

แนวทางการออกแบบทางเลือกสำหรับโหลดรีจรูปวงกลม

An Alternative Design Approach for Circular Load Ring

ฐิตะพล หุทยานันท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10530

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

E-mail: thuyanan@mut.ac.th

Manuscript received October 20, 2015

Revised January 5, 2016

บทคัดย่อ

โหลดรีจที่ใช้เป็น Elastic body ของวงแหวนวัดแรงได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตามแนวทางการออกแบบที่ the National Bureau of Standards หรือ NBS กำหนดไว้ แม้ว่าจะมีการพัฒนารูปทรงของโหลดรีจที่ต่างไปจากรูปวงแหวนวงกลมแต่ส่วนใหญ่มักยังคงตั้งอยู่พื้นฐานของทฤษฎีความเค้นของวงแหวนแบบบางเหมือนกัน บทความนี้ต้องการจะนำเสนอแนวทางการออกแบบทางเลือกสำหรับโหลดรีจแบบวงกลมหน้าตัดคงที่รูปสี่เหลี่ยมซึ่งถูกประมวลผลมาจากการวิเคราะห์ทฤษฎีวงแหวนแบบบางร่วมกับข้อจำกัดของวัสดุและค่าของคุณสมบัติวัสดุที่เกี่ยวข้อง โดยได้กำหนดตัวแปรไร้หน่วยขึ้นมาใหม่ สองตัว ได้แก่ K_{mat} และ $K_{i/R}$ เพื่อกำจัดความเอะอะของการคำนวณแบบดั้งเดิมและยังสามารถนำไปใช้ในการสร้าง Performance chart δ^{net}/R ที่ใช้ประกอบกับแผนสถิติ $Ew\delta^{net}$ ในขั้นตอนการออกแบบโหลดรีจตามแนวทางที่นำเสนอ จากการทดสอบด้วย UTM พบว่าผลการประเมินสมรรถนะโหลดรีจเป็นไปในทางเดียวกันกับค่าการออกแบบด้วยค่าความแตกต่างที่ไม่สูงมากนัก เพราะฉะนั้นจึงอาจสรุปในที่นี้ได้ว่า แนวทางการออกแบบสำหรับโหลดรีจรูปวงกลมตามขั้นตอนต่างๆ ที่นำเสนอนี้จัดเป็นหนึ่งในทางเลือกที่สมควรนำไปใช้งาน และมีศักยภาพพอที่จะพัฒนาต่อยอดขึ้นไป

คำสำคัญ: โหลดรีจ, โหลดรีจรูปวงกลม, วงแหวนวัดแรง, เครื่องมือวัดแรง, แนวทางการออกแบบทางเลือก

ABSTRACT

As an elastic body of proving rings, load rings have been continuously developed with the code of conduct provided by the National Bureau of Standards (NBS). Despite a geometry of load ring may differ from a circular ring shape, they share the same fundamentals on the thin ring stress theory. This paper presents an alternative design approach for circular ring with rectangular cross-section. This approach has been obtained from an analysis of the thin ring theory combined with its limitation and applied values of relevant material properties. Two novel dimensionless parameters have been introduced as K_{mat} and $K_{i/R}$ to overcome a cumbersome calculation in conventional practices. Moreover, these both parameters have been employed to a construction of the δ^{net}/R performance chart which is used in combination with the $Ew\delta^{net}$ graph in order to design the load rings with this presented approach. According to the compression testing results obtained from the UTM, it was found that the performance of load ring is in good agreement with the designed values with an insignificant difference. It is therefore reasonable to conclude that this design

approach is suitable for a practical use as well as its potential for a further development.

Keywords: Load ring, Circular load ring, Proving ring, Force transducer, Alternative design approach.

1. บทนำ

โหลดริง (Load ring) ถูกนำมาใช้เป็น Elastic body ของวงแหวนวัดแรง (Proving ring) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดแรง (Force transducer) โดยมีการพัฒนาตามแนวทางการออกแบบที่ the National Bureau of Standards (NBS) กำหนดตั้งแต่ปี 1946 อย่างต่อเนื่อง [1] – [6] แม้ว่าได้มีการพัฒนารูปทรงของโหลดริงที่ต่างไปจากรูปวงแหวนวงกลม (Circular ring) ออกไป เช่น วงแหวนวงกลมแบบขยาย วงแหวนสี่เหลี่ยม วงแหวนแปดเหลี่ยม วงแหวนแปดเหลี่ยมแบบขยาย เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านั้นถูกพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของทฤษฎีความเค้นของวงแหวนแบบบาง (Thin-ring stress theory) ที่ Timoshenko ได้นำเสนอและอธิบายไว้อย่างกว้างขวางตั้งแต่ปี 1930 [7] นอกจากนี้ยังมีการนำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบ [1, [2], [4] เนื่องจากความแตกต่างของผลที่ได้จากทฤษฎีวงแหวนแบบบางและผลทดสอบจริงยังมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับโหลดริงทั้งในแง่การออกแบบและการนำไปใช้ประยุกต์งานยังมีความจำเป็นอยู่ในปัจจุบัน

