ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

วศ
กฟ
อว 5

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 6ว

เรื่องที่ 1

การสอบเทียบมุมมาตรฐานชนิดโพลีกอน

โดย

นายวันชัย ชินชูศักดิ์
นักวิทยาศาสตร์ 5

กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ
กองฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง

นักวิทยาศาสตร์ 6ว

เรื่องที่ 1

การสอบเทียบมุมมาตรฐานชนิดโพลีกอน

กส
เลขหมู่ ๓๗
ส๓ 5
เลขทะเบียน ๙๙๐๘
วันที่ 11 พค. ๒ 44

โดย

นายวันชัย ชินชูศักดิ์

นักวิทยาศาสตร์ 5

ด้วยอภินันทนาการ
จาก
กส.

กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ

กองฟิสิกส์และวิศวกรรม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
สารบัญตาราง	ก
สารบัญภาพ	ข
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ปัญหาและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษาวิจัย	2
1.4 ระยะเวลาของการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 หลักการสอบเทียบ	3
2.1 การสอบเทียบโพลีกอนด้วยเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์สองเครื่อง	4
2.2 การสอบเทียบโพลีกอนด้วยเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์เครื่องเดียว	6
บทที่ 3 วิธีการสอบเทียบ	7
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ	7
3.2 การสอบเทียบโพลีกอนด้วยเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์	7
3.3 ขั้นตอนการสอบเทียบโพลีกอน	8
บทที่ 4 ผลการสอบเทียบและวิเคราะห์ผล	9
4.1 ผลการสอบเทียบ	9
4.2 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบ	11
บทที่ 5 วิจารณ์ผลการสอบเทียบและข้อเสนอแนะ	14
5.1 วิจารณ์ผลการสอบเทียบ	14
5.2 ข้อเสนอแนะ	14
บทที่ 6 สรุปผลการสอบเทียบ	15
กิตติกรรมประกาศ	16
เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม	17
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูล ตารางวิเคราะห์ผล และอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการสอบเทียบ	18
ภาคผนวก ข ความไม่แน่นอนการสอบเทียบมุมมาตรฐาน	29

บทคัดย่อ

ในการสอบเทียบโพลีกอน(Polygon)นั้นทำได้โดยใช้เครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์(Auto Collimator) ซึ่งเป็นเครื่องวัดมุมที่มีความแม่นยำสูง ±0.20 ฟิลิปดา ใช้หลักการของลำแสงตรง จากลำแสงเลเซอร์ เพื่อวัดเปรียบเทียบมุมระหว่างหน้าโพลีกอน จากการวิจัยเพื่อถ่ายทอดความถูกต้องให้กับโพลีกอนพบว่าค่าผิดพลาดอันเกิดจากการวางโพลีกอนกับแท่นโรตารี่เทเบิ้ลเยื้องศูนย์กลางมากกว่า ± 1500.00 ฟิลิปดา เกินกว่าความสามารถเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์จะวัดได้ จึงได้การออกแบบแท่นวางโพลีกอนเพื่อแก้ปัญหาและลดค่าความผิดพลาดได้น้อยกว่า ±20.00 ฟิลิปดา นอกจากนี้เทคนิคการสอบเทียบนี้ยังสามารถสอบเทียบโรตารี่เทเบิ้ล(Rotary Table)ไปพร้อมๆกันได้อีกด้วย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลการสอบเทียบโพลีกอน	5
ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบโพลีกอน 8 หน้าและโรตารี่เทเบิ้ล	10
ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบโพลีกอน 12 หน้าและโรตารี่เทเบิ้ล	10
ตารางที่ 4 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบโพลีกอน 8 หน้า	12
ตารางที่ 5 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบโพลีกอน 12 หน้า	13
ตารางที่ 6 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 0 และ 45 องศา	18
ตารางที่ 7 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 90 และ 135 องศา	19
ตารางที่ 8 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 180 และ 225 องศา	20
ตารางที่ 9 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 270 และ 315 องศา	21
ตารางที่ 10 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 330 และ 0 องศา	22
ตารางที่ 11 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 30 และ 60 องศา	23
ตารางที่ 12 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 90 และ 120 องศา	24
ตารางที่ 13 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 150 และ 180 องศา	25
ตารางที่ 14 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 210 และ 240 องศา	26
ตารางที่ 15 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 270 และ 300 องศา	27
ตารางที่ 16 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของโพลีกอน	31
ตารางที่ 17 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของโรตารี่เทเบิ้ล	32

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 การวัดการสะท้อนกลับลำแสงตรงของเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์	3
รูปที่ 2 ลักษณะทั่วไปของโพลีกอน	3
รูปที่ 3 การสอบเทียบโพลีกอนด้วยออโต้คอลลิเมเตอร์สองเครื่อง	4
รูปที่ 4 แสดงการวัดโพลีกอนด้วยเครื่องคอลลิเมเตอร์เครื่องเดียว	6
รูปที่ 5 การติดตั้งชุดออโต้คอลลิเมเตอร์เครื่องเดียว	7
รูปที่ 6 แสดงการปรับออโต้คอลลิเมเตอร์จาก viewfinder prism	8
รูปที่ 7 การจัดตั้งโพลีกอน โรตารี่เทเบิ้ล และออโต้คอลลิเมตอร์ให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน	8
รูปที่ 8 ค่าผิดพลาดจากการวางโพลีกอนเยื้องศูนย์กลาง	11
รูปที่ 9 การออกแบบแท่นวางโพลีกอนทั้งสองชนิด(45 องศา และ 30 องศา)	28

บทที่ 1

บทนำ

การวัดมุมเป็นส่วนหนึ่งของการวัดทางมิติและมีการสอบย้อนกลับมาตรฐานไปยังความยาวมาตรฐานเช่นเดียวกันกับการวัดทางมิติอื่นๆ หรืออาจกล่าวได้ว่ามุมเป็นส่วนหนึ่งของการวัดความยาวซึ่งมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิดด้วยกัน เราอาจแบ่งการวัดมุมออกเป็นสองแบบด้วยกัน แบบแรกเป็นการวัดมุมที่ขนาดใหญ่หรือมากกว่า 1 องศา ตามที่เห็นเครื่องมือวัดอยู่ทั่วไป และต้องการความถูกต้องไม่มากนัก เช่นโปรแทรคเตอร์ แองกูลาร์คอมบิเนชั่น แบบที่สองเป็นการวัดมุมที่มีขนาดเล็กหรือน้อยกว่า 1 องศา เป็นเครื่องมือที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ระดับน้ำ เกจวัดมุม เครื่องวัดความลาดเอียง

งานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงการสอบเทียบมุมมาตรฐานหรือโพลีกอนโดยใช้เครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ ซึ่งขณะที่สอบเทียบโพลีกอนก็สามารถเทียบเครื่องโรตารี่เทเบิ้ลไปพร้อมๆ กันได้อีกด้วย

1.1 ปัญหาและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันการสอบย้อนมาตรฐานด้านการวัดมุมไม่มีห้องปฏิบัติด้านมาตรวิทยาใดในประเทศให้ความสนใจอย่างจริงจัง ในขณะเดียวกันมีผู้มาขอรับบริการเพื่อขอสอบเทียบเครื่องมือวัดมุมในปริมาณเพิ่มมากขึ้นทุกวัน การศึกษาการสอบเทียบโพลีกอนชนิดความเที่ยงตรงสูงทางห้องปฏิบัติความยาวและมิติ กลุ่มสอบเทียบฯ คาดหวังว่าจะทำให้การสอบย้อนกลับมุมมาตรฐานของประเทศสมบูรณ์แบบครบถ้วนตามมาตรฐานสากล ดังนั้นการศึกษาการสอบเทียบโพลีกอนจึงเป็นการพัฒนาวิธีการวัดค่าความถูกต้องอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้เป็นแนวทางให้หน่วยงานและห้องปฏิบัติการต่างๆ ได้ปฏิบัติตามและใช้บริการสอบย้อนกลับมาตรฐานนี้ นอกจากนี้ยังเป็นแผนรองรับการนำภาคอุตสาหกรรมของประเทศไปสู่มาตรฐานสากล

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการถ่ายทอดความถูกต้องให้กับเครื่องมือ/อุปกรณ์วัดมุมในมาตรฐานระดับความถูกต้องสูงลงมาสู่มาตรฐานระดับต่ำ

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. ศึกษาถึงระบบการถ่ายทอดความถูกต้องทางด้านการวัดมุม

1.4 ระยะเวลาของการศึกษาวิจัย

ใช้เวลาในการวิจัย 4 เดือน ตั้งแต่ ตุลาคม 2539 จนถึง มกราคม 2540

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

รายการดำเนินการ	ช่วงระยะเวลาการดำเนินการวิจัย			
ปีงบประมาณ 2539	ต.ค. 39	พ.ย. 39	ธ.ค. 39	ม.ค. 40
รวบรวมเอกสารทางวิชาการ	←	→		
ศึกษาหลักการจากเอกสารอ้างอิง	←	→		
ดำเนินการจัดเตรียมอุปกรณ์			←	→
เก็บข้อมูลการศึกษาทดลอง			←	→
เขียนรายงานการศึกษาทดลอง				← →
ตรวจสอบแก้ไขคำผิดและข้อบกพร่อง รวมทั้งเพิ่มเติมเนื้อหา				← →

