภาพตัดขวาง	11
2	มาตรฐานเกจบล็อก ค่าความเปลี่ยนแปลงความยาวต่อปี	12
3	มาตรฐานเกจบล็อก ค่าความเรียบของผิวหน้าที่ทำการวัด	14
4	มาตรฐานเกจบล็อก ระยะเพื่อค่าความเรียบและระยะเพื่อค่าความขนานของผิวข้าง	14
5	มาตรฐานเกจบล็อก ระยะเพื่อค่าความตั้งฉากของผิวข้างของเกจบล็อก	15
6	มาตรฐานเกจบล็อก ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้	16
7	ตำแหน่งต่าง ๆ ในการสอบเทียบเกจบล็อกแบบเปรียบเทียบ	23
8	ความผิดพลาดด้านขนาดของเกจบล็อกตามมาตรฐาน	23
9	ผลการวัดเครื่องสอบเทียบที่พัฒนาขึ้นด้วยเกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm	56
10	ผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น	65
11	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm	66
12	ผลการวัดเกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm	70
13	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm	77
14	การหาจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสมในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ระยะต่าง ๆ	80
15	การหาจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสมในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาดต่าง ๆ	80
16	ผลการวัดเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 70 mm	82
17	ผลการวัดเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 80 mm	82
18	ผลการวัดเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 90 mm	83
19	ผลการวัดเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 100 mm	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
20	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบ เกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 70 mm	85
21	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบ เกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 80 mm	86
22	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบ เกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 90 mm	87
23	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบ เกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 90 mm	88
24	ผลการวัดเกจบล็อกขนาดระบุ 70 mm	90
25	ผลการวัดเกจบล็อกขนาดระบุ 80 mm	90
26	ผลการวัดเกจบล็อกขนาดระบุ 90 mm	91
27	ผลการวัดเกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm	92
28	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบโดยตรงในการสอบเทียบเกจบล็อก ขนาดระบุ 70 mm	93
29	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบโดยตรงในการสอบเทียบเกจบล็อก ขนาดระบุ 80 mm	94
30	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบโดยตรงในการสอบเทียบเกจบล็อก ขนาดระบุ 90 mm	95
31	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบโดยตรงในการสอบเทียบเกจบล็อก ขนาดระบุ 100 mm	96
32	การเปรียบเทียบผลการวัด	97
ตารางผนวกที่		
1	การปรับแต่งแกนเลื่อนหลัก	108
2	แสดงแรงกดที่กระทำที่ระยะต่างๆ	110

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เกจบล็อกขนาดต่าง ๆ	5
2	ลักษณะทั่วไปของเกจบล็อกแบบสี่เหลี่ยม	6
3	ความยาวของเกจบล็อก	7
4	ความยาวของเกจบล็อกที่จุดกึ่งกลาง	8
5	ค่าความเบี่ยงเบนของความยาวของเกจบล็อก	8
6	ค่าความความเรียบของผิวหน้าการวัด	9
7	ระบบการตั้งชื่อของผิวสัมผัสของเกจบล็อก	10
8	ขนาดของรูเชื่อมต่อมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร	11
9	ระยะเพื่อความตึงฉากของเกจบล็อก	15
10	เกจบล็อกที่ทำด้วยวัสดุต่าง ๆ	17
11	กราฟแสดงการสึกหรอของเกจบล็อกที่ทำด้วยวัสดุต่าง ๆ	18
12	การทำความสะอาดเกจบล็อก	19
13	ผิวหน้าการวัดที่ไม่เรียบ	19
14	หินขัดสำหรับขัดผิวหน้าการวัดเกจบล็อก	20
15	รอยตำหนิบริเวณผิวหน้าการวัดก่อนและหลังการขัด	20
16	จุดที่ทำการสอบเทียบแบบเปรียบเทียบ	23
17	ตำแหน่งจุดอ้างอิงสำหรับการวัดเกจบล็อก	24
18	ขั้นตอนการวัดขนาดหรือการสอบเทียบขนาด	25
19	ตำแหน่งที่ถูกต้องของรีเฟลคเตอร์	28
20	ตำแหน่งที่การวางของบีมสปริทเตอร์ที่ถูกต้อง	29
21	ระบบการทำงานของไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์	29
22	การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	36
23	การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม	37
24	การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบยู	37
25	แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ของ Renishaw	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ชุดชุดเซชความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากปัจจัยสภาวะแวดล้อม	42
27	กระจกสะท้อนและแทรกสอดแสงเลเซอร์	42
28	เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรวบรวมและประมวลผลข้อมูล	43
29	แบบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ทำการพัฒนาขึ้น	44
30	เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ทำการพัฒนาขึ้น	45
31	ชุดหัววัดกำหนดแรง	45
32	ชุดหัววัดกำหนดตำแหน่ง	46
33	จุดที่ทำการปรับแต่งชุดหัววัดกำหนดตำแหน่ง	47
34	การปรับแต่งหัววัด	48
35	ชุดแท่นวางเกจบล็อก	49
36	การปรับแต่งการวางเกจบล็อก	50
37	ภาพการปรับแต่งการวางเกจบล็อก	51
38	แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น	53
39	ผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น	55
40	แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเกจบล็อก	67
41	ผลการสอบเทียบเกจบล็อก	69
ภาพผนวกที่		
1	การปรับแต่งแกนเลื่อนหลัก	109
2	การทดสอบแรงกดของหัววัดที่ยุบตัวในระยะต่าง ๆ	109
3	การทดสอบแรงกดของหัววัด	110

การศึกษาการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการสอบเทียบเกจบล็อก

A Study an Application of Michelson Laser Interferometer for Calibration Block Gauges

คำนำ

เกจบล็อก (Block Gauges) เป็นเครื่องมือวัดที่มีลักษณะเป็นแท่ง ใช้เป็นเครื่องมือวัดในการวัดขนาดงานและใช้เป็นแท่งตรวจสอบความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดอื่นๆ เนื่องจากเกจบล็อกเป็นแท่งตรวจสอบความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดอื่นๆ ดังนั้นตัวเกจบล็อกเองต้องมีความเที่ยงตรงสูงในขณะนำไปใช้งาน จึงมีกระบวนการตรวจสอบความเที่ยงตรงของเกจบล็อกที่เรียกว่า การสอบเทียบ

การสอบเทียบ (Calibration) คือกระบวนการทำงาน (ภายใต้สภาวะที่ควบคุม) ซึ่งสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัด กับค่าที่แท้จริงจากมาตรฐานอ้างอิงที่มีการสอบกลับได้ (Traceability) กล่าวคือการสอบเทียบคือการเทียบผลการวัดกับค่ามาตรฐานที่รู้ค่าอย่างแท้จริง ค่ามาตรฐานที่รู้ค่าจริงนี้จะต้องเป็นแหล่งที่มาที่เป็นที่ยอมรับกันซึ่ง ค่ามาตรฐานต่าง ๆ นั้น ถูกกำหนดขึ้นและยอมรับกันระหว่างประเทศต่างๆ ใช้อ้างอิง (Reference) เป็นมาตรฐาน (Standard) เดียวกันก็จะ เป็น International Standards และเป็น International Traceability การสอบเทียบ เน้นการวัดเพื่อสอบทางมาตรวิทยา โดยรายงานผลหรือค่าที่ได้จากเครื่องมือ ภายใต้การควบคุมกระบวนการและสภาวะอย่างเคร่งครัด ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่า ค่าที่วัดจากเครื่องมือ นั้น สามารถเปรียบเทียบกับค่าที่แท้จริงได้ (สมนึก, 2550)

เนื่องจากการประกันคุณภาพเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในวงการอุตสาหกรรม ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดก่อนนำไปใช้งานนั้นนับว่าเป็นสิ่งสำคัญสถานภาพของเครื่องมือวัดดังกล่าวเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์รวมถึงภาพลักษณ์ขององค์กร เครื่องมือวัดที่ไม่ได้มาตรฐานส่งผลให้งานไม่ได้คุณภาพก่อให้เกิดความสูญเสียของผลิตภัณฑ์นั้น ในที่สุด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดก่อนนำไปใช้งาน

ในปัจจุบันเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นเครื่องมือวัดในระบบการผลิตมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำ และให้ผลในการวัดที่มีความละเอียดสูงถึงระดับ 1 nm อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่มีความเสถียรในการแสดงผลที่สูงอีกด้วย จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย งานวิจัยต่างๆ ได้นำเสนอขึ้นเพื่อช่วยเป็นแนวทางในการใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในวงการอุตสาหกรรม เช่น (อรวรรณ, 2543) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการวัดความคลาดเคลื่อนของไมโครมิเตอร์ และ (จิตภูมิ, 2551) ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการวัดความกลม

งานวิจัยฉบับนี้มีความต้องการความถูกต้อง และแม่นยำในการสอบเทียบเกจบล็อก จึงมีแนวความคิดที่จะทำการตรวจวัดด้วยการนำแสงเลเซอร์มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ให้ผลการตรวจวัดที่มีความละเอียดและประสิทธิภาพสูง โดยมีแนวคิดที่จะนำเอาหลักการการแทรกสอดของแสงเข้ามาทำการตรวจวัดความยาวโดยใช้แสงเลเซอร์ เรียกว่า เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Laser Interferometer) ในที่นี้จะใช้ระบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน (Michelson's Interferometer) ซึ่งเป็นระบบที่มีความเหมาะสมสำหรับงานด้านการตรวจวัด

วัตถุประสงค์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาดังนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการสอบเทียบเกจบล็อก
2. เพื่อคำนวณหาระยะความคลาดเคลื่อนของเกจบล็อกที่ทำการสอบเทียบ ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น
3. เพื่อคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดของระบบ
4. เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากการทดลอง กับผลการวัดที่ได้จากห้องปฏิบัติการมาตรฐาน

การตรวจเอกสาร

การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การศึกษาการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการสอบเทียบเกจบล็อก ได้อาศัยข้อมูลและทฤษฎีต่อไปนี้เป็นพื้นฐานในการดำเนินงานวิจัย

1. เกจบล็อก
2. การสอบเทียบเกจบล็อก
3. เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์
4. การประเมินระบบการวัด
5. การเปรียบเทียบผลการวัด

1. เกจบล็อก

เกจบล็อกหรือแท่งเทียบมาตรฐาน เป็นมาตรฐานด้านความยาวชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิง ด้านความยาวและมิติมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากทำจากวัสดุที่มีความแข็ง มีความทนทานต่อการเสียดสี ไม่สึกหรอและไม่เป็นสนิมง่าย ผิวหน้าสัมผัสทั้งสองด้านเรียบและขนานกันสามารถนำมาประกอ (Wring) เข้าด้วยกันได้ เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่ทำจากโลหะดังนั้น ความยาวนั้นจะแปรผันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ค่าที่ถูกต้องของเกจบล็อกจะอ้างอิงที่อุณหภูมิ 20 °c

เกจบล็อกยังเป็นมาตรฐานความยาวที่สากลยอมรับและมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่เป็นรูปธรรมสามารถจับต้องได้จริง และเป็นมาตรฐานที่ได้รับการถ่ายทอดค่าความถูกต้องจากนิยามของ “เมตร” โดยตรง โดยนิยามของเมตรกำหนดไว้ คือระยะทางที่แสงเดินทางได้ในสุญญากาศในระยะเวลา $1/299,792,458$ วินาที

เกจบล็อกนอกจากนำมาเป็นมาตรฐานสำหรับสอบเทียบเครื่องมือวัดแล้ว ชุดเกจบล็อกยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น การใช้เกจบล็อกสอบเทียบค่า เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ และไมโครมิเตอร์ ที่ใช้ในฝ่ายผลิตโดยปกติทุกๆ 30-60 วันทำการจะมีการวัดตรวจสอบค่าเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ และไมโครมิเตอร์ โดยห้องตรวจสอบค่าโดยทดสอบวัดกับเกจบล็อก แล้วอ่านค่าจากเครื่องมือวัดดังกล่าวว่ามีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นหรือไม่อย่างไร ถ้าค่ามีผิดพลาดมีมากเกินไปก็จะต้องมีการปรับแต่งหรือเปลี่ยนเครื่องมือวัดนั้น ๆ ออกจากกระบวนการผลิตชิ้นงาน

ด้วยเหตุนี้เกจบล็อกจึงนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดมาตรฐานของเครื่องมือวัดพื้นฐาน ดังกล่าวถ้าจะพิจารณาหาความเป็นมาตรฐานของเกจบล็อก ก็จะใช้วิธีการวัดสอบเทียบค่าของ เกจบล็อกก็จะใช้วิธีการวัดสอบเทียบค่าของเกจบล็อกที่มีคุณภาพของค่าขนาดที่สูงกว่า ดีกว่า (มีค่า ความผิดพลาดน้อยกว่า)

1.1 ขอบเขตของเกจบล็อก

ขอบเขตของเกจบล็อกนี้ว่าด้วย การออกแบบที่สำคัญที่สุด และลักษณะทางเลขาคณิต ของข้อกำหนดมาตรฐานสากลของเกจบล็อกนี้ กับภาพตัดขวาง และความยาวระบุของเกจบล็อกขนาด 0.5 mm ถึง 1,000 mm



Rectangular Gauge Blocks

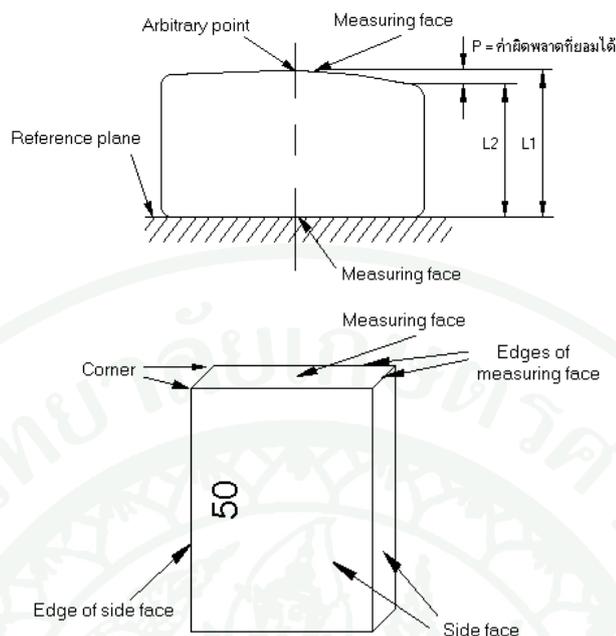


Square Gauge Blocks



Angle Gauge Blocks

ภาพที่ 1 เกจบล็อกลักษณะต่างๆ



ภาพที่ 2 ลักษณะทั่วไปของเกจบล็อกแบบสี่เหลี่ยม

1.2 หลักเกณฑ์การอ้างอิง

ตามหลักเกณฑ์ที่มีมาตรฐานที่มีเงื่อนไขอ้างอิง ประกอบด้วย เงื่อนไขตามมาตรฐานสากลดังนี้

ISO 1:1975, มาตรฐานอุณหภูมิอ้างอิงสำหรับการวัดความยาวในอุตสาหกรรม

ISO 1101: -, ข้อกำหนดของรูปทรงเรขาคณิต ระยะเพื่อ สัญลักษณ์ และสิ่งบ่งบอกบน

แบบ

ISO 6507-1:1997, วัสดุ การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ บทที่ 1 ทฤษฎีการทดสอบ

ISO 14253-1:1998, ข้อกำหนดของรูปทรงเรขาคณิต การตรวจสอบชิ้นงานด้วยการวัดและการวัดเครื่องมือ

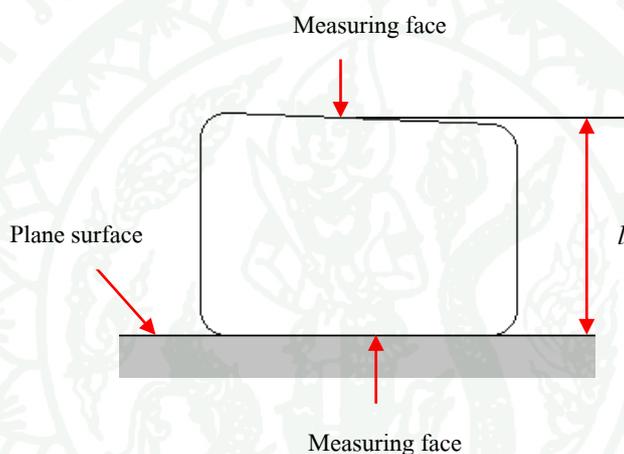
1.3 นิยามความยาวของเกจบล็อก

ความยาวของเกจบล็อกตามเอกสารมาตรฐาน ISO 3650:1998 กำหนดนิยามความยาวของเกจบล็อก คือระยะทางที่ตั้งฉากระหว่างจุดใดจุดหนึ่งบนผิวหน้าเกจบล็อกถึงพื้นผิวของแผ่น

ความเรียบมาตรฐานอ้างอิง โดยที่สมบัติเฉพาะของวัสดุและความหยาบของแผ่นความเรียบมาตรฐานอ้างอิงเหมือนกันกับเกจบล็อก โดยที่ความยาวของเกจบล็อกนี้จะรวมถึงผลกระทบจากการประกบติดกับแผ่นความเรียบมาตรฐานอ้างอิงด้วย ความยาวระบุของเกจบล็อกมีขนาดตั้งแต่ 0.5 – 1,000 mm และมีอยู่ทั้งหมด 4 เกรดคือ K, 0, 1 และ 2

1.3.1 ความยาวของเกจบล็อก (Length of a Gauge Block, l)

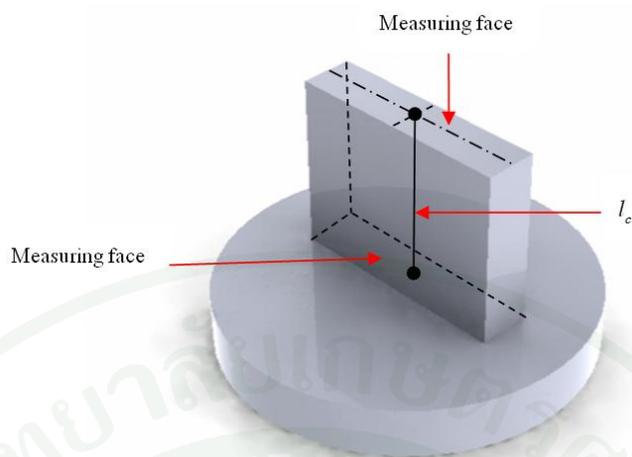
ความยาวของเกจบล็อกที่จุดเฉพาะที่ผิวหน้าการวัด คือระยะทางที่ตั้งฉากระหว่างจุดและพื้นผิวของ Auxiliary plate ที่ทำจากวัสดุเดียวกันและพื้นผิวเดียวกันตามภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความยาวของเกจบล็อก

1.3.2 ความยาวที่จุดกึ่งกลางของเกจบล็อก (Central Length of Gauge Block, l_c)

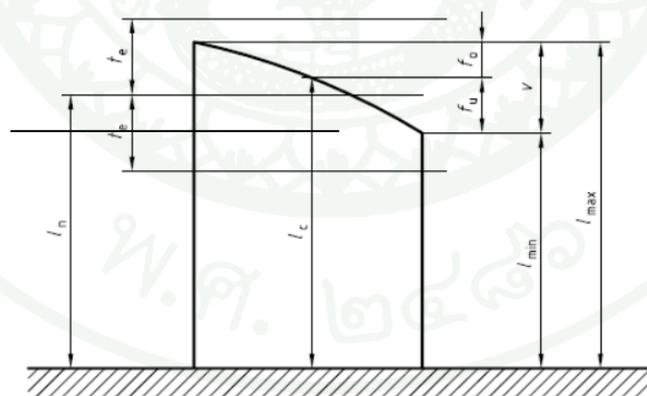
ความยาวที่จุดกึ่งกลางของเกจบล็อก คือความยาวที่จุดกึ่งกลางของเกจบล็อกที่ผิวหน้าการวัดตามภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ความยาวของเกจบล็อกที่จุดกึ่งกลาง

1.3.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวของเกจบล็อก (Variation in Length, v)

ค่าความเบี่ยงเบนของความยาว (e) ที่จุดอื่น จากความยาวระบุ (l_n) คือผลต่างระหว่างค่าความยาวที่จุดนั้นกับความยาวระบุ ($l-l_n$) โดยที่ค่าความเบี่ยงเบนของที่มากที่สุด (e_d) คือผลต่างของความยาวที่มากที่สุด หรือความยาวที่น้อยที่สุดกับความยาวระบุ ($l_{max}-l_n$) หรือ (l_n-l_{min}) ตามภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ค่าความเบี่ยงเบนของความยาวของเกจบล็อก

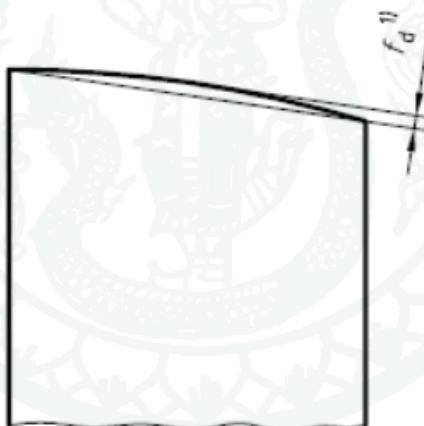
ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

ค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวของแถบลิ้น (v) คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าความยาวที่มากที่สุด (l_{max}) กับค่าความยาวที่น้อยที่สุด (l_{min}) โดยสัญลักษณ์ต่างๆ มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} e &= l - l_n \\ e_d &= l_{max} - l_n \quad \text{หรือ} \quad l_n - l_{min} \\ v &= l_{max} - l_{min} \\ f_o &= l_{max} - l_c \\ f_u &= l_c - l_{min} \end{aligned}$$

1.3.4 ค่าความเรียบของผิวหน้าการวัด (Deviation from Flatness, f_d)

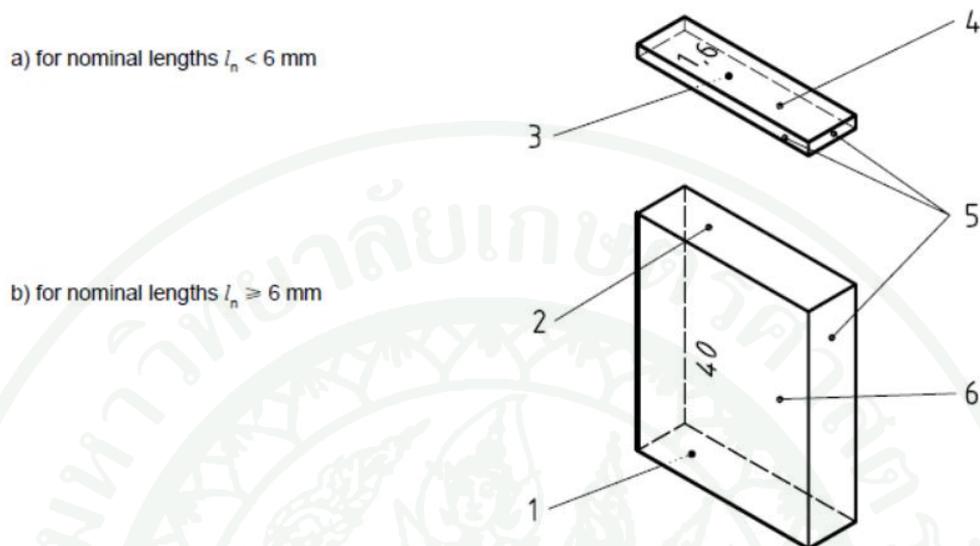
ค่าความเรียบของผิวหน้าการวัด คือระยะทางที่น้อยที่สุดระหว่างพื้นผิวที่ขนานกันตามภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ค่าความเรียบของผิวหน้าการวัด

ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

1.4 ระบบการตั้งชื่อของผิวสัมผัสของเกจบล็อก (Nomenclature of Faces)



ภาพที่ 7 ระบบการตั้งชื่อของผิวสัมผัสของเกจบล็อก

- | | | |
|------------------------|--------------------|------------------------|
| 1 ผิวหน้าการวัดซ้าย | 2 ผิวหน้าการวัดขวา | 3 ผิวหน้าการวัดไม่ระบุ |
| 4 ผิวหน้าการวัดที่ระบุ | 5 ผิวข้าง | 6 ผิวข้างที่ระบุ |

ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

1.5 ขนาดทั่วไป คุณสมบัติของวัสดุ และการกำหนดจุดของเกจบล็อก

1.5.1 ขนาดทั่วไปของเกจบล็อก

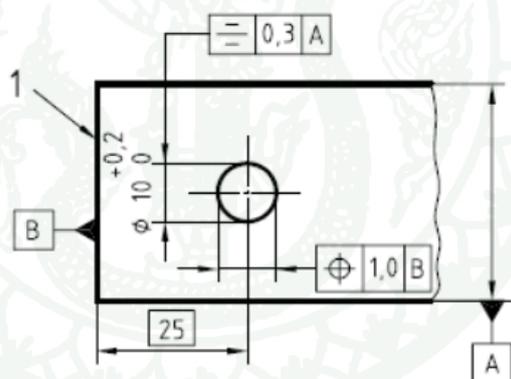
ขนาดของเกจบล็อกตามภาพตัดขวาง และขีดจำกัดค่าเบี่ยงเบนของเกจบล็อก แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดทั่วไปของเกจบล็อกตามภาพตัดขวาง

