

การศึกษาออกแบบโหลดเซลล์ชนิดคอลัมน์โดยวิธีการทดลอง และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study Design of Multiple Column Type Load Cell by Experimental and FEM

สุรสิทธิ์ ปิยะศิลป์¹ และ สุภกิจ รูปขันธ์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

โทร 0-43244296 ต่อ 121 โทรสาร 0-43245878 E-mail: surasith@kku.ac.th¹, supakit_r@hotmail.com²

Surasith Piyasin¹ and Supakit Rooppakhun²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Tel: 0-43244296 Ext. 121 Fax: 0-43245878 E-mail: surasith@kku.ac.th¹, supakit_r@hotmail.com²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาออกแบบโหลดเซลล์ชนิดคอลัมน์ที่มีสมรรถนะรับน้ำหนักได้ 20 ตัน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและวิธีการทดลอง การศึกษานี้ได้คำนึงออกแบบรูปร่างของโหลดเซลล์ภายใต้ข้อจำกัดของความเค้นไม่เกินค่าความเค้นพอนมิสเซส รวมถึงวิเคราะห์ค่าผลตอบสนองความเครียด/ภาระ ทำการศึกษาโดยสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์ในระนาบ 3 มิติ และพิจารณาอิทธิพลการสัมผัสระหว่างแผ่นกดและโหลดเซลล์ การสร้างแบบจำลองเป็นแบบเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมแปดจุดต่อ และมีแบบจำลองของการสัมผัสเป็นแบบจุดสัมผัสกับพื้นผิว ผลของการศึกษาพบว่ารูปร่างโหลดเซลล์ที่ได้จากการศึกษามีค่าความเค้นสูงสุดอยู่ภายใต้ความเค้นครากของวัสดุ และที่ภาระใดๆ ก็ตามทางความเค้นหลัก ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสแตนเกจมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง รวมทั้งการกระจายความเครียดในแนวแกนบริเวณรอบผิวกึ่งกลางโครงสร้างเสามีลักษณะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และค่าความเครียดที่ได้จะมีลักษณะสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นต่อภาระกระทำ โดยที่ค่าความเครียดในแนวยาวจะมีค่าที่สูงกว่าค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง หายที่สุดทำการสร้าง ทดสอบ และวิเคราะห์ค่าการวัดทางกลของโหลดเซลล์ที่ได้ออกแบบ

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านการวัดเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมให้เจริญก้าวหน้า โหลดเซลล์ที่ทำจากสแตนเกจนับเป็นอุปกรณ์ที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่มีการชั่งน้ำหนัก ซึ่งโครงสร้างของโหลดเซลล์มีหลายประเภทขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับน้ำหนักรวมทั้งความเหมาะสมในการใช้งาน ในงานที่ต้องการชั่งน้ำหนักมากๆ เช่น การชั่งน้ำหนักบรรทุกทุกสินค้าหรือในอุตสาหกรรมหนักต่างๆ โหลดเซลล์ประเภทคอลัมน์ได้เป็นที่นิยมใช้

งานกันอย่างแพร่หลาย เพราะมีช่วงการใช้งานที่กว้างและมีสมรรถนะสูง สามารถรับน้ำหนักได้ตั้งแต่ระดับกิโลกรัมถึงหน่วยตัน โหลดเซลล์ชนิดคอลัมน์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันข้อมูลของการศึกษาออกแบบจะถูกจดลิขสิทธิ์ ซึ่งในรายละเอียดข้อมูลดังกล่าวในเชิงวิเคราะห์รูปร่างและตำแหน่งที่จะติดตั้งสแตนเกจไม่ถูกนำมาเผยแพร่ ส่วนใหญ่รูปร่างโครงสร้างของโหลดเซลล์ประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นเสาสั้น และมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันไป ในการออกแบบโหลดเซลล์เพื่อใช้งานที่ต้องการชั่งน้ำหนักปริมาณมากๆ โครงสร้างรูปร่างโหลดเซลล์แบบหลายเสา (Multiple type column load cell) เป็นทางเลือกหนึ่งในการออกแบบเพื่อให้ได้รูปร่างโหลดเซลล์ที่เหมาะสม

