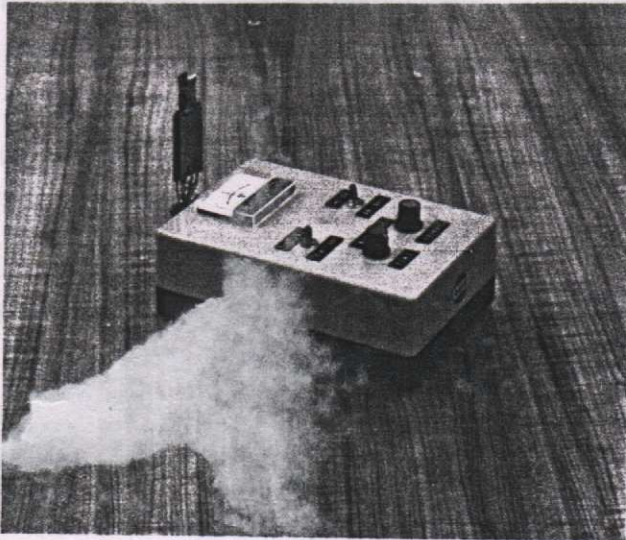


รายงานการวิจัย

เรื่อง

อุปกรณ์วัดแรงหนีบ scalp clip*

Scalp Force Measurement Apparatus



โดย

สุธีระ ประเสริฐสุวรรณ Ph.D.

ประการ ครูทงษา Dr.Ing.

อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์ วศ.บ.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

กันยายน 2533

ด.พอ.

เลขหมู่ RD63 / 43 2533
 เลขทะเบียน 015336 # 15795
 - 5 ต.ค. 2533

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 วิทยาเขตปัตตานี
 ๕๕๖ พ.ท. ๗๖๓๗ ม.๖๓ ๕ ต.ปัตตานี

* งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ในโครงการนักวิจัยใหม่ 2532

ดิมะ - อุปกรณ์วัดแรงหนีบ

บทคัดย่อ

ได้ออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดแรงหนีบของที่หนีบหนังศีรษะขณะผ่าตัด โดยมีจุดประสงค์ เพื่อ
เปรียบเทียบแรงหนีบของที่หนีบแบบใหม่ ซึ่งดัดแปลงมาจากที่หนีบกระดาษกับที่หนีบที่ใช้ในทางการแพทย์
อุปกรณ์สำหรับวัดประกอบด้วยคานคู่ปลายยึดทำหน้าที่รับการหนีบ และแรงวัดโดยเกจความเครียด
ซึ่งต่อแบบ full bridge วงจรเกจความเครียดถูกกระตุ้นด้วยความต่างศักย์ 2.5 V และสัญญาณ
ถูกขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณ และแสดงผลโดยมิเตอร์วัดกระแส ผลการเปรียบเทียบ พบว่า อุปกรณ์
วัดนี้มีสมรรถนะดี โดยมีความไม่เชิงเส้นและ hysteresis น้อยกว่า 1% FS

Abstract

An apparatus for measuring scalp clip force was designed and
manufactured to be used as force calibrator for paper clips. The paper
clips are modified to substitute the expensive commercial clips. The
apparatus employed the principle of double cantilever beam . Strain of
the beams at the clamped end was measured by strain gauges (full
Wheatstone bridge). The bridge was excited by 2.5 DCV. The signal was
amplified and displayed by an ammeter. The calibration revealed an
appreciate performance with combined nonlinearity and hysteresis of
less than 1% FS.

สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
คำนำ	ข
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
1. ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.1 จุดเริ่มต้นของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 แนวทางการวิจัย	4
1.4 สรุป	4
2. การออกแบบทางกล	5
2.1 ความนำ	5
2.2 ลักษณะที่ต้องการของ transducer และวัสดุที่ใช้	5
2.3 การคำนวณเพื่อออกแบบ	6
2.4 การตัดแปลงปากหนีบ	7
2.5 สรุป	10
3. การออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์	11
3.1 ความนำ	11
3.2 หลักการของเกจความเครียด	11
3.3 วงจร Wheatstone bridge	11
3.4 วงจรอ่านสัญญาณ และแสดงผล	14
3.5 สรุป	16
4. สมรรถนะของเครื่อง	17
4.1 ความนำ	17
4.2 การปรับเทียบ	17
4.3 การตอบสนองของอุปกรณ์วัดจากการปรับเทียบ	17
4.4 แรงของที่หนีบกระดาษ และผลของการตัดแปลงปากหนีบ	20
5. สรุปและวิจารณ์ผล	21
ภาคผนวก การใช้เครื่องมือ	22
เอกสารอ้างอิง	25

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1	การตอบสนองต่อแรงมาตรฐาน	10
ตารางที่ 4.2	แรงของที่นั่งกระดาน	20

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	Raney scalp clip	2
รูปที่ 1.2	Children's hospital scalp clip	2
รูปที่ 1.3	Paper clip ที่ัดดแปลงใช้งาน	3
รูปที่ 2.1	การออกแบบคานคู่ปลายยึด สำหรับเป็น force transducer	8
รูปที่ 2.2	Force transducer ที่สร้างขึ้น	9
รูปที่ 2.3	คีมปากกนกแก้วที่ัดดแปลงเพื่อขึ้นรูปปากที่หนีบ และที่หนีบกระดาษที่ัดดแปลงแล้ว	9
รูปที่ 3.1	วงจร Wheatstone bridge	12
รูปที่ 3.2	วงจรสมมูลย์	15
รูปที่ 3.3	วงจรขยายสัญญาณ	15
รูปที่ 4.1	การปรับเทียบแรง	18
ผ - 1	กราฟการปรับเทียบ	24