Cross section	Nominal length, l_n	a		b	
		nominal	limit deviation	nominal	limit deviation
	0.5 to 10	30	0	9	-0.05
	Over to 1000	35	0.3		-0.2

ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

ถ้าเกจบล็อกมีขนาดระบุมากกว่า 100 mm เกจบล็อกจะมีรูที่ใช้ในการเชื่อมต่อ โดยมีขนาดและตำแหน่งของรูตามภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ขนาดของรูเชื่อมต่อมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

1.5.2 คุณสมบัติของวัสดุ

เกจบล็อกควรจะทำจากเหล็กคุณภาพสูงหรือวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน และมีคุณสมบัติมีค่าระยะเผื่อคงที่

1.5.2.1 สัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ

สัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิของเกจบล็อกที่ทำมาจากเหล็กในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 10 °C ถึง 30 °C จะมีค่าเท่ากับ $(11.5 \pm 1.0) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

1.5.2.2 ค่าความแข็งของเกจบล็อก

ค่าความแข็งของเกจบล็อกตามค่าความแข็งของวิกเกอร์ต้องไม่ต่ำกว่า 800 HV

1.5.2.3 ค่าความเสถียรของขนาด

ค่าความเปลี่ยนแปลงของความยาวต่อปีของเกจบล็อกได้แสดงในตารางที่ 2 โดยค่าความเปลี่ยนแปลงนี้ไม่รวมถึงค่าเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากอุณหภูมิ ความชื้น สะเทือน สนามแม่เหล็ก และแรงภายนอกที่มากระทำ

ตารางที่ 2 มาตรฐานเกจบล็อก ค่าความเปลี่ยนแปลงของความยาวต่อปี

Grade	Maximum permissible change in length
K, 0	$\pm (0.02 + 0.25 \times 10^{-6} \times l_n)$
1, 2	$\pm (0.05 + 0.5 \times 10^{-6} \times l_n)$

หมายเหตุ l_n คือความยาวของเกจบล็อกมีหน่วยเป็น mm

ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

1.6 การแบ่งระดับของเกจบล็อก

เกจบล็อกจะมีอยู่ 4 ระดับ หรือ 4 เกรด ตามค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerance Class) ตามมาตรฐาน ISO 3650 มีดังนี้

1.6.1 เกรดที่ใช้อ้างอิง (Reference Grade) เกรด K เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเที่ยงตรงและความแม่นยำสูง โดยเฉพาะในการนำไปใช้ใน Clean Room สำหรับนำวัสดุอ้างอิงในการสอบเทียบกับเกจบล็อกที่มีเกรดคุณภาพต่ำกว่า

1.6.2 เกรดที่ใช้สอบเทียบ (Calibration Grade) เกรด 0 เหมาะสำหรับการใช้ในห้องสอบเทียบ ห้องวิจัย ที่ต้องการหาความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการสอบเทียบขนาดของเครื่องมือวัดต่างๆ พร้อมการรับรองผลการสอบเทียบขนาด เครื่องมือวัดประเภทนี้ได้แก่ เวอร์นิเยอร์ คาร์ลิเปอร์ ไมโครมิเตอร์ ฯลฯ

1.6.3 เกรดที่ใช้ในการตรวจสอบ (Inspection Grade) เกรด 1 เป็นเกรดที่ใช้ตรวจสอบค่าของเครื่องมือวัดต่างๆ ไปในงานอุตสาหกรรมการผลิต โดยจะเป็นการตรวจสอบคุณภาพภายในองค์กรนั้นๆ (การทวนสอบ) ซึ่งจะมีการนำเครื่องมือวัดขึ้นพื้นฐานมาตรวจสอบความเที่ยงตรงของขนาดตามช่วงเวลาที่กำหนด การสอบขนาดดังกล่าวจะไม่สามารถออกใบรับรองผลได้ เป็นเพียงการตรวจสอบจาก Inspection Room เท่านั้น

1.6.4 เกรดที่ใช้ในฝ่ายผลิต (Working Grade) เกรด 2 เป็นเกรดของการใช้งานผลิต โดยเอาเกจบล็อกดังกล่าวไปใช้ประกอบเพื่อวัดค่าต่างๆ ของชิ้นงานที่ต้องผลิตในงานอุตสาหกรรมทุกประเภท

1.7 ค่าความต้องการเกี่ยวกับการวัด

โดยทั่วไปค่าต่าง ๆ ของเกจบล็อกจะเป็นไปตามเกรดของของเกจบล็อกที่ได้มีการกำหนดไว้ ค่าความไม่แน่นอนในการวัดจะอยู่ในช่วงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวและจะแปรผันตามความยาวของเกจบล็อก

1.7.1 ค่าความเรียบของผิวหน้าที่ทำการวัดระยะเพื่อค่าความเรียบผิวหน้าที่ทำการวัดของเกจบล็อกจะแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 มาตรฐานเกจบล็อก ค่าความเรียบของผิวหน้าที่ทำการวัด

Nominal length range (mm)	Grade K (μm)	Grade 0 (μm)	Grade 1 (μm)	Grade 2 (μm)
From 0.5 up to 150	0.05	0.10	0.15	0.25
over 150 up to 500	0.10	0.15	0.18	0.25
over 500 up to 1000	0.15	0.18	0.20	0.25

ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

1.7.2 ระบุเพื่อค่าความเรียบและระบุเพื่อค่าความขนานของผิวข้างเกจบล็อกจะแสดง
ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 มาตรฐานเกจบล็อก ระบุเพื่อค่าความเรียบและระบุเพื่อค่าความขนานของผิวข้าง

Nominal length (mm)	Flatness tolerance	Parallelism tolerance
100 or under	40	80
Over 100	$40+40 \cdot 10^{-6} \cdot l_n$	$80+80 \cdot 10^{-6} \cdot l_n$

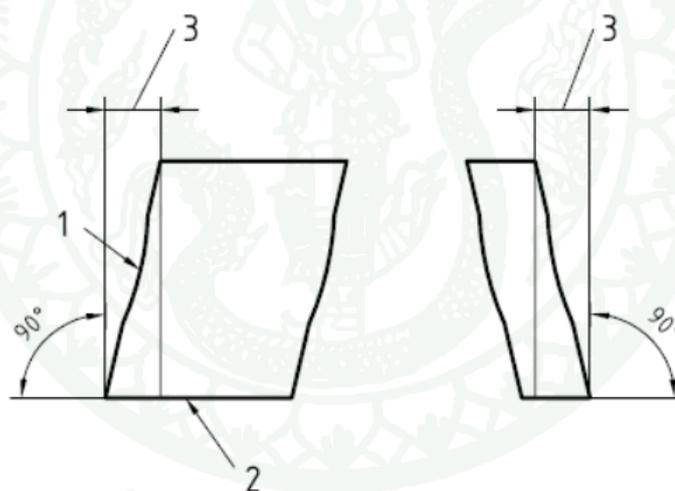
ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

1.7.3 ระบุเพื่อค่าความตั้งฉากของผิวข้างของเกจบล็อกจะอยู่ในช่วงระหว่าง $90 \pm 10'$
ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 มาตรฐานเกจบล็อก ระยะเผื่อค่าความต้งฉากของผิวข้างของเกจบล็อก

Nominal length (mm)		Perpendicularity tolerance
Over	Or under	
10	25	50
25	60	70
60	150	100
150	400	140
400	1000	180

ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)



ภาพที่ 9 ระยะเผื่อค่าความต้งฉากของผิวข้างของเกจบล็อก

1 ผิวข้าง

2 ผิวหน้าการวัด

3 ความเบี่ยงเบนจากค่าความต้งฉาก

ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

1.7.4 ค่าความแม่นยำทางด้านความยาว ค่าระยะเผื่อที่ความยาวต่างๆ และค่าที่อนุญาตให้แปรผันในความยาวต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 มาตรฐานแถบลิ้น ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้

Nominal length range (mm)	Grade K		Grade 0		Grade 1		Grade 2	
	Tolerance length at any point $\pm t_e$ (μm)	Permissible variation in length t_v (μm)	Tolerance length at any point $\pm t_e$ (μm)	Permissible variation in length t_v (μm)	Tolerance length at any point $\pm t_e$ (μm)	Permissible variation in length t_v (μm)	Tolerance length at any point $\pm t_e$ (μm)	Permissible variation in length t_v (μm)
From 0.5 up to 10	± 0.20	0.05	± 0.12	0.10	± 0.20	0.16	± 0.45	0.30
over 10 up to 25	± 0.30	0.05	± 0.14	0.10	± 0.30	0.16	± 0.60	0.30
over 25 up to 50	± 0.40	0.06	± 0.20	0.10	± 0.40	0.18	± 0.80	0.30
over 50 up to 75	± 0.50	0.06	± 0.25	0.12	± 0.50	0.18	± 1.00	0.35
over 75 up to 100	± 0.60	0.07	± 0.30	0.12	± 0.60	0.20	± 1.20	0.35
over 100 up to 150	± 0.80	0.08	± 0.40	0.14	± 0.80	0.20	± 1.60	0.40
over 150 up to 200	± 1.00	0.09	± 0.50	0.16	± 1.00	0.25	± 2.00	0.40
over 200 up to 250	± 1.20	0.10	± 0.60	0.16	± 1.20	0.25	± 2.40	0.45
over 250 up to 300	± 1.40	0.10	± 0.70	0.18	± 1.40	0.25	± 2.80	0.50
over 300 up to 400	± 1.80	0.12	± 0.90	0.20	± 1.80	0.30	± 3.60	0.50
over 400 up to 500	± 2.20	0.14	± 1.10	0.25	± 2.20	0.35	± 4.40	0.60
over 500 up to 600	± 2.60	0.16	± 1.30	0.25	± 2.60	0.40	± 5.00	0.70
over 600 up to 700	± 3.00	0.18	± 1.50	0.30	± 3.00	0.45	± 6.00	0.70
over 700 up to 800	± 3.40	0.20	± 1.70	0.30	± 3.40	0.50	± 6.50	0.80
over 800 up to 900	± 3.80	0.20	± 1.90	0.35	± 3.80	0.50	± 7.50	0.90
over 900 up to 1000	± 4.20	0.25	± 2.00	0.40	± 4.20	0.60	± 8.00	1.00

ที่มา: Guide to the expression of uncertainty in measurement (1993)

1.8 วัสดุที่ใช้ผลิตเกจบล็อก

วัสดุที่ใช้ผลิตเกจบล็อกมีหลายชนิด ซึ่งคุณสมบัติหลักที่ต้องการจากวัสดุเหล่านี้คือ ความสามารถรักษารูปร่างขนาดประจำตัวไว้ได้เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมหรือในตัวเองสูงขึ้นระหว่างใช้งาน และความสามารถทนต่อการขีดสี เนื่องจากการใช้งานมักจะต้องสัมผัสกับผิวของชิ้นงานอื่นๆ และ ถูกขีดสีตลอดเวลา วัสดุที่ใช้ทำเกจบล็อกในปัจจุบัน ได้แก่

1. เหล็กเครื่องมือ (Tool Steel) เป็นวัสดุที่ใช้ทำเกจบล็อกในยุคต้นๆ มีความทนต่อการสึกหรอน้อยที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหลาย
2. เหล็กซิลิกอนไนไตรด์ (Silicon Nitride)
3. เหล็กคาร์ไบด์ (Cerbide)
4. เซรามิกผสมเซอร์โคเนียม (Zirconium Based Ceramic) วัสดุชนิดนี้มีความสามารถทนต่อการขีดสีได้สูงมาก มากกว่าเกจบล็อกที่ทำด้วยเหล็กถึง 10 เท่า การดูแลรักษาก็ไม่จำเป็นต้องเคลือบสารป้องกันสนิมหลังใช้งานเช่นเหล็กอื่น

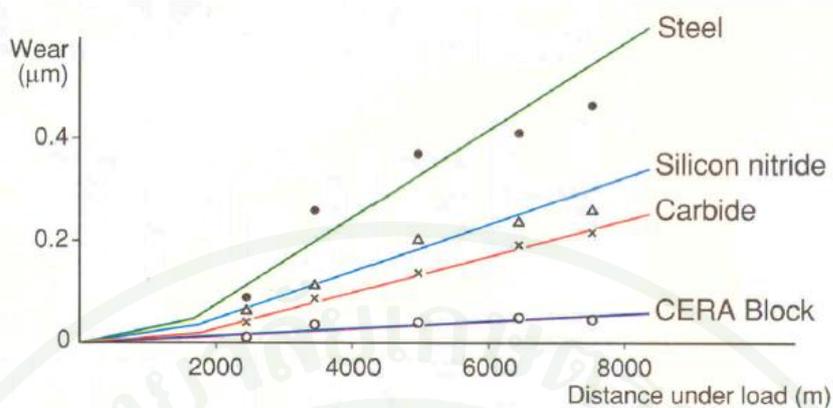


Ceramic Gauge Blocks



Steel Gauge Blocks

ภาพที่ 10 เกจบล็อกที่ทำด้วยวัสดุต่างๆ



ภาพที่ 11 กราฟการสึกหรอของเกจบล็อกที่ทำด้วยวัสดุต่างๆ

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบการสึกหรอของเกจบล็อกที่ทำด้วยวัสดุต่างๆ แกนแนวตั้งแสดงการสึกของพื้นที่หน้าตัดความหนาของเกจบล็อกหน่วยเป็นไมโครเมตร และแกนอนแสดงจำนวนครั้งในการใช้งานจะเห็นว่าเกจบล็อกชนิดที่ทำด้วยเหล็กเครื่องมือมีการสึกหรอสูงสุดและชนิดที่ทำด้วยเซรามิกมีการสึกหรอน้อยสุด ในจำนวนการใช้งานเท่าๆ กัน

2. การสอบเทียบเกจบล็อก

เมื่อกล่าวถึงการสอบเทียบปัจจัยสำคัญของการสอบเทียบและห้องปฏิบัติการทดสอบในภาคอุตสาหกรรมขึ้นอยู่กับกระบวนการสอบกลับมาตรฐานของเครื่องมือวัดกับมาตรฐานอ้างอิง เพื่อคงไว้ซึ่งความถูกต้องตามมาตรฐานสากล ในที่นี้จะกล่าวถึงการสอบเทียบเกจบล็อกโดยการใช้อุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการสอบเทียบแบบโดยตรง รวมถึงขั้นตอนการสอบเทียบ และวิธีการสอบเทียบตามมาตรฐาน EA-4/02

2.1 การเตรียมการก่อนการสอบเทียบ

ก่อนทำการสอบเทียบเกจบล็อก ต้องทำการตรวจสอบเกจบล็อกและทำการบันทึกข้อมูลเบื้องต้นและลักษณะเฉพาะที่สำคัญเช่น บริษัทผู้ผลิต หน่วยงานที่ทำการส่งมาสอบเทียบ ระดับความถูกต้องของเกจบล็อกที่ส่งมาสอบเทียบ เป็นต้น หลังจากนั้นทำการปฏิบัติตามขั้นตอนตามต่อไปนี้

2.1.1 การทำความสะอาดเกจบล็อก

การทำความสะอาดเกจบล็อกนั้นจะใช้กระดาษชนิดพิเศษชุบแอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาดเกจบล็อกจนสะอาด ให้ไม่เหลือคราบวาสลินและคราบอื่นๆ ที่เคลือบมาเหลืออยู่



ภาพที่ 12 การทำความสะอาดเกจบล็อก

2.1.2 การตรวจสอบผิวหน้าเกจบล็อก

เนื่องจากเกจบล็อกที่ผ่านการใช้งานมานั้นจะมีรอยตำหนิต่างๆ เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าการวัดเช่น รอยสนิม หรือรอยขีดข่วนต่างๆ ทำให้ผิวหน้าการวัดนั้นไม่เหมาะการตรวจสอบกระทำโดยการนำเกจบล็อกที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาประกบติดกับออปติคอลแฟลตได้สนิทและไม่มีริ้วการแทรกสอดเกิดขึ้น เกจบล็อกที่มีผิวหน้าการวัดที่ไม่เรียบเมื่อประกบติดกับออปติแฟลตจะเห็นริ้วการแทรกสอดเกิดขึ้นดังภาพที่ 13 ผิวหน้าการวัดที่ไม่เรียบจะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการวัดนั้นเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องทำการกำจัดรอยตำหนินั้นออกไป การกำจัดรอยตำหนินั้นกระทำโดยใช้วิธีการขัดด้วยหินขัด

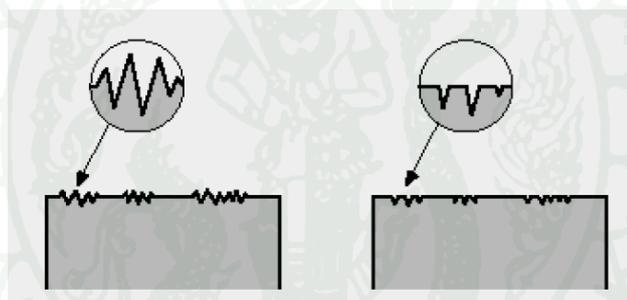


ภาพที่ 13 ผิวหน้าการวัดที่ไม่เรียบ

การขัดผิวหน้าการวัดจะใช้หินขัดตามภาพที่ 14 เป็นหินขัดที่ใช้ในการขัดเกบบล็อก โดยการขัดนั้นจะเป็นการขัดเพื่อกำจัดรอยตำหนิต่างๆ ที่ทำให้ผิวหน้าการวัดไม่เรียบออกให้หมดเพื่อให้การสอบเทียบนั้นมีความเที่ยงตรงมากที่สุดตามภาพที่ 15



ภาพที่ 14 หินขัดสำหรับขัดผิวหน้าการวัดเกบบล็อก



ภาพที่ 15 รอยตำหนิบริเวณผิวหน้าการวัดก่อนและหลังการขัด

หลังจากเตรียมเกบบล็อกเสร็จเรียบร้อยแล้วต้องทิ้งไว้ในห้องปฏิบัติการสอบเทียบอย่างน้อย 2 ชั่วโมงก่อนทำการสอบเทียบเพื่อให้เกบบล็อกมีอุณหภูมิที่เสถียรเหมือนกับอุณหภูมิของสถานะแวดล้อมเดียวกับห้องปฏิบัติการสอบเทียบ เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมินี้มีผลต่อความผิดพลาดในการวัด

2.2 ระบบการสอบเทียบ (Calibration System)

ความสำคัญของระบบการสอบเทียบ ในอุตสาหกรรมการผลิต คือมีการกำหนดคุณภาพของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบคุณภาพสินค้าในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมทุกชนิด ทุกประเทศมีการกำหนดให้ควบคุมการวัด และเครื่องมือทดสอบ (เครื่องตรวจ เครื่องวัด และ

เครื่องทดสอบ) ในระบบคุณภาพต่าง ๆ อย่างเข้มงวด เช่น ISO -9000 QS 9000 โดยทั่วไปแล้วการสอบเทียบได้กำหนดขึ้นเพื่อช่วยระบบในการวัด ซึ่งรวมถึง (อัจฉรา, 2551)

- การยอมรับระบบการวัด รวมถึงความไม่แน่นอนในการวัด (Measurement Uncertainty)

- ช่วงระยะเวลาในการสอบเทียบของระบบหรือเวลาที่ใช้งาน
- แหล่งมาตรฐานที่สามารถอ้างอิงได้ถึงระดับชาติ

2.2.1 ขั้นตอนการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัด (Calibration Procedure)

ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความถูกต้อง และเชื่อถือได้ของผลการสอบเทียบ ประกอบด้วย

- บุคคล
- สถานที่ และสภาวะแวดล้อม
- ขั้นตอนการสอบเทียบ และการตรวจสอบความใช้ได้ของขั้นตอน
- เครื่องมือ
- ความสอบกลับได้ของการวัด
- การปฏิบัติต่อเครื่องมือที่รับมาสอบเทียบ

ผลกระทบจากปัจจัยเหล่านี้ แต่ละปัจจัยกระทบต่อคุณภาพของการสอบเทียบแตกต่างกันไปตามการสอบเทียบแต่ละประเภท (ISO/IEC 17025, 2005) ผู้บริหารห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือวัดต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวในการจัดระบบบริหารห้องปฏิบัติการสอบเทียบ

ขั้นตอนการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดเป็นเอกสารที่ระบุขั้นตอนการหาความ สัมพันธ์ระหว่างค่าชี้บอก (Indication) ของเครื่องมือวัด อุปกรณ์มาตรฐานการวัด ระบบวัด เครื่องมือวัดที่เป็นวัสดุกับค่าสมนัย (Corresponding Value) ที่ทำให้เป็นจริงตามมาตรฐานกำหนดเพื่อรายงาน ตัดสิน รายงานค่าแก้ หรือปรับแต่งให้มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งการสอบเทียบจะทำภายในภาวะเฉพาะ ผลการสอบเทียบทำให้รู้คุณลักษณะทางมาตรวิทยาอื่นๆของเครื่องมือวัด โครงสร้างเอกสารแสดงขั้นตอนการสอบเทียบประกอบไปด้วย

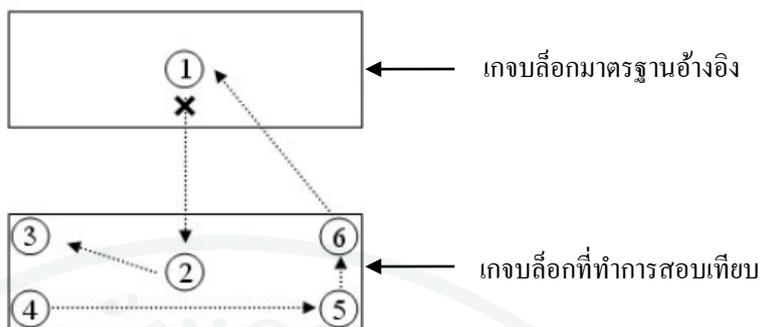
- กำหนดนำในการสอบเทียบ เช่น ระบุค่า ช่วง เครื่องมือวัด รายการที่จะสอบเทียบ
- ระบุรายการอุปกรณ์ประกอบ อุปกรณ์มาตรฐานอ้างอิง
- ระบุการเตรียมการขึ้นต้นก่อนการสอบเทียบ เช่น การอุ่นเครื่อง การปรับแต่งเครื่องมือมาตรฐาน และเครื่องมือลูกค้ำก่อนสอบเทียบ สภาวะแวดล้อมในการสอบเทียบ
- ขั้นตอนการปฏิบัติการสอบเทียบขั้นต่อขั้น ตามลำดับ
- ขั้นตอนการอ่านค่า และบันทึกผล การคำนวณการประเมินผลการสอบเทียบ รวมถึงใบแนบในการบันทึกผลการสอบเทียบ และ
- ขั้นตอนการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดตามขั้นตอนการสอบเทียบที่ปฏิบัติ

2.3 การสอบเทียบเกจบล็อกตามมาตรฐาน EA-4/02 นั้นมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี

2.3.1 การสอบเทียบแบบเปรียบเทียบ

เป็นการวัดเปรียบเทียบเกจบล็อกด้วยเครื่องมือวัดเปรียบเทียบโดยเปรียบเทียบเกจบล็อกที่มีมาตรฐานสูงกว่า หรือเกจบล็อกมาตรฐานอ้างอิงเช่น เกจบล็อกระดับ 0 กับเกจบล็อกที่มีความถูกต้องต่ำกว่าเช่นเกจบล็อกระดับ 1 และเกจบล็อกระดับ 2 เพื่อสอบเทียบขนาดมาวัดค่าแล้วบันทึกค่าเอาไว้ แล้วนำค่าทั้งสองครั้งมาเปรียบเทียบค่าของความผิดพลาดว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้หรือไม่อย่างไร จากนั้นก็ออกเอกสารรับรองการสอบเทียบขนาด (เขาวัดถัก, 2546)

ในการวัดค่าเพื่อให้ได้ค่าของเกจบล็อก จะวัดโดยกำหนดจุดวัดต่อพื้นที่ของการวัดออกเป็น 5 จุด แล้วเปรียบเทียบค่าที่วัดทั้งสองขึ้นงานว่ามีความผิดพลาดเท่าไร ยอมรับได้หรือไม่ โดยค่าความผิดพลาดพิจารณาได้จากตารางมาตรฐานที่แสดงเอาไว้