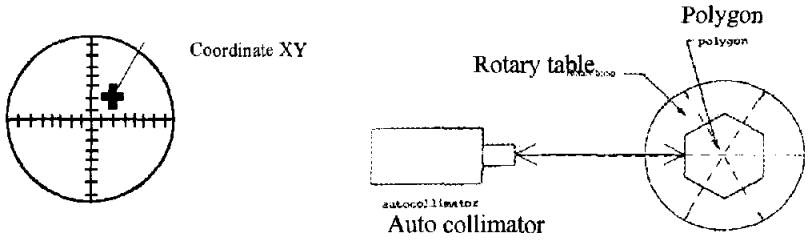
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. ความรู้จากการศึกษาการสอบย้อนกลับมุมมาตรฐาน
2. สามารถสอบย้อนกลับมาตรฐานเครื่องมือวัดมุมภายในห้องปฏิบัติการความยาวและมิติ
3. เพื่อลดปัญหาการส่งเครื่องมือทางด้านมาตรวิทยาของโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการในประเทศไปสอบเทียบยังต่างประเทศ
4. เพื่อเผยแพร่ความรู้ที่ได้จากการวิจัยให้กับภาคอุตสาหกรรมและยังทำให้เกิดการพัฒนาทางด้านผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศ
5. ประยุกต์และเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือ/อุปกรณ์วัดมุมให้มีประโยชน์สูงสุด
6. เป็นแนวทางที่จะนำไปสู่การสร้างเครื่องมือ/อุปกรณ์ทางด้านการสอบเทียบมุมให้มีความแม่นยำเที่ยงตรงสูงต่อไป

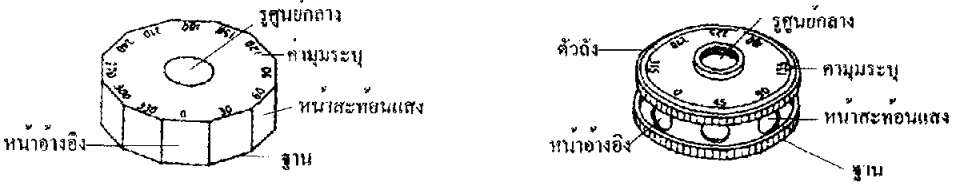
บทที่ 2

หลักการสอบเทียบ

โดยทั่วไปการสอบเทียบโพลีกอน(Polygon)จะใช้เครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์(Auto Collimator) ที่ใช้ลำแสงตรงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความเข้มสูง รูปกากบาทหรือจุดดังรูปที่ 1 ในระบบโคออดิเนตของแนวแกน X และแกน Y ช่วงการวัด +/- 1500.00 ฟิลิปดาทั้งแกน XและY โดยจัดลำแสงให้ตั้งฉากกับหน้ากระจกของโพลีกอนกับหน้าโพลีกอนอ้างอิง(Reference face) เมื่อลำแสงสะท้อนกลับจะปรากฏเครื่องหมายกากบาทที่ตัวเซ็นเซอร์(sensor) โดยจะอ่านเป็นค่ามุมโดยอัตโนมัติ และเมื่อเปลี่ยนให้ลำแสงตั้งฉากกับหน้าถัดไปจะได้ผลต่างของมุมระหว่างหน้าของโพลีกอน เมื่อนำผลต่างมาเปรียบเทียบกันก็จะได้ค่าผิดพลาดในแต่ละหน้า



รูปที่ 1 การวัดการสะท้อนกลับลำแสงตรงของเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์

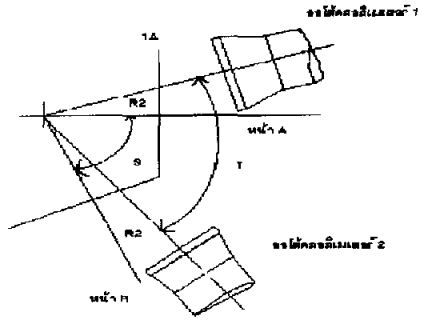


รูปที่ 2 ลักษณะทั่วไปของโพลีกอน

โพลีกอน(Polygon)คือ มุมมาตรฐานชนิดหนึ่งที่บอกค่ามุมสัมพันธ์กันกับจำนวนของหน้ามุม $360^{\circ}/N$ เมื่อ N เท่ากับจำนวนหน้าของโพลีกอน ที่มุมระหว่างหน้าโพลีกอนมีขนาดเท่ากันซึ่งทำจากโลหะขัดเงา หรือกระจก เช่น ชนิด 12 หน้า และชนิด 8 หน้า มุมระหว่างหน้าจะมีขนาดมุมเท่ากับ 30 องศาและ 45 องศา ตามลำดับ เทคนิคการสอบเทียบโพลีกอนโดยทั่วไปมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 2 วิธีด้วยกันดังนี้

2.1 การสอบเทียบโพลีกอนด้วยเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์สองเครื่อง[1]

(Calibrating a precision polygon by using 2 Autocollimators)



รูปที่ 3 การสอบเทียบโพลีกอนด้วยออโต้คอลลิเมเตอร์สองเครื่อง

ค่าความผิดพลาดของโพลีกอน สามารถหาได้โดยใช้เครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ (Auto Collimator) สองเครื่องจัดวางให้ใกล้ๆ หน้าของโพลีกอนเท่ากันดังรูปที่ 3 ถ้า R_1 และ R_2 เป็นค่าที่อ่านได้จากเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ S เป็นมุมระหว่างหน้าแต่ละหน้าของ A กับ B และ T เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์

$$S + R_1 = T + R_2$$

หรือจัดใหม่

$$S = T + (R_2 - R_1) \qquad (1)$$

ถ้าพิจารณาค่าที่ได้จากการวัดโพลีกอนทั้งหมดค่าของ S, T และ $(R_2 - R_1)$ รวมได้เป็น

$$\sum S = \sum T + \sum(R_2 - R_1) \qquad (2)$$

แต่ $\sum S = 360^\circ$ ดังนั้น

$$\sum T + \sum(R_2 - R_1) = 360^\circ \qquad (3)$$

แบ่งจำนวนหน้าของโพลีกอนเท่ากับ n

$$\sum T/n + \sum(R_2 - R_1)/n = 360^\circ/n \qquad (4)$$

$360^\circ/n$ เป็นค่ามุมที่ระบุของโพลีกอน และให้ T เป็นค่าคงที่ ดังนั้นมุมระหว่างเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ทั้งสองจะเป็น $(\sum T)/n = T$ เราจะได้ว่า

$$\frac{360^0}{n} = T + \sum(\frac{R_2 - R_1}{n}) \qquad (5)$$

หรือ

$$T = \frac{360^0}{n} - \sum(\frac{R_2 - R_1}{n}) \qquad (6)$$

เมื่อนำค่าที่อ่านได้ของ $\Sigma(R_2 - R_1)$ สามารถหาค่า T ได้ เมื่อนำค่านี้แทนกลับในสมการที่ (1) สำหรับค่ามุมแต่ละหน้าผลที่ได้จากการคำนวณจะออกมาดังสมการที่ (6) ดูตัวอย่างต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลการสอบเทียบโพลีกอน [1]

หน้าโพลีกอน	R_1		R_2		$(R_2 - R_1)$		ค่าผิดพลาด
(องศา)	(ลิปดา)	(ฟิลิปดา)	(ลิปดา)	(ฟิลิปดา)	(ลิปดา)	(ฟิลิปดา)	(ฟิลิปดา)
0 - 45	4	32.5	7	48.7	3	16.2	+2.8
45 - 90	5	15.3	8	33.8	3	18.5	+5.1
90 - 135	2	17.6	5	29.9	3	12.3	-1.1
135 - 180	4	52.1	8	07.2	3	15.1	+1.7
180 - 225	5	03.5	8	10.2	3	06.7	-6.7
225 - 270	4	22.9	7	41.0	3	18.1	+4.7
270 - 315	1	16.8	4	25.3	3	08.5	-5.9
315 - 0	4	18.9	7	30.7	3	11.8	-1.6
รวม	-	-	-	-	**25**	**47.2**	-

ให้โพลีกอนขนาดมุม 45 องศา มี 8 หน้า(n = 8) ผลรวมของผลต่างของมุมของออโต้คอลลิเมเตอร์เป็น 25' 47.2" จะได้ว่า

$$T = \frac{\Sigma\, 360\ ^\circ}{n} - \frac{\Sigma(R_2 - R_1)}{n}$$
$$= 45\ ^\circ - \frac{25'47\ .2''}{8}$$
$$= 45\ ^\circ - 3'13\ .4''$$

