



## การวิเคราะห์ผลการออกแบบอุปกรณ์ และผลการทดสอบการคืบ

### 5.1 คุณภาพของอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว

#### 5.1.1 ความละเอียด

ความละเอียด (resolution) ของเครื่องมือตามมาตรฐาน BS3846 (13) คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวเกจที่น้อยที่สุดที่อุปกรณ์สามารถตรวจวัดได้ โดยความละเอียดจะแสดงในรูปแบบของขนาดความเครียด สำหรับความละเอียดของอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวที่ออกแบบ ขึ้นอยู่กับความไวของคลิปเกจและความละเอียดของมิเตอร์ความเครียด มิเตอร์ความเครียดที่ใช้มีความละเอียด 1 ไมโครสเตรน แต่เนื่องจากวงจรเกจความเครียดมีค่าคงตัวบริดจ์เท่ากับ 4 ดังนั้นมิเตอร์ความเครียดจึงสามารถตรวจวัดความเครียดได้ละเอียดถึง 0.25 ไมโครสเตรน และคลิปเกจตัวที่มีความไวที่น้อยที่สุดคือ  $226.6 \text{ มม}^{-1}$  (หัวข้อที่ 4.1.2) ดังนั้นระยะขีดของชิ้นงานที่น้อยที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้คือ

$$\delta_{clip} = \frac{0.25 \mu\epsilon}{226.6 \mu\epsilon/mm} \approx 0.001 \text{ มม}$$

โดยประมาณให้ระยะเคลื่อนตัวของคลิปเกจเท่ากับระยะขีดของชิ้นงาน (ไม่คิดความผิดพลาดในการถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว)

ความยาวเกจ  $GL$  ของชิ้นงานทดสอบ คือ 55 มม (ที่อุณหภูมิห้อง) ดังนั้นความเครียดบนชิ้นงานที่น้อยที่สุดที่อุปกรณ์สามารถวัดได้  $\epsilon_{min}$  คือ

$$\epsilon_{min} = \frac{\delta_{clip}}{GL} = \frac{0.001 \text{ มม}}{55 \text{ มม}} = 18 \mu\epsilon \quad (5.1)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับที่มาตรฐานกำหนด สรุปว่าอุปกรณ์มีความละเอียดในเกรด  $D^2$

<sup>1</sup> ในความเป็นจริงต้องใช้ความยาวเกจ ณ อุณหภูมิทดสอบ แต่เนื่องจากว่า ถ้าใช้ค่าความยาวเกจที่อุณหภูมิห้องจะคำนวณความละเอียดของเครื่องมือได้ conservative มากขึ้น ดังนั้นจึงประมาณความเครียดโดยใช้ความยาวเกจที่อุณหภูมิห้อง

<sup>2</sup> ความละเอียดอยู่ระหว่าง 12 ถึง 30 ไมโครสเตรน

### 5.1.2 ความแม่นยำ

มาตรฐาน BS3846 จะการแบ่งเกรดความแม่นยำของอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวด้วยการเปรียบเทียบความผิดพลาดของความเครียดของชิ้นงานทดสอบกับขอบเขตความเครียดที่ยอมให้ผิดพลาดได้  $Y$  ความผิดพลาดของความเครียดของชิ้นงานทดสอบสามารถคำนวณได้โดยนำความไม่แน่นอนสำหรับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวจับยึดอุปกรณ์กับชิ้นงาน  $U_{\delta_{grip}}$  (ตาราง 5.8 คอลัมน์สุดท้าย) มาหารด้วยความยาวเกจ ตารางที่ 5.1 แสดงความผิดพลาดของความเครียดที่วัดโดยอุปกรณ์ที่สร้าง และขอบเขตความเครียดที่ยอมให้ผิดพลาดได้ของอุปกรณ์ในเกรด  $E$  และเกรด  $F$  ตามลำดับ จากตารางจะสรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่สร้างมีความแม่นยำจัดอยู่ในเกรด  $F$

ตารางที่ 5.1 ความผิดพลาดของความเครียดบนชิ้นงานทดสอบและขอบเขตที่ยอมให้ผิดพลาดได้

ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวยึดอุปกรณ์กับชิ้นงาน $\delta_{grip}$ (มม)	ความเครียดบนชิ้นงานทดสอบ $\epsilon_s$ ( $\mu\epsilon$ ) <sup>(n)</sup>	ความผิดพลาดของความเครียดบนชิ้นงานทดสอบ <sup>(ข)</sup> $Y_s$ ( $\mu\epsilon$ )	ขอบเขตที่ยอมให้ผิดพลาดได้ $Y$ ( $\mu\epsilon$ )	
			เกรด $E$ <sup>(ค)</sup>	เกรด $F$ <sup>(ง)</sup>
0.000	0	291	200	400
0.658	10000	295	694	1388
2.421	40000	340	2107	4215
3.212	60000	374	2767	5535
4.488	80000	438	3780	7560
5.768	100000	512	4820	9640
6.789	120000	576	5662	11324
7.274	130000	607	6061	12122
8.072	150000	658	6677	13353
8.845	160000	709	7277	14554
9.588	170000	758	7874	15748

<sup>(n)</sup> หาได้จากนำระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวยึดอุปกรณ์กับชิ้นงานส่วนด้วยความยาวเกจ

<sup>(ข)</sup> ความยาวเกจ 55 มม

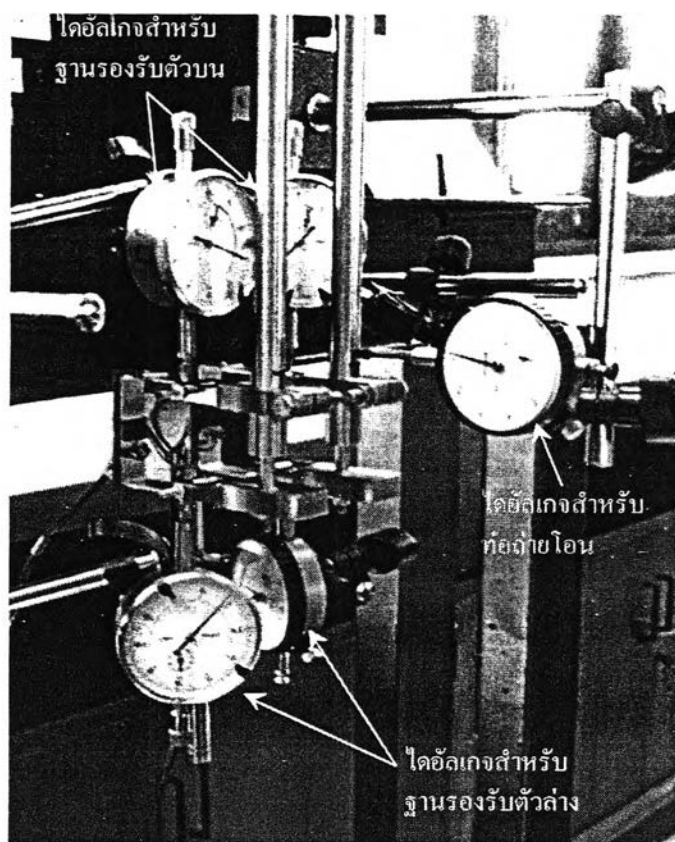
<sup>(ค)</sup>  $Y_E = 0.040\epsilon + 200 \times 10^{-6}$  โดย  $\epsilon$  คือ ความเครียดที่วัด มีหน่วยเป็น มม/มม (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ญ)

<sup>(ง)</sup>  $Y_F = 0.080\epsilon + 400 \times 10^{-6}$  โดย  $\epsilon$  คือ ความเครียดที่วัด มีหน่วยเป็น มม/มม (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ญ)

## 5.2 ความแม่นยำของการถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว

จากผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวในสมการที่ (4.2) จะเห็นว่าระยะเคลื่อนตัวของตัวจับอุปกรณ์กับชิ้นงานทดสอบมีค่ามากกว่าระยะแอนตัวของคลิปเกจเสมอ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่ามีการสูญเสียระยะเคลื่อนตัวเนื่องจากการยึดของชิ้นงานที่กลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัวในการทดสอบจริงแม้ว่าจะสามารถใช้ความสัมพันธ์สอบเทียบคำนวณหาระยะยึดของชิ้นงานจากระยะแอนตัวของคลิปเกจได้ แต่การหาสาเหตุของความผิดพลาดเป็นสิ่งที่สำคัญเช่นกันเพื่อเป็นแนวทางการปรับปรุงต่อไป