ภาพที่ 16 จุดที่ทำการสอบเทียบแบบเปรียบเทียบ

ตารางที่ 7 ตำแหน่งต่าง ๆ ในการสอบเทียบเกจบล็อกแบบเปรียบเทียบ

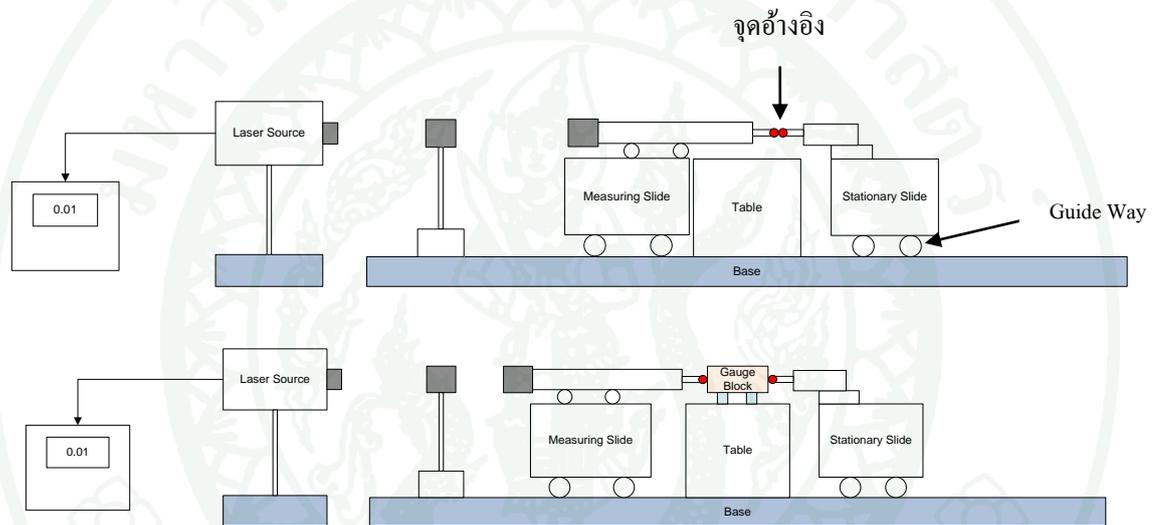
จุดสอบเทียบ	ตำแหน่งในการสอบเทียบ
จุดที่ 1	กึ่งกลางของเกจบล็อกอ้างอิง
จุดที่ 2	กึ่งกลางของเกจบล็อกทดสอบ
จุดที่ 3	มุมบน-ซ้าย ของเกจบล็อกทดสอบ
จุดที่ 4	มุมล่าง-ซ้าย ของเกจบล็อกทดสอบ
จุดที่ 5	มุมล่าง-ขวา ของเกจบล็อกทดสอบ
จุดที่ 6	มุมบน-ขวา ของเกจบล็อกทดสอบ

ตารางที่ 8 ความผิดพลาดด้านขนาดของเกจบล็อกตามมาตรฐาน

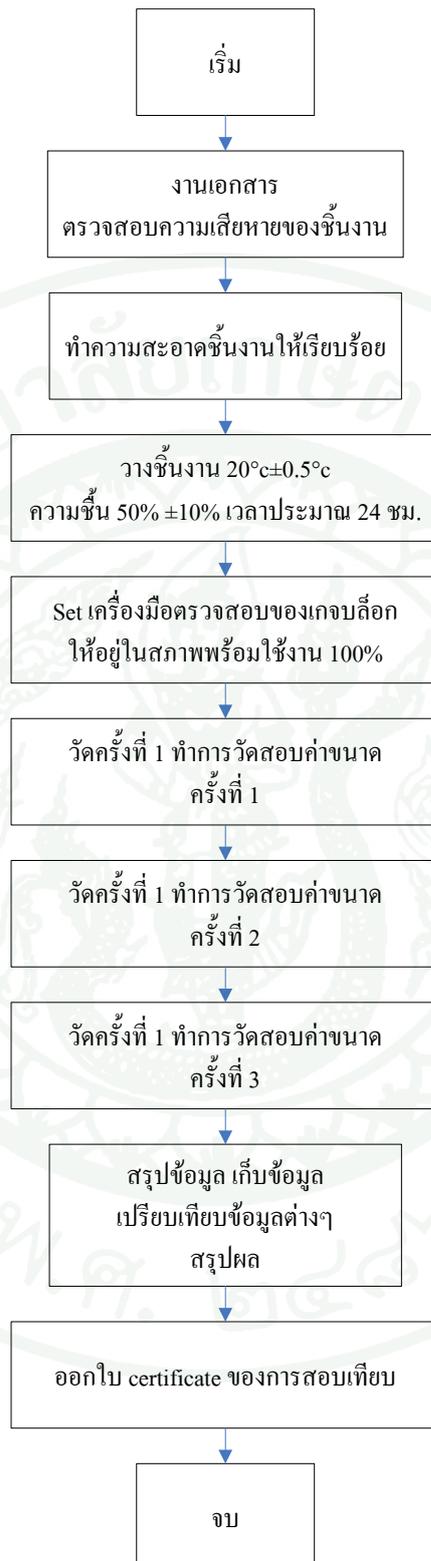
Size over	มาตรฐาน ISO 3650				
	Up to	Grade K	Grade 0	Grade 1	Grade 2
-	10 mm	±0.06	±0.12	±0.20	±0.45
10 mm	25 mm	±0.07	±0.14	±0.30	±0.60
25 mm	50 mm	±0.10	±0.20	±0.40	±0.80
50 mm	75 mm	±0.12	±0.25	±0.50	±1.00
75 mm	100 mm	±0.14	±0.30	±0.60	±1.20

2.3.2 การสอบเทียบแบบโดยตรง

การสอบเทียบแบบโดยตรงนี้เป็นการวัดโดยใช้หัววัดเป็นมาตรฐานเปรียบเทียบกับเกจ บล็อกที่ต้องการสอบเทียบ ซึ่งตำแหน่งการวัดของวิธีการวัดแบบ โดยตรงนี้เป็นตำแหน่งเดียวกับวิธีการวัดแบบเปรียบเทียบ แตกต่างกันตรงที่ การวัดด้วยวิธีการวัด โดยตรงนี้ใช้หัววัดทั้งสองหัวเป็นจุดอ้างอิง ทำการวัดโดยเลื่อนหัววัดทั้งสองมาที่ตำแหน่งจุดอ้างอิงดังภาพที่ 17 ทำการปรับค่าที่วัดได้ให้เท่ากับ 0 จากนั้นทำการบันทึกค่าเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง จากนั้นทำการวัดเกจบล็อกที่ต้องการสอบเทียบ โดยในการทดลองนี้จะทำการสอบเทียบที่ตำแหน่งกึ่งกลางคือตำแหน่งที่ 2



ภาพที่ 17 ตำแหน่งจุดอ้างอิงสำหรับการวัดเกจบล็อก



ภาพที่ 18 ขั้นตอนการวัดขนาดหรือการสอบเทียบขนาด

3. เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

งานวิจัยนี้ได้นำเอาระบบการวัดทางแสงเข้ามาประยุกต์ใช้ในการทำการตรวจสอบ โดยใช้แสงเลเซอร์ในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีคุณสมบัติเด่นกว่าแสงทั่วไปคือ เป็นแสงโคฮีเรนต์และให้แสงสีเดียว โดยจะนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน ซึ่งเป็นระบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบที่เหมาะสมสำหรับงานด้านการตรวจวัดความยาวอย่างละเอียด โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นและวัดค่าความแตกต่างของเส้นทางเดินแสงที่สัมพันธ์กับจำนวนริ้วจากสัญญาณการแทรกสอด (ในที่นี้จะใช้คำว่า “ฟริ้ง (Fringe)” แทนคำว่า “ริ้ว”) โดยวัดจากค่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าและแสดงผลออกมาด้วยเครื่องนับจำนวนฟริ้ง แต่ก่อนที่จะทำการศึกษาระบบที่ใช้งานระบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์จำเป็นจะต้องศึกษาหลักการการแทรกสอดของแสงเสียก่อนเนื่องจากเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจถึงระบบการทำงานของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

3.1 หลักการของอินเตอร์เฟียโรเมทรี (Interferometry) (Hariharab, 1992)

3.1.1 หลักการสำคัญในการวัด

อินเตอร์เฟียโรเมทรี คือวิธีการวัดระยะทางที่มีความแน่นอนถึง 1 ppm หรือดีกว่า เทคนิคที่นำมาใช้ในการวัดด้วยวิธีนี้ คือความถูกต้องของลักษณะการเคลื่อนที่ของแสงหรือความยาวคลื่น คือระยะทางจากยอดคลื่นหนึ่งถึงยอดคลื่นถัดไป โดยที่ความยาวคลื่นของแสงนั้นจะแปรผันโดยมีขอบเขตอยู่ระหว่าง 0.450 μm สำหรับแสงสีฟ้า ถึง 0.700 μm สำหรับแสงสีแดง

สำหรับเลเซอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ คือเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ยี่ห้อ เรนิชอว์ รูน เอ็มแอลสิบ (Renishaw ML10) สำหรับเลเซอร์ชนิดนี้เป็นเลเซอร์แบบ ฮีเลียม-นีออน (Helium-Neon, HeNe) โดยการวัดนั้นใช้หลักการที่ว่าความยาวคลื่นที่ระบุของแสงเลเซอร์นั้นมีความยาว 0.633 μm และสิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์นั้นมีความเสถียรในสุญญากาศ โดยมีความแน่นอนอยู่ที่ 0.1 ppm หรือดีกว่า

3.2 ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสง (Interference of Light)

ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสง เป็นคุณสมบัติหนึ่งของแสง เกิดขึ้นเมื่อคลื่นสองขบวนหรือมากกว่าคลื่นที่มาพบกันแล้วซ้อนกันที่ตำแหน่งนั้นๆ ซึ่งเป็นไปตามหลักการรวมกันได้ของคลื่น (Superposition) โดยหลักการของอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นี้จะอาศัยหลักการการแทรกสอดของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงโคฮีเรนต์เดียวกัน (โคฮีเรนต์ หมายความว่าคลื่นเหล่านี้จะมีความถี่เท่ากันและมีความต่างเฟสคงที่ตลอดเวลา) การแบ่งประเภทของการแทรกสอดนั้น จะแบ่งตามลักษณะของการแยกแสงซึ่งมี 2 วิธี คือ

3.2.1 การแทรกสอดแบบแบ่งหน้าคลื่น

วิธีนี้หน้าคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดหนึ่ง จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยใช้กระจกเงา ปริซึมหรือเลนส์ช่วย แล้วหน้าคลื่นนั้นจะมารวมกันอีกรอบหลังจากผ่านระยะทางต่างๆ กัน วิธีการนี้ใช้ได้ดีสำหรับแหล่งกำเนิดขนาดเล็ก หรือแหล่งกำเนิดที่เป็นจุด ตัวอย่างการทดลองที่ใช้วิธีการนี้ เช่น Fresnel's double mirror, Lloyd's mirror และการทดลองของยัง เป็นต้น เครื่องมือที่สร้างโดยอาศัยหลักการการแบ่งหน้าคลื่นนี้จะเรียกว่า "Wavefront-splitting Interferometers"

3.2.2 การแทรกสอดแบบการแบ่งแอมพลิจูด

เป็นการแทรกสอดอันเกิดจากคลื่นแสงตกกระทบบนกระจกที่ฉาบเงินบางส่วน (Half-Silvered Mirror) คลื่นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่านไป อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนที่ผิว โดยทั้งคลื่นที่ส่งผ่านและคลื่นที่สะท้อนจะมีแอมพลิจูดต่ำกว่าเดิม ถ้าคลื่น 2 ส่วนนี้เป็นโคฮีเรนต์และกลับมารวมกันที่จุดสังเกต จะสามารถเห็นรู้อยการแทรกสอดได้ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแบ่งแอมพลิจูดมีหลายแบบด้วยกัน แต่แบบที่รู้จักกันมากที่สุดคือ ไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

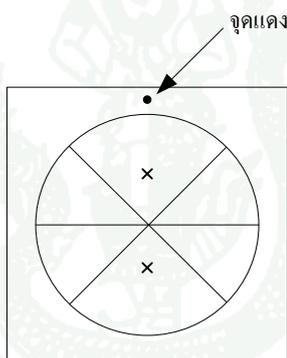
3.3 ไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการการแทรกสอดของคลื่นแสงสองขบวนเกิดเป็นฟริ้ง แต่ถ้าแสงทั้งสองขบวนต้องเป็นแสงโคฮีเรนต์และกำเนิดจากแหล่งกำเนิดเดียวกันถึงจะสามารถสังเกตเห็นฟริ้งที่เกิดขึ้นได้ การอาศัยหลักการทางแสงของ

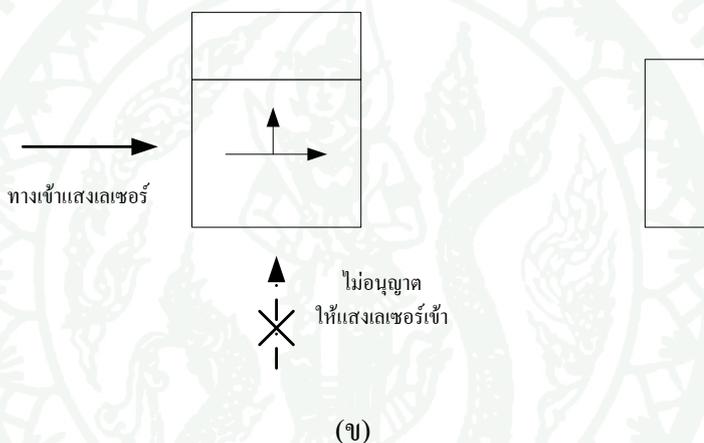
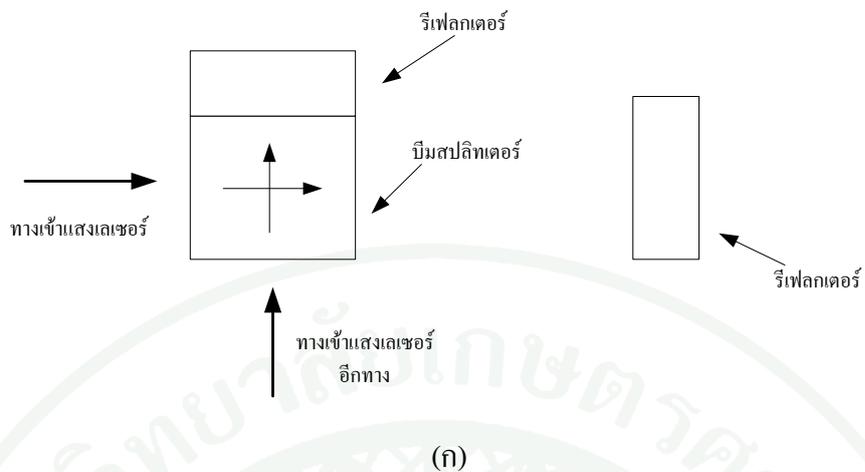
อินเตอร์เฟียโร-มิเตอร์ทำให้สามารถวัดระยะทางในเทอมของความยาวคลื่นได้ โดยการนับFRINGE ของคลื่นแสงสองขบวนที่แทรกสอดกัน

3.3.1 หลักการวัดความยาว (Length Measurement)

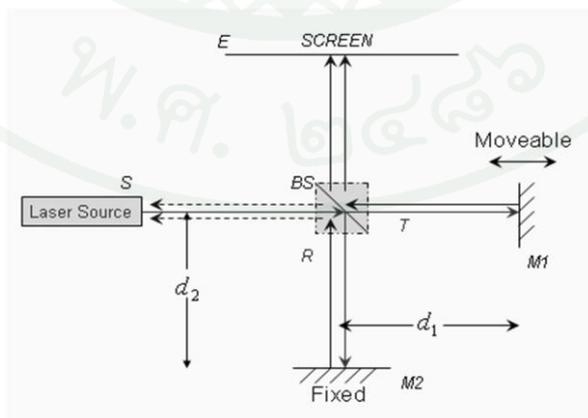
ในการวัดความยาวด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์นั้นจะประกอบด้วยชุดของกระจกที่ใช้คั้งนี้ บีมสปลิตเตอร์(Beam Splitter) 1 ตัว และลิเนียร์เฟลกเตอร์ (Linear Reflector) 2 ตัว โดยจะมีรีเฟลกเตอร์ 1 ตัวไว้สำหรับกำหนดระยะทางจาก บีมสปลิตเตอร์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดวิถีอ้างอิง (อันที่จริงแล้วรีเฟลกเตอร์กับบีมสปลิตเตอร์นั้นถูกทำให้ติดกันด้วยสกรู) ส่วนรีเฟลกเตอร์อีกตัวหนึ่งนั้นจะอยู่ติดกับหัววัดเคลื่อนที่ซึ่งจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและจะเป็นตัววัดระยะจากการเคลื่อนที่ (สุรพล, 2544)



ภาพที่ 19 ตำแหน่งที่ถูกต้องของรีเฟลกเตอร์



ภาพที่ 20 ตำแหน่งการวางของบีมสปลิตเตอร์ที่ถูกต้อง



ภาพที่ 21 ระบบการทำงานของไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

3.3.2 หลักการพื้นฐานของไมเคลสันอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

จากภาพที่ 21 แหล่งกำเนิดแสง โคฮีเรนต์เดียวกันลำแสงจะถูกแยกออกเป็นแสง 2 ขบวน ด้วย BS ที่วางขวาง 45 องศา กับลำแสง ลำแสงส่วนหนึ่งจะสะท้อน (Reflected-R) และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่าน (Transmitted-T) BS ไป ลำแสงที่ถูกส่งผ่านจะเดินทางไปตามท่กระบอกกระจก M1 และสะท้อนกลับมายัง BS แล้วแสงส่วนหนึ่งจะหักเหเป็นมุม 90 องศาไปตกกระทบบนฉาก E แสงอีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปยังแหล่งกำเนิดแสง ส่วนลำแสงจากแหล่งกำเนิดที่สะท้อนจาก BS จะเดินทางไปตามท่กระบอกกระจก M2 และสะท้อนกลับมาอีกครั้ง แสงที่สะท้อนจากกระจก M2 ส่วนหนึ่งจะส่งผ่าน BS ไปตกกระทบฉากที่จุด E แสงอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนไปยังแหล่งกำเนิดแสง แสงทั้งสองขบวนที่ไปตกกระทบฉากที่จุด E จะเกิดการแทรกสอดกันเป็นพริ้วขึ้นที่ฉาก ซึ่งพริ้วที่เกิดขึ้นนี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของกระจก M1 ดังนั้นผลที่ได้จึงสามารถนำไปวิเคราะห์หาตำแหน่งของกระจก M1 ได้

4. การประเมินระบบการวัด

การตรวจวัดที่มีค่าความละเอียดสูงๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับผลกระทบต่างๆ ที่จะก่อให้เกิดความผิดพลาดต่อผลลัพธ์หรือข้อมูลที่ทำกรวัด เนื่องจากในกระบวนการตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ เกิดขึ้นระหว่างการวัดได้ตลอดเวลา และการวัดนั้นต้องได้รับการยอมรับซึ่งถือเป็นข้อกำหนดของมาตรฐานการประกันคุณภาพ

4.1 ความสามารถสอบกลับได้ (Traceability System)

นิยาม ผลการวัดจะไม่มี ความหมายถ้าไม่สามารถโยง หรืออ้างอิงสู่มาตรฐานแห่งชาติ คุณสมบัติดังกล่าวของผลการวัด เรียกว่า ความสามารถสอบกลับได้ คำว่าความสามารถสอบกลับได้ ได้รับคำนิยามไว้ว่า “สมบัติของผลการวัดที่สามารถโยงไปกับมาตรฐานแห่งชาติที่เป็นที่ยอมรับ โดยการเปรียบเทียบกันอย่างไม่ขาดช่วงเป็นลูกโซ่ และจะต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัดด้วย” ดังนั้น ความสามารถสอบกลับได้จึงเป็นการส่งต่อหน่วยวัดตามนิยาม SI จากจุดเริ่มต้นจนถึงผู้ใช้งาน ความสามารถสอบกลับได้ของผลการวัด จึงต้องได้นับการถ่ายทอดผ่านห้องปฏิบัติการสอบเทียบหลายระดับจนกว่าจะถึงผู้ใช้งาน

4.2 ความคลาดเคลื่อนในระบบการวัด

เพื่อหาหนทางในการลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระบบการวัดจึงมีความพยายามในการจำแนกความคลาดเคลื่อนในการวัดออกเป็นหมวดหมู่ โดยทั่วไปจะถูกจำแนกออกเป็นประเภทใหญ่ๆ 2 ประเภท คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) และความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error)

4.2.1 ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ

เกิดจากคุณสมบัติด้านความแม่นยำของระบบการวัด สาเหตุอาจเกิดจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การสั่นสะเทือน ความดัน สัญญาณรบกวนที่ปนมากับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องมือวัด หรืออาจเกิดจากคุณสมบัติอันบกพร่องอื่นๆ ของตัวเครื่องมือวัดเอง เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนนี้จะคงอยู่ไม่เปลี่ยนแปลงไปถึงแม้จะทำการวัดซ้ำๆ กันหลายๆ รอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันก็ตาม โดยมีลักษณะการเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ที่ปริมาณคงเดิม (ในการวัดค่าเดียวกัน) และถึงแม้จะทราบแหล่งที่ก่อให้เกิดอยู่บ้าง แต่การหาปริมาณที่แน่นอนจากแต่ละแหล่งเป็นเรื่องที่ยากมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนชนิดนี้ออกไปได้

โดยทั่วไปความคลาดเคลื่อนเชิงระบบนี้ได้รับการกำหนดค่าโดยผู้ผลิตอุปกรณ์เครื่องมือวัด หรืออาจจะได้จากใบสอบเทียบ ใบรับรองค่าความคลาดเคลื่อน (Certificate) จากการสอบเทียบเครื่องมือด้วยมาตรฐานที่สูงกว่า

4.2.2 ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม

เกิดจากคุณสมบัติด้านความเที่ยงตรง (Precision) ของระบบการวัด อันเนื่องมาจากความผันแปรแบบสุ่มของการสังเกตหรือการตรวจวัดทุกครั้งที่ทำการวัดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยลักษณะการเกิดขึ้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ ทั้งยังไม่มีรูปแบบที่แน่นอนอีกด้วย และในบางครั้งก็อาจจะมีผลพลาระบบซึ่งมีรูปแบบการเกิดเป็นช่วงเวลารวมอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น ความผิดพลาดเนื่องจากวิธีการวัด การเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมบางขณะซึ่งส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการวัด ฯลฯ

4.3 สาเหตุของความคลาดเคลื่อน

สำหรับสาเหตุอันก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนนั้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

4.3.1 ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากกระบวนการวัด เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการวัด

4.3.2 ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อม เป็นอีกปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด ความรุนแรงของผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมขณะทำการวัดจะขึ้นอยู่กับว่าความเปลี่ยนแปลงนั้นๆ ส่งผลกับค่าที่ได้จากการวัดเพียงใด เช่น แสงสว่างมีผลกับเครื่องวัดแสงแต่ไม่มีผลกับอุปกรณ์วัดแรง หรือที่ความสั่นสะเทือนค่าหนึ่ง อาจมีผลต่ออุปกรณ์จับยึดเพียงเล็กน้อย แต่มีผลต่อเครื่องมือวัดทางแสงอย่างมาก เป็นต้น สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อค่าที่วัดตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศ ความสั่นสะเทือน และสนามไฟฟ้า เป็นต้น

4.3.3 ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากเครื่องมือ เป็นความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดมาจากตัวเครื่องมือเองหรือการใช้งานเครื่องมือที่ไม่ถูกวิธี เช่น ความผิดพลาดในการวางติดตั้งเครื่องมือ การสอบเทียบ การปรับแต่งหรืออาจเกิดจากความเสื่อมสภาพของเครื่องมือวัดเอง เป็นต้น

4.3.4 ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการอ่านค่า เช่น การแบ่งสเกลผิด หรือสเกลไม่ชัดเจนทำให้อ่านค่าผิดพลาด เป็นต้น

4.4 ความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty of Measurement)

ความไม่แน่นอนในการวัดคือ ขอบเขตของความคลาดเคลื่อนภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการวัดที่ได้กำหนดไว้ ความไม่แน่นอนในการวัดนี้จะบอกถึงลักษณะการแจกแจงของค่าที่ได้จากการวัดซ้ำๆ กัน ดังนั้นความไม่แน่นอนไม่ใช่ความผิดพลาดเป็นเพียงการประมาณขอบเขตของความผิดพลาดเท่านั้น และความไม่แน่นอนในการวัดนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลการวัดว่าดีมาน้อยเพียงใด สำหรับแนวทางการประเมินความไม่แน่นอนในการวัด ในที่นี้จะใช้แนวทางตาม ISO “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” (GUM) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไป ประโยชน์ต่างๆของค่าความไม่แน่นอนสามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนจะเป็นปริมาณที่บ่งชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของการวัดนั้นๆ
- สามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์หนึ่งในการเปรียบเทียบผลของการวัดระหว่าง

ห้องปฏิบัติการ

- ทำให้ลูกค้านำไปใช้ในการตัดสินใจจากการแปรข้อมูล ซึ่งจะได้ข้อมูลที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น โดยค่าที่รายงานจะรวมถึงความไม่แน่นอนจากการวัดทั้งระบบ
- สามารถนำมาเป็นแฟคเตอร์ที่ใช้พิจารณา วิธีวิเคราะห์ วิธีการวัดค่าควรต้องปรับปรุงแก้ไขหรือไม่วิธีการวัดที่กำหนดไว้มีค่าความไม่แน่นอนสูงเพียงใด และอาจจะทำการลดค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวลงโดยการปรับปรุงวิธีวัดใหม่ได้

