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

วศ กฟ
อว 16

**เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง**

*นักวิทยาศาสตร์ 7ว*

# *การออกแบบและสร้างเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ*

*โดย*

*นายวันชัย ชินชูศักดิ์*
*นักวิทยาศาสตร์ 6ว*
*และ*
*นายพีระวัฒน์ สมนึก*
*นักวิทยาศาสตร์ 5*

*กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ*
*กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ*

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

# เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง

## *นักวิทยาศาสตร์ 7ว*

เลขหมู่ จศ กฟ
จว 16
เลขทะเบียน 11585
วันที่ 16 / ธ.ค. / 46

# *การออกแบบและสร้างเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ*

ด้วยอภินันทนาการ
จาก
จศ.
.....

***โดย***

***นายวันชัย ชินชูศักดิ์***

***นักวิทยาศาสตร์ 6ว***

***และ***

***นายพีระวัฒน์ สมนึก***

***นักวิทยาศาสตร์ 5***

***กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ***

***กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ***

**กรมวิทยาศาสตร์บริการ**

# บทที่ 1
# บทนำ

จากโครงการวิจัยเรื่องเครื่องสอบเทียบมุมมาตรฐาน (small angle generator) ปีงบประมาณ 2544-2545 ซึ่งสอดคล้องกับการสอบย้อนกลับความยาวมาตรฐาน และมุมเป็นส่วนหนึ่งของการวัดความยาว อาจแบ่งการวัดมุมออกเป็นสองแบบด้วยกัน แบบแรกเป็นการวัดมุมที่ขนาดใหญ่หรือมากกว่า 1 องศา ตามที่เห็นเครื่องมือวัดอยู่ทั่วไป และต้องการความถูกต้องไม่มากนัก เช่นโปรแทรคเตอร์ แองกูลาร์คอมบิเนชั่น แบบที่สองเป็นการวัดมุมที่มีขนาดเล็กหรือน้อยกว่า 1 องศา เป็นเครื่องมือที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ระดับน้ำ เกจวัดมุม เครื่องวัดความลาดเอียง งานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงการออกแบบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำโดยใช้เครื่องเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ที่ความแม่นยำดีกว่า ± 0.01 มม./ม.

## 1.1 ปัญหาและที่มาของการวิจัย

ปัญหาการสอบย้อนกลับมาตรฐานด้านมุมในประเทศไทยเรามีอยู่น้อยมาก และไม่มีห้องปฏิบัติการด้านมาตรวิทยาใดในประเทศให้ความสนใจอย่างจริงจัง ในขณะเดียวกันก็มีผู้มาขอรับบริการเพื่อขอสอบเทียบเครื่องมือวัดในปริมาณเพิ่มมากขึ้นทุกวัน การศึกษาพัฒนาเครื่องมือวัดมุมขึ้นใช้เองเพื่อการสอบย้อนกลับมุมมาตรฐานเป็นแนวทางหนึ่งที่ทางห้องปฏิบัติความยาวและมิติ คาดหวังว่าจะเป็นการทำให้แผนภูมิการสอบย้อนกลับมุมมาตรฐานของประเทศไทยสมบูรณ์ตามมาตรฐานสากล ดังนั้นการออกแบบ การสร้างและการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำชนิดความเที่ยงตรงสูงจึงเป็นการพัฒนาความสามารถ และใช้เป็นแนวทางแก้ไขปัญหาการสอบย้อนกลับของห้องปฏิบัติด้านการวัดความยาวและมิติและพร้อมที่ให้บริการสอบเทียบ เป็นแผนรองรับการนำภาคอุตสาหกรรมของประเทศไปสู่มาตรฐานสากล

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาพัฒนาเครื่องสอบเทียบระดับน้ำความไวตั้งแต่ 0.01 มม./ม. ถึง 1.0 มม./ม.
2. ศึกษาแนวทางการออกแบบเครื่องมือวัดมุมชนิดความเที่ยงตรงสูง
3. ขยายขอบข่ายความสามารถห้องปฏิบัติการความยาวและมิติ
4. ศึกษาวิธีการสอบย้อนกลับมาตรฐานทางด้านการวัดความยาวและมิติ
5. เพื่อลดการนำเข้าเครื่องมือวัดทางด้านความยาวและมิติ
6. ยกระดับมาตรฐานอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีการวัดให้ทัดเทียมนานาประเทศ

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. ศึกษาถึงระบบการถ่ายทอดความถูกต้องทางด้านการวัดมุม
2. ศึกษาถึงวิธีการที่เกี่ยวข้องในการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางด้านมิติ

## 1.4 ระยะเวลาของการศึกษาวิจัย

กำหนดเวลาในการวิจัย 2 ปี (ปีงบประมาณ 2544-2545) ตั้งแต่ ตุลาคม2543 ถึง กันยายน 2545 แต่โครงการวิจัยเสร็จสิ้นก่อนกำหนดใช้ระยะเวลาการวิจัยพัฒนาจริง 1 ปี 8 เดือน

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

| รายการดำเนินการ | ช่วงระยะเวลาการดำเนินการวิจัย | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ปีงบประมาณ 2544** | ต.ค | พ.ย | ธ.ค | ม.ค | ก.พ | มี.ค | เม.ย | พ.ค | มิ.ย | ก.ค | ส.ค | ก.ย |
| รวบรวมเอกสารทางวิชาการ | | | | | | | | | | | | |
| ศึกษาหลักการจากเอกสารอ้างอิง | | | | | | | | | | | | |
| ดำเนินการจัดเตรียมอุปกรณ์ | | | | | | | | | | | | |
| **ปีงบประมาณ 2545** | ต.ค | พ.ย | ธ.ค | ม.ค | ก.พ | มี.ค | เม.ย | พ.ค | มิ.ย | ก.ค | ส.ค | ก.ย |
| ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ | | | | | | | | | - | - | - | - |
| สร้างแท่นเครื่องและประกอบเครื่อง | | | | | | | | | - | - | - | - |
| เก็บข้อมูลการศึกษาทดลอง | | | | | | | | | - | - | - | - |
| เขียนรายงานการศึกษาทดลอง | | | | | | | | | - | - | - | - |
| ตรวจสอบแก้ไขคำผิดและข้อบกพร่องรวมทั้งเพิ่มเติมเนื้อหาให้มีความสมบูรณ์ | | | | | | | | | - | - | - | - |

## 1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการศึกษาการสร้างเครื่องมือสอบเทียบมุมมาตรฐาน
2. ทำให้เครื่องมือวิเคราะห์ ทดสอบภายในห้องปฏิบัติการมีความถูกต้องเที่ยงตรงและมีผลต่อการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพการผลิตของโรงงาน
3. เพื่อลดปัญหาการส่งเครื่องมือทางด้านมาตรวิทยาของโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการในประเทศไปสอบเทียบยังต่างประเทศ
4. เพื่อเผยแพร่ความรู้และเทคโนโลยีให้เกิดการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมของประเทศ

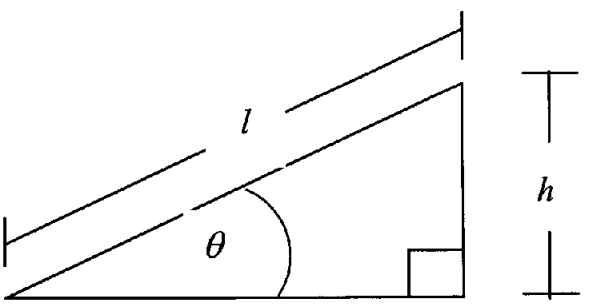
# บทที่ 2
# การออกแบบและหลักการทำงาน

## 2.1 แนวการออกแบบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ

การออกแบบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ[1] ใช้หลักการของมุมซายน์เมื่ออธิบายในรูปของสามเหลี่ยมมุมฉากมุมซายน์แนวความคิดจากซายน์บาร์(sine bar) รูปที่ 2.1 มุมที่เปลี่ยนไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสูง*(h)* ด้านตรงข้ามมุม($\theta$) ต่อระยะฐาน( $l$ ) ที่เปิดมุมของสามเหลี่ยมนั้นดังสมการที่ 1 ซึ่งโดยทั่วไปการออกแบบเครื่องมือชนิดนี้จะกำหนดให้ระยะฐานมีค่าเท่ากับ 1000 มม. เรียกหน่วยของมุมเป็น มิลลิเมตร/เมตร(มม./ม.) หมายถึง มุมที่ได้จากระยะความสูงที่เปลี่ยนไปต่อความยาวฐานที่ยกขึ้นสูงเท่ากับ 1 เมตร (1 ฟิลิปดา เท่ากับ 0.00485 มม./ม. $\approx$ 0.005 มม./ม.)

ในการออกแบบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำต้นแบบนี้ต้องการลดขนาดแท่นให้เล็กลงเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานการสร้างด้วย จึงกำหนดให้มีความยาวของแท่น*(l)* เท่ากับ 500 มม. ทำให้เครื่องมีความไวมากขึ้นเพราะเหตุผลที่ว่าที่ขนาดมุม($\theta$) เดียวกันความสูงจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความยาวเดิม เช่น ที่ความไวขนาด 0.02 มม./ม. จะมีค่าเท่ากับความไวขนาด 0.01 มม./500 มม. เป็นต้น ด้วยแนวความคิดนี้สร้างความสะดวกสบายในการออกแบบเครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้แก่ โปรแกรม AUTOCAD Release 14

รูปที่ 2.1 สามเหลี่ยมมุมฉากมุมซายน์ที่เปลี่ยนไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสูงด้านตรงข้ามมุม($\theta$) ต่อระยะฐาน( $l$ ) ของสามเหลี่ยมดังสมการที่ 2




**รูปที่ 2.1** หลักการสามเหลี่ยมมุมฉาก และการออกแบบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ

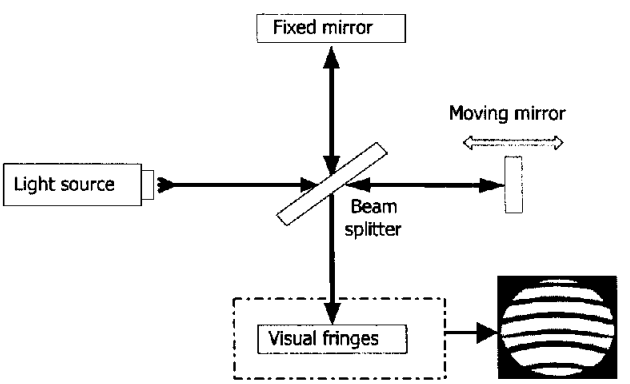
$$sin\theta = \frac{h}{l} \qquad (1)$$

พิจารณาหลักการมุม $sin\ \theta$

$$\Delta h = h_2 - h_1 \qquad (2)$$

$$sin\theta = \frac{\Delta h}{l} \qquad (3)$$

เครื่องสอบเทียบระดับน้ำใช้หลักการแทรกสอดทางแสงของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และเป็นไปตามทฤษฎีการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสัน(Michelson Interferometer) ดังรูปที่ 2.2 เป็นเลเซอร์ชนิดฮีเลี่ยม-นิออน (He-Ne Laser) ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร เนื่องจากชุดวัดมุมด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มีความแม่นยำ ±0.2% ของค่าที่วัดได้ วิธีการวัดจะทำการเปรียบเทียบโดยตรงกับเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ โดยติดตั้งอุปกรณ์ชุดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์บนแท่นเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ โดยทั่วไปเครื่องชุดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สามารถประยุกต์ใช้กับวัดความยาวและมิติต่างๆ มากมาย เช่น วัดระยะขีดสเกล วัดความเร็ว วัดความตรง ความเรียบของพื้นผิวชิ้นงานวัดมุม และอื่นๆ




**รูปที่ 2.2** หลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสัน

งานวิจัยนี้ใช้หลักการแทรกสอดทางแสงของไมเคิลสันดังรูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดแสง (light source) จะถูกส่งมายังผลึกแยกลำแสง (beam splitter) แบบ 50% ทำการแยกลำแสงออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนจะมีความเข้มแสงลดลงครึ่งหนึ่ง ลำแสงส่วนที่หนึ่งเป็นลำแสงอ้างอิงจะไปสะท้อนยังกระจกที่ยึดติดอยู่กับที่ (fixed mirror) ลำแสงส่วนที่สองจะสะท้อนไปยังกระจกที่เคลื่อนที่ได้ (moving mirror) ลำแสงที่สะท้อนกลับจากกระจกที่ยึดติดอยู่กับที่และ กระจกที่เคลื่อนที่ได้มายังผลึกแยกลำแสงอีกครั้งหนึ่ง เปรียบเสมือนว่ามีแหล่งกำเนิดแสงสองแหล่งที่มารวมกัน ทำให้เกิดฟริงจ์ของการแทรกสอดขึ้นที่

ฉากรับแสง (visual fringes) ระยะห่างระหว่างฟริงจ์มีค่าเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ เมื่อทำการเลื่อนกระจกที่เคลื่อนที่ได้เข้า-ออกจะ พบว่าฟริงจ์ที่ฉากรับมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ โดยหลักการนี้ทำให้สามารถคำนวณหาระยะระหว่างกระจกทั้งสองได้

## 2.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ [2]

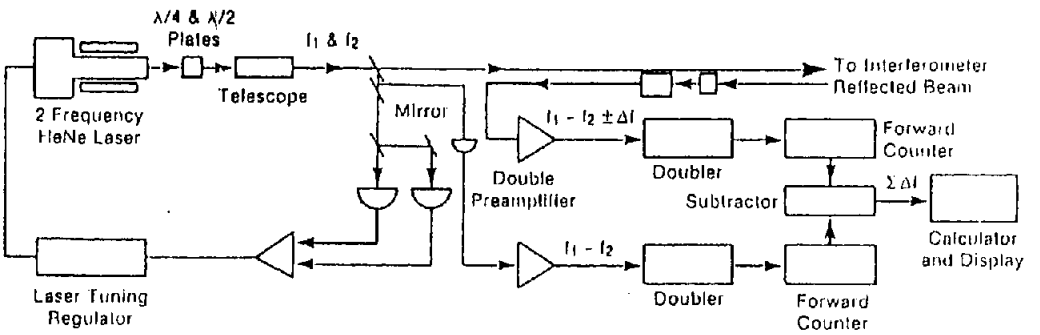
หลักการทำงานของเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์รูปที่ 2.3 นี้ทำแบบหลักการของซีแมนสปลิตเลเซอร์ (Zeeman Split Laser) โดยฮีเลี่ยม-นิออนเลเซอร์จะถูกกระทำภายใต้แรงจากสนามแม่เหล็กในตามแนวยาวอะตอมภายในนีออนจะเกิดการสปลิตไปในระดับพลังงานต่างๆ 2 ระดับ ($\Delta m = \pm 1$) ทำให้เลเซอร์สปลิตออกมามีความถี่ 2 ความถี่ ($f_1$ และ $f_2$) ประมาณ 1.8 เมกะเฮิร์ต และมีการโพลาไรเซชั่น (polarization) ทั้งทางซ้ายและขวาเป็นวงกลมและสามารถดูความแตกต่างของความถี่ด้วยตัวตรวจจับทางแสง (photodetector) ใช้ร่วมกับเครื่องนับความถี่

ลำแสงทั้งสองจะถูกแยกโดยตัวแยกลำแสงหรือบีมสปลิตเตอร์ (beam splitter) ที่มีความไวต่อแสงที่มีการโพลาไรเซชั่น และจะยอมให้แสงความถี่เดียวท่านั้นผ่านไปยังชุดกระจกสะท้อนกลับ (corner reflector mirror) ที่สามารถเคลื่อนที่ไป ณ ที่ตำแหน่งใดๆได้ที่เปลี่ยนไป($\Delta s$) ด้วยความเร็ว($v$) และเป็นสาเหตุของการเกิดความถี่ที่เปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (4)

$$\Delta F_1 = \pm F_1 - \frac{v}{c} \qquad (4)$$

เมื่อ $\Delta F_1$ : เป็นความถี่ในขณะลำแสงเดินทางสะท้อนกลับ

ดังนั้น ผลต่างของความถี่จะเป็น $F_1 + \Delta F_1 - \frac{v}{c}$ จะถูกตรวจจับโดยตัวตรวจจับทางแสง เมื่อลำแสงทั้งสองกลับมารวมกันอีกครั้งซึ่งเป็นผลทำให้สร้างความถี่ต่างระหว่างความถี่ที่เห็นที่ได้จากตัวตรวจจับทางแสงจริงเปรียบเทียบกับชุดตรวจจับทางแสงอ้างอิง (reference photodetector) ซึ่งดูได้จากตัวซับแทร็คเตอร์ (subtractor) และถูกสะสมในหน่วยความจำแถบมืดสว่างหรือฟริงจ์ (fringe-counter register) จากจำนวนฟริงจ์ที่นับได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะขจัด $\Delta s$ เมื่อมีการเคลื่อนกระจกสะท้อนและสามารถที่จะเปลี่ยนกลับค่าความยาวคลื่นไปเป็นเมตริกได้

