การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 19-21 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ภูเก็ต

## การยืนยันผลการใช้สปริงเอลิเมนต์แทนชั้นกาวบางในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงาน ยางที่ต่อแบบชน

## Validation of Using Spring Element for Thin Adhesive Layer In Finite Element Models of Rubber Bonded Butt Joints.

วิภู พิวัฒน์ เจริญยุทธ เดชวายุกุล วิริยะ ทองเรือง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112 โทร 0-74287035 โทรสาร 0-74212893 E-mail: wipoo.p@egat.co.th

Wipoo Piwat Charoenyut Decwayukul Wiriya Thongraung Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand Tel: 0-74287035 Fax: 0-74212893 E-mail: wipoo.p@egat.co.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้สปริงเอลิเมนต์แทนชั้นกาวบาง ใน ้ต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานวัสดุยางที่ต่อแบบชนกันแผ่นโลหะ ด้วยชั้นกาวบาง โดยสร้างชิ้นงานทดสอบด้วยยางซึ่งเป็นวัสดุไฮเปอร์ อิลาสติกที่มีมอดูลัสแรงกด 5.15 MPa ที่ความเครียด 30% ลักษณะ เป็นแผ่นกลมสามขนาดคือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 30 mm หนา 10 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 40 mm หนา 18 mm และเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm หนา 30 mm ต่อแบบชนกับแผ่นโลหะทั้งสองด้านด้วยกาวที่มีมอดูลัส ต่างกันสองชนิดคือ กาวยางมีมอดูลัสแรงดึง 1.128 MPa มอดูลัสแรง เฉือน 0.154 MPa และกาวแห้งเร็ว มีมอดูลัสแรงดึง 5.8 Mpa มอดูลัส แรงเฉือน 2.6 MPa รับแรงกดคล้ายสถิตย์คงที่ โดยทำการเปรียบเทียบ ผลของการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในแนวแรง และการเปลี่ยนรูปของ ชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับแรงที่วัดได้จากชิ้นงานทดสอบ กับผลที่ ้คำนวณได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติที่มีขนาดและสมบัติ ของยางเหมือนกับชิ้นงานทดสอบ และใช้สปริงเอลิเมนต์แทนรอยต่อ ของชั้นกาวบาง พบว่าค่าเฉลี่ยร้อยละความแตกต่างของการเปลี่ยนรูป ในแนวตั้งฉากกับแรง ที่ประมวลผลด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับผลการทดลอง ตลอดช่วงความเครียด 0-30% มีค่าอยู่ในช่วง 3.53 ถึง 6.87%

#### Abstract

This paper presents the using of spring element to replace the thin adhesive layer bonding between the rubber and the metal plate in the finite element model of butt joint. The butt joint specimens were prepared form circular disc of rubber (hyperelastic material) which has compressive modulus of 5.15 MPa , at 30% strain. Three sizes of circular discs were studied which are 30 mm in diameter  $\times$  10 mm in thickness, 40 mm in diameter  $\times$  10 mm in thickness and 50 mm in diameter  $\times$  10 mm in thickness. Both sides of the rubber surfaces were bonded to metal plate by 2 types of the adhesive; rubber glue and instant glue. The elastic modulus and shear modulus of the rubber glue and the instant glue were 1.128, 0.154 MPa and 5.8, 2.6 MPa respectively. The specimens were compressed by the quasi-static compression. To valid the using of spring element, lateral deformation at the mid-height of specimens were compared with the results from 3D finite element models. It was found that the average differences between percent of deformation in experimental models, and in finite element models were 3.53 – 6.87 % in the strain ranged from 0 to 30 %