4.4.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอน

ขั้นตอนการประเมินค่าความไม่แน่นอนมีขั้นตอนหลักๆ 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ระบุให้ชัดเจนว่าต้องการวัดอะไร เช่น ต้องการหาค่าความเข้มข้นของสาร หรือการหาความชื้นของสารสกัดสมุนไพร

ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาแหล่งที่มาหรือขั้นตอนที่ทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอนขึ้นมาให้ละเอียดครบถ้วนทุกปัจจัย เช่น เครื่องมือวัด วิธีการสุ่มตัวอย่าง นักวิเคราะห์ หรือสิ่งแวดล้อมที่อาจส่งผลกระทบต่อการวัดหรือการวิเคราะห์นั้นได้ ในขั้นตอนนี้ต้องพยายามเรียงปัจจัยต่างๆ ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในการหาแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนนั้น ต้องอาศัยความรู้ที่จะประเมินหาพารามิเตอร์ต่างๆ อย่างเหมาะสมอาจต้องมีการรวบรวมความคิดจากนักวิเคราะห์หลายๆ คนเพื่อที่จะได้ปัจจัยที่สมบูรณ์ที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหรือประมาณค่าของความไม่แน่นอนของแต่ละปัจจัยที่เรียงไว้ในขั้นตอนที่ 2 ในขั้นนี้จะพบว่าปัจจัยบางปัจจัยมีผลกระทบต่อการวัดค่อนข้างมาก ค่าที่ออกมาเป็นตัวเลขจะมีค่าสูง ส่วนบางปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบน้อยมาก ดังนั้นจึงทำการตัดปัจจัยที่มีผลกระทบน้อยออกจากการคำนวณได้

ขั้นตอนที่ 4 หลังจากการทราบค่าความไม่แน่นอนแต่ละค่าแล้ว ในขั้นตอนนี้จะต้องทำการรวมปัจจัยดังกล่าวเข้าด้วยกันให้เป็นค่าเดียว โดยขั้นตอนการหาจะได้กล่าวต่อไป

ความไม่แน่นอนในการวัด แบ่งได้เป็น Type A หมายถึง ความไม่แน่นอนใน รูปแบบที่สามารถประเมินได้ด้วยวิธีการทางสถิติ และ Type B หมายถึง ความไม่แน่นอนทั้งหลายที่สามารถประเมินได้ด้วยวิธีการอื่นๆ

ก. การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A, U_A

เป็นการประเมินค่าที่ได้จากการวัดซ้ำหรือการเก็บตัวอย่างแบบสุ่มจากการวัด แล้วนำไปทำการวิเคราะห์ทางสถิติ (ประไพศรี และพงศชนัน, 2549)

เมื่อมีปริมาณอินพุต x_i ที่ได้จากการสังเกต n ครั้ง ภายใต้เงื่อนไขการวัดที่สภาวะ เดียวกัน ข้อมูลจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

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

เมื่อ x_i คือ ผลการวัดครั้งที่ i โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$
 \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยจากผลการวัด n ครั้ง

ส่วนเบี่ยงเบน (s) หมายถึง ค่าที่แตกต่างกันระหว่างผลการวัดครั้งใดๆ กับค่ากลางของ ชุดการวัดนั้น มีค่าเท่ากับ

$$s = (x_i - \bar{x}) \quad (2)$$

ดังนั้นผลรวมกำลังสองของส่วนเบี่ยงเบน จะมีค่าเท่ากับ

$$s = (x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

จะได้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

ประมาณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยจากผลการวัด จาก

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

จะได้รูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A

$$U_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

ข. การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B, U_B

เป็นการประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐานด้วยวิธีการอื่นที่ไม่ใช่การวิเคราะห์ทางสถิติ โดยทั่วไปมักเป็นความไม่แน่นอนที่ทราบจาก

- ลักษณะการแจกแจงของข้อมูลในการสังเกตครั้งก่อนๆ
- ข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิต
- พฤติกรรมคุณสมบัติของวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้
- ข้อมูลใบรับรองการสอบเทียบ
- หรืออาจได้จากข้อมูลในเอกสารอ้างอิงหรือคู่มือ เป็นต้น

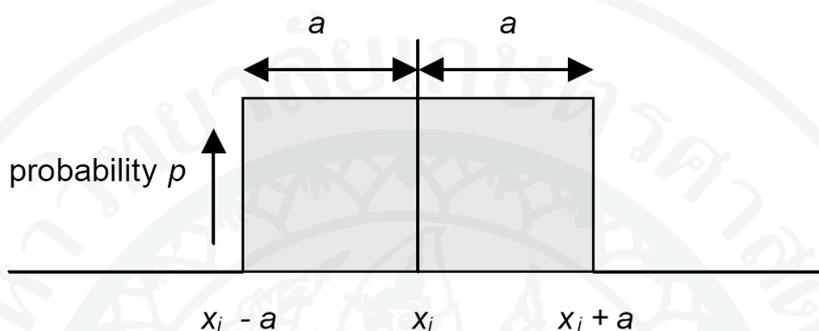
เมื่อทราบลักษณะการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution) ของข้อมูลในการวัด ไม่ว่าจะมาจากทฤษฎีหรือข้อมูลครั้งก่อนๆ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B จะสามารถคำนวณหาได้จากความแปรปรวนของการแจกแจงดังกล่าว

โดยทั่วไปรูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B จะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังภาพที่ 22 กล่าวคือมีค่าเฉลี่ยอยู่ตรงกลางระหว่างค่าบวกลบค่าหนึ่ง

ค่าเฉลี่ยดังกล่าวนี้สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\bar{x} = \frac{1}{2}(a^+ + a^-) \quad (7)$$

เมื่อ a^+ หมายถึงขอบเขตบน (Upper Limit) ของข้อมูล
 a^- หมายถึงขอบเขตล่าง (Lower Limit) ของข้อมูล



ภาพที่ 22 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ที่มา: M3003 Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement (2007)

และสามารถคำนวณหาค่าความแปรปรวนของการแจกแจงได้จาก

$$\sigma^2 = \frac{1}{12}(a^+ + a^-)^2 \quad (8)$$

ความแปรปรวนนี้จะมีค่าเท่ากับกำลังสองของความไม่แน่นอนในการวัดประเภท

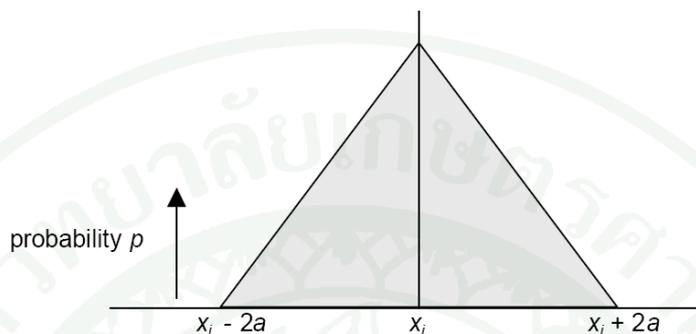
Type B

$$\sigma^2 = U(x_i)^2 \quad (9)$$

จะได้รูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B จากการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$U(x_i) = \frac{1}{\sqrt{3}} a \quad (10)$$

ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ยังมีการแจกแจงอีกหลายแบบที่ผู้ผลิตอุปกรณ์ได้มี การกำหนดการแจกแจง เช่นการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม การแจกแจงแบบยู และการแจกแจงแบบ ปกติ เป็นต้น

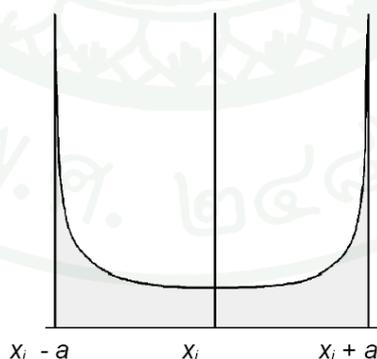


ภาพที่ 23 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม

ที่มา: M3003 Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement (2007)

จะได้รูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B จากการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม

$$U(x_i) = \frac{1}{\sqrt{6}} a \quad (11)$$



ภาพที่ 24 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบยู

ที่มา: M3003 Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement (2007)

จะได้รูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B จากการแจกแจงแบบยู

$$U(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} a \quad (12)$$

4.4.2 การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

ความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ได้จากการประเมิน Type A และ Type B สามารถนำมาคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมได้ โดยใช้ตัวย่อเป็น $U_c(y)$ จาก

$$U_c^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 U^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} U(x_i, x_j) \quad (13)$$

อนุพันธ์ย่อยของ f เทียบกับ x_i $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity Coefficient) ส่วน $U(x_i)$ คือค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของปริมาณอินพุต x_i แต่ละตัว ซึ่งอาจเป็นความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A หรือ Type B ก็ได้ และ $U(x_i, x_j)$ คือค่าประมาณของความแปรปรวนร่วม (Estimated Covariance) ระหว่าง x_i กับ x_j

ในกรณีที่ปริมาณอินพุตแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน จะสามารถลดรูปสมการที่ (13) ได้ โดยเทอมที่สองจะหายไป ดังนั้นความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม U_c จะอยู่ในรูป

$$U_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 U^2(x_i) \quad (14)$$

ถ้ากำหนดให้สัมประสิทธิ์ความไว $(\partial f / \partial x_i) = c_i$ และถ้ากำหนดให้ $U_i(y) = |c_i| U(x_i)$ จะได้

$$U_c(y) = \sqrt{U_i^2(y)} \quad (15)$$

ทำให้สามารถหาความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมได้จาก

$$U_c(y) = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (16)$$

เมื่อ U_A คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A และ
 U_B คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B

4.4.3 ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty, U)

ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมที่คำนวณได้จากสมการที่ (16) เป็นค่าความไม่แน่นอนที่อยู่ในช่วงระดับความเชื่อมั่น 68.27% แต่ตามมาตรฐานทั่วไปมักกำหนดให้ใช้ช่วงความเชื่อมั่น 95% ถึง 99.7% ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการขยายความไม่แน่นอนให้อยู่ในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด สำหรับความไม่แน่นอนขยาย สามารถหาได้จากสมการ

$$U = k \times U_C(y) \quad (17)$$

เมื่อ k เป็นค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage Factor) หาได้จากขั้นตอนต่อไปนี

1. ทำการประเมินค่าองศาอิสระประสิทธิผล V_{eff} ของ $U_C(y)$ จาก

$$V_{eff} = \frac{U_C^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{U_i^4(y)}{v_i}} \quad (18)$$

ค่าของ V_{eff} นั้นจะมีค่าเข้าสู่ค่าอนันต์ (∞) เมื่อ

- ทำการวัดมากกว่า 3 ครั้ง หรือ
- ทำการวัดมากกว่า 2 ครั้งและ U_A น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของ $U_C(y)$

2. หาค่าตัวประกอบ $t_p(V_{eff})$ ที่ระดับความเชื่อมั่น p ในตารางสถิติ t (ถ้าองศาอิสระไม่ใช่จำนวนเต็มหรือไม่มีในตาราง ให้ปัดค่าสู่จำนวนองศาอิสระที่ต่ำกว่า)

3. นำค่า k ที่ได้จากสมการ $k = t_p(V_{eff})$ ไปคำนวณหา $U = k \times U_C(y)$

สำหรับค่าของ k จะขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ โดยทั่วไปค่าของ k จะอยู่ที่ 2 ถึง 3 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ถึง 99.7% ตามลำดับ

5. การเปรียบเทียบผลการวัด

เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลการวัดที่ได้จากการทดลองหรือห้องปฏิบัติการมีความถูกต้อง จะต้องนำผลการวัดดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่เครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพ และมาตรฐานสูงกว่าเป็นที่ยอมรับและได้รับความเชื่อถือ จึงจะสามารถยืนยันได้ว่าผลการวัดจากการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำหรือไม่

วิธีการเปรียบเทียบผลการวัดมีหลายวิธีวิธีง่ายที่สุด คือการพิจารณาผลต่างของค่าเฉลี่ยของผลการวัดทั้ง 2 ถ้ามีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับผลรวมของความคลาดเคลื่อน (ส่วนเบี่ยงเบน) แสดงว่าผลการวัดทั้งสองนั้น "เท่ากัน" โดยถ้าผลการวัดทั้งสองค่าคือ $X_1 \pm U_1$ และ $X_2 \pm U_2$ จะได้ว่าถ้า $|X_1 - X_2| \leq (U_1 + U_2)$ แสดงว่าผลการวัดทั้งสองมีค่าเท่ากัน อีกวิธีหนึ่ง คือพิจารณาว่าถ้าผลต่างของค่าเฉลี่ยทั้งสองมีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนรวม $|X_1 - X_2| < \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ ผลการวัดทั้งสองจะเท่ากัน แนวคิดดังกล่าวถูกพัฒนามาเป็นสมการของ E_n Ratio หรือ E_n Number

$$E_n = \frac{Lab - Ref}{\sqrt{U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2}} \quad (19)$$

เมื่อ	Lab	หมายถึง ค่าเฉลี่ยผลการวัดที่ได้จากการทดลอง
	Ref	หมายถึง ค่าเฉลี่ยผลการวัดจากห้องทดลองมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบ
	U_{Lab}	หมายถึง ความคลาดเคลื่อนในการวัดของผลที่ได้จากการทดลอง
	U_{Ref}	หมายถึง ความคลาดเคลื่อนในการวัดของผลที่ได้จากเครื่องมือวัดของห้องทดลองมาตรฐาน

ผลการวัดทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบกัน จะถูกยอมรับว่าไม่มีความแตกต่างกันเมื่อค่า E_n ที่ได้ อยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 หรือ $|E_n| < 1$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ชุดอุปกรณ์เลเซอร์ของ Renishaw รุ่น ML 10 ซึ่งประกอบไปด้วย

1.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (ML 10 Measurement Laser Generate)



ภาพที่ 25 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ของ Renishaw

1.2 อุปกรณ์ชดเชยความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอันเกิดจากปัจจัยอันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ (EC10 Environmental Compensation Unit)

2. เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรวบรวมและประมวลผลข้อมูล

งานวิจัยฉบับนี้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรวบรวมและประมวลผลข้อมูลจากการวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ โดยจะทำการประมวลผลระยะทางที่เลเซอร์เคลื่อนที่ และประมวลผลชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากปัจจัยสถานะแวดล้อมดังภาพที่ 28



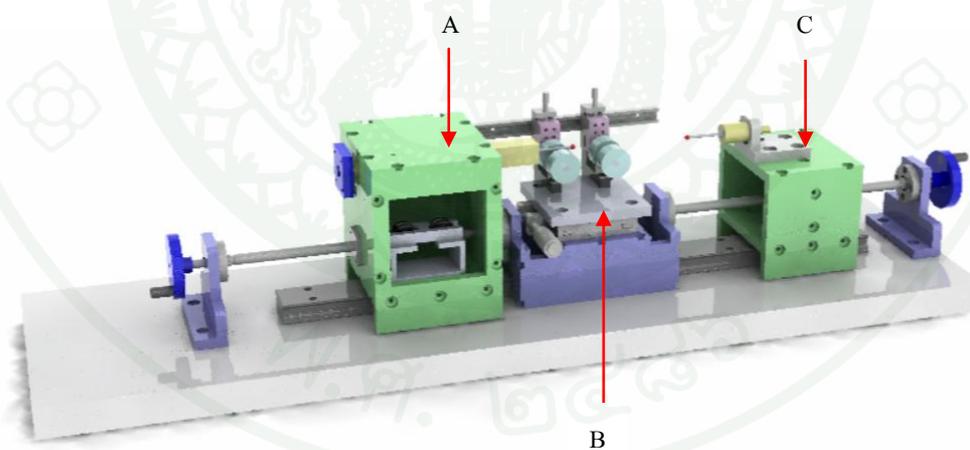
ภาพที่ 28 เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรวบรวมและประมวลผลข้อมูล

3. อุปกรณ์สำหรับการประยุกต์ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการสอบเทียบเกจบล็อกด้วยการประยุกต์ใช้ระบบไมเคลสันเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ อุปกรณ์ซึ่งประยุกต์ขึ้นตามหลักการของไมเคลสันประกอบด้วย ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ และเกจบล็อกที่ใช้ในการทดสอบนั้น ได้รับการรับรองจากสถาบันสอบเทียบเครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้

3.1 เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นมาจากงานวิจัย

เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ได้พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกแบบสองหัววัดที่มีความสามารถในการวัดโดยตรง (Direct Measurement) โดยมีพิสัยการวัดโดยตรง 100 mm ระบบการวัดสำหรับเครื่องสอบเทียบนี้ ได้มีการออกแบบให้วางเกจบล็อกในแนวอนบนแนวนาง โดยทำการเลื่อนหัววัดเข้ามาหาเกจบล็อกด้วยมือในแนวแกน x เพื่อเป็นการกำหนดแรงที่จะมากระทำกับเกจบล็อกโดยระยะขยับตัวที่เหมาะสมของหัววัดเพื่อให้ได้แรงที่เหมาะสมนั้นได้มาจากการทดลอง การปรับค่าของแรงที่ต้องการได้มาจากการเปลี่ยนน้ำหนักบนแนวนางน้ำหนัก ในขณะที่ทำการวัดต้องมีการบันทึกอุณหภูมิ เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณเพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอุณหภูมิ ทุกครั้งที่มีการวัดเกิดขึ้น การควบคุมการเคลื่อนที่ของตำแหน่งการวัด การบันทึกผลการวัดความยาวของเกจบล็อก การบันทึกผลการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งของเกจบล็อกที่ทำการวัดและอุณหภูมิห้องขณะทำการวัดดังนั้นเครื่องสอบเทียบที่พัฒนาขึ้นนี้ คาดว่าจะสามารถทดสอบเทียบเกจบล็อกระดับ 2 ได้และอาจเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการสอบเทียบเกจบล็อกต่อไป ส่วนประกอบของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกแบบวัดโดยตรง ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยมีส่วนประกอบต่างๆดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 แบบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ทำการพัฒนาขึ้น

A ชุดหัววัดกำหนดแรง

B ชุดแนวนางเกจบล็อก

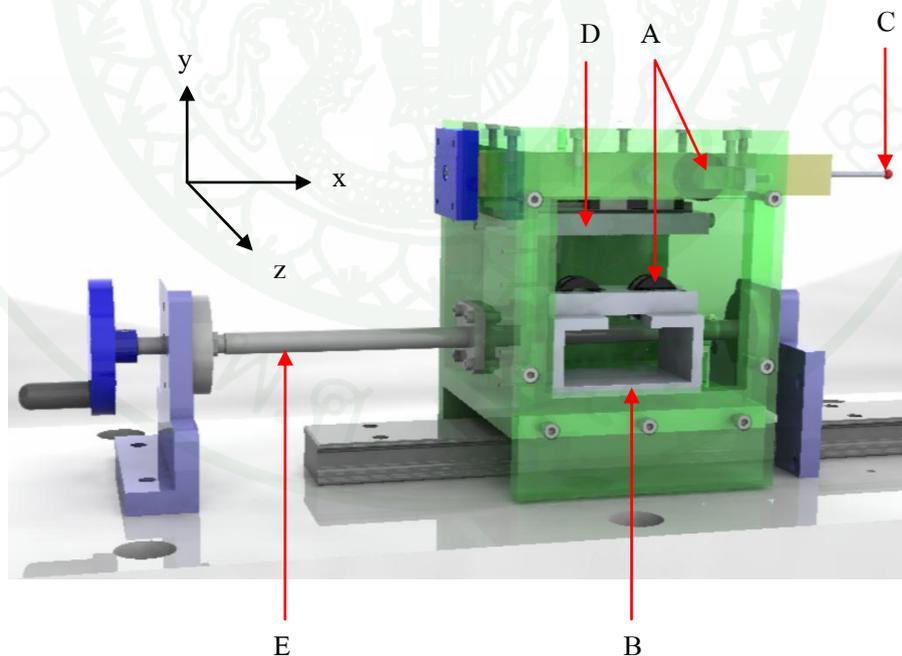
C ชุดหัววัดกำหนดตำแหน่ง



ภาพที่ 30 เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ทำการพัฒนาขึ้น

3.1.1 ชุดหัววัดกำหนดแรง

ชุดหัววัดกำหนดแรงจะเป็นตัวกำหนดแรงที่กระทำกับเกจบล็อก เนื่องจากแรงที่กระทำกับเกจบล็อกนั้นส่งผลต่อความเที่ยงตรงในการวัดเป็นอย่างมากจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดแรงที่เหมาะสม ดังแสดงตามภาพที่ 31



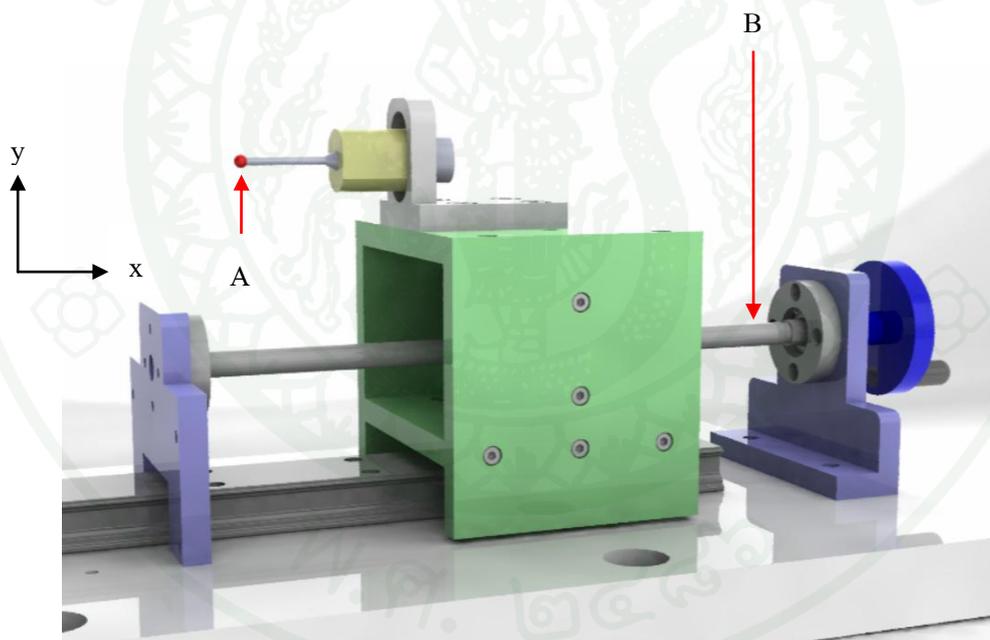
ภาพที่ 31 ชุดหัววัดกำหนดแรง

A : ชุดรอกถ่าน้ำหนัก B : แท่นวางน้ำหนักกำหนดแรงที่หัววัด

C : หัววัดกำหนดแรง D : ชุดเลื่อนหัววัด E : ชุดบอลสกรูเลื่อนชุดหัววัดกำหนดแรง

ชุดหัววัดกำหนดแรงจะมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x โดยเคลื่อนที่อยู่บนรางสไลด์หลัก มีมือหมุนเป็นตัวกำหนดให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดินหน้าหรือถอยหลัง โดยเลือกใช้หลักสกรูเป็นแบบบอลสกรูเพื่อลดปัญหาการเกิดความคลาดเคลื่อนและความไม่สม่ำเสมอของการเคลื่อน โดยการเคลื่อนที่นี้จะเป็นการเคลื่อนที่เพื่อนำหัววัดเข้าไปหาเกจบล็อก ส่วนการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการวัดจะเป็นการเคลื่อนที่ของหัววัดกำหนดแรงโดยชุดเลื่อนหัววัด เมื่อชุดหัววัดกำหนดแรงเคลื่อนที่เข้าไปชนกับเกจบล็อกหัววัดกำหนดแรงจะยุบตัวหัววัดจะส่งแรงกดไปที่เกจบล็อก โดยแรงที่กดนั้นได้มากจากการเปลี่ยนน้ำหนักที่แทนวางน้ำหนักในแนวแกน y มาเป็นแรงกดในแนวแกน x ที่หัววัด โดยจะทำการทดลองการหาค่าของแรงที่การยุบตัวระยะต่างๆ ของหัววัดที่น้ำหนักเท่ากันต่อไป