การหาสาเหตุของความผิดพลาดในการถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว ทำได้โดยติดตั้งไดอัลเกจที่ฐานรองรับคลิปเกจตัวบนและตัวล่างทั้งซ้ายและขวาและตัวล่างทั้งซ้ายและขวาของอุปกรณ์และที่ท่อถ่ายโอนฯ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ไดอัลเกจเหล่านี้จะตรวจวัดว่าชิ้นส่วนเหล่านี้มีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมหรือไม่ขณะที่คลิปเกจถูกทำให้มีระยะเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 การติดตั้งไดอัลเกจเพื่อวัดการเคลื่อนที่ของฐานรองรับคลิปเกจ และท่อถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบ คอลัมน์แรก คือระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ คอลัมน์ที่ 2 แสดงระยะแอ่นตัวสัมพัทธ์ของคลิปเกจ คอลัมน์ที่ 3 คือ แรงที่กระทำกับคลิปเกจซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3.2) คอลัมน์ที่ 4 ถึง 6 แสดงระยะที่ชิ้นส่วนเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม จากตารางจะเห็นว่าชิ้นส่วนมีการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเริ่มต้น โดยการเคลื่อนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะแอ่นตัวของคลิปเกจ (เนื่องจาก  $P$  มากขึ้น)

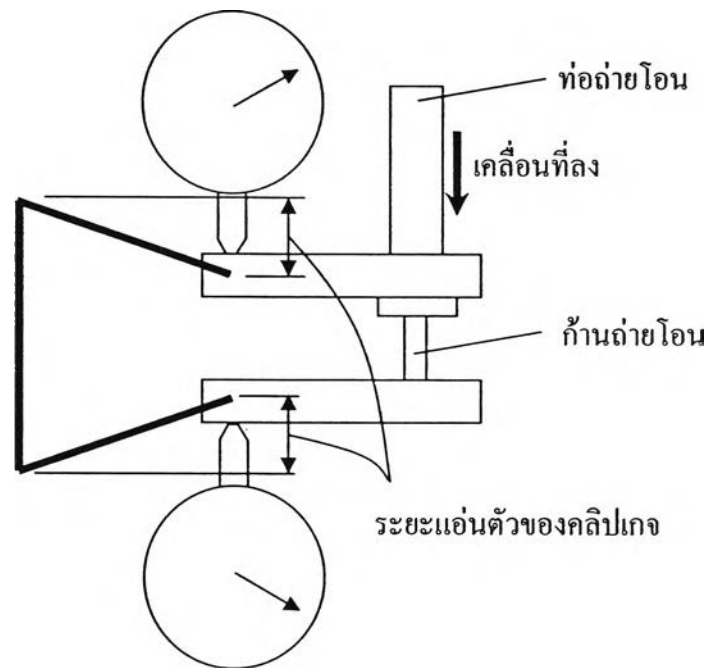
ตารางที่ 5.2 ผลการวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของชิ้นส่วนในกลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว

ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวจับยึด $\delta_{actual}$ (มม)	ระยะแอ่นตัวสัมพัทธ์ของคลิปเกจ $\delta_{clip}^{(m)}$ (มม)	ภาระที่กระทำกับคลิปเกจ $P$ (นิวตัน)	ระยะเคลื่อนตัวของชิ้นส่วน (มม)		
			ฐานรองรับตัวบน	ฐานรองรับตัวล่าง	ท่อถ่ายโอน (มม)
0.000	0.000	0.0	0.00	0.00	0.00
0.660	0.614	0.6	0.66	0.01	0.00
2.423	2.338	2.4	2.41	0.02	0.02
3.212	3.110	3.2	3.21	0.03	0.04
4.478	4.366	4.4	4.47	0.03	0.09
5.756	5.640	5.7	5.74	0.05	0.15
6.774	6.655	6.7	6.76	0.06	0.19
7.258	7.148	7.2	7.26	0.06	0.22
8.058	7.953	8.1	8.03	0.07	0.27
8.851	8.748	8.9	8.82	0.08	0.34
9.625	9.497	9.6	- <sup>(n)</sup>	0.11	0.62

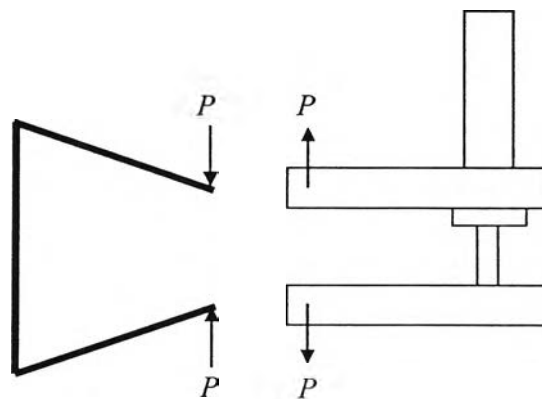
<sup>(m)</sup> คำนวณจากความเครียด

<sup>(n)</sup> เกินพิสัยการวัดของไดอัลเกจ

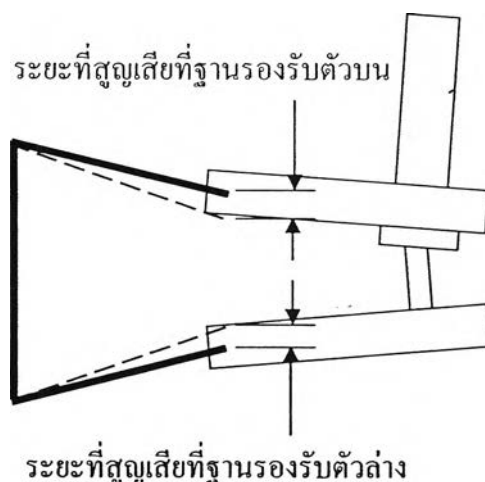
รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะการติดตั้งไดอัลเกจบนฐานรองรับคลิปเกจ เมื่อปรับฐานเคลื่อนที่ให้เคลื่อนลง ท่อถ่ายไอออนจะเคลื่อนที่ลงขณะที่ก้านถ่ายไอออนจะอยู่กับที่ ทำให้คลิปเกจถูกบีบดังที่แสดงในรูป รูปที่ 5.3 แสดงผังวัตถุอิสระ (free body diagram) ของแรงที่กระทำกับคลิปเกจ และฐานรองรับคลิปเกจ แรงนี้ทำให้ฐานรองรับตัวบนและตัวล่างเคลื่อนที่ออกจากกันดังที่แสดงในรูปที่ 5.4 ดังนั้นระยะแอนตัวของคลิปเกจจะน้อยกว่าระยะที่ถ่ายไอออนมา การสูญเสียนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อคลิปเกจถูกบีบมากขึ้น



รูปที่ 5.2 ลักษณะการติดตั้งไดอัลเกจ และทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนในกลไกถ่ายไอออนระยะเคลื่อนตัว



รูปที่ 5.3 ผังวัตถุอิสระของคลิปเกจ และฐานรองรับคลิปเกจ



รูปที่ 5.4 ลักษณะการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนในกลไกถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว

การทวนสอบผลการวิเคราะห์เบื้องต้น จะใช้วิธีคำนวณระยะเคลื่อนตัว ณ จุดติดตั้งคลิป เกจ รูปที่ 5.5 จำลองท่อถ่ายโอนและฐานรองรับคลิปเกจด้วยคานารูปตัวแอล เนื่องจากปัญหาที่พิจารณา  $x \ll L$  ดังนั้นระยะเคลื่อนตัวแนวตั้ง ณ จุดที่แรง  $P$  กระทำ  $\Delta$  หาได้จากสมการต่อไปนี้<sup>3</sup>

$$\Delta = x \tan \theta \quad (5.2)$$

$$\theta = \frac{PxL}{EI} \quad (5.3)$$

กำหนดค่า  $E$  ของสแตนเลส เท่ากับ 190 GPa (8)

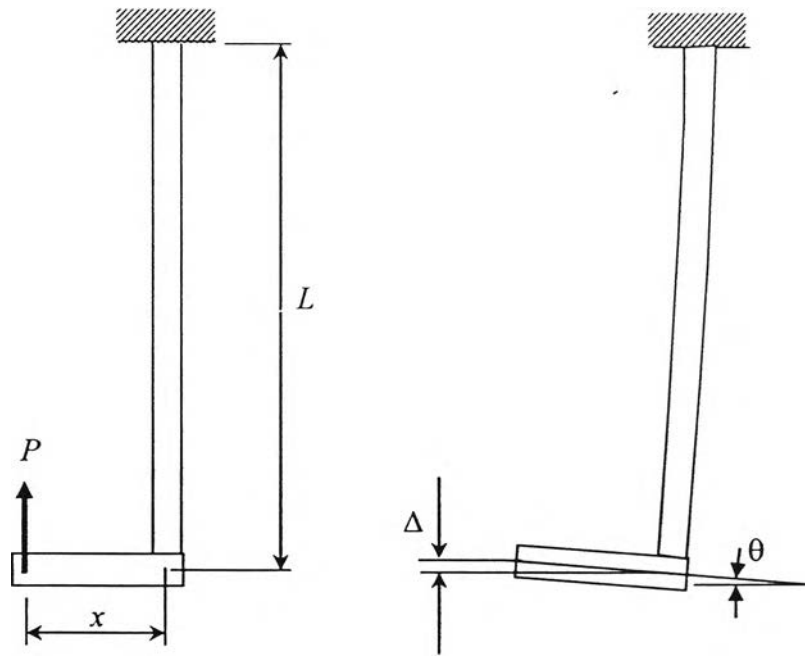
จากแบบรายละเอียดในภาคผนวก ก จะได้  $x = 36$  มม