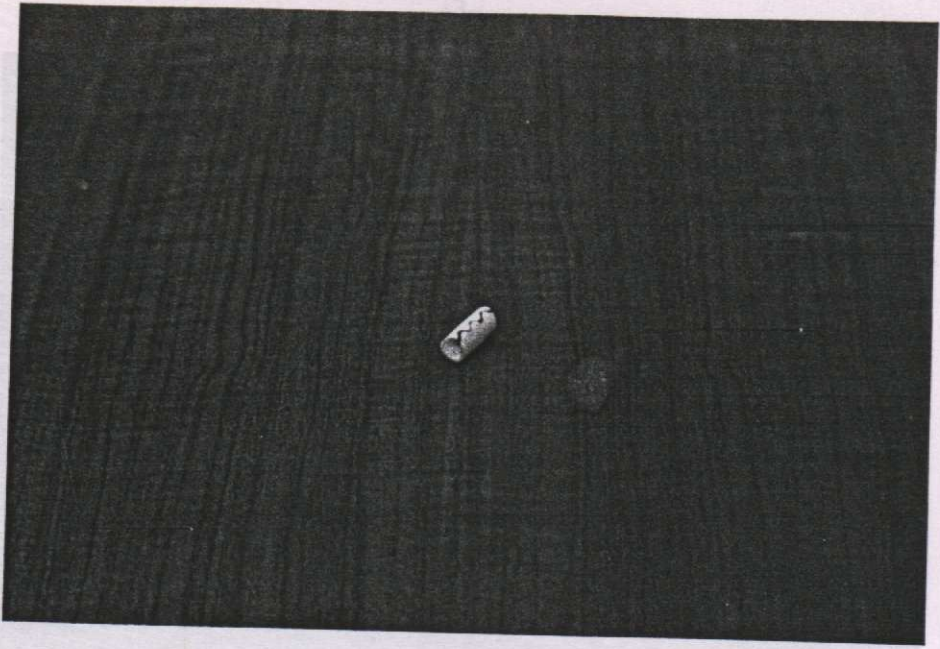
ความเป็นมาของงานวิจัย

1.1 จุดเริ่มต้นของงานวิจัย

ในการผ่าตัดเปิดกระดูกต้องใช้ที่หนีบทันศีรษะ (scalp clip) เพื่อห้ามเลือด และป้องกันการสูญเสียเลือดระหว่างการผ่าตัด ที่หนีบทันศีรษะที่ใช้อยู่ทั่วไป มีอยู่สองชนิด คือ Raney scalp clip และ Children's hospital scalp clip ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และ 1.2 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ต่างประเทศ และมีราคาแพง อีกทั้งอายุการใช้งานสั้น⁽¹⁾ จึงได้มีความพยายามคิดแปลงที่หนีบกระดาษ (paper clip) ในรูปที่ 1.3 เพื่อใช้งานแทนที่หนีบกระดาษดังกล่าว ถึงแม้จะมีราคาถูก (ราคา 20% และ 4% เมื่อเทียบกับ Raney และ Children's hospital clip ตามลำดับ) แต่ก็ไม่ทราบค่าแรงหนีบ การใช้งานที่ผ่านมา จึงต้องปรับเทียบแรงหนีบในลักษณะสัมพัทธ์ (relative calibration) กับ Raney และ Children's hospital clip โดยใช้การบีบลำน้ำในสายน้ำเกลือ แล้วเปรียบเทียบกับความสูงของลำน้ำ ถ้าลำน้ำขึ้นสูงมาก แปลความหมายว่ามีแรงบีบมาก จากการทดลองเพื่อใช้งานดังกล่าว พบว่าที่หนีบกระดาษ สามารถบีบลำน้ำได้สูง 2-3 เท่าของ Raney และ Children's hospital clip ดังนั้น ในการใช้งานจึงต้องตัดทาสบริงของที่หนีบกระดาษให้สั้นลง และทดลองบีบลำน้ำใหม่ จนได้ความสูงลำน้ำตามต้องการ ที่หนีบกระดาษที่ตัดแปลงแล้ว ใช้งานได้ดีในการผ่าตัดสมองของผู้ป่วยไม่ต่ำกว่า 20 ราย⁽¹⁾

อย่างไรก็ตาม การตัดแปลงที่หนีบกระดาษ ยังต้องการเครื่องมือสำหรับวัดแรงที่ถูกต้อง เพื่อทำการปรับเทียบอย่างสัมบูรณ์ (absolute calibration) ได้ นอกจากนั้นสายยางเมื่อใช้ไปนาน ๆ จะอ่อนตัว เนื่องจากความล้า ทำให้การปรับเทียบขาดความแม่นยำ

การปรับเทียบอย่างสัมบูรณ์ ยังให้ขนาดแรงหนีบ ซึ่งมีประโยชน์ในการวิจัยทางการแพทย์ อีกต่อไปได้ เช่น การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงหนีบกับการบอบซ้ำของเนื้อเยื่อ, ความสามารถห้ามเลือด และการหายของแผลได้

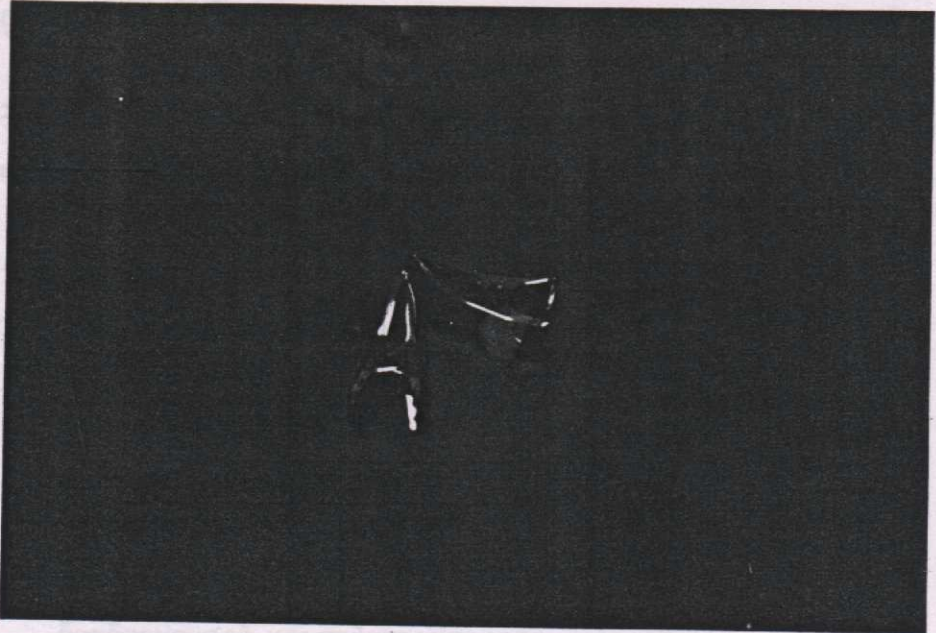


រូប 1.1 Raney scalp clip

រូប 1.3 Paper clip ក្រណាត់



រូប 1.2 Children's hospital scalp clip



รูปที่ 1.3 Paper clip ที่ดัดแปลงใช้งาน

1.2 วัสดุ
 ชนิดต่าง
 คุณสมบัติ
 1.3 วัสดุ
 1.4 วัสดุ

วัสดุของ
 และเป็น

คุณสมบัติของวัสดุ และคุณสมบัติของวัสดุ จะพิจารณาจากคุณสมบัติทางเคมี (chemical design) และการออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ (electronic design) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้เป็นวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้ เช่น วัสดุประเภท plastic และแก้วความเครียด (strain gauge) การออกแบบได้เลือกใช้แก้วความเครียดเพราะสามารถรับแรงดึงและสามารถแสดงค่าเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ โดยผ่านวงจร bridge ที่ใช้กับเครื่องวัด นอกจากนี้ แก้วความเครียดสามารถติดตั้งกับตัวกลางวงจรวัด โดยไม่จำเป็นต้องใช้สายไฟ และขนาด

1.4 วัสดุ

วัสดุของวัสดุจะสามารถทนทานต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ การรับแรงดึงได้ และมีสมบัติทางเคมีที่คงที่ของวัสดุทางกายภาพ ทำให้ไม่ปรากฏความเครียดที่แท้จริง วัสดุที่เลือกใช้กับวัสดุประเภทนี้สามารถรับแรงดึงได้ โดยการขยายความยาวทางเครื่องวัดแบบไฟฟ้า ซึ่งจะได้ผลการวัดที่แม่นยำยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ปรับแต่ง และวัดแรงหนีบของที่หนีบทันทีชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางใช้ที่หนีบกระดาษทดแทนที่หนีบจากต่างประเทศ และเป็นอุปกรณ์ประกอบการวิจัยทางการแพทย์ได้

1.3 แนวทางการวิจัย

1.3.1 คุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ต้องการ

- ก. ใช้งานสะดวก
- ข. แสดงผลเป็นสัญญาณไฟฟ้า
- ค. ขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายได้
- ง. ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่แห้ง

1.3.2 มโนทัศน์การออกแบบ

ด้วยวัตถุประสงค์ และคุณลักษณะที่ต้องการ จึงต้องรวมการออกแบบทางกล (mechanical design) และการออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน วัสดุตรวจวัดแรง จึงต้องสามารถเปลี่ยนแรงกลให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ วัสดุตรวจวัดที่มีความสามารถเช่นนี้ ได้แก่ ผลึก piezoelectric และเกจความเครียด (strain gauge) การออกแบบนี้ ได้เลือกใช้เกจความเครียดเพราะหาซื้อง่าย, ราคาไม่แพง และสามารถแสดงผลเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ โดยผ่านวงจร wheatstone bridge ที่รู้จักกันดี นอกจากนั้น เกจความเครียดสามารถติดตั้งบนตัวกลางตรวจวัด โดยไม่จำกัดรูปร่าง และขนาด

1.4 สรุป

ที่หนีบทันทีชนิดนี้สามารถทดแทนด้วยที่หนีบกระดาษราคาถูก ในอดีตที่ผ่านมา การปรับเทียบยังใช้วิธีสัมพันธ์กับที่หนีบทันทีชนิดทางการแพทย์ ทำให้ไม่ทราบค่าแรงที่แท้จริง อุปกรณ์เพื่อปรับเทียบสัญญาณสามารถสร้างได้ โดยการผสมความรู้ทางเครื่องกลและไฟฟ้า ซึ่งจะได้นำผลการออกแบบในบทต่อไป

การออกแบบทางกล

2.1 ความนำ

ในการเปลี่ยนค่าทางกายภาพ (ในที่นี้ คือ แรง) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ต้องการตัวกลางในการสื่อสารแปลค่ากายภาพนั้น ให้เหมาะสมแก่วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ตัวกลางที่ทำหน้าที่เช่นนี้ คือ transducer ซึ่งต้องให้ความรู้ทางวิศวกรรมเครื่องกล ในการออกแบบ และสร้าง ในบทนี้ จึงจะเสนอการคำนวณ ออกแบบ และสร้าง transducer วัดแรงทึง

2.2 ลักษณะที่ต้องการของ Transducer และวัสดุที่ใช้

เพื่อให้การวัดมีความถูกต้อง ตัว transducer จะต้องมีลักษณะ ดังนี้

ก. มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน และการคืบ (creep) ต่ำ

ข. มีคุณสมบัติเชิงเส้น (linearity) ดี

ค. มี hysteresis ต่ำ

ง. ขึ้นรูปได้ง่าย โดยไม่มี work hardening มาก

คุณลักษณะทั้งหลายนี้ ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำ, ตัวเกจความเครียด และวัสดุเชื่อมประสาน (adhesive) ระหว่างเกจความเครียด และวัสดุ

เกจความเครียด และวัสดุประสาน เป็นองค์ประกอบที่ควบคุมยาก เพราะต้องซื้อ แต่ก็สามารถเลือกหาที่เหมาะสมได้ในการออกแบบนี้ เลือกใช้ผลิตภัณฑ์ของ Tokyo Sokki Kenkyujo แห่งประเทศญี่ปุ่น โดยเลือกเกจความเครียดแบบ FLA-5 และ adhesive แบบ P-2

ดังนั้น คุณสมบัติที่ต้องการทั้งหลาย ส่วนมากจะถูกควบคุมโดยวัสดุที่นำมาทำ transducer สำหรับการออกแบบนี้ เลือกใช้เหล็กไร้สนิม เบอร์ 316

2.3 การคำนวณเพื่อออกแบบ

2.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบ

ข้อมูลเบื้องต้นที่ต้องการทราบสำหรับการออกแบบ คือ แรงหนีบของ scalp clip การแพทย์ และความหนาของกาวหนีบ (แรงหนีบแปรตามความหนา) จากการสอบถามแพทย์ ผู้ใช้งานทราบว่าความหนาของหนังศีรษะ ประมาณ 5 มิลลิเมตร จึงทำการวัดแรงหนีบของ scalp clip ที่ระยะถ่าง 5 มม. โดยใช้ลวดตะขอมและตาซึ่งสปริงแบบดึงอ่านค่า ผลการทดลองพบว่า Rayney clip มีแรงหนีบ 15.3 นิวตัน และ Children's hospital clip มีแรงหนีบ 4.9 นิวตัน ดังนั้น ในการออกแบบจึงให้อุปกรณ์สามารถรับแรงได้ไม่ต่ำกว่า 15 นิวตัน

2.3.2 หลักการเกิดความเครียดในวัสดุตัวกลาง

หลักการออกแบบ transducer คือ ให้แรงหนีบทำให้เกิดความเครียดในวัสดุตัวกลาง ซึ่งมีวิธีการได้หลายวิธี อาทิ เช่น ความเครียดจากการโค้งงอ (bending), ความเครียดตรงแบบดึงหรือกด (direct stress, tensile or compressive) และความเครียดเฉือน ในบรรดาความเครียดชนิดต่าง ๆ นี้ ความเครียดโค้งงอเหมาะที่สุด ด้วยสาเหตุต่อไปนี้

ก. เป็นความเครียดจากการโค้งงอของคาน ซึ่งสร้างให้อยู่ในรูปร่างรับการหนีบได้ง่าย

ข. เป็นความเครียดที่สามารถขยายขนาดได้ตามต้องการ โดยการขยายความยาวและ/หรือลดขนาดของคาน

ค. การโค้งงอของคานให้ความเครียดที่ผิวทั้งสองข้างมีขนาดเท่ากัน แต่ต่างชนิดกัน คือ ทั้งดึงและกด ซึ่งเหมาะสำหรับการต่อ wheatstone bridge

ง. ด้วยลักษณะของการหนีบ ทำให้สามารถออกแบบอุปกรณ์เป็นแบบคานคู่ปลายยึด (double cantilever beam) ได้ซึ่งเป็นผลให้สามารถต่อวงจรแบบ full bridge ได้ ทำให้ได้สัญญาณเพิ่มขึ้น และสะดวกแก่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ด้วย

ดังนั้นหลักการออกแบบ transducer คือ คานคู่ปลายยึด ดังจะแสดงในหัวข้อต่อไป

2.3.3 การคำนวณ

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ มีดังนี้ ⁽²⁾

Modulus of elasticity (E) 193 GPa

Yield stress (σ_y) 262 MPa

Poisson's ratio (ν) 0.3

ดังนั้น ความเครียดที่จุดคราก, $\epsilon_y = \sigma_y / E$

$$= 1357 \times 10^{-6}$$

ในการออกแบบกำหนดให้วัสดุตัวกลางมีความเครียดสูงสุด 700×10^{-6} สำหรับที่หนีบแบบ Raney (ค่าความปลอดภัย = 1.94) ซึ่งเป็นความเครียดที่วัสดุอยู่ในช่วง elastic และมีความเครียดมากพอสำหรับการตรวจจับ

กำหนดให้ ระยะแขนโมเมนต์ของคานที่ตำแหน่งติดเกจ มีความยาว 60 มม. ดังนั้น จะหาขนาดพื้นที่หน้าตัดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{โมเมนต์สูงสุด} &= 60 \times 10^{-3} \times 15.3 \\ &= 918 \times 10^{-3} \text{ N-๓} \end{aligned}$$

สำหรับพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมกว้าง b สูง h

$$\text{ความเค้น } (\delta) = 6M/bh^2$$

$$\text{ดังนั้น } 262 \times 10^6 / 1.94 = 6 \times 918 \times 10^{-3} / bh^2$$

$$bh^2 = 408 \times 10^{-8} \text{ ๓}^3$$

ถึงแม้ที่หน้ามีความกว้าง 15 มม. แต่ในการติดเกจความเครียดไม่ต้องการพื้นที่กว้าง เช่นนี้ เพื่อให้ได้ความเครียดที่มากพอ จึงลดความกว้างของพื้นที่ที่จะติดเกจลงเหลือ 6 มม. ซึ่งพอดีสำหรับเกจ 1 ตัว ที่กว้าง 3 มม. (มีขอบเหลือข้างละ 1.5 มม.)

$$\text{ดังนั้น } h = 2.6 \text{ มม.}$$

การออกแบบแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2

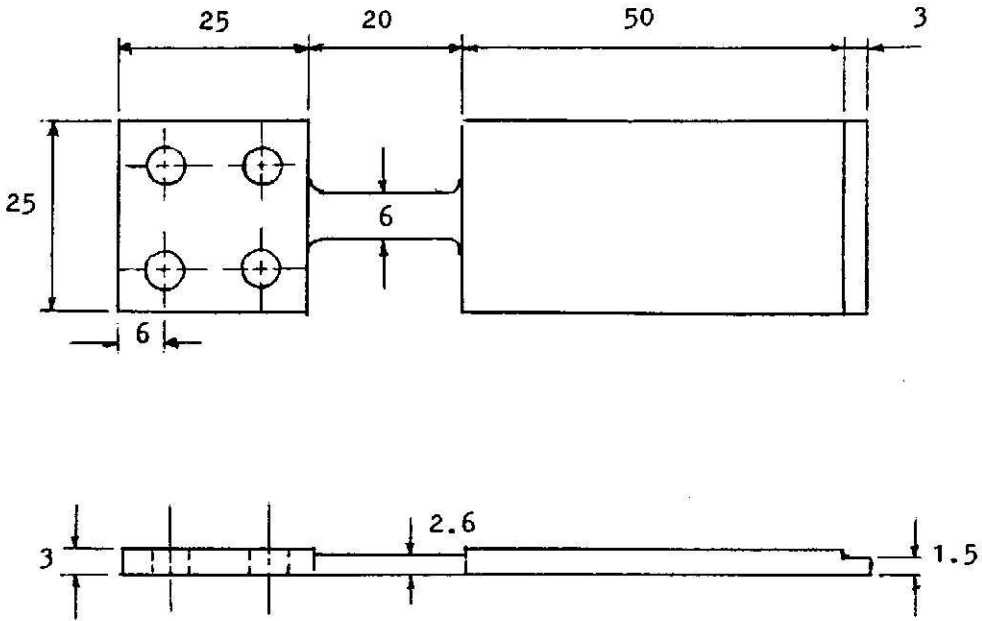
2.4 การดัดแปลงปากทึบ

ปากทึบของที่ทึบกระดาษเป็นแผ่นเรียบกว้างประมาณ 1.5 มม. ยาว 15 มม. ปากทึบ ลักษณะนี้ไม่สามารถยึดจับได้ดีทำให้สิ้นเปลืองขณะผ่าตัดได้ ลักษณะปากทึบที่ถูกต้องคือปากแบบรอยหยัก หรือมีซี่ขาว ตามแบบของ Raney และ Children's hospital ตามลำดับ ถึงแม้การดัดแปลงปากทึบจะ ไม่อยู่ในขอบข่ายการวิจัยนี้ แต่เพื่อความสมบูรณ์จึงได้พยายามหาทางดัดแปลงปากทึบไว้ด้วย