ปัจจุบันนี้การออกแบบและการวิเคราะห์ชิ้นงานในอุตสาหกรรมนิยมใช้การออกแบบด้วยการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวก รวดเร็ว และลดค่าใช้จ่ายในการลงมือทดลองถูกลงได้อย่างมาก ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการออกแบบโหลดเซลล์ประเภทคอลัมน์ที่มีโครงสร้างแบบหลายเสาและสมรรถนะ 20 ตัน โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ออกแบบ ซึ่งจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์รูปร่างของโหลดเซลล์ และผลตอบสนองค่าความเครียด/ภาระ ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสแตนเกจ ในที่สุดทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่าการวัดทางกลของโหลดเซลล์ที่ออกแบบ

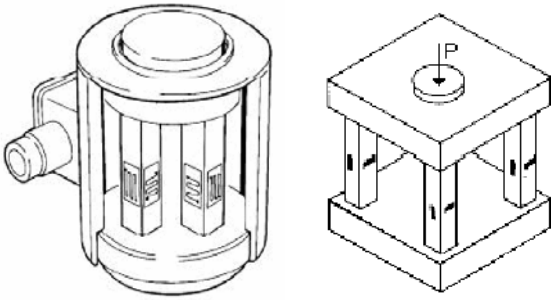
2. การออกแบบโหลดเซลล์ประเภทคอลัมน์

ในการออกแบบโหลดเซลล์ประเภทคอลัมน์ เพื่อให้ได้สมรรถนะที่สูง ทางเลือกหนึ่งคือ ออกแบบรูปร่างโครงสร้างของโหลดเซลล์ให้มีลักษณะเป็นแบบหลายเสา^[1] (รูปที่ 1) ปกติอัตราส่วนความเพียวของเสาจะต่ำ ($L_e/k < 30$) (เป็นลักษณะเสาสั้น) การออกแบบโหลดเซลล์

¹ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

² นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ประเภทนี้ นอกจากจะต้องคำนึงการรับภาระได้ตามที่ต้องการ สิ่งที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึง ก็คือ ค่าผลตอบสนองความไว จากการศึกษาของ Robinson G.M. [2], [3], [4] พบว่า ที่อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.25 จะมีค่าในการออกแบบที่ดี แต่ในทางตรงกันข้าม การออกแบบให้มีอัตราส่วนความสูงมากขึ้นจะทำให้ค่าฮีสเทรีซิสจากอิทธิกรรสัมผัสลดลง นอกจากนี้รูปร่างโพลดเซลล์ชนิดคอลัมน์ที่เหมาะสมควรมีการลดพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างเสา เพื่อลดอิทธิพลจากบริเวณที่รับภาระ



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างโพลดเซลล์แบบหลายเสา

การออกแบบโครงสร้างเสายภายใต้สมรรถนะสูงสุด 20 ตัน โดยใช้โครงสร้างเหล็กกล้าไร้สนิม ASTM-304L มีสมบัติ ดังนี้ $E = 193 \text{ GPa}$, $\nu = 0.27$ และ $\sigma_y = 240 \text{ MPa}$ เลือกออกแบบโพลดเซลล์ให้มีลักษณะโครงสร้างเสาจำนวน 4 เสา โดยพิจารณาค่าความเค้นสูงสุดไม่เกินค่า Proportional Limit และพิจารณาภาระที่กระทำกับโพลดเซลล์เป็นภาระกระทำแบบเยื้องศูนย์กลาง จากความสัมพันธ์ที่ (1) และ (2) [6]

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_y}{N} = \frac{F}{A} \left(1 + \frac{ec}{r^2} \sec \left(\frac{L}{2r} \sqrt{\frac{F}{EA}} \right) \right) \quad (1)$$

$$\text{Aspect ratio} = H/d \quad (2)$$

โดยที่

σ_y = ความเค้นครากของวัสดุ

N = ค่าความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบ(กำหนดเท่ากับ 1.5)

F = แรงกดที่กระทำ

A = พื้นที่หน้าตัดของ

E = โมดูลัสความยืดหยุ่น

L = ความยาวของเสา

$\frac{ec}{r^2}$ = eccentric ratio (ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ)