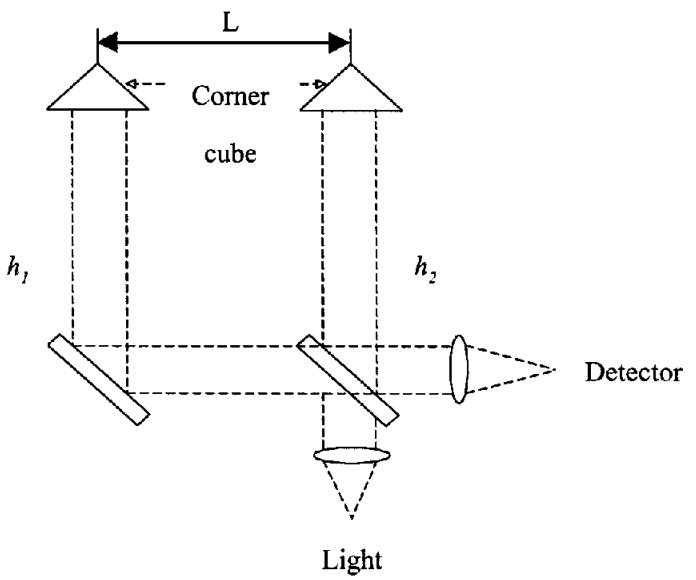



**รูปที่ 2.3** หลักการทำงานของเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ *Excel 1100A*

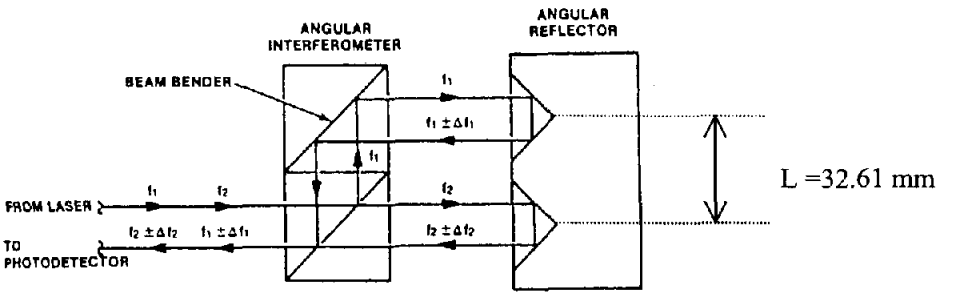
## 2.3 การวัดมุมด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

การวัดมุมด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มีหลักการแตกต่างไปจากการวัดระยะอยู่ตรงที่จะประกอบด้วยชุดวัดระยะอยู่สองชุดด้วยกัน โดยใช้ชุดกระจกสะท้อนกลับ (reflector) สองชุดเพื่อว่า $F_1$ และ $F_2$ ที่ขนานกันออกไปทำให้ระยะขจัดเชิงมุม (angular displacement) ของชุดกระจกสะท้อนกลับทำให้เกิดความถี่ต่าง แบบด็อปเปอร์ชิพต์ (doppler-Shift) เมื่อความถี่ของลำแสงย้อนกลับมาซึ่งจะเป็นผลต่อแกนระยะขจัด (axial displacement) ดังนั้นจำนวนฟริงจ์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะขจัดเชิงมุมเป็น $\sin\theta$

หลักการแทรกสอดทางแสงเพื่อวัดมุม สามารถวัดมุมขนาดเล็ก ดังรูปที่ 2.4 หลักการแทรกสอดทางแสงเพื่อวัดมุมที่สามารถวัดมุมขนาดเล็กดังรูปที่ 2.4 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดมุมดังรูปที่ 2.5 $H_1$ และ$H_2$ จะเทียบเท่า $f_1 \pm \Delta f_1$ และ $f_2 \pm \Delta f_2$ ดังสมการที่ 5 และ 6 โดยลำดับ




**รูปที่ 2.4** หลักการพื้นฐานอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์วัดมุม




**รูปที่ 2.5** ชุดแองกูลาร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ *Excel 1100A*

ตามหลักการของชุดอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์นำเอาหลักการมาใช้ในการวัดรูปโดยใช้หลักการวัดแบบอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ในการวัดระยะมาใช้วัดมุม โดยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์จะมีการกำเนิดแสงมี 2 ความถี่ ($f_1, f_2$) เพียงแต่ชุดวัดระยะจะมีชุด $f_1 \pm \Delta f_1$ กับ $f_2 \pm \Delta f_2$ เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยพิจารณาหลักการพื้นฐานของมุมซายน์กับชุดแองกูลาร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Angular Interferometer) เราจะได้

$$f_1 \pm \Delta f_1 = h_2 \qquad (5)$$

$$f_2 \pm \Delta f_2 = h_1 \qquad (6)$$

# บทที่ 3
# การสร้างและสอบเทียบ

## 3.1 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบในการออกแบบ สร้างและสอบเทียบ

### 3.1.1 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบในการออกแบบและการสร้าง

1. เครื่อง milling machine ชนิด 2 1/2 แกนยี่ห้อ Lagoon รุ่นFTV-1S
2. เครื่องกลึง Harrison, รุ่น 250M
3. เครื่องขัดผิวชิ้นงาน (surface guiding) ยี่ห้อ OKAMOTO รุ่น 63ST
4. Dial gauge 0.001 – 2.0 mm ยี่ห้อ Frenco
5. Micrometer head 0.01 – 25.0 mm ยี่ห้อ Mitutoyo

### 3.1.2 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบการสอบเทียบ

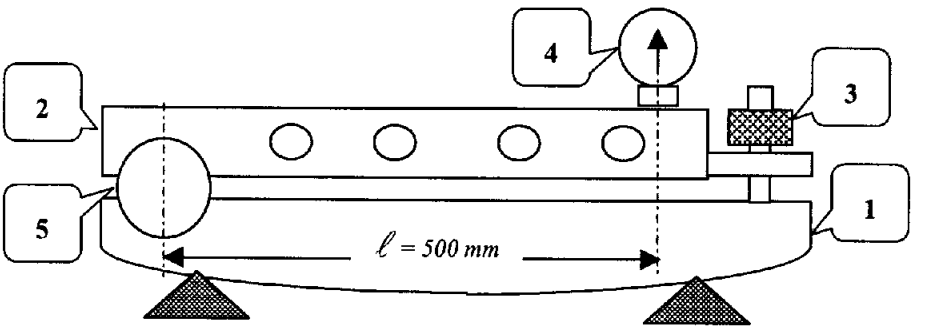
1. ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ *(Excel รุ่น 1100A)*
   - He-Ne Laser Head *(รุ่น 1001B, S/N: 1F1406)* และ Tripot
   - Laser Receiver*( รุ่น 1031A)*
   - Angular Inteferometer *(รุ่น 1121A)*
   - Angular Reflector *(รุ่น 1122A)*
   - PC computer
   - Air Sensor*(รุ่น 1160A)*, Material Sensor*(รุ่น 1163A)*
   - คู่มือการใช้เครื่องเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์[3]
2. แท่นระดับชนิดหินแกรนิต เกรด 0 ขนาด 500 x 450 mm (RAPH)

## 3.2 ลำดับขั้นตอนการสร้างเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ

เทคนิคการสร้างเครื่องสอบเทียบระดับน้ำมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ออกแบบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำด้วยโปรแกรม AUTOCAD, Release 14 (รูปที่ ก.2)
2. ทำแบบแม่พิมพ์ไม้ 2 ชุด ส่วนฐาน และส่วนระนาบอ้างอิง (รูปที่ ก.3)
3. หล่อเหล็กตามแบบข้อ 2 ด้วยวิธี green sand mold ใช้เหล็กชนิด FC25 (รูปที่ ก.4)
4. ขึ้นรูปเครื่องมือด้วยเครื่อง milling machine ชนิด 2 1/2 แกนยี่ห้อ Lagoon รุ่นFTV-1S (รูปที่ ก.5)

5. ทำชิ้นงานต่างๆ เช่น ลูกบิด ขาตั้ง ตัวยึดไดอัลเกจ ยี่ห้อ Harrison, รุ่น 250M(รูปที่ ก.5)
6. ขัดผิวชิ้นงานให้เรียบด้วยเครื่อง surface guiding , ยี่ห้อ OKAMOTO รุ่น 63ST
7. ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ ไดอัลเกจ ไมโครมิเตอร์เฮ็ด ขาตั้ง (รูปที่ ก.6)




**รูปที่ 3.1** ส่วนประกอบหลักของเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ

**รายการส่วนประกอบหลักของเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ**

หมายเลข 1. ส่วนฐานเครื่อง ความยาวทั้งหมด 530 มม.($\ell$= 500 mm)

หมายเลข 2. ส่วนระนาบอ้างอิงความยาวทั้งหมด 530 มม.($\ell$= 500 mm)

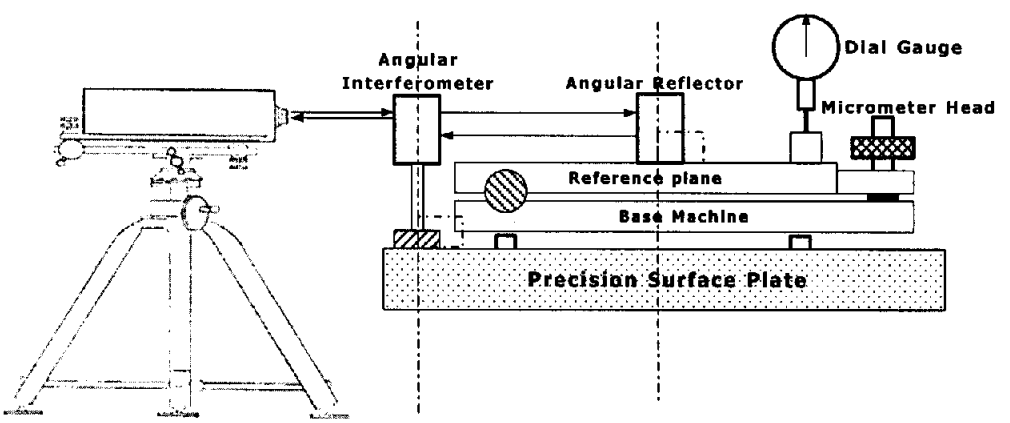
หมายเลข 3. ไมโครมิเตอร์เฮ็ด(Micrometer head)