สำหรับท่อถ่ายโอน  $L \approx 400$  มม และ  $I = \frac{\pi}{64}(12.7^4 - 10.3^4)$  มม<sup>4</sup>

สำหรับก้านถ่ายโอน  $L \approx 500$  มม และ  $I = \frac{\pi}{64}8^4$  มม

แทนค่าเหล่านี้และแรง  $P$  ในตารางที่ 5.2 ลงในสมการที่ (5.2) และ (5.3) จะได้ระยะสูญเสียที่ฐานรองรับตัวบน และตัวล่าง ผลการคำนวณที่ได้สรุปอยู่ในตารางที่ 5.3

<sup>3</sup> กรณีของก้านถ่ายโอนก็ยังคงใช้สมการที่ (5.1) และ (5.2) ได้แต่ว่า  $\Delta$  จะมีทิศทาง



รูปที่ 5.5 แบบจำลองท่อนำไอในระยะเคลื่อนตัว และลักษณะการเสียรูปที่จะเกิดขึ้น

คอลัมน์ที่ 2 ในตารางที่ 5.3 คือระยะสูญเสียที่ฐานรองรับตัวบนจากการทดลอง ซึ่งเท่ากับผลต่างของค่าในคอลัมน์ที่ 1 และ 4 ของตารางที่ 5.2 ส่วนคอลัมน์ที่ 2 นำข้อมูลมาจากคอลัมน์ที่ 5 ตารางที่ 5.2 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณจะพบว่าจะมีค่าอยู่ในอันดับเดียวกัน ดังนั้นสรุปว่า สาเหตุของความผิดพลาดในการถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว มาจากการเคลื่อนที่ของฐานรองรับคลิปเกจตัวบน และตัวล่าง เนื่องจากการเคลื่อนตัวของท่อ และก้านถ่ายโอนระยะเคลื่อนตัว ตามลำดับ การลดความผิดพลาดนี้ทำได้โดยการลดระยะ  $x$  ให้เท่ากับศูนย์ (หรือน้อยที่สุด) หรือถ้าทำไม่ได้จะต้องลดขนาดแรง  $P$

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณระยะสูญเสียที่ฐานรองรับคลิปเกดตัวบน และตัวล่าง

ภาระที่กระทำกับ คลิปเกด $P$ (นิวตัน)	ระยะสูญเสียที่ ฐานรองรับตัวบน (มม)		ระยะสูญเสียที่ ฐานรองรับตัวล่าง (มม)	
	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ
0.0	0.000	0.000	0.00	0.00
0.6	0.000	0.002	0.01	0.01
2.4	0.013	0.009	0.02	0.04
3.2	0.002	0.012	0.03	0.05
4.4	0.008	0.017	0.03	0.08
5.7	0.016	0.022	0.05	0.10
6.7	0.014	0.025	0.06	0.11
7.2	-0.002	0.027	0.06	0.12
8.1	0.028	0.030	0.07	0.14
8.9	0.031	0.033	0.08	0.15
9.6	-	-	0.11	0.16

### 5.3 ความทนทานของคลิปเกด

เนื่องจากการทดสอบการคืบ คลิปเกดจะถูกบีบค้ำงไว้เป็นเวลานานทำให้เกิดความเครียดมีโอกาาสเสื่อมสภาพได้ ดังนั้นเมื่อการทดสอบการคืบแต่ละครั้งเสร็จสิ้น คลิปเกดทั้งสองตัวจะถูกนำมาวัดความไวเชิงกลแล้วเปรียบเทียบกับค่าที่วัดก่อนนำไปใช้ทดสอบการคืบ ตารางที่ 5.4 แสดงความไวเชิงกลของคลิปเกดทั้งสองตัวหลังผ่านการใช้งานไปเป็นระยะเวลาต่าง ๆ (ข้อมูลแสดงอยู่ในภาคผนวก ข)