$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ = รัศมีจโรเซน

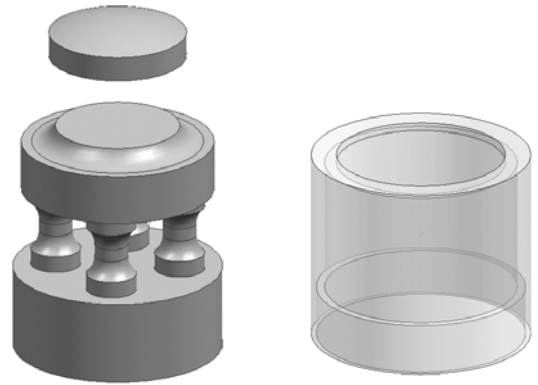
I = Second Moment of Area

H = ความสูงของเสา

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเสา

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ออกแบบเบื้องต้นได้ขนาดและรูปร่างโพลดเซลล์ตามรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดขนาดดังนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางเสา	เท่ากับ	20	มม.
เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนหัว	เท่ากับ	115	มม.
เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนฐาน	เท่ากับ	125	มม.
ความยาวของเสา	เท่ากับ	50	มม.
ความหนาของส่วนหัว	เท่ากับ	30	มม.
ความหนาของส่วนฐาน	เท่ากับ	50	มม.
รัศมีของการตัดพื้นที่ส่วนเสา	เท่ากับ	15	มม.
รัศมีของการตัดพื้นที่ส่วนหัว	เท่ากับ	10	มม.



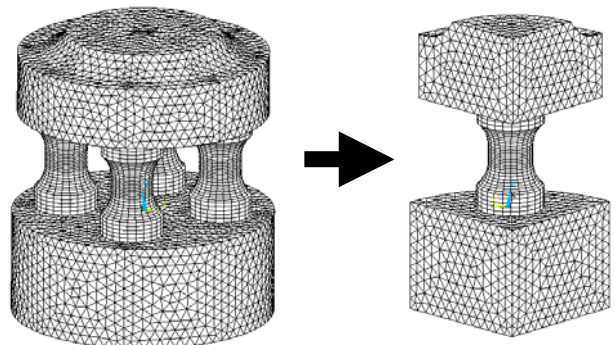
(ก) ส่วนโครงสร้างโพลดเซลล์ (ข) ส่วนโครงสร้างตัวเรือน

รูปที่ 2 โพลดเซลล์ที่ออกแบบ

3. แบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 การสร้างแบบจำลอง

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์โพลดเซลล์ที่ออกแบบ ซึ่งรูปร่างของโพลดเซลล์ตามรูปที่ 2 ถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลองในระบบพิกัดทรงกระบอก 3 มิติ โดยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ชื่อว่า ANSYS 7.0 เนื่องจากรูปร่างของโครงสร้างมีความสมมาตร ดังนั้นเพื่อลดเวลาและจำนวนเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์จึงพิจารณาแบบจำลองเพียง 1 ใน 4 ส่วน (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3)



รูปที่ 3 รูปร่างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสมมาตร

3.2 เอลิเมนต์แบบจำลอง

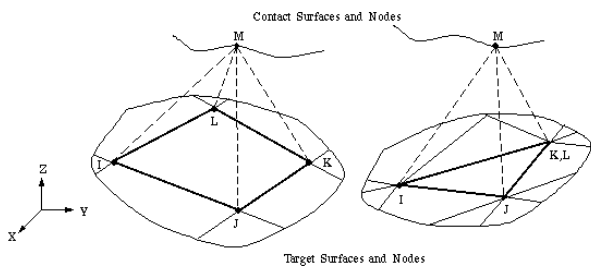
ในการศึกษาครั้งนี้แบบจำลองของโหนดเซลล์ได้ถูกพิจารณาใช้เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมแบบ 8 จุดต่อ(8-node hexahedron Element หรือ Solid45) เนื่องจากเป็นเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้ค่าความแม่นยำสูง^[7] สำหรับฟังก์ชันประมาณภายในของเอลิเมนต์แสดงไว้ตามสมการที่ (3) ดังนี้

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \mu\mu_i) \quad (3)$$

โดยที่

η, ξ, μ = พิกัดธรรมชาติของเอลิเมนต์

เนื่องจากการพิจารณาอิทธิพลของการสัมผัสระหว่างแผ่นกุดและโหนดเซลล์ ดังนั้นการสร้างแบบจำลองการสัมผัสเลือกใช้อิเล็กเมนต์แบบจุดสัมผัสพื้นผิว(Point-to-surface หรือ Contact49)^[8] แสดงในรูปที่ 4 และเลือกรูปแบบแรงเสียดทานแบบยึดหยุ่น ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ไม่คงที่และใกล้เคียงกับกระบวนการสัมผัสของชิ้นงาน



