สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

## รายละเอียดและผลของการออกแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวความคิดในการออกแบบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว และเครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว และผลการออกแบบเครื่องมือทั้งสอง

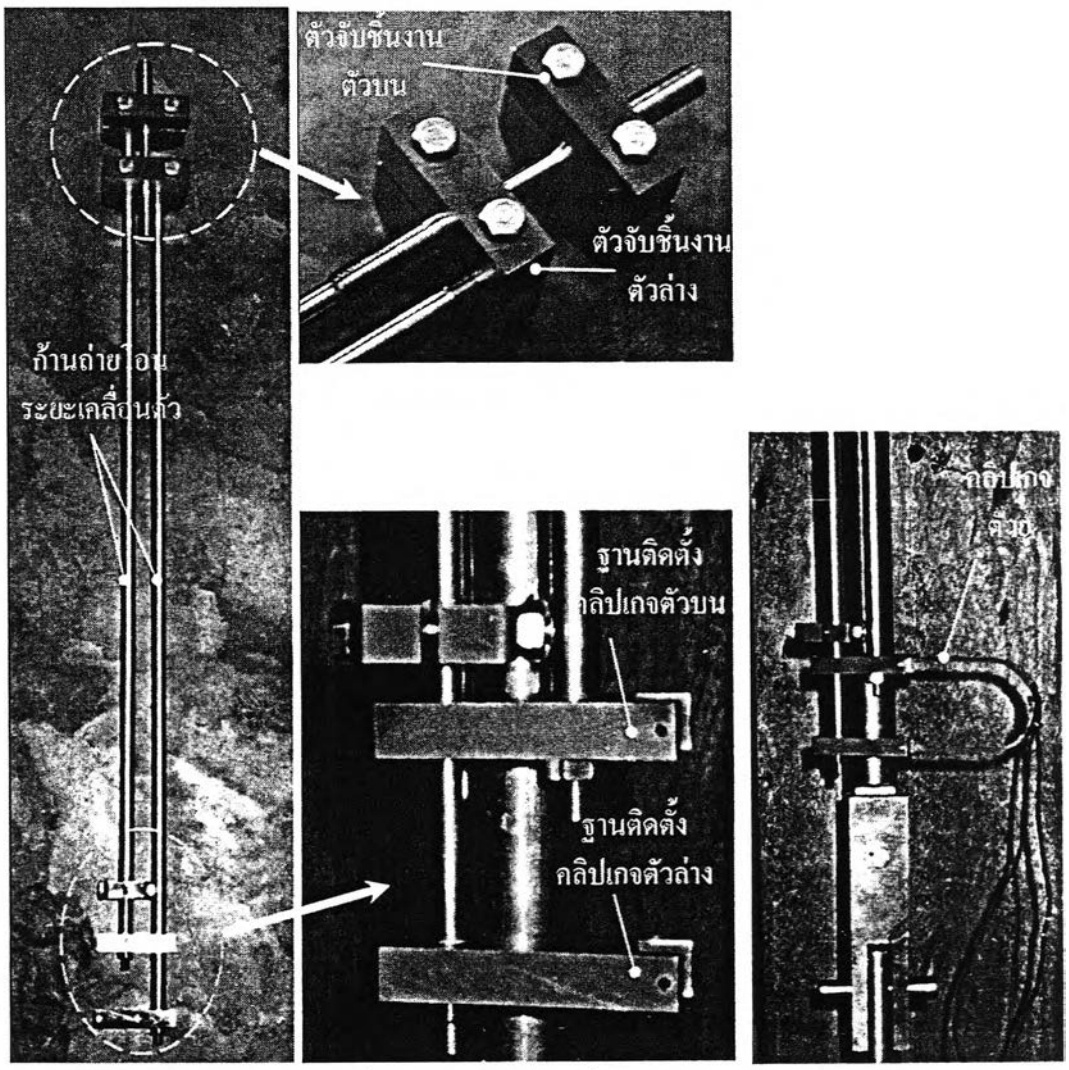
### 3.1 อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว

#### 3.1.1 ภาพรวมในการออกแบบ

อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวที่ออกแบบใช้วิธีวัดที่สัมผัสกับชิ้นงานทดสอบเพราะว่าชิ้นงานทดสอบถูกคิดตั้งในเตา ระยะยืดของชิ้นงานทดสอบจะถูกถ่ายโอนไปที่ทรานส์ดิวเซอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ภายนอกเตา (ที่อุณหภูมิห้องโดยประมาณ) อุปกรณ์ที่ออกแบบใหม่นี้ยังคงมีส่วนประกอบหลักเหมือนกับอุปกรณ์ต้นแบบ คือ 1) กลไกจับยึดกับชิ้นงานทดสอบ 2) กลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัวจากชิ้นงานทดสอบมายังทรานสดิวเซอร์ และ 3) ทรานสดิวเซอร์ (ต่อไปจะเรียกว่าคลิปเกจ) สำหรับวัดระยะเคลื่อนตัวที่ถูกถ่ายโอนมา แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อประมวลผลต่อไป แนวความคิดในการออกแบบจะใช้การวิเคราะห์ข้อบกพร่องในแต่ละส่วนของอุปกรณ์ต้นแบบแล้วหาวิธีแก้ไข

#### 3.1.2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องของอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบ

การวิเคราะห์อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบ (รูปที่ 3.1) พบข้อบกพร่องหลายประการ ซึ่งแบ่งออกได้ 3 กลุ่มคือ 1) ด้านการใช้งานโดยรวม 2) กลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว และ 3) ทรานสดิวเซอร์ โดยข้อบกพร่องทั้ง 3 ส่วนสรุปไว้ในตารางที่ 3.1 ถึง 3.3