เราจะได้มุมระหว่างหน้าเป็น

$$S = T + (R_2 - R_1) = 45^\circ - \frac{\Sigma(R_2 - R_1)}{n} + (R_2 - R_1)$$

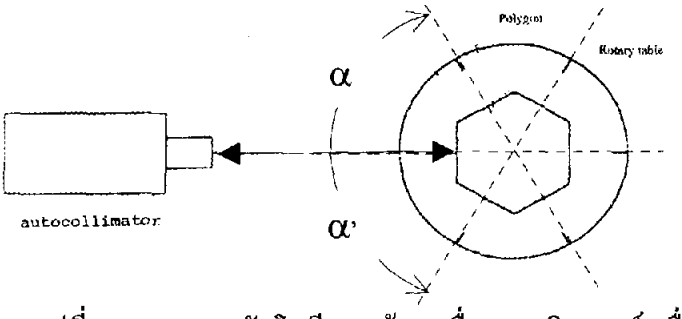
เมื่อเราแทนค่าR_1 และR_2 จะค่าความผิดพลาดจากสมการข้างล่างนี้

$$Error = (R_2 - R_1) - 3'13.4''$$

ชุดโพลีกอนสามารถสอบเทียบได้โดยไม่ต้องใช้มุมอ้างอิงมาตรฐานใดๆและค่อนข้างแม่นยำ วิธีนี้จัดอยู่บนพื้นฐานของความจริงว่าด้วยวงกลมจัดว่าเป็น ฟังก์ชันต่อเนื่อง(Continuous Function) ซึ่งว่าด้วยค่าอะไรก็ตามของแต่ละหน้าของชุดโพลีกอนเมื่อรวมกันแล้วจะต้องได้ 360 องศาซึ่งวิธีดังกล่าวดูรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.2 การสอบเทียบโพลีกอนโดยใช้เครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์เครื่องเดียว[2]

(Calibrating a precision polygon by using a s ingle autocollimator)



รูปที่ 4 แสดงการวัดโพลีกอนด้วยเครื่องคอลลิเมเตอร์เครื่องเดียว

การสอบเทียบโพลีกอนด้วยเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์เครื่องเดียวมีความสะดวกมากกว่าการสอบเทียบด้วยวิธีแรก เพราะสะดวกในการติดตั้ง และการคำนวณค่าผิดพลาด เราจำเป็นต้องนำค่าที่วัด (α) และทิศทวนเข็มนาฬิกา (α') มาหาค่าผิดพลาดเฉลี่ย($\overline{\alpha}$) เช่นเดียวกับการหาระยะคลอนเฉลี่ย (Average Backlash) ของเกลียวและเฟืองดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{(\alpha' + \alpha)}{2} = \overline{\alpha} \qquad (7)$$

$\overline{\alpha}$: ค่าผิดพลาดเฉลี่ย

α' : ค่ามุมที่อ่านได้ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

α : ค่ามุมที่อ่านได้ในทิศตามเข็มนาฬิกา

นำค่าผิดพลาดเฉลี่ยจากตารางผลการสอบเทียบในภาคผนวก ก(ตารางที่1-10) มาจัดกลุ่มกัน เช่น หน้าโพลีกอน 30 องศา กับ หน้าโพลีกอนอื่นๆ ดูตารางวิเคราะห์ผลการสอบเทียบที่ 2 ในภาคผนวก ก เพื่อนำมาคำนวณหาค่าผิดพลาดสะสม

$$\text{ค่าผิดพลาดสะสม} = \sum_{i=0}^{n} (\overline{\alpha}_r)_i$$

$$\text{ค่าผิดพลาดแต่ละหน้า} = \frac{\sum_{i=0}^{n} (\overline{\alpha}_r)_i}{n}$$

$\overline{\alpha}_r$: ค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่หน้าอ้างอิง ($r = 0,1,\ldots,8$ หรือ 12)

เมื่อ $n = 8$ และ 12 สำหรับโพลีกอน 45 องศา และ30 องศาตามลำดับ

บทที่ 3

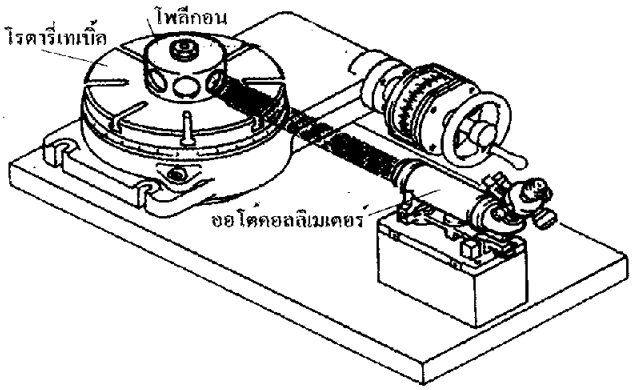
วิธีการสอบเทียบ

3.1 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบในการสอบเทียบ

1) เครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ 1 เครื่องใช้วัดอ่านค่ามุมมีหน่วยเป็นฟิลิปดา
2) ชุดโพลีกอนขนาด 8, 12 หน้าขนาดมุม45°/หน้าและ30°/หน้า ตามลำดับ
3) แท่นวางโพลีกอนที่จัดทำขึ้นพิเศษ ดูรูปที่ 9 ในผนวก ก ประกอบ
4) โรต้าริ่เทเบิ้ล(Rotary table)มีหมุนได้ละเอียด 2 ลิปดา
5) พื้นผิวเรียบ(Granite plate) เกรด 2 (±15 ไมโครเมตร)

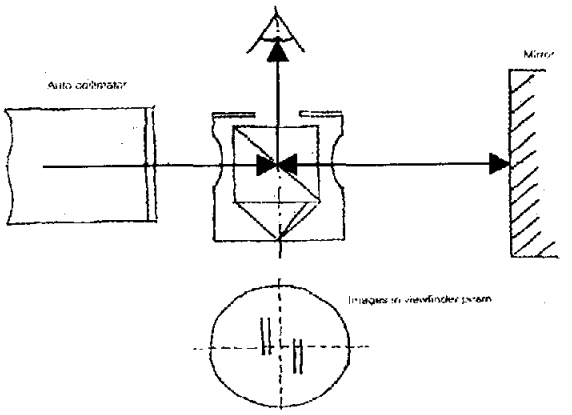
3.2 การสอบเทียบโพลีกอนด้วยเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ 1 เครื่อง

วางโพลีกอนไว้บนแท่นของโรตาริ่เทเบิ้ล(Rotary Table) แล้ววางเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ ให้ตั้งฉากกับหน้าอ้างอิงที่ "0" ของโพลีกอน ดูรูปที่ 5 ประกอบ



รูปที่ 5 การติดตั้งชุดออโต้คอลลิเมเตอร์

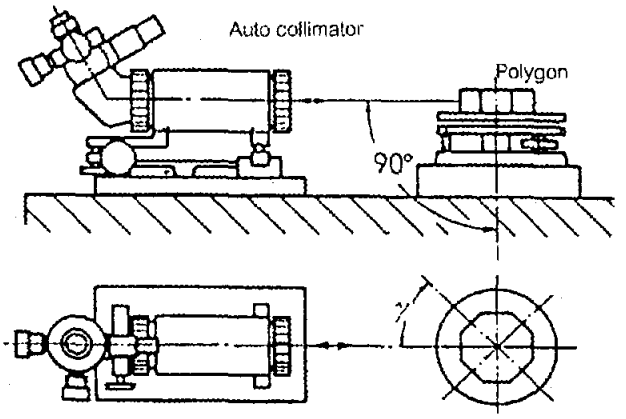
1. ให้หมุนโรตาริ่เทเบิ้ล(Rotary Table)ไปในทิศตามเข็มนาฬิกา(Clockwise Rotating) จนตั้งฉากกับหน้าโพลีกอนโดยดูจากเครื่องหมายกากบาทที่ Viewfinder prism รูปที่ 6 ว่าทับกันพอดี แล้วบันทึกค่ามุมที่อ่านได้จากออโต้คอลลิเมเตอร์ ลงในตารางบันทึกผลทำจนครบทุกหน้าของโพลีกอนซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนหน้าของโพลีกอนนั้น(8 หน้าหรือ 12 หน้า)
2. เปลี่ยนหน้าอื่นเป็นหน้าอ้างอิงบ้างแล้วทำตามข้อที่ 1 จนถึงข้อที่ 3 จนครบทุกหน้า
3. ให้หมุนโรตาริ่เทเบิ้ล(Rotary Table)ไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา(Anticlock wise) จนตั้งฉากกับหน้าโพลีกอนโดยสังเกตดูเครื่องหมายกากบาทจาก Viewfinder prism รูปที่ 6 ให้กากบาททับกันพอดี แล้วบันทึกค่ามุมที่อ่านได้จากออโต้คอลลิเมเตอร์ ลงในตารางบันทึกผลทำจนครบทุกหน้าของโพลีกอนซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนหน้าของโพลีกอนนั้น(8 หน้าหรือ 12 หน้า)