สำหรับบทความนี้ต้องการจะนำเสนอแนวทางการออกแบบทางเลือกสำหรับโหลดริงแบบวงกลมหน้าตัดคกที่รูปสี่เหลี่ยมซึ่งประมวลมาจากการวิเคราะห์ทฤษฎีวงแหวนแบบบางร่วมกับข้อจำกัดและค่าของคุณสมบัติวัสดุจริงที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นอีกหนทางให้แก่ผู้ที่สนใจจะต่อยอดงานวิจัยและพัฒนาที่ต้องประยุกต์ใช้งานโหลดริง

2. โหลดริงภายใต้แรงในแนวแกน

การวิเคราะห์โหลดริงในงานนี้อยู่บนพื้นฐานทฤษฎีวงแหวนแบบบาง [7] เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ ข้างต้น พิจารณาจากรูปที่ 1(a) จะเห็นว่า โหลดริงรูปวงกลมรัศมีเฉลี่ย R หน้าตัดสี่เหลี่ยมกว้าง w และหนา t รับแรงดึงในแนวตั้ง P ซึ่งเป็นผลให้วงแหวนสมมาตรรอบแกนทั้ง x และ y ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์สมดุลสถิตที่หนึ่งในสี่

ส่วนของโหลดริงได้ดังรูปที่ 1(b) ซึ่งพบว่า โมเมนต์ตัด M ที่ตำแหน่งเชิงมุม θ หาได้จาก

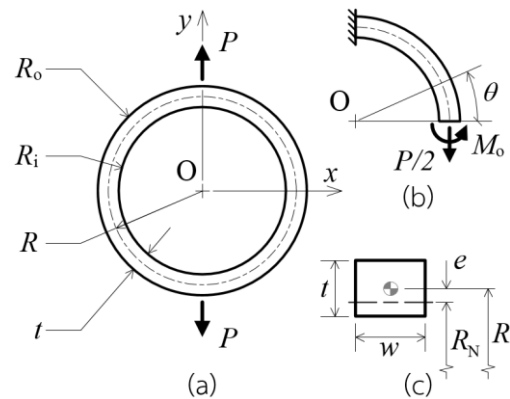
$$M = \frac{PR}{2}(1 - \cos \theta) - M_0 \quad (1)$$

เนื่องจากไม่มี Rotation เกิดขึ้นในระนาบสมมาตรทำให้พิจารณาได้ว่า $\frac{\partial U}{\partial M_0}$ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial M_0} &= \int_0^{\pi/2} \frac{M^2}{2EI} R d\theta = 0 \rightarrow \int_0^{\pi/2} M^2 d\theta = 0 \\ \therefore M_0 &= \frac{PR}{2} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \end{aligned}$$

แทน M_0 ที่ได้กลับลงในสมการที่ (1) จะได้ฟังก์ชันของโมเมนต์ตัด M ณ ตำแหน่งเชิงมุมใด ๆ ดังนี้

$$M = \frac{PR}{2} \left(\frac{2}{\pi} - \cos \theta\right) \text{ เมื่อ } 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (2)$$



รูปที่ 1 การพิจารณาโหลดริงภายใต้แรงดึงในแนวตั้ง

2.1 การโค้งงอของโหลดริง

การหาการโค้งงอของโหลดริงนั้นสามารถทำได้โดยอาศัย Castigliano's second theorem บนสมมติฐานว่าการโค้งงอในแนวตั้งที่เกิด ณ หนึ่งในสี่ส่วนของโหลดริงเป็นผลมาจากแรงดึง $P/2$

ดังนั้นระยะโก่ง $\delta_{1/4}$ ในส่วนนี้จึงหาได้จากอนุพันธ์ย่อยของ Strain energy U^* เทียบกับ $P/2$ ทั้งนี้ U^* สามารถหาจากโมเมนต์ดัดในสมการที่ (2)

$$U^* = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2EI} \left(\frac{PR}{2} \left(\frac{2}{\pi} - \cos \theta \right) \right)^2 R d\theta$$

$$\frac{\partial U^*}{\partial P/2} = P/2 \frac{R^3}{EI} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) = \delta_{1/4}$$

$$\therefore \delta_{1/4} = \frac{PR^3}{2E} \frac{12}{wt^3} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) = \frac{6PR^3}{wEt^3} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right)$$

ฉะนั้นระยะโก่งสุทธิ δ^{net} ตามแนวตั้งของโหลตรงสามารถหาได้จาก $\delta_{1/4}$ ดังต่อไปนี้

$$\delta^{\text{net}} = 2\delta_{1/4} = \left(3\pi - \frac{12}{\pi} \right) \left(\frac{R}{t} \right)^3 \frac{P}{wE} \quad (3)$$

Boresi และ Schmidt [8] อธิบายไว้ว่า ความคลาดเคลื่อนของการโก่งตามสมการที่ (3) จะมีค่าน้อยกว่า 7.7% เมื่อ $R/t > 2.0$