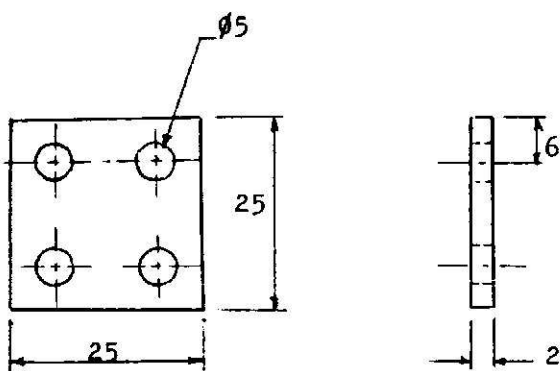
จากการวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างพบว่าการใช้ซี่ขาวแบบ Children's hospital นั้น ไม่เหมาะสม เพราะผลึกยาก และต้องตัดเนื้อเหล็ก ทำให้เปิดเนื้อเหล็กสู่อากาศ อันจะเป็นเหตุให้เกิดสนิมได้ง่าย ดังนั้น การดัดแปลงจึงอาศัยรูปทรงปากทึบของที่ทึบแบบ Raney เป็นหลัก ซึ่งมีลักษณะปากดังรูป 1.1

การดัดแปลงที่เหมาะสม คือใช้แรงอัดโดยมีกระสวยที่เหมาะสม ในบรรดาเครื่องกำเนิดแรงอัดทั้งหลายที่มีอยู่ล้วนแต่มีขนาดใหญ่ และใช้ยุ่งยาก ในการวิจัยนี้ จึงได้ดัดแปลง คีมปากทึบแก้ว โดยเจียรปากให้หยักมีลักษณะขบกันดังรูปที่ 2.3

การทดลองพบว่า ประสิทธิภาพสำเร็จอย่างสมบูรณ์ คือ ได้ที่ทึบมีลักษณะหยักเช่นเดียวกับแบบ Raney (รูปที่ 2.3) โดยที่โลหะกันสนิมที่เคลือบไว้ไม่ได้กระเทาะหรือสิ้นเปลือออก แรงกดถึงแม้จะแรงพอที่ทำให้เกิด plastic deformation แต่ก็ได้เป็นรอยลักษณะจะให้เหล็กภายในสัมผัสกับอากาศซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมได้



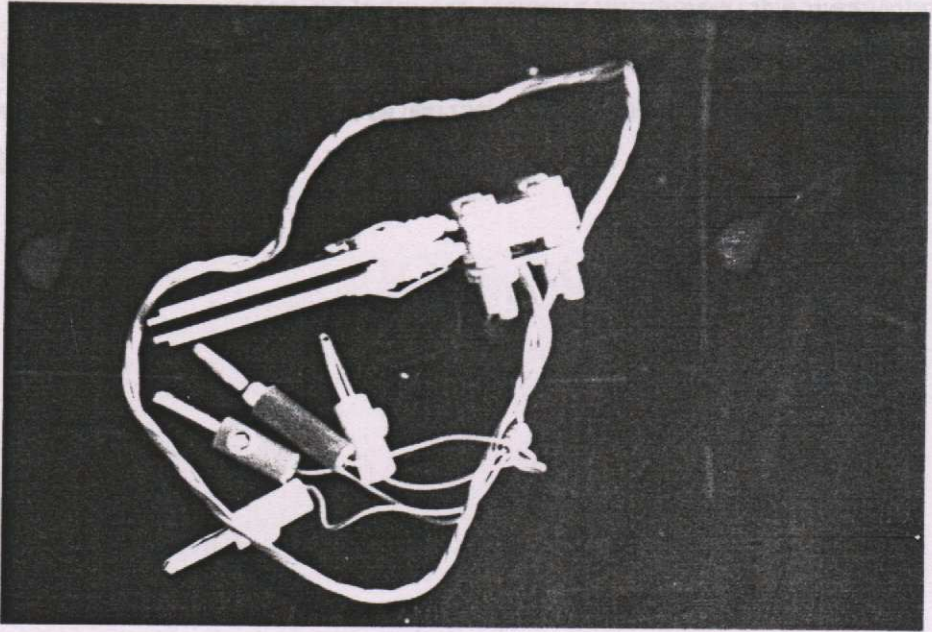
QTY : 2



QTY : 1

หน่วยเป็น มม.
วัสดุเหล็กโรสนิม 316

รูปที่ 2.1 การออกแบบคานกึ่งปลายยึดสำหรับเป็น force transducer



รูปที่ 2.2 Force transducer ที่สร้าง



รูปที่ 2.3 คีมปากนกแก้วที่ติดตั้งเพื่อชนรูปปากที่หนัก
และที่หนักกระดาศที่ถูกติดตั้งแล้ว

2.5 สรุป

ด้วยการออกแบบทางกล ทำให้สามารถได้ที่วัดแรงหนีบลักษณะเป็นคานคู่ชนิดปลายยึดโดยมีความกว้างเพียงพอสำหรับปากหนีบ และพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับติดเกจความเครียดได้ ปากที่หนีบสามารถดัดแปลงให้มีลักษณะชนที่ที่เหมาะสมได้โดยง่าย เพียงแต่อาศัยแรงหนีบของคีมปากนกแก้วที่ผ่านการเจียรให้มีรูปร่างที่ต้องการ

การออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์

3.1 ความนำ

การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วย สองส่วนหลัก คือ ส่วนที่เป็น bridge ของเกจความเครียดและส่วนที่เป็นวงจรขยายสัญญาณจากเกจความเครียด ในบทนี้จะเสนอการออกแบบทั้งสองส่วน

3.2 หลักการของเกจความเครียด

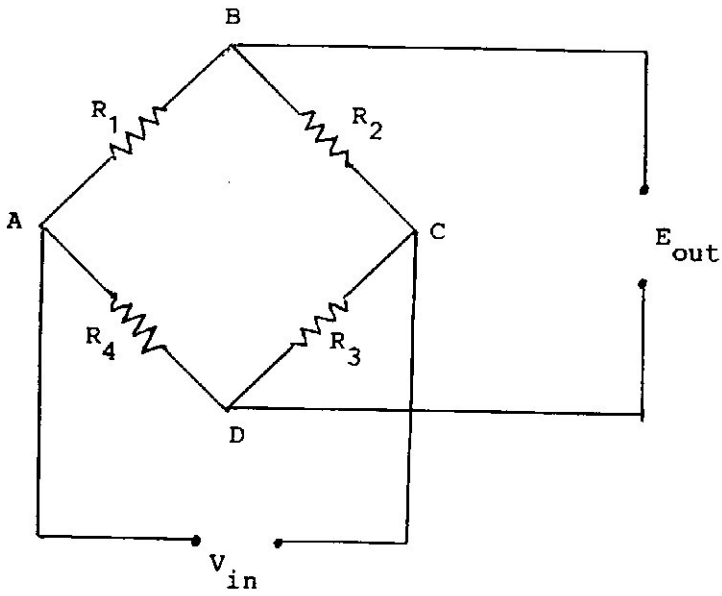
เกจความเครียดคือ ลวดความต้านทานขนาดเล็กที่อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งโดยมากเป็นแผ่นบาง ๆ (foil) วัสดุที่ใช้ทำเกจความเครียดคือ โลหะผสมนิเกิล และทองแดง ติดอยู่บน carrier ซึ่งส่วนมากเป็นสารโพลีเมอร์ เช่นพลาสติก, โพลีเอสเตอร์ ลวดความต้านทานจะมีความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อถูกยึดออกและความต้านทานลดลงเมื่อรับแรงกด ด้วยเหตุนี้ เราจึงใช้เกจความเครียดมาประยุกต์เพื่อวัดค่าเชิงกลอื่น ๆ (ที่ทำให้เกิดความเครียดในโลหะ) เช่น อุณหภูมิ, แรง, แรงบิดและความดันได้ โดยผ่านวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสม เช่น wheatstone bridge

3.3 วงจร wheatstone bridge

วงจร wheatstone bridge เป็นที่รู้จักกันดีในระบบเครื่องวัดที่ใช้เกจความเครียด โดยมีการต่อตัวต้านทาน ดังรูปที่ 3.1

ความต่างศักย์คร่อม R_1 หาได้ดังนี้

$$V_{AB} = V \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$$



3.1 wheatstone bridge

ในทำนองเดียวกัน $V_{AD} = V \cdot R_4 / (R_3 + R_4)$

และ $E = V_{AB} - V_{AD}$

$$\text{ดังนั้น } E = V \cdot (R_1 R_3 - R_2 R_4) / \{(R_1 + R_2) (R_3 + R_4)\} \quad (1)$$

เมื่อความต้านทานมีการเปลี่ยนค่าเป็น $R + \Delta R$ จะได้

$$E = V \cdot R_1 R_2 (\Delta R_1 / R_1 - \Delta R_2 / R_2 + \Delta R_3 / R_3 - \Delta R_4 / R_4) / (R_1 + R_2)^2 \quad (2)$$

สมการ (1) แสดงให้เห็นว่า $E = 0$ ถึง $R_1 R_3 = R_2 R_4$ และสมการ (2) แสดงถึงค่าของ E เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไปตามความเครียดที่เกิดขึ้นความชัน (slope) ของการพลอตกราฟระหว่าง E และความเครียด (ϵ) คือ circuit sensitivity, S_c

$$S_c = V \cdot R_1 R_2 (\Delta R_1 / R_1 - \Delta R_2 / R_2 + \Delta R_3 / R_3 - \Delta R_4 / R_4) / \{(R_1 + R_2)^2\} \quad (3)$$

โดยปกติแล้ว $R_1 \rightarrow R_4$ คือ เกจความเครียดที่มีความต้านทานเท่ากัน (เช่น 120 Ω หรือ 350 Ω) และการออกแบบ transducer มักจะให้ ΔR ของทุกความต้านทานมีค่าเท่ากันโดย R_1 และ R_3 มีทิศทางต่างกับ R_2 และ R_4 (เช่นกรณีของ bending) จะได้

$$S_c = nV\Delta R / 4\epsilon R \quad (4)$$

เมื่อ n คือ จำนวน active gauge (เกจที่มีความเครียด)

$$S_c = nV S_g / 4 \quad (5)$$

เมื่อ S_g คือ Gauge factor = $\Delta R / R \epsilon$ เป็นค่าซึ่งปรับเทียบมาจากโรงงาน และให้มาพร้อมกับเกจความเครียด

$$\text{ดังนั้น } E = n S_g \epsilon V / 4 \quad (6)$$

ในการออกแบบนี้ ใช้เกจความเครียด 4 เกจ (full bridge) โดยคานยึดแต่ละอันจะมีเกจ 2 ตัวรับความเครียดดึงและความเครียดกด ดังนั้น

$$E = S_{\mu} \epsilon V \tag{7}$$

ค่า S_{μ} และ V เป็นค่าคงที่ ดังนั้น สัญญาณที่ได้ (E) จะแปรผันเชิงเส้นกับความเครียด ในการออกแบบนี้ $S_{\mu} = 2.13$ และ $V = 2.5$ Volt ดังนั้น

$$E = 5.325 \epsilon \text{ Volt} \tag{8}$$

และในการออกแบบความเครียดสูงสุด (บทที่ 2) คือ $700 \times 10^{-6} \epsilon$ สำหรับแรง 15.3 N ที่ตำแหน่งติดเกจทำที่ระยะ 60 มม. ดังนั้น สัญญาณสูงสุดในการออกแบบ คือ

$$\begin{aligned} E &= 5.325 \times 700 \times 10^{-6} \text{ volt} \\ &= 3.7 \text{ mV} \end{aligned}$$

3.4 วงจรอ่านสัญญาณและแสดงผล

3.4.1 ส่วนปรับสมดุลของวงจรวัด

วงจรวัด bridge และการปรับสมดุลแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2 ในการใช้งานจริงเมื่อจ่ายไฟเข้าที่วงจรวัด bridge ของเกจความเครียดแล้ว แรงดันที่หัว AB จะไม่เป็นศูนย์ (bridge ไม่สมดุล) ถึงแม้ว่าจะไม่มีแรงกระทำก็ตาม ทั้งนี้ เพราะคุณสมบัติของเกจความเครียดทั้งสองตัว ไม่เหมือนกันอย่างแท้จริง ดังนั้น จึงต้องมีวงจรช่วยในการปรับสมดุลของ bridge มาช่วยปรับสมดุลด้วย นอกจากนี้ วงจรปรับสมดุลนี้ ยังใช้ในการปรับแรงดัน offset ของวงจรมหาสัญญาณอีกด้วย

จากรูป R_B, R_C ต่อเป็นวงจรวัดปรับสมดุล

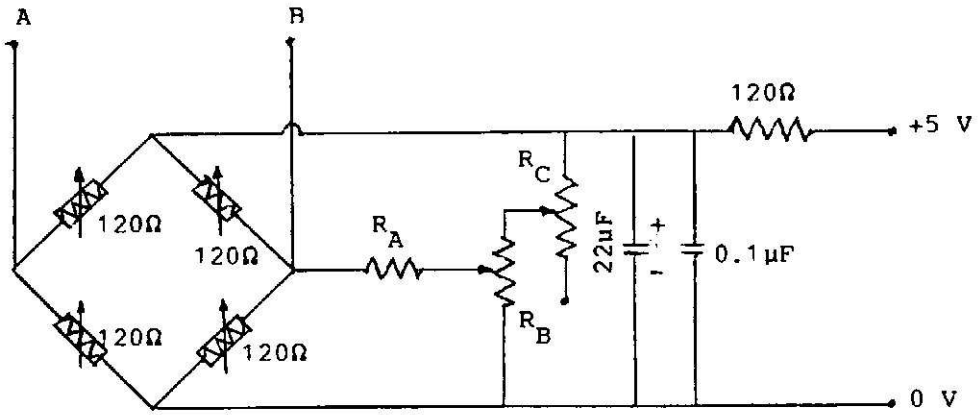
ค่าความต้านทานของเกจแต่ละตัว $120 \Omega + 0.3\% (\Delta R = 0.36 \Omega)$

$R_B = R_C = 50 \text{ k}\Omega$ และ $R_A = 1 \text{ k}\Omega$

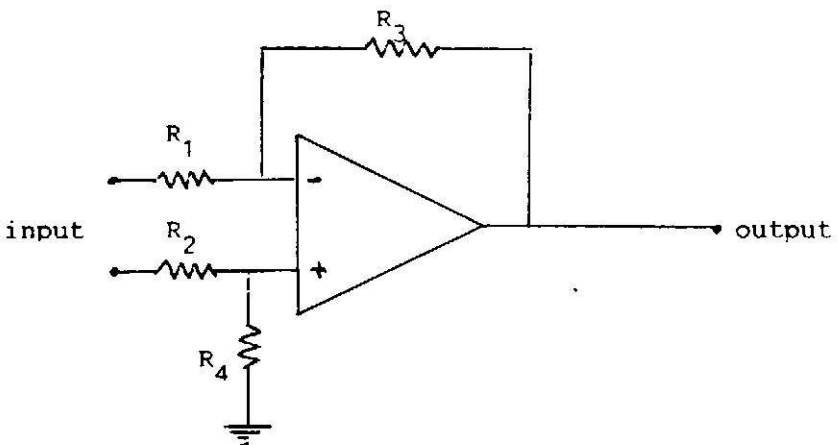
ซึ่งจะทำให้สามารถปรับเพื่อรองรับ ΔR ได้ถึง $+ 12.8 \Omega$ โดยที่ R_B จะทำหน้าที่ในการปรับขยาย ส่วน R_C จะทำหน้าที่ในการปรับละเอียด เราสามารถกำหนดช่วงการปรับให้ละเอียดยิ่งขึ้นได้โดยการเพิ่มค่า R_A แต่จากการทดลองพบว่าที่ R_A เท่ากับ $1 \text{ k}\Omega$ เมื่อทำการปรับ R_C แล้วพบว่า สามารถสังเกตการเคลื่อนที่ของเข็มมิเตอร์ได้สะดวก กล่าวคือ เข็มมิเตอร์จะไม่เคลื่อนที่ช้าหรือเร็วจนเกินไป จึงทำให้สามารถปรับแต่งวงจรวัดได้ง่าย

3.4.2 วงจรมหาสัญญาณและส่วนแสดงผล

จากการออกแบบที่วัดแรงทึง ค่าแรงดันที่ได้จากวงจรวัด bridge มีค่าสูงสุด 4.4 mV เมื่อป้อนด้วยแรงสูงสุดจนคนชนกัน เนื่องจากแรงดันขนาดนี้ น้อยมากที่จะนำไปแสดงผลได้ ดังนั้น จึงต้องมีภาคขยายสัญญาณมาช่วยขยายสัญญาณเพื่อส่งให้ภาคแสดงผลต่อไป ภาคขยายสัญญาณที่ได้ออกแบบนี้ ใช้วงจรมหาผลต่าง (differential amplifier) โดยมีออฟแอมป์เป็นส่วนสำคัญ โดย



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูล



รูปที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณ

จะออกแบบให้มีอัตราขยายสัญญาณที่สามารถปรับได้ โดยมีอัตราขยายสูงสุด 100 เท่า วงจรขยายสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.3

อัตราขยายแรงดัน (พิจารณาเมื่อ $R_3/R_1 = R_4/R_2$) คือ R_3/R_1 หรือ R_4/R_2 ในวงจรที่ใช้นี้เลือกใช้ค่า $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ และเลือก R_3 กับ R_4 เป็นความต้านทานปรับค่าได้แบบมีแกนร่วมกัน ซึ่งเวลาปรับอัตราขยายจะได้ปรับ R_3 และ R_4 ไปได้พร้อม ๆ กัน

จากการเลือก R_1 และ R_2 เป็น $1 \text{ k}\Omega$ นี้จะได้ความต้านทานที่เข้าวงจรขยายเป็น $2 \text{ k}\Omega$ ซึ่งเมื่อเทียบกับความต้านทานออกของวงจร bridge เมื่อมองจากด้าน AB เข้าไปซึ่งมีค่าเท่ากับ 120Ω แล้วพบว่าความต้านทานเข้าของวงจรขยายมีค่าสูงกว่ามาก จึงไม่ทำให้สัญญาณที่ได้จากชั้น AB ของวงจร bridge มีขนาดลดลงจากความจริง เมื่อต่อวงจรขยายเข้าไป

แรงดันของ Raney clip มีขนาด 15.3 นิวตัน ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าออกจาก bridge ที่ขั้ว AB (รูปที่ 3.2) 3.7 mV ดังนั้น ที่อัตราขยายสูงสุด 100 เท่า จะได้แรงดันไฟฟ้าออกจากวงจรขยายสัญญาณ 370 mV มีเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแสดงแรงดันไฟฟ้า ขนาดต่ำเช่นนี้ คือ ไดนามมิเตอร์ มีเตอร์ที่เลือกใช้มีขนาดเต็มสเกลที่ 1 mA เพื่อป้องกันกระแสเกินจึงได้ต่อความต้านทานแบบอนุกรม ค่าความต้านทานที่ปลอดภัย คือ 370Ω แต่เนื่องจากการใช้งานไม่จำเป็นต้องใช้ที่ กำลังขยายสูงสุด (เพราะจะมีความไวต่อสัญญาณรบกวนมาก) ในการออกแบบวงจรเลือกใช้ความต้านทาน 83Ω (120Ω ต่อขนานกับ 270Ω) ซึ่งจะทำให้อัตราขยายสูงสุดในการใช้งานเป็น 22.4 เท่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งวงจรนี้สามารถใช้แสดงผลสัญญาณจาก bridge ที่มีค่าน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ถึงเกือบ 5 เท่าตัว

3.5 สรุป

โดยหลักการของเกจความเครียดต่อแบบ full bridge ทำให้ได้แรงดันสูงสุด 3.7 mV . จากการทบทวนของ Raney clip วงจรเกจความเครียดสามารถปรับสมดุลได้อย่างละเอียด โดยมีค่าเผื่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไว้ 12.8Ω วงจรขยายสัญญาณถูกออกแบบให้ขยายสูงสุด 100 เท่า แต่ในการใช้งานจริงใช้เพียง 22.4 เท่า ก็เพียงพอที่จะให้เข็มมิเตอร์เต็มสเกล เมื่อมีขั้วที่หนึ่งด้วยแรงสูงสุด โดยสรุป การออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ประสบความสำเร็จในระดับที่น่าพอใจ

สมรรถนะของเครื่อง

4.1 ความน่า

สมรรถนะของเครื่องที่จะนำมาพิจารณา คือ sensitivity ในการวัด, ความมีคุณสมบัติเชิงเส้น (linearity) และปริมาณ hysteresis ซึ่งทำได้โดยการปรับเทียบ (calibration) ซึ่งจะเป็นเนื้อความส่วนใหญ่ในบทนี้ รวมทั้ง การทดลองใช้วัดแรงของที่หนีบกระดาษ

4.2 การปรับเทียบ

4.2.1 การตั้ง sensitivity เป็นมาตรฐานปรับเทียบ

เนื่องจาก เครื่องถูกออกแบบให้สามารถตั้ง sensitivity ได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้น เพื่อให้ได้มาตรฐานในการใช้ภายหลังการปรับเทียบ จึงปรับ sensitivity เพื่อให้เข็มชี้เต็มสเกลเมื่อแรงบีบสูงสุดจนกดคานทั้งสองติดกัน อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้งานเลือกตั้ง sensitivity ที่ตำแหน่งใดก็ได้ตามความต้องการ (รายละเอียดวิธีการปรับ sensitivity ปรากฏในภาคผนวก)

4.2.2 การให้ภาระแก่คานหนีบ

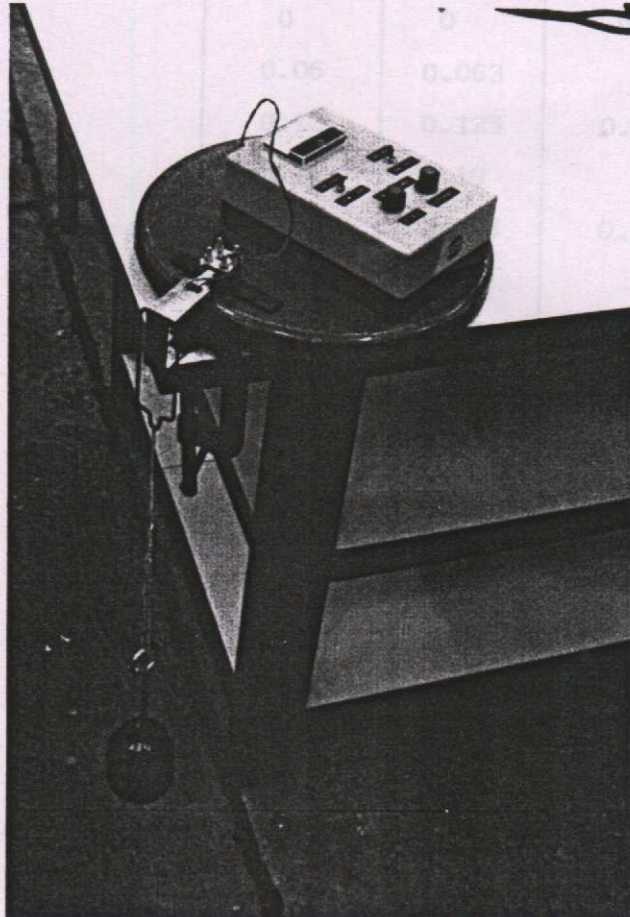
การปรับเทียบใช้แรงมาตรฐานจากคัมน้ำหนัก ดังนั้น จึงต้องวางที่วัดแรงหนีบในแนวนอนและถ่วงน้ำหนัก ดังรูป 4.1 การวางที่หนีบในลักษณะนี้ แม้ว่าจะมีผลเบี่ยงเบน เนื่องจากน้ำหนักของตัวที่วัดแรงหนีบได้ แต่ก็จะน้อยมากจนสังเกตเห็น

4.3 การตอบสนองของอุปกรณ์วัดจากการปรับเทียบ

จากการถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้นครั้งละ 1/4 ปอนด์ และ 1/2 ปอนด์ จนถึง 4 ปอนด์ แล้วลดน้ำหนักลงจนถึง 0 ปอนด์ ได้ผลการทดลอง แสดงในตารางที่ 1

รูปที่ 4.1

การปรับเทียบแรง



การวัดคุณสมบัติของวัสดุที่แรงดึงและ hysteresis ค่า สำหรับแรง

$$F = -0.009 + 10.26 \times \text{การวัด}$$

(4.1)

เมื่อ F คือ ค่าที่อ่าน รูปที่ 4.1 การปรับเทียบแรง

ค่าการวัดการทดสอบของวัสดุและการ (3.7) จะเห็นได้ nonlinearity และ

hysteresis มีค่าประมาณ 1x 10⁻³

ตารางที่ 4.1
การตอบสนองต่อแรงมาตรฐาน

น้ำหนัก (ปอนด์)	ค่าที่อ่านได้			
	เพิ่มน้ำหนัก	ลดน้ำหนัก	เพิ่มน้ำหนัก	ลดน้ำหนัก
0	0	0	0	0
0.25	0.06	0.063		
0.50	0.12	0.125	0.12	0.122
0.75	0.18	0.19		
1.00	0.24	0.245	0.24	0.24
1.25	0.30	0.31		
1.50	0.36	0.36	0.36	0.36
1.75	0.415	0.42		
2.00	0.48	0.48	0.48	0.48
2.25	0.54	0.54		
2.50	0.60	0.60	0.60	0.60
2.75	0.655	0.66		
3.00	0.72	0.72	0.72	0.72
3.25	0.78	0.78		
3.50	0.84	0.843	0.84	0.84
3.75	0.90	0.90		
4.00	0.96	0.96	0.96	0.96

การตอบสนองที่ได้มีคุณสมบัติเชิงเส้นที่ดีมาก และ hysteresis ต่ำ ค่าในตารางสามารถเขียนเป็นสมการตอบสนอง ได้ดังนี้

$$F = -0.009 + 18.26 R \text{ นิวตัน} \quad (4.1)$$

เมื่อ R คือ ค่าที่อ่านจากมิเตอร์

จากตารางการทดลองและสมการ (4.1) จะเห็นว่า nonlinearity และ hysteresis มีค่าประมาณ 1% FS.

4.4 แรงของที่หนีบกระดาษ และผลของการตัดแปงปากหนีบ

ทดลองใช้อุปกรณ์วัดแรงหนีบของที่หนีบกระดาษ จำนวน 20 อัน โดยวัดแรงก่อน และ ภายหลังจากการตัดปากหนีบ ได้ผลการทดลองดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2
แรงของที่หนีบกระดาษ

ชั้นที่	แรง (N)			ชั้นที่	แรง (N)		
	ก่อนตัดแปง	หลังตัดแปง	แรงเพิ่มขึ้น		ก่อนตัดแปง	หลังตัดแปง	แรงเพิ่มขึ้น
1	6.56	6.93	0.37	11	6.02	6.56	0.54
2	6.20	6.51	0.31	12	5.56	5.83	0.27
3	6.20	6.56	0.36	13	5.83	6.20	0.37
4	6.38	6.56	0.18	14	6.20	6.56	0.36
5	6.38	6.93	0.55	15	6.20	6.56	0.36
6	6.56	6.75	0.19	16	6.02	6.20	0.18
7	6.38	6.66	0.28	17	6.20	6.56	0.36
8	6.20	6.56	0.36	18	6.20	6.56	0.36
9	6.47	6.75	0.28	19	5.29	5.83	0.54
10	5.83	6.20	0.37	20	6.02	6.38	0.36

โดยเฉลี่ยที่หนีบกระดาษมีแรงหนีบก่อนตัดแปง 6.13 นิวตัน และเมื่อตัดแปงแล้วแรงหนีบจะเพิ่มขึ้น 0.35 นิวตัน ทำให้ค่าเฉลี่ยแรงหนีบภายหลังตัดแปงปากหนีบมีค่า 6.48 นิวตัน ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างที่หนีบแบบ Children's hospital (4.9 N) และ Rayney (15.3 N)

สรุปและวิจารณ์ผล

ที่วัดแรงหนีที่ออกแบบและสร้างมีสมรรถนะเป็นที่พอใจ โดยเฉพาะ มีความเป็นเชิงเส้น ดี และ hysteresis ต่ำ ค่า sensitivity สามารถปรับได้ตามต้องการ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งาน สะดวก

ค่าแรงหนีที่วัดนี้ เป็นการหนีโดยมีระยะห่างไม่เกิน 5 มม. ซึ่งเป็นระยะใกล้เคียงกับการใช้งาน จากการทดลองพบว่า ที่หนีกระดูกขาเมื่อมีการตัดแปลงปากหนีจะมีแรงหนีเพิ่มขึ้น ประมาณ 5.7% เพราะรอยหยักของปากที่หนีทำให้ระยะถ่างของสปริงเพิ่มขึ้น แต่แรงหนีที่เพิ่มขึ้น ก็ยังคงอยู่ในขีดของ Children's hospital และ Raney clip

เป็นที่น่าสังเกตว่า แรงหนีของที่หนีกระดูกขาน้อยกว่าแรงหนีแบบ Raney ซึ่งกลับกับการหาโดยใช้วิธีหนีกับสายน้ำเกลือที่ปฏิบัติอยู่⁽¹⁾ ผลต่างนี้ อธิบายได้จากความแตกต่างของพื้นที่ที่หนี Raney clip ถึงแม้จะมีแรงหนีมากกว่าที่หนีกระดูกขา แต่ก็มีพื้นที่ในการหนี (พื้นที่หน้าตัดที่ชนกัน) น้อยกว่ามาก ความสูงของลำน้ำที่เพิ่มขึ้นขณะหนีกับสายน้ำเกลือขึ้นอยู่กับทั้งแรงหนี (กดสายยางได้ลึก) และพื้นที่หน้าตัด (กดสายยางได้หนักมาก) การที่ที่หนีกระดูกขา กดลำน้ำขึ้นได้สูงมากกว่า Raney clip ก็เพราะอิทธิพลของพื้นที่หน้าตัดนี้มากกว่านั่นเอง

ด้วยเหตุนี้ การวัดแรงในลักษณะสัมพัทธ์ที่เคยใช้มาก่อนนั้น ไม่ใช่วิธีที่ให้ค่าถูกต้อง และยังอาจให้ค่าในทางตรงกันข้ามด้วย (แปลค่าแรงน้อยกว่าเป็นมากกว่า) แต่ที่หนีที่ออกแบบและสร้างนี้ แสดงผลที่ไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่การหนี ค่าที่แสดงคือ แรงและเป็นค่าสัมบูรณ์ (absolute value)

อย่างไรก็ตาม จุดประสงค์ของที่หนีบทังศรีระ คือ ห้ามเลือด ซึ่งความสามารถในการห้ามเลือดขึ้นอยู่กับ pressure ที่กด ค่า pressure เป็นฟังก์ชันของแรงและพื้นที่ ดังนั้นถ้าพิจารณาในเรื่อง pressure แต่อย่างเดียว พื้นที่กดย่อมมีผลให้ที่หนีกระดูกขามี pressure น้อยลง ซึ่งหมายถึงความสามารถในการห้ามเลือดจะต้อยกว่าแบบ Raney แต่จากรายงานการทดลอง พบว่า

ที่หนีบกระดาษใช้งานได้ดีแม้จะลดแรงหรือ pressure ลง (ด้วยการตัดทาสปริง เนื่องจากเข้าใจว่าที่หนีบกระดาษมีแรงหนีบมากกว่า Raney clip⁽¹⁾) ดังนั้น ที่หนีบกระดาษที่ไม่ได้งอทาสปริง และมีแรงมากกว่า (แบบงอทาสปริง) ย่อมมี pressure มากกว่าและห้ามเลือดได้ดีกว่า กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ที่หนีบกระดาษสามารถใช้งานเป็นที่หนีบทันทีได้เลยโดยไม่ต้องลดขนาดของแรงลง นอกจากนั้น ขนาดของ pressure ที่น้อยกว่า Raney clip และการไม่มีเขี้ยวแบบ Children's hospital clip ก็น่าจะมีผลที่ไม่ทำให้เนื้อเยื่อบอบช้ำ เนื่องจากอุปกรณ์ที่สร้างนี้ สามารถให้ค่าแรงหนีบได้โดยตรง ดังนั้น จึงสามารถใช้ในการศึกษาวิจัยทางการแพทย์ได้ เช่น ในเรื่องของความสัมพันธ์ของความบอบช้ำของเนื้อเยื่อ และความสามารถในการหายกับขนาดของแรงที่ใช้หนีบ

เอกสารอ้างอิง

1. สงวนสิน รัตนเลิศ "เครื่องมือหนักหึ่งศรียะในระหว่างผ่าตัดชนิดใหม่" แพทยสภาสาร
ปีที่ 16 ฉบับที่ 5, 2530, หน้า 243-246
2. ASM. Metals Handbook "Properties and selection : Stainless steel,
tool materials and special - purpose metals, Vol 3, 1978.
3. Doebelin, E.O., "Measurement systems : Application and design."
McGraw - Hill., London, 1983.

ภาคผนวก
การใช้เครื่องมือ

ในการใช้เครื่องมือนี้ควรปฏิบัติตามขั้นตอน ต่อไปนี้

1. เปิดสวิตช์มิเตอร์ และ เชื่อมหน้าปัทม์ ไม่ควรเคลื่อนที่ออกจากศูนย์เกินกว่า 1 ช่อง (0.04) ถ้าไม่เป็นตามเงื่อนไขให้ตั้ง offset ใหม่ หรืออาจมีสาเหตุจากแบตเตอรี่หมดอายุ
2. เปิดสวิตช์ bridge แล้วปรับ R balance ทั้ง coarse และ fine เพื่อให้เชื่อมหน้าปัทม์ชี้ที่ศูนย์
3. ปีนคานาคู่จนปลายคานทั้งสองชิดติดกันและ เชื่อมหน้าปัทม์ควรวีที่ 1.0 (เต็มสเกล) ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขให้ตั้ง sensitivity ใหม่
4. ลองบีบตั้งในขั้นตอนที่ 3 เป็นระยะ ๆ ระหว่างใช้งานเพื่อตรวจถ่าน และทุกครั้งที่ เชื่อมควรวีที่ 0 และ 1.0 เมื่อไม่มีและบีบเต็มทีตามลำดับ (ถ้าเปิดเครื่องทิ้งไว้นาน ๆ อาจมีผลให้ บีบเต็มทีแล้วเชื่อมไม่ชี้ที่ 1.0 ในกรณีเช่นนี้ ให้ปิดเครื่องสักครู่หรือเปลี่ยนถ่านใหม่)
5. นำที่หนีบที่ต้องการวัดแรงไปหนีบที่ปลายคานคู่ แล้วอ่านค่าจากมิเตอร์
6. คำนวณแรงหนีบจากสูตร $F = 18.26 R - 0.009$ นิวตัน หรือใช้รูปที่ ๘-1

หมายเหตุ 1 กิโลกรัมบนพื้นโลก = 9.81 นิวตัน

ข้อควรระวัง ให้ถอดถ่านออก ถ้าจะไม่ได้ใช้เป็นเวลานานกว่า 1 เดือน

การตั้ง offset มีขั้นตอน ต่อไปนี้

1. เปิดกล่องออก โดยการคลายสกรูที่ฝาด้านล่าง
2. เปิดสวิตช์มิเตอร์ (ไม่ต้องเปิดสวิตช์ bridge) แล้วปรับ offset (variable resistance แกนตั้งบนแผงวงจร) ให้เชื่อมชี้ที่ศูนย์ (zero offset)

การตั้ง sensitivity มีขั้นตอน ต่อไปนี้

1. เปิดสวิตช์มิเตอร์ และ bridge
2. ปรับ R-balance ให้เชื่อมชี้ที่ศูนย์
3. ใช้ที่หนีบกระดาษขนาดใหญ่ (สี่ดำ) หนีบปลายคานคู่ให้ติดกัน
4. ใช้ไขควงปรับ R sensitivity (ใส่ไขควงทางรูเปิดด้านท้ายกล่อง) จนกระทั่ง เชื่อมมิเตอร์ชี้ที่ 1.0 แล้วจึงนำที่หนีบกระดาษออก

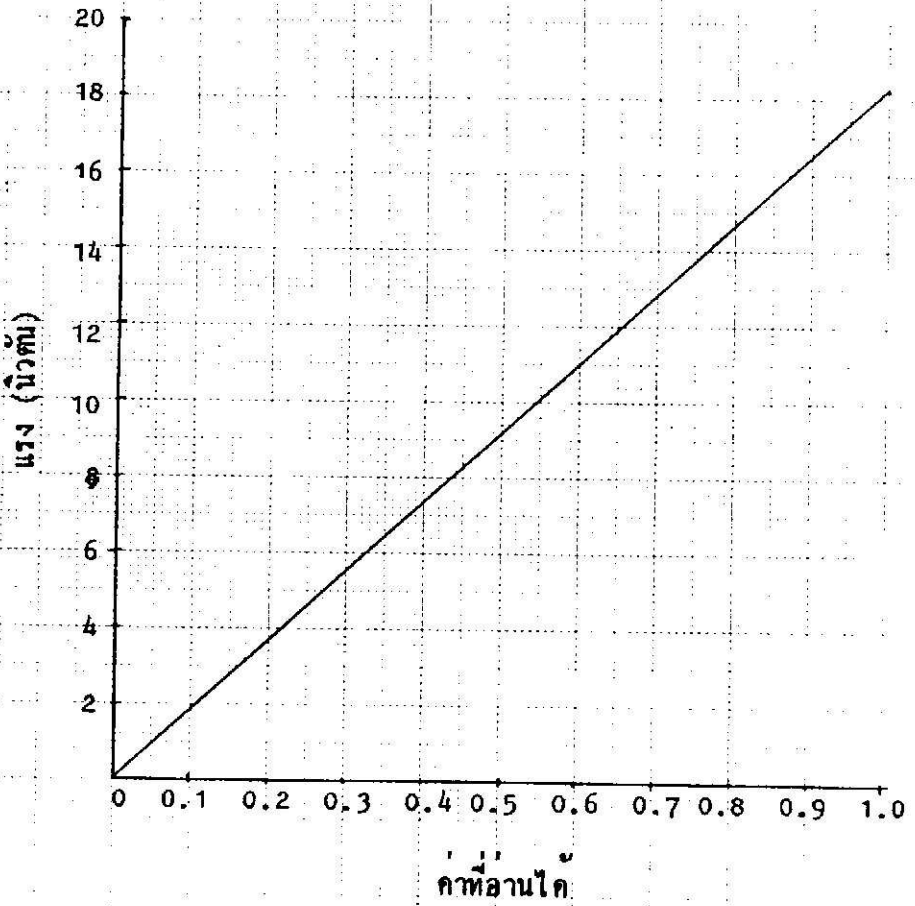
หมายเหตุ การทำเช่นนี้ ก็เพื่อให้สมการ $F = 18.26 R - 0.009$ มีความเชื่อถือได้ (valid)

ข้อควรทราบ

อาการเมื่อถ่านหมด เข็มจะตีสู่คานใดคานหนึ่ง และปรับสมดุลย์ (R = balance) ไม่ได้ หรือ sensitivity เปลี่ยนไป

การเปลี่ยนถ่าน ควรเปลี่ยนทั้ง 3 ก้อนพร้อมกัน ห้ามใช้ถ่านเก่าและถ่านใหม่ปนกัน

ขนาดของถ่าน ก้อน 9 volt จำนวน 3 ก้อน



รูปที่ ผ-1 กราฟการปรับเทียบ