รูปที่ 6 แสดงการปรับออโต้คอลลิเมเตอร์จาก viewfinder prism

3.3 ขั้นตอนการสอบเทียบโพลีกอน

1) จัดวางเครื่องมือดังรูปที่ 7 โดยให้ศูนย์กลางอยู่ในแนวเดียวกัน(Concentrically)
2) กำหนดให้หน้าใดหน้าหนึ่งของโพลีกอนเป็นหน้าอ้างอิง (ให้หน้านั้นเป็น"0") และจัดชุดออโต้คอลลิเมเตอร์ให้ลำแสงตรงและตั้งฉากตามรูปที่ 7
3) บันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ลงในตารางข้อมูล
4) เริ่มหมุนโรตารี่เทเบิ้ล(Rotary Table) โดยเริ่มที่ขีดศูนย์ไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) หมุนจนขีดสเกลของโรตารี่เทเบิ้ลมาบรรจบที่ 30° และลำแสงของเครื่องตรงพอดีกับหน้าโพลีกอนที่ "1" ให้บันทึกค่าที่อ่านได้ลงตาราง
5) ทำเช่นเดียวกันกับข้อที่ 4) ไปจนครบหน้าของโพลีกอน
6) เริ่มทำตั้งแต่ข้อ 1) ถึงข้อ 5) แต่ทำในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา(Anticlock wise)
7) เปลี่ยนให้หน้าอื่นเป็นหน้าอ้างอิงบ้างและทำขั้นตอนเช่นเดียวกันกับข้อ 1) ถึงข้อ 6)



รูปที่ 7 การจัดตั้งโพลีกอน โรตารี่เทเบิ้ล และออโต้คอลลิเมตอร์ให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน

บทที่ 4
ผลการสอบเทียบและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการสอบเทียบโพลีกอน

จากตารางบันทึกผลการสอบเทียบที่ 2-5 และ 6-10 ในภาคผนวก ก แสดงข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบโพลีกอนชนิด 45 องศาและ 30 องศาตามลำดับ จะเห็นว่าเราได้ผลต่างของการวัดทั้งทิศตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาให้นำค่าผลต่างเฉลี่ยของทั้งสองทิศทางที่ได้ทั้งหมด 10 ตาราง นำมาคำนวณหาค่าความผิดพลาดของมุมในแต่ละหน้าของโพลีกอน

พิจารณาผลการวัดของโพลีกอนขนาดมุม 45 องศาหรือโพลีกอนชนิด 8 หน้า*(n=8)* โดยนำผลที่ได้ของมุมทุกช่วง 45 องศา จากตารางข้อมูลการสอบเทียบที่ 1-4 เราได้นำค่าผลต่างเฉลี่ยของโพลีกอนที่ใช้เป็นหน้าอ้างอิง(α_r) เดียวกัน มาใส่ลงในตารางวิเคราะห์ผลการสอบเทียบที่ 1 ก่อนเพื่อค่าผิดพลาดสะสมตามสมการข้างล่าง ในตารางวิเคราะห์ผลการสอบเทียบที่ 1 ในภาคผนวก ก แสดงการนำผลต่างเฉลี่ยมารวมกันแบบสะสมผลต่างของมุมดังสมการต่อนี้

$$\text{ค่าผิดพลาดสะสม} = \sum_{i=0}^{8} (\overline{\alpha}_r)_i$$

$$\text{ค่าผิดพลาดแต่ละหน้า} = \frac{\sum_{i=0}^{8} (\overline{\alpha}_r)_i}{n}$$

เมื่อ $n=8$

พิจารณาผลการวัดของโพลีกอนขนาดมุม 30 องศาหรือโพลีกอนชนิด 12 หน้า*(n=12)* โดยนำผลที่ได้ของมุมทุกช่วง 30 องศา จากตารางการสอบเทียบที่ 5-10 ที่ปรากฏค่าผลต่างเฉลี่ยที่ใช้เป็นหน้าอ้างอิง(α_r) เดียวกันของมุมมาใส่ลงในตารางวิเคราะห์ผลในภาคผนวก ก เพื่อหาค่าผิดพลาดสะสมและค่าผิดพลาดของมุมแต่ละหน้า ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าผิดพลาดสะสม} = \sum_{i=0}^{12} (\overline{\alpha}_r)_i$$

$$\text{ค่าผิดพลาดแต่ละหน้า} = \frac{\sum_{i=0}^{12} (\overline{\alpha}_r)_i}{n}$$

เมื่อ $n=12$

ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบโพลีกอน 8 หน้าและโรตารี่เทเบิ้ล

Angle (Degree)	**Polygon Error** (Arc second)	**Uncertainty** (Arc second)	**Rotary Error** (Arc second)	**Uncertainty** (Arc second)
$0^\circ - 45^\circ$	12.09	±0.20	-0.01	±0.30
$45^\circ - 90^\circ$	5.94	±0.20	-8.36	±0.30
$90^\circ - 135^\circ$	11.18	±0.20	11.64	±0.30
$135^\circ - 180^\circ$	17.31	±0.20	-11.19	±0.30
$180^\circ - 225^\circ$	7.35	±0.20	15.96	±0.30
$225^\circ - 270^\circ$	1.87	±0.20	11.61	±0.30
$270^\circ - 315^\circ$	11.18	±0.20	7.37	±0.30
$315^\circ - 0^\circ$	19.07	±0.20	58.96	±0.30

ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบโพลีกอน 12 หน้าและโรตารี่เทเบิ้ล

Angle (Degree)	**Polygon Error** (Arc second)	**Uncertainty** (Arc second)	**Rotary Error** (Arc second)	**Uncertainty** (Arc second)
$0^\circ - 30^\circ$	11.43	±0.20	15.94	±0.30
$30^\circ - 60^\circ$	6.33	±0.20	4.83	±0.30
$60^\circ - 90^\circ$	11.18	±0.20	-30.56	±0.30
$90^\circ - 120^\circ$	7.26	±0.20	34.10	±0.30
$120^\circ - 150^\circ$	9.04	±0.20	-18.41	±0.30
$150^\circ - 180^\circ$	7.48	±0.20	17.44	±0.30
$180^\circ - 210^\circ$	9.19	±0.20	-18.09	±0.30
$210^\circ - 240^\circ$	15.6	±0.20	34.52	±0.30
$240^\circ - 270^\circ$	10.84	±0.20	-20.88	±0.30
$270^\circ - 300^\circ$	8.99	±0.20	30.93	±0.30
$300^\circ - 330^\circ$	6.90	±0.20	-19.22	±0.30
$330^\circ - 0^\circ$	13.79	±0.20	87.07	±0.30

จากผลการสอบเทียบโพลีกอนดังตารางที่ 2 และ3 จะประกอบด้วยค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบโพลีกอนทั้งสองแบบ คือ โพลีกอน 8 หน้า(45 องศา) และโพลีกอน 12หน้า(30 องศา) ค่าความไม่แน่นอนสูงสุด ±0.2 ฟิลิปดา(จากตารางที่ 16)และโรตารี่เทเบิ้ลค่าความไม่แน่นอนสูงสุด ±0.3 ฟิลิปดา(จากตารางที่ 17) ที่ช่วงมุมที่เท่ากัน

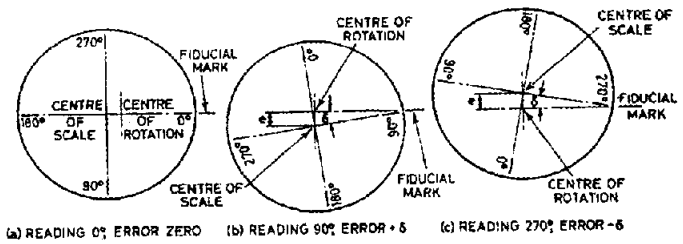
4.2 วิเคราะห์ค่าผิดพลาดอันเนื่องจากการวางโพลีกอนเยื้องศูนย์กลาง

(Error due to a polygon being mount eccentric by amount :e)

จากรูปที่ 8(b) ข้อมูลที่อ่านได้จากการวัดจะถูกต้องจนกระทั่งอ่านได้ 90 องศา ขึ้นไปซึ่งต้องรวมค่ามุมที่ผิดพลาดไปด้วยคือ (90°+ δ)เช่นเดียวกันกับรูปที่ 8(c) ที่มุม 270 องศา อ่านค่าต้องได้ (270°+ δ)แต่ในกรณีที่ตำแหน่ง 270 องศา ซึ่งช่วงที่ค่าผิดพลาดจากศูนย์ถึง (+ δ, - δ)

ฉะนั้นค่าผิดพลาดของมุมสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ เมื่อเราหมุนที่มุมระหว่าง 90 องศา และ 270 องศา จะเป็น 2δ หรือ 2e/R ค่ามุมผิดพลาดสูงสุดอยู่ระหว่างค่าเป็นดังสมการต่อไปนี้

$\delta = e/R$ เมื่อ e : Eccentricity และ R เป็นรัศมีของความโค้งที่ได้ในขณะอ่าน



รูปที่ 8 ค่าผิดพลาดจากการวางโพลีกอนเยื้องศูนย์กลาง

(a) อ่านค่ามุมที่ 0 องศา ค่าผิดพลาดเป็นศูนย์

(b) อ่านค่ามุมที่ 90 องศา ค่าผิดพลาดเป็น + δ

(c) อ่านค่ามุมที่ 270 องศา ค่าผิดพลาดเป็น - δ

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบโพลีกอน 8 หน้า

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (45 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 313 - 128 **Face No.** : 8 faces