หมายเลข 4. ไดอัลเกจ(Dial gauge)

หมายเลข 4. จุดหมุน(Pivot)

## 3.3 วิธีการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำโดยใช้เครื่องเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

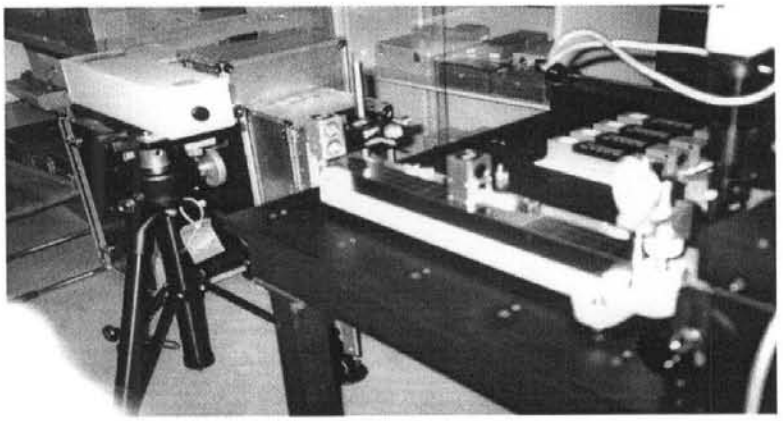
เมื่อจัดชุดสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำดังรูปที่ 3.1 โดยวางชุดแองกูลาร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และชุดแองกูลาร์รีเฟ็คเตอร์ (Angular Reflector) ให้อยู่ในแนวเดียวกัน และทำมุมตั้งฉากกับแท่นบนพื้นระดับ โดยมีค่าคงที่ L เท่ากับ 32.61 มิลลิเมตร




**รูปที่ 3.2** การสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำด้วยเครื่องเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

## 3.4 ลำดับขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ

1. เปิดเครื่องเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เพื่ออุ่นเครื่องอย่างน้อย 1 ชม.
2. ติดตั้งชุดแองกูลาร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์บนแท่นระดับและชุดแองกูลาร์รีเฟล็คเตอร์บนเครื่องสอบเทียบระดับน้ำดังรูปที่ 3.2 แล้วปรับตั้งให้ลำแสงอยู่ในแนวเดียวกันตามคู่มือการใช้ของ *Excel 1100A*
3. เลือกการวัดไปที่การวัดมุม(angular measurement) ปรับตั้งอ่านศูนย์
4. ปรับหัวไมโครมิเตอร์ของเครื่องสอบเทียบระดับน้ำให้ไดอัลเกจ (dial gauge)อ่านศูนย์
5. เริ่มทำการสอบเทียบที่จุด 0.01 จนถึง 1.0 มม./ม. อ่านค่าความถูกต้องที่ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์บันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์



**รูปที่ 3.3** การจัดตั้งเครื่องมือเพื่อสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ

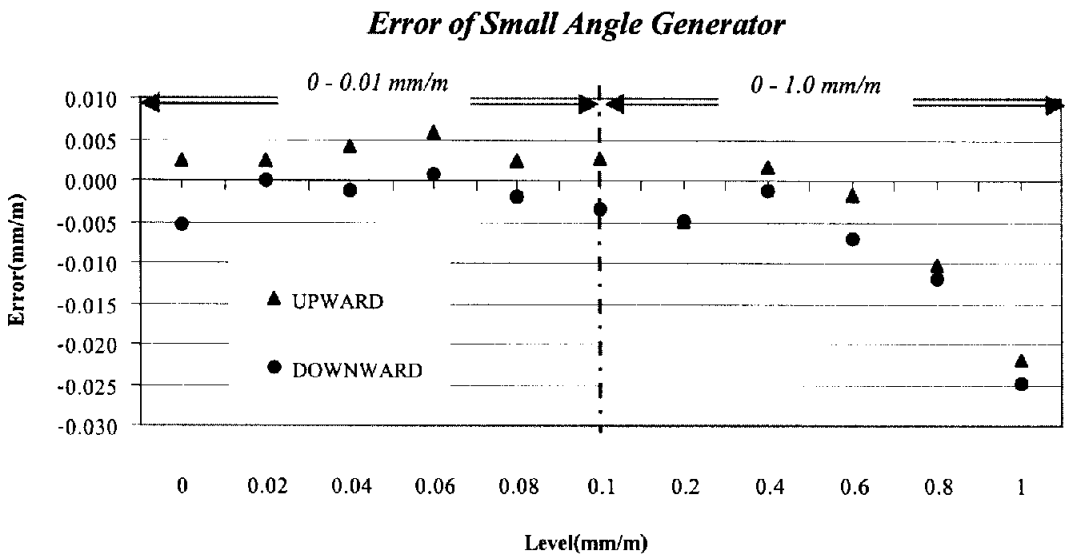
6. กระทำการวัดซ้ำขั้นตอนข้อ 3 ถึง 5 ตามจำนวนครั้งที่ต้องการ
7. หากว่าผลการวัดผิดปกติให้กระทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 และทำการเริ่มสอบเทียบใหม่อีกครั้ง
8. นำค่าที่ได้จากการสอบเทียบไปคำนวณค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนต่อไป

# บทที่ 4

## ผลการทดลอง

จากผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ (ภาคผนวก ก) ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ แบ่งการสอบเทียบออกเป็นสองช่วงการวัดด้วยกัน ในช่วงการวัดแรกตั้งแต่ 0 ถึง 0.1 มม./ม.และช่วงการวัดที่สองตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.0 มม./ม. จากจำนวนข้อมูลการสอบเทียบ 5 ชุดซึ่งแต่ละชุดวัด 3 ครั้ง

ได้ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 0.01 มม./ม. และ ± 0.03 มม./ม. ที่ความไม่แน่นอนเท่ากับ ± 0.001 มม./ม. และ ± 0.003 มม./ม. โดยลำดับ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

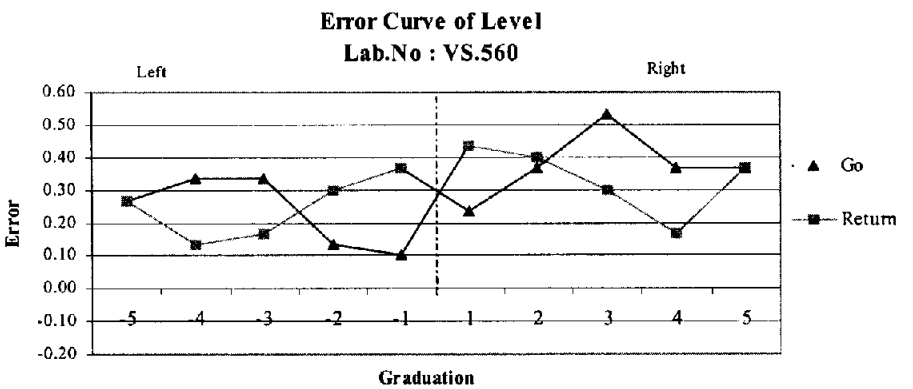



**รูปที่ 4.1** ค่าผิดพลาดของเครื่องสอบเทียบระดับน้ำที่ช่วงการวัด 0 – 1.0 มม./ม.

# บทที่ 5
# สรุปผล วิจารณ์และข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผล

ผลการออกแบบพัฒนาเครื่องสอบเทียบระดับน้ำช่วงการวัด 0 ถึง 1.0 มม./ม. มีความแม่นยำดีกว่า ± 0.03 มม./ม. สามารถใช้สอบเทียบระดับน้ำที่มีความไวขนาด 0.02-0.1 มม./ม. ค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ ± 0.01 มม./ม. ได้ผลดีดังตัวอย่างรูปที่ 5.1 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงค่าความผิดของระดับน้ำที่ได้รับการสอบเทียบด้วยเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ




**รูปที่ 5.1** ตัวอย่างกราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระดับน้ำที่สอบเทียบด้วยเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ

## 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ปัจจัยสำคัญในการศึกษาพัฒนาเรื่องใดเรื่องหนึ่งนั้น สิ่งที่มีความจำเป็นที่ขาดเสียไม่ได้ที่จะต้องกล่าวถึงก็คือ ปัญหาของค่าผิดพลาดจากการวัดฯ และข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ เครื่องมือ ตำรา บุคลากร และค่าใช้จ่าย ที่ใช้ในการศึกษาสำหรับโครงการฯ ฉบับนี้ยังไม่เพียงพอ ซึ่งปัญหาการขาดอุปกรณ์เครื่องมือสามารถแก้ได้โดยการจัดหางบประมาณเพื่อจัดซื้อ หรือส่งเสริมให้มีการจัดทำเครื่องขึ้นเอง ส่วนปัญหาการขาดแคลนตำราที่ใช้ศึกษา พัฒนาฯ แก้ไขโดยการรับ วารสารเอกสารเผยแพร่ของหน่วยงานหรือสถาบันที่เกี่ยวข้องกับมาตรวิทยาทางวิทยาศาสตร์ เพื่อที่จะได้รับรู้เทคโนโลยีและผลงานการวิจัยแปลกใหม่ อีกทั้งยังเพิ่มความรู้วิธีการวัดและสอบเทียบเครื่องมือให้ทันสมัยทัดเทียมห้องปฏิบัติการทางมาตรวิทยาฯต่าง ๆ

