

การออกแบบสร้างและทดสอบโหลดเซลล์

4.1 ข้อกำหนดในการออกแบบโหลดเซลล์

เนื่องจากในปัจจุบัน พระราชบัญญัติมาตราซึ่งดวงวัด ยังมิได้กำหนดคุณสมบัติของ โหลดเซลล์ขึ้นมา ดังนั้นจึงต้องอาศัยการศึกษาจากข้อกำหนดของบริษัทต่าง ประเทศที่ผลิตโหลด เซลล์ ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.1 แล้วนำมากำหนดขึ้นเป็นคุณสมบัติเพื่อใช้อ้างอิงใน การออกแบบโหลดเซลล์ในวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 4.1

ข้อกำหนดต่าง ๆ ของโหลดเซลล์ที่ผลิตโดยบริษัทฟิลิปส์⁽¹⁰⁾

Characteristic	Loadcells class 0.5	Loadcells class 0.1
Output under nominal load (factory-adjustment)	1 mV/V \pm 0.5%	1 mV/V \pm 0.25%
Max. overload possible without serious zero-point variation	up to 200%	up to 200%
Non-linearity error	< \pm 0.3%	< \pm 0.1%
Hysteresis	—	< \pm 0.1%
Reproducibility better than	\pm 0.1 tot 0.3%	\pm 0.05%
Effect of temperature upon the zero-point	< \pm 0.05% per °C	< \pm 0.005% per °C
input impedance	600 Ω \pm 1%	600 Ω \pm 1%
Recommended supply voltage	12 V	12 V
Output impedance	610 Ω \pm 1 Ω	610 Ω \pm 1 Ω

ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้อ้างอิงในการออกแบบโหลดเซลล์มีดังนี้

- 1 โหลดเซลล์แต่ละตัวสามารถจะรับน้ำหนักปกติได้ 20 เมตริกตัน

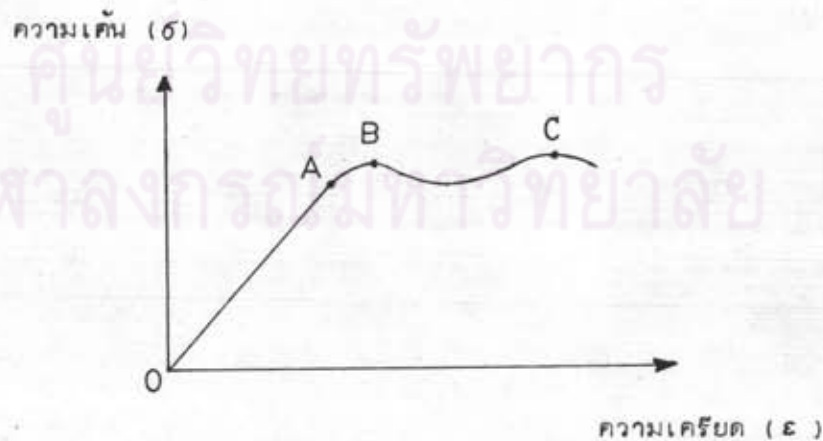
2. ค่าความไม่เชิงเส้น น้อยกว่า $\pm 0.1\%$ เต็มพิกัด
3. ค่าฮิสเตอริซิส (Hysteresis) น้อยกว่า $\pm 0.1\%$ เต็มพิกัด
4. ค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ (Repeatability) ดีกว่า $\pm 0.05\%$ เต็มพิกัด
5. ผลของจุดศูนย์ (Zero-point) น้อยกว่า $\pm 0.05\%$ ต่อ $^{\circ}\text{C}$
6. ใช้แรงไฮดรอลิกโหลดเซลล์ 12 โวลท์
7. แรงดันออกสูงสุดที่น้ำหนักเต็มพิกัด มากกว่า 1 มิลลิโวลท์/โวลท์
8. จุดศูนย์ใช้งานอยู่ในช่วง 10°C - 60°C

4.2 การออกแบบชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

จากหัวข้อ 2.3.1 ได้กล่าวถึงชิ้นส่วนรับน้ำหนัก แบบต่าง ๆ และได้เลือกใช้แบบคอสซีน เนื่องจากเหมาะสมกับการรับน้ำหนักขนาด 20 เมตริกตันตามที่ติดตั้งวัตถุประหลาดไว้ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเลือกชนิดของโลหะ และคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอสซีนที่จะทำโหลดเซลล์

4.2.1 การเลือกชนิดของโลหะ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ สามารถจะเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.1 ช่วง OA เป็นช่วงเส้นตรงที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในการทำโหลดเซลล์ จุด B เรียกว่าจุดคดาก (Yield point) เป็นจุดที่ความเครียดของวัสดุ-



รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างความเค้นและความเครียด

เพิ่มแต่ความเค้นของวัสดุไม่เพิ่มขึ้นเลย ส่วนจุด C เป็นจุดที่วัสดุจะรับกำลังได้สูงสุด (Ultimate strength) เนื่องจากค่าความเค้นของจุด A ไม่บอกรมา จึงต้องใช้ค่าความเค้นของจุดกลางในการคำนวณ และเพื่อให้ค่าฮิสเตอร์ซิสมีค่าน้อย ค่าความเค้นในขณะใช้งานที่น้ำหนักเต็มก็เกิดของการยั้ง ควรจะมีค่าไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเค้นที่จุดกลาง⁽²⁾ แต่ในการออกแบบโพลดเชลล์นั้น ก็ต้องการให้ค่าแรงดันออกของโพลดเชลล์มีค่าสูง ซึ่งก็หมายความว่าต้องออกแบบให้เกิดความเครียดและความเค้นในชิ้นส่วนรับน้ำหนักมาก

ทางออกที่จะบรรลุจุดประสงค์ทั้งสอง ก็โดยการเลือกใช้โลหะที่มีกำลังรับน้ำหนักสูง (High strength) ซึ่งจะมีค่าความเค้นที่จุดกลางสูงขึ้น สำหรับโลหะที่มีกำลังรับน้ำหนักสูงที่หาได้ภายในประเทศได้แก่

ก.	เหล็ก ASSAB 705	มีจุดกลางประมาณ 7000 กก./ซม ²
ข.	เหล็ก ASSAB 718	มีจุดกลางประมาณ 7650 กก./ซม ²
ค.	เหล็ก TEW 6582	มีจุดกลางประมาณ 8000 กก./ซม ²
ง.	เหล็ก TEW 7225	มีจุดกลางประมาณ 6500 กก./ซม ²

สำหรับรายละเอียดอื่น ๆ ของเหล็กทั้ง 4 ชนิด ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง.

4.2.2 การคำนวณขนาดของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักที่จะออกแบบ 4 อันต่อไปนี้ จะทำจากเหล็กที่มีกำลังรับน้ำหนักสูงทั้ง 4 ชนิดที่กล่าวมาแล้ว โดยแต่ละอันจะสามารถรับน้ำหนักได้ 20 ตัน และยังสามารถรับน้ำหนักเกินได้อีกประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์ เพราะว่าการออกแบบจะใช้ความเค้นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของจุดกลางเท่านั้น ลักษณะของคอสัมผัสจะเป็นแบบทรงกระบอกตันตั้งรูปที่ 2.5 (ก) และรัศมีของทรงกระบอกส่วนที่ติดสเตรนเกจจะต้องไม่น้อยกว่าครึ่งนิ้ว หรือ 1.27 ซม. จึงจะทำให้การยืดเยื้อจุดหลุมเป็นไปอย่างถูกต้อง⁽²⁾ รายละเอียดและตัวอย่างการคำนวณมีดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ ชิ้นส่วนรับน้ำหนักเบอร์ 2

วัสดุที่เลือกใช้คือ เหล็ก ASSAB 705

จุดกลางเท่ากับ 7000 กก./ซม²

ค่า Young's modulus (E) เท่ากับ 2.09×10^6 กก./ซม²

$$\therefore \text{ความเค้นใช้งาน} = 7000 \times 0.3 = 2100 \text{ กก./ซม}^2$$

$$\begin{aligned} \text{และเกิดความเครียด} &= \frac{\text{ความเค้น}}{E} = \frac{2100}{2.09 \times 10^6} \\ &= 1004.78 \times 10^{-6} \text{ ซม./ซม.} \end{aligned}$$

จากสมการ (2.3) และ (2.17) จะคำนวณแรงดันออกสูงสุดได้ดังนี้

$$\frac{\Delta V_o}{V} = (1 + \mu) \frac{G \cdot \epsilon}{2} = (1 + 0.3) \times \frac{2.1}{2} \times 1004.78 \times 10^{-6}$$

$$\text{แรงดันออกสูงสุด} = 1.372 \text{ มิลลิโวลต์/โวลต์}$$

$$\text{ขนาดพื้นที่หน้าตัด} = \frac{\text{น้ำหนักสูงสุด}}{\text{ความเค้นใช้งาน}} = \frac{20000}{2100} = 9.52 \text{ ซม}^2$$

$$\text{จะได้เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกระบอก} = \sqrt{\frac{9.52 \times 4}{\pi}} = 3.48 \text{ ซม.}$$