**รูปที่ 3.1** เกจวัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบ

ตารางที่ 3.1 ข้อบกพร่องของเกจวัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบในส่วนการใช้งานโดยรวม

| ข้อบกพร่อง และผลเสียที่เกิดขึ้นตามมา | แนวทางการปรับปรุง |
|---|---|
| 1. *มีน้ำหนักมาก*<br>ทำให้เกิดความเค้นบนชิ้นงานทดสอบ และติดตั้งลำบาก | 1.1 ลดความหนาของตัวจับชิ้นงานตัวบนและตัวล่าง |
| | 1.2 เปลี่ยนวิธีถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว |
| | 1.3 ชิ้นส่วนที่ไม่ได้อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง เปลี่ยนไปใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา |
| 2. *ไม่มีวิธีจำกัดระยะใช้งาน*<br>ทรานสดิวเซอร์อาจเสียหายเนื่องจากเคลื่อนตัวเกินระยะใช้งานออกแบบ | 2.1 เพิ่มกลไก |
| 3. *ไม่มีวิธีตั้งความยาวเกจเริ่มต้น*<br>ทำให้ผลการทดสอบมี repeatability ลดลง | 3.1 เพิ่มกลไก |

ตารางที่ 3.2 ข้อบกพร่องของเกจวัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบในส่วนกลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว

| ข้อบกพร่อง และผลเสียที่เกิดขึ้นตามมา | แนวทางการปรับปรุง |
|---|---|
| 1. *ไม่สามารถชดเชยกรณีที่ชิ้นงานทดสอบเอียงตัว พร้อมกับยืดออก* ทำให้ผลการทดสอบมีความผิดพลาด | 1.1 เพิ่มกลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัวอีกหนึ่งตำแหน่งที่สมมาตรกับแกนชิ้นงานทดสอบ |
| 2. *มีน้ำหนักมาก*<br>ทำให้น้ำหนักสุทธิของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น | 2.1 เปลี่ยนวิธีถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว |
| | 2.2 ลดความยาวของกลไกถ่ายโอน |
| | 2.3 ลดขนาดหน้าตัดของกลไกถ่ายโอน |

ตารางที่ 3.3 ข้อบกพร่องของเกจวัดระยะเคลื่อนตัวต้นแบบในส่วนคลิปเกจ

| ข้อบกพร่อง และผลเสียที่เกิดขึ้นตามมา | แนวทางการปรับปรุง |
|---|---|
| 1. *พิสัยการใช้งานน้อย*<br>ทำให้ทดสอบกับวัสดุที่มีความเหนียวสูงไม่ได้ | 1.1 เปลี่ยนรูปร่างคลิปเกจ |
| | 1.2 เพิ่มความยาวชิ้นส่วนในคลิปเกจ |
| 2. *ความไวเชิงกลของทรานสดิวเซอร์ต่ำ*<br>ทำให้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อย ๆ ไม่ได้ | 2.1 เปลี่ยนรูปร่างของคลิปเกจ |
| | 2.2 เพิ่มขนาดความเครียดที่ยอมรับได้ของเกจความเครียด |
| 3. *ตำแหน่งติดเกจความเครียดเป็นผิวโค้ง*<br>ทำให้การติดเกจความเครียดให้ตรงตำแหน่งทำได้ยาก | 3.1 ออกแบบให้ตำแหน่งติดเกจความเครียดเป็นผิวแบนราบ |

**3.1.3 ผลการออกแบบ**

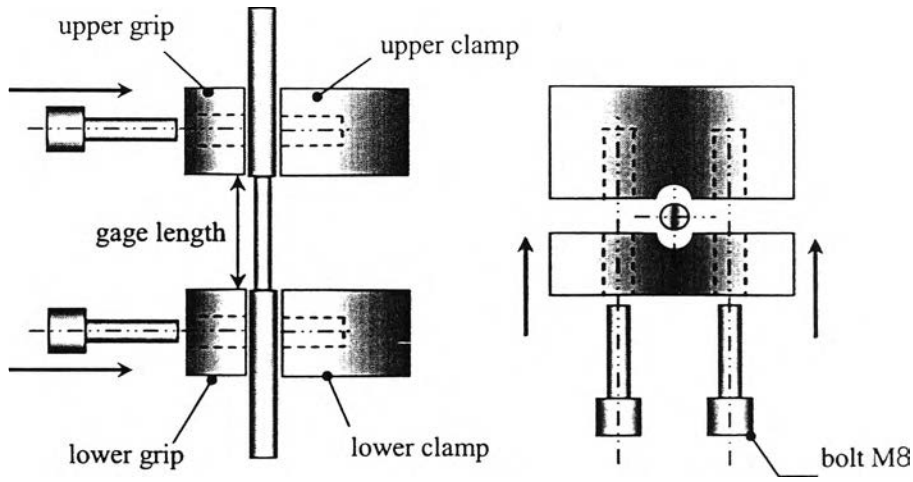
ก) การเลือกวัสดุ เนื่องจากอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวติดตั้งอยู่ภายในเตาที่มีอุณหภูมิสูงราว 600 องศาเซลเซียส จึงต้องใช้วัสดุที่ต้านทานการเกิดออกซิเดชันดี ในที่นี้เลือกเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค เบอร์ 310S

ข) วิธีจับยึดอุปกรณ์กับชิ้นงาน การจับยึดจะใช้วิธีประกบชิ้นส่วน 2 ชิ้นกับชิ้นงานทดสอบแล้วรัดแน่นด้วยสลักเกลียว ตำแหน่งจับยึดอยู่ถัดจากช่วงความยาวเกจทั้งด้านบนและล่าง รูปที่ 3.2 แสดงวิธีจับยึดที่กล่าวไป

ค) กลไกจำกัดระยะ เมื่อชิ้นงานขาดคลิปเกจที่ติดตั้งด้านล่างจะเคลื่อนตัวเกินระยะใช้ใช้งานและเสียหายได้ ด้วยเหตุนี้จึงควรเพิ่มกลไกป้องกันความเสียหาย (แก้ไขข้อบกพร่อง ข้อ 2.1 ในตารางที่ 3.1) แนวความคิดรวบยอดในการออกแบบคือ กลไกควรติดตั้งถาวรกับอุปกรณ์ และเป็นกลไกที่ไม่ซับซ้อน