#### 1. บทน้ำ

ปัจจุบันมีการนำยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้ในงาน วิศวกรรม เช่น แบริ่งยาง (rubber bearing) ในงานตึกสูงเพื่อลดการ เคลื่อนตัวเมื่อเกิดแผ่นดินไหว [1] ชิ้นงานดังกล่าวอาศัยการต่อชน ระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุต่างชนิดกันโดยชั้นกาวบาง ชั้นกาวบางที่ ประสานผิวสัมผัสมีพฤติกรรมในการยึดติด (adhesion) ต่างกัน ขึ้นอยู่ กับความแข็งแรงของกาว ซึ่งอาจพิจารณาในรูปของมอดูลัสยึดหยุ่น (E, elastic modulus) และมอดูลัสเฉือน (G, shear modulus) มี การศึกษา [2] ผลของแรงที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส เมื่อขนาด ของชิ้นงานที่ถูกยึดติดเปลี่ยนแปลง รวมถึงการศึกษาค่าความแข็งตึง ของรอยต่อยางที่มีค่าต่างกันระหว่างผิวยางที่ยึดติดกับไม่มีการยึดติด กับแผ่นเสริมแรงในแบริ่งยาง (rubber bearing) [3]

ในการศึกษาผลกระทบของการยึดติดของชั้นกาวบางโดยใช้ เป็นทางเลือกอย่างหนึ่งในการศึกษาพฤติกรรม วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทางกลของรอยต่อชนของยางโดยใช้กาว แต่มีอุปสรรคคือ การจำลอง ้ชั้นกาวบางด้วยเอลิเมนต์รูปทรง ทำได้ยากเนื่องจากชั้นกางมีวามบาง มากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นงานที่จะต่อ [4-5] ดังนั้นต้องจำลอง ชั้นกาวบางแทนด้วยสปริงเอลิเมนต์ อย่างไรก็ตามความถูกต้องของ การใช้สปริงเอลิเมนต์ในการคำนวณผลของชั้นกาวในรอยต่อยางด้วย วิรีไฟในต์เอลิเมนต์ ต้องมีการตรวจสอบความแม่นยำในการใช้งาน ดังนั้นในการวิจัยนี้ เป็นการยืนยันผลการใช้สปริงเอลิเมนต์แทนเอลิ เมนต์ของชั้นกาวบางในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานยางที่ต่อ แบบชน เพื่อใช้แทนพฤติกรรมของชั้นกาวบาง และทำการศึกษาการ เปลี่ยนแปลงของความแข็งตึงปรากฏ (apparent stiffness) ในเนื้อยาง เมื่อสมบัติของกาวเปลี่ยนแปลงด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2. ทฤษฎีพื้นฐาน

#### 2.1 โมเดลวัสดุของยาง

ยางเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถยืดได้หลายร้อยเท่าของ ความยาวเดิมเมื่อมีแรงกระทำ และเมื่อเอาแรงออกจะกลับสู่ขนาดและ รูปทรงเดิมได้ โมเดลเชิงทฤษฎีของวัสดุแบบนี้จัดเป็นวัสดุไฮเปอร์อีลา สติก (Hyperelastic Material) พฤติกรรมของวัสดุอยู่ในรูปของสม การพลังงานความเครียดในเนื้อยางต่อหน่วยปริมาตร โดยเป็นฟังชั่น ของความเครียด สมการพลังงานความเครียดที่ใช้กันอยู่มีหลายรูปแบบ แต่ที่นิยมอยู่ในรูปแบบของโพลิโนเมียน (Polynomial form) การ กำหนดพลังงานความเครียดในรูปแบบนี้คือ [6]

$$U = \sum_{i+j+k=0}^{N} C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 1)^k + \sum_{i+j+k=1}^{N} \frac{1}{D_j} (J_{el} - 1)^{2i}$$
(1)