จากผลที่ได้จากการศึกษา พัฒนาแสดงให้เห็นว่าแนวทางการออกแบบและวิธีการสอบเทียบเกี่ยวกับเรื่องมุมมาตรฐานนั้นมีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือเทียบเท่าเครื่องมือถึงดีกว่าเครื่องมือที่จัดซื้อมาจากต่างประเทศ เนื่องจากว่ามีอยู่หลายวิธีที่ทำให้ข้อมูลออกมาใกล้เคียงกันมาก โดยเฉพาะในการใช้เครื่องมือวัดระดับความสามารถสูง เช่น Laser Interferometer และ small angle generator เป็นต้น ซึ่งเราสามารถนำหลักการและวิธีไปใช้ในการศึกษาพัฒนาการสอบย้อนกลับเครื่องมือประเภทอื่นต่อไป

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำเป็นแนวทางให้มีการพัฒนาเครื่องดังกล่าวให้มีความสามารถมากขึ้นได้ด้วยการเปลี่ยนชุดแสดงผลจากเดิมเป็นไดอัลเกจ ขนาด 0.001 มม. ให้มีความละเอียดในการอ่านและความแม่นยำมากขึ้น 0.0001 มม. ก็จะเพิ่มความแม่นยำในการสอบเทียบมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัย และผู้ร่วมวิจัย ขอขอบคุณ นายชัยวุฒิ เลาวเลิศ ผู้อำนวยการกองฟิสิกส์และวิศวกรรม, นายเกษม พิฤทธิ์บูรณะ หัวหน้ากลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ และทีมงานฝ่ายสนับสนุนทางเทคนิค กลุ่มสอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์ ทดสอบ ที่ให้การช่วยเหลือ ส่งเสริม และสนับสนุนโครงการวิจัยฯ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

วันชัย ชินชูศักดิ์

ดร.พีระวัฒน์ สมนึก

# 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, Lenghts 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. Edited by : chairman programme committee. Length standards : Precision angular measurement, Tae Bong Eom.

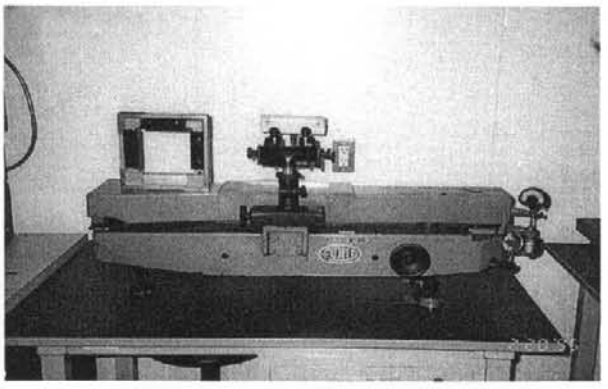
[3] Instruction manual , P/N 1100-0000-9101, **"Laser Interferometer 1100A"**, No. 2 July 2001, Excel precision coporation precision company , USA.

[4] ISO/TAG 4, **"Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement"**, First Edition, January 1993.

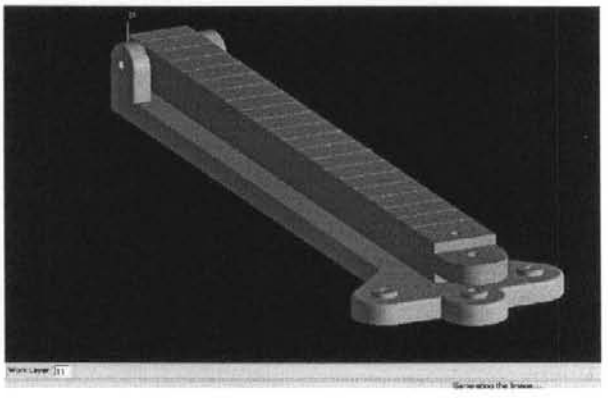
# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

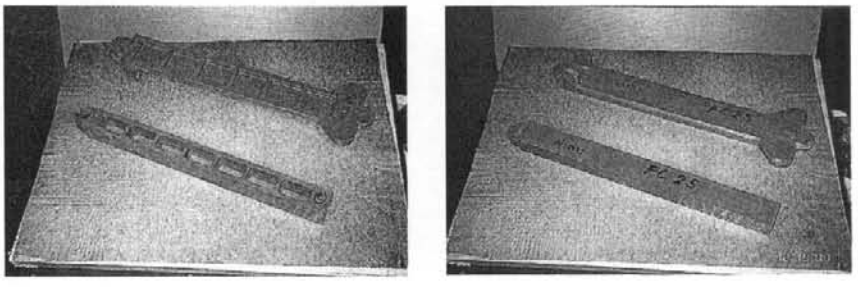
## ลำดับขั้นตอนการออกแบบและผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ



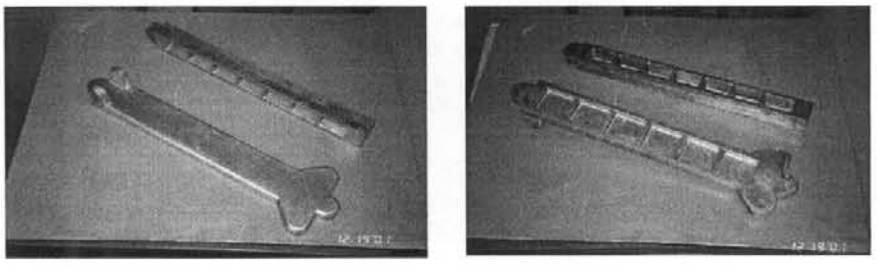
**รูปที่ ก.1** เครื่องสอบเทียบระดับน้ำแบบเดิมขนาดแท่นยาว 1000 มม.



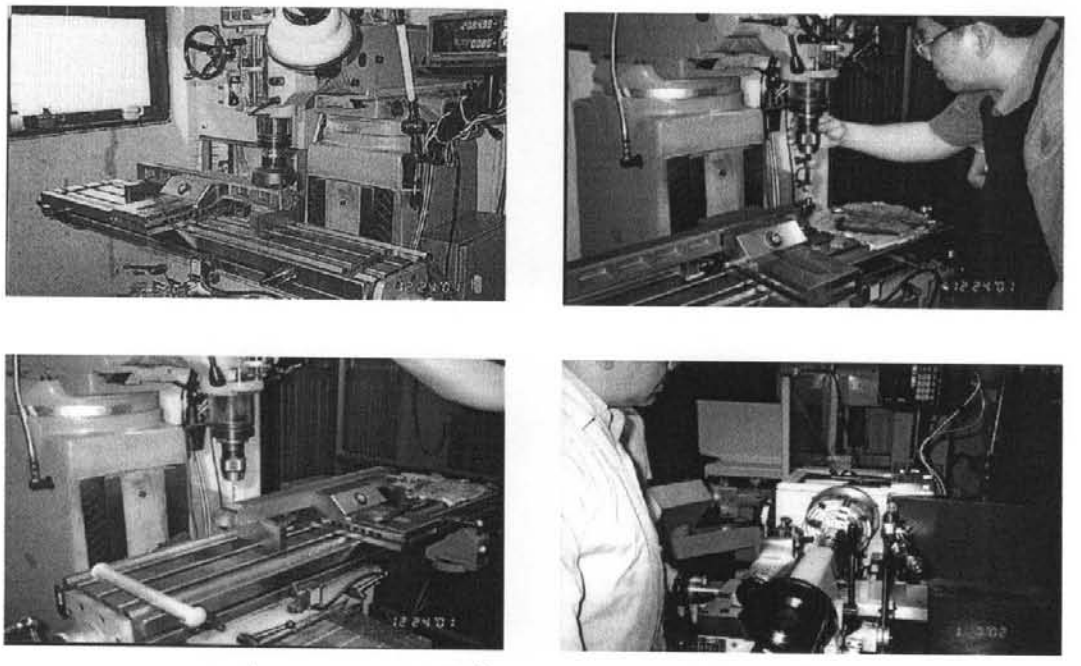
**รูปที่ ก.2** การออกแบบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