3.1.2 ชุดหัววัดกำหนดตำแหน่ง



ภาพที่ 32 ชุดหัววัดกำหนดตำแหน่ง

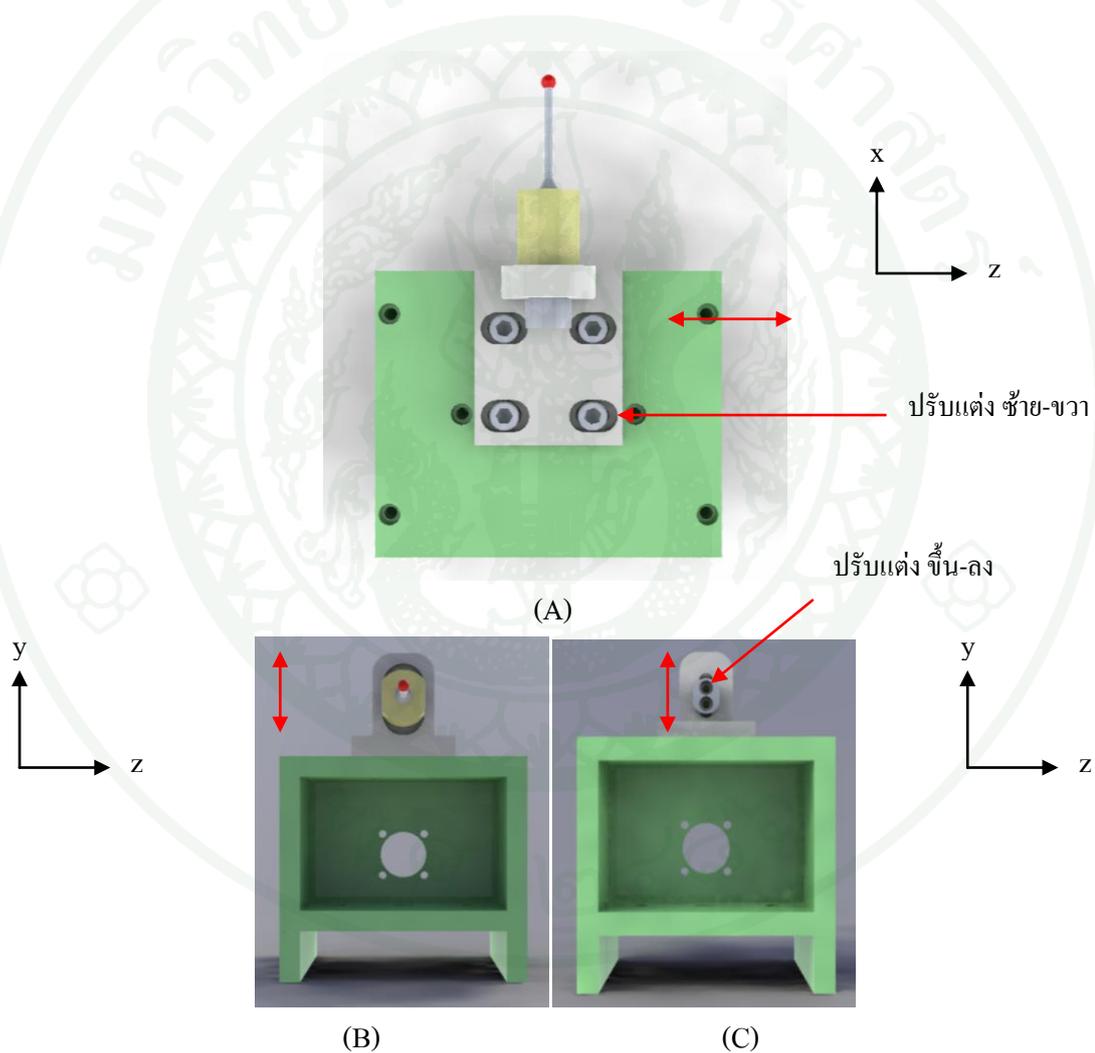
A : หัววัดกำหนดตำแหน่ง B : ชุดบอลสกรูเลื่อนชุดหัววัดกำหนดตำแหน่ง

ชุดหัววัดกำหนดตำแหน่งจะมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x เช่นเดียวกับชุดหัววัดกำหนดแรง โดยการเคลื่อนที่นี้จะเป็นการเคลื่อนที่เพื่อนำหัววัดเข้าไปหาเกจบล็อก โดยกำหนดให้เกจบล็อกอยู่ตรงกลางของแทนวางน้ำหนักหัววัดสัมผัสกับเกจบล็อกแล้วจะเป็นตัวกำหนด

ตำแหน่งในการวางเกบสล็อกเพื่อให้หัววัดกำหนดแรงเข้ามาสัมผัสที่ผิวของเกบสล็อกที่ด้านตรงข้ามด้วยแรงที่กำหนด

3.1.2.1 การปรับตั้งหัววัดกำหนดตำแหน่ง

การปรับตั้งหัววัดกำหนดตำแหน่งจะทำการปรับตั้งได้ในแนวแกน y และ z โดยการปรับตั้งในแนวแกน y จะมีนิต 2 ตัวในการปรับตั้งตามภาพที่ 33 (C) ส่วนการปรับตั้งในแนวแกน z จะมีนิต 4 ตัวในการปรับตั้งตามภาพที่ 33 (A)

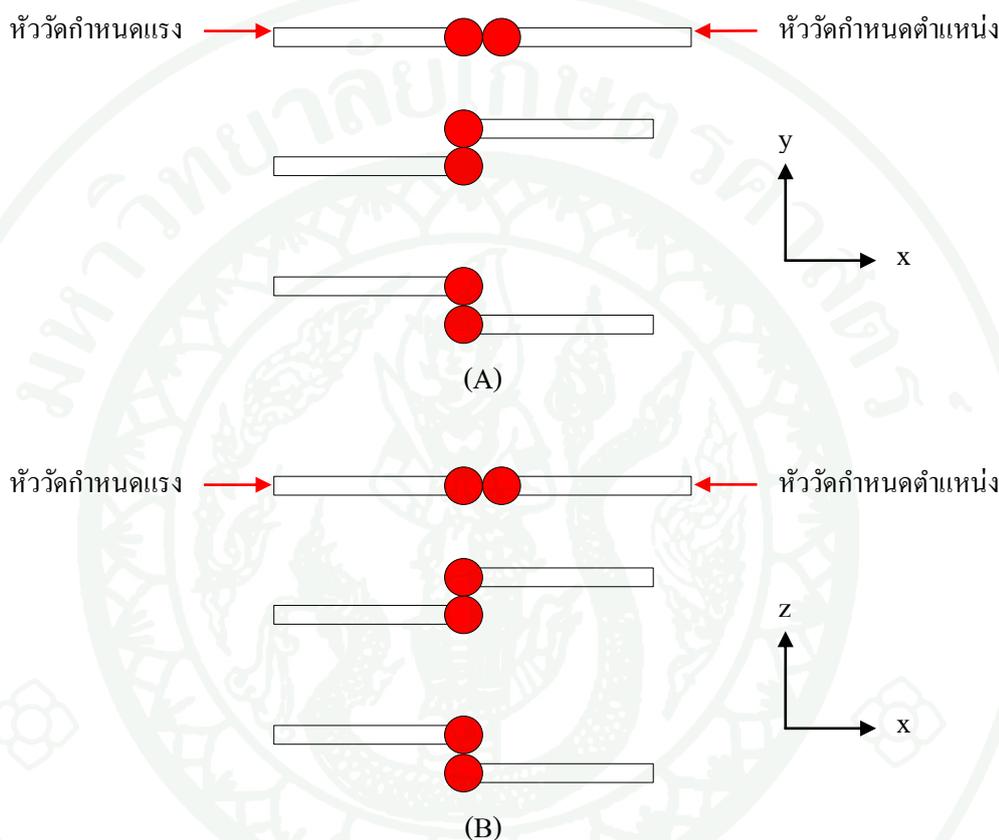


ภาพที่ 33 จุดที่ทำการปรับตั้งชุดหัววัดกำหนดตำแหน่ง

(A) ภาพฉายด้านบน (B) ภาพฉายด้านหน้า (C) ภาพฉายด้านหลัง

3.1.2.2 การปรับแต่งหัววัด

การปรับแต่งหัววัดให้มีความเที่ยงตรงมีความสำคัญมากสำหรับความถูกต้องในการสอบเทียบ โดยในการทดลองนี้จะทำการปรับแต่งหัววัดโดยใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์



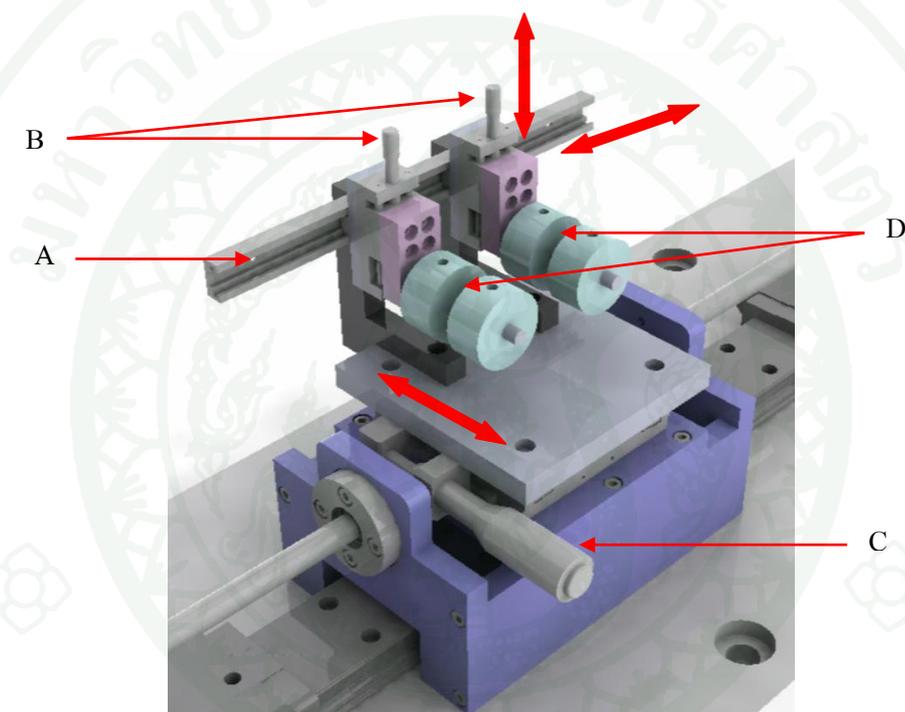
ภาพที่ 34 การปรับแต่งหัววัด

- (A) ภาพฉายด้านข้าง การปรับแต่งหัววัดในแนวแกน y (ขึ้น-ลง)
- (B) ภาพฉายด้านบน การปรับแต่งหัววัดในแนวแกน z (ซ้าย-ขวา)

การปรับแต่งหัววัดในการทดลองนี้ใช้วิธีการตามภาพที่ 34 โดยปรับแต่งในแนวแกน y และ z ตามลำดับ ในการปรับแต่งนี้จะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนโดยการปรับแต่งในแนวแกน y และ z จะมีขั้นตอนเหมือนกัน ในขั้นตอนแรกจะทำการเลื่อนหัววัดทั้งสองมาชนกัน จากนั้นเซทศูนย์ที่จอแสดงผลของเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ขั้นตอนที่ 2 ทำการปรับแต่งหัววัดกำหนดตำแหน่งขึ้นไปด้านบนโดยที่หัววัดทั้งสองยังสัมผัสกันอยู่ ตรวจสอบค่าและบันทึกผลในแต่ละ

ละตำแหน่งที่จอแสดงผล ขั้นตอนที่ 3 ทำการปรับแต่งหัววัดกำหนดตำแหน่งลงไปด้านล่างโดยที่หัววัดทั้งสองยังสัมผัสกันอยู่ตรวจสอบค่าและบันทึกผลในแต่ละตำแหน่งที่จอแสดงผลแบบเดียวกับขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบค่าที่ได้จากการบันทึกผล จากนั้นปรับแต่งหัววัดกำหนดตำแหน่งไปที่ตำแหน่งที่มีค่ามากที่สุดในแต่ละแกน จากนั้นเซตศูนย์ที่จอแสดงผล

3.1.4 ชุดแท่นวางเกจบล้อ



ภาพที่ 35 ชุดแท่นวางเกจบล้อ

A : แขนเลื่อนแท่นวางเกจบล้อในแนวแกน x

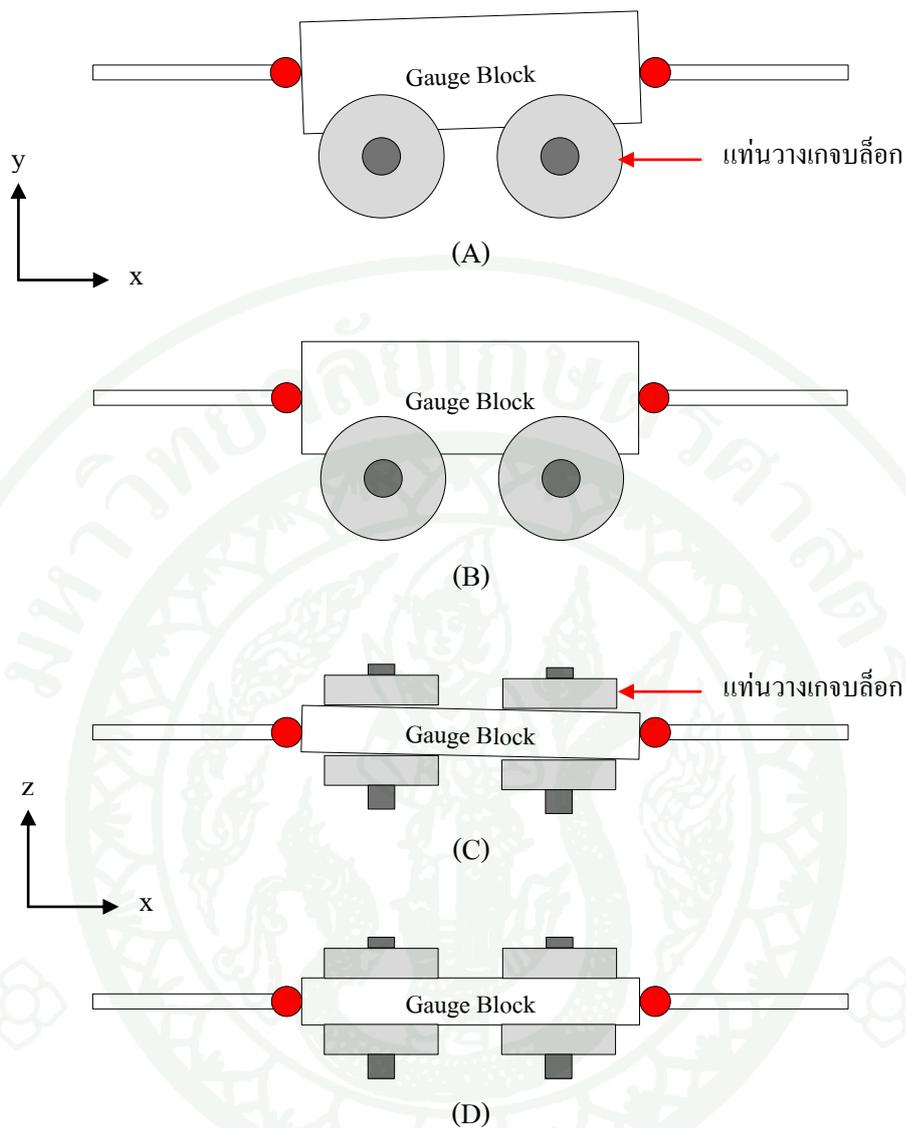
B : ตัวปรับแท่นวางเกจบล้อในแนวแกน y

C : ตัวปรับแท่นวางเกจบล้อในแนวแกน z

D : แท่นวางเกจบล้อ

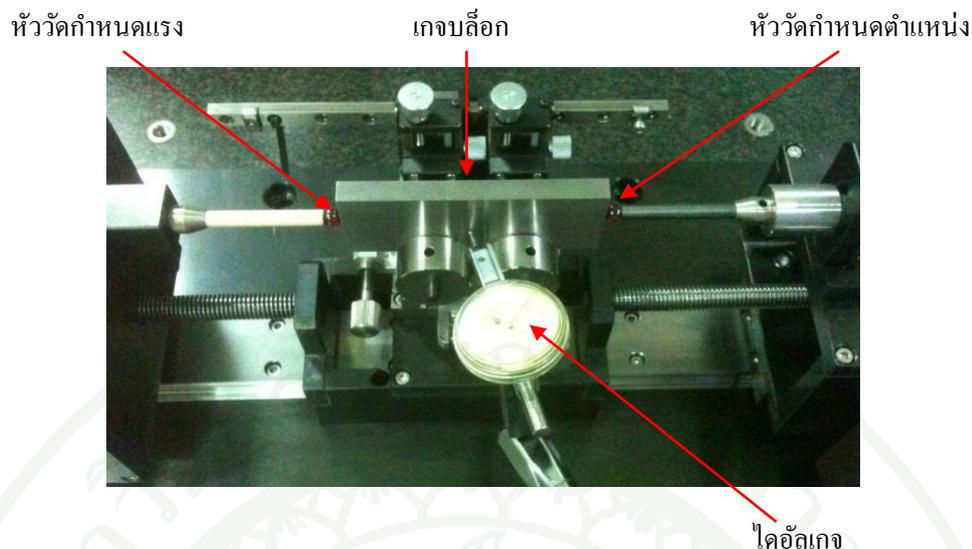
3.1.4.1 การปรับแต่งการวางเกจบล้อ

การปรับแต่งการวางเกจบล้อทำขึ้นเพื่อให้หัวสัมผัสสัมผัสกับจุดกึ่งกลางของเกจบล้อเพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำในการสอบเทียบ



ภาพที่ 36 การปรับแต่งการวางเกจบล็อก

- (A) ภาพฉายด้านข้าง เกจบล็อกก่อนการปรับแต่งในแนวแกน y
- (B) ภาพฉายด้านข้าง เกจบล็อกหลังการปรับแต่งในแนวแกน y
- (C) ภาพฉายด้านบน เกจบล็อกก่อนการปรับแต่งในแนวแกน z
- (D) ภาพฉายด้านบน เกจบล็อกหลังการปรับแต่งในแนวแกน z



ภาพที่ 37 ภาพการปรับแต่งการวางเกจบล็อก

การปรับแต่งการวางเกจบล็อกในการทดลองตามภาพที่ 37 นี้ทำโดยใช้เกจบล็อกมาตรฐานที่ผ่านการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการที่น่าเชื่อถือ ในที่นี้จะใช้เกจบล็อกกระดับ 2 ขนาดระบุ 100 mm ที่ผ่านการสอบเทียบจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยแบ่งการปรับแต่งเป็น 2 แกน คือในแนวแกน y และ z ในการปรับแต่งจะนำเกจบล็อกมาวางบนแท่นวางเกจบล็อก จากนั้นใช้ไดอัลเกจในการปรับแต่งให้เกจบล็อกอยู่ตรงตามระนาบที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกเพื่อหาค่าความไม่แน่นอนของเครื่องสอบเทียบต่อไป

3.1.5 การทำงานของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น

การทำงานของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นเป็นการวัดแบบโดยตรง โดยหลังจากทำการปรับแต่งเครื่องแล้วจะการเลื่อนหัววัดกำหนดตำแหน่งมาอยู่บริเวณแท่นวางเกจบล็อก หลังจากนั้นทำการเลื่อนหัววัดกำหนดแรงเข้ามาสัมผัสกับหัววัดกำหนดตำแหน่งให้อยู่ในตำแหน่งที่ทำการทดลองเอาไว้แล้วทำการเซตค่าที่เลเซอร์อ่าน ได้ให้เป็นศูนย์ตามภาพจากนั้นเลื่อนหัววัดกำหนดแรงออกเพื่อนำเอาเกจบล็อกมาวางบนแท่นวางเกจบล็อก โดยให้หน้าสัมผัสของเกจบล็อกสัมผัสกับหัววัดกำหนดตำแหน่ง จากนั้นเลื่อนชุดหัววัดกำหนดแรงเข้ามาสัมผัสกับหน้าสัมผัสของเกจบล็อกอีกด้านหนึ่ง โดยทำการเลื่อนหัววัดกำหนดแรงไปที่ตำแหน่งที่ทำการทดลองไว้ บันทึกค่าที่เลเซอร์แสดง โดยทำการทดลองแบบเดียวกันจำนวนครั้งที่เหมาะสมตามตารางที่ 14 ในเกจบล็อกแต่ละขนาดที่ทำการวัด โดยในการทดลองนี้จะทำการทดลองวัดบริเวณกึ่งกลางเท่านั้น

วิธีการ

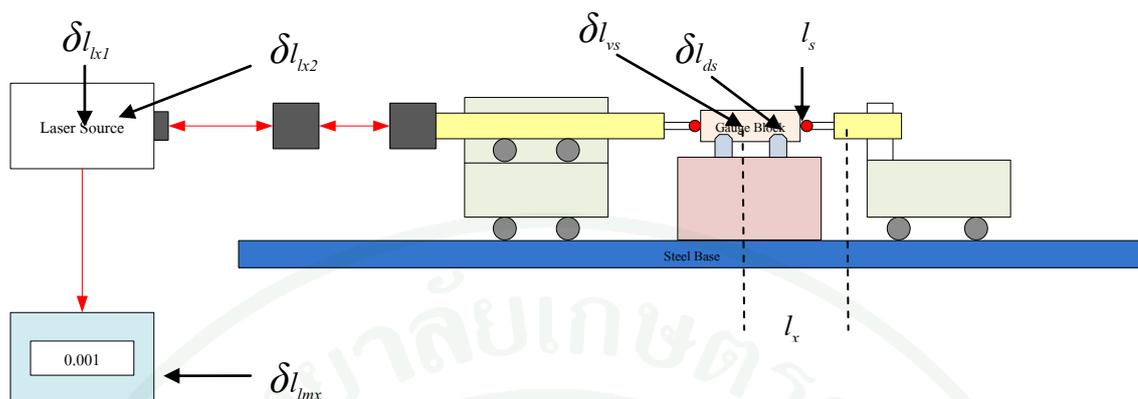
ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนในการทำการทดลองไว้ 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นโดยใช้เกจบล็อกเป็นอุปกรณ์ในการสอบเทียบ กับขั้นตอนการสอบเทียบเกจบล็อกโดยใช้เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นเป็นอุปกรณ์ในการสอบเทียบ

1. ขั้นตอนการสอบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น

ในขั้นตอนนี้ทำขึ้นเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นและนำค่านั้นมาปรับแก้ค่าที่ได้จากการวัดเกจบล็อก และหาค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นด้วย

ในการทดลองนี้จะใช้การหาค่าความไม่แน่นอนของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการสอบเทียบแบบ โดยตรง

เนื่องจากการสอบเทียบเกจบล็อกต้องมีความแม่นยำสูง ดังนั้นก่อนที่จะนำเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกมาทำการสอบเทียบนั้นต้องมีการสอบเทียบและคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการวัดของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกเสียก่อน โดยใช้เกจบล็อกระดับ 2 เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบ สำหรับวิธีการสอบเทียบใช้วิธีการวัดแบบโดยตรง โดยใช้วัดเกจบล็อกความยาว 70 mm, 80 mm, 90 mm และ 100 mm เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบ



ภาพที่ 38 แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น

เมื่อพิจารณาจากแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนมาตรฐานตามภาพที่ 38 สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic Model) แสดงค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อก โดยใช้เกจบล็อกที่เป็นมาตรฐานอ้างอิงได้ดังสมการที่ (20)

$$\text{ขนาดของเกจบล็อก (Standard)} = \text{ระยะที่เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกวัดได้ (Unknown)} \quad (20)$$

จากสมการที่ (31) สามารถระบุค่าของความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการวัดจะได้นี้ (UKAS, 2007)

$$l_s + \delta l_{vs} + \delta l_{ds} + l_s \alpha_s (t_s - t_0) = l_x + \delta l_{x1} + \delta l_{x2} + \delta l_{lx} + l_x \alpha_x (t_x - t_0) \quad (21)$$

โดยที่

- l_s คือ ความยาวของเกจบล็อกอ้างอิง ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C
- δl_{vs} คือ ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากการที่หัววัดวัดไม่ตรงตำแหน่งเดิม
- δl_{ds} คือ ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากความเสถียรของเกจบล็อกอ้างอิง
- l_x คือ ความยาวที่เครื่องสอบเทียบวัดได้ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C
- δl_{x1} คือ ค่าความแม่นยำในการวัดของระบบเลเซอร์
- δl_{x2} คือ ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของอุปกรณ์เลเซอร์

- $\delta l_{l_{mx}}$ คือ ค่าความผิดพลาดของการแสดงผลการวัดของเลเซอร์
 L คือ ความยาวที่ระบุของเกจบล็อกอ้างอิง
 $\bar{\alpha}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่างเกจบล็อกกับเครื่องสอบเทียบ
 δt คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างเกจบล็อกอ้างอิงกับเครื่องสอบเทียบ
 $\delta \alpha$ คือ ผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่างเกจบล็อกกับเครื่องสอบเทียบ
 $\Delta \bar{t}$ คือ ผลต่างเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของเกจบล็อกและเครื่องสอบเทียบกับ