เมื่อ U คือ พลังงานความเครียดในเนื้อยาง (Strain Energy),  $J_{_{el}}$  คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (Elastic Volume Ratio), N คือดีกรีของสมการโพลิโนเมียน,  $D_i$  คือ สมบัติการอัดตัว ไม่ได้ของวัสดุ,  $C_{_{ijk}}$  คือค่าคงที่ที่เป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุ และ  $I_1$ ,  $I_2$  และ  $I_3$  คือ กลุ่มตัวแปรความเครยดที่ไม่เปลี่ยนตามมิติ (strain invariants) เมื่อ

$$I_{1} = \lambda_{1}^{2} + \lambda_{2}^{2} + \lambda_{3}^{2}$$

$$I_{2} = \lambda_{1}^{2}\lambda_{2}^{2} + \lambda_{2}^{2}\lambda_{3}^{2} + \lambda_{1}^{2}\lambda_{3}^{2}$$

$$I_{3} = \lambda_{1}^{2}\lambda_{2}^{2}\lambda_{3}^{2}$$
(2)

โดย  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  และ  $\lambda_3$  คือ ค่าอัตราการยึดตัวของยางในแนวต่างๆ (Stretch ratio)

การกำหนดพลังงานความเครียดในรูปแบบของโพลิโนเมียน สามารถลดรูปลงได้ เมื่อพิจารณาให้วัสดุมีสมบัติการอัดตัวไม่ได้สูง (Fully Incompressible Material) เนื่องจากปริมาตรของวัสดุไม่มีการ เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงเทอม  $J_{_{el}}=1$  และ Third strain invariant  $I_{_3}=\lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2=0$  ดังนั้นสมการพลังงานความเครียดในรูปของโพลิ นอเมียนสามารถลดรูปได้ดังนี้

$$U = \sum_{i+j=0}^{N} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$$
(3)

รูปของสมการข้างตันสามารถเขียนให้สมบูรณ์ได้ตามสมการที่ 4 เมื่อ N = 2

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2$$
(4)

### 2.2 การกำหนดสมบัติของชั้นกาวบาง

การกำหนดสมบัติของชั้นกาวบางเมื่อนำมาใช้ด้วยวิธีไฟในต์เอลิ เมนต์ถูกนำมาใช้โดยหลักการที่เรียกว่า TALA [5] คือชั้นกาวดังแสดง ใน รูปที่ 1 จะถูกเปลี่ยนเป็นสปริงเอลิเมนต์หลาย ๆตัวที่สามารถจำลอง พฤติกรรมจริงของชั้นกาวได้ ความเค้น ความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้น กาวบางถูกเปลี่ยนเป็นแรงและการเคลื่อนตัวระหว่างผิวที่ต่อกันด้วย กาว การเปลี่ยนทำได้เมื่อรู้พื้นที่ผิวสัมผัสและความหนาของชั้นกาว เมื่อสมมุติว่าชั้นกาวมีความบางมาก ค่าของ  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_x$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$  และ  $\gamma_{yx}$ มีค่าน้อยมากสามารถละทิ้ง ได้



รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนชั้นกาวเป็นสปริง[5]

จะมีเฉพาะ  $\sigma_z$ ,  $\tau_z$  และ  $\tau_z$ , เท่านั้นที่กระทำบนพื้นที่ A, ของ สปริงที่ต่อระหว่างจุด a และ b ความเค้นในแนวตั้งฉากกับผิว  $\sigma_z$ จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ผิวขณะที่  $\tau_z$  และ  $\tau_z$ , ถูกเปลี่ยนเป็นแรงเฉือนในแนวขนานกับผิว  $\varepsilon_z$ ,  $\gamma_z$ ,  $\gamma_z$  จะถูก เปลี่ยนเป็นการเคลื่อนตัวของสปริงในแนวตั้งฉากกับผิว และในแนว เฉือนตามลำดับ ซึ่งรูปแบบของสมการที่ใช้ในการเปลี่ยนความเค้นและ ความเครียดในเอลิเมนต์สามมิติของชั้นกาวบางไปเป็นแรงและการ