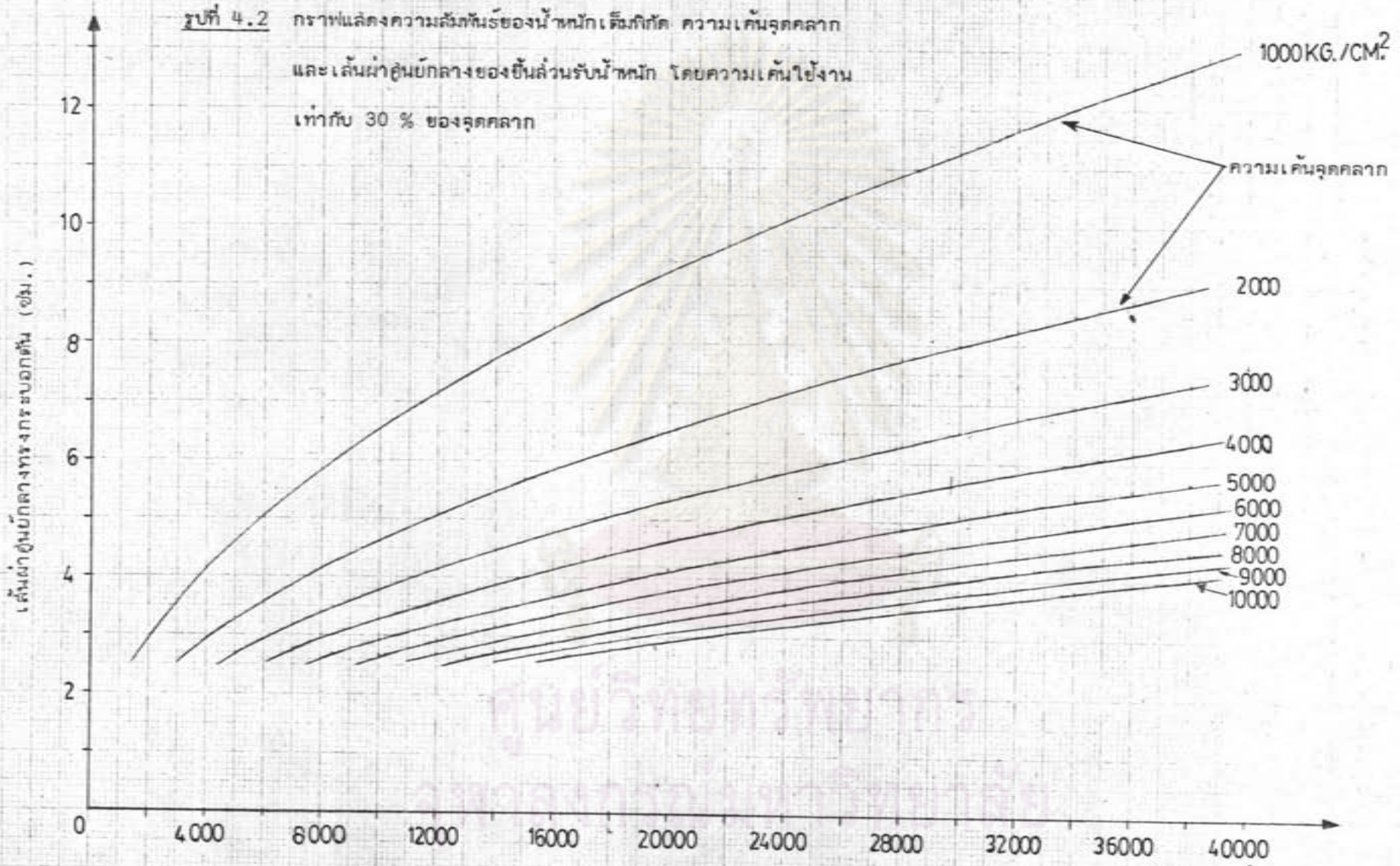
เพื่อที่จะให้ความไวของโพลีเอสเตอร์มีค่าเท่ากัน การคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นส่วนรับน้ำหนักที่เหลือ จะใช้ค่าความเค้นเท่ากับ 2100 กก./ซม² และผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

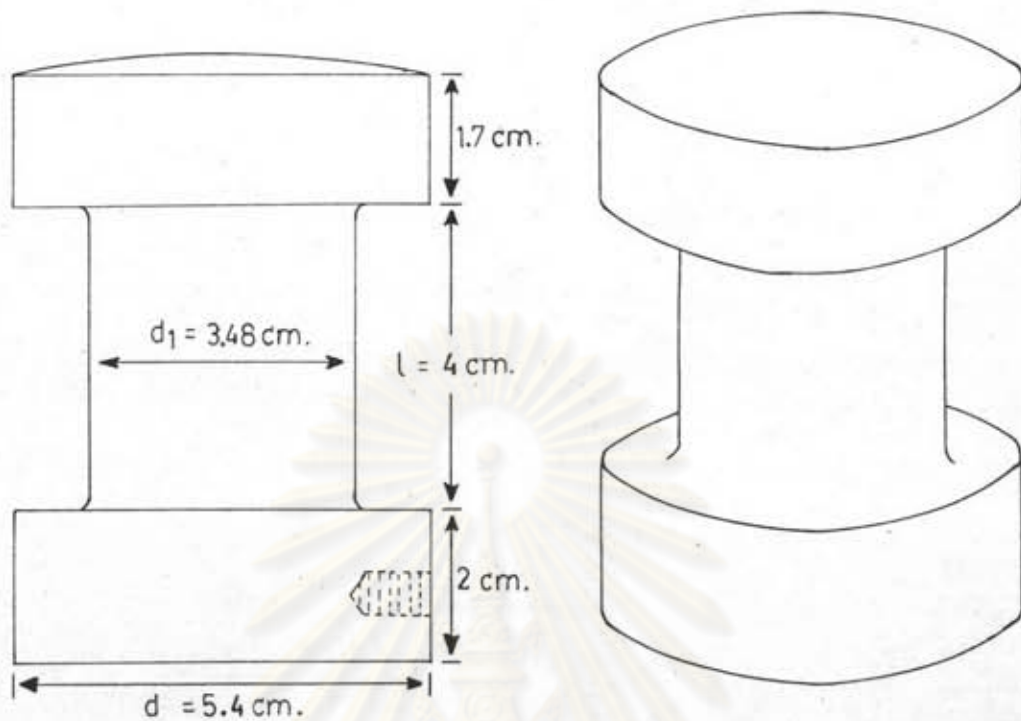
ชิ้นส่วนรับน้ำหนัก	วัสดุ	จุดคานง กก./ซม ²	เส้นผ่าศูนย์กลาง ทรงกระบอก-ซม.	ความเค้นใช้งาน- % ของจุดคานง
เบอร์ 1	TEW 7225	6500	3.48	32.31 %
เบอร์ 2	ASSAB 705	7000	3.48	30 %
เบอร์ 3	ASSAB 718	7650	3.48	27.45 %
เบอร์ 4	TEW 6582	8000	3.48	26.25 %

ในกรณีที่วัสดุมีค่าความเค้นจุดคานงแตกต่างกัน และค่าน้ำหนักสูงสุดที่โพลีเอสเตอร์จะรับได้เปลี่ยนแปลงเป็นค่าอื่น ก็สามารถหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางทรงกระบอกได้จากกราฟในรูปที่ 4.2 ซึ่งได้จากการคำนวณด้วยไมโครคอมพิวเตอร์และนำมาเขียนเป็นกราฟ

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักเต็มกัก ความเค้นจุดคลาก และเส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นล้นรับน้ำหนัก โดยความเค้นใช้งานเท่ากับ 30 % ของจุดคลาก



น้ำหนักเต็มกัก (กก.)



รูปที่ 4.3 แสดงรูปร่างของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

รูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก ทั้ง 4 ชิ้น แสดงไว้ดังรูปที่ 4.3 โดยใช่เหล็ก ที่กล่าวมาแล้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.5 ซม. มากสิ่งและขัดผิวด้วยกระดาษทรายจนเรียบ ด้านบนจะมีลักษณะโค้งเป็นหลังเต่า เพื่อให้น้ำหนักกระทำบริเวณตรงกลาง ป้องกันการเกิดความเค้นและความเครียดเนื่องจากการโค้งงอ (bending) เมื่อน้ำหนักกระทำบริเวณขอบ กรณีที่ด้านบนแบนราบ และนอกจากนี้จะต้องไม่ให้อัตราส่วนของความสูงต่อรัศมี ($1/r_1$) เกินกว่า 60 มิฉะนั้นจะเกิดการโค้งงอ (buckling) ถึงแม้จะรับน้ำหนักบริเวณตรงกลาง⁽¹⁾ ซึ่งในการออกแบบนี้ค่าความสูงต่อรัศมี = 2.3 เท่านั้น

ที่ฐานล่างจะมีรูเกลียวขนาด 5 มม. ลึก 1 ซม. สำหรับขันน็อตเพื่อปิดครอบโลหะทรงกระบอก ป้องกันอุปกรณ์ที่จะติดอยู่ภายใน

4.3 การเลือกโลหะแทนเกดแบบความต้านทาน

จากหัวข้อ 2.3.2 ที่ผ่านมามีได้กล่าวถึงโลหะแทนเกดแบบต่าง ๆ และตอนสุดท้ายได้เลือกใช้โลหะแทนเกดแบบแผ่นโลหะบาง เพื่อใช้ในการทำโพลดเซลล์ สำหรับหัวข้อที่จะกล่าวต่อไปนี้จะเป็นการเลือกโลหะแทนเกดแบบแผ่นโลหะบาง โดยจะพิจารณาจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ

คือ ความยาวเกล รูปร่าง ยึด ค่าความต้านทาน และการยึดเย็บจุดหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์
จุดหมุดของวัสดุ

4.3.1 ความยาวเกล

ความยาวเกลของลวดเตรนเกล หมายถึงความยาวของกริดส่วนที่ไวต่อความเครียด
ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนปลายและจุดต่อลวดจะไม่ไวต่อความเครียดเพราะมีขนาดใหญ่ และ



รูปที่ 4.4 แสดงความยาวเกล

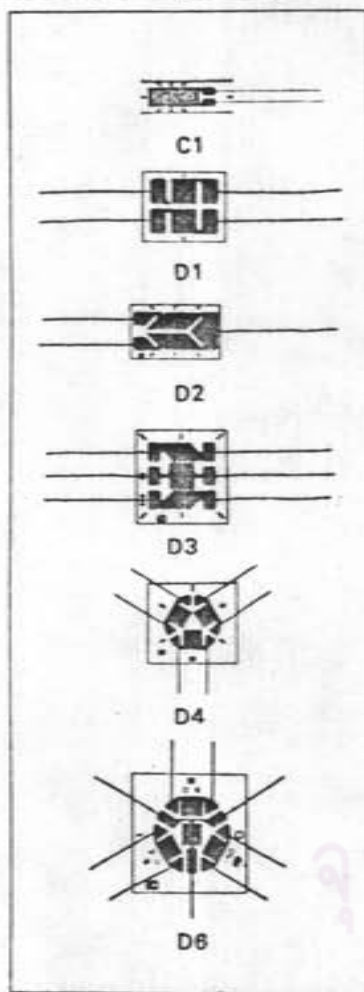
ความต้านทานต่ำ การเลือกความยาวเกลขึ้นอยู่กับภาวะวัดความเครียด คือ ถ้าต้องการวัดค่า
ความเครียดแบบเฉลี่ยก็ใช้ลวดเตรนเกลที่ยาว แต่ถ้าต้องการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นเฉพาะจุดหรือ
วัดค่าพีค (peak) ก็เลือกลวดเตรนเกลที่สั้น นอกจากนี้จะต้องพิจารณาพื้นที่ของกริดด้วยว่ามี
การระบายความร้อนพอหรือไม่ ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.2 ในการใช้งานโดยทั่ว ๆ ไป
จะเลือกความยาวเกลในช่วง 2-5 มม.