รูปที่ 4 เอลิเมนต์การสัมผัสแบบจุดสัมผัสพื้นผิว

3.3 การวิเคราะห์แบบจำลอง

เนื่องจากแบบจำลองเป็นกระบวนการที่มีการสัมผัสกันระหว่างแผ่นกุดและโหนดเซลล์ ดังนั้นการวิเคราะห์แบบจำลองจึงเป็นแบบการวิเคราะห์ปัญหาไม่เชิงเส้นแบบสถิต โดยพิจารณาถึงผลกระทบเนื่องจากความเครียดค่าที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสแตนเกจ ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาของงานวิจัยครั้งนี้ใช้เงื่อนไขความเสียหายของฟอนมิสเซต(Von Mises) ตามสมการที่ (4) ดังนี้

$$2\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (4)$$

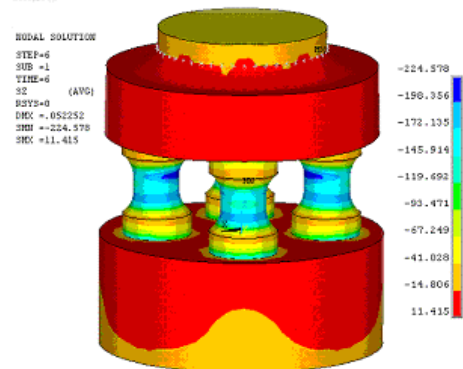
โดยที่

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ค่าความเค้นหลักตามแนวแกน 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

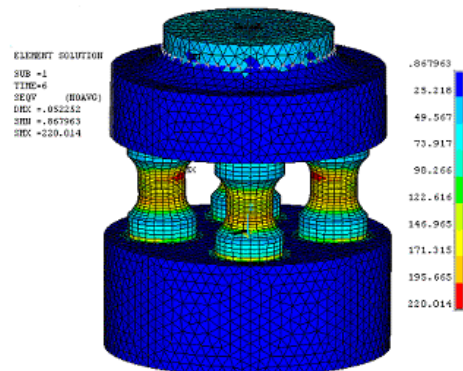
4. ผลการทดลองเชิงตัวเลข

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้สามารถวิเคราะห์ค่า Engineering Data ได้หลายรูปแบบแต่นำมาใช้ประโยชน์ในงานวิจัยนี้คือ ค่าความเค้นฟอนมิสเซต การกระจายความเค้น-ความเครียดและทิศทางความเค้นหลัก ที่ภาวะต่างๆ โดยเฉพาะที่ตำแหน่งที่ติดตั้งสแตนเกจ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองโดยเพิ่มภาระจนถึงภาวะสูงสุด พบว่าผลของการกระจายความเค้นในแนวยาว (σ_x) และค่าความเค้นฟอนมิสเซตที่ภาวะสูงสุดทั่วโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ



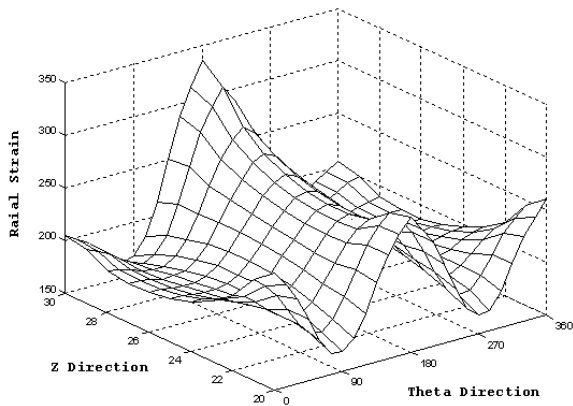
(ก) การกระจายความเค้นในแนวยาวบนทั่วโครงสร้าง