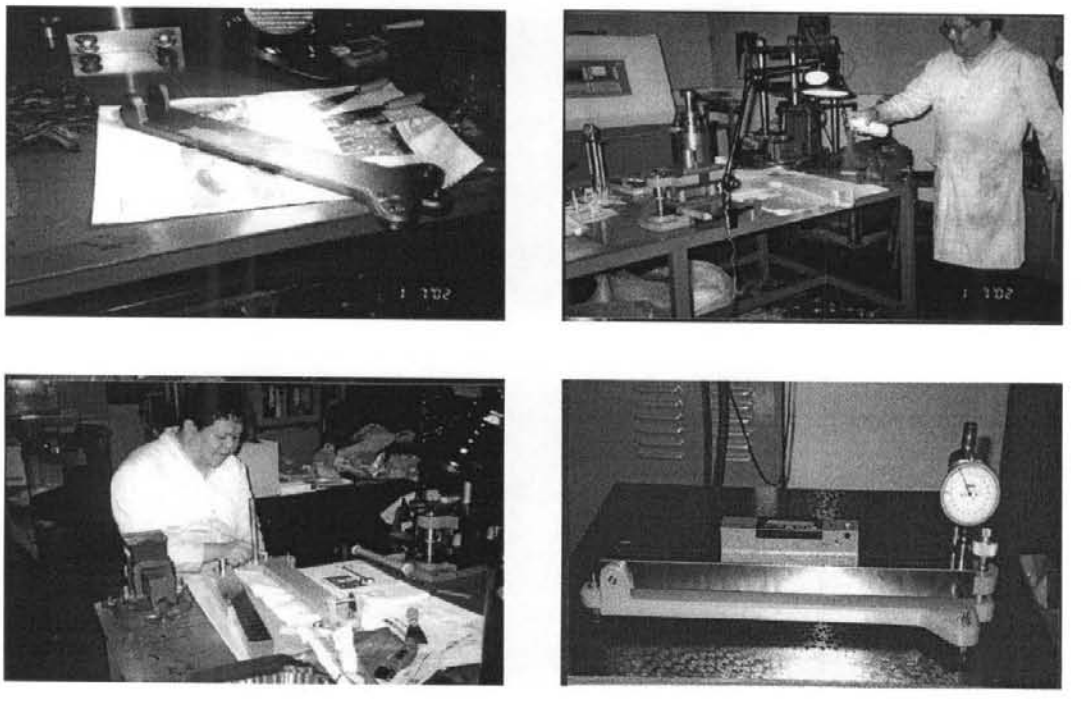
**รูปที่ ก.3** แบบแม่พิมพ์เครื่องสอบเทียบระดับน้ำ



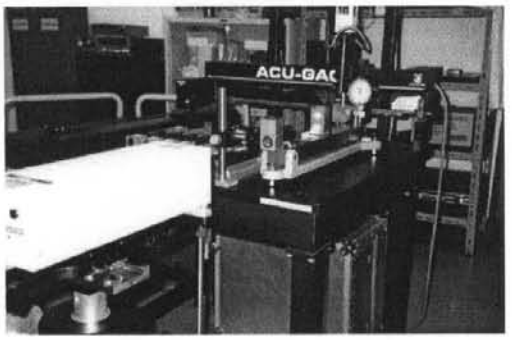
**รูปที่ ก.4** หล่อเหล็กแท่นเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ



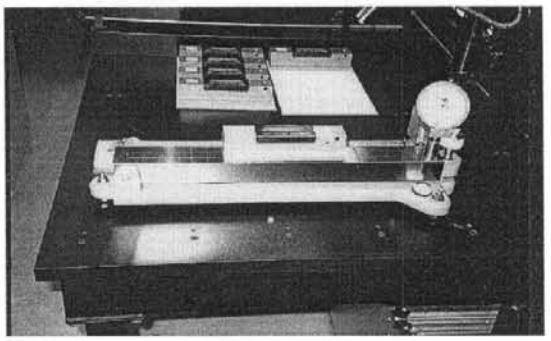
**รูปที่ ก.5** การแมชีนนิ่งขึ้นรูปเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ



**รูปที่ ก.6** การตกแต่งและประกอบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ




**รูปที่ ก.7** ทำการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำด้วยชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ณ ห้องปฏิบัติการความยาวและมิติ



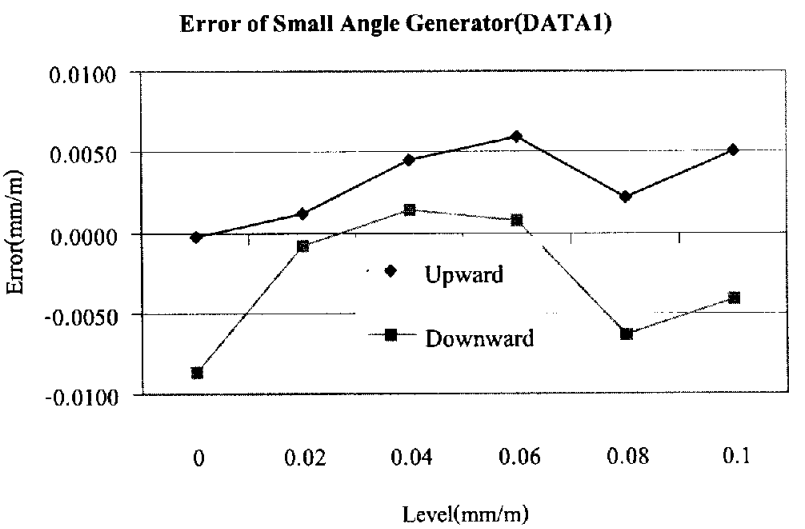
**รูปที่ ก.8** เครื่องสอบเทียบระดับน้ำขณะสอบเทียบระดับน้ำขนาด 0.02 มม./ม

## ตารางที่ ก.1 บันทึกผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำครั้งที่ 1

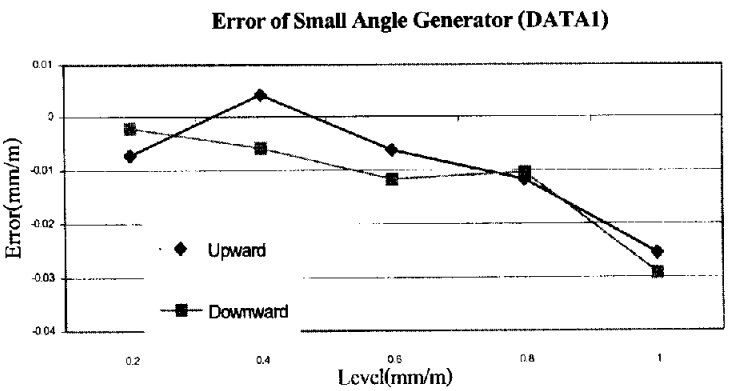
วันที่สอบเทียบ : 17 พฤษภาคม 2545

| Reading | UPWARD | | | DOWNWARD | | | Error UP | Error |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm/m | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | DOWN |
| 0 | 0.000 | 0.000 | -0.001 | -0.009 | -0.009 | -0.008 | -0.0003 | -0.0087 |
| 0.02 | 0.021 | 0.021 | 0.021 | 0.019 | 0.019 | 0.019 | +0.0012 | -0.0009 |
| 0.04 | 0.044 | 0.045 | 0.045 | 0.041 | 0.042 | 0.042 | +0.0045 | +0.0014 |
| 0.06 | 0.066 | 0.066 | 0.066 | 0.061 | 0.061 | 0.060 | +0.0059 | +0.0007 |
| 0.08 | 0.082 | 0.082 | 0.082 | 0.074 | 0.074 | 0.073 | +0.0021 | -0.0063 |
| 0.1 | 0.105 | 0.105 | 0.105 | 0.096 | 0.096 | 0.096 | +0.0051 | -0.0041 |
| 0.2 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | 0.198 | 0.198 | 0.198 | -0.0073 | -0.0022 |
| 0.4 | 0.404 | 0.404 | 0.404 | 0.394 | 0.394 | 0.394 | +0.0042 | -0.0059 |
| 0.6 | 0.594 | 0.594 | 0.594 | 0.588 | 0.588 | 0.588 | -0.0063 | -0.0117 |
| 0.8 | 0.788 | 0.788 | 0.788 | 0.790 | 0.789 | 0.789 | -0.0118 | -0.0105 |
| 1.0 | 0.975 | 0.974 | 0.974 | 0.971 | 0.971 | 0.971 | -0.0255 | -0.0291 |