2.2 ความเค้นสูงสุดและต่ำสุดในโหลตรง

การหาความเค้นรอบวงทางทฤษฎีของโหลตรงแบบวงกลมหน้าตัดคงที่รูปสี่เหลี่ยมมี 2 แนวทาง ได้แก่

Straight beam formula สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sigma_{\theta\theta} = -Mc / I$$

Curved beam formula สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{N}{A} - \frac{M(A - rA_m)}{Ar(A - RA_m)}$$

เมื่อแรง $N = P \cos \theta$ พื้นที่หน้าตัด $A = wt$ และ $A_m = w \ln(R_o / R_i)$ รัศมี $R_i \leq r \leq R_o$ โมเมนต์ดัด M เป็นไปตามสมการที่ (2) โดยค่าความเค้นสูงสุด σ_i^{max} จะเกิดบริเวณผิววงแหวนด้านในที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = 0^\circ$ ณ $r = R_i$ ตามสมการดังนี้

$$\sigma_i^{\text{max}} = \frac{P}{wt} \left(1 - \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \frac{t/R_i - \ln(R_o/R_i)}{t/R - \ln(R_o/R_i)} \right) \quad (5a)$$

และค่าความเค้นคู่ σ_o^* ณ ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = 0^\circ$ บนบริเวณผิววงแหวนด้านนอกซึ่ง $r = R_o$ แสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\sigma_o^* = \frac{P}{wt} \left(1 - \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \frac{t/R_o - \ln(R_o/R_i)}{t/R - \ln(R_o/R_i)} \right) \quad (5b)$$

สำหรับรัศมี R_N ดังรูปที่ 1(c) ซึ่งเป็นตำแหน่งพิกัดของ Neutral surface นั้นสามารถหาได้จาก r ที่ทำให้ $\partial \sigma_{\theta\theta} / \partial r = 0$ ซึ่งก็คือ $R_N = A/A_m = t / \ln(R_o/R_i)$ เยื้องจากจุด Centroid ของหน้าตัดเท่ากับ $e = R_N - R$ อย่างไรก็ตาม Boresi และ Schmidt [8] ได้อธิบายไว้ว่า ค่าตอบจาก Curved beam formula เมื่อ $R/t \geq 5.0$ จะเริ่มเข้าสู่ Straight beam formula ด้วยความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 7%

3. การประมวลผลแนวทางออกแบบโหลตรง

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3) จะพบว่า t/R เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระยะโก่งสุทธิของโหลตรงที่สุด และเมื่อจัดรูปสมการที่ (5) ที่แสดงการหาความเค้นรอบวงสูงสุดและความเค้นคู่ ณ ตำแหน่งเชิงมุมเดียวกันได้ดังนี้

$$\sigma_i^{\text{max}} = \frac{1}{\zeta} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \frac{\frac{\zeta^-}{\zeta^+} - \ln \frac{\zeta^+}{\zeta^-}}{\zeta^- - \ln \frac{\zeta^+}{\zeta^-}} \right] \frac{1}{R} \frac{P}{w} \quad (6a)$$

และ

$$\sigma_o^* = \frac{1}{\zeta} \left(1 - \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \frac{\frac{\zeta}{\zeta^+} - \ln \frac{\zeta}{\zeta^-}}{\zeta - \ln \frac{\zeta^+}{\zeta^-}} \right) \frac{1}{R} \frac{P}{w} \quad (6a)$$

เมื่อกำหนดให้ $\zeta = t/R$, $\zeta^+ = 1 + 0.5t/R$ และ $\zeta^- = 1 - 0.5t/R$ ถ้าพิจารณาสมการที่ (3) ในทำนองเดียวกันกับสมการที่ (5) ก็จะเห็นว่า สามารถนำเสนอระยะโค้งสุทธิ δ^{net} ในรูปฟังก์ชันของ ζ ได้เช่นกัน ดังนี้

$$\delta^{\text{net}} = \left(3\pi - \frac{12}{\pi} \right) \frac{1}{\zeta^3} \frac{1}{E} \frac{P}{w} \quad (7)$$

ถ้านำสมการที่ (7) มาหารสมการที่ (6) แล้วจัดรูปความสัมพันธ์ใหม่ก็จะได้สมการใหม่ของความไวต่อรัศมี δ^{net}/R ที่ยังไม่เคยถูกนำมาก่อน ดังต่อไปนี้

$$\frac{\delta^{\text{net}}}{R} = \frac{\sigma_i^{\text{max}}}{E} \frac{\left(3\pi - \frac{12}{\pi} \right) / \zeta^2}{\left(1 - \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \frac{\frac{\zeta}{\zeta^+} - \ln \frac{\zeta}{\zeta^-}}{\zeta - \ln \frac{\zeta^+}{\zeta^-}} \right)} \quad (8)$$

ข้อจำกัดการใช้งานโหลดจริง คือ การรับภาระของมันต้องไม่ทำให้ความเค้น σ_i^{max} มากกว่า Proportional limit จึงจะทำให้โหลดจริงเสียรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นด้วย Young's modulus คงที่ค่าหนึ่ง อาศัยหลัก Damage prevention ในการออกแบบทางวิศวกรรมทำให้เลือก Allowance stress ที่เหมาะสมจาก $\sigma_{\text{allow}} = \sigma_y / FoS$ (เมื่อ σ_y คือ Yield strength และ FoS คือ Factor of safety) ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรไร้หน่วยขึ้นใหม่ สองตัว ได้แก่ K_{mat} และ $K_{t/R}$ เพื่อกำจัดความเหอะเหอะของสมการที่ (8) และยังสามารถสะท้อนอิทธิพลของรูปทรงและวัสดุต่อการโค้งงอของโหลดจริง ณ รัศมี R ที่เลือกใช้งานได้ชัดเจนขึ้นอีกด้วย โดยนิยามให้

ปัจจัยไร้หน่วยเชิงวัสดุ K_{mat} กำหนดจาก สัดส่วน Yield strength ต่อ Young's modulus ของวัสดุที่นำมาสร้างโหลดจริง

(ดังตารางที่ 1)

$$K_{\text{mat}} = \frac{\sigma_y}{E} \quad (9a)$$

ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่า K_{mat} ของวัสดุ

ชื่อวัสดุ	E [GPa]	σ_y [MPa]	K_{mat}
ASTM A36	200	250	0.001250
AISI 4130	205	460	0.002244
Al 5052-H38	70	255	0.003643
Al 6061-T6511	69	361	0.005232
Al 7075-T6	72	500	0.006944

ตัวแปรไร้หน่วยเชิงรูปทรง $K_{t/R}$ คือ ฟังก์ชันของ t/R ซึ่งถูกแสดงไว้อย่างง่ายในรูปของตัวแปร ζ , ζ^+ และ ζ^- โดยความสัมพันธ์ระหว่าง t/R และ $K_{t/R}$ แสดงดังรูปที่ 2

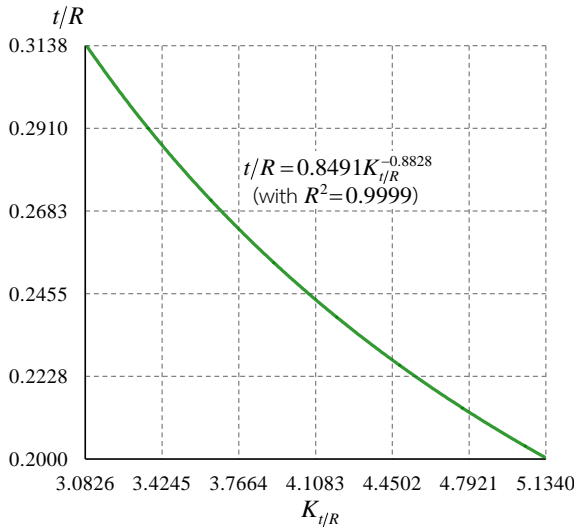
$$K_{t/R} = \frac{\left(3\pi - \frac{12}{\pi} \right)}{\zeta^2 \left(1 - \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \right) \frac{\frac{\zeta}{\zeta^+} - \ln \frac{\zeta}{\zeta^-}}{\zeta - \ln \frac{\zeta^+}{\zeta^-}} \right)} \quad (9b)$$

เพราะฉะนั้นความไวต่อรัศมี δ^{net}/R ที่ถูกจัดในรูปฟังก์ชันของปัจจัยไร้หน่วย K_{mat} และ $K_{t/R}$ เป็นดังนี้

$$\frac{\delta^{\text{net}}}{R} = \frac{K_{\text{mat}}}{FoS} K_{t/R} \quad \text{โดยทั่วไป } FoS \geq 1 \quad (10)$$

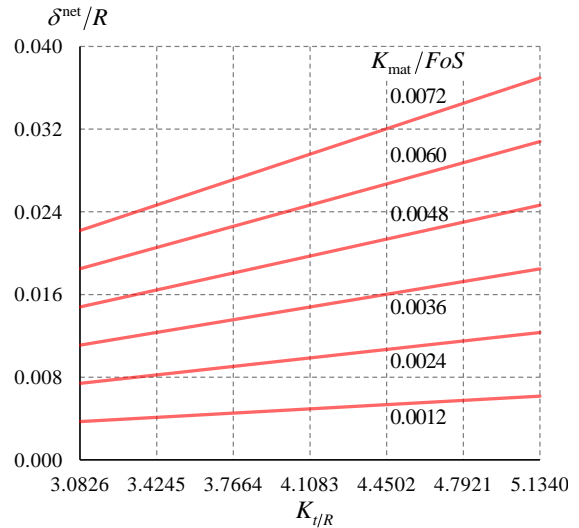
พิจารณาสัดส่วนระยะจาก Neutral surface ของผิวด้านในต่อผิวด้านนอก $|c_i/c_o|$ ของโหลดจริงในช่วงใช้งาน $0.2 < \zeta < 0.5$ ดังที่ได้อธิบายข้างต้นไว้แล้ว โดยที่

$$|c_i/c_o| = \frac{\zeta^- \ln(\zeta^+/\zeta^-) - \zeta}{\zeta^+ \ln(\zeta^+/\zeta^-) - \zeta}$$



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง t/R และ $K_{t/R}$

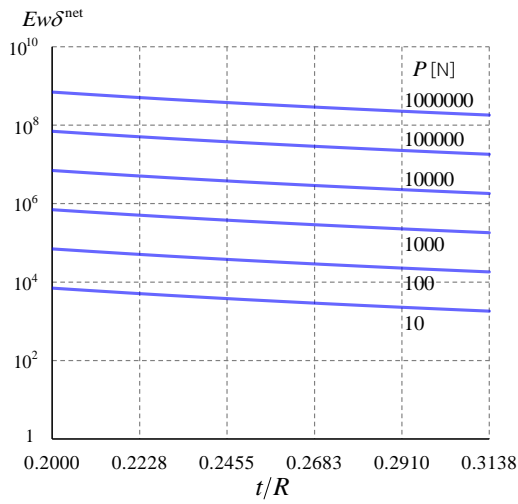
จากผล Goal seeking ของ ζ บนฟังก์ชัน $|c_i/c_o|$ ข้างต้น ภายใต้สมมติฐานของทฤษฎีวงแหวนแบบบางที่ให้ $|c_i/c_o| \rightarrow 1$ พบว่า $|c_i|$ มีค่าไม่เกินกว่า 10% $|c_o|$ ในช่วง $0.2 < \zeta \leq 0.3138$ จึงสมควรเลือกใช้ ζ ในช่วงนี้และเป็นผลให้ได้ $1.7543 < K_{t/R} \leq 3.0826$ ซึ่งจะถูกนำมาคำนวณค่า δ^{net}/R ณ K_{mat}/FoS ต่าง ๆ ตามสมการที่ (10) ดังแผนสถิติรูปที่ 3 ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการเลือกประเภทวัสดุที่จะนำมาสร้างโพลดริง



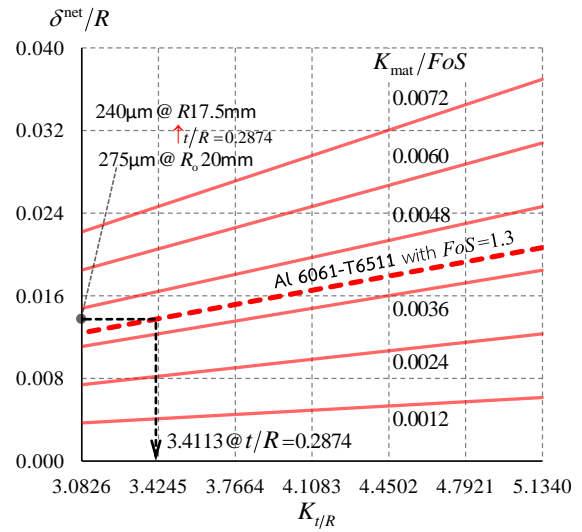
รูปที่ 3 ค่า δ^{net}/R ที่เปลี่ยนแปลงตาม $K_{t/R}$ ณ K_{mat}/FoS ใด ๆ

ในการทำงานเกี่ยวกับการกำหนดแนวทางเลือกวัสดุข้างต้น สมการที่ (7) ยังถูกนำมาใช้มาจัดรูปความสัมพันธ์หน่วย $Ew\delta^{net}$ ที่เป็นฟังก์ชันของ ζ ดังสมการที่ (11) และเมื่อสร้างเป็นแผนสถิติ (ดังรูปที่ 4) ก็สามารถนำใช้หาขนาดความกว้าง w ของโพลดริง ณ ภาระใช้งาน P สูงสุดที่ต้องการหลังจากทราบค่า E และ δ^{net} ในขั้นตอนก่อนหน้านี้ด้วยค่ารัศมีวงนอก R_o ที่กำหนดมา

$$Ew\delta^{net} = \left(3\pi - \frac{12}{\pi}\right) \frac{1}{\zeta^3} P \tag{11}$$



รูปที่ 4 ค่า $Ew\delta^{net}$ ที่เปลี่ยนตาม t/R ณ P ใดๆ



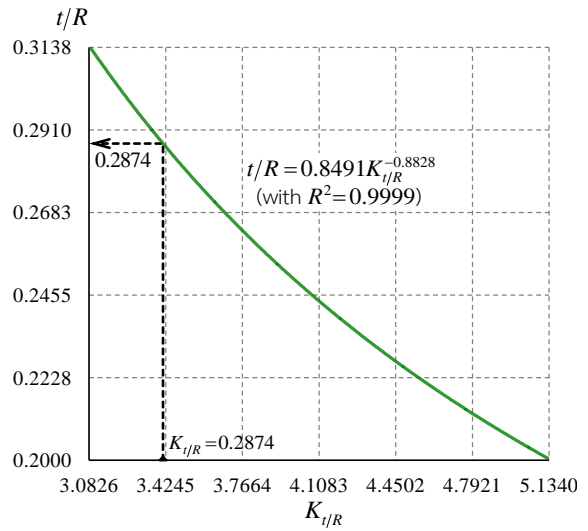
รูปที่ 5 การสาคัดการใช้งานแผนผังสมรรถนะ δ^{net} / R

4. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

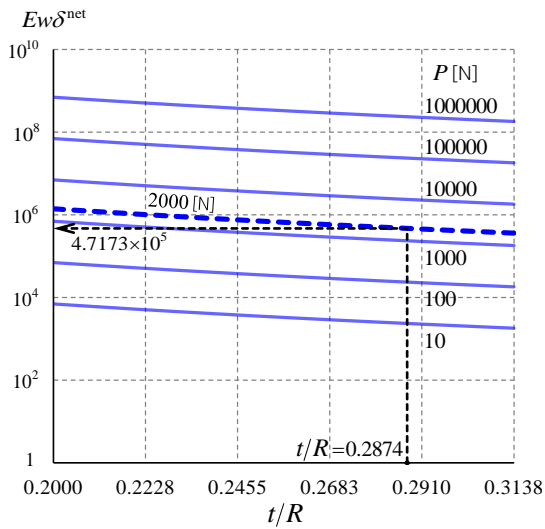
จากที่ได้นำเสนอมาจนถึงบรรทัดนี้ชี้ให้เห็นถึง ความเป็นไปได้ที่จะนำผลการวิเคราะห์และข้อจำกัดข้างต้นมาประมวลเป็นขั้นตอนทางเลือกใหม่สำหรับการออกแบบโหลดริง ดังจะแสดงอย่างกระจำจ่างต่อไปในหัวข้อนี้

4.1 การออกแบบโหลดริง

การออกแบบโหลดริงให้เหมาะสมกับการใช้งานใดก็จำเป็นต้องกำหนดตัวแปรนำเข้าที่เหมาะสมกับงานนั้น



รูปที่ 6 การสาคัดการใช้งานแผนสถิติ $K_{t/R}$



รูปที่ 7 การสาธิตการใช้งานแผนสถิติ δ^{net} / R

จากการสาธิตดังแสดงในรูปที่ 5 ถึง 7 สามารถนำมาประมวลเป็นขั้นตอนการออกแบบโหลดริงได้ดังนี้

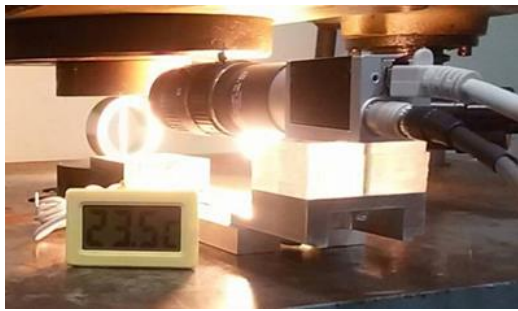
1. กำหนดตัวแปรนำเข้าเหล่านี้ด้วยค่าที่ต้องการ ได้แก่ ภาระสูงสุด P [N] ระยะโคงสุทธิ δ^{net} [mm] รัศมีวงนอก R_o [mm] และ Factor of safety FoS
2. คำนวณค่า δ^{net} / R_o เพื่อใช้เป็นค่าตั้งต้นในการเลือกปัจจัยไร้หน่วย K_{mat} / FoS และ $K_{t/R}$ ที่เหมาะสมจากแผนสถิติดังรูปที่ 3
3. นำค่า K_{mat} / FoS และ $K_{t/R}$ มาคำนวณค่า δ^{net} / R ตามสมการที่ (10) หรือจะเลือกอ่านค่า δ^{net} / R คร่าวๆ จากแผนสถิติดังรูปที่ 3 ก็ได้
4. คำนวณค่า K_{mat} โดยคูณ K_{mat} / FoS ด้วย FoS แล้วนำไปเลือกวัสดุที่จะนำมาสร้างโหลดริงดังตัวอย่างจากตารางที่ 1 ทั้งนี้ อาจต้องมีการปรับแต่งค่า FoS เล็กน้อยเพื่อให้สอดคล้องกับค่า K_{mat} ของวัสดุที่เลือกใช้
5. นำ $K_{t/R}$ ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 มาหาค่า t/R โดยใช้ความสัมพันธ์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6
6. หาค่าของรัศมีเฉลี่ย R และ ความหนา t ในหน่วย[mm] จาก $R = R_o / (1 + 0.5t/R)$ และ $t = (t/R)R$ ตามลำดับ

7. นำค่า R ที่ได้มาคำนวณปรับแก้ค่าของระยะโคงสุทธิ δ^{net} [mm] ด้วยสมการ $\delta^{net} = (\delta^{net} / R_o) R$
8. หาค่า $Ew\delta^{net}$ ซึ่งสัมพันธ์กับค่า t/R ณ ภาระใช้งานสูงสุด P [N] ที่กำหนดไว้แล้ว โดยสามารถเลือกอ่านค่าคร่าวๆ จากแผนสถิติดังรูปที่ 4 หรือจะคำนวณตามสมการที่ (11) ก็ได้
9. นำค่า Young's modulus E [MPa] ของวัสดุที่จะใช้สร้างโหลดริงจากแหล่งเดียวกับที่ใช้ในการคำนวณค่าของตัวแปรไร้หน่วย K_{mat} และระยะโคงสุทธิ δ^{net} [mm] ที่ได้รับการปรับแก้แล้วจากขั้นตอนที่ 7 มาหารออกจากค่า $Ew\delta^{net}$ ก็จะได้ความกว้าง w [mm] ของโหลดริง

งานวิจัยนี้ได้กำหนดกรณีศึกษาของการออกแบบโหลดริงที่มีรัศมีภายนอก 20mm ซึ่งกำหนดมีภาระใช้งานสูงสุด ณ ระยะโคงสุทธิไม่เกินกว่า 2000N ที่ระยะ 0.275mm ด้วย Factor of safety เท่ากับ 1.3 โดยใช้แนวทางใหม่ที่น่าเสนอ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินการตามลำดับขั้นตอนข้างต้น (พิจารณารูปที่ 5 - 7 ประกอบ) ก็คือโหลดริง Aluminium alloys Al 6061-T6511 รูปร่างวง รัศมีภายนอก 20mm หนา 5mm และ กว้าง 25mm ซึ่งต้องให้สมรรถนะสอดคล้องตามค่าออกแบบด้วยระยะโคงสุทธิ 0.240mm ที่ภาระสูงสุด 2000N

4.2 การประเมินสมรรถนะโหลดริง

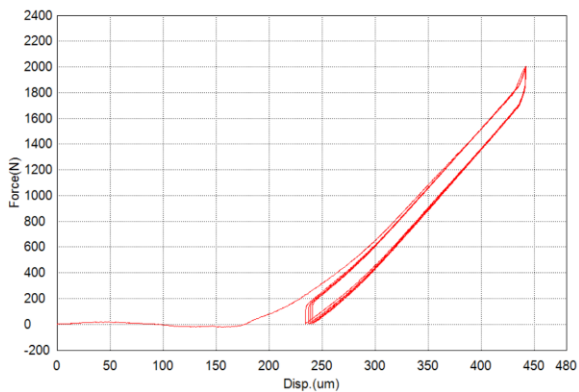
นำโหลดที่สร้างด้วย Al 6061-T6511 ตามมิติขนาดที่ได้จากแนวทางออกแบบข้างต้นไปทดสอบด้วย Universal testing machine (UTM) รุ่น UH-300kNXR ของ Shimadzu โดยเป็นการทดสอบการรับภาระกดแบบไปกลับด้วยอัตราเร็ว 1mm/min ในช่วง 0 ถึง 2kN ดังรูปที่ 8(a) จะให้ผลการทดสอบดังรูปที่ 8(b) ข้างล่างนี้



(a) การติดตั้งการทดสอบ

Report Date	6/7/2016	Test Date	6/7/2016
Temperature	23.3 deg.C	Testing Machine	UH-X
Machine No.	30096684	Test Mode	Cycle
Test Type	Compression	Speed	1mm/min
Shape	Area	No of Batches:	1
Number of Cycles	5		

Name	Max_Force	Min_Force	Hysteresis	Hysteresis_Loss
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas		
Unit	N	N	J	%
[1Cycle]	1996.90	-20.504	0.04319	20.2394
[2Cycle]	1996.90	5.81741	0.03382	16.7830
[3Cycle]	2001.19	3.52860	0.03413	16.9932
[4Cycle]	2002.95	3.95775	0.03405	16.9916
[5Cycle]	1998.57	5.19753	0.03409	17.0729
Average	1999.30	-0.4005	0.03586	17.6120
Standard Deviation	2.69011	11.2759	0.00410	1.47330
Maximum	2002.95	5.81741	0.04319	20.2394
Minimum	1996.90	-20.504	0.03382	16.7830