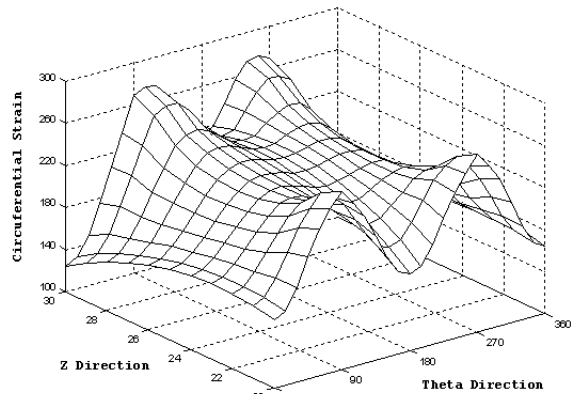
(ข) ค่าความเค้นฟอนมิสเซตที่ภาวะสูงสุด

รูปที่ 5 ค่าความเค้นในแนวยาวและความเค้นฟอนมิสเซต

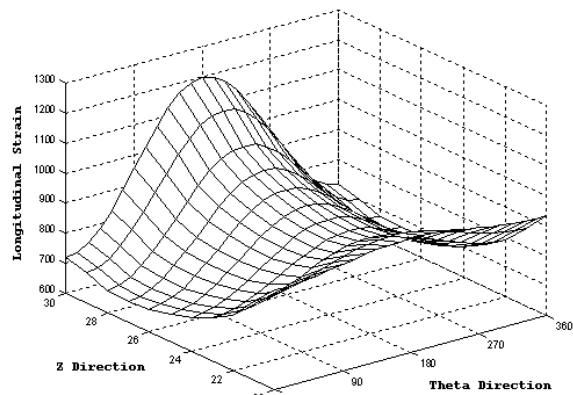
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาทิศทางของความเค้นหลักที่จุดต่อเอลิเมนต์ใดๆ พบว่า ทิศทางของความเค้นหลักจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงที่ภาวะกระทำใดๆ เมื่อพิจารณาความเครียดในแนวต่างๆ ที่บริเวณผิวรอบกึ่งกลางโครงสร้างเสา มีลักษณะการกระจายตัวดังรูปที่ 6 และเมื่อพิจารณาความเครียด ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสแตนเกจต่อภาวะกระทำ ได้ตามรูปที่ 7



(ก) การกระจายความเครียดในแนวรัศมี (ϵ_r)

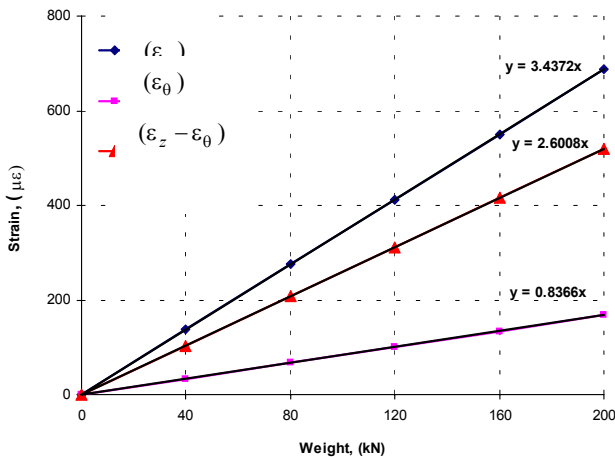


(ข) การกระจายความเครียดในแนวเส้นรอบวง (ϵ_θ)



(ค) การกระจายความเครียดในแนวยาว (ϵ_z)

รูปที่ 6 แสดงการกระจายความเครียดในแนวแกนต่างๆ



รูปที่ 7 ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสแตนเกจที่ภาวะใดๆ

จากผลการทดลองเชิงตัวเลข พบว่า โหลดเซลล์ที่ได้ออกแบบอยู่ภายใต้ค่าเสียหาย และนอกจากนี้พบว่าที่ภาวะกระทำใด ทิศทางความเค้นและความเครียดหลักมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อทำการเลือกศึกษาค่าความเครียดที่จุดต่อเอลิเมนต์ที่ภาวะใดๆ พบว่า ค่าความเครียดในแนวรัศมี, ค่าความเครียดแนวเส้นรอบวง และค่าความเครียดในแนวยาวมีลักษณะกระจายตัวไม่เป็นเชิงเส้นในแนวยาวและแนวเส้นรอบวง ทั้งนี้เกิดจากอิทธิพลของภาวะที่กระทำซึ่งเป็นแบบภาวะเยื้องศูนย์ แต่จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่ภาวะกระทำ นอกจากนี้ที่ภาวะใดๆ ค่าความเครียดในแนวยาวจะให้ค่าที่สูงกว่าค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง เนื่องจากในแนวยาวจะมีอิทธิพลจากการรับภาวะมากที่สุด