อุณหภูมิห้อง

เมื่อทำการย้ายข้างสมการที่ (21) จะได้ความยาวที่เครื่องสอบเทียบวัดได้ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20°C ดังนี้

$$l_x = l_s + \delta l_{vs} + \delta l_{ds} + l_s \alpha_s (t_s - t_0) - \delta l_{x1} - \delta l_{x2} - \delta l_{l_{mx}} - l_x \alpha_x (t_x - t_0) \quad (22)$$

$$l_x = l_s + \delta l_{vs} + \delta l_{ds} - \delta l_{x1} - \delta l_{x2} - \delta l_{l_{mx}} - L(\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}) \quad (23)$$

---BS 3800 Statistical Table - Linear---										
Machine:dear		Date:11:11 Dec 01 2010			Axis:70,80,90,100			TITLE:cal		
Serial No:002		By:jack			Location:rdipt			Filename: dear3.rtl		
---Forward deviations (micrometres)---										
Target (millimetres)	Run 1	2	3	4	5	Mean	Standard Deviation	Mean+3s	Mean-3s	
1 0.000000	0	-0.060	-0.040	0.170	...	0.211	0.182	0.750	-0.336	
2 70.000000	-24.390	-24.690	-24.640	-24.470	...	-24.524	0.197	-23.934	-25.114	
3 80.000000	-27.510	-27.500	-27.320	-27.460	...	-27.511	0.100	-27.210	-27.812	
4 90.000000	-26.270	-26.380	-26.450	-29.750	...	-28.643	1.578	-23.910	-33.376	
5 100.000000	-33.750	-33.680	-33.840	-33.440	...	-33.639	0.135	-33.234	-34.044	
---Reverse deviations (micrometres)---										
Target (millimetres)	Run 1	2	3	4	5	Mean	Standard Deviation	Mean+3s	Mean-3s	
1 0.000000	-0.020	-0.040	0.040	0.360	...	0.191	0.172	0.707	-0.325	
2 70.000000	-24.410	-24.590	-24.590	-24.850	...	-24.516	0.190	-23.923	-25.109	
3 80.000000	-27.500	-27.490	-27.660	-27.650	...	-27.608	0.168	-27.105	-28.111	
4 90.000000	-26.310	-26.400	-29.560	-29.650	...	-28.964	1.381	-24.822	-33.106	
5 100.000000	-33.750	-33.730	-33.780	-33.580	...	-33.674	0.111	-33.342	-34.006	
---Summaries (micrometres)---										
Target (millimetres)	3Sj+	3Sj-	Reversal	Max 6Sj						
1 0.000000	0.547	0.516	0.020	1.094						
2 70.000000	0.590	0.593	-0.008	1.186						
3 80.000000	0.301	0.503	0.097	1.006						
4 90.000000	4.733	4.142	0.321	9.466						
5 100.000000	0.405	0.332	0.035	0.809						
---Statistics---										
Positioning accuracy :		34.802 micrometres								
Unidirectional repeatability :		9.466 micrometres (at target 4)								
Bidirectional repeatability :		9.466 micrometres (at target 4)								
Mean reversal :		0.093 micrometres								
Mean positioning deviation :		33.857 micrometres								

ภาพที่ 39 ผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบแถบสติกที่พัฒนาขึ้น

1.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดเอ

ผลการวัด l_x ในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นได้ทำการวัดเกจบล็อกที่ขนาดความยาวระบุ 100 mm โดยทำการวัดเริ่มต้น ณ ตำแหน่งตรงกลางเป็นจำนวน 10 ครั้ง และได้หาจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสมจากตารางที่ 14 ได้จำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสมเป็นจำนวน 7 รอบทำซ้ำ ในงานวิจัยนี้จะแสดงการคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากการทดลองวัดเกจบล็อกที่ขนาดความยาวระบุ 100 mm ได้ผลการวัดดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวัดเครื่องสอบเทียบที่พัฒนาขึ้นด้วยเกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	99.96625
2	99.96632
3	99.96616
4	99.96656
5	99.96647
6	99.96642
7	99.96651
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	99.96638
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.146

จากการวัดในตารางที่ 9 ได้ผลการวัดเฉลี่ยเป็น 99.96638 mm และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.146 μm ดังนั้นการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการอ่านซ้ำคือ

$$\begin{aligned}
 u(l_x) &= \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \\
 &= \frac{0.146}{\sqrt{7}} \\
 &= 0.05518 \quad \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

1.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดบี

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดบี ได้แก่ค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความยาวของเกจบล็อกอ้างอิง ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากความเสถียรของเกจบล็อกอ้างอิง ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากการที่หัววัดวัดไม่ตรงตำแหน่งเดิม ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของหัววัด ค่าความแม่นยำในการวัดของระบบเลเซอร์ ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของอุปกรณ์เลเซอร์ ค่าความผิดพลาดของการแสดงผลการวัดของเลเซอร์ และค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการสอบเทียบ โดยสามารถพิจารณาค่าความไม่แน่นอนแต่ละชนิดได้ดังนี้

1.2.1 ความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความยาวของเกจบล็อกอ้างอิง (l_s)

ค่าความยาวของเกจบล็อกอ้างอิง จากใบรับรองการสอบเทียบมีค่าความยาวระบุ 100 mm ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนของความยาวเท่ากับ $0.1 \mu\text{m}$ และมีค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่ $U = 50 \text{ nm} + (0.8 \times 10^{-6}) \cdot l$ โดย l คือค่าความยาวของเกจบล็อกมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % กำหนดให้มีลักษณะของการกระจายตัวของค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) มีค่าตัวประกอบร่วม $k = 2$ ในที่นี้ความยาวของเกจบล็อกคือ 100 mm ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความยาวของเกจบล็อกอ้างอิงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} l_s &= 100.00051 && \text{mm} \\ u(l_s) &= \frac{50 \text{ nm} + (0.8 \times 10^{-6}) \cdot l}{2} && (24) \\ &= \frac{50 \text{ nm} + (0.8 \times 10^{-6}) \cdot 100}{2} \\ &= 0.065 && \mu\text{m} \end{aligned}$$

1.2.2 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานอันเนื่องมาจากความเสถียรของเกจบล็อกอ้างอิง (δl_{ds})

เกจบล็อกอ้างอิงที่นำมาใช้ในการสอบเทียบเป็นเกจบล็อกระดับ 2 ค่าความเสถียรของเกจ บล็อก ตามที่ระบุไว้ใน ISO 3650 มีค่าเท่ากับ $0.05 \mu\text{m} + (0.5 \times 10^{-6} \times l_n)$ กำหนดให้มีลักษณะของการกระจายของค่าความไม่แน่นอนเป็นแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution) ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าความเสถียรของเกจบล็อกอ้างอิงจะเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 u(\delta l_{ds}) &= \frac{0.05 \mu\text{m} + (0.5 \times 10^{-6} \times l_n)}{\sqrt{3}} \\
 &= \frac{0.05 \mu\text{m} + (0.5 \times 10^{-6} \times 100)}{\sqrt{3}} \\
 &= 0.0577 \mu\text{m}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

1.2.3 ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากการที่หัววัดวัดไม่ตรงตำแหน่งเดิม (δl_{vs})

เกจบล็อกที่นำมาสอบเทียบนั้น มีค่าการยอมรับในค่าความแปรปรวนในความยาว $\pm 0.20 \mu\text{m}$ ซึ่งระบุไว้ใน ISO 3650 โดยค่าความแปรปรวนนี้เกิดขึ้นตลอดผิวหน้าการวัดเกจบล็อกที่ทำการสอบเทียบมีความกว้าง 9 mm ตำแหน่งการวัดอยู่ในพื้นที่วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นค่าความเบี่ยงเบนในความยาว} &= \frac{\phi \times T}{W} \\
 &= \frac{0.5 \text{ mm} \times 0.2 \mu\text{m}}{9 \text{ mm}} \\
 &= 0.01 \mu\text{m}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

โดยที่ ϕ คือ ตำแหน่งที่หัววัดสัมผัสกับเกจบล็อก
 T คือ ค่าการยอมรับในความแปรปรวนในความยาว
 W คือ ความกว้างของเกจบล็อก

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad u(\delta l_{vs}) &= \frac{0.01}{\sqrt{3}} \\
 &= 0.006 \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

1.2.4 ค่าความเบี่ยงเบนเนื่องจากระบบเลเซอร์ (δl_{x1} , δl_{x2} , δl_{lms})

ค่าความเบี่ยงเบนเนื่องจากระบบเลเซอร์ ในงานวิจัยนี้ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ยี่ห้อ เรนิชอว์ รุ่น เอ็มแอลสลิป ข้อมูลต่างๆ ที่ได้รับการกำหนดค่าจากผู้ผลิต ซึ่งสามารถแบ่งค่าความเบี่ยงเบนออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

ค่าความแม่นยำในการวัดของระบบเลเซอร์ (δl_{x1})

มีค่าเท่ากับ $\pm 0.001 \mu\text{m}$ ทำให้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดส่วนนี้เท่ากับ

$$\delta l_{x1} = \frac{0.001}{\sqrt{3}} = 0.00058 \quad \mu\text{m}$$

ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของอุปกรณ์เลเซอร์ (δl_{x2})

ที่ค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage Factor, k) = 2 มีค่าเท่ากับ $\pm 0.025 \mu\text{m}$ ดังนั้นความไม่แน่นอนในส่วนนี้เท่ากับ

$$\delta l_{x2} = \frac{0.025}{2} = 0.0125 \quad \mu\text{m}$$

ค่าความผิดพลาดของการแสดงผลการวัดของเลเซอร์ (δl_{lmx})

เลเซอร์มีความละเอียดในการแสดงผลที่ระดับ $0.001 \mu\text{m}$ ดังนั้นความไม่แน่นอนในส่วนนี้เท่ากับ

$$\delta l_{lmx} = \frac{0.001}{2\sqrt{3}} = 0.00029 \quad \mu\text{m}$$

1.2.5 ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ ($\bar{\alpha}$, $\delta\alpha$, $\Delta\bar{\alpha}$)

ค่า $\bar{\alpha} \times \delta l$ ในการสอบเทียบได้ใช้เกจบล็อกระดับ 2 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเท่ากับ $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ เป็นมาตรฐานทำการสอบเทียบให้กับอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับเลเซอร์ ซึ่งหวั้ควมมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ $(0.05 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ โดยการกระจายตัวของข้อมูลของค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ มีลักษณะการกระจายตัวแบบสามเหลี่ยมภายใต้ขีดจำกัด $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะระหว่างเกจบล็อกกับหวั้ควมมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \frac{\alpha_x + \alpha_s}{2} & (27) \\ &= \frac{(0.05 \times 10^{-6}) + (11.5 \times 10^{-6})}{2} \\ &= 5.78 \times 10^{-6} \quad \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนของการขยายตัวของโลหะของเกจบล็อกที่ต้องการสอบเทียบ มีค่าเท่ากับ $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ให้ลักษณะการกระจายตัวของค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลเป็นแบบสามเหลี่ยมดังนั้น

$$\begin{aligned} u(\alpha) &= \frac{1 \times 10^{-6}}{\sqrt{6}} \\ &= 0.408 \times 10^{-6} \quad \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

อุณหภูมิภายในห้องสอบเทียบเท่ากับ $(20 \pm 1) \text{ } ^\circ\text{C}$ และเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ ต่อชั่วโมง โดยอุณหภูมิของเกจบล็อกกับหัววัดต้องต่างกันไม่เกิน $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ ซึ่งเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิขณะทำการสอบเทียบมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ที่ $\pm 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีค่าตัวคูณร่วม $k=2$

ขณะทำการวัดอุณหภูมิเกจบล็อก (t_s) เท่ากับ $20.30 \text{ } ^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับเลเซอร์ (t_x) เท่ากับ $20.35 \text{ } ^\circ\text{C}$ ดังนั้นผลต่างของอุณหภูมิ (δt)

$$\begin{aligned} \delta t &= t_x - t_s \\ &= 20.35 - 20.30 = 0.05 \quad \text{ } ^\circ\text{C} \\ u(\delta t) &= \frac{0.05}{2} = 0.025 \quad \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

จากวิธีการคำนวณหาค่าการกระจายของความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $\bar{x} \times \delta t$ โดยวิธีของ EA-4/02 ดังนี้

$$u^2(x_1, x_2) = x_2^2 u^2(x_1) + x_1^2 u^2(x_2) + u^2(x_1) \cdot u^2(x_2) \quad (28)$$

กำหนดให้

$$\bar{\alpha} = x_1, u(\bar{\alpha}) = u(x_1), \delta t = x_2 \text{ และ } u(\delta t) = u(x_2)$$

ดังนั้นจะได้

$$u^2(\bar{\alpha}, \delta t) = (\delta t^2 \cdot u^2(\bar{\alpha})) + (\bar{\alpha}^2 \cdot u^2(\delta t)) + (u^2(\bar{\alpha}) \cdot u^2(\delta t)) \quad (29)$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการ จะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $u(\bar{\alpha}, \delta t)$ ที่มีขนาดความยาวระบุ 100 mm ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\bar{\alpha}, \delta t) &= \sqrt{((0.05)^2 \times (0.408 \times 10^{-6})^2) + ((5.78 \times 10^{-6})^2 \times (0.015)^2) + ((0.408 \times 10^{-6})^2 \times (0.015)^2)} \\ &= 8.92 \times 10^{-8} \cdot L \\ &= 8.92 \times 10^{-8} \cdot 100 \\ &= 0.0089 \quad \mu\text{m} \end{aligned}$$

$\delta\alpha \times \Delta\bar{t}$ ผลต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะของเกจบล็อก (α_x) กับอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับเลเซอร์ (α_s)

$$\begin{aligned} \delta\alpha &= \alpha_x - \alpha_s \\ &= (0.05 \times 10^{-6}) - (11.5 \times 10^{-6}) \\ &= -11.45 \times 10^{-6} \quad ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนของผลต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะของเกจบล็อกกับหัววัดมีค่าเท่ากับ $2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$$\begin{aligned} u(\delta\alpha) &= \alpha_x \cdot \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{6}} \\ &= 0.816 \times 10^{-6} \quad ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

ขณะทำการสอบเทียบอุณหภูมิห้องมีค่า 20.1 °C ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของเกจบล็อก และหัววัดที่อุณหภูมิห้อง ($\Delta\bar{t}$) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \Delta\bar{t} &= \left(\frac{t_x - t_s}{2} \right) - t_0 \\ &= \left(\frac{20.35 - 20.30}{2} \right) - 20.1 \\ &= 0.032 \quad ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (30)$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $\Delta \bar{t}$ จะทำการนำค่าสูงสุดของการยอมรับได้คือ $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ มาคำนวณ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $\Delta \bar{t}$ มีค่าเท่ากับ

$$u(\Delta \bar{t}) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ } ^\circ\text{C}$$

จากวิธีการคำนวณหาการกระจายของความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $\delta \alpha \times \Delta \bar{t}$ โดยวิธีการคำนวณตาม EA-4/02 ดังสมการที่ 28 โดย

กำหนดให้

$$\delta \alpha = x_1, u(\delta \alpha) = u(x_1), \Delta \bar{t} = x_2 \text{ และ } u(\Delta \bar{t}) = u(x_2)$$

ดังนั้นจะได้

$$u^2(\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}) = (\Delta \bar{t}^2 \cdot u^2(\delta \alpha)) + (\delta \alpha^2 \cdot u^2(\Delta \bar{t})) + (u^2(\delta \alpha) \cdot u^2(\Delta \bar{t})) \quad (31)$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการ จะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $u(\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t})$ ที่มีขนาดความยาวระบุ 100 mm ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}) &= \sqrt{((0.032)^2 \times (0.816 \times 10^{-6})^2) + ((-11.45 \times 10^{-6})^2 \times (0.289)^2) + ((0.816 \times 10^{-6})^2 \times (0.289)^2)} \\ &= 3.32 \times 10^{-6} \cdot L \\ &= 3.32 \times 10^{-6} \cdot 100 \\ &= 0.332 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

1.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม u_c สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 16 ดังนี้

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u(x_i)^2 \sum_{i=1}^n u(x_i)^2 \\ u_c &= \sqrt{(u(l_s))^2 \times (u(l_x))^2 \times (u(\delta l_{vs}))^2 \times (u(\delta l_{ds}))^2 \times (u(\delta l_{Lx}))^2 \times (u(\delta l_{x1}))^2 \\ &\quad \times (u(\delta l_{x2}))^2 \times (u(\delta l_{mx}))^2 \times (u(\bar{\alpha} \cdot \delta t))^2 \times (u(\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}))^2} \\ &= 0.34798 \end{aligned}$$

1.4 การประเมินค่าตัวประกอบร่วม

ในการประเมินค่าตัวประกอบร่วม k ที่ความยาวระบุ 100 mm นั้นอ้างอิงตาม EA-4/02 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 18 ดังนี้

$$\begin{aligned} v_{eff} &= \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \\ &= \frac{u_c^4}{\frac{u(l_x)}{n-1} + \frac{u(l_s)}{\infty} + \frac{u(\delta l_{vs})}{\infty} + \frac{u(\delta l_{ds})}{\infty} + \frac{u(\delta l_{Lx})}{\infty} + \frac{u(\delta l_{x1})}{\infty} + \frac{u(\delta l_{x2})}{\infty} + \frac{u(\delta l_{mx})}{\infty} + \frac{u(\bar{\alpha} \cdot \delta t)}{\infty} + \frac{u(\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t})}{\infty}} \\ &= \infty \end{aligned}$$

ซึ่งค่า v_{eff} ที่ได้สามารถเปรียบเทียบกับค่าในตารางค่าองศาอิสระเพื่อหาตัวประกอบร่วม k ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 2

1.5 การประเมินค่าความไม่แน่นอนขยาย

ค่าความไม่แน่นอนขยายสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} U &= k \times u_c \\ &= 2 \times 0.34798 \end{aligned}$$

$$= 0.6959$$

เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ช่างคืนมาแทนในสมการที่ 17 แล้ว ค่าความไม่แน่นอนขยายของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ระยะ 100 mm จะมีค่าเท่ากับ $0.6959 \mu\text{m}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 11



ตารางที่ 10 ผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น

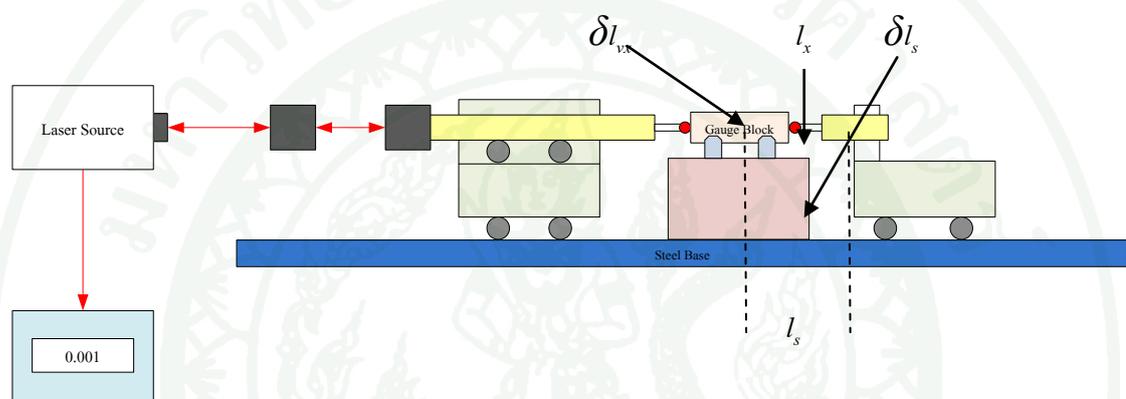
ความยาวระบุ (mm)	ผลการวัด (mm)	ค่าความยาวจริงของ เกจบล็อก (mm)	ผลต่างระหว่างผลการวัด และค่าความยาวจริง (mm)
70	69.97545	70.00036	0.02491
80	79.97254	79.99927	0.02673
90	89.97042	90.00063	0.03021
100	99.96638	100.00051	0.03413

ตารางที่ 11 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm

Quantity Xi	Estimate xi (mm)	Standard Uncertainty u(xi) (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient ci	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom v_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	100.00051	0.025	0.04	Normal	2	1	0.06500	∞
l_x	99.96638	0.05518	-	Normal	$\sqrt{7}$	1	0.05518	$\sqrt{7}$
δl_{ds}	0	0.02886	0.028	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.05770	∞
δl_{vs}	0	0.0100	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.00600	∞
δl_{x1}	0	0.00058	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	-1	- 0.00058	∞
δl_{x2}	0	0.0125	-	Normal	2	-1	- 0.01250	∞
δl_{mx}	0	0.00029	-	Rectangular	$2\sqrt{3}$	-1	- 0.00029	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.0089	Special	-	-1	- 0.00890	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.3320	Special	-	-1	- 0.33200	∞
$u(l_x)$							0.12109 μm ²	-
							0.34798	-
$l_s - l_x$	0.03413			Normal	2		0.6959	-

2. การหาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเกจบล็อกด้วยวิธีการสอบเทียบแบบโดยตรง

ในการทดลองนี้จะทำการสอบเทียบเกจบล็อกระดับ 2 ที่ผ่านการสอบเทียบจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติมาแล้ว โดยมีความยาวระบุ 70 mm, 80 mm, 90 mm และ 100 mm ในการสอบเทียบเกจบล็อกนี้จะใช้เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นเป็นมาตรฐานในการสอบเทียบสำหรับวิธีการสอบเทียบโดยใช้วิธีการวัดแบบโดยตรง



ภาพที่ 40 แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเกจบล็อก

เมื่อพิจารณาจากแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนมาตรฐานตามภาพที่ 40 สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic Model) แสดงค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเกจบล็อก โดยใช้เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นเป็นมาตรฐานอ้างอิงได้ดังสมการที่ (32)

$$\text{ระยะที่เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกวัดได้ (Standard)} = \text{ขนาดของเกจบล็อก (Unknown)} \quad (32)$$

จากสมการที่ (32) สามารถระบุค่าของความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการวัดจะได้ดังนี้

$$l_s + l_s \alpha_s (t_s - t_0) = l_x + \delta l_x + l_x \alpha_x (t_x - t_0) \quad (33)$$

โดยที่

- l_s คือ ความยาวของแถบลึอกอ้างอิง ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C
 δl_s คือ ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องจากเครื่องสอบเทียบแถบลึอก
 l_x คือ ความยาวที่เครื่องสอบเทียบวัดได้ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C
 δl_{vx} คือ ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากการที่หัววัดวัดไม่ตรงตำแหน่งเดิม
 L คือ ความยาวที่ระบุของแถบลึอกอ้างอิง
 $\bar{\alpha}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่างแถบลึอกกับเครื่องสอบเทียบ
 δt คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแถบลึอกกับเครื่องสอบเทียบ
 $\delta \alpha$ คือ ผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่างแถบลึอกกับเครื่องสอบเทียบ
 $\Delta \bar{t}$ คือ ผลต่างเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของแถบลึอกและเครื่องสอบเทียบกับ

อุณหภูมิห้อง

ดังนั้นเมื่อทำการย้ายข้างสมการที่ (33) จะได้ความยาวที่เครื่องสอบเทียบวัดได้ ณ อุณหภูมิอ้างอิง 20° C ดังนี้

$$l_x = l_s + \delta l_s + l_s \alpha_s (t_s - t_0) - \delta l_{vx} - l_x \alpha_x (t_x - t_0) \quad (34)$$

$$l_x = l_s + \delta l_s - \delta l_{vx} - L(\bar{\alpha} \cdot \delta t + \delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}) \quad (35)$$

---BS 3800 Statistical Table - Linear---

Machine:dear	Date:13:18 Dec 01 2010	Axis:70,80,90,100	TITLE:cal
Serial No:002	By:jack	Location:rdipt	Filename: deart.rtl

---Forward deviations (micrometres)---

Target (millimetres)	Run 1	2	3	4	5	Mean	Standard Deviation	Mean+3s	Mean-3s
1 0.000000	0.030	0.020	0.050	0	...	0.014	0.016	0.063	-0.035
2 70.000000	-24.450	-24.500	-24.680	-24.320	...	-24.437	0.173	-23.919	-24.955
3 80.000000	-27.200	-27.080	-27.310	-27.270	...	-27.257	0.090	-26.986	-27.528
4 90.000000	-26.830	-26.200	-26.260	-26.300	...	-26.240	0.221	-25.578	-26.902
5 100.000000	-31.710	-31.540	-31.150	-31.250	...	-31.346	0.177	-30.814	-31.878

---Summaries (micrometres)---

Target (millimetres)	3Sj+	3Sj-	Reversal	Max 6Sj
1 0.000000	0.049		0.099	0.099
2 70.000000	0.518		1.037	1.037
3 80.000000	0.271		0.543	0.543
4 90.000000	0.662		1.323	1.323
5 100.000000	0.532		1.064	1.064

---Statistics---

Positioning accuracy : 31.941 micrometres
 Unidirectional repeatability : 1.323 micrometres (at target 4)