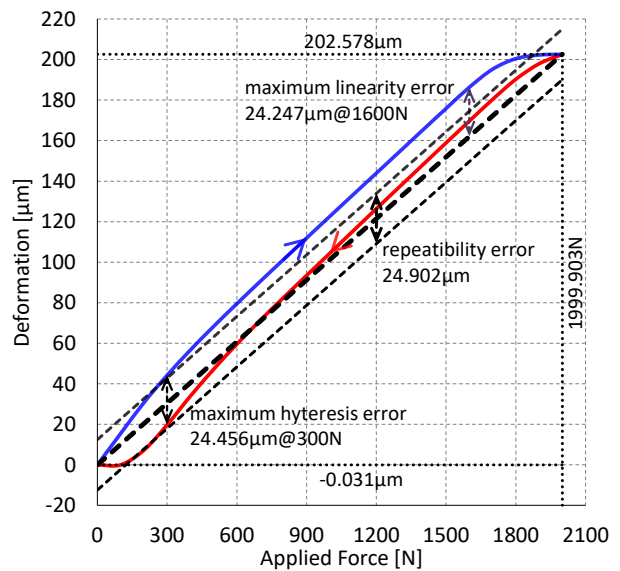


(b) ข้อมูลดิบของผลการทดสอบ

รูปที่ 8 การทดสอบของโหลดริงด้วย UTM

สำหรับผลประเมินสมรรถนะของโหลดริงที่สร้างขึ้นจากวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วย UTM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยผลประเมินของตัวบ่งชี้หลักแต่ละตัวได้ถูกแสดงไว้ดังปรากฏในตารางที่

2



รูปที่ 9 ผลประเมินสมรรถนะของโหลดริง

ตารางที่ 2 ผลประเมินสมรรถนะของโหลดริง

ตัวบ่งชี้	ผลประเมิน
Span	1999.903 N
Full scale output	202.610 μm
Sensitivity	0.1013 $\mu\text{m}/\text{N}$
Linearity error	$\pm 11.968\%$ ของ FSO
Hysteresis error	$\pm 12.070\%$ ของ FSO
Repeatability error	$\pm 12.291\%$ ของ FSO

จากผลการประเมินข้างต้นของโหลดริงที่สร้างตามแนวทางออกแบบที่นำเสนอจะเห็นว่า นอกเหนือจากค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดในตารางที่ 2 แล้ว โหลดริงที่สร้างขึ้นมานี้ยังมีความคลาดเคลื่อนของค่าการะสูงสุดและระยะโค้งงอสุทธิจากการทดสอบต่างไปจากค่าการออกแบบอยู่เท่ากับ -0.0048% และ -15.5925% ตามลำดับ

5. สรุป

ถึงแม้ว่าแนวทางออกแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะถูกประมวลขึ้นมาจากทฤษฎีความเค้นของวงแหวนแบบบางในระนาบ ซึ่งไม่ได้นำผลกระทบจาก Poisson's ratio เข้ามาพิจารณาไว้ในแนวทางนี้ด้วยก็ตาม ทว่าผลที่ได้จากการประเมินสมรรถนะโพลตรึงยังคงเป็นไปในทางเดียวกันกับค่าการออกแบบด้วยค่าความแตกต่างที่ไม่สูงมากนัก เพราะฉะนั้นจึงอาจสรุปในที่นี้ได้ว่า แนวการออกแบบสำหรับโพลตรึงรูปวงกลมตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่นำเสนอจัดเป็นหนึ่งในทางเลือกที่สมควรนำไปใช้งานหรือพัฒนาต่อยอดขึ้นไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบโพลตรึงรูปทรงอื่น ๆ ต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rahman MA., Rahman S., *Design parameters of a circular proving ring of uniform strength*, Proceedings of the international conference on mechanical engineering 2005, ICME2005, Dhaka, Bangladesh, December 28-30, (AM-15) 1–5, 2005
- [2] Chen B., Wu X., Peng X., *Finite element analysis of ring strain sensor*, Sensors and Actuators A 139 (2007) 66–69.
- [3] Kumar H., Sharma C., Kumar A., *Design studies of ring shaped force transducers*, International Journal of Engineering Science and Technology 3 (2) (2011) 1536-1541.
- [4] Kumar H., Sharma C., Kumar, A., *Design and development of precision force transducers*, Journal of Scientific & Industrial Research 70 (7) (2011) 519-524
- [5] Kumar S., Kumar, H., *Development and testing of ring shaped force transducers*, Journal of Scientific & Industrial Research 73 (2) (2014) 103-106.
- [6] Kumar H., Kaushik M., Kumar S., Kumar S., *A Retrospective Investigation of deflection of ring shaped strain gauged force transducers*, MIT International Journal of Mechanical Engineering 5 (2) (2015) 67 - 70.
- [7] Timoshenko S., *Strength of Materials: Part II Advanced Theory and Problems*, second ed., Van Nostrand, New York, 1941 (Chapter 2).
- [8] Boresi AP., Schmidt RJ., *Advanced Mechanics of Materials*, sixth ed., John Wiley & Sons, New York, 2003 (Chapter 9).



ฐิตะพล หุยนันท์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2534 จบการศึกษาระดับปริญญาโท จาก Coventry University ประเทศอังกฤษ ปี 2540 จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก University of Sheffield ประเทศอังกฤษ ปี 2547 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร งานวิจัยเน้นทางกลศาสตร์วัสดุประยุกต์ การวิเคราะห์เชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ คอมพิวเตอร์ช่วยสำหรับการออกแบบและการผลิต การทดสอบและการวัดเชิงกล