5. การทดสอบและผลการทดสอบ

รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างของโหลดเซลล์ที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งตำแหน่งที่ติดตั้งสแตนเกจอยู่ที่กลางของโครงสร้างเสาทั้ง 4 จุด โดยที่สแตนเกจจะอยู่ในแนวยาวและในแนวเส้นรอบวง ชุดทดสอบที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องทดสอบการกดอัดรุ่น CCH-3000 KNA ชุดแสดงผลเป็นเครื่องวัดค่าความเครียดดิจิทัลรุ่น TC-31K

ผลตอบสนองความไว (Sensitivity Output) ในกรณีวงจรบริดจ์แบบสมบูรณ์และชดเชย 4 เกจ (Full Bridge Four Compensation) (รูปที่ 9) สามารถพิจารณาได้ตามความสัมพันธ์ที่ 5

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1}{8}(1+\nu)(k_I \bar{\epsilon}_I + k_{II} \bar{\epsilon}_{II} + k_{III} \bar{\epsilon}_{III} + k_{IV} \bar{\epsilon}_{IV}) \quad (5)$$

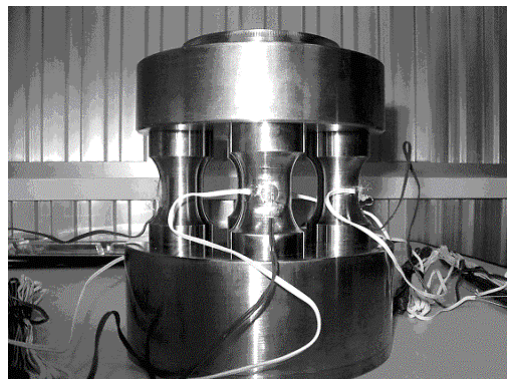
โดยที่

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \text{อัตราส่วนผลตอบสนองความไว}$$

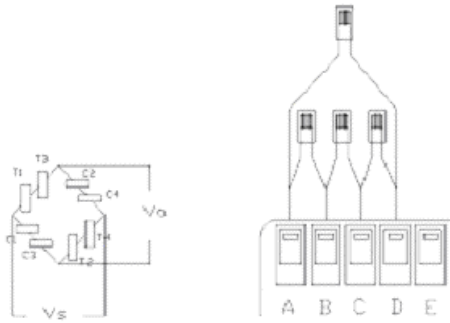
ν = อัตราส่วนปัวซอง

$k_{I,II,III,IV}$ = ค่าคงที่ของเกจที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

$\bar{\epsilon}_{I,II,III,IV}$ = ค่าความเครียดสัมพัทธ์ของเกจ 1 ถึง 4



รูปที่ 8 โครงสร้างโหลดเซลล์ที่ได้สร้างขึ้น

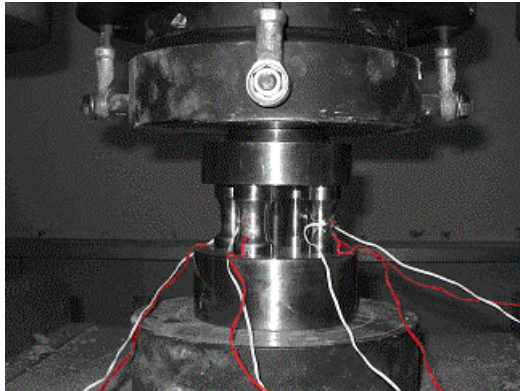


รูปที่ 11 การต่อวงจรแสดงผล(Full Arm Bridge)

หมายเหตุ

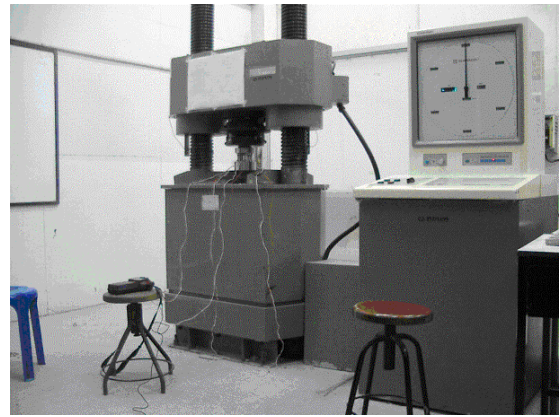
T₁, T₂, T₃, และ T₄ คือ สทนเกจที่ติดตั้งในแนวยาวของโครงสร้างเสา 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