Mean positioning deviation : 31.360 micrometres

ภาพที่ 41 ผลการสอบเทียบแบบเกจบล็อก

2.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดเอ

ผลการวัด l_x ด้วยวิธีการวัดแบบโดยตรงในการทดลองนี้ คือความยาวของเกจบล็อก ซึ่งจัดเป็นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดเอ ในงานวิจัยนี้จะแสดงการคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากการทดลองวัดเกจบล็อกที่ขนาดความยาวระบุ 100 mm โดยผลการวัดนี้ได้รวมค่าแก้ไข (Correction) ที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นเอาไว้แล้ว และได้หาจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสมจากตารางที่ 15 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 12 ส่วนการทดลองอื่นจะแสดงผลลัพธ์ในผลการทดลอง

ตารางที่ 12 ผลการวัดเกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	100.00242
2	100.00259
3	100.00298
4	100.00288
5	100.00283
6	100.00303
7	100.00283
8	100.00283
9	100.00273
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	100.00279
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.189

จากการวัดในตารางที่ 12 ได้ผลการวัดเฉลี่ยเป็น 100.00279 mm และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.189 μm ดังนั้นการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการอ่านซ้ำคือ

$$u(l_x) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.189}{\sqrt{9}} \\
 &= 0.063 \quad \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

2.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดบี

แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดบี ได้แก่ค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากการที่หัววัดวัดไม่ตรงตำแหน่งเดิม ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของหัววัด และค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการสอบเทียบ โดยสามารถพิจารณาค่าความไม่แน่นอนแต่ละชนิดได้ดังนี้

2.2.1 ความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น (l_s)

ในการสอบเทียบแบบโดยตรงนี้ได้ใช้เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นเป็นมาตรฐานดังนั้นค่าที่ใช้เป็นมาตรฐาน คือค่าที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อก มีค่าเบี่ยงเบนความยาว ณ ตำแหน่ง 100 mm เท่ากับ $0.031346 \mu\text{m}$ มีค่าความไม่แน่นอน $U = 1.34085 \mu\text{m}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่า $k = 2$ ดังนั้นค่า ความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 u(l_s) &= \frac{1.34085}{2} \\
 &= 0.670 \quad \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

2.2.2 ค่าความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากการที่หัววัดวัดไม่ตรงตำแหน่งเดิม (δl_x)

เกจบล็อกที่นำมาสอบเทียบนั้น มีการยอมรับในค่าความแปรปรวนในความยาว $\pm 0.20 \mu\text{m}$ ซึ่งระบุไว้ใน ISO 3650 โดยค่าความแปรปรวนนี้เกิดขึ้นตลอดผิวหน้าการวัดเกจบล็อกที่ทำการสอบเทียบมีความกว้าง 9 mm ตำแหน่งการวัดอยู่ในพื้นที่วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นค่าความเบี่ยงเบนในความยาว} &= \frac{\phi \times T}{W} \\
 &= \frac{0.5 \text{ mm} \times 0.2 \mu\text{m}}{9 \text{ mm}} \\
 &= 0.01 \quad \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

โดยที่ \varnothing	คือ	ตำแหน่งที่หัววัดสัมผัสกับเกจบดล็อก
T	คือ	ค่าการยอมรับในความแปรปรวนในความยาว
W	คือ	ความกว้างของเกจบดล็อก

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad u(\delta l_x) &= \frac{0.01}{\sqrt{3}} \\ &= 0.006 \quad \mu\text{m} \end{aligned}$$

2.2.3 ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ ($\bar{\alpha}$, δt , $\delta \alpha$, $\Delta \bar{t}$)

ค่า $\bar{\alpha} \times \delta t$ ในการสอบเทียบได้ใช้เกจบดล็อกระดับ 2 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเท่ากับ $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ เป็นมาตรฐานทำการสอบเทียบให้กับอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับเลเซอร์ ซึ่งหัววัดมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ $(0.05 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ โดยการกระจายตัวของข้อมูลของค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ มีลักษณะการกระจายตัวแบบสามเหลี่ยมภายใต้ขีดจำกัด $\pm 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะระหว่างเกจบดล็อกกับหัววัดมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \frac{\alpha_x + \alpha_s}{2} \\ &= \frac{(0.05 \times 10^{-6}) + (11.5 \times 10^{-6})}{2} \\ &= 5.78 \times 10^{-6} \quad ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนของการขยายตัวของโลหะของเกจบดล็อกที่ต้องการสอบเทียบมีค่าเท่ากับ $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ให้ลักษณะการกระจายตัวของค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลเป็นแบบสามเหลี่ยมดังนั้น

$$\begin{aligned} u(\alpha) &= \frac{1 \times 10^{-6}}{\sqrt{6}} \\ &= 0.408 \times 10^{-6} \quad ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

อุณหภูมิภายในห้องสอบเทียบเท่ากับ $(20 \pm 1) \text{ }^{\circ}\text{C}$ และเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อชั่วโมง โดยอุณหภูมิของเกจบล็อกกับหัววัดต้องต่างกันไม่เกิน $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิขณะทำการสอบเทียบมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ที่ $\pm 0.03 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีค่าตัวคูณร่วม $k=2$

ขณะทำการวัดอุณหภูมิเกจบล็อก (t_x) เท่ากับ $20.30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับแลเซอร์ (t_s) เท่ากับ $20.35 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นผลต่างของอุณหภูมิ (δt)

$$\begin{aligned} \delta t &= t_x - t_s \\ &= 20.35 - 20.30 = 0.05 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ u(\delta t) &= \frac{0.05}{2} = 0.025 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

จากวิธีการคำนวณหาการกระจายของความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $\bar{\alpha} \times \delta t$ โดยวิธีของ EA-4/02 ดังนี้

$$u^2(x_1, x_2) = x_2^2 u^2(x_1) + x_1^2 u^2(x_2) + u^2(x_1) \cdot u^2(x_2)$$

กำหนดให้

$$\bar{\alpha} = x_1, u(\bar{\alpha}) = u(x_1), \delta t = x_2 \text{ และ } u(\delta t) = u(x_2)$$

ดังนั้นจะได้

$$u^2(\bar{\alpha} \cdot \delta t) = (\delta t)^2 \cdot u^2(\bar{\alpha}) + (\bar{\alpha})^2 \cdot u^2(\delta t) + (u^2(\bar{\alpha}) \cdot u^2(\delta t))$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการ จะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $u(\bar{\alpha} \cdot \delta t)$ ที่มีขนาดความยาวระบุ 100 mm ดังนี้

$$\begin{aligned}
 u(\bar{\alpha} \cdot \delta t) &= \sqrt{((0.05)^2 \times (0.408 \times 10^{-6})^2) + ((5.78 \times 10^{-6})^2 \times (0.015)^2) + ((0.408 \times 10^{-6})^2 \times (0.015)^2)} \\
 &= 8.92 \times 10^{-8} \cdot L \\
 &= 8.92 \times 10^{-8} \cdot 100 \\
 &= 0.0089 \quad \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

$\delta\alpha \times \Delta\bar{t}$ ผลต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะของเกจบล็อก (α_x) กับอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับเลเซอร์ (α_s)

$$\begin{aligned}
 \delta\alpha &= \alpha_x - \alpha_s \\
 &= (0.05 \times 10^{-6}) - (11.5 \times 10^{-6}) \\
 &= -11.45 \times 10^{-6} \quad ^\circ\text{C}^{-1}
 \end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนของผลต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะของเกจบล็อกกับหัววัดมีค่าเท่ากับ $2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$$\begin{aligned}
 u(\delta\alpha) &= \alpha_x \cdot \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{6}} \\
 &= 0.816 \times 10^{-6} \quad ^\circ\text{C}^{-1}
 \end{aligned}$$

ขณะทำการสอบเทียบอุณหภูมิห้องมีค่า $20.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของเกจบล็อกและหัววัดที่อุณหภูมิห้อง ($\Delta\bar{t}$) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 \Delta\bar{t} &= \left(\frac{t_x - t_s}{2} \right) - t_0 \\
 &= \left(\frac{20.35 - 20.30}{2} \right) - 20.1 \\
 &= 0.032 \quad ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $\Delta\bar{t}$ จะทำการนำค่าสูงสุดของการยอมรับได้คือ $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ มาคำนวณ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $\Delta\bar{t}$ มีค่าเท่ากับ

$$u(\Delta\bar{t}) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \quad ^\circ\text{C}$$

จากวิธีการคำนวณหาค่าการกระจายของความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $\delta\alpha \times \Delta\bar{t}$ โดยวิธีการคำนวณดังสมการที่ 28 (EA-4/02, 1999) โดย

กำหนดให้

$$\delta\alpha = x_1, u(\delta\alpha) = u(x_1), \Delta\bar{t} = x_2 \text{ และ } u(\Delta\bar{t}) = u(x_2)$$

ดังนั้นจะได้

$$u^2(\delta\alpha, \Delta\bar{t}) = (\Delta\bar{t}^2 \cdot u^2(\delta\alpha)) + (\delta\alpha^2 \cdot u^2(\Delta\bar{t})) + (u^2(\delta\alpha) \cdot u^2(\Delta\bar{t}))$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการ จะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของ $u(\delta\alpha, \Delta\bar{t})$ ที่มีขนาดความยาวระบุ 100 mm ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta\alpha, \Delta\bar{t}) &= \sqrt{((0.032)^2 \times (0.816 \times 10^{-6})^2) + ((-11.45 \times 10^{-6})^2 \times (0.289)^2) \\ &\quad + ((0.816 \times 10^{-6})^2 \times (0.289)^2)} \\ &= 3.32 \times 10^{-6} \cdot L \\ &= 3.32 \times 10^{-6} \cdot 100 \\ &= 0.332 \quad \mu\text{m} \end{aligned}$$

2.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม u_c สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} u_c^2 &= u(x_i)^2 \sum_{i=1}^n u(x_i)^2 \\ u_c &= \sqrt{(u(l_s))^2 \times (u(l_x))^2 \times (u(\delta L_x))^2 \times (u(\delta l_{vx}))^2 \\ &\quad \times (u(\bar{\alpha} \cdot \delta t))^2 \times (u(\delta\alpha, \Delta\bar{t}))^2} \\ &= 0.04839 \end{aligned}$$

2.4 การประเมินค่าตัวประกอบรวม

ในการประเมินค่าตัวประกอบรวม k ที่ความยาวระบุ 100 mm นั้นอ้างอิงตาม EA-4/02 สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 29 ดังนี้

$$\begin{aligned} v_{eff} &= \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \\ &= \frac{u_c^4}{\frac{u(L_x)}{n-1} + \frac{u(L_s)}{\infty} + \frac{u(\delta L_x)}{\infty} + \frac{u(\delta L_{vx})}{\infty}} \\ &= \infty \end{aligned}$$

ซึ่งค่า v_{eff} ที่ได้สามารถเปรียบเทียบกับค่าในตารางค่าองศาอิสระเพื่อหาตัวประกอบรวม k ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 2

2.5 การประเมินค่าความไม่แน่นอนขยาย

ค่าความไม่แน่นอนขยายสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} U &= k \times u_c \\ &= 2 \times 0.4839 \\ &= 0.9678 \end{aligned}$$

เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ข้างต้นมาแทนในสมการที่ 17 แล้ว ค่าความไม่แน่นอนขยายที่ของเกลบล็อกที่ขนาดระบุ 100 mm จะมีค่าเท่ากับ 0.9678 μm ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm

Quantity X_i	Estimate x_i (mm)	Standard Uncertainty $u(x_i)$ (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient c_i	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom ν_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	100.00051	0.34622	-	Normal	2	1	0.34622	∞
l_x	100.00279	0.0630	-	Normal	$\sqrt{9}$	1	0.0630	$\sqrt{9}$
δl_{vx}	0	0.006	-	Regtangular	$\sqrt{3}$	-1	-0.006	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.0089	Special	-	-1	-0.0089	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.3320	Special	-	-1	-0.3320	∞
$u(l_x)$							0.23417 μm^2	-
							0.4839	-
$l_s - l_x$	-0.00228			Normal		k = 2	0.9678	-

2.6 การเปรียบเทียบผลการวัด

ทำการเปรียบเทียบผลการวัดด้วยสมการที่ 19 E_n Ratio ผลการวัดทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบกัน จะถูกยอมรับว่าไม่มีความแตกต่างกันเมื่อค่า E_n ที่ได้อยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 จากผลการทดลองสอบเทียบเกจลึอกขนาด 100 mm ได้ผลการวัดเท่ากับ $100.00279 \text{ mm} \pm 0.9678 \text{ }\mu\text{m}$ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐานของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ $100.00051 \text{ mm} \pm 0.10 \text{ }\mu\text{m}$ จะได้ค่า E_n Ratio เท่ากับ

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{Lab-Ref}{\sqrt{U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2}} \\ &= \frac{100.00279 - 100.00051}{\sqrt{0.9678^2 + 0.10^2}} \\ &= 2.343 \end{aligned}$$

3. การกำหนดจำนวนรอบทำซ้ำของการทดลอง (Number of Replications)

จำนวนรอบทำซ้ำขึ้นอยู่กับช่วงความเชื่อมั่นของผลลัพธ์ที่ต้องการ เริ่มต้นต้องทำการทดลองแบบคร่าว ๆ ก่อนเพื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล โดยสามารถประมาณค่าได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง จากนั้นไปคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง ดังสมการที่ (36) (Douglas, 2005)

$$R = \frac{(t_{\alpha/2, R_0 - 1} S_0)}{\varepsilon} \quad (36)$$

กำหนดให้

- ε หมายถึง ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้
- R_0 หมายถึง จำนวนรอบทำซ้ำเริ่มต้น
- S_0 หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- α หมายถึง ระดับนัยสำคัญ

จากนั้นจึงทำการประมวลผลด้วยแบบจำลองหาค่าเวลารอเฉลี่ย และหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แล้วจึงนำค่าที่ได้แทนในสมการที่ 36 เพื่อกำหนดจำนวนรอบทำซ้ำ

โดยกำหนดให้

ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 5 % $\mathcal{E} = 0.05$

จำนวนรอบทำซ้ำเริ่มต้นเท่ากับ 10 รอบทำซ้ำ $R_0 = 10$

ดังนั้นจะได้จำนวนรอบทำซ้ำในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 100 mm เท่ากับ

$$\begin{aligned} R &= \left(\frac{t_{0.05/2, 10-1} \cdot 0.143}{0.05} \right) \\ &= \left(\frac{2.262 \times 0.143}{0.05} \right) \\ &= 6.469 = 7 \quad \text{รอบทำซ้ำ} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้จำนวนรอบทำซ้ำในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm เท่ากับ

$$\begin{aligned} R &= \left(\frac{2.262 \times 0.178}{0.05} \right) \\ &= 8.045 = 9 \quad \text{รอบทำซ้ำ} \end{aligned}$$

ตารางที่ 14 การหาจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสมในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ระยะต่าง ๆ

การสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ระยะต่าง ๆ (mm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm) S_0	รอบทำซ้ำเริ่มต้น R_0	ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ \mathcal{E}	ระดับนัยสำคัญ α	รอบทำซ้ำที่เหมาะสม R
70	0.189	10	0.05	0.05	9
80	0.103	10	0.05	0.05	5
90	0.195	10	0.05	0.05	9
100	0.143	10	0.05	0.05	7

ตารางที่ 15 การหาจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสมในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาดต่าง ๆ

การสอบเทียบเกจบล็อกขนาดต่าง ๆ (mm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm) S_0	รอบทำซ้ำเริ่มต้น R_0	ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ \mathcal{E}	ระดับนัยสำคัญ α	รอบทำซ้ำที่เหมาะสม R
70	0.171	10	0.05	0.05	8
80	0.095	10	0.05	0.05	5
90	0.207	10	0.05	0.05	10
100	0.178	10	0.05	0.05	9

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการทดลองการสอบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 16 แสดงผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 70 mm จำนวน 10 ครั้ง ตารางที่ 20 แสดงค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 70 mm

ตารางที่ 17 แสดงผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 80 mm จำนวน 10 ครั้ง ตารางที่ 21 แสดงค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 80 mm

ตารางที่ 18 แสดงผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 90 mm จำนวน 10 ครั้ง ตารางที่ 22 แสดงค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 90 mm

ตารางที่ 19 แสดงผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 100 mm จำนวน 10 ครั้ง ตารางที่ 23 แสดงค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 100 mm

ตารางที่ 16 ผลการวัดเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 70 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	69.97561
2	69.97531
3	69.97536
4	69.97553
5	69.97548
6	69.97522
7	69.97533
8	69.97537
9	69.97580
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	69.97545
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.179

ตารางที่ 17 ผลการวัดเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 80 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	79.97249
2	79.97250
3	79.97268
4	79.97254
5	79.97250
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	79.97254
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.079

ตารางที่ 18 ผลการวัดเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 90 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	89.97073
2	89.97062
3	89.97055
4	89.97025
5	89.97024
6	89.97026
7	89.97033
8	89.97027
9	89.97050
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	89.97042
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.186

ตารางที่ 19 ผลการวัดเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 100 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	99.96625
2	99.96632
3	99.96616
4	99.96656
5	99.96647
6	99.96642
7	99.96651
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	99.96638
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.146

ตารางที่ 20 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 70 mm

Quantity X_i	Estimate x_i (mm)	Standard Uncertainty $u(x_i)$ (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient c_i	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom ν_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	70.00036	0.025	0.04	Normal	2	1	0.05300	∞
l_x	69.97545	0.05966	-	Normal	$\sqrt{9}$	1	0.05966	$\sqrt{9}$
δl_{ds}	0	0.02886	0.028	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.04907	∞
δl_{vs}	0	0.0100	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.00600	∞
δl_{x1}	0	0.00058	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	-1	-0.00058	∞
δl_{x2}	0	0.0125	-	Normal	2	-1	-0.01250	∞
δl_{mx}	0	0.00029	-	Rectangular	$2\sqrt{3}$	-1	-0.00029	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.00624	Special	-	-1	-0.00624	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.23240	Special	-	-1	-0.23240	∞
$u(l_x)$							0.06308 μm^2	-
							0.25103	-
$l_s - l_x$	0.02491			Normal	2		0.502	-

ตารางที่ 21 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 80 mm

Quantity X_i	Estimate x_i (mm)	Standard Uncertainty $u(x_i)$ (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient c_i	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom ν_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	79.99927	0.025	0.04	Normal	2	1	0.05700	∞
l_x	79.97254	0.03532	-	Normal	$\sqrt{5}$	1	0.03532	$\sqrt{5}$
δl_{ds}	0	0.02886	0.028	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.05196	∞
δl_{vs}	0	0.0100	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.00600	∞
δl_{x1}	0	0.00058	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	-1	- 0.00058	∞
δl_{x2}	0	0.0125	-	Normal	2	-1	- 0.01250	∞
δl_{mx}	0	0.00029	-	Rectangular	$2\sqrt{3}$	-1	- 0.00029	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.00713	Special	-	-1	- 0.00713	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.2656	Special	-	-1	- 0.2656	∞
$u(l_x)$						0.07798 μm^2		-
						0.2792		-
$l_s - l_x$	0.02673			Normal	2	0.559		-

ตารางที่ 22 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 90 mm

Quantity X_i	Estimate x_i (mm)	Standard Uncertainty $u(x_i)$ (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient c_i	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom ν_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	90.00063	0.025	0.04	Normal	2	1	0.0610	∞
l_x	89.97042	0.062	-	Normal	$\sqrt{9}$	1	0.062	$\sqrt{9}$
δl_{ds}	0	0.02886	0.028	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.05484	∞
δl_{vs}	0	0.0100	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.00600	∞
δl_{x1}	0	0.00058	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	-1	- 0.00058	∞
δl_{x2}	0	0.0125	-	Normal	2	-1	- 0.0125	∞
δl_{mx}	0	0.00029	-	Rectangular	$2\sqrt{3}$	-1	- 0.00029	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.00802	Special	-	-1	- 0.00802	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.2988	Special	-	-1	- 0.2988	∞
$u(l_x)$							0.1001 μm^2	-
							0.3164	-
$l_s - l_x$	0.03021			Normal	2		0.633	-

ตารางที่ 23 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm

Quantity Xi	Estimate xi (mm)	Standard Uncertainty u(xi) (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient ci	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom ν_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	100.00051	0.025	0.04	Normal	2	1	0.06500	∞
l_x	99.96638	0.05518	-	Normal	$\sqrt{7}$	1	0.05518	$\sqrt{7}$
δl_{ds}	0	0.02886	0.028	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.05770	∞
δl_{vs}	0	0.0100	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.00600	∞
δl_{x1}	0	0.00058	-	Rectangular	$\sqrt{3}$	-1	- 0.00058	∞
δl_{x2}	0	0.0125	-	Normal	2	-1	- 0.01250	∞
δl_{mx}	0	0.00029	-	Rectangular	$2\sqrt{3}$	-1	- 0.00029	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.0089	Special	-	-1	- 0.00890	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.3320	Special	-	-1	- 0.33200	∞
$u(l_x)$							0.12109 μm ²	-
							0.34798	-
$l_s - l_x$	0.03413			Normal	2		0.6959	-

2. ผลการทดลองการสอบเทียบเครื่องวัดด้วยวิธีแบบโดยตรง

ผลการวัดเกจบล็อกในการสอบเทียบนี้ได้รวมค่าแก้ไข (Correction) ที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นเอาไว้แล้ว

ตารางที่ 24 แสดงผลการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 70 mm จำนวน 8 ครั้ง ตารางที่ 28 แสดงค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเกจบล็อกระดับ 2 ขนาดระบุ 70 mm

ตารางที่ 25 แสดงผลการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 80 mm จำนวน 5 ครั้ง ตารางที่ 29 แสดงค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเกจบล็อกระดับ 2 ขนาดระบุ 80 mm

ตารางที่ 26 แสดงผลการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 70 mm จำนวน 10 ครั้ง ตารางที่ 30 แสดงค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเกจบล็อกระดับ 2 ขนาดระบุ 90 mm

ตารางที่ 27 แสดงผลการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 70 mm จำนวน 9 ครั้ง ตารางที่ 31 แสดงค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเกจบล็อกระดับ 2 ขนาดระบุ 100 mm

ตารางที่ 32 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 70 – 100 mm ระหว่างเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นกับผลการสอบเทียบที่ได้จากสถาบันมาตรวิทยา

ตารางที่ 24 ผลการวัดแถบสีออกขนาดระบุ 70 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	70.00046
2	70.00041
3	70.00023
4	70.00059
5	70.00042
6	70.00067
7	70.00056
8	70.00043
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	70.00048
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.135

ตารางที่ 25 ผลการวัดแถบสีออกขนาดระบุ 80 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	79.99953
2	79.99965
3	79.99942
4	79.99946
5	79.99943
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	79.99950
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.095

ตารางที่ 26 ผลการวัดแถบสีออกขนาดระบุ 90 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	90.00338
2	90.00401
3	90.00395
4	90.00391
5	90.00411
6	90.00401
7	90.00401
8	90.00401
9	90.00411
10	90.00411
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	90.00396
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.215

ตารางที่ 27 ผลการวัดแถบสีออกขนาดระบุ 100 mm

ลำดับการวัด	ผลการวัดที่ได้ (mm)
1	100.00242
2	100.00259
3	100.00298
4	100.00288
5	100.00283
6	100.00303
7	100.00283
8	100.00283
9	100.00273
ความยาวเฉลี่ย (\bar{x})	100.00279
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	0.189

ตารางที่ 28 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบโดยตรงในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาดระบุ 70 mm

Quantity Xi	Estimate xi (mm)	Standard Uncertainty u(xi) (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient ci	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom v_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	70.00035	0.25167	-	Normal	2	1	0.25167	∞
l_x	70.00048	0.0477	-	Normal	$\sqrt{8}$	1	0.0477	$\sqrt{8}$
δl_{vx}	0	0.006	-	Regtangular	$\sqrt{3}$	-1	-0.006	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.00624	Special	-	-1	-0.00624	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.2324	Special	-	-1	-0.2324	∞
$u(l_x)$							0.1196 μm ²	-
							0.3459	-
$l_s - l_x$	-0.00013			Normal		k = 2	0.692	-

ตารางที่ 29 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบโดยตรงในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาดระบุ 80 mm

Quantity Xi	Estimate xi (mm)	Standard Uncertainty u(xi) (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient ci	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom ν_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	79.99926	0.27881	-	Normal	2	1	0.27881	∞
l_x	79.99950	0.04248	-	Normal	$\sqrt{5}$	1	0.04248	$\sqrt{5}$
δl_{vx}	0	0.006	-	Regtangular	$\sqrt{3}$	-1	- 0.006	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.00713	Special	-	- l	- 0.00713	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.2656	Special	-	- l	- 0.2656	∞
$u(l_x)$							0.14963 μm ²	-
							0.3868	-
$l_s - l_x$	- 0.00024			Normal		k = 2	0.774	-

ตารางที่ 30 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบโดยตรงในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาดระบุ 90 mm

Quantity Xi	Estimate xi (mm)	Standard Uncertainty u(xi) (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient ci	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom v_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	90.00062	0.58759	-	Normal	2	1	0.58759	∞
l_x	90.00396	0.06798	-	Normal	$\sqrt{10}$	1	0.06798	$\sqrt{10}$
δl_{vx}	0	0.006	-	Regtangular	$\sqrt{3}$	-1	-0.006	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.00802	Special	-	-1	-0.00802	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.2988	Special	-	-1	-0.2988	∞
$u(l_x)$							0.4392 μm ²	-
							0.6627	-
$l_s - l_x$	-0.00240			Normal		k = 2	1.325	-