สำหรับคลิปเกดหมายเลข 1 พิสัยของความไวเชิงกลที่น่าจะเป็น (probable) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์  $S_1$  คือ

$$S_1 = \bar{C}_{2,1} \pm U_{P,C_{2,1}}$$

จากหัวข้อ จ.1.2 จะได้

$$S_1 = 233.33 \pm 0.16 \mu\epsilon/mm \quad (5.4)$$

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าประมาณที่ดีที่สุดก่อนและหลังการใช้งาน (คอลัมน์ที่ 4 ของตารางที่ 5.4) กับความไม่แน่นอนรวมในคอลัมน์ที่ 5 จะพบว่าความแตกต่างมีค่าอยู่ในพิสัยของความไม่แน่นอนรวม กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความแตกต่าง



ขนาดดังกล่าว ดังนั้นสรุปได้ว่า คลิปเกจหมายเลข 1 ยังไม่เสื่อมสภาพหลังใช้งานเป็นระยะเวลา 191 ชั่วโมง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5.4 ความไวเชิงกลของคลิปเกจหมายเลข 1 ก่อนและหลังการใช้งาน

ลำดับการใช้งาน	อายุใช้งาน (ชั่วโมง)	ความไวเชิงกล $C_{2,1}$ ( $\mu\epsilon/mm$ )	เปรียบเทียบกับสมการที่ (5.2)	
			ความแตกต่าง $ C_{2,1} - \bar{C}_{2,1} $ ( $\mu\epsilon/mm$ )	ความไม่ แน่นอนรวม <sup>(ก)</sup> ( $\mu\epsilon/mm$ )
หลังการทดสอบครั้งที่ 1	3.5	$233.44 \pm 0.37$ <sup>(ก)</sup>	0.11	0.40
หลังการทดสอบครั้งที่ 2	151.1	$233.21 \pm 0.37$ <sup>(ก)</sup>	0.21	0.40
หลังการทดสอบครั้งที่ 3	19.4	$233.25 \pm 0.37$ <sup>(ก)</sup>	0.08	0.40
หลังการทดสอบครั้งที่ 4	191.1	$233.01 \pm 0.37$ <sup>(ก)</sup>	0.32	0.53

<sup>(ก)</sup> เนื่องจากทำการวัดครั้งเดียว ดังนั้นจึงประมาณความไม่แน่นอนจากผลคูณของ  $t_{4,95\%}$  (เท่ากับ 2.7765) กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความไวเชิงกลก่อนการใช้งาน  $SD_{C_{2,1}}$  (เท่ากับ 0.132 จากตารางที่ จ.2)

<sup>(ข)</sup> ทำการวัดทั้งหมด 4 ครั้ง ดังนั้นจึงประมาณความไม่แน่นอนจากผลคูณของ  $t_{3,95\%}$  (เท่ากับ 3.182) กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (เท่ากับ 0.08 จากตารางที่ ช.2)

<sup>(ค)</sup> คำนวณจากรากที่สองของผลบวกกำลังสองของความไม่แน่นอนก่อนและหลังการใช้งาน

สำหรับคลิปเกจหมายเลข 2 พิสัยของความไวเชิงกลที่น่าจะเป็น (probable)  $S_2$  ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ คือ

$$S_2 = \bar{C}_{2,2} \pm U_{P,C_{2,2}}$$

จากหัวข้อ จ.2.2 จะได้ว่า

$$S_2 = 226.62 \pm 0.71 \mu\epsilon/mm \quad (5.5)$$

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าประมาณที่ดีที่สุดก่อนและหลังการใช้งาน (คอลัมน์ที่ 4 ของตารางที่ 5.4) กับความไม่แน่นอนรวมในคอลัมน์ที่ 5 จะพบว่าความแตกต่างมีค่าอยู่ในพิสัยของความไม่แน่นอนรวม กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความแตกต่างขนาดดังกล่าว ดังนั้นสรุปได้ว่า คลิปเกจหมายเลข 2 ยังไม่เสื่อมสภาพหลังใช้งานเป็นระยะเวลา 191 ชั่วโมง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5.5 ความไวเชิงกลของคลิปปอกหมายเลข 2 ก่อนและหลังการใช้งาน