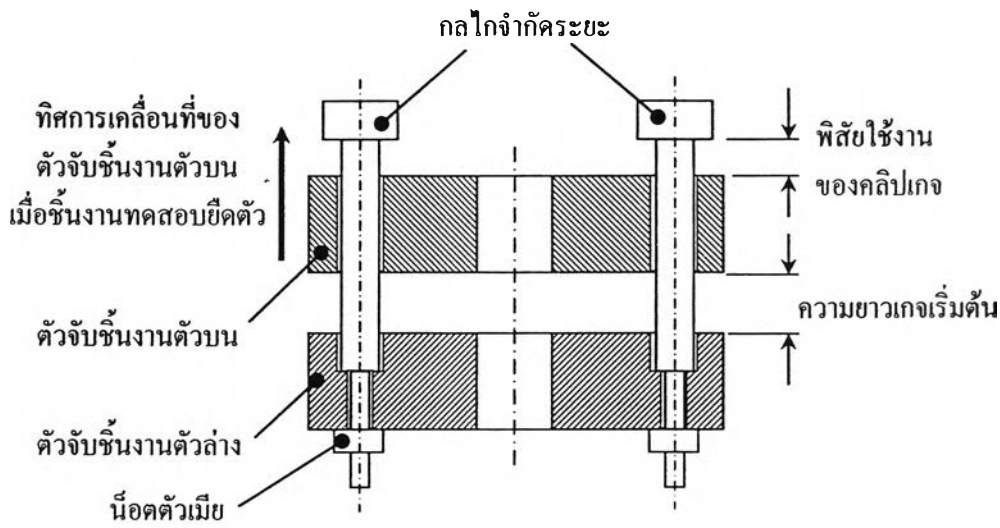
กลไกที่ออกแบบแสดงอยู่ในรูปที่ 3.3 จากรูปกลไกคือ เพลากลมที่ยึดปลายข้างหนึ่งกับตัวจับชิ้นงานตัวล่างและสอดผ่านตัวจับชิ้นงานตัวบน และปลายอีกข้างทำบ่า เมื่อตัวจับชิ้นงานเคลื่อนที่ออกจากกันจนเกินพิสัยที่กำหนด บ่าที่ทำไว้จะรั้งไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ต่อไป ทำให้คลิปเกจจะไม่เสียรูปเกินที่ออกแบบ ตำแหน่งศูนย์กลางของรูบนตัวจับชิ้นงานตัวบนที่ให้ตัวจำกัดระยะสอดผ่านจะต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกับจุดศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบ (รูปที่ 3.4)

เพื่อให้ไม่มีโมเมนต์รอบแกน $x$ (หลังจากชิ้นงานขาด) และจะต้องสมมาตรกับแกน $y$ เพื่อไม่ให้เกิดโมเมนต์รอบแกน $y$ (หลังจากชิ้นงานขาด)

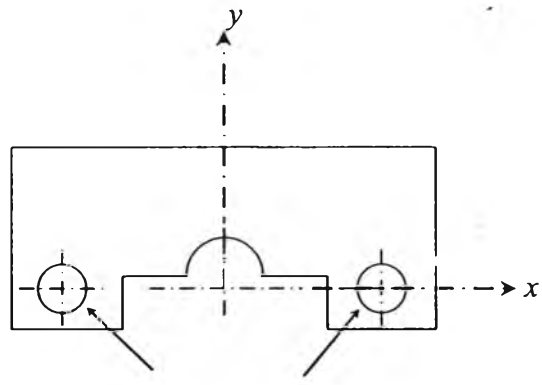



ก) มองจากด้านข้าง ข) มองจากด้านบน

**รูปที่ 3.2** วิธีจับยึดอุปกรณ์กับชิ้นงานทดสอบ




**รูปที่ 3.3** กลไกจำกัดระยะใช้งาน




**รูปที่ 3.4** ตำแหน่งศูนย์กลางรูสำหรับสอดกลไกจำกัดระยะ

ขนาดหน้าตัดของกลไกจำกัดระยะขึ้นอยู่กับขนาดภาระที่กระทำ ซึ่งพิจารณาได้ดังนี้ เมื่อชิ้นงานขาดภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบจะถ่ายโอนไปยังกลไกจำกัดระยะ สำหรับเครื่องทดสอบที่มีภาระดึงสูงสุดคือ 800 กก. ดังนั้นเพลาแต่ละอันจะรับภาระ 400 กก. ขั้นตอนการคำนวณขนาดเพลา เริ่มจากการหาความเค้นที่ยอมรับของวัสดุ จากนั้นกำหนดสมการความเสียหายและแก้สมการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

การคำนวณหาความเค้นที่ยอมรับจะใช้สมการที่แนะนำในหัวข้อที่ 2.4 บทที่ 2 จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข (*9*) ความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิม 310S ที่ 600°C มีดังนี้

$$\frac{1}{4}\sigma_{u,RT} = 146.5 \quad \text{MPa}$$

$$\frac{1}{4}\sigma_{u,HT} = 84.5 \quad \text{MPa}$$

$$\frac{2}{3}\sigma_{y,RT} = 174.4 \quad \text{MPa}$$

$$\frac{2}{3}\sigma_{y,HT} = 73.5 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_{creep,1\%,10^5 h} = 79.3 \ \text{MPa}$$

เนื่องจากไม่สามารถหาข้อมูลได้ครบทุกรายการที่แสดงในหัวข้อที่ 2.4 จึงกำหนดว่าความเค้นที่ยอมรับ $\sigma_{allow}$ คือค่าต่ำสุดของความเค้นข้างต้น ดังนั้น $\sigma_{allow} = 73.5$ MPa

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ผังวัตถุอิสระของตัวจำกัดระยะหลังจากที่ชิ้นงานขาดแสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 จากรูปโหมดความเสียหายที่เป็นไปได้ คือ