ตารางที่ 31 ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบตรงในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาดระบุ 100 mm

Quantity X_i	Estimate x_i (mm)	Standard Uncertainty $u(x_i)$ (μm)		Probability Distribution	Devisor	Sensitivity Coefficient c_i	Uncertainty Contribution $u_i(y)$ (μm)	Effective Degree of Freedom ν_{eff}
		Absolute	Relative					
l_s	100.00051	0.34622	-	Normal	2	1	0.34622	∞
l_x	100.00279	0.0630	-	Normal	$\sqrt{9}$	1	0.0630	$\sqrt{9}$
δl_{vx}	0	0.006	-	Regtangular	$\sqrt{3}$	-1	-0.006	∞
$\bar{\alpha} \cdot \delta t$	0	-	0.0089	Special	-	-1	-0.0089	∞
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	0	-	0.3320	Special	-	-1	-0.3320	∞
$u(l_x)$							0.23417 μm^2	-
							0.4839	-
$l_s - l_x$	-0.00228			Normal		k = 2	0.9678	-

3. การเปรียบเทียบผลการวัด

เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลการวัดที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องจะต้องนำผลการวัดดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่เครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพ และมาตรฐานสูงกว่าเป็นที่ยอมรับและได้รับความเชื่อถือ จึงจะสามารถยืนยันได้ว่าผลการวัดจากการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำหรือไม่ ในการทดลองนี้ นำผลวัดที่ได้จากการทดลองไปทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวัดจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 การเปรียบเทียบผลการวัด

ความยาว มาตรฐาน (mm)	ความยาวจาก การสอบเทียบ (mm)	ความยาวจาก การทดลอง (mm)	ความไม่ แน่นอนจาก การสอบเทียบ (μm)	ความไม่ แน่นอนจาก การทดลอง (μm)	E_n Ratio
70	70.00036	70.00048	± 0.085	± 0.694	0.1716
80	79.99927	79.99950	± 0.090	± 0.774	0.2952
90	90.00063	90.00396	± 0.095	± 1.325	2.5067
100	100.00051	100.00279	± 0.100	± 0.968	2.3429

วิจารณ์

จากขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นนั้น ผลการวัดที่ได้มีค่าที่แตกต่างจากเกจบล็อกมาตรฐานอ้างอิงค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 10 เนื่องจากเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีส่วนประกอบหลายชิ้นส่วน และอาจเกิดมาจากความผิดพลาดในการประกอบชิ้นส่วนเหล่านั้น แต่จากขั้นตอนนี้สามารถนำเอาค่าความแตกต่างระหว่างความยาวของเกจบล็อกมาตรฐานอ้างอิงกับผลที่ได้จากการวัด หรือค่าแก้ไข (Correction) มารวมในขั้นตอนการสอบเทียบเกจบล็อกได้ แต่ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ระยะต่าง ๆ ที่ได้จากขั้นตอนนี้ยังมีค่าค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกมาตรฐานที่มีใช้กันในปัจจุบัน

จากขั้นตอนการสอบเทียบเกจบล็อกนั้นจะทำต่อจากขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นทันที เนื่องจากการทดลองต้องทำร่วมกับเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เมื่อมีการถอดประกอบเลเซอร์ทุกครั้งต้องมีการเซทค่าของเลเซอร์ใหม่ทุกครั้ง เกจบล็อกที่ใช้ในการทดลองนี้ได้รับความอนุเคราะห์ในการทดสอบการสอบเทียบด้วยการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์จากห้องปฏิบัติการความยาว สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยเกจบล็อกที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเกจบล็อกระดับ 2 ที่ผ่านการรับรองการสอบเทียบจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติแล้ว โดยผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 24 ถึงตารางที่ 31 แสดงให้เห็นว่าค่าความไม่แน่นอนในการวัดยังมีค่าที่ใหญ่อยู่มากเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานในตารางที่ 6

จากขั้นตอนการเปรียบเทียบผลการวัดด้วยวิธี $E_n Ratio$ นั้นผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 32 จะเห็นได้ว่าการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 70 mm และ 80 mm มีค่า $E_n Ratio$ อยู่ในช่วง ± 1 ซึ่งถือว่าผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการสอบเทียบจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาตินั้นไม่มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อดูจากผลการทดลองในตารางที่ 32 นั้นจะเห็นว่าค่าความยาวที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกันแต่ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานยังมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก ส่วนการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 90 mm และ 100 mm มีค่า $E_n Ratio$ ไม่อยู่ในช่วง ± 1 ซึ่งถือว่าผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการสอบเทียบจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาตินั้นมีความแตกต่างกัน หมายความว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั้นถ้าจะนำไปใช้เป็นค่าในการอ้างอิงต้องลดความน่าเชื่อถือลง เมื่อดูจากผลการ

ทดลองในตารางที่ 32 นั้นจะเห็นว่าค่าความยาวและค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานยังมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากจึงต้องมีการปรับปรุงต่อไป

จากการทดลองทั้งหมดเป็นไปตามข้อกำหนดขององค์ระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน ดังนั้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ทำการพัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสอบเทียบเกจบล็อกระดับ 2 ได้แต่ต้องมีการพัฒนาให้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานมีค่าลดลง ดังจะกล่าวต่อไปในสรุปและข้อเสนอแนะต่อไป



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ทำการประมวลหาค่าความไม่แน่นอนของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น และประมวลค่าความยาวจากการสอบเทียบเกจบล็อกด้วยเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น และการสอบเทียบเกจบล็อก ซึ่งในการทดลองจะทำการสอบเทียบเกจบล็อกระดับ 2 ขนาด 70 mm, 80 mm, 90 mm, และ 100 mm ตามลำดับ ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของระบบที่ได้นำเสนอจะพิจารณาจากค่าความไม่แน่นอนของเกจบล็อก ค่าความไม่แน่นอนของแหล่งกำเนิดแสง อุปกรณ์เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ความคลาดเคลื่อนของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ทำการพัฒนาขึ้น และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยในการสอบเทียบเกจบล็อกนี้ให้เป็นไปตามข้อกำหนดขององค์กรระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization, ISO)

โดยการขั้นตอนที่ 1 ทำการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นที่ระยะ 70 mm, 80 mm, 90 mm, และ 100 mm ตามลำดับ โดยใช้เกจบล็อกระดับ 2 ที่ผ่านการสอบเทียบจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติเป็นมาตรฐานอ้างอิง ได้ผลการสอบเทียบดังนี้

การสอบเทียบที่ระยะ 70 mm ได้ค่าความยาวที่เลเซอร์วัดได้เท่ากับ 69.97545 mm ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเท่ากับ $0.502 \mu\text{m}$ และได้ค่าความแตกต่างระหว่างความยาวของเกจบล็อกมาตรฐานอ้างอิงกับค่าความยาวที่วัดได้เท่ากับ 0.02491 mm

การสอบเทียบที่ระยะ 80 mm ได้ค่าความยาวที่เลเซอร์วัดได้เท่ากับ 79.97254 mm ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเท่ากับ $0.559 \mu\text{m}$ และได้ค่าความแตกต่างระหว่างความยาวของเกจบล็อกมาตรฐานอ้างอิงกับค่าความยาวที่วัดได้เท่ากับ 0.02673 mm

การสอบเทียบที่ระยะ 90 mm ได้ค่าความยาวที่เลเซอร์วัดได้เท่ากับ 89.97042 mm ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเท่ากับ $0.633 \mu\text{m}$ และได้ค่าความแตกต่างระหว่างความยาวของเกจบล็อกมาตรฐานอ้างอิงกับค่าความยาวที่วัดได้เท่ากับ 0.03021 mm

การสอบเทียบที่ระยะ 100 mm ได้ค่าความยาวที่เลเซอร์วัดได้เท่ากับ 99.96638 mm ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องสอบเทียบเท่ากับ $0.696 \mu\text{m}$ และได้ค่าความแตกต่างระหว่างความยาวของเกจบล็อกมาตรฐานอ้างอิงกับค่าความยาวที่วัดได้เท่ากับ 0.03413 mm

การขั้นตอนที่ 2 ทำการสอบเทียบเกจบล็อกระดับ 2 ขนาด 70 mm, 80 mm, 90 mm, และ 100 mm ตามลำดับ โดยใช้เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ทำการพัฒนาขึ้นเป็นมาตรฐานอ้างอิง โดยในขั้นตอนนี้ได้รวมเอาค่าแก้ไขที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มารวมไว้ในผลการทดลองแล้ว ได้ผลการสอบเทียบดังนี้

การสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 70 mm ได้ความยาวเท่ากับ 70.00048 mm มีค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่ากับ $\pm 0.692 \mu\text{m}$ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้ได้ค่า $E_n \text{ Ratio}$ เท่ากับ 0.1716

การสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 80 mm ได้ความยาวเท่ากับ 79.99950 mm มีค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่ากับ $\pm 0.774 \mu\text{m}$ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้ได้ค่า $E_n \text{ Ratio}$ เท่ากับ 0.2952

การสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 90 mm ได้ความยาวเท่ากับ 90.00396 mm มีค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่ากับ $\pm 1.325 \mu\text{m}$ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้ได้ค่า $E_n \text{ Ratio}$ เท่ากับ 2.5067

การสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 100 mm ได้ความยาวเท่ากับ 100.00279 mm มีค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่ากับ $\pm 0.968 \mu\text{m}$ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้ได้ค่า $E_n \text{ Ratio}$ เท่ากับ 2.3429

เมื่อทำเปรียบเทียบผลการวัดด้วยสมการ $E_n \text{ Ratio}$ ระหว่างผลการวัดจากห้องปฏิบัติการของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งถือเป็นห้องปฏิบัติการที่สามารถเชื่อถือได้กับผลการทดลองด้วยการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ในการวัด ผลการเปรียบเทียบที่ได้มีค่า $E_n \text{ Ratio}$ ดังตารางที่ 32 ซึ่งในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 70 mm และ 80 mm มีค่า $E_n \text{ Ratio}$ อยู่ในช่วง ± 1 ทำ

ให้สามารถสรุปได้ว่าผลการวัดทั้งสองไม่มีความแตกต่างกัน ส่งผลให้งานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้สามารถสรุปได้ว่า เครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถนำไปใช้ในการสอบเทียบเกจบล็อกระดับ 2 ขนาด 70 mm และ 80 mm ได้ แต่ในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 90 mm และ 100 mm มีค่า E_n Ratio ไม่อยู่ในช่วง ± 1 ซึ่งถือว่าผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการสอบเทียบจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาตินั้นมีความแตกต่างกัน หมายความว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั้นถ้าจะนำไปใช้เป็นการอ้างอิงต้องลดความน่าเชื่อถือลง ดังนั้นก่อนที่จะนำเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานจริงต้องมีการพัฒนาให้ค่าความยาวที่วัดได้ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน และค่า E_n Ratio มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกมาตรฐานที่มีใช้ในปัจจุบันเสียก่อน โดยมีวิธีการดังจะกล่าวในข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ

จากการสังเกตพบว่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากการประยุกต์ใช้ไลเซนเซอร์อินเตอร์เฟซโรมิเตอร์ของเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นยังมีขนาดใหญ่อยู่มาก ทำให้ผลการวัดไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร กล่าวคือความเป็นไปได้ของผลการวัดอยู่ในช่วงที่กว้างมากเกินไป ความไม่แน่นอนมาตรฐานในที่นี้คือ ขอบเขตของความคลาดเคลื่อน ภายใต้เงื่อนไขของกระบวนการวัดที่ได้กำหนดไว้ ความไม่แน่นอนในการวัดนี้จะบอกถึงลักษณะการแจกแจงของค่าที่ได้จากการวัดซ้ำ ๆ กัน ดังนั้นความไม่แน่นอนไม่ใช่ความผิดพลาดเป็นเพียงการประมาณขอบเขตของความผิดพลาดเท่านั้น และความไม่แน่นอนมาตรฐานนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลการวัดว่าดีมากน้อยเพียงใด แสดงให้เห็นว่ายิ่งได้ช่วงของความไม่แน่นอนกว้างมากเท่าไร ขอบเขตของข้อมูลที่เป็นไปได้ยิ่งกว้างมากเท่านั้น ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความผิดพลาดจากค่าจริงจึงมากขึ้นตามไป กล่าวอีกนัยหนึ่งคือผลที่ได้มีความแม่นยำน้อยลงนั่นเอง

ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานอยู่ในช่วง $\pm 0.502 \mu\text{m}$ ถึง $\pm 1.696 \mu\text{m}$ โดยเมื่อทำการตรวจสอบจากตารางการหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานในการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่ระยะต่าง ๆ ตามตารางที่ 20 ถึง ตารางที่ 23 สาเหตุที่ส่งผลให้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานมีค่ามากคือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากผลต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะของเกจบล็อกกับเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น กับผลต่างของอุณหภูมิของเกจบล็อกกับเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกขณะทำการทดลอง

($\delta\alpha$, $\Delta\bar{t}$) โดยวิธีการพัฒนาต่อไปเพื่อลดค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่เกิดจากส่วนนี้สามารถทำได้ดังนี้

1. ทำให้คุณสมบัติของเกจบล็อกและเครื่องสอบเทียบมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด และมีการแปรผันของอุณหภูมิในการทดลองน้อยที่สุด ดังนี้

- ทำการทดลองในห้องทดลองมาตรฐานที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้
- ก่อนทำการทดลองต้องให้เกจบล็อกและเครื่องสอบเทียบอยู่ในอุณหภูมิที่จะทำการทดลองอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
- ผู้ทำการทดลองต้องไม่ให้ส่วนหนึ่งส่วนใดของร่างกายสัมผัสกับเกจบล็อกและเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกเพื่อป้องกันอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

2. ทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะของเกจบล็อกกับเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการปรับปรุงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องสอบเทียบเกจบล็อก

ขั้นตอนการสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น ในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 70 mm และ 80 mm นั้นผลการวัดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดที่ได้จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ แต่ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานแตกต่างกันค่อนข้างมาก เป็นเหตุผลเดียวกับขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น แต่ในการสอบเทียบเกจบล็อกขนาด 90 mm และ 100 mm นั้นผลการวัดที่ได้แตกต่างจากผลการวัดของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติค่อนข้างมาก จากการวิเคราะห์สาเหตุเกิดมาจาก

1. ในขั้นตอนการสอบเทียบเกจบล็อกจะต้องมีการเซทค่าที่หัววัดให้หัววัดอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางตามภาพที่ 34 แต่เมื่อทำการเลื่อนหัววัดกำหนดแรงออกเพื่อทำการสอบเทียบเกจบล็อกอาจเกิดการเบี่ยงเบนของหัววัดอันเนื่องมาจากแรงสไลด์ที่ยังระยะทางมากขึ้น (เกจบล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้น) ก็จะมีค่าความเบี่ยงเบนมากขึ้น

2. ในขั้นตอนการสอบเทียบเกจบล็อกนั้นแรงที่หัววัดกระทำต่อเกจบล็อกต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดคือ 2 N แต่เนื่องจากการเบี่ยงเบนของหัววัดจะส่งผลให้แรงที่หัววัดกระทำต่อ

เกจบล็อกเกิดการเบี่ยงเบนไปตามองศาที่หัววัดเบี่ยงเบนไป ดังนั้นแรงที่หัววัดกระทำต่อเกจบล็อก จึงไม่ใช่ $2 N$ ตามที่ต้องการจึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดได้



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จิตติภูมิ ดอกขยอ. 2551. การประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ในการวัดความกลม.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศชนัน เหลืองไพบุลย์. 2549. สถิติวิศวกรรม. สำนักพิมพ์
ท้อป, กรุงเทพฯ. แปลจาก D.C., Montgomery and G.C., Runger. **Applied Statistics
and Probability for Engineers.** ALL RIGHTS RESERVED, New York.

เขาวลัยณ์ ล้อมรีน. 2546. การสอบเทียบแท่งเทียบมาตรฐานด้วยเทคนิคการแทรกสอดทางแสง.
วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 51 (163): 5.

สุรพล รักวิชัย. 2544. เลเซอร์ ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้. เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า,
กรุงเทพฯ. แปลจาก J., Wilson and J.F.B., Hawkes. **Laser Principles and
Applications.** Prentice-Hall, London.

สมนึก บุญพาไสว. 2550. การวัด และเครื่องมือวัด. ครั้งที่ 1. ท้อป, กรุงเทพฯ.

อัจฉรา เจริญสุข. 2551. Inter Traceability, น. 35. การสอบเทียบเครื่องมือวัด. แผนก
วารสารวิชาการ ฝ่ายสำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

_____. 2551. M3003, น. 66. การสอบเทียบเครื่องมือวัด. แผนกวารสารวิชาการ ฝ่ายสำนักพิมพ์
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

อรรวรรณ ไตรรัตน์ชัชวาล. 2543. การประยุกต์ใช้ไมเคลสันอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ในการวัดความ
คลาดเคลื่อนของไมโครมิเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี.

Douglas, C.M. 2005. **Design and Analysis of Experiments.** 6th ed. John Wiley & Sons, Inc.,
New York.

EA-4/02 (European Co-operation for Accreditation). 1999. **Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.** First ed., Paris.

Hariharab, P. 1992. **Basics of Interferometry.** Academic Press, Boston.

ISO (International Standardisation Organisation). 1993. **Guide to the expression of uncertainty in measurement.** First ed., Genève.

UKAS (United Kingdom Accreditation Service). 2007. **M3003 Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement.** 2nd ed., Feltham.



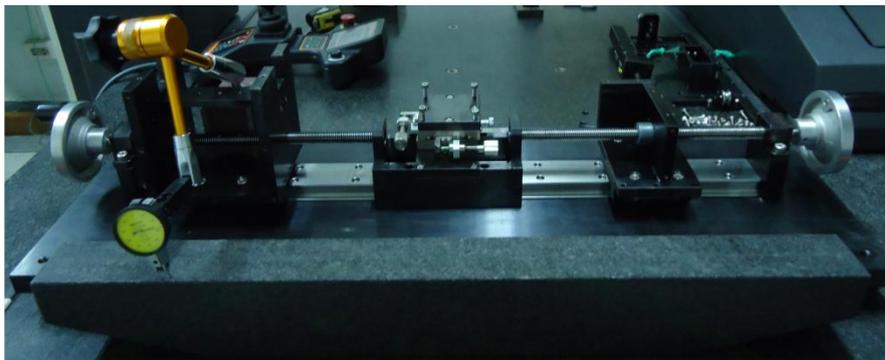
ภาคผนวก

การปรับแต่งเครื่องสอบเทียบเกจบล็อกที่พัฒนาขึ้น

1. การปรับแต่งแกนเลื่อนหลัก

ตารางผนวกที่ 1 การปรับแต่งแกนเลื่อนหลัก

ระยะแกนเลื่อน (cm)	ค่าความคลาดเคลื่อน (μm)
0	0
2	1
4	0
6	1
8	0
10	0
12	0
14	2
16	0
18	0
20	0
22	0
24	0
26	2
28	0
30	2
32	0
34	0
36	1
38	2
40	1

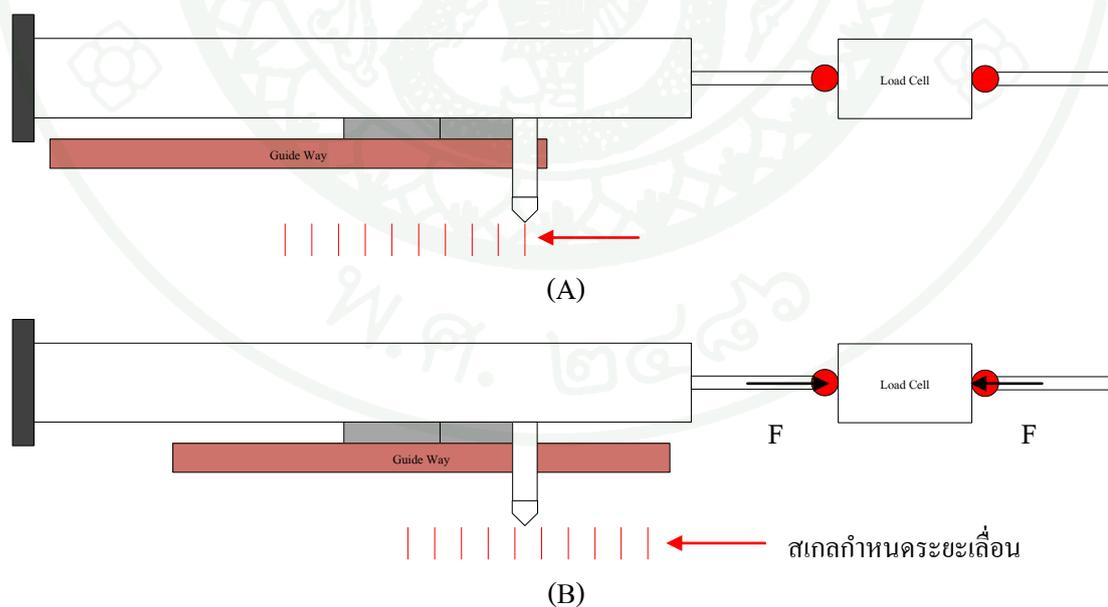


ภาพผนวกที่ 1 การปรับแต่งแกนเลื่อนหลัก

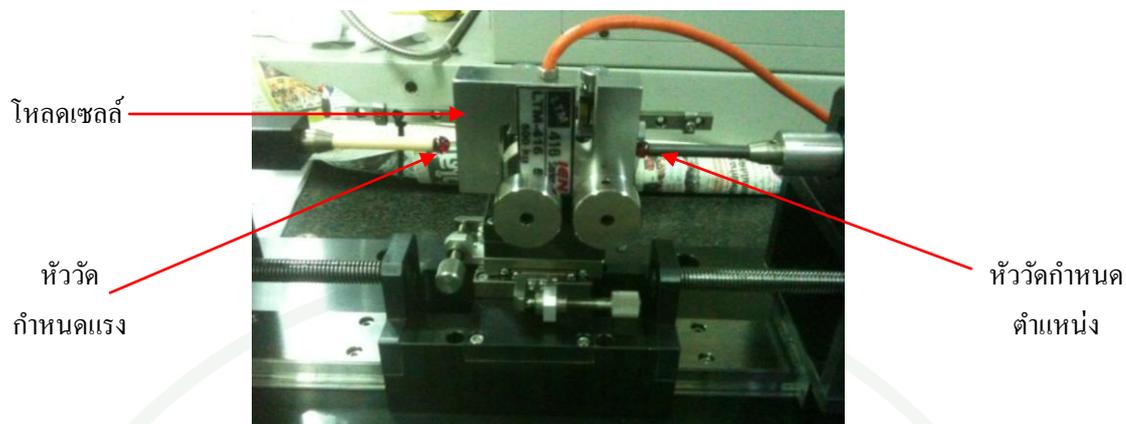
2. การปรับแต่งชุดหัววัดกำหนดแรง

2.1 การทดสอบแรงกดของหัววัดที่กระทำต่อเกจบล็อก

การทดสอบแรงกดของหัววัดกำหนดแรงกระทำเพื่อเป็นการหาแรงที่กระทำต่อเกจบล็อก และควบคุมแรงที่จะกดที่ผิวของเกจบล็อกให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด



ภาพผนวกที่ 2 การทดสอบแรงกดของหัววัดที่ยุบตัวในระยะเวลาต่างๆ



ภาพผนวกที่ 3 ภาพการทดสอบแรงกดของหัววัด

ตารางผนวกที่ 2 แสดงแรงกดที่กระทำที่ระยะต่างๆ

น้ำหนักถ่วง (g)	ระยะเลื่อน (mm)	แรงกดที่วัดได้ (kg)
ไม่มีน้ำหนักถ่วง มีเฉพาะแท่นถ่วงน้ำหนัก	0	0
	5	0.1
	10	0.2
	15	0.2
	20	0.2
	25	0.2
	30	0.2

แรงกดมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบเกลบล็อกดด้วยหัววัดนั้นเท่ากับ 2 N หรือประมาณ 0.2 kg ดังนั้นระยะเลื่อนที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของชุดหัววัดกำหนดแรงคือ ช่วงระยะเลื่อนระหว่าง 10 – 30 mm

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	เรือเอกอัฐภูมิ เหลืองทองคำ
เกิดวันที่	10 มกราคม 2521
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(เครื่องกลเรือ)โรงเรียนนายเรือ
ตำแหน่งปัจจุบัน	นักวิจัย 2
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) กระทรวงกลาโหม
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	งานประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัย มหาวิทยาลัยพายัพ 2554 เรื่องการศึกษาการประยุกต์ใช้เลเซอร์อินเทอร์เน็ตเพียโร มิเตอร์ในการสอบเทียบเกจบล็อกลูก
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนส่วนตัว