4.3.2 รูปร่าง (Pattern)

รูปร่างของลวดเตรนเกลแบบต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งมีประโยชน์ใน
การใช้งานต่างกัน เช่น ถ้าความเค้นเป็นแนวเดียวและรู้ทิศทางก็ใช้ลวดเตรนเกลแบบกริดเดียว
แต่ถ้ายังไม่ทราบทิศทางของความเค้นมาก่อน ก็ใช้ลวดเตรนเกลแบบ 3 กริดที่หัวมุมกัน

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างรายละเอียดของลวดเตรนเกจยี่ห้อ Kyowa

● General Purpose Gage



Type	Resistance value (Ω)	Gage factor (App.)	Dimensions (mm)			Gages per pack	Applicable adhesive Remarks
			Gage length	Grid width	Base LxW		

KFC Phester Foil Strain Gage

This gage has a metal foil sensitive element backed by phester, phenol/epoxy resin, and is compatible

with most cements of the thermo-setting and room-temperature-setting types, and features ease of bonding, superior creep characteristics, and is versatile in applications.

KFC-2-D2-(11, 16, 23, 27)	120	2.1	2	3.4	12×7	5	PC-6 -50~+180°C PC-12 -50~+170°C CC-15A -50~+120°C EP-18 -50~+100°C Gage pattern D9 and D19 gages are with 100mm long polyester clad copper lead wires. Other gages are with 25mm long silver clad copper lead wires.		
KFC-2-D3-(11, 16, 23, 27)		2.1	2	3.6	11×11				
KFC-2-D4-(11, 16, 23, 27)		2.1	2	3.4	12×12				
KFC-1-D4-(11, 16, 23, 27)		2.1	1	1.7	7×7				
KFC-2-D6-(11, 16, 23, 27)		2.1	2	3.4	17×17				
KFC-10-D16-(11, 16, 23, 27)		2.1	10	3	φ21				
KFC-5-D16-(11, 16, 23, 27)		2.1	5	1.9	φ11				
KFC-2-D16-(11, 16, 23, 27)		2.1	2	1.4	φ8				
KFC-1-D16-(11, 16, 23, 27)		2.1	1	1.4	φ4				
KFC-10-D17-(11, 16, 23, 27)		2.1	10	3	φ21				
KFC-5-D17-(11, 16, 23, 27)		2.1	5	1.9	φ11				
KFC-2-D17-(11, 16, 23, 27)		2.1	2	1.4	φ8				
KFC-1-D17-(11, 16, 23, 27)		2.1	1	1.4	φ5				
KFC-2-D9-(11, 16, 23, 27)		2.1	2	2.2	17×5				
KFC-1-D9-(11, 16, 23, 27)		2.1	1	1.4	12×4				
KFC-2-D19-(11, 16, 23, 27)		2.1	2	2.5	17×5				
KFC-1-D19-(11, 16, 23, 27)		2.1	1	1.5	12×4				
KFC-5-350-C1-(11, 16, 23, 27)		350	2.1	5	3.9			11×5.5	10
KFC-2-350-C1-(11, 16, 23, 27)			2.1	2	3			7.5×4.5	
KFC-5-350-D16-(11, 16, 23, 27)	2.1		5	3.9	φ16	5			
KFC-2-350-D16-(11, 16, 23, 27)	2.1		2	3	φ10				
KFC-5-350-D17-(11, 16, 23, 27)	2.1		5	3.9	φ16				
KFC-2-350-D17-(11, 16, 23, 27)	2.1	2	3	φ12					
KFC-5-500-C1-(11, 16, 23, 27)	500	2.1	5	3.5	11×5	10			
KFC-2-500-C1-(11, 16, 23, 27)		2.1	2	2.6	7.5×4.5				

4.3.3 ชนิดของลัทรนเกจ

ชนิดของลัทรนเกจ หมายถึงชนิดของโลหะผสมที่ใช้ทำเกจและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นรอง ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3.2 การเลือกชนิดของลัทรนเกจค่อนข้างจะจำกัดอยู่บ้างเพราะจะต้องเลือกจากชนิดที่ผลิตจำหน่าย ดังแสดงตัวอย่างไว้ในตารางที่ 4.4 การเลือกนั้นพิจารณาจากสิ่งต่อไปนี้

- ก. ชนิดของความเครียด (ลัทรนเกจ, โคนามิค หรือเกินจุดคด)
- ข. ช่วงอุณหภูมิใช้งาน
- ค. อายุใช้งาน (Fatigue life)
- ง. ความแม่นยำในการวัด

4.3.4 ค่าความต้านทานของเกจ

การเลือกค่าความต้านทานของลัทรนเกจนั้น จะต้องพิจารณาสิ่งต่อไปนี้

ก. การระบายความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.2 เพื่อให้ความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ควรจะเลือกลัทรนเกจที่มีค่าความต้านทานสูง

ข. การลดลงของความไวเนื่องจากสลายน้ำสัญญาณ ถ้าเลือกลัทรนเกจให้มีความต้านทานสูงกว่าความต้านทานของสลายน้ำสัญญาณมาก ๆ จะแก้ปัญหการลดลงของความไวของลัทรนเกจได้

ค. อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ถ้าในวงจรลัทรนเกจมีสวิตช์ หรือ อุปกรณ์พวก Slipring การเลือกลัทรนเกจที่มีค่าความต้านทานสูง จะเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

4.3.5 การยึดเชื่อมอุณหภูมิด้วยตัวเอง

ค่าความเครียดในวัสดุจะถูกเหนี่ยวนำขึ้น ถ้าอุณหภูมิของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นควรจะเลือกลัทรนเกจที่มีค่ายึดเชื่อมอุณหภูมิด้วยตัวเองให้ใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุเนื่องจากอุณหภูมิ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 แสดงชนิดและคุณสมบัติของสเตรนเกจยี่ห้อ Kyowa

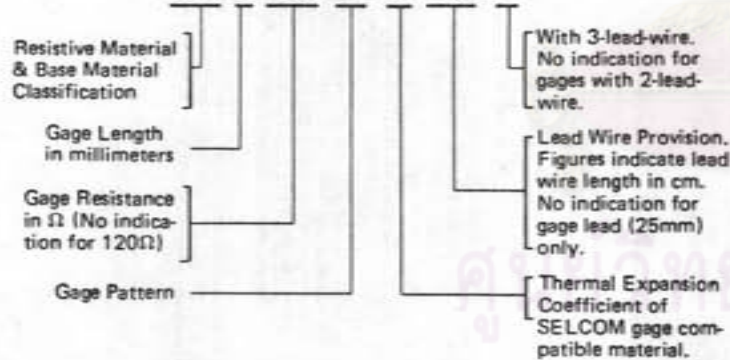
● Kinds and Important Characteristics of Kyowa Strain Gages

Kind/Type	Material		Operating Temperature Range (°C)	Compensated Temperature Range (°C)	Strain Limit at Room Temp. (%)	Fatigue Life at Room Temperature	Applicable Adhesive	Main Applications Features	
	Resistive Element	Base							
General Purpose	Foil Phester Gage KFC	Cu-Ni Foil	Phester	-195 ~ +180	+10 ~ +100	2.8%	4.5 × 10 ⁶	PC-6, CC-15A, PC-12, EP-18	General/residual stress, transducer
	Foil Strain Gage KFR	Special Alloy Foil	Polyimide	-195 ~ +180	0 ~ +150	2.2%	1.0 × 10 ⁶	PC-6, CC-15A, PC-12, EP-18	General stress, transducer
	Foil Polyimide Gage KFD	Cu-Ni Foil	Polyimide	-195 ~ +200	+10 ~ +150	2.8%	4.0 × 10 ⁶	PC-6, CC-15A, PC-12, EP-18	General/residual stress, transducer
	Paper Gage K	Cu-Ni Wire	Paper	-100 ~ +80	+10 ~ +80	1.5%	1.6 × 10 ⁶	CC-15A, BC-11	General stress, plaster model test
	Polyester Gage KP	Cu-Ni Wire	Polyester	-100 ~ +180	+10 ~ +80	1.8%	1.5 × 10 ⁶	PC-12, CC-15A, PC-13	General stress

ตารางที่ 4.5 การชดเชยจุดอุณหภูมิเนื่องจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของวัสดุ

■ Kyowa Strain Gage Coding System

KFR-5-350-C1-11 L30-3



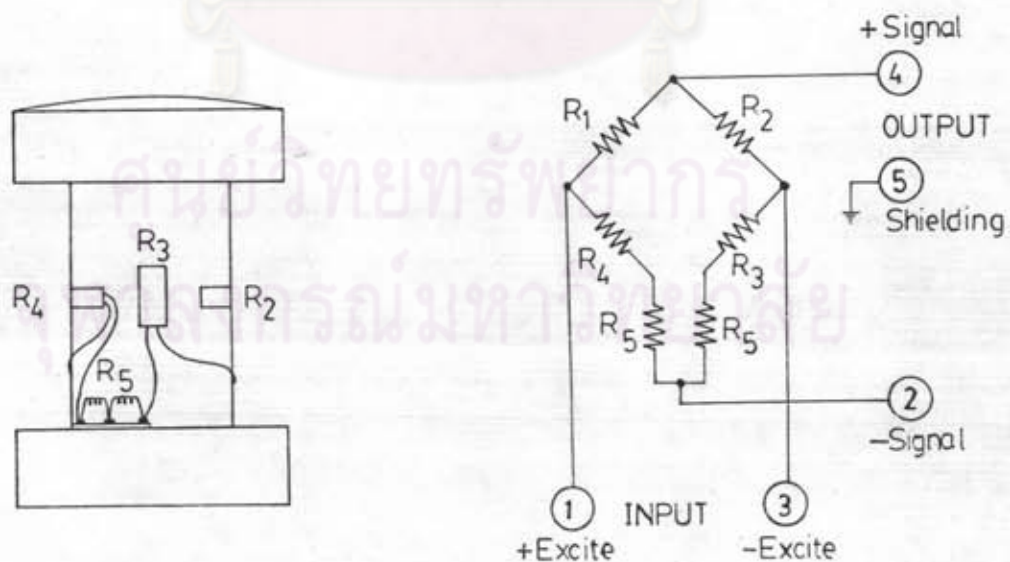
Compatible measuring object	Coefficient of linear expansion	Last figure/s in coding	Base color
Wood	5.0 × 10 ⁻⁵ /°C	5	—
Ordinary steel, concrete	10.8 × 10 ⁻⁵ /°C	11	Red
Stainless steel	16.2 × 10 ⁻⁵ /°C	16	Orange
Aluminum alloy	23.4 × 10 ⁻⁵ /°C	23	Green
Magnesium alloy	27.0 × 10 ⁻⁵ /°C	27	Yellow
Plastics	65.0 × 10 ⁻⁵ /°C	65	—

รูปที่ 4.5 รหัสของสเตรนเกจ

สำหรับลัเตนเทกที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ มีรายละเอียดคือ มีความยาวเทกเท่ากับ 5 มม. เนื่องจากต้องการวัดความเครียดในแนวเดียวต่อลัเตนเทก 1 ตัว จึงใช้ลัเตนเทกที่มีรูปร่างแบบกริดเดี่ยว ซึ่งมีรหัสเป็น C1 ใช้ลัเตนเทกที่มีความต้านทาน 500 โอห์มเพราะต้องการให้ความร้อนน้อย และลัเตนเทกแบบแผ่นโลหะบางที่มีความต้านทาน 500 โอห์ม จะมีเฉพาะอนุกรม KFC ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิใช้งานค่อนข้างกว้าง ระบายใช้งานสูงสุด โลหะที่ทำขึ้นส่วนรับน้ำหนักมีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิขยายตัว ประมาณ $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเลือกจากรายที่ 4.5 ได้ค่าใกล้เคียงที่สุด $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีรหัสเป็น 11 ดังนั้นลัเตนเทกที่ใช้คือแบบ KFC - 5 - 500 - C1 - 11

4.4 วงจรลัเตนเทก

จากหัวข้อ 2.3 ที่ผ่านมาได้เลือกชิ้นส่วนรับน้ำหนัก แบบคอสนัม์ และใช้วงจรลัเตนเทกเป็น วิทลิตอนบรีดจ์ แบบที่ 4 ลัเตนเทกแต่ละตัวจะมีค่าผิดพลาดของความต้านทานอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้วงจรวิทลิตอนบรีดจ์ ไม่สมดุลมีค่าแรงดันออกมาในขณะที่ยังไม่มี ความเครียด จึงจะต้องเพิ่มวงจรปรับให้ค่าแรงดันออกมาเป็นศูนย์โวลท์ ดังแสดงในวงจรรูปที่ 4.6 ความต้านทาน R5 จะถูกเพิ่มเข้าไปเพียงตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น และควรจะมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิใกล้เคียงกับลัเตนเทก



รูปที่ 4.6 แสดงการปรับศูนย์วงจรลัเตนเทก

ซึ่งทำจากโลหะผสม Advance หรือ Constantan ในทางปฏิบัติจริง ๆ ไข้วัดความต้านทาน Manganin ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานต่ำมาก (ตามที่แสดงในตารางที่ 2.1) ทดลองเปลี่ยนความยาวจนได้แรงดันออกของวงจรเป็นอุนย์ ค่าความต้านทาน R5 ที่เพิ่มเข้าไป นี้จะมีค่าประมาณไม่เกิน 2 โอห์ม

ในการกลิ้งหรือขัดผิวของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก อาจจะทำให้ขนาดผิดพลาดจากที่ออกแบบไว้ ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นของแต่ละอันอาจจะไม่เท่ากัน เมื่อรับน้ำหนักเท่ากัน มีผลให้ความไวของโพลีเอสเตอร์ไม่เท่ากัน การปรับความไวนี้ได้ออกแบบไว้ที่ภาครวมสัญญาแล้ว

4.5 กาวและการติดสเตรนเกจ ⁽³⁾

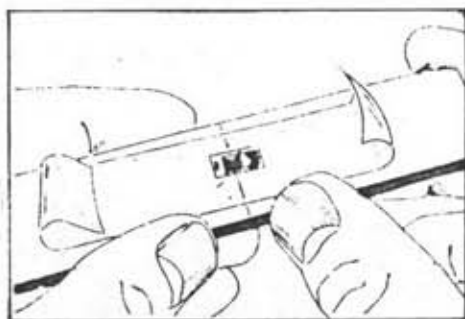
ในการติดสเตรนเกจบนผิวของวัสดุ ก็ถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่ง จำเป็นจะต้องเลือกชนิดของกาวและวิธีการติดให้ถูกต้อง ความสำคัญของกาวคือเป็นตัวกลางส่งผ่านความเครียดจากผิวของวัสดุมายังสเตรนเกจโดยไม่ให้ความผิดเพี้ยนหรือมีน้อยที่สุด

ก่อนติดสเตรนเกจจะต้องเตรียมผิวของวัสดุให้ดี โดยเริ่มจากขัดผิวด้วยกระดาษทราย เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนผิวเรียบ ต่อจากนั้นใช้สารละลายพวก Acetone, Freon เป็นต้น เช็ดล้างเอาคราบไขมันหรือสิ่งสกปรกออกจากผิววัสดุ แล้วจึงทำเครื่องหมายตำแหน่งที่จะติดสเตรนเกจบนผิวของวัสดุ ใช้เทปใสติดสเตรนเกจลงบนผิวของวัสดุดังที่แสดงในรูปที่ 4.7 (ก) - ฉัดตำแหน่งและทิศทางของสเตรนเกจให้ตรงกับที่ทำเครื่องหมายไว้ ดึงเทปใสออกด้านเดียวดังรูปที่ 4.7 (ข) แล้วจึงทำกาวตามคำแนะนำของกาวแต่ละชนิดลงบนผิวของวัสดุ และสเตรนเกจตามรูปที่ 4.6 (ค) ชิ้นสุดท้ายติดสเตรนเกจจากปลายด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง เพื่อให้โลโก้หรือร่องอากาศต่ออยู่ระหว่างสเตรนเกจและผิววัสดุ ใช้น้ำหนักกดบนสเตรนเกจ และอบ (Cure) อุณหภูมิตามระยะเวลาที่แนะนำในคู่มือของกาว

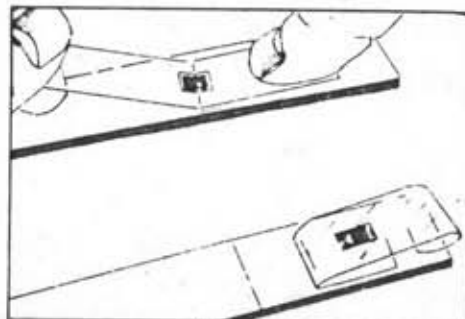
กาวสำหรับใช้ติดสเตรนเกจมีอยู่หลายชนิด คุณสมบัติและประสิทธิภาพในการใช้งานก็แตกต่างกันไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และกาวที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่

4.5.1 Nitrocellulose Cement

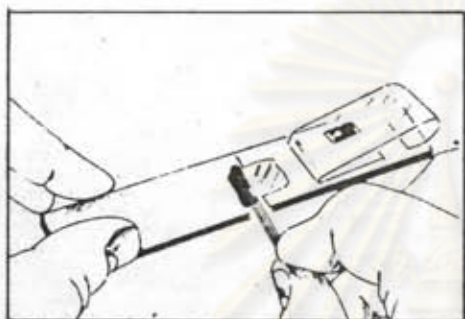
กาวชนิดนี้เหมาะที่จะใช้กับสเตรนเกจที่ใช้แผ่นรองเป็นกระดาษ เมื่อติดแล้วต้องทำให้แห้ง และทาสารกันชื้นเช่น Silicone rubber ทันที เพราะกาวชนิดนี้ดูดซับความชื้นได้ง่าย เกิดการขยายตัว และเสื่อมประสิทธิภาพ



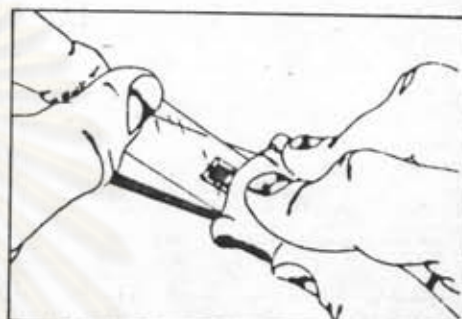
(ก)



(ข)

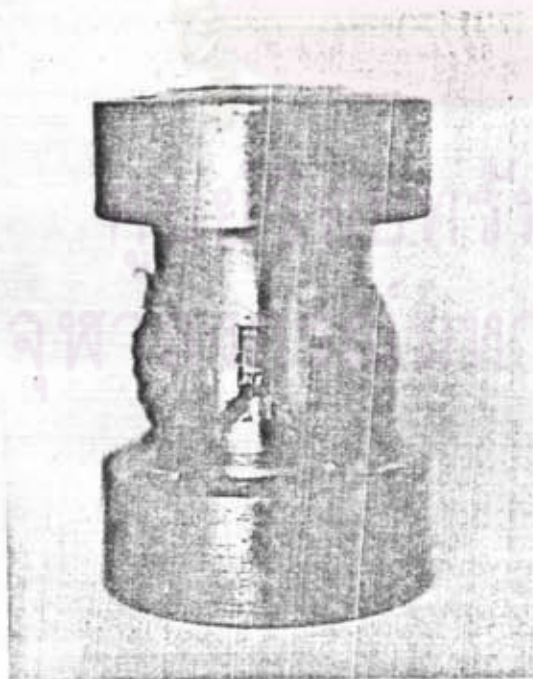


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.7 แสดงการติดใส่เตรนเกจ



รูปที่ 4.8 แสดงชิ้นส่วนรับน้ำหมัก
ที่ติดใส่เตรนเกจแล้ว

4.5.2 Epoxy Cement

กาวชนิดนี้จัดอยู่ในพวกแข็งตัวที่อุณหภูมิสูง (Thermosetting) หลังจากติดแล้ว จะต้องใช้แรงกดเพื่อให้ชั้นของกาวบางมาก และอบที่อุณหภูมิสูง แต่กาว Epoxy ก็มีแรงยึดตัวสูงกว่ากาวชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้การเติมสารตัวเร่งบางชนิดเข้าไปจะทำให้แข็งตัวที่อุณหภูมิกายนอกปกติได้ กาวชนิดนี้เหมาะที่จะใช้ในการทำทราเวลลิ่งเชอร์

4.5.3 Cyanoacrylate cement

เป็นกาวที่ใช้กันมากในการติดโลหะ เพราะง่ายต่อการใช้งานเพียงใช้นิ้วมือกดไว้หลังจากติดกาวเพียง 10-30 วินาที ที่อุณหภูมิห้องเท่านั้นก็พอแล้ว หลังจากทิ้งไว้ 10 นาทีก็นำไปใช้งานได้ แต่มีข้อเสียคือ อายุใช้งานสั้นเพียง 1 ถึง 2 ปีเท่านั้น

ในการเลือกชนิดของกาวนั้น จะต้องพิจารณาส่งต่าง ๆ ดังนี้

1. ชนิดของแผ่นรองของโลหะ ตามปกติแล้วผู้ผลิตจะแนะนำชนิดของกาวที่สามารถใช้กับโลหะต่าง ๆ ดังในตารางที่ 4.4
2. ช่วงอุณหภูมิใช้งานของกาว ดังแสดงในตารางที่ 4.6
3. อุณหภูมิที่ต้องอบกาวหลังจากการติดโลหะ

สำหรับกาวที่ใช้ติดโลหะในวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้กาว Epoxy แบบ EP-18 เพราะว่า เป็นกาวที่มีแรงยึดสูงมาก และสามารถใช้กับโลหะชนิด KFC ได้ ช่วงอุณหภูมิใช้งานของการอยู่ระหว่าง -50°C ถึง $+100^{\circ}\text{C}$ ซึ่งครอบคลุมช่วงอุณหภูมิที่ต้องการของไหลเซลล์คือ $+10^{\circ}\text{C}$ ถึง $+60^{\circ}\text{C}$. หลังจากติดแล้วก็ไม่ต้องอบที่อุณหภูมิสูง เพียงปล่อยไว้ที่อุณหภูมิห้องและใช้แรงกด 1 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ประมาณ 24 ชั่วโมง ก็พอแล้ว กาว EP-18 ประกอบด้วยส่วนผสม 2 ชนิด A และ B จะต้องผสมกันในอัตราส่วน 5 ต่อ 3

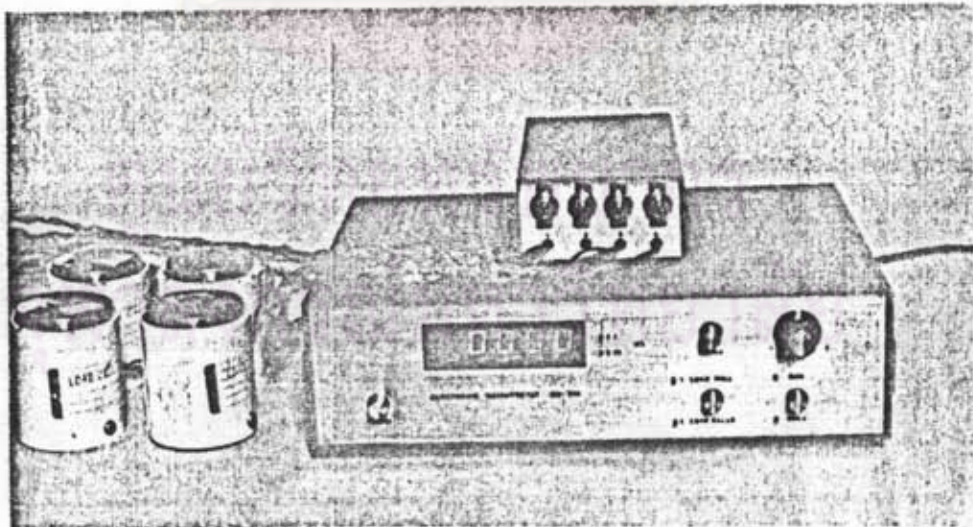
รูปที่ 4.8 จะแสดงชิ้นส่วนรับน้ำหนัก ที่ติดโลหะเรียบร้อยแล้ว การป้องกันความชื้นใช้ Silicone rubber ทาหับโลหะ และการป้องกันสนิมที่จะเกิดกับเหล็กชิ้นส่วนรับน้ำหนัก นั้น ก็โดยการทึบแลคเกอร์สีเปรย์ให้ทั่ว

ตารางที่ 4.6 กาวชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ติดสเตรนเกจ

type	components	opr. temp range (°C)	applicable gages	capac. (K)	Remarks
HC-25A	Ceramic	+20-+500	KH	30	2-component* ¹
SC-22	Silicon	-50-+400	KFA-KA	30	Single-component* ¹
PC-6	Phenor	-269-+250	KFC-KFR-KFD-KC-KFN-KFL KFH-KBN	100	Single-component* ¹
EP-17	Epoxy	-50-+170	Semiconductor gage	30	2-component* ¹
PC-12	Polyester	-196-+170	KFC-KC-KP-KFS-KBN-KFW Semiconductor-KFP	30 100	2-component* ²
PC-13	Polyester	-50-+150	KFC-KC-KP-KBN-Semiconductor	30	2-component* ²
CC-15A	Cyanoacrylate	-196-+120	KFC-KFR-KFD-KC-K-KP-KFE KFP-KFN-KBN-KFS-KFL-KFW KFF-Semiconductor	2 20	Single-component* ³ Use S7 together in a cold season.
EP-18	Epoxy	-50-+100	KFC-KC-KBN-KFW-KFF	30	2-component* ²
BC-11	Nitrocellulose	-50-+80	K	20	Single-component* ²
EC-24	Epoxy-p.urethane	0-+60	KLM	30	2-component* ²
EC-10	Rubber	-20-+60	KL	20	Single-component* ²
UC-26	Polyurethane	-196-+50	KFL (mainly for concrete & wood)	30	2-component* ²
S-7	Hardening agent for CC-15A			30cc	
S-8	Polyethylene surface treating agent for CC-15A			100cc	

KYOWA

- *¹: thermosetting type
- *²: room temperature setting type
- *³: quick setting room temperature type



รูปที่ 4.9 แสดงโหนดเซลล์ที่หุ้มด้วยกระบอกโลหะป้องกันสเตรนเกจ
พร้อมกับอินดิเคเตอร์ และกล่องรวมสัญญาณ

เนื่องจากในการกลิ้งเหล็ก และการตีดล่เตรนเกจ อาจจะทำให้มีความเครียดเหลือ อยู่ในเนื้อเหล็ก และล่เตรนเกจ จึงกำจัดโดยการอบที่อุณหภูมิประมาณ 60 °ซ และใช้เวลา ประมาณ 1 ชม. จากนั้นนำไปกดด้วยน้ำหนัก 20 เมตริกตัน ประมาณ 2-3 รอบ

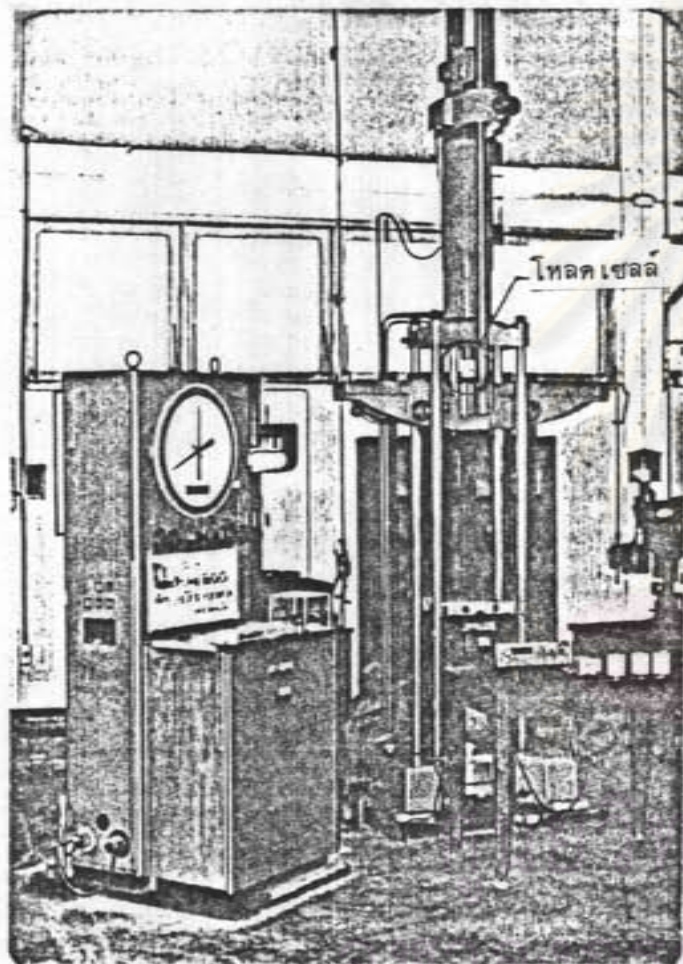
นำไปต่อวงจรตามรูปที่ 4.6 ลายนำสัญญาณออกของโพลดเซลล์ใช้ล่ายชิลด์ (Shield) เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน การป้องกันอุปกรณ์ที่อยู่ภายในโพลดเซลล์ก็ใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็น ทรงกระบอก ครอบชิ้นส่วนรับน้ำหนักและชิ้นมอดบีดให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 4.9

4.6 การทดสอบโพลดเซลล์

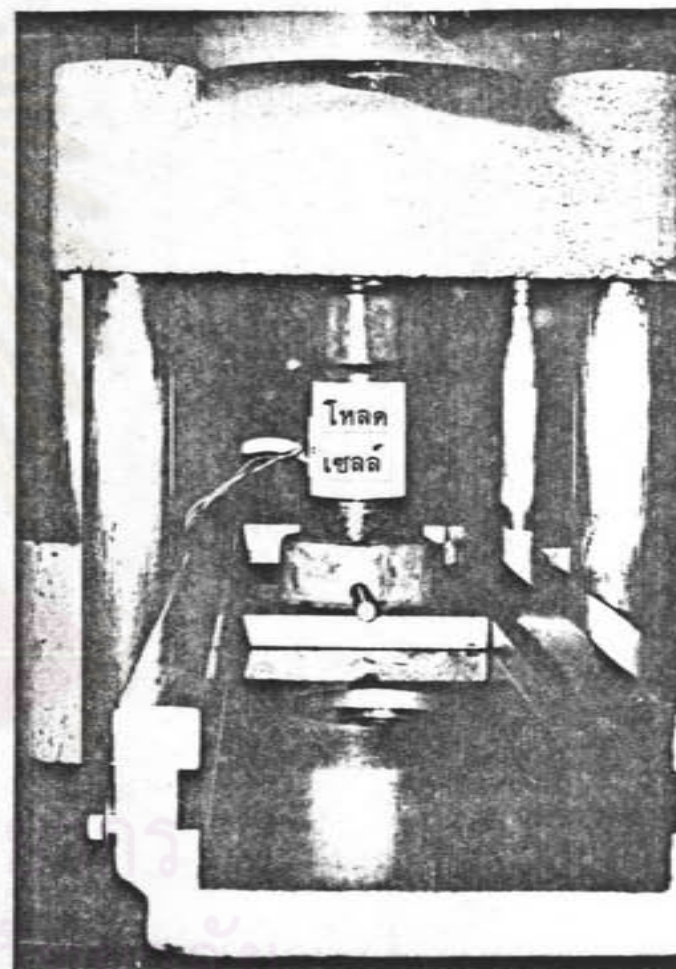
ในการทดสอบโพลดเซลล์ที่สร้างขึ้น จะใช้เครื่องมือทดสอบกำลังวัสดุที่ชื่อ Amsler ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เป็นเครื่องกดน้ำหนักลงบนโพลดเซลล์ และใช้อินดิเคเตอร์ที่สร้างขึ้นเป็นตัวอ่านค่าน้ำหนักจากโพลดเซลล์ ความแม่นยำของเครื่องทดสอบกำลังวัสดุเท่ากับ ± 1.0 % สำหรับค่าความละเอียดของการอ่านเข็ม หน้าปัด มีดังนี้ ในพิกัด 40 เมตริกตัน อ่านได้ละเอียด 100 กก./ช่อง และในพิกัด 20 เมตริกตัน อ่านได้ละเอียด 20 กก./ช่อง

การปรับความไวของโพลดเซลล์แต่ละตัวให้เท่ากัน จะต้องปรับที่กล่องรวมสัญญาณ โดยนำโพลดเซลล์แต่ละตัวไปกดด้วยน้ำหนักประมาณ 20,000 กก. ปรับความต้านทานของแต่ละช่องให้ค่าที่อ่านจากอินดิเคเตอร์ เท่ากันทุกโพลดเซลล์ จากนั้นจึงปรับ "SPAN" ของอินดิเคเตอร์ ให้อ่านค่าน้ำหนักเป็น 20000 กก. แล้วจึงเริ่มต้นทำการทดสอบที่น้ำหนักเต็มพิกัด 20000 กก. และ 5000 กก. โดยแบ่งเป็นทดสอบทีละโพลดเซลล์ และใช้โพลดเซลล์ทั้ง 4 อัน ขนานกัน นอก จากนี้ยังได้นำเอาโพลดเซลล์ที่ผลิตจากต่างประเทศชื่อ KYOWA มาทดสอบเปรียบเทียบกับ ซึ่งข้อมูลของโพลดเซลล์ KYOWA มีดังนี้

ความไว	1.968	มิลลิโวลท์/โวลท์
ความไม่เป็นเชิงเส้น	± 0.05 %	เต็มพิกัด
ฮิสเตอร์ซิส	± 0.05 %	เต็มพิกัด
ความแม่นยำ	± 0.1 %	เต็มพิกัด
ค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ	± 0.05 %	เต็มพิกัด



รูปที่ 4.10 เครื่องมือทอถอบกาสังวัสดุ ที่ใช้ทอถอบ
โพลีเซลล์



รูปที่ 4.11 แล่คงโพลีเซลล์ที่วางอยู่บนเครื่องมือ
ทอถอบกาสังวัสดุ

สำหรับข้อมูลและผลการทดสอบโพลีเซลล์ทั้งหมด แสดงไว้ในภาคผนวก จ. ตั้งแต่ตารางที่ จ.-1 ถึง ตารางที่ จ.-12 ซึ่งใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ และวิเคราะห์ผลออกมา ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป ผลการทดสอบของโพลีเซลล์แต่ละอัน เมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะได้กราฟที่มีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งเขียนแสดงเพียงกราฟเดียวดังรูปที่ 4.12

4.6.1 ผลการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้น

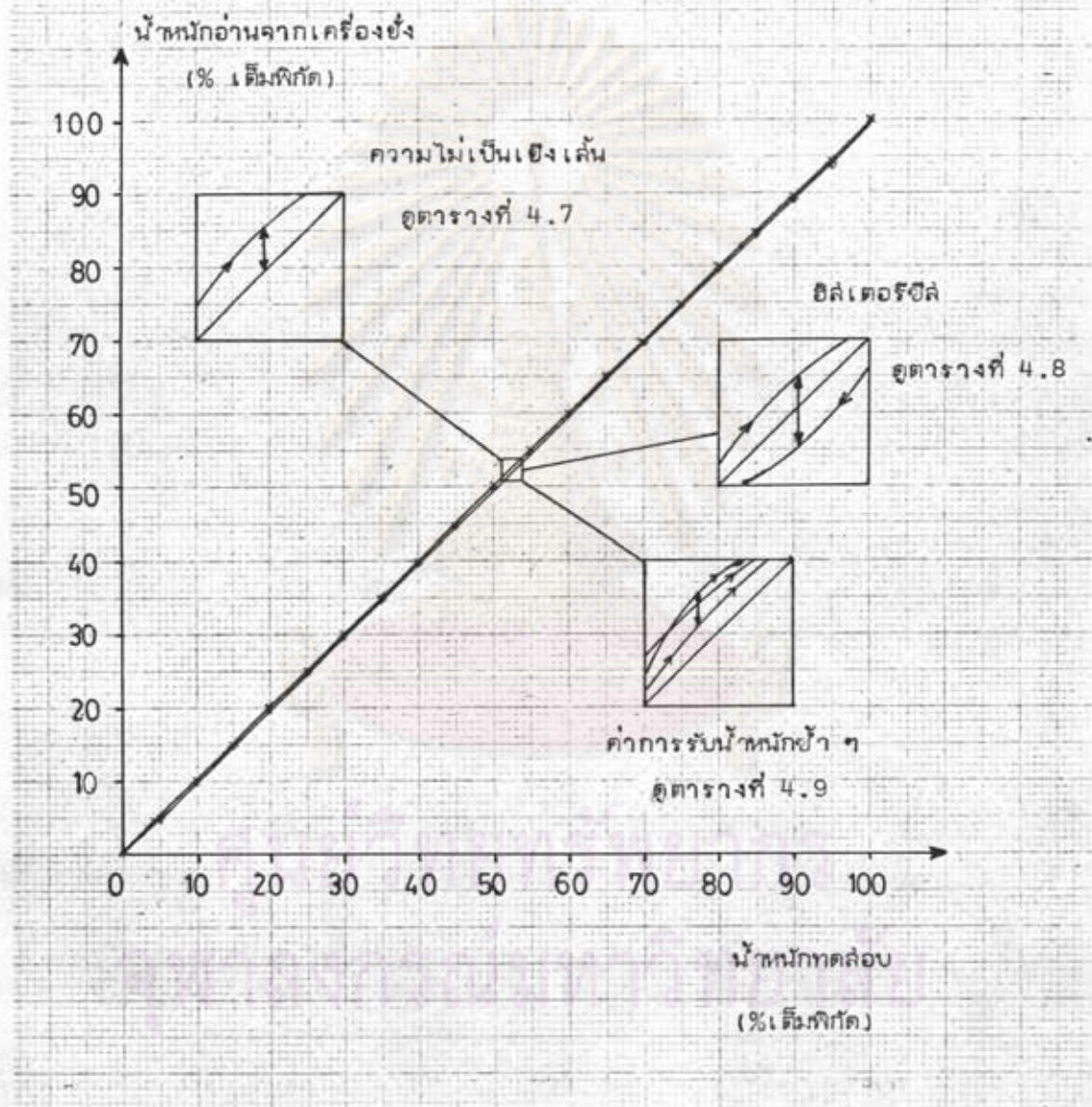
กราฟที่ได้จากการทดสอบมีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นตรงมาก จนไม่สามารถจะอ่านค่าความไม่เป็นเชิงเส้นจากกราฟได้ จึงต้องใช้วิธีการหาค่าผลต่างที่มากที่สุดระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทดสอบ ที่เป็นเส้นตรงกับเปอร์เซ็นต์ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่อ่านจากเครื่องยังอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อเพิ่มน้ำหนัก ซึ่งผลการคำนวณจะอยู่ในช่อง "NONLIN" ของตารางที่ จ.-1 ถึงตารางที่ จ.-12 ตัวอย่างของการคำนวณ โพลีเซลล์เบอร์ 1 เมื่อน้ำหนักเต็มพิกัด 20000 กก. จากตารางที่ จ.-1 ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นสูงสุดเท่ากับ $35.38 - 35.00 = 0.35\%$ เต็มพิกัด และค่าความไม่เป็นเชิงเส้นสูงสุดของโพลีเซลล์ทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลีเซลล์

น้ำหนัก เต็มพิกัด (กก.)	ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น (% เต็มพิกัด)					
	โพลีเซลล์ เบอร์ 1	โพลีเซลล์ เบอร์ 2	โพลีเซลล์ เบอร์ 3	โพลีเซลล์ เบอร์ 4	โพลีเซลล์ 4 อัน	โพลีเซลล์ KYOWA
5000	0.31	0.32	0.32	0.28	0.28	0.30
20000	0.38	0.38	0.36	0.35	0.33	0.38

ผลการทดสอบค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลีเซลล์ รวมทั้งของยี่ห้อ KYOWA ที่ผู้ผลิตแจ้งว่ามีความไม่เป็นเชิงเส้น $\pm 0.05\%$ เต็มพิกัด จะมีค่าใกล้เคียงกัน และมากกว่าที่กำหนดในข้อ 4.1 คือ $\pm 0.1\%$ เต็มพิกัด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจาก เครื่องมือทดสอบกำลังวัสดุที่ใช้ มีค่าความแม่นยำเพียง 1% และค่าที่อ่านจากหน้าปัด ซึ่งเป็นแบบเข็มก็ขยายเกินไป (20 และ 100 กก. ในการทดสอบ 5000 และ 20000 กก. เต็มพิกัดตามลำดับ)

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการทดสอบของโพลีเอทิลีนเบอร์ 1



เมื่อเทียบกับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอ่านได้ถึง 1 กก. สำหรับเหตุผลที่ต้องใช้เครื่องมือทดสอบนี้ก็เพราะยังไม่มีเครื่องมือทดสอบชนิดก่อนน้ำหนักคงที่ (Dead weight) ขนาด 20000 กก. ภายในประเทศ

ดังนั้นถ้าเปลี่ยนมาใช้โพลีเซลล์ยี่ห้อ KYOWA เป็นตัวอ้างอิงแทนจะสรุปได้ว่าค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลีเซลล์ทั้ง 4 อัน และเมื่อนำมาชานานกันจะมีค่าดีกว่าหรือเท่ากับ ± 0.05 % เต็มขีด ซึ่งจะดีกว่าที่กำหนดในข้อ 4.1 คือ ± 0.1 % เต็มขีด และโพลีเซลล์เบอร์ 4 จะมีความไม่เป็นเชิงเส้นน้อยที่สุด

4.6.2 ผลการทดสอบฮิสเตอรีซิส

การหาค่าฮิสเตอรีซิสก็เช่นเดียวกัน ใช้วิธีหาค่าผลต่างที่มากที่สุดระหว่างการเพิ่มน้ำหนักและลดน้ำหนักของค่าเฉลี่ย เมื่อใช้น้ำหนักทดสอบเท่าเดิม ผลการคำนวณจะอยู่ในช่อง "HYST." ของตารางที่ จ.-1 ถึง ตารางที่ จ.-12 ดังตัวอย่างของโพลีเซลล์เบอร์ 1 เมื่อทดสอบเต็มขีด 20000 กก. ในตารางที่ จ.-1 ค่าฮิสเตอรีซิสสูงสุดเท่ากับ 40.36-39.86 = 0.50 % เต็มขีด และค่าฮิสเตอรีซิสของโพลีเซลล์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบหาค่าฮิสเตอรีซิสของโพลีเซลล์

น้ำหนัก ทดสอบ (กก.)	ค่าฮิสเตอรีซิส (% เต็มขีด)					
	โพลีเซลล์ เบอร์ 1	โพลีเซลล์ เบอร์ 2	โพลีเซลล์ เบอร์ 3	โพลีเซลล์ เบอร์ 4	โพลีเซลล์ 4 อัน	โพลีเซลล์ KYOWA
5000	0.32	0.30	0.33	0.27	0.38	0.38
20000	0.50	0.48	0.44	0.45	0.47	0.52

ค่าฮิสเตอรีซิสของโพลีเซลล์ทั้งหมดในตารางที่ 4.8 จะมากกว่าที่กำหนดไว้ในข้อ 4.1 คือ ± 0.1 % เต็มขีด แต่ถ้าเปลี่ยนมาใช้โพลีเซลล์ยี่ห้อ KYOWA เป็นตัวอ้างอิงก็จะได้ว่าค่าฮิสเตอรีซิสของโพลีเซลล์ทั้ง 4 อัน และชานานกัน 4 อัน จะมีค่าดีกว่าหรือเท่ากับ 0.05 % เต็มขีด โดยโพลีเซลล์เบอร์ 4 จะมีค่าฮิสเตอรีซิสน้อยที่สุด

4.6.3 ผลการทดสอบการชั่งน้ำหนักซ้ำ ๆ

ค่าการชั่งน้ำหนักซ้ำ ๆ จะเป็นผลต่างที่มากที่สุด เมื่อทดสอบด้วยน้ำหนักเดียวกันหลาย ๆ ครั้ง เนื่องจากไม่สามารถหาจากกราฟได้ จึงต้องใช้การคำนวณแทน ดังแสดงในช่อง "REPEAT." ของตารางที่ จ.-1 ถึงตารางที่ จ.-12 และสามารถนำมาเขียนรวมได้ ดังตารางที่ 4.9

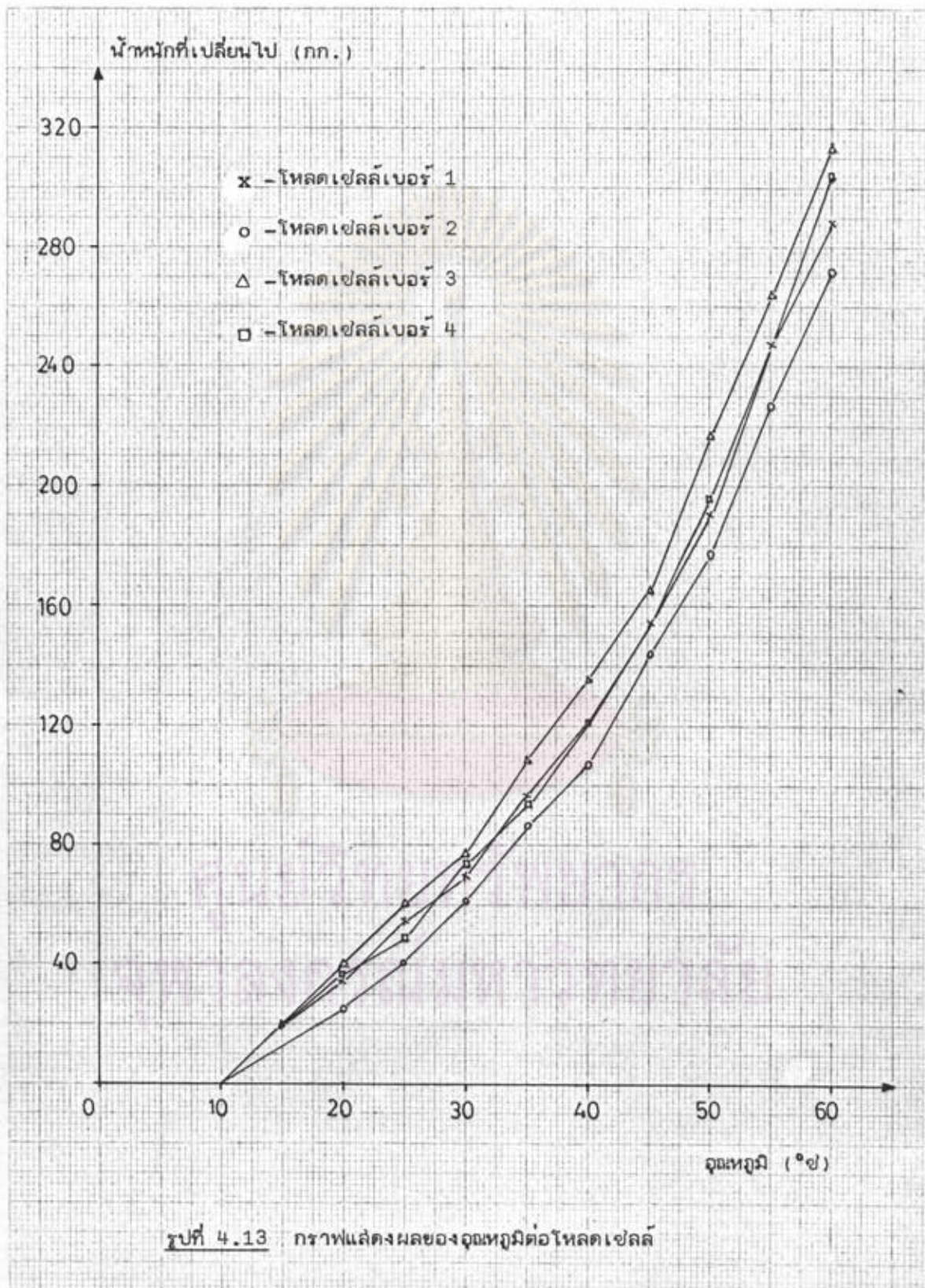
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ

น้ำหนัก ทดสอบ (กก.)	ค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ (% เต็มพิกัด)					
	โพลดเซลล์ เบอร์ 1	โพลดเซลล์ เบอร์ 2	โพลดเซลล์ เบอร์ 3	โพลดเซลล์ เบอร์ 4	โพลดเซลล์ 4 อัน	โพลดเซลล์ KYOWA
5000	0.08	0.10	0.08	0.09	0.05	0.09
20000	0.06	0.07	0.09	0.08	0.09	0.09

ค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ ของโพลดเซลล์ในตารางที่ 4.9 จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และมากกว่าที่กำหนดในข้อ 4.1 คือ ± 0.05 % เต็มพิกัด แต่ถ้าเปลี่ยนมาใช้โพลดเซลล์ยี่ห้อ KYOWA เป็นตัวอ้างอิง ก็จะสรุปได้ว่าค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ ของโพลดเซลล์ทั้ง 4 อัน และเมื่อขนานกัน 4 อัน มีค่าดีกว่าหรือเท่ากับ ± 0.05 % เต็มพิกัด

4.6.4 ผลการทดสอบผลของอุณหภูมิต่อการปรับศูนย์

ในการทดสอบ จะนำเอาโพลดเซลล์เข้าไปแช่ในตู้เย็น และปรับอุณหภูมิลงมาถึง 10°C . ปรับปุ่ม "ZERO" ของอินดิเคเตอร์ ให้อ่านได้ 0 กก. เริ่มปิดสวิตช์ตู้เย็นปล่อยให้จุดหมึกค่อย ๆ ลุ่งขึ้น จนเท่ากับจุดหมึกห้อง จึงนำออกมาใส่กล่องโลหะข้างนอก และใช้เครื่องเป่าผมเป่าให้จุดหมึกภายในค่อย ๆ ลุ่งขึ้นจนถึง 60°C . ข้อมูลการทดสอบโพลดเซลล์ทั้ง 4 อัน และขนานกัน 4 อัน แสดงไว้ในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ.-13 ถึงตารางที่ จ.-14 และนำมาเขียนเป็นกราฟ ได้ดังรูปที่ 4.13 ตัวอย่างการคำนวณของโพลดเซลล์เบอร์ 1 และจากตารางที่ จ.-13 มีดังนี้



$$\begin{aligned} \text{ผลของจุดหมุดต่อการปรับศูนย์} &= \frac{\text{น.น.ที่เปลี่ยนไป} \times 100}{\text{น.น.เดิมปกติ} \times \text{จุดหมุดที่เปลี่ยนไป}} \\ &= \frac{288 \times 100}{20000 \times 50} = 0.029 \text{ \% เต็มปกติ/°ซ} \end{aligned}$$

สำหรับโหลตเซลล์อื่นอื่น ๆ ก็คำนวณด้วยวิธีเดียวกัน และแสดงผลไว้ในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบผลของจุดหมุดต่อการปรับศูนย์

โหลตเซลล์	ผลของจุดหมุดต่อการปรับศูนย์ % เต็มปกติ/°ซ
เบอร์ 1	0.029
เบอร์ 2	0.027
เบอร์ 3	0.031
เบอร์ 4	0.030
ขนาดกัน 4 อัน	0.029

ผลของจุดหมุดต่อการปรับศูนย์ของโหลตเซลล์ ที่แสดงในตารางที่ 4.10 โหลตเซลล์เบอร์ 2 จะมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่เบอร์ 3 จะมีค่ามากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามทั้งหมดนี้ก็ถือว่าใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.1 คือ ± 0.05 % เต็มปกติ

4.6.5 ผลการทดสอบผลของจุดหมุดต่อความไว

ในการทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบ กตน้ำหนักบนโหลตเซลล์ให้เต็มปกติคือ 20000 กก. แล้วนำโหลตเซลล์ไปทำให้ร้อนถึง 60 °ซ โดยการเป่าด้วยเครื่องเป่าผม ใช้แผ่นใยแก้วห่อหุ้มโหลตเซลล์ไว้ ป้องกันความร้อนไม่ให้ระบายนอกตู้ภายนอก และนำไปปกติด้วยน้ำหนักเท่าเดิม ข้อมูลการทดสอบแสดงไว้ในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ.-18 ตัวอย่างการคำนวณของโหลตเซลล์เบอร์ 1 มีดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ผลของจุดหมุดต่อความไว} &= \frac{\text{ค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไป} \times 100}{\text{ค่าน้ำหนักเดิม} \times \text{จุดหมุดที่เปลี่ยนไป}} \\ &= \frac{(20250 - 19994) \times 100}{19994 \times 32} = 0.04 \text{ \% /ซ} \end{aligned}$$

โพลดเซลล์ที่เหลือก็คำนวณเช่นเดียวกัน และแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบผลของจุดหมุดต่อความไว

โพลดเซลล์	ผลของจุดหมุดต่อความไว % ต่อ °ซ
เบอร์ 1	0.040
เบอร์ 2	0.039
เบอร์ 3	0.043
เบอร์ 4	0.040
ขนานกัน 4 อัน	0.041

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.11 ผลของจุดหมุดต่อความไวของโพลดเซลล์ทุกอัน จะมีค่าต่ำกว่าที่ตั้งไว้ในข้อ 4.1 คือ 0.05 %/°ซ โพลดเซลล์เบอร์ 4 จะมีค่าน้อยที่สุด และ เบอร์ 3 จะมีค่ามากที่สุด

4.6.6 ผลการทดสอบความแม่นยำ

การคำนวณหาค่าความแม่นยำในการปรับแต่งของโพลดเซลล์ จะอาศัยผลจากการทดสอบหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลดเซลล์ และค่าความแม่นยำของโพลดเซลล์ KYOWA ที่นำมาเป็นตัวอ้างอิง จะได้

$$\begin{aligned}
 \text{ความแม่นยำของโพลดเซลล์ทั้งหมด} &= \text{ความแม่นยำของตัวอ้างอิง} \\
 &+ \text{ความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลดเซลล์} \\
 &= \pm 0.1 + (\pm 0.05) \% \text{ เต็มพิกัด} \\
 &= \pm 0.15 \% \text{ เต็มพิกัด}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นความแม่นยำของโพลดเซลล์ทั้ง 4 อัน และเมื่อนำมาขนานกัน 4 อัน จะมีค่า 0.15 % เต็มพิกัด

4.6.7 ผลการทดสอบแรงดันออกสูงที่สุดของโหนดเซลล์

ในการทดสอบหาค่าแรงดันออกสูงที่สุดของแต่ละโหนดเซลล์ จะนำเอาสัญญาณออกของแต่ละโหนดเซลล์ต่อเข้ากับภาคปรับสัญญาณโดยตรง ไม่ต้องผ่านการลดความไวในกล่องรวมสัญญาณ แล้วนำโหนดเซลล์ไปทดสอบด้วยน้ำหนัก 20 ตัน ปรับอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณ และอัตราการรับทอนสัญญาณของ "SPAN" รวมแล้วเท่ากับ 110 เท่า จะได้แรงดันออกของโหนดเซลล์ดังนี้

โหนดเซลล์เบอร์ 1	=	1.8286	โวลท์
โหนดเซลล์เบอร์ 2	=	1.8458	โวลท์
โหนดเซลล์เบอร์ 3	=	1.8312	โวลท์
โหนดเซลล์เบอร์ 4	=	1.8657	โวลท์

เนื่องจากแรงดันไฟตรงที่ป้อนโหนดเซลล์เท่ากับ 12.046 โวลท์ เพราะฉะนั้นจะคำนวณแรงดันออกจากโหนดเซลล์แต่ละอันดังนี้

โหนดเซลล์เบอร์ 1	=	$\frac{1.8286}{110 \times 12.046}$	=	1.380	มิลลิโวลท์/โวลท์
โหนดเซลล์เบอร์ 2	=	1.393			มิลลิโวลท์/โวลท์
โหนดเซลล์เบอร์ 3	=	1.382			มิลลิโวลท์/โวลท์
โหนดเซลล์เบอร์ 4	=	1.408			มิลลิโวลท์/โวลท์

โหนดเซลล์ทั้ง 4 อันที่สร้างขึ้น จะมีค่าแรงดันออกสูงที่สุดที่น้ำหนักเต็มหนักมากกว่าที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.1 คือ 1 มิลลิโวลท์/โวลท์

4.7 ข้อสรุปในการออกแบบโหนดเซลล์

จากการออกแบบและทดสอบโหนดเซลล์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถนำมาสรุปเป็นข้อสำคัญในการออกแบบโหนดเซลล์ดังนี้

4.7.1 ในการเลือกรูปร่างของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก ซึ่งจะมีผลต่อความไวของโหนดเซลล์ จะพิจารณาจากพื้นที่รับน้ำหนักสูงที่สุดของโหนดเซลล์ ดังนี้

1. แบบคานไฮ้ในช่องน้ำหนัก 20 กก. ถึง 500 กก.
2. แบบวงแหวนไฮ้ในช่องน้ำหนัก 200 กก. ถึง 2 ตัน
3. แบบคอสัมมิไฮ้ในช่องน้ำหนัก 2 ตัน ถึง 1000 ตัน

4.7.2 ชนิดของโลหะที่ใช้ทำชิ้นส่วนรับน้ำหนัก ควรจะเป็นโลหะที่มีกำลังรับน้ำหนักสูง เพื่อให้ได้ค่าความไวของโพลตเซลล์สูง และออกแบบค่าความเค้นใช้งานไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเค้นจุดคลากจะทำให้ได้ค่าความไม่เชิงเส้น ค่าฮิสเตอร์ซิส และค่าการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ มีค่าน้อย

4.7.3 ในการเลือกโลหะประเภทความต้านทานนั้น ให้เลือกค่าความต้านทานสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อลดค่าความร้อนที่จะเกิดขึ้น และเลือกชนิดของโลหะที่มีค่าการยืดหยุ่นจุดหนุมิตด้วยตัวเอง ตามชนิดของโลหะที่ใช้ทำชิ้นส่วนรับน้ำหนัก

4.7.4 การเลือกชนิดของกาวให้พิจารณาถึงอายุการใช้งาน และช่วงอุณหภูมิใช้งานของโพลตเซลล์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย