

การประมวลสัญญาณความเครียดจาก การวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์รูปวงแหวนกลม Strain Signal Processing from Finite Element Analysis of Circular Ring Load Cell

ฐิตะพล หุยนันท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10530

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2988-3655, โทรสาร: 0-2988-3666 ต่อ 3106

E-mail: thitaphol@mutacth.com

Manuscript received April 15, 2019

Revised June 5, 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์รูปวงแหวนกลมจากวัสดุ Al6061 ภายใต้การรับแรงแบบสองแกน ผลเฉลยที่ได้จากแต่ละตำแหน่งอ้างอิงเชิงมุมที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งสเตรนเกจตามงานล่าสุดของ Huyanan ถูกนำมาใช้ประมวลสร้างสัญญาณความเครียดเฉลี่ยที่เป็นสัดส่วนกับแรงองค์ประกอบที่วัดได้ของแต่ละแกน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า สัญญาณความเครียดเฉลี่ยแต่ละแกนตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นต่อแรงองค์ประกอบที่วัดได้ตามสมการถดถอยเชิงเส้นทั้งสองที่นำเสนอด้วยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจไม่ต่ำกว่า 0.9985 ทั้งยังพบว่า ค่า Sensitivity ในการวัดแรงตามแนวสัมผัสและการวัดในแรงแนวรัศมีเท่ากับ $1.4538 \pm 0.0179 \text{ N}/\mu\epsilon$ และ $2.7120 \pm 0.0381 \text{ N}/\mu\epsilon$ ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบสัญญาณที่ได้จากการวัดของโหลดจริงที่นำเสนอกับ Input signal มีค่าน้อยกว่า Background noise signal ที่วิเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการดำเนินงานวิจัยนี้บรรลุความสำเร็จตามจุดประสงค์

คำสำคัญ: โหลดเซลล์รูปวงแหวนกลม เครื่องมือวัดแรง การประมวลสัญญาณความเครียด การวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์

ABSTRACT

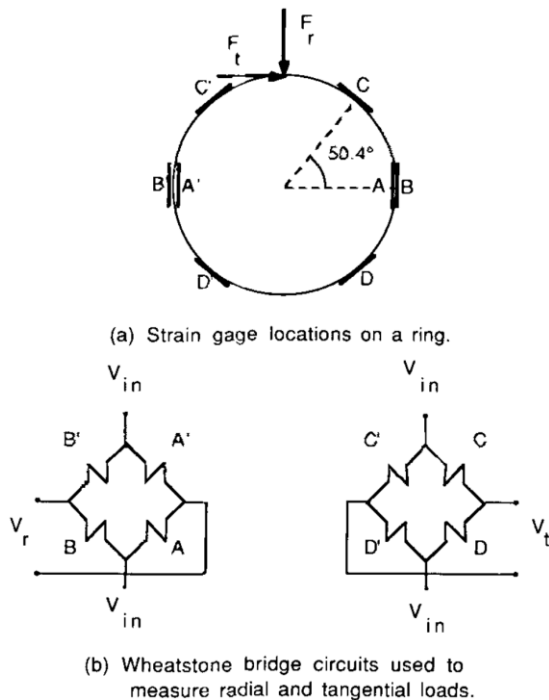
This paper presents the finite element simulations of Al6061 circular ring load cell under two-force loading. The solution taken from each appropriated angular position for installing strain gauges based on Huyanan's recent work was processed to generate an average strain signal proportional to a measured force component in each axis. The outcome shows that each average strain signal linearly responses to its measured force component as proposed in both linear regression equations with the coefficients of determination not less than 0.9985. In addition, it also shows that both sensitivities of tangential force measurement and radial force measurement are $1.4538 \pm 0.0179 \text{ N}/\mu\epsilon$ and $2.7120 \pm 0.0381 \text{ N}/\mu\epsilon$ in respectively. The comparative error of measured signal from the proposed load ring to the input signal is lower than the analysed background signal. Thus, it can be concluded that this work is successfully conducted to achieve its aim.

Keywords: Circular ring load cell, Force transducer, Strain signal processing, Finite element analysis

1. บทนำ

โหลดเซลล์รูปวงแหวนกลมคือ โหลดเซลล์ชนิดหนึ่งซึ่งนำ Elastic element รูปวงแหวนมาใช้ตรวจจับแรงแบบสองแกน (Two-force sensing) แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ได้สัดส่วนกับแรงกระทำที่ตรวจจับได้ ผ่านการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรอิเล็คทรอนิกส์

(Wheatstone bridge circuit) กับสเตรนเกจ (Strain gauge) ที่ถูกติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่งเชิงมุมที่เหมาะสมบน Elastic element จากงานของ Youssef [1] ในปี 1971 และ Kroencke และ Hull [2] ในปี 1989 ได้กำหนดระยะเชิงมุม θ_r ไว้ที่ $\pm 50.4^\circ$ และ $\pm 129.6^\circ$ เพื่อใช้ตรวจวัดแรงตามแนวรัศมี F_r และที่ระยะเชิงมุม θ_t เท่ากับ 0° และ 180° สำหรับแรงในแนวสัมผัส F_t ตามทฤษฎีความเค้นของวงแหวนแบบบางของ Timoshenko (ดังรูปที่ 1)



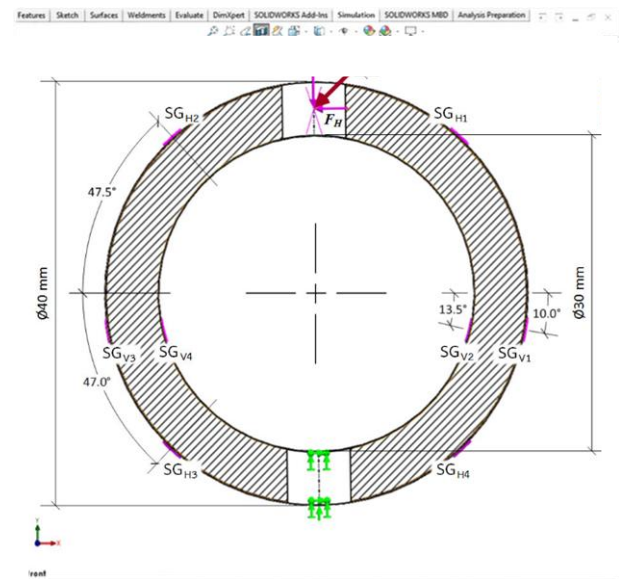
รูปที่ 1 ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจและวงจรวัดสเตรนเกจของโหนดเซลล์รูปวงแหวน [2]

อย่างไรก็ตามจากงานวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งของ Ito และคณะ [3] ในปี 1978 Rahman และ Rahman [4] ในปี 2005 Chen และคณะ [5] ในปี 2007 รวมทั้ง Kumar และคณะ [6–7] ในปี 2011 และ 2015 ได้นำเสนอระยะเชิงมุม θ_r และ θ_t ที่เหมาะแก่การติดตั้งสเตรนเกจสำหรับวัดค่าแรง F_r และ F_t แตกต่างหลากหลายไปจากงาน [1] – [2] ซึ่งอิงตามทฤษฎีความเค้นของวงแหวนแบบบางดังกล่าวข้างต้น ทั้งนี้ในปี 2017 Huyanan [8] ได้แนะนำระยะเชิงมุมที่เหมาะสมผ่านการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ไว้ที่ θ_r เท่ากับ 47.5° 132.5° -47° และ -133° สำหรับตรวจวัดแรง F_r และระยะเชิงมุม θ_t เท่ากับ -13.5° -10° 166.5° และ -170° สำหรับแรงในแนวสัมผัส F_t ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์มาหาผลเฉลยการจำลองเพื่อนำสัญญาณความเครียดที่ได้ออกมาจากตำแหน่งเชิงมุมที่เหมาะสม

θ_r และ θ_t ตามคำแนะนำของ Huyanan ข้างต้นมาประมวลหาแรงทั้งสองแกนซึ่งโหนดเซลล์รูปวงแหวนกลมที่กำหนดสามารถตรวจจับได้

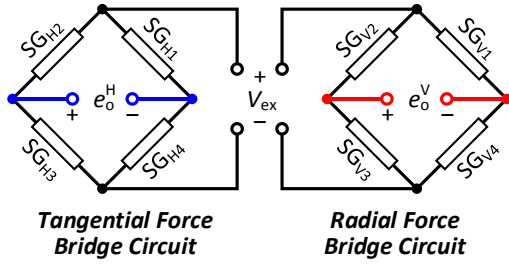
2. การประมวลสัญญาณความเครียดจากโหนดจริง

โหนดเซลล์รูปวงแหวนกลม (ดังรูปที่ 2) ทำจากวัสดุ Al6061 ซึ่งออกแบบด้วยการปรับปรุงขึ้นมาจากแนวทางของ Huyanan [9] ที่นำเสนอในปี 2016 เพื่อรองรับการจับยึดจริงภายใต้แรง F สูงสุดขนาด 200N ณ มุมกระทำ ϕ ต่าง ๆ



รูปที่ 2 ขนาดมิติของ Elastic element ทรงวงแหวนรูปวงกลมและตำแหน่งเชิงมุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งสเตรนเกจแต่ละตัว

จากผลเฉลยเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ของวงแหวนแบบบางหน้าตัดคงที่จากงานของ Huyanan [8] แสดงให้เห็นว่า ความเค้นรอบแกนจากผลกระทบของแรง F_V ณ ผิวรอบนอกของวงแหวนจะมีค่าน้อยที่สุด ณ ระยะเชิงมุม $\theta_t^{(1)}$ $\theta_t^{(2)}$ $\theta_t^{(3)}$ และ $\theta_t^{(4)}$ เท่ากับ 47.5° 132.5° -133° และ -47° ตามลำดับ จึงเป็นจุดเหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งสเตรนเกจ SG_H1 SG_H2 SG_H3 และ SG_H4 ที่เชื่อมต่อกันอยู่แบบฟูลบริดจ์ (ดังรูปที่ 3) เพื่อตรวจวัดแรง F_H แล้วแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage signal) e_H ดังแสดงในสมการที่ (1a) โดยที่ V_{ex} คือ Exciting voltage ของวงจรบริดจ์ และ G_F คือ ค่า Gauge factor ของสเตรนเกจที่ใช้ทำนองเดียวกันกับสัญญาณ e_V ของแรง F_V ซึ่งประมวลได้ตามสมการที่ (1b) จากสัญญาณที่ได้จากสเตรนเกจ SG_V1 SG_V2



รูปที่ 3 วงจรแบบฟูลบริดจ์สำหรับแปลงสัญญาณความเครียด

SG_{V3} และ SG_{V4} ซึ่งติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่ความเค้นรอบแกนที่ผิวของวงแหวนจากผลกระทบของแรง F_H มีค่าน้อยที่สุด ณ ระยะเชิงมุม $\theta_r^{(1)}$ $\theta_r^{(2)}$ $\theta_r^{(3)}$ และ $\theta_r^{(4)}$ เท่ากับ -13.5° -10° -166.5° และ -170° ตามลำดับ ทั้งนี้แรงกดจะทำให้ได้แรงดันขาออกเป็นลบ (Negative output voltage) จากวงจรบริดจ์แต่ละวงจร

$$e_o^H = (G_F V_{ex}) \bar{\epsilon}_H \quad \text{โดย } \bar{\epsilon}_H = \frac{\epsilon_\theta^{H1} - \epsilon_\theta^{H2} + \epsilon_\theta^{H3} - \epsilon_\theta^{H4}}{4} \quad (1)$$

$$e_o^V = (G_F V_{ex}) \bar{\epsilon}_V \quad \text{โดย } \bar{\epsilon}_V = \frac{\epsilon_\theta^{V1} - \epsilon_\theta^{V2} + \epsilon_\theta^{V3} - \epsilon_\theta^{V4}}{4}$$

ทั้งนี้การหาค่าความเครียดรอบวง ϵ_θ^H และ ϵ_θ^V ณ ระยะเชิงมุม θ_t และ θ_r ซึ่งใช้กำหนดตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจแต่ละตัวทั้งที่ผิวนอกและผิวในของโพลีคริงตามสมการที่ (1) สามารถทำได้โดยการนำผลเฉลี่ยของความเค้นรอบวง σ_θ^H และ σ_θ^V ที่เกิดจากการเสียรูปแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ภายใต้ Proportional limit มาคำนวณร่วมกับ Hooke's law (ดังสมการที่ 2)

$$\bar{\epsilon}_H = \frac{\sigma_\theta^{H1} - \sigma_\theta^{H2} + \sigma_\theta^{H3} - \sigma_\theta^{H4}}{4E} \quad (2)$$

$$\bar{\epsilon}_V = \frac{\sigma_\theta^{V1} - \sigma_\theta^{V2} + \sigma_\theta^{V3} - \sigma_\theta^{V4}}{4E}$$

สำหรับการคำนวณหา Sensitivity ในการวัดแรงแต่ละแนวของแต่ละกรณีการรับภาระนั้นสามารถแสดงดังสมการที่ (3)

$$\text{Sensitivity}_H [N/\mu\epsilon] = |F_H [N] / \bar{\epsilon}_H [\mu\epsilon]|_{t \text{ at } \bar{\epsilon}_H \text{ max-level}} \quad (3)$$

$$\text{Sensitivity}_V [N/\mu\epsilon] = |F_V [N] / \bar{\epsilon}_V [\mu\epsilon]|_{t \text{ at } \bar{\epsilon}_V \text{ max-level}}$$