เคลื่อนที่ใน สปริงเอลิเมนต์ สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฮุค (Hook's Law) ดังสมการ 5 ถึง 14

$$\sigma_z = E \times (\varepsilon_z) \tag{5}$$

$$n_{a,z} + n_{b,z} = E \times (A_i / h) \times (v_{a,z} + v_{b,z})$$
(6)

$$n_{a,z} + n_{b,z} = K_{n,i} \times \left( v_{a,z} + v_{b,z} \right)$$
(7)

$$F_{n,i} = K_{n,i} \times v_{n,i} \tag{8}$$

$$K_{n,i} = E \times (A_i / h) \tag{9}$$

เมื่อ  $F_{n,i}$  คือ แรงลัพธ์ในสปริงในแนวตั้งฉาก,  $v_{n,i}$  คือ การเคลื่อนตัว ของสปริงในแนวตั้งฉาก,  $K_{n,i}$  คือ ความแข็งตึง (stiffness) ของสปริง ในแนวตั้งฉาก, E คือ มอดูลัสยึดหยุ่นของกาว (elastic modulus of the adhesive),  $\tau_{zx}$  และ  $\tau_{zy}$  จะเท่ากันทั้งนี้วัสดุเป็นแบบไอโซโทรปิค (isotropic):

$$\tau_{zx} = G \times (\gamma_{zx}) \tag{10}$$

$$f_{a,x} + f_{b,x} = G \times \left(A_i / h\right) \times \left(u_{a,x} + u_{b,x}\right)$$
(11)

$$f_{a,x} + f_{b,x} = K_{f,i} \times (u_{a,x} + u_{b,x})$$
(12)

$$F_{f,i} = K_{f,i} \times u_{f,i} \tag{13}$$

$$K_{f,i} = G \times \left(A_i / h\right) \tag{14}$$

เมื่อ  $F_{f,i}$  คือ แรงลัพธ์ในสปริงในแนวเฉือน,  $u_{f,i}$  คือ การเคลื่อนตัว ของสปริงในแนวเฉือน,  $K_{f,i}$  คือ ความแข็งตึงเฉือน (shear stiffness) ของสปริงในแนวเฉือน, G คือ มอดูลัสเฉือนของกาว (shear modulus of the adhesive)

#### 2.3 การเปลี่ยนกาวเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 3 มิติ

การเปลี่ยนเอลิเมนต์ของชั้นกาวบางเป็นสปริงเอลิเมนต์ ใน แบบจำลองสามมิติ ทำโดยเปลี่ยนเอลิเมนต์ของกาวบางหนึ่งตัวให้เป็น สปริงเอลิเมนต์สี่ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่จุดบนผิวสัมผัส a-b-c-d ของ element U<sub>i</sub> จะเชื่อมต่อกับจุดบนผิวสัมผัส a'-b'-c'-d' ของ element L<sub>i</sub> ด้วยชั้นกาวบาง element i ของกาวบางซึ่งจะถูกเปลี่ยน เป็นสปริง S<sub>i</sub> , S<sub>i+1</sub> , S<sub>i+2</sub> และ S<sub>i+3</sub> โดยสปริง S<sub>i</sub> จะประกอบด้วยสปริง แสดงพฤติกรรมจริงของชั้นกาวในสามทิศทาง เอลิเมนต์สามตัว ประกอบด้วยทิศตั้งฉากกับพื้นที่ผิว (z direction) และขนาดกับ ผิวสัมผัส (x and y direction) สปริง S<sub>i</sub> เชื่อมต่อระหว่างโนด u<sub>i</sub> และ I<sub>i</sub> มีพื้นที่รับแรง A<sub>i</sub> สำหรับสปริง S<sub>i+1</sub> เชื่อมต่อระหว่างโนด u<sub>i+1</sub> และ I<sub>i+1</sub> สปริง S<sub>i+2</sub> มีพื้นที่รับแรง A<sub>i +1</sub> เชื่อมต่อระหว่างโนด u<sub>i+2</sub> และ I<sub>i+2</sub> มี พื้นที่รับแรง A<sub>i+2</sub> สปริง S<sub>i+3</sub> เชื่อมต่อระหว่างโนด u<sub>i+3</sub> และ I<sub>i+3</sub> มีพื้นที่ รับแรง A<sub>i+3</sub> ตามลำดับ โดยพื้นที่ของสปริงแต่ละตัวคำนวณได้ดัง สมการ 15 ถึง 18