Polygon / Rotary table	0° -45°	45°-90°	90°-135°	135°-180°	180°-225°	225°-270°	270°-315°	315°-0°	Accum.	Error of rotary table
0° - 45°	-15.43	14.70	-8.68	5.73	-2.05	8.58	-2.68	-0.30	-0.12	- 0"01
45° - 90°	-7.73	-23.88	-8.53	11.95	-3.83	-15.13	-12.55	-7.25	-66.92	- 8"36
90° - 135°	10.70	5.85	22.48	27.90	5.03	3.25	13.38	4.55	93.12	11"64
135° – 180°	-13.00	-16.65	-13.23	3.58	3.80	-20.90	-21.08	-12.10	-89.57	- 11"19
180° – 225°	21.20	27.73	23.50	25.08	0.53	-16.73	12.63	33.78	127.70	15"96
225° – 270°	13.65	11.30	8.58	9.33	2.60	-3.70	17.98	33.20	92.92	11"61
270° – 315°	13.45	-6.90	0.08	-1.65	0.66	7.03	25.90	20.40	58.96	7"37
315° - 0°	73.80	35.38	65.23	56.58	52.08	52.55	55.88	80.28	471.75	58"96
Accum	96.65	47.52	89.42	137.47	58.51	14.95	89.45	152.55		
Error of polygon	12" 08	5" 94	11" 18	17" 31	7" 35	1" 87	11" 18	19" 07		

ตารางที่ 5 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบโพลีกอนชนิด 12 หน้า

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (30 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 307 - 113 **Face No. :** 12 faces

Polygon / Rotary Table	0° - 30°	30° - 60°	60° - 90°	90° -120°	120° 150°	150° -180°	180°-210°	210°-240°	240°-270°	270°-300°	300°-330°	330° -0°	Accum.	Error of rotary table
0° - 30°	32.97	-12.00	26.97	-16.12	-5.35	-9.55	24.40	74.37	33.17	1.77	-1.37	42.05	191.32	15"94
30° - 60°	3.10	-7.05	10.10	8.97	6.07	4.65	8.87	3.57	3.02	8.52	1.75	6.45	58.05	4"83
60° - 90°	-29.22	-31.20	-18.00	-32.95	-31.37	-33.30	-32.50	-33.55	-31.87	-29.47	-35.22	-28.07	-366.75	-30"56
90° – 120°	34.00	35.47	36.32	30.05	36.75	38.85	30.97	36.45	30.70	32.22	33.32	33.70	409.27	34"10
120° – 150°	-15.75	-20.27	-22.57	-23.37	-19.30	-21.65	-23.37	-15.65	-16.67	-12.50	-16.47	-13.52	-221.00	-18"42
150° – 180°	14.05	17.97	14.82	15.42	21.40	17.40	15.92	20.62	20.70	16.40	17.12	17.47	209.32	17"44
180° – 210°	-13.40	-16.83	-16.78	-12.70	-12.18	-20.18	-20.13	-18.88	-21.80	-23.98	-21.63	-18.68	-217.13	-18"09
210° – 240°	33.65	33.32	33.02	31.12	31.82	33.30	32.80	41.27	37.25	38.55	31.33	36.85	41.43	34"52
240° –270°	-19.60	-22.55	-20.95	-17.48	-18.75	-15.85	-24.48	-19.70	-25.85	-22.90	-21.90	-15.63	-250.63	-20"88
270° – 300°	31.93	34.43	33.30	28.99	26.50	30.10	24.98	30.18	30.78	30.53	34.03	35.93	371.20	30"93
300° – 330°	-19.70	-18.95	-24.78	-20.30	-19.48	-17.55	-11.28	-19.50	-16.43	-18.40	-21.85	-22.25	-230.65	-19"22
330° - 0°	85.20	83.68	83.00	95.03	92.78	83.63	84.50	82.73	87.20	87.20	88.75	91.25	1044.80	87"07
Accum	137.20	76.03	134.30	87.12	108.50	89.85	110.30	181.90	130.20	107.90	82.85	165.60		
Error of polygon	11"43	6"33	11"19	7"26	9"04	7"49	9"19	15"16	10"846	8"99	6"90	13"79		

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการสอบเทียบและข้อเสนอแนะ

5.1 วิจารณ์ผลการสอบเทียบ

จากการสอบเทียบจะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าความผิดพลาดของโพลีกอนทั้งสองแบบ(30 และ 45 องศา)ในตารางที่ 2 และ 3 มีค่าน้อยกว่า ±20.00 ฟิลิปดา ที่ค่าความไม่แน่นอนในการวัด ±0.20 ฟิลิปดา ดังตารางที่ 16 มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดโดยไม่มีแท่นที่มีค่าผิดพลาดเกิน ± 1500.00 ฟิลิปดา ซึ่งทำให้ไม่สามารถบันทึกผลการสอบเทียบได้เนื่องจากเกินช่วงการวัดของเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ ปัญหาของค่าผิดพลาดจากการสอบเทียบโพลีกอน และข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นหลักๆมีอยู่ 2 ข้อด้วยกันดังนี้

1. ความผิดพลาดจากการวัดเยื้องศูนย์กลาง
2. ความผิดพลาดจากความตั้งฉากระหว่างเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์กับโพลีกอน

จากการแก้ไขและค้นหาเทคนิคการสอบเทียบใหม่ที่เกี่ยวกับเรื่องมุมมาตรฐานนั้นทำให้มีความถูกต้อง แม่นยำมากยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากปัญหาของค่าผิดพลาดจากการสอบเทียบนี้ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นได้พบว่าการสะสมค่าผิดพลาดในช่วงการวัดมุมนั้นเกิดจากการวางได้นำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ชุดแท่นวางโพลีกอนดังแสดงในภาคผนวก ก รูปที่ 9 เพื่อลดค่าความผิดพลาดเยื้องศูนย์กลาง ซึ่งหากว่าไม่มีอุปกรณ์ชุดนี้จะไม่สามารถนำผลการสอบเทียบออกมาวิเคราะห์ได้เลย

บทที่ 6

สรุปผลการสอบเทียบ

จากเทคนิคการสอบเทียบโพลีกอนจะเห็นได้ว่า การใช้เครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์เพียงเครื่องเดียวนั้นมีค่าความไม่แน่นอน ±0.20 ฟิลิปดา ค่อนข้างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบแบบใช้ออโต้คอลลิเมเตอร์สองเครื่องแล้วไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก เพียงแต่ว่าวิธีการสอบเทียบแบบใช้เครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์เครื่องเดียวนั้นมีขั้นตอนในการลงตารางข้อมูลยุ่งยากมากกว่า ซึ่งเหมาะสมกับห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์เครื่องเดียว จำเป็นต้องใช้เทคนิคอันนี้แทน จากวิธีนี้ทำให้เราสามารถสอบเทียบได้ทั้งโรตารี่เทเบิ้ล และโพลีกอน ซึ่งอีกประการหนึ่งหากว่าถ้ามีการแก้ไขค่าความผิดพลาดเยื้องศูนย์กลาง(eccentric error) ก็จะทำให้ค่าผิดพลาดของโพลีกอนลดลง

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณต่อคณะบุคคลที่ให้ความร่วมมือ ความช่วยเหลือและคำปรึกษา และรวมถึงกรมวิทยาศาสตร์บริการซึ่งทำให้งานสอบเทียบและเอกสารงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ดังรายชื่อต่อไปนี้

1. **นายวีระ ตุลาสมบัติ** (อดีตหัวหน้างานมวลและเชิงกล โครงการมาตรวิทยาฯ)
2. **นายไพโรจน์ ราชกิจ** (เจ้าหน้าที่ช่างกล 4)

เอกสารอ้างอิง

1. J.F.W. Galyer & C.shotbolt. Acassell Technical book "**Metrology for Engineers**" Chapter 4 : Angular measurement and circular division, Fourth edition, 1980.
2. Jong-Chul Park, Lengths Korea standards research institute, "Proceedings of workshop on national calibration system and precision measurement technology", Volume 2 : Taedok science town, Korea October, 16-29, 1984.

บรรณานุกรม

1. ISO/TAG 4, "Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement", First Edition, January 1993.
2. M3003, UKAS, "**The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement**", First Edition, December 1997.
3. JIS 7432, Optical Polycons for Angle Standards, Angle Measuring, "**JIS HANDBOOK Mechanical Instrumentation**", pp.616-621, 1985.