ลำดับการใช้งาน	อายุใช้งาน (ชั่วโมง)	ความไวเชิงกล $C_{2.2}$ ( $\mu\epsilon/mm$ )	เปรียบเทียบกับสมการที่ (5.2)	
			ความแตกต่าง $ C_{2.2} - \bar{C}_{2.2} $ ( $\mu\epsilon/mm$ )	ความไม่ แน่นอนรวม <sup>(ก)</sup> ( $\mu\epsilon/mm$ )
หลังการทดสอบครั้งที่ 1	3.5	$226.67 \pm 1.58$ <sup>(ก)</sup>	0.05	1.73
หลังการทดสอบครั้งที่ 2	15.1	$226.81 \pm 1.58$ <sup>(ก)</sup>	0.19	1.73
หลังการทดสอบครั้งที่ 3	19.4	$226.97 \pm 1.58$ <sup>(ก)</sup>	0.35	1.73
หลังการทดสอบครั้งที่ 4	191.1	$226.15 \pm 0.15$ <sup>(ข)</sup>	0.47	0.73

<sup>(ก)</sup> เนื่องจากทำการวัดครั้งเดียว ดังนั้นจึงประมาณความไม่แน่นอนจากผลคูณของ  $t_{4,95\%}$  (เท่ากับ 2.7765) กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความไวเชิงกลก่อนการใช้งาน  $SD_{C_{2.2}}$  (เท่ากับ 0.568 จากตารางที่ จ.2)

<sup>(ข)</sup> ทำการวัดทั้งหมด 5 ครั้ง ดังนั้นจึงประมาณความไม่แน่นอนจากผลคูณของ  $t_{3,95\%}$  (เท่ากับ 2.7765) กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (เท่ากับ 0.05 จากตารางที่ ข.2)

<sup>(ค)</sup> คำนวณจากราคที่สองของผลบวกกำลังสองของความไม่แน่นอนก่อนและหลังการใช้งาน

#### 5.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการคืบ

การประเมินคุณภาพของอุปกรณ์วิเคราะห์เคลื่อนตัวอีกวิธีหนึ่งคือ การวิเคราะห์พฤติกรรมการคืบของวัสดุ จากข้อมูลการทดสอบการคืบของทองเหลืองที่ 350 องศาเซลเซียส ในภาคผนวก ฉ สามารถคำนวณหาระยะยืด ความเครียดคืบ และอัตราการคืบของชิ้นงานทดสอบที่เวลาใดๆ ได้ตามลำดับ ตารางที่ 5.6 แสดงอัตราการคืบต่ำสุด และอายุการคืบของชิ้นงานทดสอบที่ความเค้นเริ่มต้นต่างๆ

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบการคืบของทองเหลืองที่ 350 องศาเซลเซียส

ความเค้นเริ่มต้น $\sigma$ (MPa)	อัตราการคืบต่ำสุด $\dot{\epsilon}_{min}$ (วินาที <sup>-1</sup> )	อายุการคืบ $t_r$ (นาที)
8.7	6.00E-06	10,321
24.3	1.33E-06	694
27.7	3.00E-06	256
34.7	3.33E-08	210

เมื่อพล็อตค่าอัตราการคืบต่ำสุด  $\dot{\epsilon}_{min}$  กับความเค้นเริ่มต้น  $\sigma$  จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบเชิงเส้นบนสเกลล็อก-ล็อก แทนได้ด้วยสมการ

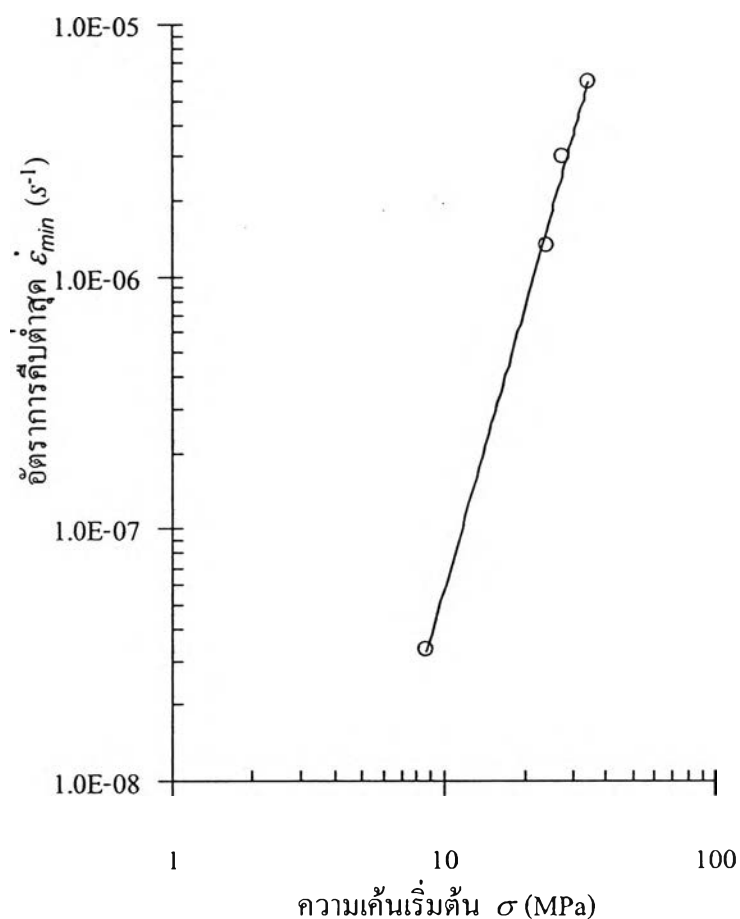
$$\dot{\epsilon}_{min} = 9.7 \times 10^{-12} \sigma^{3.76} \quad (5.6)$$