$$A_{i} = \frac{D_{i}}{4} + \frac{D_{i+1}}{4} + \frac{D_{i+2}}{4} + \frac{D_{i+4}}{4}$$
(15)

$$A_{i+1} = \frac{D_i}{4} + \frac{D_{i+2}}{4} + \frac{D_{i+3}}{4} + \frac{D_{i+5}}{4}$$
(16)

$$A_{i+2} = \frac{D_i}{4} + \frac{D_{i+5}}{4} + \frac{D_{i+7}}{4} + \frac{D_{i+8}}{4}$$
(17)

$$A_{i+3} = \frac{D_i}{4} + \frac{D_{i+4}}{4} + \frac{D_{i+6}}{4} + \frac{D_{i+7}}{4}$$
(18)



Thin adhesive, element i<sup>th</sup> Surfaced of element L<sub>i</sub>



รูปที่ 2 การเปลี่ยนชั้นกาวบางเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 3 มิติ

## 2.4 ความแข็งตึงปรากฏ (apparent stiffness) ใหเนื้อยาง

การคำนวณหาค่าความแข็งตึงปรากฏของชิ้นงานยางแผ่นกลม เมื่อได้รับแรงกดดังรูปที่ 3 สามารถหาได้จากสมการที่ 19



รูปที่ 3 การผิดรูปของชิ้นยางภายใต้แรงกด

$$F = kx \tag{19}$$

เมื่อ F แรงกดที่กระทำกับชิ้นงาน, x คือระยะยุตัว และ k คือค่า ความแข็งตึงปรากฏที่สภาวะใดๆ (apparent stiffness) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์

$$\sigma / \varepsilon = (L_0 / A_0)k \tag{20}$$

เมื่อ  $\sigma$  คือความเด้น,  $\varepsilon$  คือความเครียด,  $A_0$  คือพื้นที่รับแรง,  $L_0$  คือ ความหนาชิ้นงานเริ่มต้น โดย  $\sigma = F / A_0$ ,  $\varepsilon = x / L_0$ 

จากสมการข้างต้นพบว่า ค่าความแข็งตึงปรากฏที่ความเครียด เท่ากันจะแปรผันตามค่าความเค้นหรือแรงกระทำ และที่สภาวะความ เค้นหรือแรงกระทำเท่ากัน ค่าความแข็งตึงปรากฏจะแปรผกผันกับค่า ความเครียดที่เกิดขึ้น

#### 3. วิธีการทดสอบ

ในการยืนยันผลการใช้สปริงเอลิเมนต์แทนเอลิเมนต์ของชั้น กาวบางในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานยางที่ต่อแบบชน ประกอบด้วยสามกิจกรรมคือ การสร้างชิ้นงานและทำการทดสอบจริง การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการเปรียบเทียบผลที่ได้จาก การทดสอบกับการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 3.1 การสร้างชิ้นงานและการทดสอบ

สร้างชิ้นงานทดสอบด้วยยางธรรมชาติ ทดสอบสมบัติวัสดุเชิงกล ตาม [7] มีมอดูลัสแรงกด 5.15 MPa ที่ความเครียด 30% และมีค่าสัม ประสิทธิพลังงานความเครียด C<sub>10</sub>=2.843, C<sub>01</sub>=1.986, C<sub>20</sub>=2.013, C<sub>11</sub>=1.311, C<sub>02</sub>=0.318 MPa ลักษณะเป็นแผ่นกลมสามขนาดคือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 30 mm หนา 10 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 40 mm หนา 18 mm และเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm หนา 30 mm ต่อแบบชนกับ แผ่นโลหะทั้งสองด้านด้วยกาวที่ทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน JIS K6849 [8] และ JIS K6850 [9] มีมอดูลัส ต่างกันสองชนิดคือ กาวยาง มีมอดูลัสแรงดึง 1.128 MPa มอดูลัสแรงเฉือน 0.154 MPa และกาว แห้งเร็ว มีมอดูลัสแรงดึง 5.8 Mpa มอดูลัสแรงเฉือน 2.6 MPa ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชิ้นงานต่อแบบชนระหว่างยางกับแผ่นโลหะ