ภาคผนวก ก

ตารางข้อมูล ตารางวิเคราะห์ผลและอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการสอบเทียบ

ตารางที่ 6 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 0 และ 45 องศา

Date : 7/12/39

Ambient Temperature : 20.9^{O}C **RH** : 60 %

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (45 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 313 - 128 **Face No.** : 8 faces

Polygon	Rotary Table	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean Difference
		Reading	Difference	Reading	Difference	
0	0	10.70		161.10		
45	45	34.00	-23.30	168.65	-7.55	-15.42
90	90	67.35	-33.35	183.05	-14.40	-23.87
135	135	40.35	27.00	165.10	17.95	22.47
180	180	38.25	2.10	160.05	5.05	3.57
225	225	48.15	-9.90	149.10	10.95	0.52
270	270	41.00	7.15	163.65	-14.55	-3.70
315	315	14.40	26.60	138.45	25.50	25.90
0	0	-3.85	18.25	-3.85	142.30	80.27
0	45	-40.40		+0.55		
45	90	-95.65	55.25	+26.40	-25.85	14.70
90	135	-81.75	-13.90	+29.55	-3.15	-8.52
135	180	-117.10	35.35	+9.10	20.45	27.90
180	225	-123.10	6.00	+7.50	1.60	3.80
225	270	-86.90	-36.20	+4.75	2.75	-16.72
270	315	-108.50	21.60	-9.60	14.35	17.97
315	0	-139.60	31.10	-19.30	9.70	20.40
0	45	-153.25	13.65	-153.25	133.95	73.80

ตารางที่ 7 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 90 และ 135 องศา

Date : 8/12/39

Ambient Temperature : 20.0 °C **RH** : 61%

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (45 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 313 - 128 **Face No.** : 8 faces

Polygon	Rotary Table	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean Difference
		Reading	Difference	Reading	Difference	
0	90	-5.85		122.15		
45	135	4.35	-10.20	129.30	-7.15	-8.67
90	180	-0.40	4.75	110.15	19.15	11.95
135	225	-1.10	0.70	100.80	9.35	5.02
180	270	11.35	-12.45	130.15	-29.35	-20.90
225	315	1.15	10.20	115.10	15.05	12.62
270	0	-39.70	40.85	89.55	25.55	33.20
315	45	-22.70	17.00	79.65	9.90	13.45
0	90	-6.90	-15.80	-6.90	86.55	35.37
0	135	-27.70		93.35		
45	180	-41.50	13.80	95.70	-2.35	5.72
90	225	-23.35	-18.15	85.20	10.50	-3.82
135	270	-28.15	4.80	83.50	1.70	3.25
180	315	-1.15	-27.00	98.65	-15.15	-21.07
225	0	-44.00	42.85	73.95	24.70	33.77
270	45	-54.10	10.10	56.75	17.20	13.65
315	90	-49.25	-4.85	65.70	-8.95	-6.90
0	135	-57.00	7.75	-57.00	122.70	65.225

ตารางที่ 8 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 180 และ 225 องศา

Date : 9/12/39

Ambient Temperature : 20.0 °C **RH** : 63%

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (45 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 313 – 128 **Face No.** : 8 faces

Polygon	Rotary Table	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean Difference
		Reading	Difference	Reading	Difference	
0	180	-21.45		120.65		
45	225	-18.05	-3.40	121.35	-0.70	-2.05
90	270	18.95	-37.00	114.60	6.75	-15.12
135	315	1.15	17.80	105.65	8.95	13.37
180	0	7.95	-6.80	123.05	-17.40	-12.10
225	45	-12.25	20.20	100.85	22.20	21.20
270	90	-24.35	12.10	90.35	10.50	11.30
315	135	-26.30	1.95	92.15	-1.80	0.07
0	180	-23.50	-2.50	-23.50	115.65	56.57
0	225	7.40		133.30		
45	270	-3.15	10.55	126.20	6.60	8.57
90	315	26.80	-29.95	121.85	4.85	-12.55
135	0	19.30	7.50	120.25	1.60	4.55
180	45	31.70	-12.40	133.85	-13.60	-13.00
225	90	-2.55	34.25	112.65	21.20	27.72
270	135	-5.10	2.55	98.05	14.60	8.57
315	180	-8.10	3.00	104.35	-6.30	-1.65
0	225	-3.95	-4.15	-3.95	108.30	52.07

ตารางที่ 9 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 270 และ 315 องศา

Date : 9/12/39

Ambient Temperature : 20.0 ^{O}C **RH** : 61%

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (45 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 313 – 128 **Face No.** : 8 faces

Polygon	Rotary Table	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean Difference
		Reading	Difference	Reading	Difference	
0	270	2.40		135.75		
45	315	7.35	-4.95	136.15	-0.40	-2.67
90	0	30.35	-23.00	127.65	8.50	-7.25
135	45	13.80	16.55	122.80	4.85	10.70
180	90	31.20	-17.40	138.70	-15.90	-16.65
225	135	6.80	24.40	116.10	22.60	23.50
270	180	2.10	4.70	102.15	13.95	9.325
315	225	-5.80	7.90	108.70	-6.58	0.66
0	270	-1.10	-4.70	-1.10	109.80	52.55
0	315	-8.25		121.50		
45	0	-3.85	-4.40	117.70	3.80	-0.30
90	45	19.05	-22.90	110.25	7.45	-7.72
135	90	5.95	13.10	111.65	-1.40	5.85
180	135	18.45	-12.50	125.60	-13.95	-13.22
225	180	10.25	28.70	104.15	21.45	25.07
270	225	1.50	-11.75	87.20	16.95	2.60
315	270	-15.20	16.70	89.85	-2.65	7.02
0	315	-18.55	3.35	-18.55	108.40	55.87

ตารางที่ 10 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 330 และ 0 องศา

Date : 24/11/39

Time : 14.30 PM.

Ambient Temperature : 20.14°C **RH :** 63 %

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (30 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 307 - 113 **Face No. :** 12 faces

Polygon	Rotary Table	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean Difference
		Reading	Difference	Reading	Difference	
0	330	10.45		18.35		
30	0	-86.65	97.10	31.35	-13.00	42.05
60	30	-97.20	10.55	35.95	-4.35	3.10
90	60	-48.05	-49.15	48.95	-13.25	-31.20
120	90	-88.10	40.05	16.35	32.60	36.32
150	120	-64.05	-24.05	39.05	-22.70	-23.37
180	150	-92.75	28.70	24.95	14.10	21.40
210	180	-58.65	-34.10	31.20	-6.25	-20.17
240	210	-105.70	47.05	12.65	18.55	32.80
270	240	-77.30	-28.40	23.65	-11.00	-19.70
300	270	-115.65	38.35	0.45	23.20	30.77
330	300	-91.60	-24.05	13.20	-12.75	-18.40
0	330	-127.95	36.35	-127.95	141.15	88.75
0	0	-0.15		25.35		
30	30	-81.15	81.00	40.40	-15.05	-48.02
60	60	-72.55	-8.60	45.90	-5.50	-7.05
90	90	-43.10	-29.45	52.45	-6.55	-18.00
120	120	-87.45	44.45	26.00	26.45	-30.50
150	150	-61.05	-26.40	38.20	-12.20	-19.30
180	180	-85.95	24.90	28.30	9.90	17.40
210	210	-52.80	33.15	35.40	-7.10	-20.12
240	240	-112.05	59.15	12.10	23.30	-41.27
270	270	-75.75	-36.30	27.50	-15.40	-25.85
300	300	-115.05	39.30	5.75	21.75	30.52
330	330	-82.90	-32.15	17.30	-11.55	-21.85
0	0	-124.05	41.15	-124.05	41.35	91.25

ตารางที่ 11 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 30 และ 60 องศา

Date : 25/11/39

Time : 14.30 PM.

Ambient Temperature : 19.5 ^{o}C **RH :** 65 %

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (30 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 307 - 113 **Face No. :** 12 faces

Polygon	Indexing Table	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean Difference
		Reading	Difference	Reading	Difference	
0	30	-1.30		89.70		
30	60	-19.60	-18.30	95.40	-5.70	-12.00
60	90	-35.45	15.85	99.75	4.35	10.10
90	120	21.80	-57.60	108.05	-8.30	-32.95
120	150	-26.30	48.10	82.65	25.40	36.75
150	180	3.60	-29.90	96.05	-13.40	-21.65
180	210	-23.20	26.80	91.00	5.05	15.92
210	240	7.65	-30.85	97.90	-6.90	-18.87
240	270	-40.85	48.50	71.90	2.60	37.25
270	300	-11.50	-29.35	88.35	-16.45	-22.90
300	330	-57.05	45.55	65.85	22.50	-134.02
330	0	-23.45	-33.60	76.75	-10.90	-22.25
0	30	-58.55	35.10	-58.55	135.30	85.20
0	60	-107.40		34.00		
30	90	-59.45	-47.95	40.00	-6.00	26.07
60	120	-82.30	22.85	44.90	-4.90	8.97
90	150	-29.70	-52.60	55.05	-10.50	-31.37
120	180	-75.45	45.75	23.10	31.95	38.85
150	210	-47.45	-28.00	42.60	-19.50	-23.75
180	240	-78.25	30.80	32.15	10.45	20.62
210	270	-47.45	-30.80	44.95	-12.80	-21.80
240	300	-92.55	45.10	12.95	32.00	38.55
270	330	-62.75	-29.80	36.95	-24.00	-26.90
300	0	-106.85	44.10	9.20	27.75	35.92
330	30	-79.30	-27.55	21.05	-11.85	-19.70
0	60	-112.80	33.50	-112.80	133.85	83.67

ตารางที่ 12 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 90 และ120 องศา

Date : 25/11/39

Time : 14.30 PM.