C₁, C₂, C₃, และ C₄ คือ สทนเกจที่ติดตั้งในแนวเส้นรอบวงของโครงสร้างเสา 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 9 การติดตั้งโหนดเซลล์กับชุดทดสอบการกดอัด

โดยในการทดสอบจะติดตั้งโหนดเซลล์เข้ากับชุดทดสอบการกดอัดและชุดแสดงผล ซึ่งจะมีแผ่นรองหัวกดที่ลักษณะโค้งช่วยในการรับภาระเพื่อป้องกันการรับภาระเยื้องศูนย์ และทำการติดตั้งสายสัญญาณจากโหนดเซลล์เชื่อมต่อกับชุดแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ในการทดสอบใช้น้ำหนักตั้งแต่ 0 ถึง 200 kg โดยการทดสอบทั้งเพิ่มภาระและลดภาระ และบันทึกผลการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง

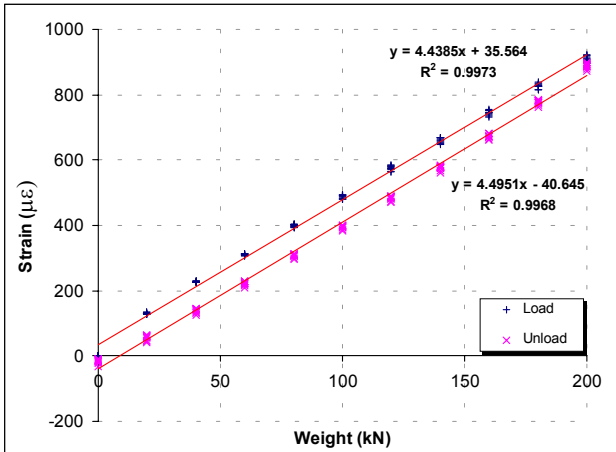


รูปที่ 10 การติดตั้งโหนดเซลล์กับชุดทดสอบและชุดแสดงผล

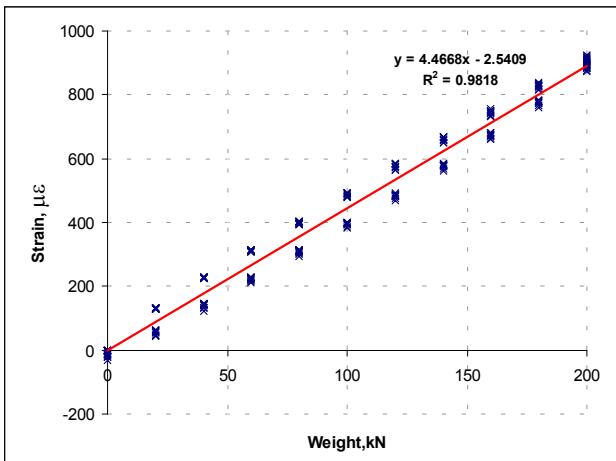
จากผลการทดสอบเมื่อทำประมาณค่าความเครียดเฉลี่ยที่ภาระใดๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าได้ข้อมูลตามตารางที่ 1 และเมื่อทำการวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นของค่าความเครียดต่อภาระกระทำกรณีเพิ่มและกรณีลดภาระ พบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ได้เป็นดังนี้ คือ $y = 4.4385x + 35.564$ และ $y = 4.4951x - 40.645$ ตามลำดับ (แสดงในรูปที่12) นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้นเฉลี่ยรวมกรณีเพิ่ม-ลดภาระ เพื่อใช้เป็นความสัมพันธ์แทนคุณลักษณะโหนดเซลล์ และทำการวิเคราะห์ค่าการวัดทางกล พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้เป็นดังนี้ $y = 4.4668x - 2.5409$ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 13