โดย  $\dot{\epsilon}_{min}$  มีหน่วยเป็น วินาที<sup>-1</sup> และ  $\sigma$  มีหน่วยเป็น MPa

เมื่อพล็อตค่าอัตราการคืบต่ำสุด  $\dot{\epsilon}_{min}$  กับอายุการคืบ  $t_r$  จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.7 ที่ได้เป็นแบบเชิงเส้นบนสเกลล็อก-ล็อก แทนได้ด้วยสมการ

$$\dot{\epsilon}_{min} t_r^{1.29} = 2.59 \times 10^{-5} \quad (5.7)$$

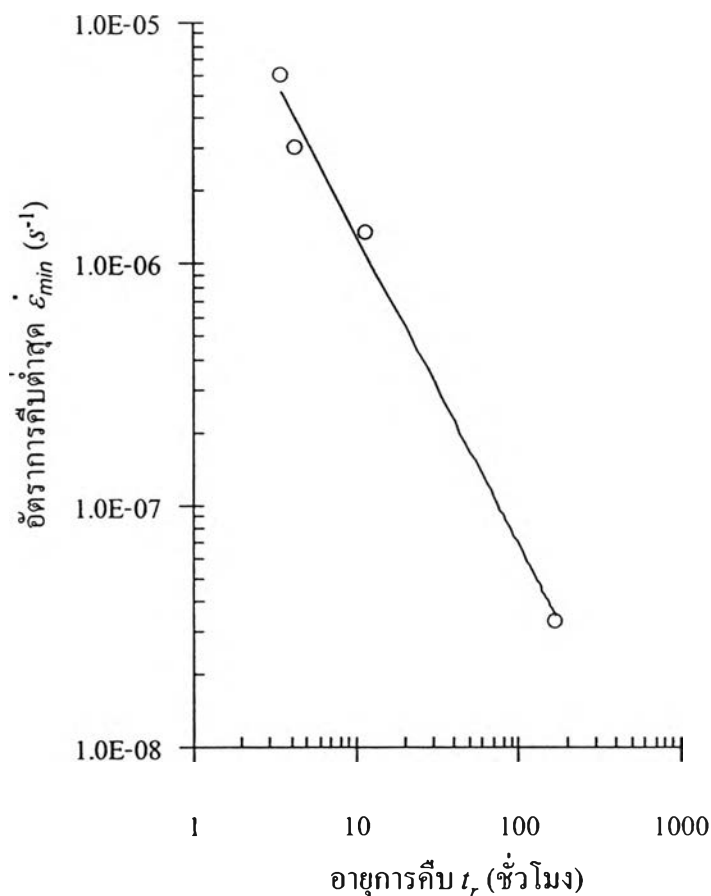
โดย  $\dot{\epsilon}_{min}$  มีหน่วยเป็น วินาที<sup>-1</sup> และ  $t_r$  มีหน่วยเป็น นาที



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบต่ำสุดกับความเค้นเริ่มต้นต่างๆของทองเหลืองที่อุณหภูมิ

350 องศาเซลเซียส

เนื่องจากไม่ได้มีการวิเคราะห์ส่วนผสมของทองเหลืองที่นำมาทดสอบ จึงเปรียบเทียบข้อมูลการคืบจากเอกสารอื่นไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการคืบสามารถแทนด้วยความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.6) และ (5.7) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลการคืบ ดังนั้นอุปกรณ์วิเคราะห์เคลื่อนตัวที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้แม่นยำ



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบต่ำสุดกับอายุการคืบของทองเหลืองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส