บทที่ 2
ทฤษฎีเบื้องต้นในการวัดด้วยสเตรนเกจ

2.1 บทนำ

สเตรนเกจเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่นำเทคนิคการวัดทางไฟฟ้ามาวัดหาข้อมูลทางกล เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติซึ่งสามารถบอกได้ว่าสเตรนเกจใช้สำหรับการวัดความเครียด (Strain) ซึ่ง "ความเครียด" แบ่งออกเป็นความเครียดแบบดึงและความเครียดแบบอัดแสดงได้โดยใช้เครื่องหมายบวกหรือลบตามลำดับ ดังนั้นสเตรนเกจสามารถใช้ในการตรวจได้ทั้งการขยายตัวและการหดตัว

ความเครียดของวัตถุดิบเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลนอกหรือผลกระทบภายใน ความเครียดอาจจะเกิดจากแรง ความดัน โมเมนต์ ความร้อน การเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุ และอื่นๆ ปริมาณหรือขนาดของผลกระทบสามารถหาได้จากค่าความเครียดที่วัดได้ถ้าทราบสภาวะที่มากระทำ

จากประโยชน์ของสเตรนเกจทำให้มีการพัฒนาสเตรนเกจมาอย่างต่อเนื่องตลอดมามีการออกแบบสเตรนเกจเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานหลายประเภท ซึ่งทำให้สเตรนเกจมีความเหมาะสมประยุกต์ใช้กับงานวัดความเครียดในสภาวะสิ่งแวดล้อมต่างๆ แม้แต่ในสภาวะที่รุนแรงก็ตามการใช้งานสเตรนเกจจึงมีข้อได้เปรียบกว่าใช้เครื่องมือวัดความเครียดอื่นๆ ซึ่งข้อได้เปรียบของ สเตรนเกจ ได้แก่

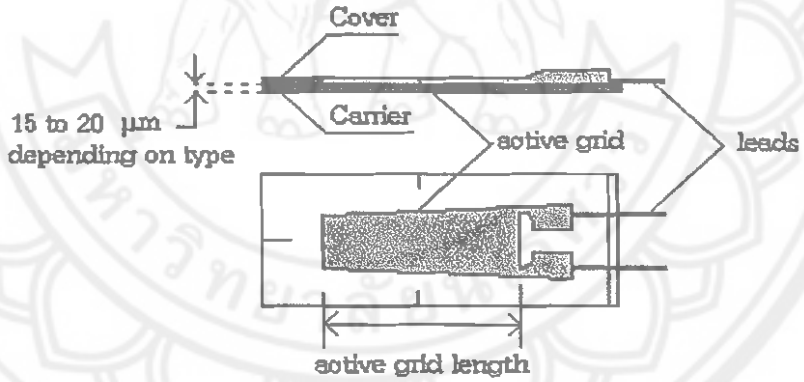
- การใช้สเตรนเกจโดยการวัดค่าทางไฟฟ้า
- สามารถแยกวัดความเค้นแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานโดยใช้วงจรที่เหมาะสม
- สามารถชดเชยผลกระทบที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดได้ เช่น ความผิดพลาดจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน
- วัดค่าความเครียดได้ในช่วง $+10\times10^{-2}$ ถึง $-10\times10^{-2}\,m/m$ (+10% ถึง -10%)
- ได้ค่าวัดที่มีความละเอียดสูง โดยใช้เครื่องขยายและเครื่องแสดงผลช่วย
- ไม่มีระดับการกระตุ้น
- วัดได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง จาก $-296\,^{0}C$ ถึง $+1{,}000\,^{0}C$
- มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ซึ่งจะไม่มีผลกระทบต่อการวัดถึงแม้ชิ้นงานจะมีขนาดเล็ก
- วัดเหตุการณ์พลวัตได้เป็นอย่างดี
- มีอายุการล้ายาวนาน

สเตรนเกจทั่วๆไปจะมีคุณสมบัติตามที่กล่าวข้างต้นแต่ก็จะใช้ได้ในช่วงของความเครียดที่จำกัด ในสภาวะการใช้งานที่มีความเค้นสูง อุณหภูมิสูง หรือมีการต้านทางการสั่นสะเทือนก็จะต้องเลือก สเตรนเกจชนิดพิเศษ สเตรนเกจในท้องตลาดมีอยู่หลายชนิดผู้ใช้สเตรนเกจควรจะสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมถึงแม้จะไม่ใช่ผู้เชี่ยวชาญ

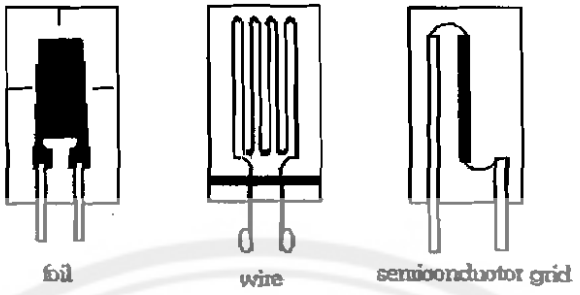
2.2 รูปทรงของสเตรนเกจ

รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างสเตรนเกจมาตรฐาน ลวดที่ใช้ในการวัด (Active Part) ทำจากโลหะบาง (foil) เป็นลักษณะขดลวด (grid) ฝังอยู่ระหว่างแผ่นพลาสติกซึ่งเป็นส่วนห่อหุ้ม ส่วนปลายของ grid มีบริเวณกว้างเพื่อใช้สำหรับเชื่อมยึดสายไฟ ประโยชน์ของแผ่นพลาสติกเพื่อให้สะดวกในการหยิบจับหรือเครื่องย้ายและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับขดลวด

มีวัสดุเพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถนำมาใช้ทำลวดวัด การเลือกใช้วัสดุสำหรับทำสเตรนเกจแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน วัสดุที่ใช้อาจเป็นโลหะหรือเป็นสารกึ่งตัวนำ ขึ้นกับการใช้งานและกระบวนการผลิต



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างลวดวัดในสเตรนเกจ



รูปที่ 2.2 ลักษณะของลวด (grid) แบบต่างๆ

ขดลวดของสเตรนเกจโลหะผลิตด้วยเทคนิคโฟโต้เอชชิ่ง (Photo-Etching) จากแผ่นฟอยล์หนา 3 - 5 ไมครอน หรือจากลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 - 20 ไมครอน การผลิตเกจที่มีขนาดเล็กและมีความซับซ้อนมักใช้เทคนิคโฟตต้เอชชิ่งจากแผ่นฟอยล์ แต่เกจที่มีความยาวของขดลวดมากกว่า 20 มม. จะผลิตจากลวดเพราะการผลิตง่ายกว่า เกจที่ทำจากลวดมีข้อได้เปรียบสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูงเพราะสามารถหาวัสดุที่มีความเหมาะสมได้มากกว่าและสามารถใช้เทคนิคการติดที่ดีกว่าได้

ขดลวดของเกจที่ทำจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำมักมีขนาดเล็ก โดยมีความยาวเพียงประมาณ 0.1 มม. และมีความหนาประมาณ 0.02 - 0.3 มม. ฝังอยู่ระหว่างแผ่นพลาสติกเช่นเดียวกับสเตรนเกจที่ทำด้วยโลหะ โดยทั่วไปการทดลองวิเคราะห์ความเค้นมักใช้ขดลวดแบบโลหะ ส่วนขดลวดแบบสารกึ่งตัวนำจะใช้ในการวัดกรณีพิเศษเท่านั้น

2.3 ทฤษฎีในการวิเคราะห์สเตรนเกจ

เนื่องจากดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า สเตรนเกจก็เป็นตัวต้านทานชนิดหนึ่ง ซึ่งลักษณะของความต้านทานมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$R = \frac{\rho \ell}{ab} \qquad \text{...(2.1)}$$

เมื่อ ρ คือ สภาพความต้านทานของวัสดุ(Ω-m)

ℓ คือ ความยาวของวัสดุ(m)

a,b คือ ค่าความกว้างและยาวของวัสดุ(m)

นำค่าลอกาลิทึมฐาน e คูณตลอด (2.1)

$$\ell nR = \ell n\rho + \ell n\ell - \ell na - \ell nb \qquad ...(2.2)$$

หาอนุพันธ์ตลอดทั้ง (2.1)

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{d\ell}{\ell} - \frac{da}{a} - \frac{db}{b} \qquad ...(2.3)$$

เนื่องจาก ρ คงที่ตลอดทั้งวัสดุ ดังนั้นอนุพันธ์จึงเท่ากับศูนย์ จึงเขียน (2.3) ได้เป็น

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\ell}{\ell} - \frac{da}{a} - \frac{db}{b} \qquad ...(2.4)$$

พิจารณาฝั่งซ้ายของ (2.4) เมื่อ $d\ell$ เพิ่ม ค่า da และ db จะลดลง และจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนปัวซองส์ของวัสดุจะได้

$$-\frac{da}{a} = -\frac{db}{b} = \nu\frac{d\ell}{\ell} \qquad ...(2.5)$$

เมื่อ ν คือ อัตราส่วนปัวซองส์

จาก (2.5) และ (2.4) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\frac{d\ell}{\ell} \qquad ...(2.6)$$

และจากความสัมพันธ์ของความเครียด

$$\varepsilon = \frac{d\ell}{\ell} \qquad ...(2.7)$$

จาก (2.6) และ (2.7) และให้ $dR \approx \Delta R$ จะได้

$$\frac{\Delta R}{R} = (1+2\nu)\varepsilon \qquad ...(2.8)$$

โดยให้ $(1+2\nu) = F$ เรียกว่า เกจเฟคเตอร์ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละวัสดุ

เขียน (2.8) ใหม่

$$\boxed{\frac{\Delta R}{R} = F\varepsilon} \qquad ...(2.9)$$

ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า เราสามารถวัดค่าหน่วยแรง(Stress)หรือแรง(Force) จากความสัมพันธ์ของฮุค

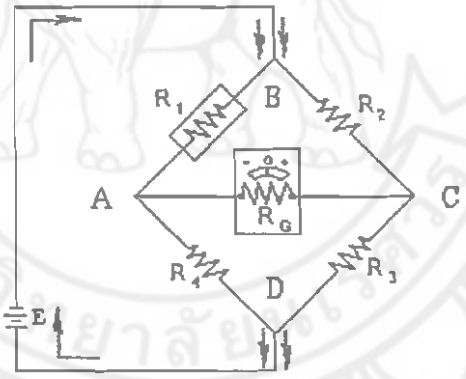
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad ...(2.10)$$

2.4 วงจรวีสสโตนบริดจ์

ในปี 1833 มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Sir Charles Wheatstone ค้นพบรูปแบบการต่อวงจรที่เรียกว่า "Wheatstone Bridge" ซึ่งในปัจจุบัน รูปแบบวงจรบริดจ์ชนิดนี้ เป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้หลักการที่อธิบายได้ง่าย ไม่ซับซ้อน การประยุกต์ใช้ทำได้หลากหลาย

2.4.1 หลักการพื้นฐานของวงจรวีสสโตนบริดจ์

พิจารณาจากรูปที่ 2.3 เป็นวงจรบริดจ์ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัว มีไฟจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายเลี้ยงในวงจร ตรงจุดระหว่าง A และ C มีกัลวานอมิเตอร์วัดกระแสไฟที่วิ่งผ่านอยู่



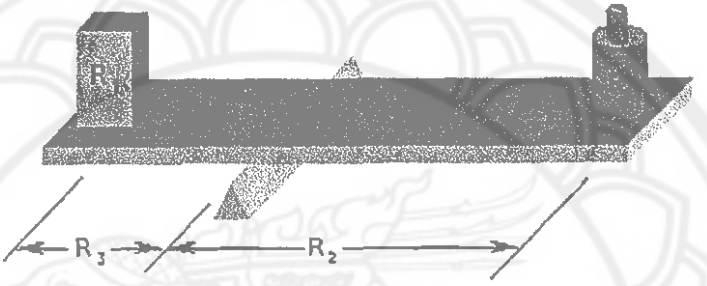
รูปที่ 2.3 รูปพื้นฐานในการพิจารณาวงจรวีสสโตนบริดจ์

ซึ่งวงจรประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน 4 ตัวคือ R_1 ,R_2 ,R_3 ,R_4 ซึ่งในที่นี้ R_1 เป็นตัวไม่ทราบค่า นอกนั้นเป็นตัวทานทานที่ทราบค่าแล้ว ซึ่งจากที่ทราบมาแล้วว่าถ้าวงจรนี้จะสมดุลก็ต่อเมื่อ ไม่มีแรงดันตกคร่อมจุด A-C ซึ่งจะเกิดความสัมพันธ์

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \qquad ...(2.11)$$

หรือเขียนในรูป $$R_1 = \left(\frac{R_2}{R_3}\right)R_4 \qquad ...(2.12)$$

ซึ่งถ้าเปรียบเทียบวงจรวีสสโตนบริดจ์กับรูปแบบทางกลศาสตร์ก็เปรียบได้กับคานในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 คานเปรียบเทียบกับวงจรวีสสโตนบริดจ์

สังเกตในรูปว่า R_4 เป็นน้ำหนักที่ทราบค่า สภาพนี้เป็นสภาพที่เรียกว่าสมดุล สามารถพิสูจน์ได้โดยการหาโมเมนต์รอบจุดหมุน จะได้

$$R_1R_3 = R_4R_2 \qquad ...(2.13)$$

ซึ่งเทียบเคียงได้กับ (2.12)

นั่นก็คือ ถ้าเกิดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก R_1 (ซึ่งจะทำให้ระบบไม่สมดุล)เราสามารถปัญหาได้ 2 ทาง ได้แก่

1. ปรับน้ำหนัก R_4
2. เลื่อนแขน R_2 และ R_3

ซึ่งในความเป็นจริงเราจะให้ R_1 คือ สเตรนเกจ และ R_4 เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้(เลือกใช้วิธีที่ 1) นั่นก็คือ ถ้า R_1 เปลี่ยนเราจะทำการปรับ R_4 เพื่อทำให้สมดุล และค่า R_1 ที่เปลี่ยนแปลงก็คือค่าที่เราต้องการ

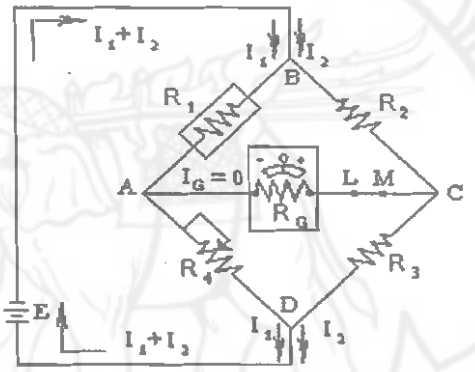
2.4.2 ทฤษฎีของวีสสโตนบริดจ์

เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับการ์ดปรับภาวะสัญญาณ จำเป็นที่จะต้องทราบถึงทฤษฎีของวงจรในส่วนต่างๆ ซึ่ง วงจรบริดจ์ก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งทฤษฎีของวงจรบริดจ์นี้ มี 2 ทฤษฎี ได้แก่

2.4.2.1 ทฤษฎีบริดจ์สมดุล (Balanced Bridge)

จากที่ได้ทราบมาแล้วว่า ถ้าหากบริดจ์สมดุลแล้วจะไม่มีแรงดันตกคร่อมใน A-C หรือไม่มีกระแสไหลผ่านระหว่างจุด A และ C นั่นเอง(ตามรูปที่ 2.5) จากความสัมพันธ์

$$E = IR \qquad ...(2.14)$$



รูปที่ 2.5 รูปประกอบเพื่อพิจารณาสมการบริดจ์สมดุล

และจากที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อไม่แรงดันตกคร่อมที่ระหว่าง A-C ทำให้แรงดันที่ A และ C เท่ากัน ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานในแนว BA และ BC เท่ากัน

$$E_{B\text{-}A} = E_{B\text{-}C} \qquad ...(2.15)$$

หรือ $$I_1R_1 = I_2R_2 \qquad ...(2.16)$$

และจากที่กล่าวมา AD ก็จะเหมือนกับ CD โดยที่กระแสที่วิ่งผ่าน $R_1 = R_4$ คือ I_1 และกระแสที่วิ่งผ่าน $R_2 = R_3$ คือ I_2 เพราะ $I_G = 0$ (R_1 และ R_4 ต่ออนุกรมกัน)

$$E_{A\text{-}D} = E_{C\text{-}D} \qquad ...(2.17)$$

หรือ $$I_4R_4 = I_3R_3 \qquad ...(2.18)$$

นำ (2.16)/(2.18) จะได้ว่า

$$\frac{I_1R_1}{I_1R_4} = \frac{I_2R_2}{I_3R_3} \qquad \text{...(2.19)}$$

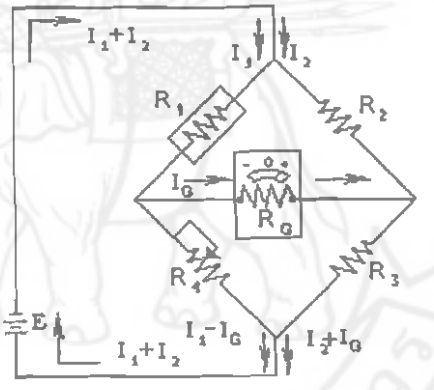
หรือ

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$

จะเห็นว่า สมการข้างต้นมีค่าเท่ากับสมการ (2.1) ซึ่งเป็นจริงตามที่ได้กล่าวไว้

2.4.2.2 ทฤษฎีบริดจ์ไม่สมดุล (Unbalanced Bridge)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อชิ้นวัสดุจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน วงจรบริดจ์ที่เคยสมดุลก็จะไม่สมดุลอีกต่อไป พิจารณารูปที่2.6 ประกอบ



รูปที่ 2.6 รูปประกอบเพื่อพิจารณาสมการบริดจ์ไม่สมดุล

การวิเคราะห์นี้ตั้งอยู่บนสมสติฐานที่ว่า มีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ ซึ่งการพิจารณาเราใช้กฎของ Kirchhoff ทั้งสองข้อที่ว่า

1. ***กฎของจุด (Point Rule)*** กล่าวว่า *"ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสไฟฟ้าในสายต่างๆ ณ จุดใดๆย่อมมีค่าเท่ากับศูนย์"*

$$\sum I = 0$$

2. ***กฎของวง (Loop Rule)*** กล่าวว่า *"ผลบวกทางพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้าในรอบวงใดๆย่อมมีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของ IR ในวงรอบนั้นๆ"*

$$\sum E = \sum IR$$

หมายเหตุ : โดยที่ E ที่มีทิศเดียวกับกระแสเป็นบวกตรงข้ามกับกระแสเป็นลบ

โดยเฉพาะกฎของวง เราพิจารณาพร้อมรูปที่ 2.6 จะได้

สำหรับแรงดันที่ตกคร่อม R_1 และ R_4

$$R_1I_1 + R_4(I_1 - I_G) = E$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$I_1(R_1 + R_4) - I_GR_4 = E \qquad ...(2.20)$$

สำหรับแรงดันที่ตกคร่อม R_1, R_2, R_G

$$R_1I_1 + R_GI_G - R_2I_2 = 0 \qquad ...(2.21)$$

สำหรับแรงดันที่ตกคร่อม R_3, R_4, R_G

$$R_GI_G + R_3(I_2 + I_G) - R_4(I_1 - I_G) = 0$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$-R_4I_1 + R_3I_2 + I_G(R_G + R_3 + R_4) = 0 \qquad ...(2.22)$$

ทั้งสามสมการแก้สมการเพื่อหาค่า I_G โดย ใช้กฎของคราเมอร์

$$I_G = \frac{\begin{vmatrix} R_1+R_4 & E & 0 \\ R_1 & 0 & -R_2 \\ -R_4 & 0 & R_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_1+R_4 & -R_4 & 0 \\ R_1 & R_G & -R_2 \\ -R_4 & R_G+R_3+R_4 & R_3 \end{vmatrix}}$$

โดยการหาตัวกำหนด (determinant) ทั้งบนและล่างจะได้

$$I_G = \frac{E(R_2R_4 - R_1R_3)}{R_2(R_1+R_4)(R_G+R_3+R_4) + R_1R_3R_4 - R_2R_4^2 + R_GR_3(R_1+R_4)} \qquad ...(2.23)$$

สามารถตรวจสอบบริดจ์สมดุลได้โดยแทน (2.11) ใน (2.23) จะได้ $I_G = 0$ ซึ่งในวงจรวีสสโตนบริดจ์ นิยมใช้ตัวต้านทานขนาดเดียวกันหมด ให้เป็น R พิจารณาผลต่างและเทอมที่มีกำลังสูงเราจะไม่พิจารณา จะได้ (2.23) เป็น

$$I_G = \frac{E\Delta R}{4R(R + R_G)} \qquad ...(2.24)$$

แทนค่าจาก (2.9) ลงใน (2.24) จะได้

$$I_G = \frac{EF\varepsilon}{4(R + R_G)} \qquad ...(2.25)$$

ใส่ค่า R_G ทั้งสมการ เพื่อจะได้ E_0

$$E_0 = I_G R_G = \frac{EF\varepsilon R_G}{4(R + R_G)} \qquad ...(2.26)$$

ถ้าวงจรเปิด ทำให้แรงดันตกคร่อม R_G เป็นศูนย์ หรือพูดอีกนัยหนึ่งก็คือ $R_G = \infty$
ดังนั้นใส่ค่าลิมิตที่ $R_G \rightarrow \infty$

$$E_0' = \lim_{R_G \to \infty} E_0 = \frac{\frac{d}{dR_G}(EF\varepsilon R_G)}{\frac{d}{dR_G}(4(R + R_G))} = \frac{EF\varepsilon}{4} \qquad ...(2.27)$$

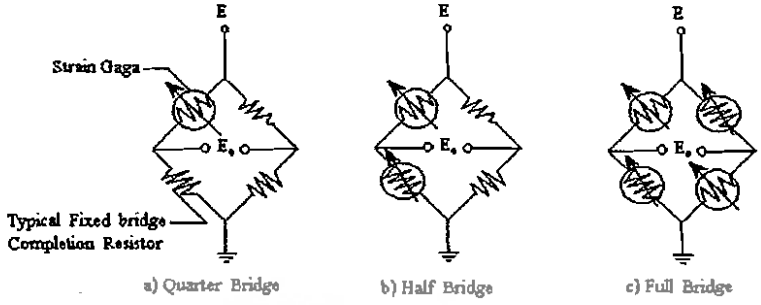
เขียน (2.27) โดยให้ค่าของความเครียดอยู่ในรูป micro จะได้

$$\frac{E_0}{E} = \left[\frac{Fx\mu\varepsilon x10^6}{4}\right] \qquad ...(2.28)$$

การต่อวงจรแบบนี้เรียกว่าการต่อแบบ quarter bridge คือ การต่อวงจรบริดจ์โดยที่มีตัวเกจตัวเดียวอีกสามตัวเป็นตัวต้านทาน นอกจากนี้ยังมีการต่ออีก 2 แบบด้วยกัน แต่จะไม่พูดถึงในที่นี้ก็คือ

1. Half Bridge ใช้ตัวเกจ 2 ตัว ตัวต้านทาน 2 ตัว
2. Full Bridge ใช้ตัวเกจทั้ง 4 ตัว

การต่อทั้งสามแบบแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการต่อวงจรบริดจ์แบบต่างๆ

ซึ่งค่า E_0' เป็นค่าแรงดันที่มากที่สุดที่วัดได้ในกรณีที่มีการต่อแบบขาเดียว โดยกระบวนการเดียวกันกับข้างต้นเราสามารถพิจารณาแรงดันเมื่อพิจารณาสเตรนเกจพร้อมกัน 4 ขาโดยสมการ

$$\frac{E_0}{E} = \frac{R_G}{4(R+R_G)}\left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right] \quad ...(2.29)$$

เมื่อสเตรนเกจทั้ง 4 ตัวมีความต้านทานเดียวกันคือ R

และต่อไป ถ้าสมการ (2.29) มีการนำ R_2 และ R_4 มาวัดความเครียด ที่มีขนาดเดียวกันแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับ R_1 และ R_3 จะได้

$$\frac{E_0}{E} = \frac{R_G}{4(R+R_G)}\left(4\frac{\Delta R}{R}\right) = \frac{F\varepsilon R_G}{R+R_G} \quad ...(2.30)$$

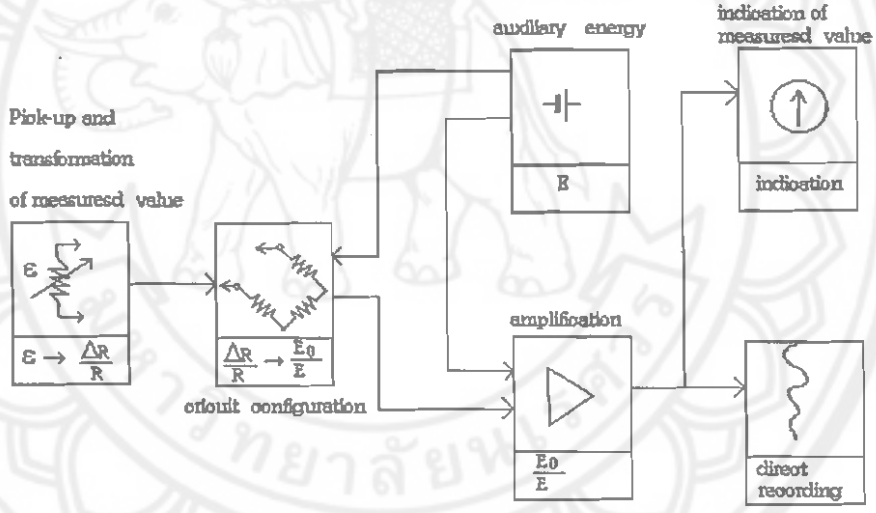
หมายเหตุ : สมการ (2.29) และ (2.30) ยังไม่ได้ปรับค่าของความเครียดให้เป็นหน่วยของไมโครสเตรน

2.4.3 การทำงานของวีสสโตนบริดจ์ในการ์ดปรับภาวะสัญญาณ

การทำงานของบริดจ์ใช้ทฤษฎีของบริดจ์สมดุล ซึ่งสามารถอธิบายได้คือเมื่อกระแสเข้ามาในวงจรจะมีตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ 1 ตัว เพื่อทำการปรับค่าความต้านทานในวงจรให้เข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้ไม่มีแรงดันผ่านไปยังตัว Op-Amp ที่วงจรขยายสัญญาณ (รูปที่ 2.5) อีกกรณีคือ เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อชิ้นวัสดุที่ติดตั้งสเตรนเกจ ทำให้ค่าความต้านทานในวงจรบริดจ์ไม่สมดุล และจะมีแรงดันไหลผ่านไปยังวงจร Op-Amp ต่อไป (รูปที่ 2.6) ซึ่งมีสมการการคำนวณดังสมการ (3.1) ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

2.5 การใช้งานของสเตรนเกจ

การวัดค่าหน่วยแรงทำโดยติดสเตรนเกจบนผิวของชิ้นงานโดยใช้กาวชนิดพิเศษ และบางครั้งต้องใช้เทคนิคอื่นๆ เช่น ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงต้องใช้กาวเซรามิก การเชื่อมด้วยไฟฟ้าแบบจุด (spot welding) หรือการใช้ไฟพ่น (flame spraying) สเตรนเกจชนิดที่ฝังตัวอยู่ภายในวัสดุห่อหุ้มมักใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจำลองและโครงสร้างคอนกรีตซึ่งสามารถวัดความเค้นภายในโครงสร้างเพื่อการวิเคราะห์ความเครียดทั้ง 3 ทิศทาง การเปลี่ยนแปลงความต้านทานเชิงสัมพันธ์ $\Delta R/R_0$ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดด้วยตัวคงที่ F ตาม (2.9) ในการวัดต้องอาศัยวงจรและเครื่องมือเพิ่มเติมเพื่อการแสดงค่าการวัดจากสเตรนเกจ เมื่อประกอบส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกันอย่างเหมาะสมแล้วจะเรียกว่า ระบบการวัด (measurement chain) ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ กันขึ้นอยู่กับหน้าที่ในการวัด รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของระบบการวัดที่ใช้สำหรับการวัดด้วยสเตรนเกจ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของระบบการวัด

ส่วนประกอบแรกของระบบการวัดก็คือ สเตรนเกจ ทำหน้าที่เปลี่ยนปริมาณทางกล "ความเครียด" เป็นปริมาณทางไฟฟ้าในรูปของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานสัมพันธ์ $\Delta R/R$

ส่วนประกอบที่ 2 ของระบบเป็นการต่อวงจรในรูปของวีสสโตนบริดจ์ที่มีสเตรนเกจเป็นส่วนประกอบอยู่ภายในวงจรบริดจ์ วงจรจะถูกปรับโดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานสัมพันธ์ซึ่งต้องอาศัยอุปกรณ์อื่นมาต่อเพื่อแสดงสัญญาณแหล่งศักย์ไฟฟ้าจะถูกป้อนเข้าไปในวงจรบริดจ์ที่จุดต่อ

สัญญาณขาออก (Output node) ของบริดจ์มีอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า E_0 / E สมดุลกับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน $\Delta R / R_0$ และสมดุลกับปริมาณความเครียด ε

ส่วนประกอบที่ 3 ของระบบการวัดคือ เครื่องขยายสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ E_0 เพื่อให้ได้ค่าที่แสดงออกชัดเจน ซึ่งอาจแสดงออกได้ในรูปศักย์ไฟฟ้า $\bar{E}_0$ หรือในรูปของกระแส $\bar{I}_0$ ขั้นตอนนี้เป็นการแปรรูปลำดับที่ 3 สัญญาณที่แสดงออกทางเครื่องขยายสามารถต่อเข้ากับเครื่องมือแสดงผลในรูปแบบที่ต้องการต่อไปได้ ถ้าเครื่องขยายส่งผ่านสัญญาณโดยตรงทั้งหมดก็จะกล่าวได้ว่าสัญญาณ ขาออก $\bar{E}_0$ หรือ $\bar{I}_0$ แปรผันเป็นสัดส่วนกับสัญญาณ E_0 และกับค่าความเครียด

ส่วนประกอบที่ 4 ของระบบการวัดได้แก่เครื่องแสดงผล ขั้นตอนการแปรรูปในลำดับที่ 4 นี้เป็นการเพิ่มสัญญาณขาออกของเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณที่ผู้วัดอ่านได้ง่าย เครื่องมืออย่างง่ายแต่มีประสิทธิภาพได้แก่ โวลต์มิเตอร์หรือแอมป์มิเตอร์ที่แสดงผลแบบเข็ม ถ้าความเครียดเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้แก่การวัดเหตุการณ์พลวัติ ควรใช้เครื่องมือบันทึกสัญญาณแทนเครื่องมือแสดงผล เครื่องขยายบางประเภทสามารถต่อเข้ากับทั้งเครื่องบันทึกและเครื่องแสดงผลในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ส่วนใหญ่แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้แก่วงจรบริดจ์จะเป็นตัวจ่ายไฟให้กับเครื่องขยายด้วย ซึ่งแหล่งจ่ายไฟนี้อาจจ่ายให้ในรูปของกระแสสลับหรือจากแบตเตอรี่ (กระแสตรง) แหล่งจ่ายไฟอาจทำหน้าที่ควบคุมความต่างศักย์ที่ป้อนแก่วงจรบริดจ์ให้คงที่เพื่อลดความผิดพลาดเมื่อเกิดการเปลี่ยนความต่างศักย์เนื่องจากโวลต์ของแบตเตอรี่ลดลงหรือจากการแปรเปลี่ยนค่าโวลต์ของกระแสสลับ

ในหลายกรณี ส่วนประกอบที่ 2 ถึง 4 ของระบบการวัด นอกจากจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟแล้ว ยังต่อเข้ากับส่วนประกอบช่วยอื่นๆ โดยรวมกันเป็นรูปแบบของเครื่องมือชิ้นเดียวไม่สามารถแยกออกเป็นคนละส่วน ความหมายของการติดตั้งสเตรนเกจที่สมบูรณ์ไม่ใช่เพียงการติดตั้งสเตรนเกจลงบนชิ้นงานเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการต่อสายสัญญาณต่างๆ และการคลุมเพื่อป้องกันเกจ ดังนั้นคุณภาพของการติดตั้งสเตรนเกจจึงขึ้นกับสมบัติของสเตรนเกจเอง วิธีติดตั้ง ชนิดของสายไฟและการป้องกัน

2.6 การติดตั้งสเตรนเกจ

สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความเครียดของชิ้นงาน ความเครียดที่วัดได้สามารถนำมาใช้หาความเค้นของชิ้นงาน รูปร่างและปริมาณแรงที่กระทำบนชิ้นงาน ค่าที่วัดได้จากสเตรนเกจจะถูกต้องถ้าการ

ส่งผ่านคลื่นไม่ผิดพลาด และไม่มีการสูญเสียสัญญาณ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการวัด คือการต่อเชื่อมระหว่างสเตรนเกจกับชิ้นงานซึ่งต้องติดให้แน่นโดยใช้กาวชนิดพิเศษ ส่วนใหญ่การใช้สเตรนเกจจะวัดบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานซึ่งง่ายต่อการวัด (ผิวที่วัดอาจเป็นผิวภายนอกและภายในก็ได้) การวัดภายในชิ้นงานใช้ได้บางกรณีเท่านั้น เช่น การวัดด้านในของชิ้นงานส่วนที่มีขนาดใหญ่ ในกรณีของการวัดชิ้นงานที่เป็นพลาสติก เช่น ใช้เป็นต้นแบบของการติดตั้งสเตรนเกจ ตั้งแต่เริ่มต้นผลิตต้นแบบนั้น วิธีการติดตั้งสเตรนเกจแบบอื่น ๆ จะถูกจำกัดเฉพาะงาน ตัวอย่างเช่น การติดด้วยเซรามิกจะใช้สำหรับการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงและในงานโครงสร้างหลักจะใช้วิธีการเชื่อมจุด (spot welding) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จำเป็นต้องเลือกสเตรนเกจที่ใช้เฉพาะงานเท่านั้น คุณภาพของการติดตั้งและเลือกใช้สเตรนเกจ มีอิทธิพลมากต่อความแม่นยำ ดังนั้นจะกล่าวได้ว่าตัวสเตรนเกจเองเป็นเครื่องมือในการวัดแต่สเตรนเกจที่ติดตั้งเสร็จแล้วจึงจะเป็นเครื่องมือที่พร้อม

สเตรนเกจและการติดตั้ง มีความสำคัญร่วมกัน โดยทั่วไปอาจเลือกโดยวิธีเปรียบเทียบการประกอบกันของทั้งระบบการวัดว่าการประกอบชุดใดเหมาะสมที่สุดหรือมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดดังนั้นจึงควรเลือกใช้วิธีที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเหมาะสม บางครั้งพิจารณาความซับซ้อน หรือราคาด้วยทุกองค์ประกอบที่เลือกใช้ ไม่ว่าชนิดของสเตรนเกจ ตัวยึดติด ตัวป้องกัน จะขึ้นกับจุดที่ต้องการวัดอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ประกอบในการวัดก็ต้องได้รับการทดสอบเพื่อตรวจประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมก่อนที่จะนำมาใช้ประกอบในการวัด สมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานคุณภาพ

ถ้าปฏิบัติตามกฎก็เชื่อได้ว่าผลการวัดเชื่อถือได้แต่ไม่สามารถรับประกันได้ ถ้าใช้ชิ้นส่วนอื่นหรือใช้วิธีต่างออกไป ความสำเร็จในการติดสเตรนเกจไม่ได้ขึ้นกับชนิดของตัวยึดเพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นกับความชำนาญของผู้ปฏิบัติด้วย ตัวยึดชนิดต่าง ๆ จะมีข้อมูลวิธีใช้มาด้วยอย่างละเอียด

ดังนั้น ผู้ปฏิบัติงานจะต้องศึกษาข้อมูลเหล่านี้ให้เข้าใจดีเสียก่อน การเตรียมการอย่างรอบคอบเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับการวัดโดยเฉพาะการวัดที่มีขอบเขตกว้าง การเตรียมการประกอบด้วยการวางแผน การเตรียมวัสดุและการกำหนดตำแหน่ง ผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญเท่านั้นที่จะประสบความสำเร็จ ช่างเทคนิคผู้ร่วมงานจะต้องทราบข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ จำนวนเครื่องมืออุปกรณ์และวิธีวัดที่ใช้ทั้งหมด ผู้นำในการทดสอบต้องให้ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับงานที่จะทำการวัดและสภาวะในการวัด ผู้ทำการติดตั้งสเตรนเกจจะต้องทราบข้อมูลดังนี้

1. ตำแหน่งที่จะวัด ทิศทางการวางเกจบนชิ้นงาน (จะต้องมีแบบแสดงตำแหน่งและทิศทางการวัด)
2. แผงวงจรไฟฟ้า สายไฟและสเตรนเกจที่ใช้
3. วิธีการติดตั้งและวิธีที่ใช้วัด (เช่น ซีเมนต์ชนิดพิเศษ)
4. วัสดุประกอบ (ชนิดของสายไฟ ขนาดภาคตัดขวาง ฉนวนและอื่น ๆ)

5. การป้องกันการวัดจากผลกระทบทางกล ทางเคมี ทางไฟฟ้า ความร้อน หรืออื่น ๆ ซึ่งอาจทำให้จุดศูนย์คลาดเคลื่อน

2.7 ตัวยึดสเตรนเกจ

ในส่วนการติดตั้งมีรายละเอียดดังนี้

2.7.1 หน้าที่และการทำงานของตัวยึด

ตัวยึดทำหน้าที่เชื่อมติดสเตรนเกจกับผิวของชิ้นงานเพื่อส่งผลการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานไปยังเกจ การเลือกใช้ตัวยึดชนิดต่างๆ ขึ้นกับสภาวะที่ใช้งาน อิทธิพลที่มีผลกระทบและการเกาะยึดของตัวยึดเองรวมทั้งวิธีการยึดติด การยึดติดเป็นส่วนที่สำคัญมากของการวัดด้วยสเตรนเกจ ข้อได้เปรียบของการยึดติดที่นับว่าเหมาะสมกับการใช้สเตรนเกจมีดังนี้

1. ความเป็นไปได้ในการต่อวัสดุต่างชนิดกัน การยึดติดจะดีหรือไม่ขึ้นกับชนิดของซีเมนต์ว่าเหมาะสมกับอุณหภูมิที่ใช้หรือไม่
2. ไม่มีผลกระทบกับชิ้นงาน ยกเว้นวัสดุประเภทพลาสติก
3. สามารถควบคุมความเร็วในการทำงานโดยการเลือกชนิดของซีเมนต์หรือวิธีการยึดติดของซีเมนต์ (ยึดติดโดยใช้ความร้อน หรือยึดติดโดยไม่ใช้ความร้อน)
4. มีความต้านทานทางไฟฟ้าสูง ทำให้ลดความเป็นฉนวนระหว่างเกจและชิ้นงานลง

การเชื่อมติดกันของชิ้นส่วนขึ้นอยู่กับการยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์และผิวชิ้นงานโดยที่การยึดเหนี่ยวขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกัน สำหรับชิ้นงานที่มีพื้นผิวขรุขระจะมีแรงกระทำจากการดูดติด (clamping action) หรือแรงกระทำจาก capillary action เป็นแรงช่วยแต่ก็มีค่าน้อย ประสิทธิภาพของการเชื่อมติดที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลจากสภาพพื้นผิวของชิ้นงานซึ่งไม่ใช่เป็นการยึดเหนี่ยวทางกล

2.7.2 ชนิดของการยึดติด

สาเหตุที่มีการใช้ตัวยึดติดหลายชนิดนั้นเนื่องจากสภาวะการทำงานในพื้นที่ที่จะมีการยึดติดและความต้องการประสิทธิภาพของตัวยึดมีแตกต่างกัน เช่น มีความต้องการนำไปใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นสภาวะเดียวกันกับการติดตั้งสเตรนเกจ ดังนั้นการใช้ตัวยึดติดที่เหมาะสมกับ

สเตรนเกจจะทำให้ได้รับประสิทธิภาพการทำงานสูงที่สุด ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้ตัวยึดและสเตรนเกจที่ไม่สอดคล้องกันจะทำให้การติดตั้งและการใช้งานสเตรนเกจด้อยประสิทธิภาพ

การใช้ตัวยึดติดที่เหมาะสมร่วมกับสเตรนเกจเป็นเหตุผลทางเทคนิคแต่ในการติดตั้งสเตรนเกจแต่ละครั้งควรจะมีการศึกษารายละเอียดและข้อแนะนำทางเทคนิคที่แนบมาด้วยอย่างละเอียด

- ตัวยึดติดที่แข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำ (Cold curing adhesive)

ตัวยึดประเภทนี้จะใช้ง่ายไม่ซับซ้อน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ตัวยึดติดที่มีองค์ประกอบเดียวได้แก่ตัวยึดที่มีการแข็งตัวโดยไม่ใช้อากาศ (anaerobe curing) และตัวยึดติดที่มี 2 องค์ประกอบซึ่งปริมาณส่วนผสมทั้ง 2 ขึ้นกับการนำไปใช้ ถ้าการแข็งตัวเร็ว เรียกตัวยึดชนิดนี้ว่าตัวยึดแบบแห้งเร็ว (rapid adhesives) ตัวยึดชนิดเหมาะกับการใช้งานประเภทวิเคราะห์หาความเค้นหรืองานอื่นที่มีลักษณะคล้ายกัน

- ตัวยึดที่แข็งตัวที่อุณหภูมิสูง (Hot curing adhesives)

ตัวยึดชนิดนี้ใช้กับชิ้นงานที่สามารถทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิแข็งตัวได้เท่านั้น ส่วนใหญ่จะใช้กับการผลิตทรานสดิวเซอร์และใช้ได้กับชิ้นส่วนโครงสร้างที่สามารถทำการติดตั้งเกจก่อนที่จะทำการประกอบหรือสามารถถอดได้โดยที่เป็นวัสดุทนอุณหภูมิสูงเช่นกัน ในทางตรงกันข้ามกับตัวยึดที่แข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำ ตัวยึดชนิดนี้สามารถนำไปใช้งานได้มากกว่าและสามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิสูงและสำหรับการผลิตทรานสดิวเซอร์ตัวยึดที่แข็งตัวที่อุณหภูมิสูงนี้ยังให้ความแม่นยำสูงโดยเฉพาะเมื่อใช้งานร่วมกับเกจที่มีความแม่นยำสูงในการประกอบเป็นทรานสดิวเซอร์ ตัวยึดชนิดนี้มีทั้งแบบมีองค์ประกอบเดียวและ 2 องค์ประกอบ

- เซรามิกซีเมนต์ (Ceramic cements)

เหมาะกับเกจชนิดพิเศษซึ่งเป็นเกจชนิดที่ไม่มีขดลวด (free grid gauges) เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง (cryogemic range) เท่านั้น แต่บางครั้งก็อาจใช้งานที่อุณหภูมิต่ำมากได้

- เซรามิกแบบพ่นเปลว (Flame sprayed ceramics)

ใช้กับเกจชนิดพิเศษเหมือนกับตัวยึดชนิดเซรามิกซีเมนต์แต่จะต้องใช้อุปกรณ์พิเศษร่วมด้วย ช่วงอุณหภูมิของการติดตั้งนั้นใกล้เคียงกับของตัวยึดแบบเซรามิกซีเมนต์ แต่มีข้อดีกว่าคือ สามารถอุ่นชิ้นงานเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ขณะที่ทำการติดตั้งสเตรนเกจ ส่วนสมบัติทางด้านการดูดความชื้นของวิธีนี้ใกล้เคียงกับของเซรามิกซีเมนต์ ตัวยึดชนิดนี้สามารถใช้ได้ดีกับงานทางด้านปรมาณู

- การเชื่อมต่อเฉพาะตำแหน่ง (Spot welding connection)

เป็นหนึ่งในวิธีติดตั้งที่ง่ายที่สุด อุปกรณ์ที่ใช้ราคาแพง (ใช้กับเครื่องเชื่อมเฉพาะตำแหน่งขนาดเล็ก) ใช้เวลาในการเตรียมงานและการฝึกหัดสั้น แต่ไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้กันนักทั้งนี้เนื่องจากจะต้องใช้กับเกจ

ชนิดพิเศษ ซึ่งมีเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นและเกจที่สามารถนำไปเชื่อมติดได้นั้นก็สามารถผลิตได้เฉพาะขนาดเท่านั้นซึ่งทำให้มีข้อจำกัดในการติดตั้ง

การติดตั้งสเตรนเกจเฉพาะชิ้นงานบางชนิดไม่สามารถทำได้ ถึงแม้ชิ้นงานจะเป็นวัสดุที่สามารถเชื่อมได้ก็ตาม เนื่องจากจะเกิดอันตรายจากการกัดกร่อน (micro corrosion) เช่นในท่อไอน้ำที่มีความเค้นสูง ชิ้นงานประเภทออสเทนนิติก เป็นต้น ชิ้นงานควรจะมีความหนามากพอที่ปฏิกิริยาจากการเชื่อมเพื่อติดตั้งเกจนี้จะไม่ไปรบกวนการกระจายความเค้น เช่น ไม่ควรจะมีความเครียดเกิดขึ้น

● ตัวยึดแบบแห้งเร็ว X60

ตัวยึดชนิดนี้ใช้สำหรับวิเคราะห์ความเค้นในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -20 ถึง+50°C ช่างเทคนิคนิยมนำไปใช้ติดตั้งกับงานที่ไม่วิกฤติ การผสมส่วนผสมทั้ง 2 องค์ประกอบก่อนทำการยึดติดที่ดีทำให้ใช้เวลาการยึดติดเพียง 3 นาที ซึ่งช่วยลดเวลาในการติดตั้งลงมาก ตัวยึด X60 สามารถใช้ในการผลิตทรานสดิวเซอร์เพียงบางกรณีเท่านั้นเนื่องจากอาจให้ค่าผิดพลาดได้ประมาณร้อยละ 2-3