ตารางที่ 1 แสดงการประมาณค่าเฉลี่ยความเครียดจากการทดสอบ

load(kN)	ค่าความเครียด($\mu\epsilon$)	
	Load ($\mu\epsilon$)	Unload ($\mu\epsilon$)
0	0	-16.1 \pm 4.75
20	130.4 \pm 1.31	55.5 \pm 5.49
40	227.9 \pm 1.36	138 \pm 5.15
60	310.9 \pm 1.79	222.3 \pm 4.37
80	399.2 \pm 3.01	307.4 \pm 4.39
100	486.9 \pm 4.01	394.4 \pm 3.87
120	575.6 \pm 5.33	483.2 \pm 4.63
140	660.7 \pm 5.32	576.2 \pm 5.02
160	743.9 \pm 5.44	672.9 \pm 4.56
180	827.8 \pm 5.70	776.1 \pm 5.21
200	910.2 \pm 6.56	887.6 \pm 5.42



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ความเครียด/ภาระในกรณีเพิ่มและกรณีลดภาระ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ความเครียด/ภาระของโหนดเซลล์ที่ออกแบบ จากข้อมูลที่ได้เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าการวัดทางกลของโหนดเซลล์ พบว่าได้ข้อมูลตามตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ข้อมูลค่าการวัดทางกลของโหนดเซลล์จากการทดสอบ

Range:	Input 0 to 200 <i>kN</i> Output -2.54 to 890.82 $\mu\epsilon$
Span:	Input 200 <i>kN</i> Output 893.36 $\mu\epsilon$
Rate of Sensitivity:	0.0044668 $\mu\epsilon / N$
Zero drift:	- 0.1164 % <i>FSO</i>
% linearity:	Increase (Max.) = + 5.795 % <i>FSO</i> Decrease (Max.) = - 5.628 % <i>FSO</i>
Repeatability:	Increase (Max.) = - 1.701 % <i>FSO</i> Decrease (Max.) = - 1.511 % <i>FSO</i>
Hysteresis:	(Max.) = - 10.354 % <i>FSO</i>

6. สรุปผล

ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์โหนดเซลล์ประเภทคอลัมน์ขนาด 20 ตัน ซึ่งมีรูปร่างซับซ้อนและยุ่งยากในการวิเคราะห์ทางทฤษฎี จากการวิเคราะห์ความเค้นสูงสุดและการกระจายความเครียด ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสแตนเกจ พบว่า โหนดเซลล์ที่ออกแบบอยู่ภายใต้ค่าความเค้นฟอนมิสเซส และทิศทางการเค้นหลักไม่เปลี่ยนแปลงตามภาระที่กระทำ นอกจากนี้การกระจายความเครียดในแนวยาวและในแนวเส้นรอบวงมีลักษณะไม่เป็นสม่ำเสมอ เนื่องจากอิทธิพลการรับภาระแบบเยื้องศูนย์กลางแต่จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นต่อภาระที่กระทำ ท้ายที่สุดโหนดเซลล์ที่ได้ออกแบบถูกสร้าง ทดสอบ และวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ให้การสนับสนุนเงินอุดหนุนของงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] The technical Staff of Measurements Group. **Strain gage Based Transducers**. Raleigh, North Carolina 27611, USA.1998M.
- [2] Robinson, G. M., **Errors due to axisymmetric non-uniform loading of column load cells**. Measurement, 1987, Vol.7, No.1
- [3] Robinson, G. M., **Finite element modeling of load cell hysteresis**. Measurement, 1997, Vol.20, No.2
- [4] Robinson, G. M., **Genetic algorithm optimization of load cell geometry by finite element analysis**. Ph D thesis, City University, London, UK, 1995.
- [5] A.C. Ugural and S.K. Fenster. **Advanced Strength and Applied Elasticity**. 2nded. Elsevier. Pub. Co.1987
- [6] [Roark, Raymond J & Warren C. Young](#). **Roark's formulas for stress and strain**. 6th ed. McGraw-Hill, c1989
- [7] Steven E. Benzley and others., **A Comparison of All Hexagonal and All Tetrahedral FEM for Elastic and Elastic Analysis**. <http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/authors/benzley.html>
- [8] ANSYS Verification Manual. VM191: **Hertz Contact Between Two Cylinders**
- [9] David H. Johnson, P.E. **Principles of Simulating Contact between Parts using ANSYS**. <http://www.ansys.com/>
- [10] Richard S.Figliola Donald E. Beasley.**Theory and Design for Mechanical Measurements**. 2nded. John Wiley& Sons, Inc 1995