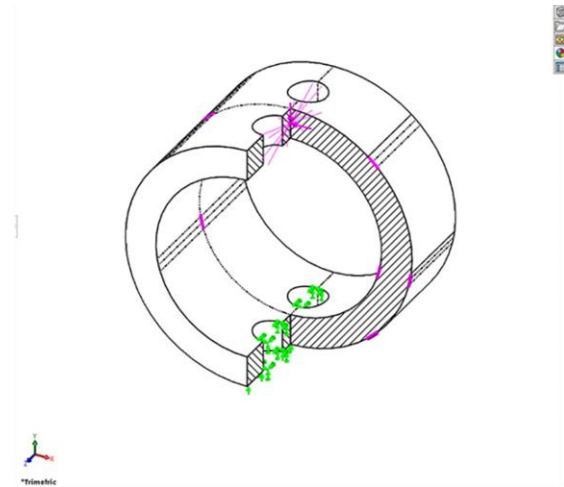
3. การจำลองเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์

โพลีคริงทำจาก Al6061 ซึ่งมีค่า Modulus of elasticity และ Poisson's ratio เท่ากับ 69000MPa และ 0.33 ตามลำดับ ขณะที่ Mass density มีค่าเท่ากับ 2810kg/m³ โดยงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ Nonlinear dynamic analysis มาใช้จำลองเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ในการรับภาระภายใต้ Boundary configuration ตามที่แสดงในรูปที่ 4 และตารางที่ 1 ทั้งนี้จะนำ Newmark's method สำหรับ Implicit time integration ดังสมการที่ (4) ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์ δ และ α เพื่อให้เป็นไปตาม Unconditionally stable condition ไว้ที่ 0.50 และ 0.25 ตามลำดับ มาประยุกต์ร่วมกับ Newton-Raphson iterative technique เพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลขที่มี Total solution time เท่ากับ 12s และ Step size เท่ากับ 0.12s

$$\underline{M}\ddot{\underline{U}}^{t+\Delta t} + \underline{C}\dot{\underline{U}}^{t+\Delta t} + \underline{K}\underline{U}^{t+\Delta t} = \underline{R}^{t+\Delta t}$$

$$\dot{\underline{U}}^{t+\Delta t} = \dot{\underline{U}}^t + ((1-\delta)\dot{\underline{U}}^t + \delta\dot{\underline{U}}^{t+\Delta t})\Delta t \quad (4)$$

$$\underline{U}^{t+\Delta t} = \underline{U}^t + \dot{\underline{U}}^t\Delta t + ((1/2-\alpha)\dot{\underline{U}}^t + \alpha\dot{\underline{U}}^{t+\Delta t})\Delta t^2$$



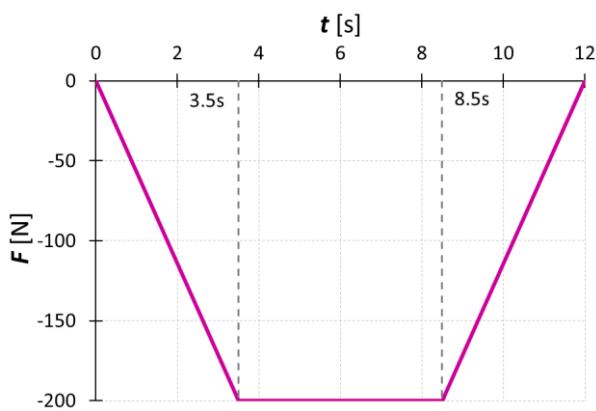
รูปที่ 4 Boundary configuration ของโพลีคริง

เมื่อพิจารณารูปที่ 4 จะเห็นว่า แบบจำลองทรงตัน (Solid modelling) ของโพลีคริงที่สนใจกำหนดให้มีการจับยึดแบบ Fixed support ที่ผิวด้านในของรูทั้งสองด้านล่างของโพลีคริง และกำหนดไม่มีการเคลื่อนที่ในแกนรวม Y ($U_Y = 0$) ตลอดแนวเส้นตรงที่ผิวนอก ณ ตำแหน่งเชิงมุม -90° ทั้งนี้การรับภาระของโพลีคริงเกิดจาก Remote load ขนาด -200N ที่กระทำ ณ จุดกึ่งกลางความหนาของโพลีคริงที่ตำแหน่งเชิงมุม $+90^\circ$ ในทิศทางของมุมกระทำ ϕ ต่าง ๆ (ดังรูปที่ 1) เป็นผลให้เกิดแรง F_H และแรง F_V ขนาดต่าง ๆ ดัง

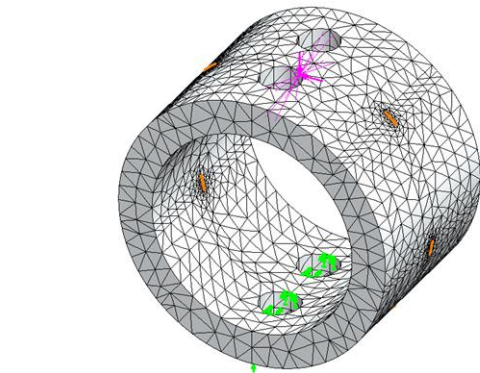
แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งสมมูลกับแรงลัพธ์ F ของ Remote load ซึ่งกระทำ ณ จุดอ้างอิงดังกล่าวทั้งในแนวรัศมีและตามแนวสัมผัส ทั้งนี้พฤติกรรมของแรงลัพธ์ข้างต้นต่อหน้าตัดรับแรงสามารถอธิบายได้ด้วยแผนผังเวลาของแรง F ตามรูปที่ 5

ตารางที่ 1 ขนาดของแรง F_H และ F_V ตามมุมกระทำ ϕ

กรณี	ϕ	F_H [N]	F_V [N]
1	0°	-200.0000	0.0000
2	30°	-173.2051	-100.0000
3	45°	-141.4214	-141.4214
4	60°	-100.0000	-173.2051
5	90°	0.0000	-200.0000



รูปที่ 5 แผนผังเวลาของแรง F ที่กระทำต่อโหลตริง

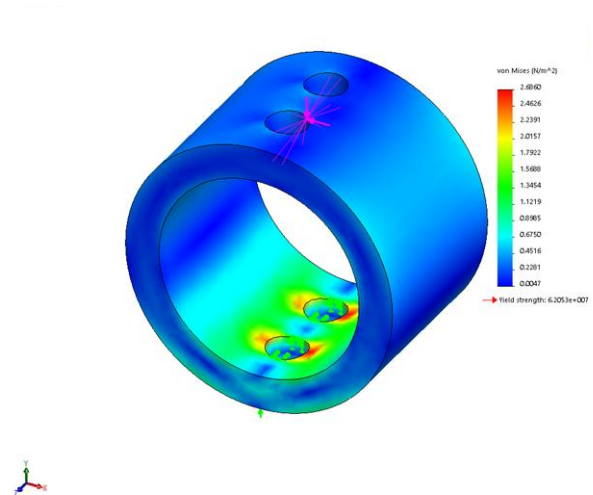


รูปที่ 6 Four-node tetrahedron mesh ของโหลตริง

Mesh ของโหลตริงประกอบขึ้นมาจาก Solid element แบบ Linear four-node tetrahedron ซึ่งกำหนด Global size ไว้เท่ากับ 2.5mm ด้วย Tolerance ในช่วง 0.0025mm และกำหนด Aspect ratio ไว้เท่ากับ 1.5 ขณะที่กำหนด Mesh control ในแนวการติดตั้ง สเตรนเกจแต่ละจุดไว้เท่ากับ 0.25mm จึงทำให้สามารถสร้าง Mesh ผลลัพธ์ขนาด 16373 Elements 25938 Nodes ได้ดังรูปที่ 6 โดยไม่มี Distorted element เกิดขึ้นใน Mesh นี้เลย

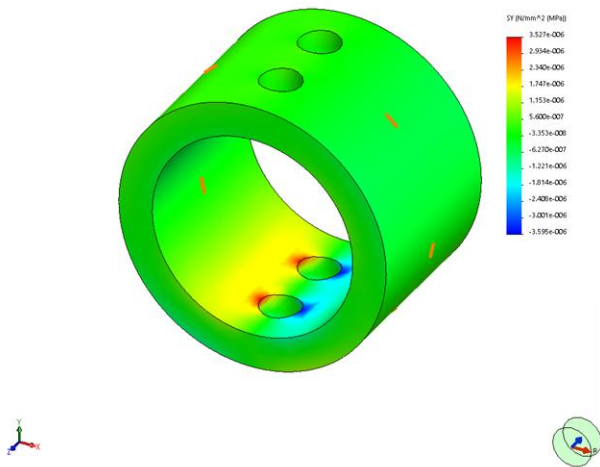
4. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

หลังจากเสร็จสิ้น 104 Time steps ของการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขของแบบจำลองเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาด 77323 d.o.f. ของการรับภาระของโหลตริงแต่ละกรณี ไม่พบว่ามีค่าความเค้น von Mises σ_0 ณ บริเวณใด ๆ ของโหลตริงที่มีค่าเกิน Yield strength ของ Al6061 ซึ่งอยู่ที่ 62.05281564MPa เลย (ดังตัวอย่างผลเฉลยเชิงภาพของการกระจายความเค้น von Mises กรณีที่ 2 ดังรูปที่ 7)



รูปที่ 7 ผลเฉลยเชิงภาพของแถบการกระจายความเค้น von Mises

ด้วยผลยืนยันการเสียรูปภายใต้ Proportional limit ข้างต้นทำให้สามารถนำเสนอสัญญาณความเค้นรอบวง σ_θ^H ของ Node 1261 1133 994 และ 903 ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงของตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจ SG_{H1} SG_{H2} SG_{H3} และ SG_{H4} ตามลำดับ เช่นเดียวกับ σ_θ^V ของ Node 257 601 213 และ 652 สำหรับสเตรนเกจ SG_{V1} SG_{V2} SG_{V3} และ SG_{V4} ตามลำดับ (ดังตัวอย่างผลเฉลยเชิงภาพ

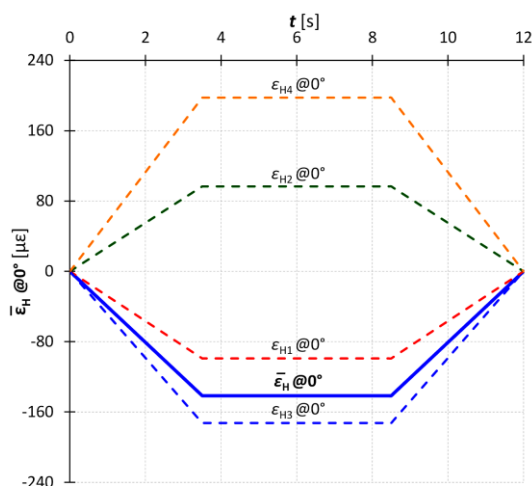


รูปที่ 8 ผลเฉลยเชิงภาพของแถบการกระจายความเค้นรอบวง

ของการกระจายความเค้นรอบวงกรณีที่ 2 ดังรูปที่ 8) ซึ่งบันทึกไว้ได้มาซึ่งประมวลเป็นสัญญาณความเครียด ณ ตำแหน่งนั้น ๆ โดยอาศัย Hooke's law และสัญญาณความเครียดของแรง F_H และแรง F_V ตามสมการที่ (2) ต่อไป

4.1 ผลการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์

สัญญาณความเครียด ณ ตำแหน่งอ้างอิงการติดตั้งสตรนเกจแต่ละตัวซึ่งประมวลจากผลเฉลยของการจำลองเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ในแต่ละกรณีของ Remote load ขนาด -200N ณ มุมกระทำต่งกันนั้นสามารถนำเสนอโดยแยกแสดงชุดสัญญาณความเครียด ε_H และ



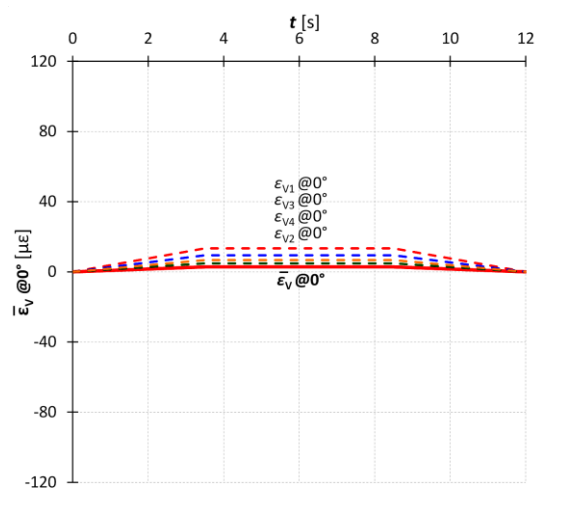
ε_V สำหรับการวัดแรง F_H และ F_V ออกจากกันได้ดังรูปที่ 9-13 ทั้งนี้สัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ และ $\bar{\varepsilon}_V$ ของแต่ละกรณีสามารถหาด้วยการคำนวณระดับสัญญาณความเครียด ณ ขณะใด ๆ ตามสมการที่ (2) ดังที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

พิจารณาชุดสัญญาณความเครียดทั้งสองในรูปที่ 9 พบว่า เมื่อแรง -200N กระทำด้วยมุม $\phi = 0^\circ$ จะเป็นผลให้เกิดสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $-141.459\mu\epsilon$ และสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_V$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $+2.841\mu\epsilon$ ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้ Sensitivity ในการวัดแรง F_H และ F_V ของโหลตริงเท่ากับ $1.4138\text{ N}/\mu\epsilon$ และ $0\text{ N}/\mu\epsilon$ ตามลำดับ

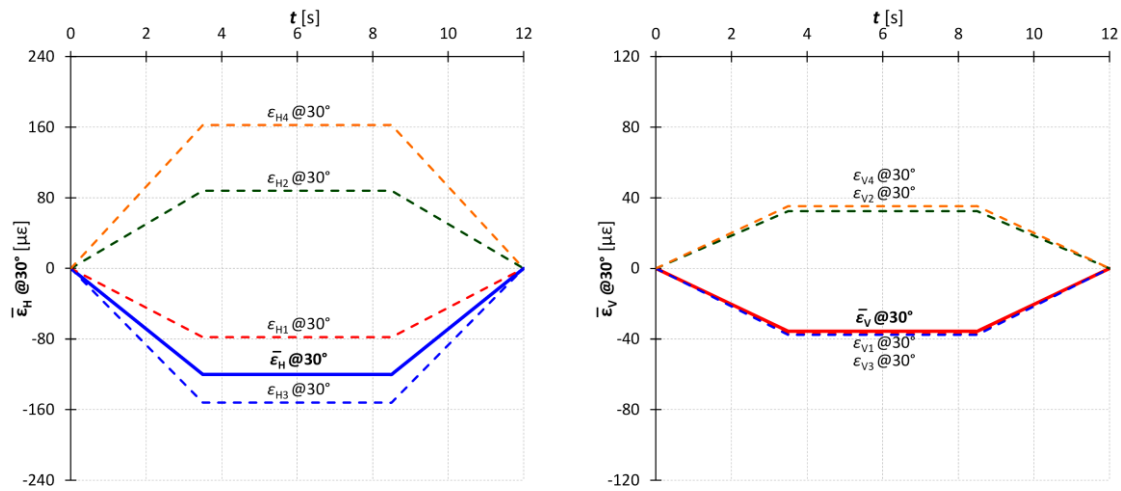
พิจารณาชุดสัญญาณความเครียดทั้งสองในรูปที่ 10 พบว่า เมื่อแรง -200N กระทำด้วยมุม $\phi = 30^\circ$ จะเป็นผลให้เกิดสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $-120.195\mu\epsilon$ และสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_V$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $-35.613\mu\epsilon$ ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้ Sensitivity ในการวัดแรง F_H และ F_V ของโหลตริงเท่ากับ $1.4410\text{ N}/\mu\epsilon$ และ $2.8079\text{ N}/\mu\epsilon$ ตามลำดับ

พิจารณาชุดสัญญาณความเครียดทั้งสองในรูปที่ 11 พบว่า เมื่อแรง -200N กระทำด้วยมุม $\phi = 45^\circ$ จะเป็นผลให้เกิดสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $-96.753\mu\epsilon$ และสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_V$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $-51.833\mu\epsilon$ ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้ Sensitivity ในการวัดแรง F_H และ F_V ของโหลตริงเท่ากับ $1.4617\text{ N}/\mu\epsilon$ และ $2.7284\text{ N}/\mu\epsilon$ ตามลำดับ

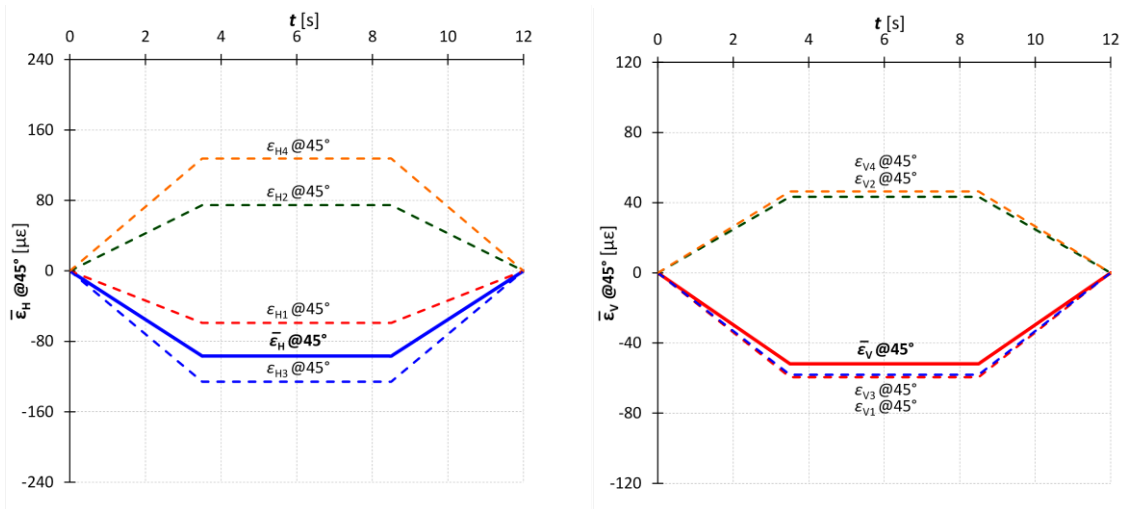
พิจารณาชุดสัญญาณความเครียดทั้งสองในรูปที่ 12 พบว่า เมื่อแรง -200N กระทำด้วยมุม $\phi = 60^\circ$ จะเป็นผลให้เกิดสัญญาณ



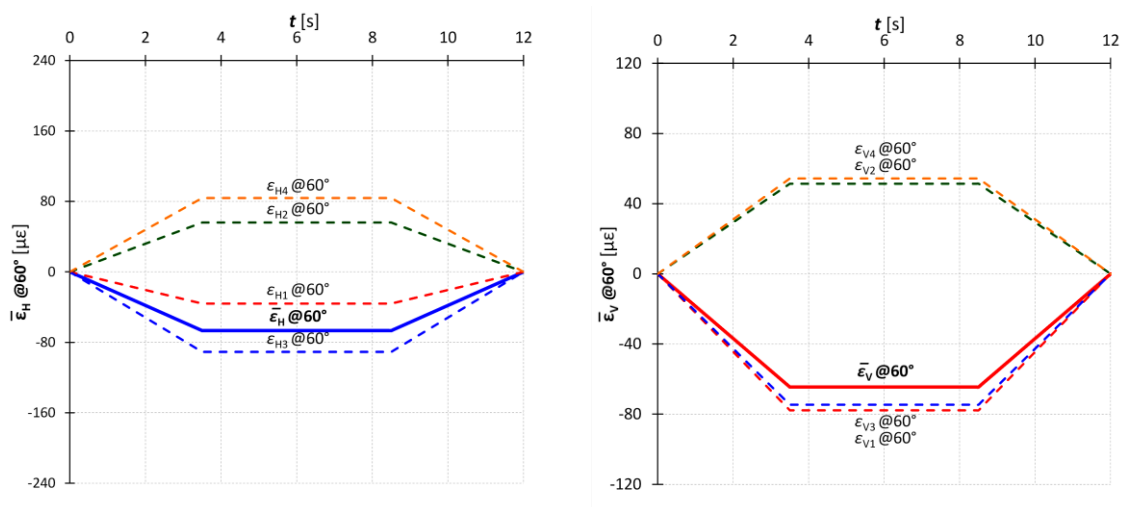
รูปที่ 9 สัญญาณความเครียด $\bar{\varepsilon}_H$ และ $\bar{\varepsilon}_V$ ของแรง F_H และแรง F_V จากโหลตริง เมื่อรับแรง -200N ที่มุมกระทำ $\phi = 0^\circ$



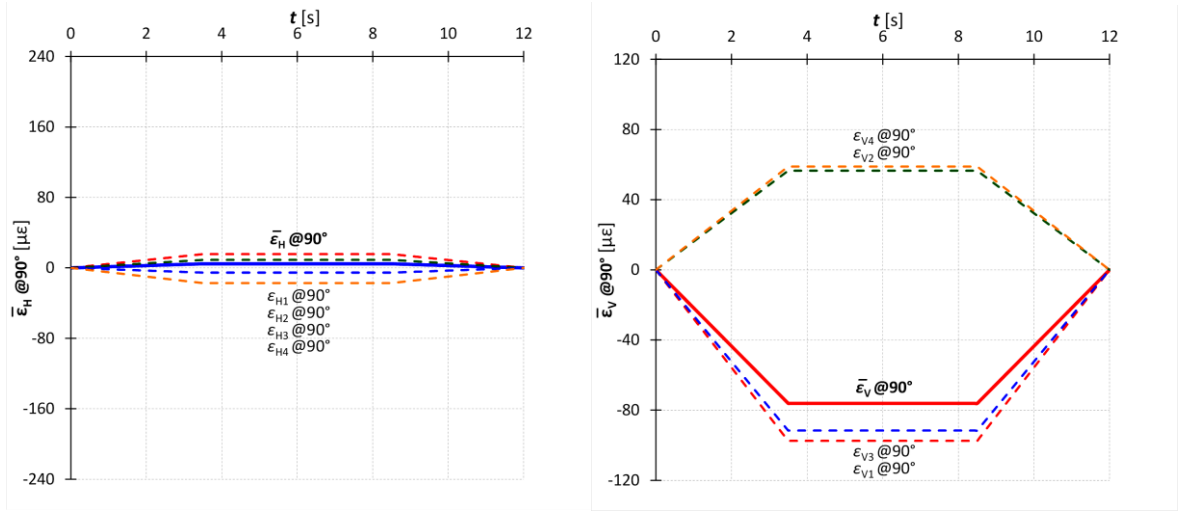
รูปที่ 10 สัญญาณความเครียด $\bar{\epsilon}_H$ และ $\bar{\epsilon}_V$ ของแรง F_H และแรง F_V จากโหลดจริง เมื่อรับแรง -200N ที่มุมกระทำ $\phi = 30^\circ$



รูปที่ 11 สัญญาณความเครียด $\bar{\epsilon}_H$ และ $\bar{\epsilon}_V$ ของแรง F_H และแรง F_V จากโหลดจริง เมื่อรับแรง -200N ที่มุมกระทำ $\phi = 45^\circ$



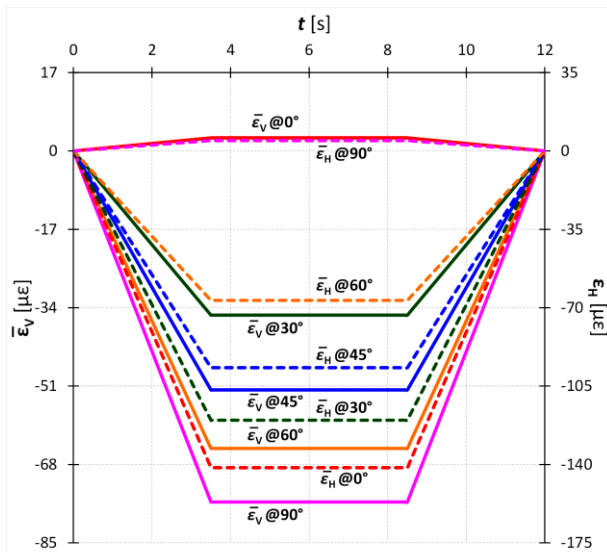
รูปที่ 12 สัญญาณความเครียด $\bar{\epsilon}_H$ และ $\bar{\epsilon}_V$ ของแรง F_H และแรง F_V จากโหลดจริง เมื่อรับแรง -200N ที่มุมกระทำ $\phi = 60^\circ$



รูปที่ 13 สัญญาณความเครียด $\bar{\varepsilon}_H$ และ $\bar{\varepsilon}_V$ ของแรง F_H และแรง F_V จากโพลีกริม เมื่อรับแรง $-200N$ ที่มุมกระทำ $\phi = 90^\circ$

ความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $-66.720\mu\epsilon$ และ สัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_V$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $-64.518\mu\epsilon$ ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้ Sensitivity ในการวัดแรง F_H และ F_V ของโพลีกริมเท่ากับ $1.4988 N/\mu\epsilon$ และ $2.6846 N/\mu\epsilon$ ตามลำดับ

พิจารณาชุดสัญญาณความเครียดทั้งสองในรูปที่ 13 พบว่า เมื่อแรง $-200N$ กระทำด้วยมุม $\phi = 90^\circ$ จะเป็นผลให้เกิดสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $+4.628\mu\epsilon$ และ สัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_V$ ที่มีระดับสูงสุดเท่ากับ $-76.132\mu\epsilon$ ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้ Sensitivity ในการวัดแรง F_H และ F_V ของโพลีกริมเท่ากับ $0 N/\mu\epsilon$ และ $2.6270 N/\mu\epsilon$ ตามลำดับ



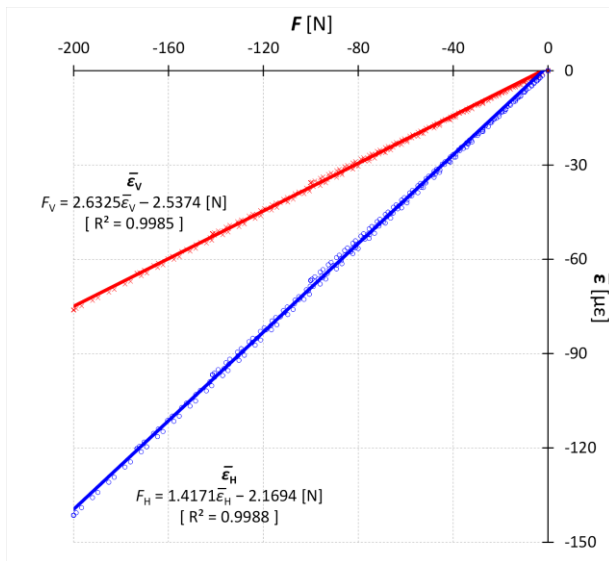
รูปที่ 14 ผลประมวลสัญญาณความเครียดเฉลี่ยจากทุกกรณี

อย่างไรก็ตามกรณีที่โพลีกริมรับภาระตามแนวรัศมีเพียงแนวเดียวนั้นพบว่า ระดับสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ กลับมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ($\bar{\varepsilon}_H @ 90^\circ = +4.628 \mu\epsilon$) ทั้งที่ไม่มีแรงองค์ประกอบของแรง $-200N$ กระทำต่อโพลีกริมในแนวรัศมี ณ จุดอ้างอิงเลย (ดังรูปที่ 13) ในทำนองเดียวกันกรณีที่โพลีกริมรับภาระในแนวสัมผัสเพียงแนวเดียวก็นพบว่า ระดับสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_V$ กลับมีค่าไม่เป็นศูนย์เช่นกัน ($\bar{\varepsilon}_V @ 0^\circ = +2.841 \mu\epsilon$) ทั้งที่ไม่มีแรงองค์ประกอบของแรง $-200N$ กระทำต่อโพลีกริมตามแนวสัมผัส ณ จุดอ้างอิงเลย (ดังรูปที่ 9)

4.2 การประมวลสัญญาณแรงที่วัดได้จากโพลีกริม

เมื่อนำผลประมวลสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ และ $\bar{\varepsilon}_V$ ของการจำลองจากทุกกรณีมาพิจารณาร่วมกัน (ดังรูปที่ 14) พบว่า Sensitivity ในการวัดแรงในแนวสัมผัส F_H ของโพลีกริมจากการรับภาระ ณ มุม ϕ ที่ 0° 30° 45° และ 60° จะมีค่าใกล้เคียงกันด้วยค่าเฉลี่ยและ Standard error เท่ากับ $1.4538 \pm 0.0179 N/\mu\epsilon$ ทั้งนี้สามารถสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นจากค่าของแรง F_H และระดับสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ ขณะเวลาเดียวจากการรับภาระของทั้งสี่กรณีดังกล่าว (ดังรูปที่ 15) เพื่อทำนายค่าของแรง F_H จากระดับสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\varepsilon}_H$ สำหรับการรับแรงกระทำ F ในช่วง $\pm 200N$ โดยไม่ต้องขึ้นกับมุมกระทำ ϕ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.9988 ดังสมการที่ (5) ต่อไปนี้

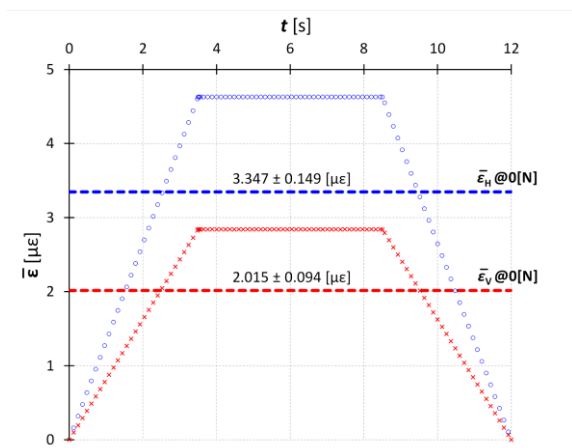
$$F_H [N] = 1.4171 \bar{\varepsilon}_H [\mu\epsilon] - 2.1694 \quad (5)$$



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์แรงและสัญญาณความเครียดเฉลี่ย

ทำนองเดียวกัน Sensitivity ในการวัดแรงตามแนวรัศมี F_V ของโพลตรงจากการรับภาระ ณ มุม ϕ ที่ 30° 45° 60° และ 90° ก็จะมีค่าเฉลี่ยและ Standard error เท่ากับ 2.7120 ± 0.0381 N/ $\mu\epsilon$ ทั้งนี้สามารถสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นจากค่าของแรง F_V และระดับสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\epsilon}_V$ ณ ขณะเวลาเดียวจากการรับภาระของทั้งสี่กรณีดังกล่าว (ดังรูปที่ 15) เพื่อทำนายค่าของแรง F_V จากระดับสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\epsilon}_V$ สำหรับการรับแรงกระทำ F ในช่วง ± 200 N โดยไม่ต้องขึ้นกับมุมกระทำ ϕ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.9985 ดังสมการที่ (6) ต่อไปนี้

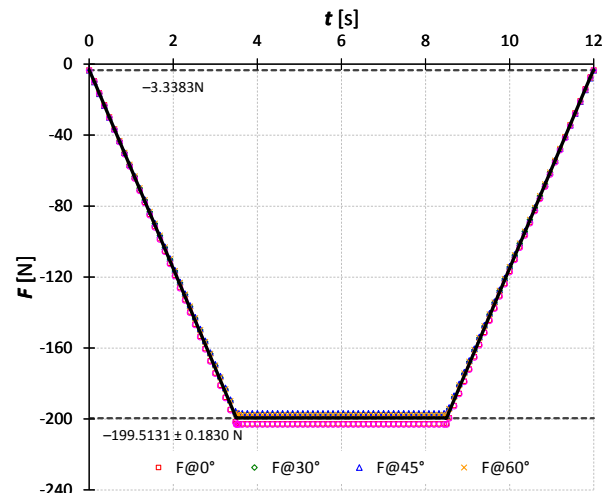
$$F_V [\text{N}] = 2.6325 \bar{\epsilon}_V [\mu\epsilon] - 2.5374 \quad (6)$$



รูปที่ 16 สัญญาณความเครียดเฉลี่ยเมื่อไม่มีแรงองค์ประกอบ

ทั้งนี้เมื่อนำระดับสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\epsilon}_H$ เมื่อไม่มีแรงองค์ประกอบของแรง -200 N มากระทำในแนวรัศมี ณ มุม $\phi = 90^\circ$ มาพิจารณา (ดังรูปที่ 16) พบว่า สัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\epsilon}_H$ เมื่อไม่มีแรงองค์ประกอบในแนวรัศมีมากระทำ ($F_V = 0$) มีค่าเฉลี่ยและ Standard error เท่ากับ 3.347 ± 0.149 $\mu\epsilon$ ซึ่งสามารถพิจารณาให้เป็น Background noise signal ระดับ $2.3627 \sim 2.7851$ N ในการวัดแรงตามแนวสัมผัส F_H ของแรงกระทำ F ในช่วง ± 200 N ทำนองเดียวกันเมื่อนำระดับสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\epsilon}_V$ เมื่อไม่มีแรงองค์ประกอบของแรง -200 N มากระทำตามแนวสัมผัส ณ มุม $\phi = 0^\circ$ มาพิจารณา (ดังรูปที่ 16) พบว่า สัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\epsilon}_V$ เมื่อไม่มีแรงองค์ประกอบตามแนวสัมผัสมากระทำ ($F_H = 0$) มีค่าเฉลี่ยและ Standard error เท่ากับ 2.015 ± 0.094 $\mu\epsilon$ ซึ่งสามารถพิจารณาให้เป็น Background noise signal ที่ระดับเท่ากับ $2.5212 \sim 3.0154$ N ในการวัดแรงในแนวรัศมี F_V ของแรงกระทำ F ในช่วง ± 200 N โดยสัญญาณรวมของแรงองค์ประกอบ ณ ขณะเวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากพื้นฐานการหาขนาดของแรงลัพธ์ดังแสดงไว้ในสมการที่ (7) ต่อไปนี้

$$F(t) = \sqrt{(F_H(t))^2 + (F_V(t))^2} \quad (7)$$



รูปที่ 17 แผนผังเวลาของสัญญาณเฉลี่ยของแรง F ประมวลได้

เมื่อพิจารณาแผนผังเวลาของสัญญาณเฉลี่ยของแรง F ซึ่งประมวลได้ตามสมการที่ (7) จากทุกกรณีที่ได้นำเสนอ (ดังรูปที่ 17) พบว่า สัญญาณเฉลี่ยดังกล่าวข้างต้นมีระดับ Ground signal เท่ากับ -3.3383 N และมีระดับ Peak signal อยู่ที่ -199.5131 ± 0.1830 N

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์แนวทางออกแบบของ Huyanan [9] มาสร้างแบบจำลองทรงตันของโพลีคริงรูปร่างวงแหวนซึ่งทำจากวัสดุ Al6061 ที่สามารถจำลองการรับภาระด้วยเงื่อนไขตามจริงภายใต้แรงกระทำ F ในช่วง -200N ณ มุมกระทำ ϕ เท่ากับ 0° 30° 45° 60° และ 90° ได้โดยไม่เกิด Distorted element ขึ้นใน Mesh และความเค้น von Mises σ_0 ณ บริเวณใด ๆ ของโพลีคริงที่มีค่าไม่เกิน Yield strength ของ Al6061 เมื่อนำผลเฉลี่ยของการจำลองเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปความเค้นรอบวง σ_0 จาก Node ที่เป็นตัวแทนตำแหน่งเชิงมุมอ้างอิงสำหรับติดตั้งสเตรนเกจตามคำแนะนำของ Huyanan [8] มาประมวลหาสัญญาณความเครียดเฉลี่ย $\bar{\epsilon}$ ซึ่งมีการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นต่อแรงองค์ประกอบแต่ละแนวที่โพลีคริงที่นำเสนอตรวจวัดได้ตามสมการถดถอยเชิงเส้นทั้งสองซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ R^2 ไม่ต่ำกว่า 0.9985 ทั้งยังพบว่าโพลีคริงนี้มีค่า Sensitivity ในการวัดแรงตามแนวสัมผัสและแนวรัศมีเท่ากับ $1.4538 \pm 0.0179 \text{ N}/\mu\epsilon$ และ $2.7120 \pm 0.0381 \text{ N}/\mu\epsilon$ ตามลำดับ ขณะที่พบว่า Background noise signal มีระดับไม่เกิน 3N (หรือ 1.5% ของ Full scale output) เมื่อนำสัญญาณของแรงองค์ประกอบทั้งสองแกนที่ได้จากทุกกรณีมาประมวลหาแรงลัพธ์ที่ตรวจวัดได้พบว่า สัญญาณรวมของแรงองค์ประกอบที่ได้จากการวัดด้วยโพลีคริงนี้มีค่าเฉลี่ยของระดับ Ground signal อยู่ที่ -3.3383N ขณะที่ระดับ Peak signal อยู่ที่ $-199.5131 \pm 0.1830 \text{ N}$ และเมื่อนำไปเทียบกับ Input signal (ดังรูปที่ 5) แล้วพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่ได้จากการวัดของโพลีคริงที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่า Background noise signal ที่วิเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จตามจุดประสงค์ที่ต้องการด้วยแนวทางดำเนินการและการประมวลผลที่ได้นำเสนอมาทั้งหมด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Youssef, H.A., *Design of machine tool dynamometers*, Bulletin of the Faculty of Engineering, Alexandria University, Vol. 10 (1971): pp. 279-303.
- [2] Kroencke M., Hull M.L., *A method for designing multiload component dynamometers incorporating octagonal strain rings*, Experimental Mechanics Vol. 29 No. 2 (1989): pp. 195-204.
- [3] Ito S., Sakai S., Ishikawa M., *A study on a two dimensional dynamometer for surface grinding*, Journal of the Japan Society of Precision Engineering Vol. 44 No. 521 (1978): pp. 634-639.
- [4] Rahman MA., Rahman S., *Design parameters of a circular proving ring of uniform strength*, Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering 2005, ICME2005-AM15: pp. 1-5. Dhaka, Bangladesh, December 28-30, 2005.
- [5] Chen B., Wu X., Peng X., *Finite element analysis of ring strain sensor*, Sensors and Actuators A Vol. 139 (2007): pp. 66-69.
- [6] Kumar H., Sharma C., Kumar, A., *Design and development of precision force transducers*, Journal of Scientific & Industrial Research Vol. 70 No. 7 (2011): pp. 519-524.
- [7] Kumar H., Sharma C., Kumar A., Arora P.K., Kumar S., *Design, development and metrological of a low capacity precision industrial force transducer*, ISA Transactions Vol. 58 (2015): pp. 659-666.
- [8] Huyanan T., *Finite Element Analysis of Strain Gauges Location on Circular Ring Load Cell*, Engineering Transactions Vol. 20 No. 2(43) (2017): pp. 75-85.
- [9] Huyanan T., *An alternative design approach for circular load ring*, Engineering Transactions Vol. 19 No. 2(41) (2016): pp. 125-132.



ฐิตะพล หุยานันท์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2534 จบการศึกษาระดับปริญญาโท จาก Coventry University ประเทศอังกฤษ ปี 2540 จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก University of Sheffield ประเทศอังกฤษ ปี 2547 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร งานวิจัยเน้นทางด้านกลศาสตร์วัสดุประยุกต์ คอมพิวเตอร์ช่วยสำหรับงานทางวิศวกรรม การจำลองและการวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ การทดสอบและการวัดเชิงกล