● ตัวยึดแบบแห้งเร็ว Z70

ตัวยึดชนิดนี้จะแห้งอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องการการปฏิบัติงานที่รวดเร็วและต้องการทักษะและความชำนาญในการติดตั้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับ X60 พบว่าตัวยึดแห้งเร็ว Z70 ช่วยให้การวัดมีความแม่นยำสูงกว่าทั้งนี้เนื่องจากขอบกาวจะบาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอีกด้วย โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 °C ขึ้นไปจนถึงขีดจำกัดสูงสุดของอุณหภูมิ การใช้ระยะเวลาสั้นในการติดตั้งและการแข็งตัวจะช่วยให้สามารถลดต้นทุนได้ Z70 เหมาะสมสำหรับการออกแบบและการผลิตทรานสดิวเซอร์ที่ต้องการความแม่นยำในระดับกลางถึงสูง

● ตัวยึด H3

มีจุดเด่นคือ ตัวยึดชนิดนี้แข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำสุดคือ25 °C) แต่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง (สูงถึง 200 °C) และสำหรับการวัดที่สมบูรณ์จะทำได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 140 °C แต่มีข้อสังเกตุคือจุดศูนย์อาจเคลื่อนเนื่องจากการให้ความร้อนในช่วงแรกของการวัดสูงกว่าอุณหภูมิที่แข็งตัวของกาว การเคลื่อนของจุดศูนย์นี้จะเพิ่มมากขึ้นถ้าอุณหภูมิระหว่างการแข็งตัวกับอุณหภูมิที่ให้ความร้อนขณะวัดในช่วงแรกนี้ต่างกันมากแต่หลังจากนั้นก็จะคงที่ ตัวยึด H3 นี้ไม่เหมาะในการทำทรานสดิวเซอร์

● ตัวยึด EP250

ตัวยึดแบบแห้งที่อุณหภูมิสูงชนิดซีเมนต์ 2 องค์ประกอบนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ความเค้นในช่วงอุณหภูมิที่กว้างและในการผลิตทรานสดิวเซอร์ โดยเฉพาะเมื่อประกอบเข้ากับสเตรนเกจรุ่น G สำหรับทรานสดิวเซอร์ที่ต้องการความแม่นยำสูง

- ตัวยึด EP310

ตัวยึดชนิดนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่จากซีเมนต์ EP250 ซึ่งไม่มีสารเจือปน ทำให้สามารถที่จะติดโดยใช้กาวบางลงได้ใกล้เคียงกับ Z70 ซึ่งแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการติดตั้งจะมีค่าน้อยมากและทำให้ส่งผ่านสัญญาณไปยังเกจได้ดีจะทำให้การวัดมีความแม่นยำมากขึ้น สำหรับในการวิเคราะห์ค่าความเค้นพบว่าสามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิปกติจนถึงอุณหภูมิที่ต่ำมาก ๆ การนำไปใช้ทำทรานสดิวเซอร์ที่ต้องการความถูกต้องสูงสามารถใช้เกจรุ่น G ร่วมกับ EP310

- ตัวยึดเซรามิกซีเมนต์ CR760

ซีเมนต์ชนิดนี้ใช้กับกรณีที่เป็นข้อจำกัดซึ่งไม่สามารถใช้ซีเมนต์ชนิดอื่นได้ จุดนี้คือข้อดีของซีเมนต์ชนิดนี้ ในระหว่างการติดตั้งสเตรนเกจรวมถึงขณะที่ใช้งานอยู่นั้นจะต้องมีการดูแลรักษาความสะอาดให้ดี ทั้งนี้เนื่องจากสิ่งสกปรกต่าง ๆ จะเกาะในรูพรุนของซีเมนต์ ซึ่งทำให้สูญเสียคุณสมบัติความต้านทานการเป็นฉนวนไปซึ่งทำให้สูญเสียสภาพการยึดติด CR760 เหมาะสำหรับทั้งใช้ในงานวิเคราะห์ความเครียดและสำหรับการผลิตทรานสดิวเซอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงแต่ความแม่นยำที่ได้จะต่ำ

2.7.3 การติดตัวยึด

สเตรนเกจสามารถใช้ยึดกับของแข็งได้เกือบทุกชนิด สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้นั้นขึ้นกับการเตรียมตำแหน่งที่จะทำการติดตั้ง

2.7.3.1 การเตรียมผิวโลหะเพื่อการยึดติด

ชนิดและขอบเขตวิธีการเตรียมผิวขึ้นอยู่กับสภาพของชิ้นงาน ประเภทของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานและปริมาณและชนิดของสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนชิ้นงาน ตารางที่ 1.1 แสดงถึงขั้นตอนการเตรียมวัสดุที่เป็นโลหะโดยมีจุดประสงค์เพื่อจะทำให้ผิวหน้าของวัสดุปราศจากรูพรุน รอยแตก และชั้นออกไซด์ซึ่งมีความจำเป็นต่อการวัดและเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นอีกด้วย ผู้ปฏิบัติงานจะต้องใช้วิจารณญาณในการตัดสินใจสำหรับแต่ละงานที่ปฏิบัติจริง

ตารางที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมการติดตั้งสเตรนเกจ

• การทำความสะอาดแบบหยาบ
• การปรับผิว
• การทำให้ผิวหยาบ (เพื่อการติด)
• การทำเครื่องหมายตำแหน่ง
• การทำความสะอาดและการขจัดคราบไขมัน
• การสร้างชั้นป้องกันการกัดกร่อน (Pickling)
• การล้างและการทำให้แห้ง

สำหรับผู้ปฏิบัติงานติดตั้งสเตรนเกจ ความเข้าใจอย่างถูกต้องของความหมายในทางเทคนิคของคำว่า "ความสะอาด" และ " การปนเปื้อน " นั้นมีความสำคัญต่อการปฏิบัติงาน ผิวหน้าชิ้นงานที่เปิดออกสู่ภายนอกนั้นถูกพิจารณาว่าเป็นส่วนที่ถูกปนเปื้อน ถึงแม้เมื่อมองดูด้วยตาจะเห็นว่ามีความสะอาดเรียบร้อยก็ตามส่วนสิ่งที่ถูกพัดพามาสู่ผิวหน้าของวัสดุ เช่น ฝุ่น ออกไซด์ การดูดซับความชื้นไอน้ำและก๊าซ จะเป็นตัวการทำให้คุณสมบัติการยึดติดของซีเมนต์เสื่อมลง ดังนั้นการยึดติดจึงควรการทำทันทีหลังจากผิวหน้าของชิ้นงานได้รับการทำความสะอาดแล้ว การเว้นช่วงระหว่างขั้นตอนการทำความสะอาดและการติดตั้งนั้นไม่สมควรการทำเป็นอย่างยิ่งถึงแม้จะทำการติดตั้งในห้องปฏิบัติการและในห้องปรับอากาศ

ช่วงระหว่างการทำความสะอาดและการติดตั้งไม่ควรเกิน 3 ชั่วโมง สำหรับสารที่เกิดออกไซด์ได้เร็ว เช่น ทองแดง อลูมิเนียม ไทเทเนียมและโครมผสมของธาตุเหล่านี้จำเป็นต้องทำการยึดติดทันทีหลังการทำความสะอาด

• การทำความสะอาดแบบหยาบ

สนิม สเก็ด ชิ้นของสารหล่อลื่นคราบสกปรก และสิ่งเปรอะเปื้อนต่างๆ จะต้องถูกขจัดออกจากบริเวณที่จะทำการวัดและบริเวณใกล้เคียงโดยการใช้เครื่องขูด (scrapers) พายขูดสี (spatulas) เครื่องขัดและเครื่องมือประเภทเดียวกัน สำหรับการทำความสะอาดแบบหยาบควรใช้สารเคมีในการขจัดคราบไขมันและสารหล่อลื่น เช่น คอสติกโซดา (Caustic Soda) แต่จะต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากคอสติกโซดาจะกัดผิว ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานควรสวมถุงมือและแว่นตา ข้อควรระวังสำหรับการใช้คอสติกโซดาคือ ไม่ควรใช้ทำความสะอาดอลูมิเนียม จากนั้นล้างให้สะอาดด้วยน้ำสะอาดหรือน้ำกลั่น ถ้าคราบไขมันถูกขจัดออกจนหมดจะสังเกตได้จากการที่น้ำจะเกาะตัวติดกันเป็นชั้นบนผิวชิ้นงาน เสร็จแล้วเช็ดให้แห้งด้วยแผ่นทำความสะอาด (cellulose pads)

● การขัดหยาบ

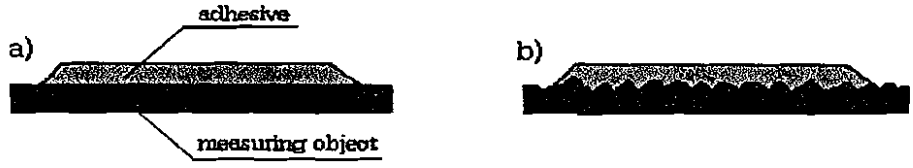
สนิม รอยบกพร่องบนชิ้นงาน และรอยขูดขีดจะทำให้เกิดความเครียด (notch strains) บนผิวชิ้นงานและยังส่งผลให้ค่าที่วัดได้มีความผิดพลาด สภาพผิวของชิ้นงานที่ขรุขระจะทำให้เกจยึดติดกับผิวชิ้นงานได้ไม่ดีดังนั้นจึงต้องมีการขัดผิวที่จะทำการยึดติดให้เรียบด้วยการเจีย การตะไบหรือใช้วิธีอื่นๆ ที่เหมาะสม เครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขัดผิวคือ การใช้หัวรองขัดพลาสติกที่สามารถเปลี่ยนกระดาษขัดได้เนื่องจากหัวรองขัดพลาสติกสามารถโค้งงอไปตามลักษณะของชิ้นงานและความละเอียดของกระดาษขัดก็สามารถเปลี่ยนได้ตามความต้องการ โดยเริ่มจากการใช้กระดาษขัดเบอร์หยาบก่อนแล้วเพิ่มความละเอียดขึ้นตามลำดับ ผิวที่จะทำการยึดติดนั้นไม่จำเป็นจะต้องเรียบเป็นมันเนื่องจากสเตรนเกจสามารถยึดติดได้ดีบนผิวที่ไม่เรียบมาก ผิวที่ถูกเคลือบด้วยตะกั่ว แคดเมียม ดีบุก อินเดียม (Indium) บิสมัส และวัสดุอื่นๆ อาจไม่สามารถทำการยึดติดด้วยซีเมนต์ได้ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องขจัดออกให้หมดก่อนทำการติดตั้ง ผิวที่เคลือบด้วยนิกเกิลก็ต้องขจัดออกด้วยเช่นกัน

● การทำความสะอาด

ในขั้นตอนนี้ คราบสกปรก ฝุ่นจากการขัดและคราบไขมันจะถูกขจัดออก การทำความสะอาดจะต้องทำอย่างทั่วถึงแต่ไม่จำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังมากเพราะจะมีขั้นตอนการทำความสะอาดอื่น ๆ ตามมาอีก สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดควรจะเป็นสารละลายที่เป็นสารละลายอินทรีย์ โดยรายละเอียดเพิ่มเติมจะกล่าวถึงในหัวข้อ " การทำความสะอาดขั้นสุดท้าย" น้ำมันชนิด mineral oil ที่ใช้ในงานขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยการม้วน (rolling) หรือของเหลวที่ใช้สำหรับงานเจาะ คว้าน ซึ่งไม่สามารถขจัดออกให้หมดได้ด้วยการใช้สารละลายที่เป็นสารอินทรีย์ธรรมดา ต้องใช้สารเคมีประเภทด่าง (alkaligents)แทน

● การทำให้ผิวหยาบ

การติดตั้งสเตรนเกจสามารถอาศัยแรงยึดติดระหว่างชิ้นงานและซีเมนต์ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางเคมีและสามารถเพิ่มแรงยึดติดได้ด้วยการเพิ่มพื้นผิวสัมผัส ซึ่งทำได้โดยการทำให้ผิวหยาบ วิธีที่ใช้คือวิธีทางกลเกือบทั้งสิ้น มีวิธีทางเคมีเพียงเล็กน้อย เช่น การสร้างชั้นป้องกันการกัดกร่อน (picking)



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของสภาพผิวชิ้นงานที่มีต่อประสิทธิภาพการยึดติด

a) ระนาบการยึดติดที่มีสภาพผิวเรียบ

b) ระนาบการยึดติดที่มีการปรับสภาพผิว (เป็นสภาวะที่ให้ผลดีที่สุด)

● การขัดผิวด้วยการพ่นทราย

พื้นผิวที่จะทำการยึดในทางทฤษฎีนั้นจะต้องผ่านการเตรียมโดยการพ่นทราย สภาวะพื้นฐานเพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานที่ปราศจากต่ำหนิคือ การใช้ลมอัดที่ไม่มีน้ำมันหรือน้ำผสมอยู่ จะต้องขจัดคราบไขมันเนื่องจากคราบไขมันจะได้ไม่ถูกฝังอยู่ในผิวชิ้นงานทำให้ขจัดออกได้ยาก (อาจจะทำความสะอาดโดยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง) ตัวพ่นที่เหมาะสมสำหรับการพ่นทรายคือ คาร์โบรันดัม(Carborundum) ซึ่งมีขอบแหลมมีความแข็งมาก สะอาดไม่ทำให้เกิดการสึกกร่อนและไม่ก่อให้เกิดอันตรายทางกายภาพ (ไม่มีอันตรายจากซิลิกอน)

โบโรคาร์ไบด์ เป็นวัสดุที่มีความแข็งใกล้เคียงกับโลหะแข็ง ค่าความแข็งอยู่ระหว่างเพชรและคาร์โบรันดัม ส่วนการแบ่งประเภทของโบโรคาร์ไบด์ขึ้นอยู่กับความแข็งของชิ้นงาน แรงดันลม ระยะระหว่างหัวเป่าและชิ้นงานและประเภทของเครื่องมือที่ใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงเบอร์มาตรฐานจองตัวพ่นชนิดคาร์โบรันดัม หรือกระดาษขัดที่ใช้สำหรับชิ้นงานเพื่อติดตั้งสเตรนเกจ

ชนิดของวัสดุชิ้นงาน	การขัดผิวด้วยการพ่นทราย คาร์โบรันดัม				เบอร์กระดาษขัด
	แรงดันลม (bar)	ระยะห่าง (ซม.)	เบอร์ของเกรน	ขนาดอนุภาค µm	
เหล็กชุบแข็ง	4	20	80...100	160...115	80...100
เหล็กละมุน	4	20	115...75	115...75	100...180
อลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม (Alloys)	4	20	45...29	45...29	220...360

ป
TA
413.5
ก592
ง545

4740040

- 2 ธ.ค. 2546

ถ้าใช้ซีเมนต์ชนิดไซยาโนอะครีเลต (Cyano-acrylate cement) ค่าความหยาบที่ได้จะมีค่าน้อย ส่วนความหยาบที่มีค่ามากนั้นเหมาะสมกับการนำไปใช้ร่วมกับตัวยึดเซรามิกและค่าความหยาบของผิวที่หอสมุด เหมาะสมสำหรับตัวยึดแต่ละชนิด (r.m.s. value)แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความหยาบของผิวและชนิดของตัวยึดสเตรนเกจที่เหมาะสม

ชนิดของตัวยึด	ค่าความหยาบเฉลี่ยของผิว μm
ตัวยึดแบบแห้งเร็ว x60	3...10
ตัวยึดแบบแห้งเร็ว z70	2...4
ตัวยึด H3	4...10
ตัวยึด EP310	2...4
เซรามิกซีเมนต์ CR760	10...20

- การขัดผิวด้วยกระดาษขัด (emery)

ถึงแม้ว่าข้อดีของการขัดผิวด้วยการพ่นทรายจะมีมากแต่ก็มีข้อจำกัดการนำไปใช้งาน เนื่องจากอุปกรณ์ที่หาได้ยากและอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้ซึ่งทำให้ไม่สามารถขัดด้วยวิธีนี้ได้จึงต้องใช้กระดาษขัดแทนและผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเป็นที่น่าพอใจหากนำไปใช้อย่างถูกต้องโดยการขัดเป็น วงบนผิวชิ้นงานเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดความเค้นที่จะทำให้ความมีเสถียรภาพของชิ้นงานลดลง กระดาษขัดที่ใช้ต้องเป็นกระดาษใหม่ที่มีเบอร์เหมาะสมกับวัสดุที่จะทำการขัด

- การขัดผิวด้วยวิธีทางกลอื่น ๆ

สำหรับวัสดุอ่อนการขัดผิวด้วยกระดาษขัด (emery) จะหยาบเกินกว่าที่จะทำการวัดได้ เช่น วัสดุที่ไวต่อความเค้นที่เกิดจากรอยบาก (notch stress) วัสดุที่มีการสเคลือบผิวหรือวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งที่ผิว ซึ่งจะต้องรักษาสภาพการชุบผิวและการชุบแข็งไว้ วิธีการขัดทางกลที่เบาที่สุดเพื่อขจัดชั้นออกไซด์ออกจากผิวชิ้นงานเหล่านี้คือการขัดด้วยใยแก้ว (glass fiber eraser) หรือน้ำยาแก้คำผิดที่ใช้กับพิมพ์ดีด หรือยาง (India rubber) ที่มีอนุภาคของแก้วเป็นส่วนผสม

2.8 ผลกระทบและการชดเชยในวงจรบริดจ์

เมื่อพิจารณาสมการวงจรบริดจ์จะทำให้เข้าใจหลักการทำงานของวงจรบริดจ์และวิธีชดเชยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเกจที่เกิดจากสิ่งรบกวนภายนอกคือ เกจที่อยู่บนแขนที่ใกล้กันของวงจร ถ้ามีการเปลี่ยนค่าความต้านทานไปในทิศทางเดียวกัน (ไปทางลบหรือบวกเหมือนกัน) จะได้ค่าที่หักล้างกันเมื่อพิจารณาด้านขาออกของสัญญาณ ดังนั้นถ้าจัดตำแหน่งของเกจบนทรานสดิวเซอร์ โดยให้สัญญาณจากสิ่งรบกวนเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกันบนแขนที่ใกล้กับผลกระทบที่เกิดขึ้นของแต่ละสัญญาณะหักล้างกัน สิ่งรบกวนที่นำมาพิจารณาได้แก่ อุณหภูมิ , ความชื้น , ความดัน , สุญญากาศ , สนามแม่เหล็ก , การแผ่รังสี เป็นต้น ตัวแปรเหล่านี้มีผลกระทบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเกจและวัสดุที่ใช้ทำเกจ โดยปกติจะป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับเกจให้มากที่สุดและกำจัดผลกระทบที่ยังเหลืออยู่ด้วยวิธีการชดเชยนี้

2.8.1 ผลกระทบจากอุณหภูมิ

การตอบสนองของสเตรนเกจต่ออุณหภูมิคือ การเปลี่ยนสัญญาณขาออกของสเตรนเกจเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิในขณะที่ไม่มีความเค้นเกิดขึ้นบนชิ้นงานหรือในขณะที่มีความเค้นคงที่ ลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของชิ้นงานหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงในระหว่างการวัด

2.8.1.1 การชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิในวงจรวีสสโตนบริดจ์ (Temperature Compensation in the Wheastone Bridge)

เมื่อพิจารณาลักษณะการทำงานและสมการในการวิเคราะห์ของวงจรวิสสโตนบริดจ์ไปแล้วแต่สิ่งที่จะลืมไม่ได้ก็คือผลกระทบอันจะทำให้ค่าที่วัดออกมาได้มีค่าไม่แม่นยำ นั่นก็คือผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ สิ่งที่ทำให้เราต้องคำถึงผลกระทบอันนี้ก็เนื่องมาจากความจริง 2 ประการคือ

1. ตัวต้านทาน(ในที่นี้ก็คือสเตรนเกจ) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป(ดูภาคผนวก)
2. ในขณะที่ติดตั้งสเตรนเกจกับชิ้นงานเรียบร้อยแล้วอุณหภูมิทำให้ชิ้นงาน(ที่จะทำการวัด) มีการยืดหรือขยายตัวก่อนที่จะทำการโหลดแรงเข้าไปในชิ้นงาน

สรุปก็คือ ในขณะที่ติดตั้งสเตรนเกจกับชิ้นงานแต่ยังไม่ได้ให้โหลดแรงเข้าไป(ยังไม่ได้เริ่มที่จะวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป) อุณหภูมิจะทำให้ตัวเกจเกิดมีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลง(ไปก่อนหน้า)และชิ้นงานจะมีการยืดหดตัวทำให้เกจมีค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง(ไปก่อนหน้า) ทั้งสองผลกระทบนี้ทำให้ค่าที่วัดได้มีค่าไม่แม่นยำ

ซึ่งการชดเชยนี้สามารถทำได้อย่างง่ายคือการ ติดตั้งสเตรนเกจตัวที่สองที่เรียกว่า ***เกจหุ่น (Dummy gage)*** บนชิ้นงานที่จะทำการวัดเช่นเดียวกับเกจใช้งาน(Active gage) โดยใช้หลักการที่ว่า เกจทั้งสองที่ติดตั้งบนชิ้นงานเดียวกันแล้ว ย่อมจะเกิดผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเหมือนกัน(เท่าๆกัน) ซึ่งลักษณะการต่อของเกจหุ่นในวงจรวีสสโตนบริดส์ จะเป็นไปตามรูป 2.10 โดยให้เกจหุ่นคือความต้านทาน R_2 ซึ่งจากสมการ

บริดจ์ที่สมดุลที่มีความสัมพันธ์

$$\frac{R_1}{R_4}=\frac{R_2}{R_3}$$

และจะเห็นว่าความสัมพันธ์นี้ยังสมดุลแม้ว่า

$$\frac{R_1}{R_2}=\frac{R_4}{R_3} \qquad ...(2.31)$$

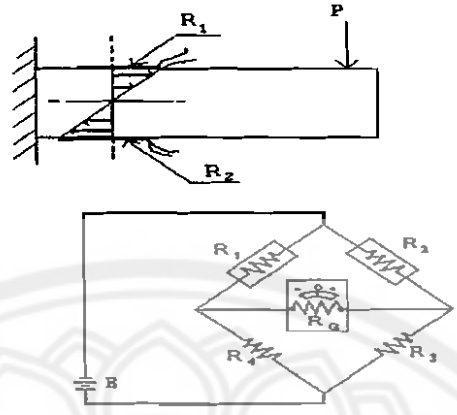
โดยที่เราทราบมาแล้วว่า R_2 และ R_4 เรียกว่า แขนของบริดจ์(Bridge arm)

ต่อมาเรามาพิจารณาความสัมพันธ์ข้างต้น ถ้าให้ R_1 คือ เกจใช้งาน R_2 คือ เกจหุ่น ซึ่งเกิดผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ΔR เท่าๆกัน ดังนั้นจะได้

$$\frac{R_1+\Delta R_1}{R_2+\Delta R_2}=\frac{R_4}{R_3} \qquad ...(2.32)$$

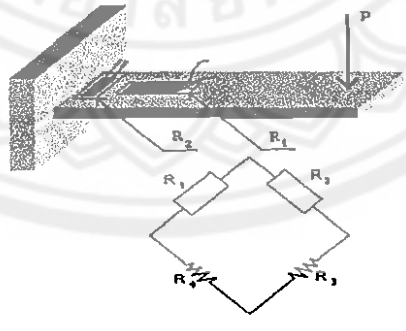
จะเห็นว่าค่าที่ได้จาก (2.32) มีค่าเท่ากับ (2.31) เพราะอัตราส่วน $\frac{R_1+\Delta R_1}{R_2+\Delta R_2}$ เท่ากับ $\frac{R_1}{R_2}$ การทำเช่นนี้สามารถชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิได้ ข้อสำคัญตัว เกจหุ่น สามารถใช้ R_2 หรือ R_4 ก็ได้แต่ต้องไม่ใช่ R_3 เพราะจะทำให้บริดส์ไม่สมดุล

ยกตัวอย่างการกระทำดังกล่าวได้โดยพิจารณา รูปที่ 2.10 เราต้องการจะวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปโดยพร้อมกับชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ เราสามารถติดเกจ R_1 และ R_2 ดังแสดงในรูป โดยจะเห็นว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ R_1 มีขนาดเท่ากับ R_2 แต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม ลักษณะเช่นนี้ก็จะสามารถชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิได้เช่นกันแต่ว่า ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในลักษณะที่มีการต่อเกจ 2 ตัวแบบนี้ จะมีค่าเป็น 2 เท่าของความเป็นจริง เรียกค่าที่เกินนี้ว่า ***บริดจ์แฟกเตอร์ (Bridge Factor)*** โดยถ้าต่อแบบอื่นๆ ก็จะมีค่า บริดส์เฟคเตอร์ แตกต่างกันเป็นเท่าไป



รูปที่ 2.10 การติดตั้งสเตรนเกจบนคานยื่นเพื่อชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิ

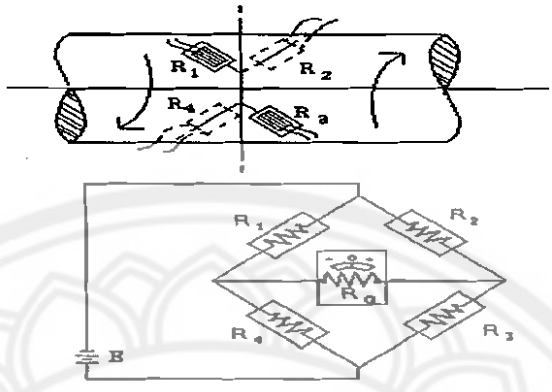
และในกรณีข้างต้นหากการติดตั้ง R_2 ทำได้ลำบากเราสามารถติดตั้ง R_2 ในลักษณะดังรูป 2.11 ได้ จะเห็นว่าการติดตั้ง เกจหุ่นเพื่อชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ แบบนี้เราจะติดตั้ง R_1 และ R_2 ทำมุมฉากกัน ซึ่งยังคงใช้แนวความคิดเดิมกับแบบข้างต้น แต่เราจะประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์อย่างหนึ่งของวัสดุก็คือ ***อัตราส่วนปัวซองค์(Poisson 's ratio)*** เพราะเมื่อมีการโหลดแรงกระทำกับวัสดุ จะเกิดการยืดตัวในแนวของ R_1 (ความต้านทานเปลี่ยน : พิจารณาจากรูปที่ 2.11) แต่ในแนวของ R_2 ตัว ตามความสัมพันธ์ของอัตราส่วนปัวซองค์ของวัสดุชิ้นเดียวกัน ซึ่งมีค่าประมาณ 0.25 – 0.35 ของวัสดุส่วนใหญ่ ซึ่งในกรณีนี้บริดจ์แฟกเตอร์จะมีค่าประมาณ 1.25 ซึ่งเราต้องอย่าลืมพิจารณาค่าตรงนี้ด้วย



รูปที่ 2.11 การติดตั้งเกจแบบใช้อัตราส่วนปัวซองค์เข้าช่วย

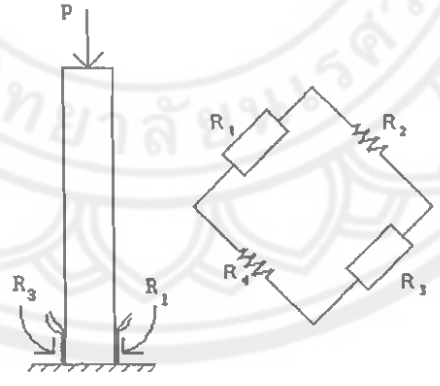
แต่ในบางกรณีที่วัสดุที่ทำการวัดค่าความเครียดเกิดแรงดึงและแรงอัดบนผิวเดียวกันดังนั้นการติดตั้ง ตัวเกจจึงต้องใช้เกจใช้งานถึง 2 ตัว และเพื่อชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิจึงติดตั้งเกจหุ่นจับคู่กับเกจ

ใช้งานอีกอย่างละตัวรวมการใช้เกจทั้งหมด 4 ตัว ดังรูปที่ 2.12 เป็นการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นผลชิ้นงานที่เกิดแรงบิด โดยอาศัยหลักการที่ว่าความเครียดดึงและอัด มีค่าเท่ากันเสมอ



รูปที่ 2.12 การติดตั้งเกจ 4 ตัวเพื่อวัดความเครียดของวัสดุที่เกิดแรงบิด

หรือในตัวอย่างถัดมา ถ้าเราต้องการวัดความเค้นอัด เช่นที่เกิดขึ้นในเสา (ในกรณีนี้พิจารณาความเครียด ที่เกิดขึ้นจากแรงตามแนวแกนเท่านั้น) ซึ่งในกรณีนี้เราจะติดตั้งสเตรนเกจในทิศทางตรงกันข้ามกันของเสาบริเวณที่ฐาน ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีเครื่องหมายเหมือนกันหมด(จากแรงอัด) ซึ่งจะพิจารณาความเค้นแบบชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิธรรมดา แต่หากว่าแรงแรงกระทำเยื้องศูนย์อันก่อให้เกิดแรงบิดเราต้องใช้ เกจใช้งาน 2 ตัวผนวกกับเกจหุ่นอีก 2 ตัว และพิจารณาค่าที่เกิดขึ้นคล้ายกับคานยื่น



รูปที่ 2.13 แสดงการติดตั้งเกจบนเสา

ดังที่ได้กว่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่าการชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมินั้น มีความสำคัญไม่น้อย ซึ่งยังมีลักษณะการวัดอีกหลายแบบที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้เช่นการวัดความเครียดแบบพลศาสตร์ (Dynamic strains) แต่ในบางกรณีก็ไม่จำเป็นต้องชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมินี้เช่น ในวัสดุที่

รับแรงกระชากหรือกระแทก(Shock or Impact) และยังจะพบอีกว่าการชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ สามารถติดตั้งหรือดำรงค์อยู่กับชิ้นงานหรือวัสดุได้ยาวนาน เพราะทั้งเกจใช้งานและเกจหุ่นนั้นมีค่าความต้านทาน เกจเฟกเตอร์ และค่าต่างๆใกล้เคียงกัน ถ้าเกจนั้นผลิตมาจากที่เดียวกัน ซึ่งค่าความผิดพลาด(errors)ของการชดเชยอุณหภูมินี้มีค่าน้อยมากประมาณ 0.003 L/L และยังมีความสำคัญอีกไม่น้อยสำหรับการชดเชยอุณหภูมิสำหรับเกจหุ่นทั้ง 2 ตัวที่ใช้เป็นแขนของวงจร ซึ่งต้องมีแฟกเตอร์เข้าไปคูณเพื่อลดค่าเหล่านั้น ซึ่งค่าแฟกเตอร์เหล่านั้น จะแสดงมาพร้อมกับอุปกรณ์ที่ซื้อมาจากโรงงาน และจากการทดลองพบว่าการติดตั้งเกจบนชิ้นงานที่มีผิวโค้ง จะมีผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิมากกว่าผิวที่แบนเรียบ หรือพูดให้เข้าประเด็นก็คือ การชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิจะไม่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ถ้านำเอาเกจไปติดตั้งในบริเวณที่เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆของท่อนหมุน(shaft)หรือบริเวณคอคอด คล้ายกันการชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิของตัวเกจเอง (self-temperature-compensating) ก็อาจจะส่งผลทำให้เกิดการชดเชยที่ไม่สมบูรณ์ได้ในบางสภาวะ อันเนื่องมาจากความจริงที่ว่า เวลาที่เกจถูกติดตั้งแต่ปลายของเกจ(ซึ่งมีความละเอียดมาก) สัมผัสกับผิวของชิ้นงานอย่างไม่เท่ากันตลอดทำให้ผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิเกิดไม่เท่ากัน ซึ่งผลกระทบนี้จะไม่นำมาคิดหากรัศมีของความโค้งของชิ้นงานมากกว่า 1.25 เซนติเมตร

การตอบสนองต่ออุณหภูมิไม่สามารถวัดได้ที่อุณหภูมิคงที่ ลักษณะการตอบสนองต่ออุณหภูมิเกิดจากสาเหตุ 5 ประการได้แก่

- การขยายตัวของชิ้นงานเนื่องจากความร้อน
- การขยายตัวของขดลวดที่ใช้ทำสเตรนเกจ
- ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด
- ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของสายสัญญาณที่ต่ออนุกรมกับสเตรนเกจ
- อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

โดยทั่วไปเราทำการวัดความเครียดเมื่อมีแรงกระทำหรือมีสภาพความเค้นทางกลเกิดขึ้นกับชิ้นงาน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะทำให้เกิดการขยายตัวของวัสดุแต่ไม่ทำให้เกิดความเค้นทางกลแก่วัสดุซึ่งสเตรนเกจไม่สามารถแยกสัญญาณความเครียดทั้งสองนี้ได้ ค่าความต้านทานของเกจที่ติดตั้งบนชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานงานเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงาน ถ้าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเกิดขึ้นระหว่างที่ชิ้นส่วนของโครงสร้างได้รับภาระกระทำทางกล สัญญาณที่วัดได้จะเป็นสัญญาณรวมซึ่งเกิดจากความเค้นทางกล (ε_{μ}) ซึ่งเป็นผลกระทบที่ต้องการวัดและผลกระทบที่ไม่ต้องการจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (ε_{w}) ดังสมการ

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot (\varepsilon_M + \varepsilon_W) \qquad ...(2.33)$$

ถ้าสเตรนเกจจำนวน 4 ตัว ถูกติดตั้งบนชิ้นงานและต่อเข้ากับวงจรบริดจ์จะปรากฏผลดังนี้

สเตรนเกจหมายเลข	(ε_M)	(ε_W)
1	บวก	บวก
2	ลบ	บวก
3	บวก	บวก
4	ลบ	บวก

จากตารางด้านบนจะเห็นได้ว่าความเครียดจากอุณหภูมิของสเตรนเกจทุกตัวมีค่าเป็นบวกเหมือนกัน ถ้าเกจทุกตัวมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เท่ากัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{E_0}{E} = \frac{F}{4}\left[(\varepsilon_M + \varepsilon_W)_1 - (-\varepsilon_M + \varepsilon_W)_2 + (\varepsilon_M + \varepsilon_W)_3 - (-\varepsilon_M + \varepsilon_W)_4\right]$$
$$= \frac{F}{4} \cdot 4\varepsilon_M \qquad ...(2.34)$$

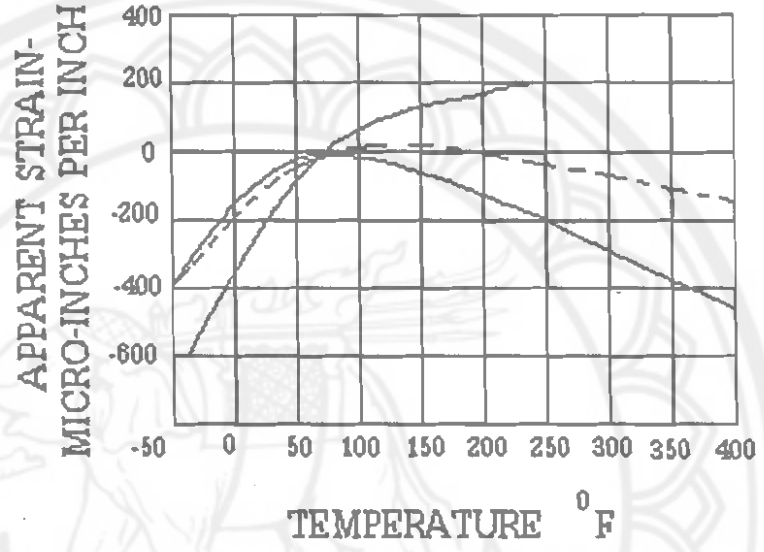
จะเห็นได้ว่าผลกระทบเนื่องจาก ε_W ได้รับการขจัดออกไป ซึ่งสมการข้างต้นยังไม่ได้ปรับให้เป็นค่า με

2.8.1.2 การชดเชยอุณหภูมิเนื่องมาจากอุณหภูมิของตัวสเตรนเกจเอง

(The Self-Temperature-Compensating Strain Gage)

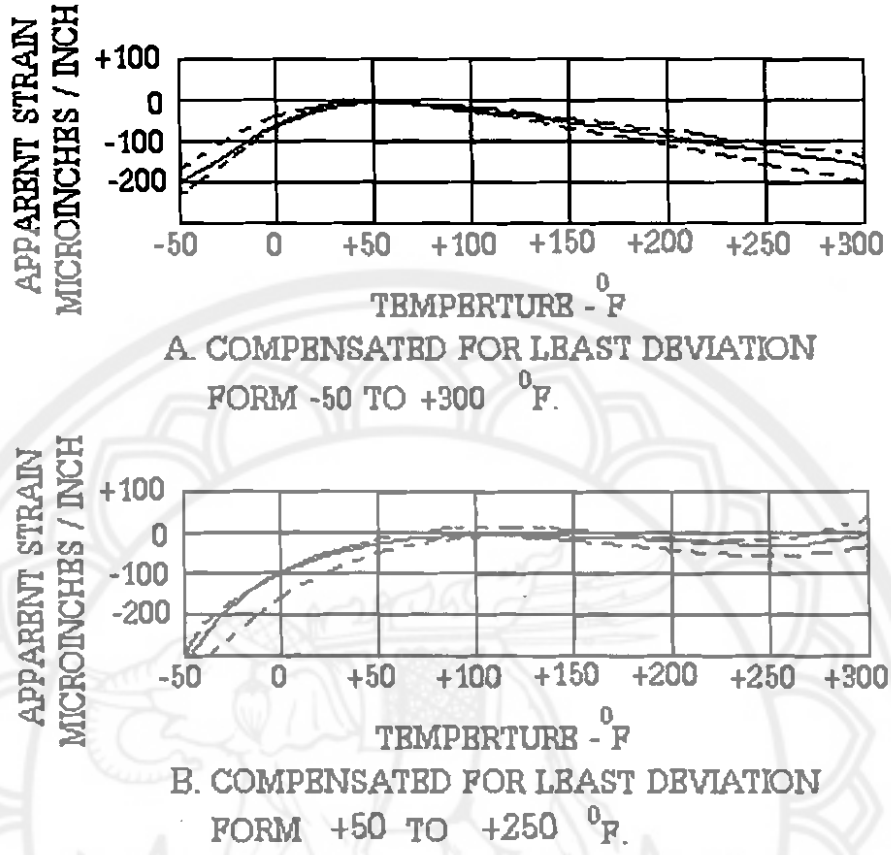
ในเวลาที่เราจะทบสอบชิ้นงานซึ่งขณะนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นไปไม่ได้จะทำการติดตั้งทั้งเกจใช้งานและเกจหุ่นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพร้อมกัน(การชดเชยผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิอย่างสมบูรณ์) ในกรณีเช่นนี้การชดเชยอุณหภูมิเนื่องมาจากอุณหภูมิตัวสเตรนเกจเองต้องถูกนำมาพิจารณา ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจากผลกระทบนี้จะมีค่าประมาณ 0.1 – 1.0 micro L/L ต่อองศาฟาเรนไฮน์(F) ซึ่งขึ้นอยู่กับเกจแต่ละชนิด

การชดเชยอุณหภูมิเนื่องมาจากอุณหภูมิตัวสเตรนเกจเองสามารถแก้ปัญหาด้วยวิธีการหลายวิธีการ วิธีการที่หนึ่งที่นิยมใช้ก็คือ การคัดเลือกวัสดุที่จะนำมาประกอบทำตัวสเตรนเกจอย่างระมัดระวัง ซึ่งต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทำการทดสอบซึ่งกระบวนการนี้ทางโรงงานผู้ผลิต จะจัดแสดงเส้นโค้งแสดงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อเกจถูกติดตั้งบนชิ้นวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงความเครียดที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อเกจถูกติดตั้งบนชิ้นวัสดุ

วิธีที่สองที่นิยมคือ ทางโรงงานที่ผลิตจะผลิตสวดสองตัวในสเตรนเกจที่มีความแตกต่างกันของวัสดุ ซึ่งวัสดุทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันในทางความยาว(Relative lengths) จนเป็นอัตราส่วนต่อกัน ดังนั้นเมื่อทราบการเปลี่ยนแปลงของวัสดุชนิดหนึ่งก็จะทราบการเปลี่ยนแปลงของอีกวัสดุหนึ่ง ซึ่งรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างลักษณะบางชนิดของสเตรนเกจที่ชดเชยผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิของตัวเกจเอง



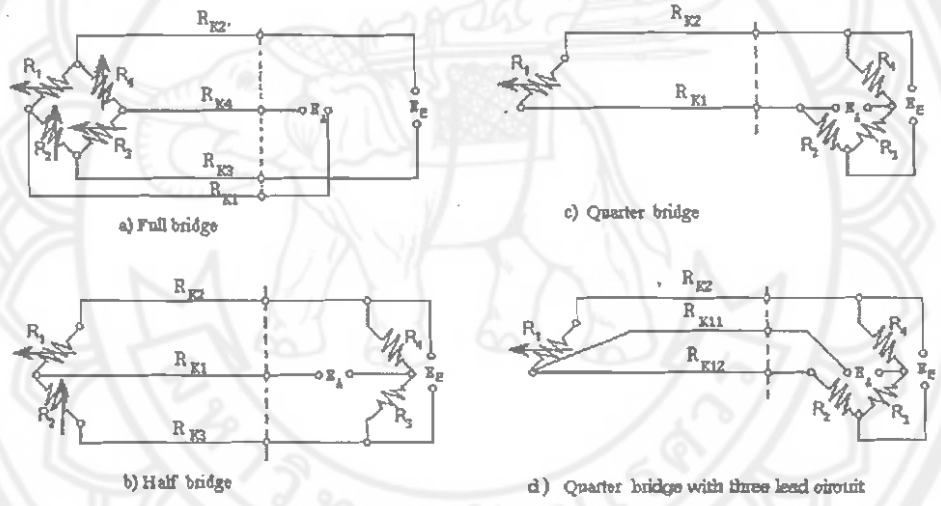
รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างลักษณะบางชนิดของสเตรนเกจที่ชดเชยผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิของตัวเกจเอง

ซึ่งลักษณะการผลิตเกจในประเภทนี้นิยมออกแบบ โดยใช้เกจ 2 และ 4 ขาในวงจรวีสสโตน**บริดจ์** ซึ่งลักษณะการชดเชยในประเภทที่สองนี้ จะสามารถทำงานได้ดีกับเกจหุ่นด้วย

2.8.2 ผลกระทบจากการสูญเสียอุณหภูมิในสายไฟ

ความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความยาวและพื้นที่หน้าตัดของตัวนำไฟฟ้าสายไฟมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงควรใช้สายไฟขนาดสั้นที่สุดที่จะทำได้และควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เพราะการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสายไฟจะมีค่าน้อยถ้าความต้านทานของสายไฟเริ่มต้นมีค่าน้อย

จากการพิจารณาวิธีการต่อวงจรแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 พบว่ามีสิ่งที่ต่างกัน 2 ประการ คือ ในวงจรฟูลบริดจ์ (full bridge) วงจรบริดจ์จะสมบูรณ์ด้วยตัวมันเองความต้านทานของสายไฟจะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับวงจรบริดจ์ สำหรับวงจรอื่นที่เหลือวงจรจะสมบูรณ์ได้ต้องต่อสายไฟเข้าเป็นส่วนประกอบด้วย รวมทั้งการต่อเครื่องขยายสัญญาณ



รูปที่ 2.16 การต่อสเตรนเกจกับส่วนประกอบของเครื่องขยายสัญญาณ

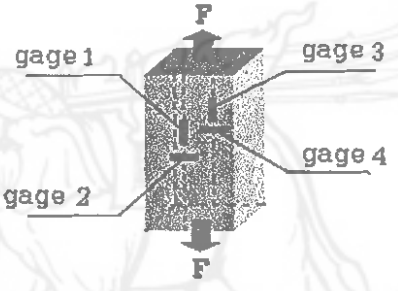
2.9 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้สเตรนเกจเพื่อวัดค่าความเครียด

การใช้สเตรนเกจเพื่อที่จะวัดค่าความเค้น สามารถประยุกต์ใช้ได้กับชิ้นงานทดสอบที่หลากหลาย ได้แก่

2.9.1 การวัดค่าความเครียดในชิ้นงานที่มีแรงดึง

ความเครียด $\varepsilon_1 = \sigma / E$ จะเกิดขึ้นในชิ้นงานในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำเมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึง ปกติจะมีความเครียด $\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1$ เกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากด้วย ผลเนื่องจากความเครียดทั้งสองนี้จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน $\Delta R_1 = \varepsilon_1 \cdot F \cdot R_1$ เกิดขึ้นในวงจรเกจตัวที่ 2 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน $\Delta R_2 = -\mu \cdot \varepsilon_1 \cdot F \cdot R_2$ ส่วนเกจตัวที่ 3 และ 4 นั้นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน

$$\frac{E_0}{E} = \frac{F \times 2.6 \times \mu\varepsilon \times 10^{-6}}{4} \qquad \text{...(2.35)}$$



รูปที่2.17 ชิ้นงานที่ได้รับแรงดึง

ข้อสังเกต :

วงจรวีสสโตนบริดจ์ที่มีเกจทำงาน 4 ตัวเมื่อวัดสัญญาณขาออก จะได้สัญญาณเป็น 2.6 เท่าของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทางของความเค้นหลักอาจเรียกว่า บริดจ์แฟคเตอร์ " B " (bridge factor "B") ดังนั้นเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{E_0}{E} \approx \frac{F \times B \times \varepsilon_1}{4} \qquad \text{...(2.36)}$$

ถ้าต้องการวัดแรงกด (compressive force) เครื่องหมายของค่า ε_1 ถึง ε_2 จะเป็นตรงกันข้าม ถ้าไม่ทราบค่าของ ε_1 ซึ่งเป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทางหลัก เราสามารถแก้ (2.34) หาค่าของ ε_1 ได้เป็น

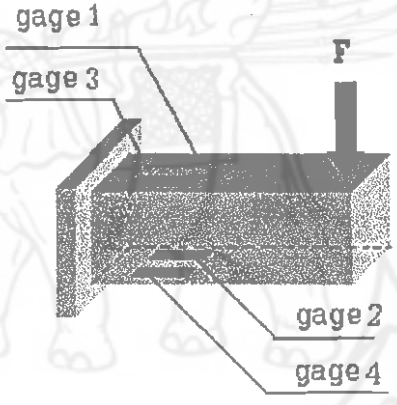
$$\varepsilon_1 = \frac{4 \times E_0}{E \times B \times F} \qquad \text{...(2.37)}$$

ถ้าใช้วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์ซึ่งมีเกจใช้งานเพียง 2 ตัว คือเกจหมายเลข 1 และเกจหมายเลข 2 จะได้สัญญาณออกมาเพียงครึ่งหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากค่าเกจแฟคเตอร์ (gage factor;B) มีค่าเพียง 1.3 เท่านั้น

การทำงานร่วมของ R_1 กับ R_3 ที่เกิดจากเกจใช้งาน และ R_2 กับ R_4 ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่มีค่าคงที่ทำให้ได้ค่าแฟคเตอร์เท่ากับ 2 ในกรณีนี้จะไม่สามารถชดเชยการขยายตัวเนื่องจากความร้อนหรือผลกระทบอื่นๆได้ แต่อย่างไรก็ตามวงจรนี้สามารถชดเชยแรงดัดโค้ง (bending force) ที่เกิดขึ้นได้

2.9.2 การวัดค่าความเครียดในคานยื่น

การวัดค่าความเครียดในคานยื่นเป็นแบบที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงการติดตั้งสเตรนเกจบนคานยื่น

ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นด้านล่างและด้านบนของคานจะมีค่าเท่ากันแต่จะมีเครื่องหมายตรงกันข้าม ซึ่งแสดงว่า

$$\frac{E_0}{E} = \frac{F}{4}\left[\varepsilon_1-(-\varepsilon_2)+\varepsilon_3-(-\varepsilon_4)\right] \text{ ; สมมุติให้ } |\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3| = |\varepsilon_4|$$

จากสมการข้างต้นจะได้ค่าบริดจ์แฟคเตอร์ (B) มีค่าเท่ากับ 4 ถ้าใช้สมการ (2.36) จะได้ว่า

$$\frac{E_0}{E} = \frac{F}{4}(B) \times |\varepsilon| = F \times |\varepsilon| \qquad \text{...(2.38)}$$

ขนาดความเครียดที่เกิดขึ้นจะได้

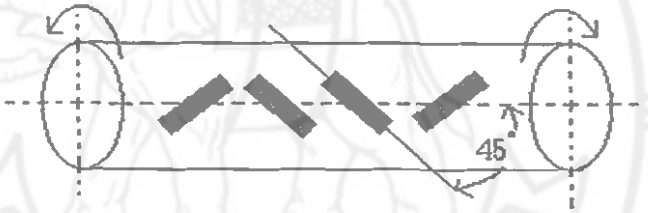
$$|\varepsilon| = \frac{E_0}{E \times F} \qquad \text{...(2.39)}$$

เครื่องหมายของความเครียดจะเป็นบวกในด้านที่เกิดแรงดึง(Tension Side) และในด้านที่เป็นลบเกิดแรงกด(compressive side) สามารถใช้หลักการนี้ในการคิดเครื่องหมายของความเครียดได้

ในกรณีที่สามารถติดตั้งเกจบนคานได้เพียงสองตัว ควรใช้เกจหมายเลข 1 และหมายเลข 2 จะได้เกจแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 2

2.9.3 การวัดค่าความเครียดบนเพลาที่มีแรงบิด

การวัดความเครียดบนเพลาเป็นสภาวะที่ไม่ซับซ้อนเช่นเดียวกับกรณีของคานยื่น ค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนเพลาที่มีแรงบิดนี้จะอยู่ที่ตำแหน่ง $\pm 45^0$ จากระนาบของแนวเฉือน (shear plane) หรือที่ $\pm 45^0$ จากแนวแกนของเพลาเอง ซึ่งก็คือเพลาอันเดียวกัน การติดตั้งควรติดตั้งตามตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การติดตั้งสเตรนเกจบนเพลาที่มีแรงบิด

เมื่อเพลาเกิดแรงบิดตามเข็มนาฬิกา เกจหมายเลข 1 และ 3 จะวัดค่าความเครียดได้เป็นค่าบวก ส่วนเกจหมายเลข 2 และ 4 จะวัดค่าความเครียดได้เป็นค่าลบ โดยค่า $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ และ ε_4 มีขนาดเท่ากัน ตามสมการ (2.34) สามารถรวมค่าความเครียดทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อ B = 4 จะได้

$$\frac{E_0}{E} = \frac{F \times B \times \varepsilon}{4} = F \times \varepsilon \qquad \text{...(2.40)}$$

และสามารถหาขนาดของความเครียดได้

$$|\varepsilon| = \frac{E_0}{E \times F} \qquad \text{...(2.41)}$$

ถ้าไม่ทราบเครื่องหมายของแรงบิดสามารถหาค่าได้โดยใช้กฎที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในกรณีของเพลาที่เกิดแรงบิดสามารถใช้วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์ โดยใช้เกจหมายเลข 1 และหมายเลข 2 สำหรับวัดความเครียดในเพลาโดยจะมีค่า B = 2

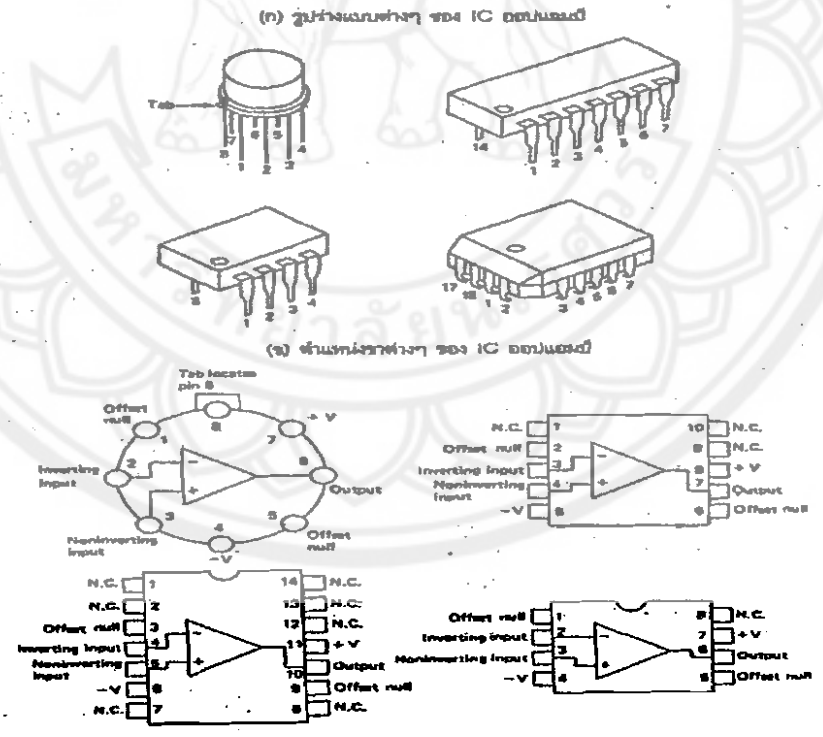
ข้อสังเกต : เมื่อต้องใช้สปริง (spring ring) ช่วยในการส่งผ่านสัญญาณ ซึ่งมักจำเป็นในการวัดแรงบิดควรเลือกใช้วงจรแบบฟูลบริดจ์ เพราะจะทำให้เกิดความผิดพลาดขณะส่งสัญญาณน้อยกว่าใช้วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์หรือควอเตอร์บริดจ์

2.10 การจัดการสัญญาณ

2.10.1 ออปแอมป์เบื้องต้น

2.10.1.1 รูปร่างและโครงสร้างของออปแอมป์

ออปเปอร์เรชั่นนัลแอมปลิไฟเออร์(Operational Amplifier) หรือเรียกสั้นๆว่าออปแอมป์ (Op-Amp) หมายถึง วงจรขยายสัญญาณไฟกระแสตรงที่มีอัตราการขยายสูงมาก ซึ่งในเครื่องอนาล็อกคอมพิวเตอร์ เพื่อทำหน้าที่คำนวณทางคณิตศาสตร์บางอย่าง การรวมสัญญาณ การหักล้างสัญญาณ การอินทิเกรท และการดิฟเฟอเรนชิเอต เป็นต้น ซึ่งเป็นการทำงานทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 2.20 รูปร่างและตำแหน่งขาของออปแอมป์

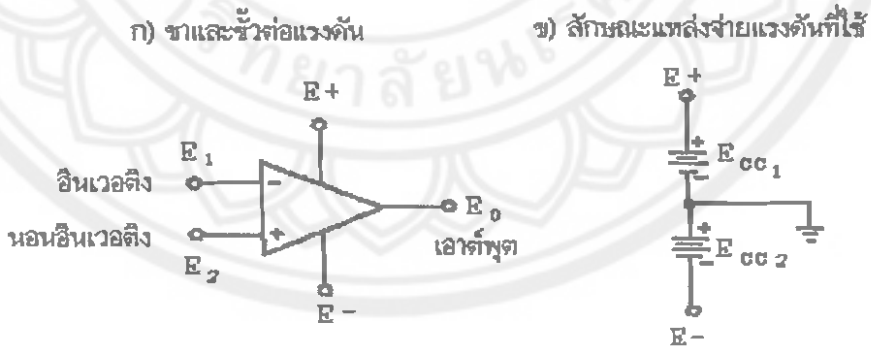
เมื่อเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำถูกพัฒนาขึ้น ออปแอมป์ก็ถูกพัฒนาให้ใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ออปแอมป์จึงถูกใช้งานแพร่หลายออกไป ทั้งวงจรเชิงเส้น(Linear Circuit) เช่น วงจรขยายสัญญาณ วงจรดักสัญญาณ วงจรควบคุมแรงดัน เป็นต้น และวงจรที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Circuit) เช่น วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรกำเนิดความถี่ วงจรมัลติไวเบรเตอร์ เป็นต้น

ออปแอมป์ส่วนใหญ่ในส่วนแรกๆ ทางอินพุต จะประกอบด้วยวงจรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) อาจเป็น 2-3 ส่วน ต่ออนุกรมกัน เพื่อให้มีอัตราการขยายและ Common Mode Rejectionสูง การจ่ายแหล่งจ่ายไฟให้กับออปแอมป์จึงต้องจ่ายให้ถูกต้อง ตามวงจรขยายความแตกต่างที่ต้องการ คือจ่ายแหล่งจ่ายแรงดัน 2 ชุด ทั้งไฟบวกและไฟลบ โครงสร้างภายในวงจรของออปแอมป์

2.10.1.2 ลักษณะและสัญลักษณ์ของออปแอมป์

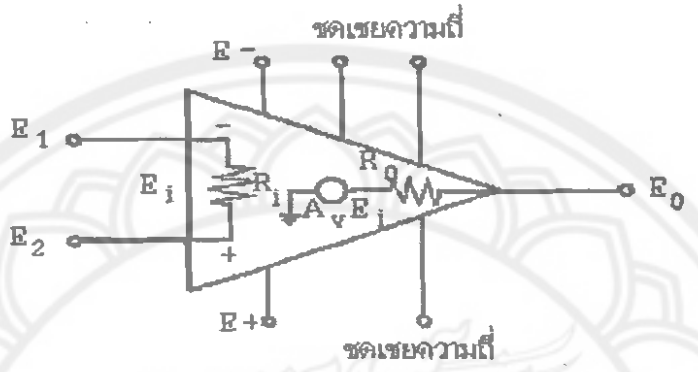
วงจรขยายความแตกต่างมีอินพุต 2 ขั้ว ดังนั้นออปแอมป์จึงมีอินพุต 2 ขั้ว เหมือนกัน ขั้วหนึ่งเรียกว่า อินเวอร์ติงอินพุต(Inverting Input) ใช้สัญลักษณ์เครื่องหมาย(-) มีสมบัติสำหรับการกลับ เฟสสัญญาณ อีกขั้วหนึ่งเรียกว่านอนอินเวอร์ติงอินพุต(Noninverting Input) ใช้สัญลักษณ์เครื่องหมาย(+) มีคุณสมบัติสำหรับการไม่กลับเฟสสัญญาณ

ทางด้านเอาต์พุตของออปแอมป์จะมีเพียงขั้วเดียว การครบวงจรของสัญญาณทั้งทางอินพุตและทางเอาต์พุต ใช้กราวด์เป็นตัวเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟใช้ 2 ชุด คือไฟบวก(+) และไฟลบ(-) โดยเทียบศักย์กับกราวด์



รูปที่ 2.21 ขาและการต่อแรงดันให้ตัวออปแอมป์

นอกจากนั้น ยังต้องมีชั้วต่อเพื่อชดเชยเฟสของความถี่ เนื่องจากความถี่สูงขึ้นจะมีการเลื่อนเฟสมากขึ้น หากมีการเลื่อนเฟสถึง 180 องศา เมื่อรวมกับการกลับเฟสอีก 180 องศา จะทำให้เกิดการย้อนกลับแบบเสริมกัน(Positive Feedback) คือการเกิดออสซิลเลตขึ้น ออปแอมป์จะไม่มีเสถียรภาพ ลักษณะวงจรสมมูลและชั้วต่อชดเชยเฟสของออปแอมป์ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลและชั้วต่อชดเชยเฟสของออปแอมป์

2.10.1.3 คุณสมบัติของออปแอมป์ทางอุดมคติ

ออปแอมป์มีคุณสมบัติทางอุดมคติสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. อัตราขยายของออปแอมป์ มีค่าสูงมากเป็นอนันต์ หรือ $A_{VOL} = \infty$
2. อินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์ มีค่าสูงมากเป็นอนันต์ หรือ $Z_{in} = \infty$
3. เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าต่ำมากหรือ $Z_{out} = 0$
4. การทำงานของออปแอมป์ไม่ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้าอินพุตไม่ว่าความถี่ต่ำหรือความถี่สูง จะขยายได้เท่ากันหมด มีแถบความถี่ (Bandwidth) เป็นอนันต์หรือ BW= ∞
5. เมื่อแรงดันอินพุตเป็นศูนย์ แรงดันเอาต์พุตจะเป็นศูนย์ด้วย นั่นคือ $E_0 = 0$ เมื่อ $E_1 = E_2$
6. การทำงานของออปแอมป์ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

2.10.1.4 คุณสมบัติที่สำคัญของออปแอมป์

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ทางอินพุต ทำให้ได้คุณสมบัติที่สำคัญของออปแอมป์ขึ้นมาหลายประการด้วยกันดังนี้

1. ไม่มีกระแสไหลเข้าขั้วอินพุตของออปแอมป์ เนื่องจากว่าอินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูงมากจึงไม่ดึงกระแสจากแหล่งจ่ายสัญญาณ นั่นคือ $Z_{in} = \infty$ ดังนั้น $I_i = 0$

2. ผลต่างแรงดันที่อินพุตทั้งสองของออปแอมป์จะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากอินพุตอิมพีแดนซ์ต่อแบบวงจรขยายความแตกต่าง ดังนั้นจึงมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก จนไม่มีกระแสไหล ฉะนั้นแรงดันที่ตกคร่อมอินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ $I_i = 0$ดังนั้น $V_i = 0$

3. อัตราขยายของออปแอมป์ ที่มีค่าสูงมากเป็นอนันต์ จะต้องเป็นอัตราขยายแบบลูปเปิด (Open Loop Gain = A_{vol}) คือ อัตราการขยายแรงดันในขณะที่ยังไม่มีการย้อนกลับ ในทางปฏิบัติแล้วอัตราการขยายแบบลูปเปิดจะไม่ถึงอนันต์ แต่จะมีค่าสูงมาก ไม่ต่ำกว่า 10,000 เท่า หรือ 80 dB ขึ้นไป

4. การต่อกันหลายภาคของออปแอมป์ต้องต่อกันโดยตรง หรือคัปปลิ้งโดยตรง (Direct-Coupling) การต่อในลักษณะนี้จะขยายสัญญาณได้ทั้งไฟกระแสตรงและไฟกระแสสลับ

5. เอาต์พุตที่ได้จะเป็นแบบกลับเฟสกับอินพุต ป้อนกลับไปยังขั้วอินพุตช่วยให้วงจรขยายออปแอมป์ไม่เกิดการออสซิลเลต นอกจากนี้ยังสามารถจัดวงจรให้เอาต์พุตมีเฟตเหมือนอินพุตได้และสามารถจัดวงจรให้เป็นการป้อนกลับแบบบวกได้

2.10.1.5 การนำไปใช้งานกับการ์ดปรับสภาพสัญญาณ

ที่ Op-Amp เมื่อวงจรบริดจ์มีสภาพที่ไม่สมดุลแล้วมีแรงดันวิ่งผ่านมายัง Op-Amp ซึ่งแรงดันที่ออกมาจากวงจรบริดจ์ มีค่าน้อยมาก ทำให้ยากต่อการอ่านค่าผลที่ได้ จึงต้องมีการขยายสัญญาณที่วงจร Op-Amp เพื่อให้มีสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยสามารถขยายค่าได้โดยอาศัย Dip Switch gain setting เพื่อให้ได้อัตราการขยายสัญญาณตามที่ต้องการ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปตามสมการ

$$G = \frac{E_{out}}{E_{in}} \qquad ...(2.42)$$

โดย G = Gain

E_{out} = ค่าความต่างศักย์ขาออก

E_{in} = ค่าความต่างศักย์ขาเข้า

หมายเหตุ : สมการข้างบนสำหรับ Op-Amp ทั่วไป (ถ้าเป็นในวงจรของเราคือOp-Amp ชนิด 731) แต่ถ้าเป็น Op-Amp ชนิด Amp02FP แล้วค่าอัตราการขยายเป็นไปตามสมการ

$$G = \left(\frac{500k\Omega}{R_G}\right)+1 \qquad ...(2.43)$$

โดยที่ R_G = คือความต้านทานที่ Dip Switch

ยกตัวอย่างเช่น กำหนดค่าอัตราการขยาย (Gain) เท่ากับ 100 เท่า เมื่อมีแรงดันที่ออกมาจากปริดจ์ 0.002 v จะทำให้ได้แรงดันที่ได้เท่ากับ 100x0.002 = 0.2 v ตามที่ต้องการ และเพื่อความสะดวกในการหาค่าความเครียดตาม 2.28 สามารถปรับสมการเป็นดังนี้

$$\frac{\mu\varepsilon}{E_0} = \frac{\left(4\times10^6\right)}{F\times E} \qquad ...(2.44)$$

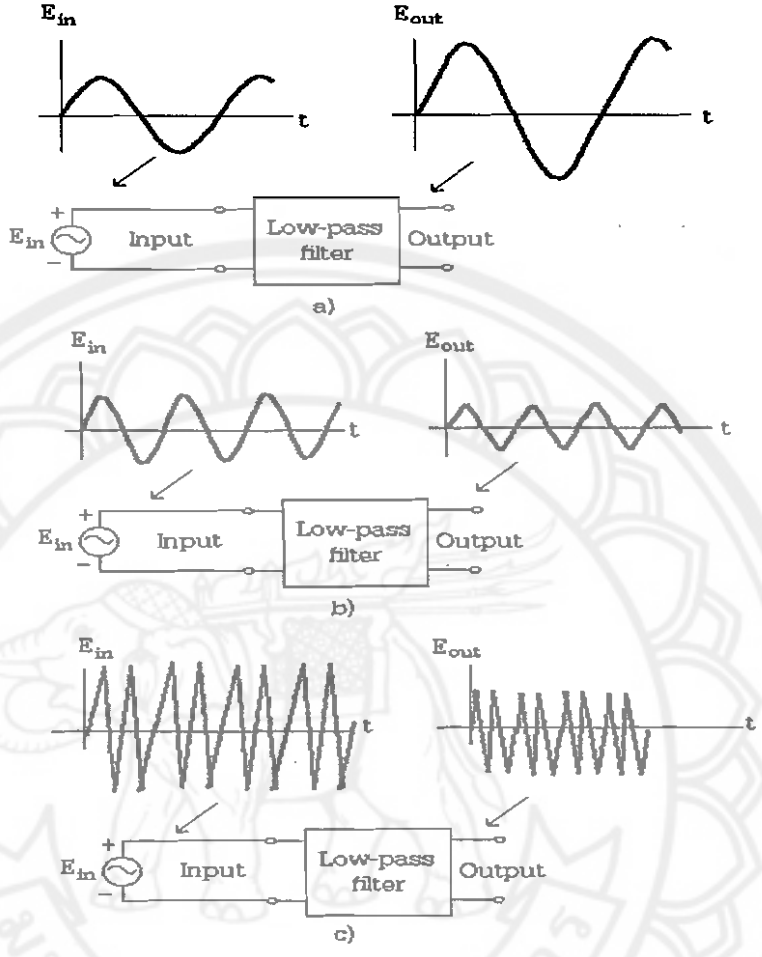
และเมื่อใส่ค่าอัตราการขยายจาก Dip Switch สมการข้างบนสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\mu\varepsilon}{E_0} = \frac{\left(4\times10^6\right)}{F\times E\times Gain} \qquad ...(2.45)$$

กำหนดให้ $\frac{\left(4\times10^6\right)}{F\times E\times Gain} = X_{Factor}$ ซึ่งตารางของ X_{Factor} (ตาราง 3.1) เป็นค่า X_{Factor} ที่ E = 4 v. และ F = 2.085 ซึ่งความสะดวกของ X_{Factor} เราสามารถเอาค่าแรงดัน (E_0) เข้ามาคูณออกมาเป็นค่าความเครียดในหน่วยไมโครสเตรน ($\mu\varepsilon$)

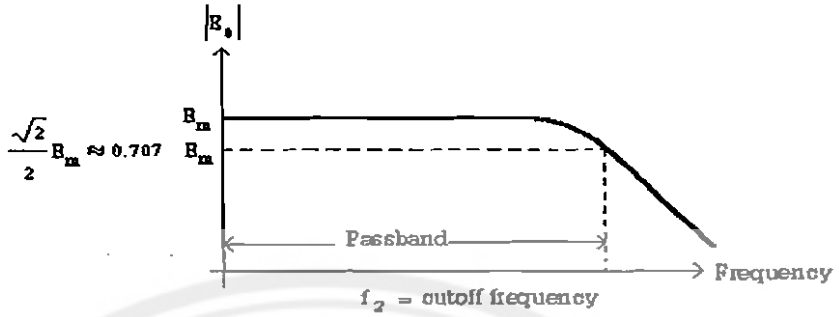
2.10.2 ตัวกรองสัญญาณ (Filter)

ตัวกรอง(Filter) เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิคที่มีหน้าที่จัดการเกี่ยวกับอำพล (Amplitude) หรือขนาด(Magnitude) ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ก่อให้เกิดความถี่ โดยขาเข้าของตัวกรองเรียกว่า input ซึ่งถูกต่อกับแหล่งจ่ายและขาออกเราเรียกว่า output ซึ่งเป็นตัวที่รังดันที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ถูกขับออกมา รูปที่ 2.17 เป็นตัวอย่างที่แสดงรูปแบบหนึ่งของตัวกรอง เราเรียกว่า ***"ตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter)"*** รูปภาพแสดงความถี่ที่ลดต่ำลงเมื่อผ่านตัวกรอง เราเรียกแหล่งจ่ายว่า ***"แหล่งจ่ายสัญญาณ (Signal Source)"*** ซึ่งตัว LPF(Low-Pass Filter) จะยอมให้เฉพาะความถี่ที่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดผ่านออกมาเท่านั้นหรือพูดง่ายๆก็ลดค่าขนาดของความถี่สูงๆลง



รูปที่ 2.23 แสดงพฤติกรรมของ LPF ซึ่งจะเห็นว่าที่แรงดันขาเข้า(E_{in}) มีค่าคงที่แต่เมื่อผ่านตัวกรองแล้วแรงดันที่วัดได้ E_{out} จะลดค่าลงโดย (a) Low-frequency (b) Medium- frequency และ (c) High-frequency signal

ซึ่งการที่จะศึกษาการทำงานของ LPF จะง่ายขึ้นถ้าเราศึกษาจากภาพระหว่างแรงดัน(แกน Y) ที่ออกมากับค่าความถี่(แกน X) ดังรูปที่ 2.24 จะสังเกตว่าค่าแรงดันที่ออกมามีค่าคงที่ตลอดจนถึงจุดๆหนึ่งค่าแรงดันนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว(มีค่าคงที่ในช่วงความถี่ที่ต่ำๆ) ค่าแรงดันที่วัดได้สูงสุดของ E_{out} เราให้สัญลักษณ์ว่า E_m และจากรูปจะเห็นว่า ความถี่ที่ค่า E_{out} เริ่มตกลงคือค่าประมาณ $\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)E_m \approx 0.707E_m$ เราเรียกความถี่นี้ว่า ***cutoff*** ซึ่งให้สัญลักษณ์เป็น f_2 ซึ่งช่วงของสัญญาณที่อยู่ก่อน f_2 เราเรียกว่า ***passband***

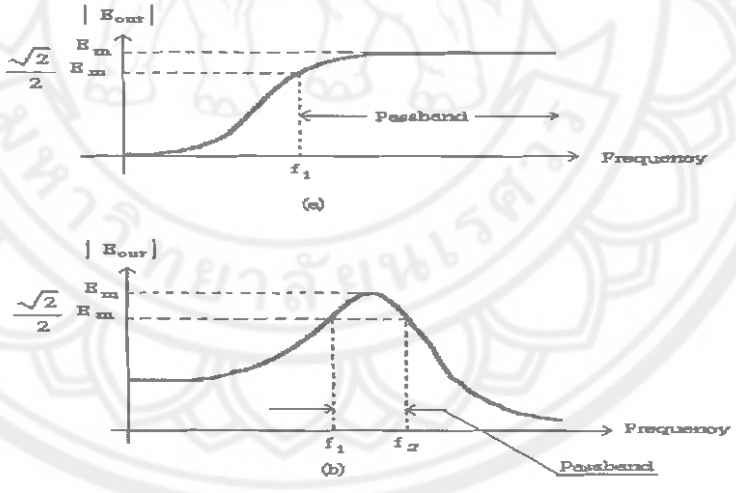


รูปที่ 2.24 ค่าตอบสนองของความถี่ของตัวกรอง

และสำหรับ High-pass Filter เราให้สัญลักษณ์ความถี่ cutoff เป็น f_1 และเช่นเดียวกันช่วงของสัญญาณที่อยู่หลังจากความถี่นี้คือ passband และเรียกช่วงสัญญาณที่อยู่ระหว่าง f_1 และ f_2 ว่า bandpass ซึ่งค่าความห่างของ f_1 และ f_2 เราเรียกว่า bandwidth(BW) มีค่าเท่ากับ

$$BW = f_2 - f_1 \qquad ...(2.46)$$

ซึ่งในความเป็นจริงแล้วค่าดังกล่าวไม่จำเป็นต้องสมมาตรแสดงค่าดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.25 High-pass และ bandpass filter (a) แสดง High-pass Filter (b) แสดง bandpass Filter

2.10.2.1 Low-Pass RC Filter

รูปที่ 2.26 แสดงรูปแบบง่ายๆของ LPF ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ซึ่ง input ต่อเข้ากับตัวต้านทานแบบอนุกรม และแรงดันที่ออกมาวัดตกคร่อมตัวเก็บประจุ เราสามารถวิเคราะห์ค่าแรงดันและความถี่ cutoff จาก กฎการแบ่งแรงดัน

$$E_{out} = \frac{-i|X_C|}{R-i|X_C|}E_{in} \qquad ...(2.47)$$

แทนค่า $|X_C| = 1/\omega C$ ในสมการ (2.47) เราจะได้

$$E_{out} = \frac{-i/\omega C}{R-i/\omega C}E_{in} = \frac{-i}{\omega RC-i}E_{in} \qquad ...(2.48)$$

หาขนาดของ E_{out} จะได้

$$|E_{out}| = \frac{|-i|}{|\omega RC-i|} = \frac{1}{\sqrt{(\omega RC)^2+1}}|E_{in}| \qquad ...(2.49)$$

จากสมการ (2.49) จะเห็นได้ชัดว่า $|E_{out}|$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อ ω มีค่ามากขึ้น **หรือ** $|E_{out}| = |E_{in}|$ เมื่อ $\omega = 0$ และต่อไปเราสามารถประมาณค่า (2.49) โดยการแทน $\omega = 1/RC$ rad/**s** เราจะได้

$$|E_{out}| = \frac{1}{\sqrt{[(1/RC)(RC)]^2+1}}|E_{in}|$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1+1}}|E_{in}|$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{2}|E_{in}| \qquad ...(2.50)$$

เนื่องจาก ค่าแรงดันขาเข้าสูงสุดของตัวกรอง คือ $E_m = |E_m|$ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ $\omega = 0$ และเนื่องจาก $|E_{out}| = (\sqrt{2}/2)|E_m|$ ที่ $\omega = 1/RC$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นความถี่ cutoff ดังนั้นสรุปความถี่ cutoff **คือ**

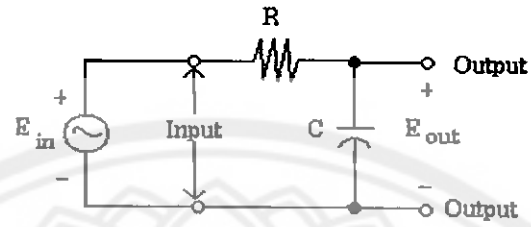
$$\omega_2 = \frac{1}{RC} \text{ rad/s} \qquad ...(2.51)$$

หรือ

$$f_2 = \frac{1}{2\pi RC} \qquad ...(2.52)$$

และสามารถหาขนาดแรงดันขาออกที่ความถี่ใดๆในเทอมของ f_2 ได้โดยการแทน $1/\omega_2 = RC$ ใน (2.49)

$$|E_{out}| = \frac{|E_{in}|}{\sqrt{(\omega/\omega_2)^2 + 1}} = \frac{|E_{in}|}{\sqrt{(f/f_2)^2 + 1}} \qquad ...(2.53)$$



รูปที่ 2.26 วงจรตัวกรองความถี่