นำชิ้นงานทดสอบด้วยแรงอัดแบบคล้ายสถิตในแนวตั้งฉากกับ ชิ้นงาน ทำการวัดการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในแนวแรงและการเปลี่ยน รูปของชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับแรง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดสอบชิ้นงานและการวัดระยะการเปลี่ยนแปลง

### 3.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 6 มีสมบัติของวัสดุใน แบบจำลองตามชิ้นงานทดสอนจริง โดยแบบจำลองขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 30 mm หนา 10 mm เอลิเมนต์ของยางจำนวน 567 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์ของกาว (Spring element) จำนวน 576 เอลิเมนต์ ,ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 mm หนา 18 mm เอลิเมนต์ของยาง จำนวน 1400 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์ของกาว (Spring element) จำนวน 816 เอลิเมนต์ ,ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm หนา 30 mm เอลิ เมนต์ของยางจำนวน 2880 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์ของกาว (Spring element) จำนวน 1086 เอลิเมนต์

ทดสอบด้วยแรงกดผ่านแบบจำลอง ตรวจสอบการเปลี่ยนรูปของ ชิ้นงานในแนวแรงและการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับแรงที่ คำนวณได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 6 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.3 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบและจากแบบจำลอง

นำผลที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานจริงเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก แบบจำลองไฟไนด์เอลิเมนด์ คำนวณหาร้อยละของความแตกต่างเฉลี่ย ตลอดช่วงการความเครียดที่พิจารณาคือ 0 ถึง 30% strain ตามสมการ ที่ 21 [10] เพื่อใช้เป็นตัวบ่งบอกว่าการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงมากน้อยเพียงใด

ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ย

$$(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{\left| l_{x(FEA)} - l_{x(exp)} \right|}{l_{x(exp)}} *100$$
 (21)

 เมื่อ *l<sub>x(FEA)</sub>* คือระยะการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับแนว แรงที่ได้จากแบบจำลอง, *l<sub>x(exp)</sub>* คือระยะการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานใน แนวตั้งฉากกับแนวแรงที่ได้จากการทดลอง, *N* คือจำนวนคู่ลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับแนว แรงและในแนวแรง

### 4 ผลและการวิเคราะห์ผล

เมื่อนำเอาค่าระยะการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งฉากกับแรง (*l<sub>x</sub>*) ที่ แต่ละค่าของการเปลี่ยนแปลงในแนวแรง (*l<sub>z</sub>*) ที่วัดได้จากการทดสอบ เปรียบเทียบกับผลที่ประมวลผลได้จากตันแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาด ต่างๆ ได้ผลการเปรียบเทียบดังนี้คือ

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบของชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 mm หนา 10 mm พบว่าร้อยละของความแตกต่างเฉลี่ยของชิ้นงาน ที่ยึดติดด้วยกาวยางเทียบกับแบบจำลองมีค่า 4.28% และ 6.87% ร้อย ละของความแตกต่างเฉลี่ยของชิ้นงานที่ยึดติดด้วยกาวแห้งเร็วเทียบ กับแบบจำลองมีค่า 5.52% และ 4.03%



ชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 mm หนา 10 mm

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบของชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 mm หนา 18 mm พบว่าร้อยละของความแตกต่างเฉลี่ยของชิ้นงาน ที่ยึดติดด้วยกาวยางเทียบกับแบบจำลองมีค่า 4.14% และ 6.68% ร้อย ละของความแตกต่างเฉลี่ยของชิ้นงานที่ยึดติดด้วยกาวแห้งเร็วเทียบ กับแบบจำลองมีค่า 4.54% และ 4.80%



รูปที่ 8 การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในแนวแรงและแนวตั้งฉากกับแรงของ ชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 mm หนา 18 mm

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบของชิ้นงานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm หนา 30 mm พบว่าร้อยละของความแตกต่างเฉลี่ยของชิ้นงาน ที่ยึดติดด้วยกาวยางเทียบกับแบบจำลองมีค่า 3.53% และ 6.78% ร้อย ละของความแตกต่างเฉลี่ยของชิ้นงานที่ยึดติดด้วยกาวแห้งเร็วเทียบ กับแบบจำลองมีค่า 6.72% และ 3.79%



ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 mm หนา 18 mm

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ที่ ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานยาง ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 40 mm หนา 18 mm ที่เชื่อมยึดกับแผ่นโลหะ ด้วย กาวแห้งเร็ว กาวยาง และไม่มีการยึดติด เมื่อการวิเคราะห์ตามสมการ ที่ 19, 20 พบว่าชิ้นงานที่ที่ยึดติดด้วยกาวที่มีมอดูลัสสูงจะทำให้ค่า ความแข็งตึงปรากฏมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ยึดติดด้วยกาวมอดูลัสต่ำ เมื่อ ชิ้นงานได้รับแรงกดในสภาวะเดียวกัน

#### 5 สรุป

การจำลองแบบสามมิติของชิ้นงานที่มีชั้นกาวบางซึ่งทำหน้าที่ยึด ติดวัสดุไฮเปอร์อิลาสติกซึ่งมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้น กับโลหะซึ่งมี พฤติกรรมเชิงเส้น แบบจำลองสามารถใช้สปริงเอลิเมนต์แสดง พฤติกรรมของชั้นกาวบางแทนเอลิเมนต์ของชั้นกาว ได้โดยมีความ น่าเชื่อถือระดับหนึ่ง เมื่อเทียบกับผลการทดลอง สามารถนำไปใช้ วิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ที่สนใจต่อไปได้ เช่น ค่ามอดูลัสของกาว สูงขึ้นทำให้ค่าความแข็งตึงปรากฏในเนื้อยางที่รับแรงกดมีค่าสูงขึ้น

#### เอกสารอ้างอิง

- Hsiang Chuan Tsai, James M. Kelly, "Buckling load of seismic isolators affected by flexibility of reinforcement", Internationa Journal of Solids and Structures, 42 (2005), 225-269
- Kenneth R. Shall, "Contact Mechanics and the Adhesion of Soft Solids" Materials Science and Engineering, R36 (2002), 1-45
- [3] C.G. Koh, H.L. Lim, "Analytical Solution for Compression Stiffness of Bonded Rectangular Layers", International Journal of Solids and Structures, 38 (2001), 445-455.
- [4] Richard M. Barkek, Fritz Hatt ,"Analysis of Bonded Joints in Vehicular Structures", AIAA Journal, Vol. 11 No 12, 1973, pp 1650-1654.
- [5] Charoenyut Dechwayukul, Carol A. Rubin and George T. Hahn. Analysis of the Effects of Thin Sealant Layers in Aircraft Structural Joints. AIAA Journal, Vol.41, No.11, November 2003, pp 2216-2228.
- [6] ABAQUS/Standard User's Manual, Volume 2, Version 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998
- [7] วิภู พิวัฒน์, เจริญยุทธ เดชวายุกุล, วิริยะ ทองเรือง และ ชลดา เล วิส. 2547. การทดสอบสมบัติของวัสดุไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อใช้ใน ดันแบบไฟไนต์เอลิเมนต์. การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, ขอนแก่น, ประเทศ ไทย, 18-20 ดุลาคม 2547.
- [8] JIS K 6849, 1994, Testing methods for tensile strength of adhesive bonds.
- [9] JIS K 6850, 1994, Testing methods for shear strength of adhesive bonds.
- [10]วิไลพร ลักษมีวานิชย์ และ มนัส แซ่ด่าน, 2545, การวิเคราะห์ พฤติกรรมการกดของอิลาสติกแบริ่งด้วยเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์, รายงานวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมศาสตร์ฉบับสมบูรณ์, คณะ

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยา เขตปัตานี