1) เส้นผ่านศูนย์กลางราก (root diameter) $d_r$ ขาดเนื่องจากความเค้นดึง

2) เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือน

พิจารณากรณีเส้นผ่านศูนย์กลางรากขาดเนื่องจากความเค้นดึง สำหรับกรณีนี้สมการออกแบบ คือ

$$\sigma_{allow} = \frac{P}{\frac{\pi}{4} d_r^4}$$

แทนค่าจะได้ $$73.5 \times 10^6 = \frac{400 \times 9.81}{\frac{\pi}{4} d_r^2}$$

แก้สมการจะได้ $$d_r = 8.2 \text{ มม}$$

ถ้าเลือกเกลียว M10 จะได้ระยะพิตช์ $p$ เท่ากับ 1.5 มม จะเห็นว่า $d_r + p = 9.7$ มม มีค่าน้อยกว่า 10 มม ดังนั้นจะใช้เกลียว M10 หรือ

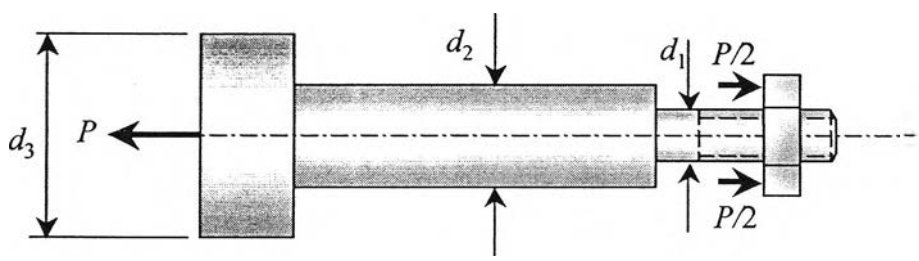
$$d_1 = 10 \text{ มม}$$

พิจารณากรณีเกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือน สำหรับกรณีสมการออกแบบ คือ

$$\frac{3}{2} \frac{P}{\pi d_r b n} = \tau_{allow}$$

โดย $b$ คือ ความสูงของฐานเกลียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{3}{4} p$ *(10)*

$n$ คือ จำนวนเกลียว




**รูปที่ 3.5** ผังวัตถุอิสระของกลไกจำกัดระยะ และตัวแปรบอกมิติ

แทนค่าตัวแปร

$$\frac{3}{2}\frac{400\times 9.81}{\pi\left(8.5\times 10^{-3}\right)\left(\frac{3}{4}\times 1.5\times 10^{-3}\right)n}=0.5\left(73.5\times 10^{6}\right)$$

แก้สมการจะได้

$$n=5.33 \text{ เกลียว}$$

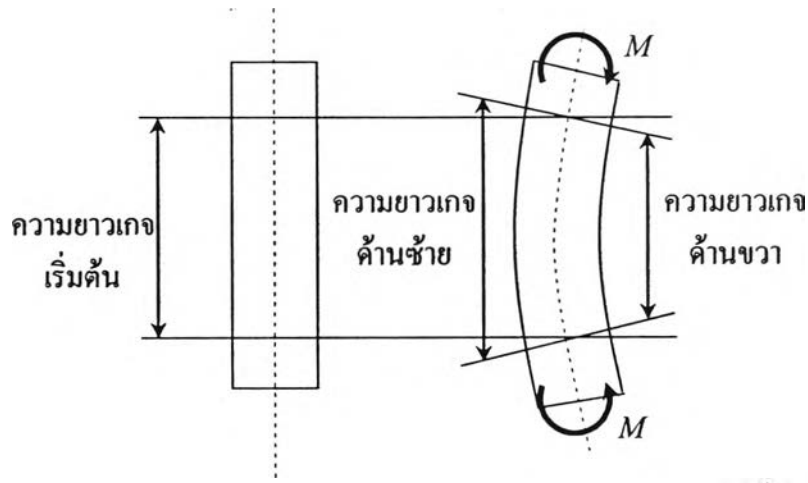
ดังนั้นความหนาต่ำสุดของน็อตตัวเมียที่ต้องการ คือ $np=5.33\times 1.5=8$ มม ความหนาของน็อตตัวเมีย M10 มาตรฐาน เท่ากับ 8.4 มม (2) ดังนั้น เกลียวขนาด M10 และน็อตตัวเมียขนาด M10 สามารถใช้ได้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d_2$ และ $d_3$ กำหนดโดยใช้ดุลพินิจ ในที่นี้เลือก

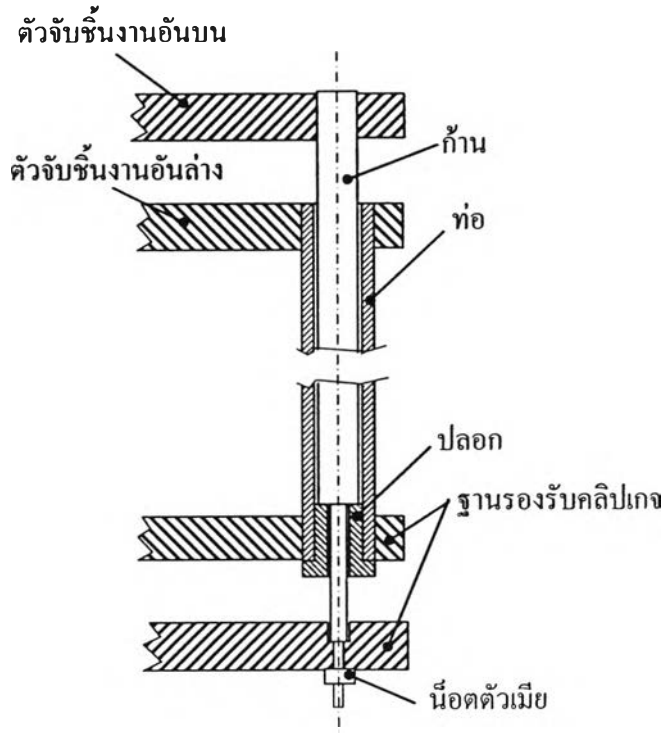
$$d_2=12 \text{ มม}$$
$$d_3=18 \text{ มม}$$

ง) กลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว ในทางปฏิบัติภาระดึงที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบจะเยื้องจากแนวแกนของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการผลิตชิ้นส่วนและการประกอบ ดังนั้นชิ้นงานทดสอบจึงต้องรับโมเมนต์ดัดที่เกิดจากการไม่ร่วมศูนย์ระหว่างแนวแรงกับแกนชิ้นงาน แม้ว่าโมเมนต์ดัดจะมีผลทำให้อายุการคืบของชิ้นงานทดสอบสั้นลงก็ตาม (*11*) แต่โมเมนต์ดัดไม่ทำให้แกนกลางของชิ้นงานทดสอบซึ่งเป็นตัวแทนของชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนแปลงความยาว อย่างไรก็ดีถ้าพิจารณารูปที่ 3.6 ประกอบจะเห็นว่า โมเมนต์ดัดมีผลทำให้การวัดความยาวเกจซึ่งส่วนใหญ่วัดที่ผิวขึ้นกับตำแหน่งที่วัด ดังนั้นเพื่อกำจัดผลของโมเมนต์ดัดดังที่กล่าว จึงออกแบบอุปกรณ์ให้วัดการเปลี่ยนแปลงความยาวเกจทั้งสองด้านของแกนชิ้นงาน เพราะระยะเคลื่อนตัวของทั้งสองด้านจะสมมาตรกันทำให้ค่าเฉลี่ยของระยะเคลื่อนตัวที่วัดได้เท่ากับระยะเคลื่อนตัวของแกนกลางชิ้นงานทดสอบ กล่าวคือ หักล้างผลของโมเมนต์ดัดได้ (แก้ไขข้อบกพร่องที่ 1 ในตารางที่ 3.2) การถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัวจากตัวจับชิ้นงานอันบนและล่างใช้หลักการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างท่อและก้าน ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7 จากรูปปลายด้านบนของท่อยึดกับตัวจับชิ้นงานอันล่าง ส่วนปลายด้านล่างยึดกับฐานรองรับคลิปเกจอันบนโดยการรัดของสลักเกลียว ขณะที่ปลายด้านบนของก้านยึดกับตัวจับชิ้นงานอันบน ปลายด้านล่างยึดกับฐานรองรับคลิปเกจอันล่างโดยการขันน็อตตัวเมีย ในที่นี้ออกแบบแบบให้ก้านเคลื่อนที่อยู่ภายในท่อเพื่อลดขนาดตัวจับชิ้นงานอันบนและอันล่าง หากพิจารณาการทำงานของกลไกที่ออกแบบจะพบว่า เมื่อตัวจับชิ้นงานอันบนและล่างเคลื่อนที่ (เนื่องจากชิ้นงานทดสอบยืดตัว) ก้านและท่อจะถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัวจากตัวจับชิ้นงาน

ไปยังฐานรองรับคลิปเกจอันบนและอันล่างซึ่งถ้าการถ่ายโอนเป็นไปอย่างสมบูรณ์แบบแล้ว ฐานรองรับคลิปเกจทั้งสองจะเคลื่อนที่ออกจากกันเท่ากับระยะยืดของชิ้นงานทดสอบ




**รูปที่ 3.6** ผลของโมเมนต์คัดที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ของแนวแรงกับแนวแกนชิ้นงานทดสอบต่อการวัดความยาวเกจ




**รูปที่ 3.7** กลไกท่อและก้านที่ใช้ในการถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัวของชิ้นงานทดสอบมายังคลิปเกจ

จ) กลไกตั้งความยาวเกจเริ่มต้น กลไกนี้ช่วยให้การติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวกับชิ้นงานทดสอบสะดวกขึ้น เพราะผู้ทดสอบไม่ต้องกังวลว่าระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นงานอันบนและล่างจะเท่าเดิมหรือไม่ ทั้งนี้เพราะกลไกตั้งความยาวเกจเริ่มต้นจะทำหน้าที่ควบคุมระยะดังกล่าว (ความยาวเกจเริ่มต้น) แนวความคิดในการออกแบบคือ กลไกควรติดตั้งถาวรกับอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว กลไกตั้งความยาวเกจเริ่มต้นที่ออกแบบแสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 จากรูปที่ปลายล่างของท่อจะมีปลอกสวมอยู่ระยะสวมจะสิ้นสุดเมื่อบ่าของปลอกยันกับปลายท่อ ปลอกนี้จะถูกรัดให้แน่นอยู่ในตำแหน่งด้วยสลักเกลียวตัวเดียวกับที่รัดฐานรองรับคลิปเกจตัวบนให้แน่นกับปลอก ที่ปลายด้านล่างของก้านจะทำบ่าเอาไว้บ่านี้จะยันกับปลอก ดังนั้นจะเห็นว่าเราสามารถปรับความยาวเกจได้โดยการเปลี่ยนแปลงระยะสวมของปลอก (แก้ไขข้อบกพร่องข้อที่ 3 ในตารางที่ 3.1)

ในการใช้งาน ผู้ทดสอบควรติดตั้งตัวจับชิ้นงานตัวล่างกับชิ้นงานทดสอบก่อน เพื่อให้น้ำหนักของตัวจับชิ้นงานตัวบนและก้านพาให้ชิ้นส่วนเคลื่อนที่ลงมาจนกระทั่งบ่าของก้านยันกับปลายของปลอก นอกจากนี้ในระหว่างการทดสอบเมื่อชิ้นงานยืดออกเนื่องจากแรงดึง หรือเนื่องจากอุณหภูมิบ่าของก้านจะเคลื่อนที่ออกห่างจากปลายของปลอกซึ่งก็เป็นไปอย่างที่ต้องการ

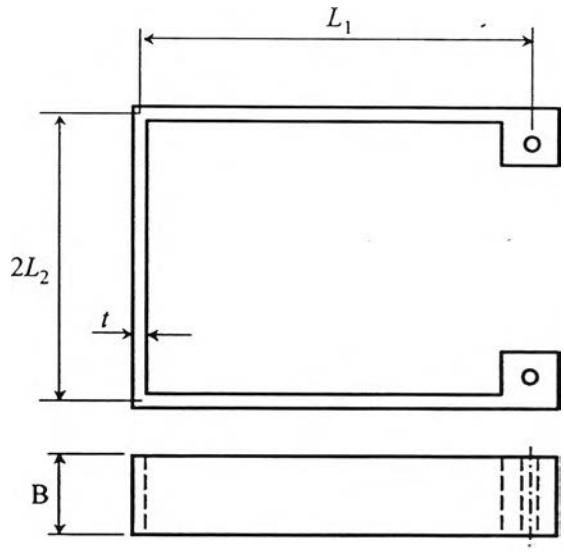
ฉ) คลิปเกจ คลิปเกจที่ออกแบบเป็นคลิปเกจตัวยูคล้ายกับต้นแบบ ต่างกันตรงที่ตำแหน่งติดเกจความเครียดจะเป็นผิวราบ (แก้ไขข้อบกพร่องที่ 3 ในตารางที่ 3.3) รูปร่างของคลิปเกจที่ออกแบบแสดงอยู่ในรูปที่ 3.8 การคำนวณมิติของคลิปเกจ ($B, L_1, L_2, t$) ใช้เทคนิค optimization

การตั้งปัญหาประกอบด้วยการกำหนด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) และฟังก์ชันบังคับ (constraint function) ในที่นี้กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความไว (sensitivity) เชิงกล $S$ มีค่าสูงสุด [1] ดังนั้น (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค)

$$Maximize: \quad S = \frac{3}{4}\left(\frac{L_1 t}{L_1^{\,3} + 3L_1^{\,2}L_2}\right) \tag{3.1}$$

---

[1] นิยามของความไวเชิงกล $s$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเทียบกับระยะเคลื่อนตัว อย่างไรก็ดีการออกแบบคลิปเกจในที่นี้ อยู่ในช่วงการเสียรูปยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสองจึงเป็นแบบเชิงเส้น นิยามของความไวเชิงกลจึงคำนวณได้จาก อัตราส่วนของความเครียดที่เกิดขึ้นต่อระยะเคลื่อนตัวขณะนั้น




**รูปที่ 3.8** คลิปเกจตัวยู

1. ความเครียดสูงสุดที่ตำแหน่งติดเกจความเครียด มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ $\varepsilon_{allow}$

$$\frac{(PL_1)\left(\frac{t}{2}\right)}{E\left(\frac{1}{12}Bt^3\right)} \leq \varepsilon_{allow} \tag{3.2}$$

2. พิสัยใช้งานของคลิปเกจ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับระยะใช้งานที่ต้องการ $\delta_{required}$

$$\frac{2P}{EI}\left(\frac{L_1^3}{3} + L_1^2 L_2\right) \geq \delta_{required} \tag{3.3}$$

3. ขอบเขตของตัวแปรบอกมิติ

$$20\ mm \leq L_1 \leq 100\ mm \tag{3.4}$$

$$40\ mm \leq 2L_2 \leq 50\ mm \tag{3.5}$$

$$1 \leq \frac{L_1}{L_2} \leq 2 \tag{3.6}$$

$$1\ mm \leq t \leq 2\ mm \tag{3.7}$$

$$12\ mm \leq B \leq 13\ mm \tag{3.8}$$

โดยทั่วไปตำแหน่งที่ติดเกจความเครียดจะเป็นตำแหน่งที่ความเค้นมีค่าสูงสุด (เพื่อให้ความไวของเครื่องมือดีที่สุด) ความเค้นสูงสุดที่ยอมรับได้ หรือความเครียดสูงสุดที่ยอมรับได้จะถูกกำหนดโดยชนิดของวัสดุที่นำมาทำคลิปเกจ วัสดุที่เหมาะสำหรับนำมาทำทรานสดิวเซอร์วัดระยะเคลื่อนตัวที่มีเกจความเครียดเป็นส่วนประกอบคือ วัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างความเค้นคราก ต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นสูง เพราะว่าวัสดุที่มีความเค้นครากสูงจะทำให้วัสดุมีความเครียดยืดหยุ่นสูง กล่าวคือ พิสัยใช้งานของทรานสดิวเซอร์จะมีค่ามาก นอกจากนี้ถ้าวัสดุมีโมดูลัสความยืดหยุ่นน้อยความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีค่ามาก ทำให้ความไวเชิงกลของทรานสดิวเซอร์สูงขึ้น จากเอกสารอ้างอิง (*9*) ในกลุ่มของโลหะนั้น โลหะผสมไททาเนียมมีอัตราส่วนดังกล่าวสูงสุดแต่เนื่องจากไม่มีตัวแทนจำหน่ายภายในประเทศ จึงเลือกวัสดุรองลงมาคือ อลูมิเนียมผสม (aluminium alloy) เบอร์ 7075-T651 ซึ่งมีความเค้นคราก 500 MPa และโมดูลัสความยืดหยุ่น 70 GPa (*8*)

เมื่อกำหนดตัวประกอบความปลอดภัย เท่ากับ 4 ดังนั้นจะได้ความเค้นและความเครียดที่ยอมให้เกิดขึ้นบนคลิปเกจ เท่ากับ 500/4 = 125 MPa และ 125 MPa/70 GPa = 1785 *me* ตามลำดับ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนด $\varepsilon_{allow} = 2000\ \mu\varepsilon$ สำหรับพิสัยใช้งานของคลิปเกจ $\delta_{required}$ ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 10 มม ซึ่งมากกว่าพิสัยใช้งานของคลิปเกจต้นแบบ 2 มม

ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (optimum solution) ภายใต้เงื่อนไขบังคับที่กำหนด คือ

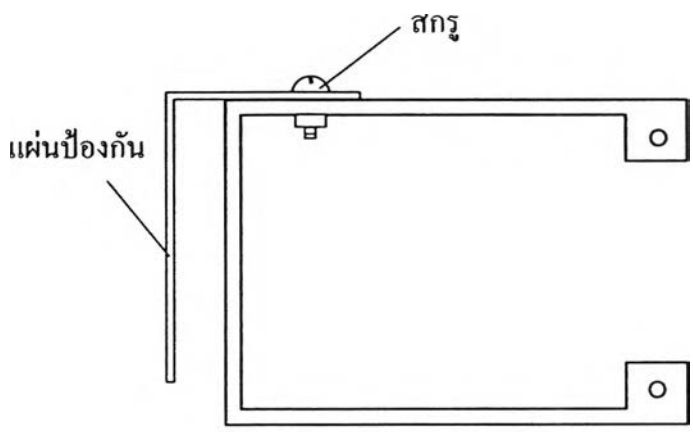
$L_1^* = 38.39$ มม , $L_2^* = 23.83$ มม, $t^* = 1.13$ มม และ $B^* = 13$ มม

ความไวที่เหมาะสมที่สุด คือ $S^* = 2\times10^{-4}\ mm^{-1}$ และพิสัยใช้งาน คือ $\delta^* = 10$ มม

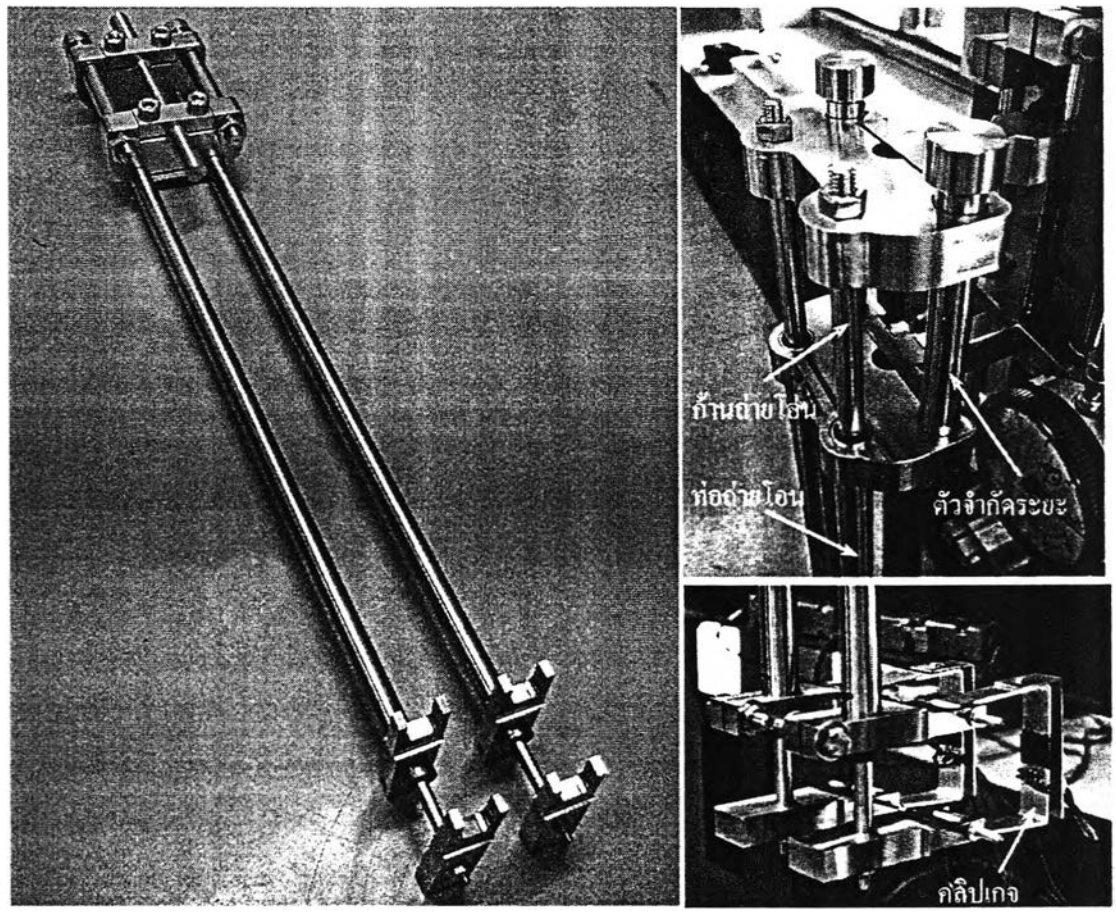
ขั้นตอนต่อไปหลังจากการออกแบบตัวเรือนของคลิปเกจเสร็จแล้วก็คือ การติดเกจความเครียดและการต่อวงจรเกจความเครียด วิทยานิพนธ์นี้เลือกเกจความเครียดที่มีความต้านทาน 500 โอห์ม ยี่ห้อ Kyowa รุ่น KFG-1-500-C1-23 ข้อมูลจำเพาะด้านมิติของเกจความเครียดรุ่นนี้คือ Gage Length 2 mm Gage Width 2.6 mm Base Length 7.5 mm Base Width 4.5 mm และเกจมีค่าตัวประกอบเกจ เท่ากับ 2.2 กาวสำหรับติดเกจความเครียดบนคลิปเกจ เลือกใช้กาวชนิดทั่วไปที่มีส่วนผสมของ cyanoacrelate สำหรับการต่อวงจรเกจความเครียด ในที่นี้เลือกวงจรแบบบริดจ์เต็มมีเกจความเครียดทั้งด้านนอกและด้านในของส่วนที่เป็นฐานตัวยู โดยมีด้านละ 2 ตัว เกจทั้งหมดจะต่อกันในลักษณะที่ทำให้มีค่าคงตัวบริดจ์เท่ากับ 4

เนื่องจากในการใช้งาน เกจความเครียดอาจถูกกระทบจนเสียหายจึงเพิ่มแผ่นป้องกันซึ่งติดกับคลิปเกจดังแสดงในรูปที่ 3.9

ช) อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว จากผลการออกแบบที่กล่าวไปในหัวข้อย่อย ก) ถึง ฉ) เมื่อนำมาผนวกกันจะได้อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.10




**รูปที่ 3.9** แผ่นป้องกันคลิปเกจ

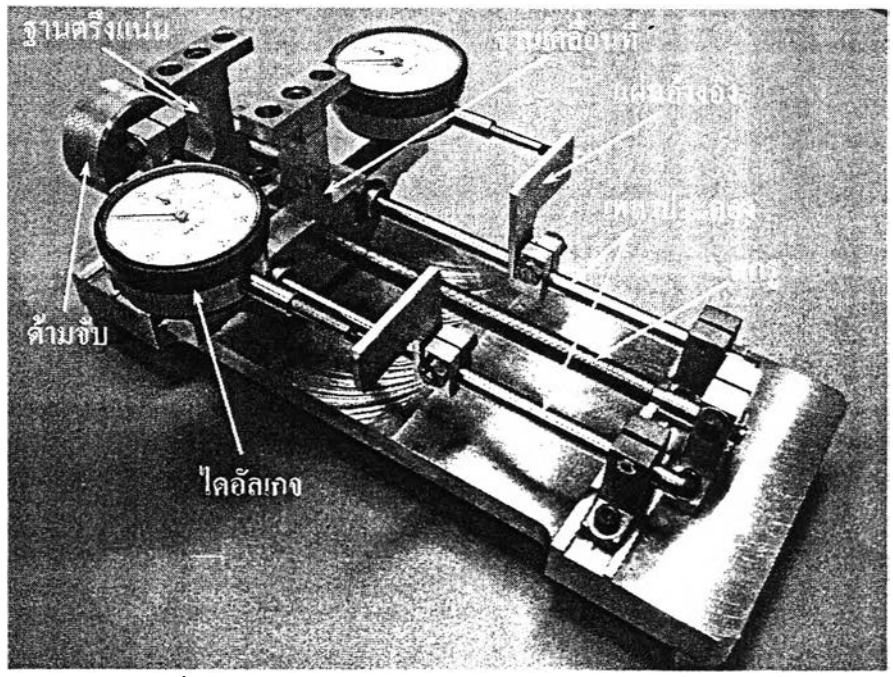



**รูปที่ 3.10** อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว

### 3.2 เครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว

เนื่องจากอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวที่ออกแบบมีการถ่ายโอนระยะยืดของชิ้นงานมายังคลิปเกจ ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนระหว่างระยะยืดของชิ้นงานกับระยะเคลื่อนตัวที่คลิปเกจ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนตัวทั้งสองตำแหน่งสามารถหาได้โดยการสอบเทียบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบเครื่องสอบเทียบดังกล่าวขึ้นเอง

เครื่องสอบเทียบจะต้องมีชิ้นส่วนสำหรับทำหน้าที่ต่อไปนี้ 1) เป็นฐานที่มั่นคงให้อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวติดตั้งได้อย่างมั่นคง 2) ปรับระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นงานตัวบนและตัวล่างได้ กล่าวอีกอย่างหนึ่ง คือ สามารถจำลองการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบได้ 3) แสดงผลระยะเคลื่อนตัวที่ปรับ ชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ข้างต้นจะต้องติดตั้งบนตัวเรือน หรือชิ้นส่วนอื่นอย่างมั่นคง รูปที่ 3.11 แสดงเครื่องสอบเทียบที่ออกแบบ (แบบใช้งานของเครื่องสอบเทียบอยู่ในภาคผนวก ข) หน้าที่ของส่วนประกอบในเครื่อง มีดังนี้




**รูปที่ 3.11** เครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว

1) ฐานตรึงแน่น และฐานเคลื่อนที่ ทำหน้าที่รองรับและจับยึดตัวจับชิ้นงานตัวบนและล่างของอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว ตามลำดับ

2) สกรู ทำหน้าที่ขับให้ฐานเคลื่อนที่เลื่อนตำแหน่งโดยการหมุนสกรูเกิดจากการหมุนด้าม

3) เพลาประคอง ทำหน้าที่บังคับการเคลื่อนที่ของฐานเคลื่อนที่ให้เป็นเส้นตรง เพลาจะอยู่ขนานกับสกรู และสอดผ่านแบริ่งเชิงเส้น (linear bearing) ที่อยู่ในรูของฐานเคลื่อนที่ แบริ่งจะช่วยลดแรงเสียดทานและรักษาเคลียแรนซ์ระหว่างเพลากับรูที่ฐานเคลื่อนที่ให้มีค่าน้อย ทำให้การเลื่อนของฐานเคลื่อนที่มีความแม่นยำสูง

4) ไดอัลเกจ (dial gage) และแผ่นอ้างอิง ทำหน้าที่อ่านระยะที่ฐานเคลื่อนที่เลื่อนไปจากตำแหน่งเริ่มต้น ไดอัลเกจจะติดตั้งอยู่บนฐานเคลื่อนที่ ขณะที่แผ่นอ้างอิงจะล็อคกับเพลาประคองการเคลื่อนที่ เมื่อฐานเคลื่อนที่เลื่อนไปก้านของไดอัลเกจจะกดกับแผ่นอ้างอิงทำให้ทราบระยะที่เลื่อนไปได้ ในที่นี้ออกแบบให้มีไดอัลเกจ 2 ตัวที่ตำแหน่งสมมาตรกับแกนสกรูเพื่อหักล้างการส่ายของฐานเคลื่อนที่ขณะเปลี่ยนตำแหน่ง