Ambient Temperature : 19.5°C **RH :** 65 %

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (30 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 307 - 113 **Face No. :** 12 faces

Polygon	Rotary Table	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean Difference
		Reading	Difference	Reading	Difference	
0	90	8.45		147.10		
30	120	33.50	-25.05	154.30	-7.20	-16.12
60	150	17.50	16.00	158.15	-3.85	6.07
90	180	67.75	-50.25	174.50	-16.35	-33.30
120	210	34.15	33.60	146.15	28.35	30.97
150	240	50.80	-16.65	160.80	-14.65	-15.65
180	270	22.60	28.20	147.60	13.20	20.70
210	300	59.75	-37.15	158.40	-10.80	-23.97
240	330	19.40	40.35	136.10	22.30	31.32
270	0	37.05	-17.65	149.70	-13.60	-15.62
300	30	1.75	35.30	121.15	28.55	31.92
330	60	27.70	-25.95	133.10	-11.95	-18.95
0	90	-2.60	30.30	-2.60	135.70	83.00
0	120	-50.45		51.60		
30	150	-50.70	0.25	62.55	-10.95	-5.35
60	180	-65.65	14.95	68.20	-5.65	4.65
90	210	-14.70	-50.95	82.25	-14.05	-32.50
120	240	-57.00	42.30	51.65	30.60	36.45
150	270	-36.70	-20.30	64.70	-13.05	-16.67
180	300	-63.05	26.35	58.25	-6.45	16.40
210	330	-28.95	-34.10	67.40	-9.15	-21.62
240	0	-71.65	42.70	36.40	31.00	36.85
270	30	-45.15	-17.50	58.10	-21.70	-19.60
300	60	-92.30	47.15	36.40	21.70	34.42
330	90	-50.70	-41.60	44.75	-8.35	-24.97
0	120	-98.00	47.30	-98.00	142.75	95.02

ตารางที่ 13 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 150 และ 180 องศา

Date : 26/11/39

Time : 14.50 PM.

Ambient Temperature : 19.5 ^{O}C **RH :** 67%

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (30 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 307 - 113 **Face No. :** 12 faces

Polygon	Rotary Table	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean Difference
		Reading	Difference	Reading	Difference	
0	150	-3.90		102.30		
30	180	1.75	-5.65	115.75	-13.45	-9.55
60	210	-14.15	15.90	113.90	1.85	8.87
90	240	30.65	-44.80	136.90	-22.30	-33.55
120	270	2.50	28.15	102.95	33.25	30.70
150	300	11.60	-9.10	118.85	-15.90	-12.50
180	330	-10.75	22.35	106.95	11.90	17.12
210	0	17.40	-28.15	116.15	-9.20	-18.67
240	30	-29.10	46.50	95.35	20.80	33.65
270	60	-0.50	-28.60	111.85	-16.50	-22.55
300	90	-41.20	40.70	85.95	25.90	33.30
330	120	-9.65	-31.55	95.00	-9.05	-20.30
0	150	-50.10	40.45	-50.10	145.10	92.77
0	180	-20.30		24.65		
30	210	-81.00	60.70	36.55	-119.00	24.40
60	240	-90.45	9.45	38.85	-2.30	3.57
90	270	-41.15	-49.30	53.30	-14.45	-31.87
120	300	-80.30	39.15	28.00	25.30	32.22
150	330	-61.35	-18.95	42.00	-14.00	-16.47
180	0	-87.10	25.75	32.80	9.20	17.47
210	30	-58.45	-22.65	56.95	-4.15	-13.40
240	60	-101.40	42.95	13.25	23.70	33.32
270	90	-78.80	-22.60	32.55	-19.30	-20.95
300	120	-111.60	32.80	7.40	25.15	28.99
330	150	-83.20	-28.40	17.95	-10.55	-19.47
0	180	-116.25	33.05	-116.25	134.20	83.62

ตารางที่ 14 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 210 และ 240 องศา

Date : 26/11/39

Time : 15.30 PM.

Ambient Temperature : 19.5°C **RH :** 67 %

Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (30 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 307 - 113 **Face No. :** 12 faces

Polygon	Rotary Table	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean Difference
		Reading	Difference	Reading	Difference	
0	210	-34.05		-90.25		
30	240	-192.20	158.15	-80.85	-9.40	74.37
60	270	-199.85	7.65	-79.25	-1.60	3.025
90	300	-156.15	-43.70	-64.00	-15.25	-29.47
120	330	-193.55	37.40	-93.25	29.25	33.32
150	0	-178.70	-14.85	-81.05	-12.20	-13.52
180	30	-201.15	22.45	-86.70	5.65	14.05
210	60	-178.60	-22.85	-75.90	-10.80	-16.82
240	90	-211.45	32.85	-109.10	33.20	33.02
270	120	-195.30	-16.15	-90.30	-18.80	-17.47
300	150	-226.20	30.90	-111.50	21.20	26.05
330	180	-200.40	-25.80	-102.20	-9.30	-17.55
0	210	-237.80	37.40	-237.80	131.60	84.50
0	240	-57.25		-38.95		
30	270	-135.60	78.35	-26.95	-12.00	33.17
60	300	-152.95	17.35	-26.65	-0.30	8.52
90	330	-100.20	-52.75	-8.95	-17.70	-35.22
120	0	-138.20	38.00	-38.35	29.40	33.70
150	30	-120.55	-17.65	-24.50	-13.85	-15.75
180	60	-146.25	25.70	-34.75	10.25	17.97
210	90	-121.95	-24.30	-25.50	-9.25	-16.77
240	120	-155.75	33.80	-53.95	28.45	31.12
270	150	-134.40	-21.35	-37.80	-16.15	-18.75
300	180	-175.95	41.55	-56.45	18.65	30.10
330	210	-145.55	-30.40	-48.60	7.85	-11.27
0	240	-179.80	34.25	-179.80	131.20	82.72

ตารางที่ 15 บันทึกผลการสอบเทียบหน้าอ้างอิง 270 และ 300 องศา

Date : 29/11/39

Time : 13.25 PM.

Ambient Temperature : 20.84°C **RH :** 62 %

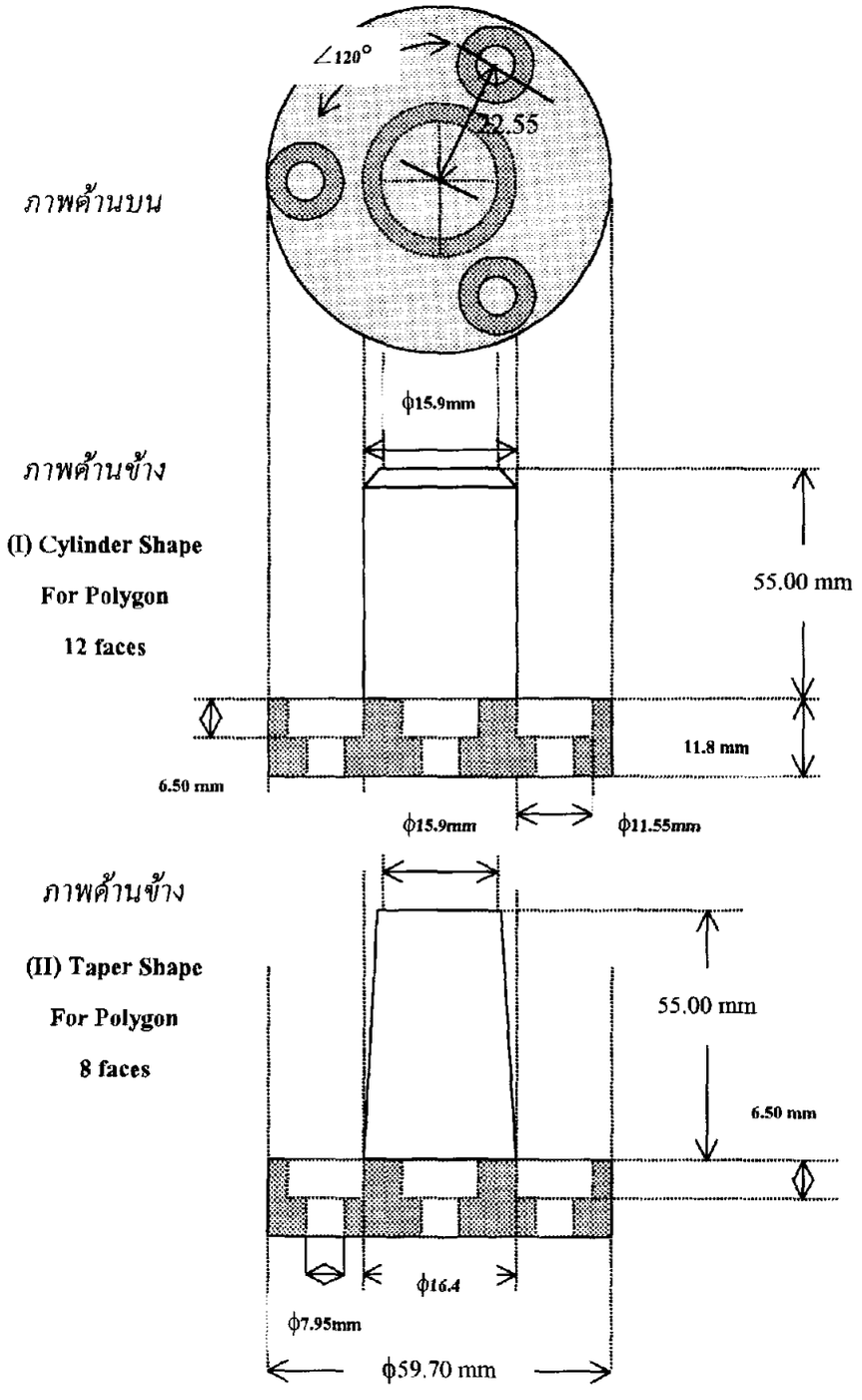
Location : Length & Dimensions Laboratory