**รูปที่ ก.9** DATA1.1/5




**รูปที่ ก.10** DATA1.2/5

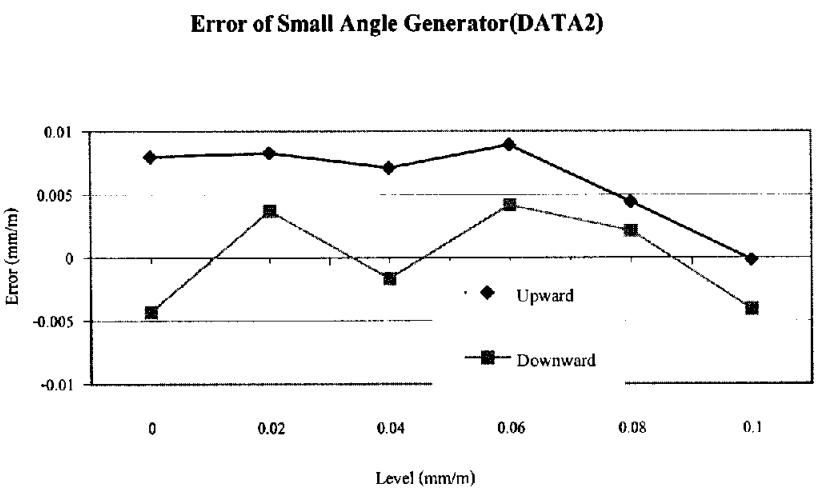


## ตารางที่ ก.2 บันทึกผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำครั้งที่ 2

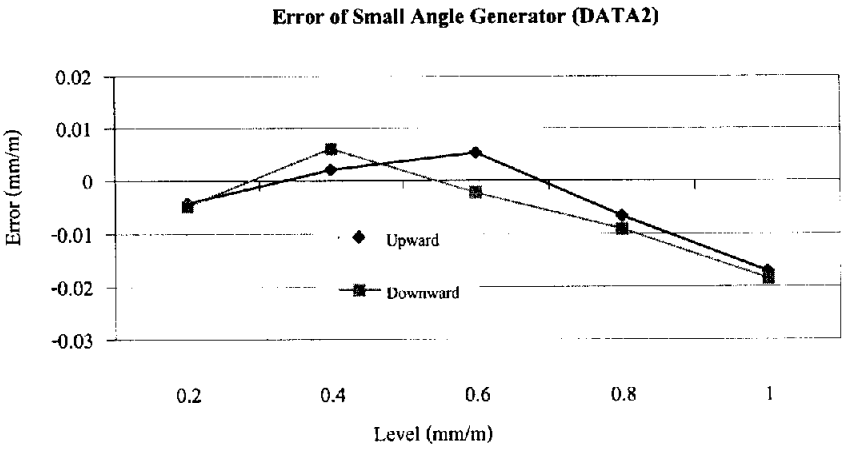
วันที่สอบเทียบ : 17 พฤษภาคม 2545

| Reading | UPWARD | | | DOWNWARD | | | Error UP | Error DOWN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm/m | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | |
| 0 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | -0.004 | -0.005 | -0.004 | +0.0080 | -0.0043 |
| 0.02 | 0.028 | 0.028 | 0.028 | 0.024 | 0.024 | 0.023 | +0.0083 | +0.0037 |
| 0.04 | 0.047 | 0.047 | 0.047 | 0.038 | 0.038 | 0.039 | +0.0071 | -0.0017 |
| 0.06 | 0.069 | 0.069 | 0.069 | 0.064 | 0.064 | 0.064 | +0.0089 | +0.0042 |
| 0.08 | 0.085 | 0.084 | 0.084 | 0.082 | 0.082 | 0.082 | +0.0044 | +0.0021 |
| 0.1 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.096 | 0.096 | 0.096 | -0.0002 | -0.0041 |
| 0.2 | 0.196 | 0.196 | 0.196 | 0.196 | 0.195 | 0.195 | -0.0043 | -0.0048 |
| 0.4 | 0.402 | 0.402 | 0.402 | 0.406 | 0.406 | 0.406 | +0.0020 | +0.0061 |
| 0.6 | 0.605 | 0.606 | 0.605 | 0.598 | 0.598 | 0.597 | +0.0052 | -0.0023 |
| 0.8 | 0.793 | 0.793 | 0.794 | 0.791 | 0.791 | 0.791 | -0.0068 | -0.0092 |
| 1.0 | 0.983 | 0.983 | 0.982 | 0.982 | 0.981 | 0.981 | -0.0171 | -0.0185 |

**รูปที่ ก.11** DATA2.1/5




**รูปที่ ก.12** DATA2.2/

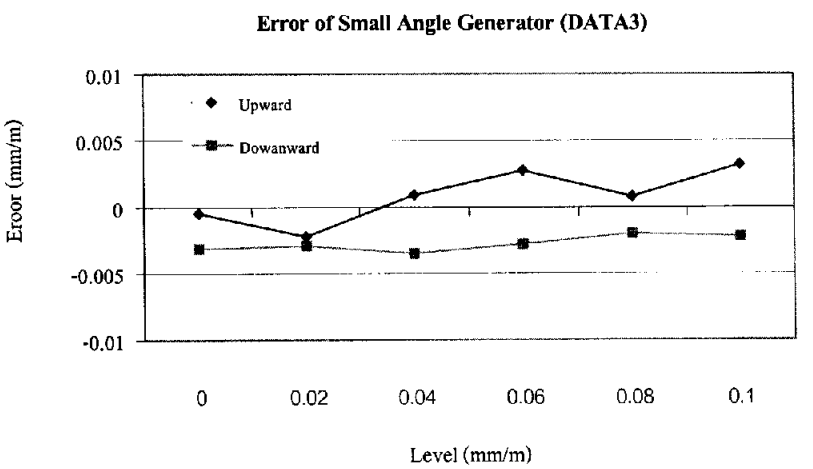


## ตารางที่ ก.3 บันทึกผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำครั้งที่ 3

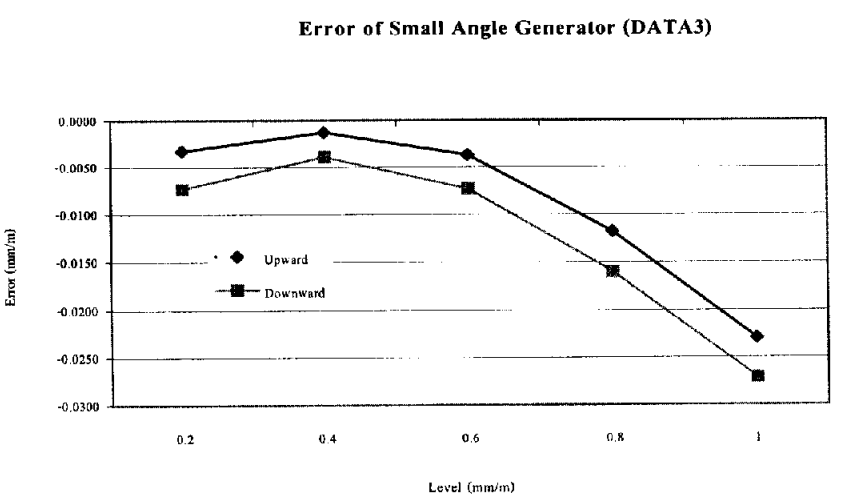
วันที่สอบเทียบ : 17 พฤษภาคม 2545

| Reading | UPWARD | | | DOWNWARD | | | Error UP | Error DOWN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm/m | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | |
| 0 | -0.001 | 0.000 | 0.000 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.0005 | -0.0032 |
| 0.02 | 0.018 | 0.018 | 0.018 | 0.017 | 0.017 | 0.017 | -0.0022 | -0.0029 |
| 0.04 | 0.041 | 0.041 | 0.041 | 0.037 | 0.036 | 0.036 | +0.0008 | -0.0035 |
| 0.06 | 0.063 | 0.063 | 0.063 | 0.057 | 0.057 | 0.057 | +0.0027 | -0.0029 |
| 0.08 | 0.081 | 0.081 | 0.081 | 0.078 | 0.078 | 0.078 | +0.0007 | -0.0020 |
| 0.1 | 0.103 | 0.103 | 0.103 | 0.098 | 0.098 | 0.098 | +0.0032 | -0.0023 |
| 0.2 | 0.197 | 0.196 | 0.197 | 0.193 | 0.193 | 0.193 | -0.0033 | -0.0073 |
| 0.4 | 0.399 | 0.399 | 0.399 | 0.396 | 0.396 | 0.396 | -0.0013 | -0.0039 |
| 0.6 | 0.596 | 0.597 | 0.597 | 0.593 | 0.593 | 0.593 | -0.0037 | -0.0073 |
| 0.8 | 0.788 | 0.788 | 0.788 | 0.784 | 0.784 | 0.784 | -0.0118 | -0.0160 |
| 1.0 | 0.977 | 0.977 | 0.977 | 0.973 | 0.973 | 0.973 | -0.0229 | -0.0271 |

**รูปที่ ก.13** DATA3.1/5




**รูปที่ ก.14** DATA3.2/5

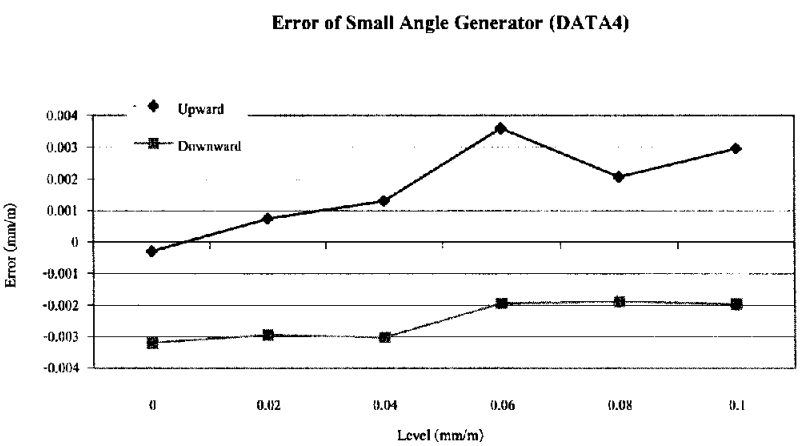


# ตารางที่ ก.4 บันทึกผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำครั้งที่ 4

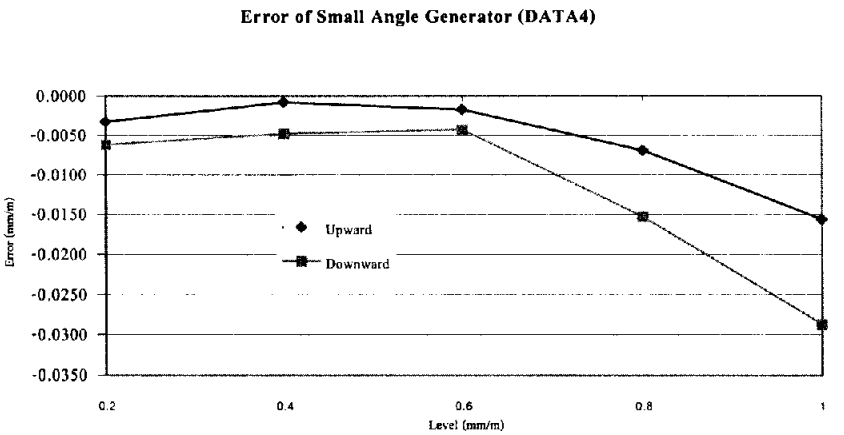
วันที่สอบเทียบ : 17 พฤษภาคม 2545

| Reading | UPWARD | | | DOWNWARD | | | Error UP | Error DOWN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm/m | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | |
| 0 | 0.000 | -0.001 | -0.001 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.0003 | -0.0032 |
| 0.02 | 0.021 | 0.021 | 0.021 | 0.017 | 0.017 | 0.017 | +0.0007 | -0.0029 |
| 0.04 | 0.042 | 0.042 | 0.042 | 0.037 | 0.037 | 0.037 | +0.0013 | -0.0030 |
| 0.06 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.058 | 0.058 | 0.058 | +0.0036 | -0.0019 |
| 0.08 | 0.083 | 0.083 | 0.083 | 0.078 | 0.078 | 0.078 | +0.0021 | -0.0019 |
| 0.1 | 0.104 | 0.104 | 0.104 | 0.098 | 0.098 | 0.098 | +0.0030 | -0.0020 |
| 0.2 | 0.196 | 0.196 | 0.195 | 0.194 | 0.194 | 0.194 | -0.0033 | -0.0062 |
| 0.4 | 0.399 | 0.399 | 0.399 | 0.395 | 0.395 | 0.395 | -0.0008 | -0.0048 |
| 0.6 | 0.598 | 0.597 | 0.598 | 0.596 | 0.596 | 0.596 | -0.0017 | -0.0043 |
| 0.8 | 0.791 | 0.791 | 0.791 | 0.785 | 0.785 | 0.785 | -0.0069 | -0.0153 |
| 1.0 | 0.979 | 0.979 | 0.979 | 0.971 | 0.971 | 0.971 | -0.0156 | -0.0287 |

**รูปที่ ก.15** DATA4.1/5




**รูปที่ ก.16** DATA4.2/5

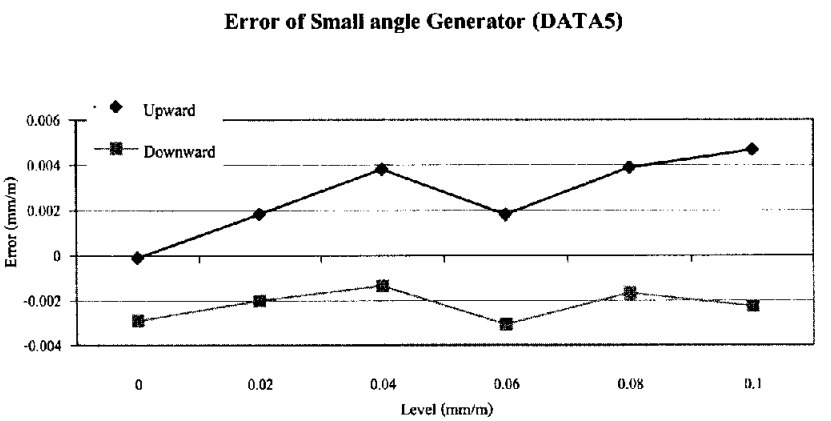


## ตารางที่ ก.5 บันทึกผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำครั้งที่ 5

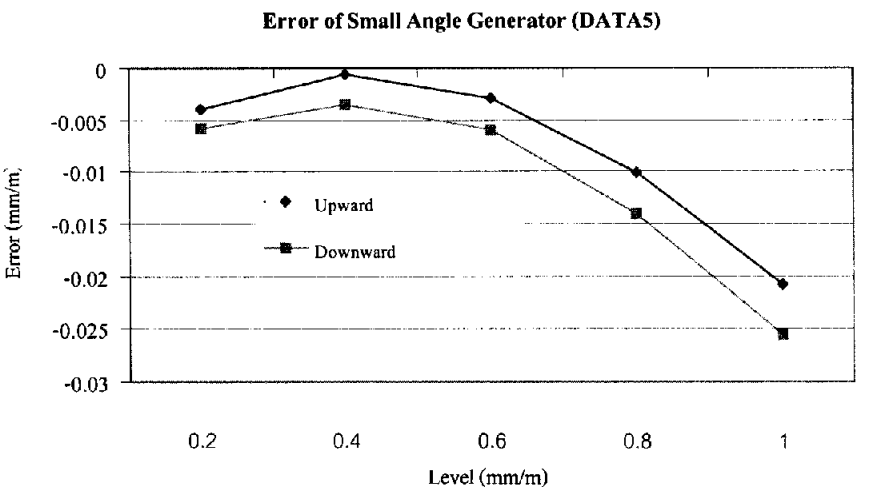
วันที่สอบเทียบ : 17 พฤษภาคม 2545

| Reading | UPWARD | | | DOWNWARD | | | Error UP | Error DOWN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm/m | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.0001 | -0.0029 |
| 0.02 | 0.022 | 0.022 | 0.022 | 0.018 | 0.018 | 0.018 | +0.0018 | -0.0020 |
| 0.04 | 0.044 | 0.044 | 0.044 | 0.039 | 0.038 | 0.039 | +0.0038 | -0.0014 |
| 0.06 | 0.062 | 0.062 | 0.062 | 0.057 | 0.057 | 0.057 | +0.0018 | -0.0031 |
| 0.08 | 0.084 | 0.084 | 0.084 | 0.078 | 0.079 | 0.078 | +0.0039 | -0.0017 |
| 0.1 | 0.105 | 0.105 | 0.105 | 0.098 | 0.098 | 0.098 | +0.0047 | -0.0023 |
| 0.2 | 0.196 | 0.196 | 0.196 | 0.194 | 0.194 | 0.194 | -0.0040 | -0.0058 |
| 0.4 | 0.399 | 0.400 | 0.399 | 0.396 | 0.397 | 0.397 | -0.0007 | -0.0036 |
| 0.6 | 0.597 | 0.597 | 0.597 | 0.594 | 0.594 | 0.594 | -0.0028 | -0.0060 |
| 0.8 | 0.790 | 0.790 | 0.790 | 0.786 | 0.786 | 0.786 | -0.0101 | -0.0141 |
| 1.0 | 0.979 | 0.979 | 0.979 | 0.974 | 0.975 | 0.975 | -0.0209 | -0.0255 |

**รูปที่ ก.17** DATA5.1/5




**รูปที่ ก.18** DATA5.2/5



# ภาคผนวก ข

## การหาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบระดับน้ำ

## (The uncertainty evaluation of small angle generator calibration)

การสอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือทางด้านมุมมาตรฐาน (angle standard) ผลที่ได้จะบอกให้รู้ถึงค่าความผิดพลาดซึ่งอยู่ในรูปของค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) จากการประยุกต์ใช้หนังสือ Guide to the expression of uncertainty in measurement [4] 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

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

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

**3.1) กำหนดให้ $U_{B1}$ จากใบรับรองผลการสอบเทียบของผู้ผลิต**

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

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

**3.2) พิจารณา $U_{B2}$ จากความละเอียดในการอ่านหรือเรซโซรูชั่น (resolution)**

ความละเอียดในการอ่านของเครื่องมือซึ่งให้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า 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 $a_w$ = เป็นค่าเรซโซรูชั่นหรือเท่ากับ 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 $2\sigma$

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

เมื่อได้ค่า $\nu_{eff}$ เป็นองศาอิสระหรือมีค่าเท่ากับ n-1 แล้วนำไปเปิดตาราง student's t-distribution ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เพื่อหาค่า $k$ ว่าค่าความไม่แน่นอนจะมีการแจกแจงแบบ t-distribution หรือ normal distribution ต่อไป

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

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบจะได้ว่า

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

**ตารางที่ ข.1 แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน (ช่วงการวัด 0.01 มม./ม.)**

| Type | Source of uncertainties | Value (±) (mm/m) | Distribution | Divisor (*k*) | U (±) (mm/m) | $c_i$ | $\nu_{eff}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_A$ | Repeatability | 0.000506 | Normal | 1 | 0.000292 | 1 | 2 |
| $U_{B1}$ | Standard | 0.0002 | Rectangular | $\sqrt{3}$ | 0.000115 | 1 | $\infty$ |
| $U_{B2}$ | Resolution | 0.0005 | Rectangular | $\sqrt{3}$ | 0.000577 | 1 | $\infty$ |
| $U_B$ | Total of type B | - | | | 0.000589 | - | - |
| . . . | | . . . | . . . | . . . | . . . | . . . | . . . |
| $U_C$ | Combined uncertainty | - | - | - | 0.000657 | - | 51.3 |
| $U_r$ | Expanded uncertanty | kUc | k = 2 | - | 0.001 | - | - |