Calibrating Instrument : Auto collimator (Moller-Wedel)

Equipment Under Test : Polygon (30 Degree) and Rotary Table

Serial No. : 205 307 - 113 **Face No. :** 12 faces

Polygon	Rotary	Clockwise Rotating		Anti clockwise Rotating		Mean
	Table	Reading	Difference	Reading	Difference	Difference
0	270	-46.50		54.70		
30	300	-67.45	20.95	72.10	-17.40	1.77
60	330	-72.35	4.90	73.50	-1.40	1.75
90	0	-24.45	-47.90	81.75	-8.25	-28.07
120	30	-64.65	40.20	53.95	27.80	34.00
150	60	-43.95	-20.70	73.80	-19.85	-20.27
180	90	-62.00	18.05	62.20	11.60	14.82
210	120	-40.95	-21.05	66.50	-4.35	-12.70
240	150	-80.65	39.70	42.60	23.95	31.82
270	180	-66.70	-13.95	60.35	-17.75	-15.85
300	210	-93.65	26.95	37.35	23.00	24.97
330	240	-59.35	-34.30	42.05	-4.70	-19.50
0	270	-102.25	42.90	-102.25	144.30	93.60
0	300	-0.85		102.40		
30	330	-7.00	6.15	111.30	-8.90	-1.37
60	0	-26.30	19.30	117.70	-6.40	6.45
90	30	23.25	-49.55	126.60	-8.90	-29.22
120	60	-17.30	40.55	96.20	30.40	35.47
150	90	11.30	-28.60	112.75	-16.55	-22.57
180	120	-12.30	23.60	105.50	7.25	15.42
210	150	7.00	-19.30	110.55	-5.05	-12.17
240	180	31.25	38.25	82.20	28.35	33.30
270	210	-3.20	-28.05	103.10	-20.90	-24.47
300	240	-40.10	36.90	79.65	23.45	30.17
330	270	-20.55	-19.55	92.95	-13.30	-16.42
0	300	-50.95	30.40	-50.95	143.90	87.15



รูปที่ 9 การออกแบบแท่นวางโพลีกอนทั้งสองชนิด(45 องศา และ 30 องศา)

ภาคผนวก ข

ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบและคำจำกัดความ

การสอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือทางด้านมุมมาตรฐาน(Angle standard) ผลที่ได้จะบอกให้รู้ถึงค่าความผิดพลาดซึ่งอยู่ในรูปของค่าความไม่แน่นอน(uncertainty) จากการประยุกต์ใช้ หนังสือThe exprcssion of uncertainty หรือ TAG4

การพิจารณาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบมุมมาตรฐานชนิดโพลีกอนโดยนำเอาหลักการทางสถิติมาประยุกต์ เช่น ทฤษฎีความน่าจะเป็น การสุ่มตัวอย่าง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าความแปรปรวน ทฤษฎีการกระจายแบบต่างๆ เช่นแบบปกติ(normal distribution) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular ditribution) สามเหลี่ยม(triangular distribution) และอื่นๆ นอกจากนี้ยังนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์ เช่น เชิงอนุพันธ์ย่อย ลำดับอนุกรม มาใช้วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการสอบเทียบทั้งหมด

1) ความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Standard Uncertainty)

ผลของการวัดจะอยู่ในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ใช้กันอยู่จะเป็นดังต่อไปนี้

2) ค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ (type A Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ(U_A) เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานโดยการพิจารณาทางสถิติ จากการวัดซ้ำจำนวน n ครั้ง ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยของการวัดเป็นดังนี้

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} x_k \qquad (1)$$

เมื่อ

$$S(x_k) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{k=1}^{n}(x_k - \bar{x})^2} \qquad (2)$$

$S(x_k)$: ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ $S(\bar{x}_i)$: ค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ดังนั้น จะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิดเอเป็น

$$U_A = U(x_i) = S(\bar{x_i}) = \frac{1}{\sqrt{n}} S(x_k) \qquad (3)$$

3) ค่าความไม่แน่นอนชนิดบี (type B Uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนชนิดบี(U_B) เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานโดยไม่ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติโดยตรง แต่จะใช้การตัดสินใจทางวิทยาศาสตร์โดยอาศัยข้อมูลที่เกี่ยวข้องดังจะกล่าวต่อไปนี้

เราจะได้ค่าความไม่แน่นอนแบบบีในกรณีต่างๆรวมทั้งหมดเป็น

$$U_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \ldots.} \qquad (4)$$

เมื่อ U_{B1}, U_{B2} : เป็นค่าความไม่แน่นอนชนิดบีที่ได้จากกรณีต่างๆ

3.1 กำหนดให้ U_{B1} จากใบรับรองผลการสอบเทียบของผู้ผลิต

$$U_{B1} = \pm \frac{U_{STD}}{k} \qquad (5)$$

กรณีที่ U_{STD} เป็นค่าความไม่แน่นอนจากใบรับรองของเครื่องออโต้คอลลิเมเตอร์ จะถูกหารด้วยตัวประกอบ (k-factor ในตาราง student's t-distribution) k ถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของระดับความเชื่อมั่นที่ 68% หรือที่ประมาณ 1σ ซึ่งในที่นี้จะให้เป็นการแจกแจงแบบปกติ(normal distribution)

3.2 พิจารณา U_{B2} จากความละเอียดในการอ่านหรือเรสโซลูชั่น(resolution) ของเครื่องมือ ซึ่งให้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ได้มีการแจกแจงเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular distribution) ซึ่งมีขีดจำกัดล่าง(lower limit) และขีดจำกัดบน(upper limit) ค่าประมาณของอินพุทที่ได้เป็น

$$U_{B2} = \pm \frac{\delta}{\sqrt{3}} = \frac{a_w}{2\sqrt{3}} \qquad (6)$$

เมื่อ a_w= เป็นค่าเรสโซลูชั่นหรือเท่ากับ 2δ ทำเป็นเซมิเรนจ์(semi-range)

4) ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (combined Standard Uncertainty: U_C)

เป็นผลรวมของค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบทั้งหมด ทั้งจากชนิดเอและชนิดบี เรียกว่ากฎแห่งการกระจายความไม่แน่นอน (law of propagation of uncertainty) และวิธีรากที่สองของผลบวกยกกำลังสอง (root-sum of square)

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \qquad (7)$$

นำค่า U_C มาพิจารณาเพื่อหาค่าไม่แน่นอนขยาย(expanded uncertainties) เพื่อปรับค่าความไม่แน่นอนในการวัดเข้าสู่ระดับความเชื่อที่ 95% หรือประมาณ 2σ

$$\nu_{eff} = \frac{U_C^4}{\sum_{i=1}^{N} \frac{U_i^4}{\nu_i}} = \frac{U_C^4}{\frac{U_A^4}{n-1} + \frac{U_{Autoco}^4}{\infty} + \frac{U_{RES}^4}{\infty}} \qquad (8)$$

เมื่อได้ค่า ν_{eff} เป็นองศาอิสระหรือมีค่าเท่ากับ n-1 แล้วนำไปเปิดตาราง student's t-distributionที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อหาค่า k ว่าค่าความไม่แน่นอนจะมีการแจกแจงแบบ t-distribution หรือ normal distribution ต่อไป

$$Ur = kUc \qquad (9)$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบจะได้ว่า

$$X = \overline{X} \pm Ur \qquad (10)$$

จากการสอบเทียบสามารถคำนวณค่าความไม่นอนในการสอบเทียบดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 16 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของโพลีกอน

Type	Source of uncertanties	Value (±) (ArcSecond)	Distribution	Divisor (k)	U(±) (ArcSecond)	c_i	ν_{eff}
U_A	Repeatability	0	Normal	1	0	1	4
U_{B1}	Auto Collimator	0.20	Normal	1.96	0.1	1	∝
U_{B2}	Resolution	0.025	Rectangular	√3	0.0144	1	∝
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
U_C	Combined uncertainty	-	-	-	0.101	-	-
U_r	Expanded uncertainty		Normal	1.96	0.198	-	∝

ตารางที่ 17 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของโรตารี่เทเบิ้ล

Type	Source of uncertanties	Value (±) (Arc Second)	Distribution	Divisor (k)	U(±) (AreSecond)	c_i	V_{eff}
U_A	Repeatability	0	Normal	1	0	1	4
U_{B1}	Auto Collimator	0.20	Normal	1.96	0.10	1	∞
U_{B2}	Polygon	0.20	Normal	1.96	0.10	1	4
U_{B3}	Resolution	0.025	Rectangular	√3	0.0144	1	∞
U_C	Combined uncertainty	-	-	-	0.142	-	-
U_r	Expanded uncertainty		Normal	1.96	0.278	-	∞