

ผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของ ความเค้นของรอยต่อหมุดย้ำ

Effects of Thin Adhesive Layer and Riveted-Pitch Distance on the Stress Concentration Factor of Riveted Lap Joints

จักรชัย สุวรรณนา¹ เจริญยุทธ เดชวายุกุล^{2*} วิริยะ ทองเรือง³ ธงชัย ฟองสมุทร⁴

^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

⁴ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

E-mail: dechvac@me.psu.ac.th*

Jugchai Suwannao¹ Charoenyut Dechwayukul^{2*} Wiriya Thongruang³ Thongchai Fongsamoot⁴

^{1,2,3}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

⁴Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Maung, Chiang Mai, 50200

E-mail: dechvac@me.psu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration Factor, SCF) ของรอยต่อหมุดย้ำ ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกทดสอบหาค่าความแข็งตึง (stiffness) ของชิ้นงานตัวอย่างที่ต่อกันด้วยหมุดย้ำร่วมกับกาวที่มีระยะห่างระหว่างหมุดต่างกัน ขั้นตอนที่สองได้แก่การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติของรอยต่อข้างต้น แบบจำลองทั้งหมดจะถูกเปรียบเทียบผลในแง่ของความแข็งตึง เมื่อรอยต่อรับภาระแรงดึงสถิตที่ทำให้มีการยืดตัวน้อยแบบเชิงเส้น (linear and small deformation) ทั้งนี้เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองในเชิงกายภาพ ขั้นตอนที่สามทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นที่เปลี่ยนไปเมื่อมอดูลัสที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อ และระยะห่างระหว่างหมุดต่างกัน จากการศึกษา พบว่า 1) การทาการที่มีค่ามอดูลัสสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นในรอยต่อหมุดย้ำมีค่าลดลง 2) ระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นในรอยต่อหมุดย้ำมีค่ามากขึ้น

คำหลัก ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้น แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และรอยต่อหมุดย้ำ

Abstract

This research focuses on the effects of adhesive and the riveted-pitch distance on the stress concentration factor (SCF) of combined adhesive-riveted lap joints. It is assumed the effect of adhesive is considered as elastic and shear modulus of thin

adhesive layer bonding between contacting surfaces of the joint.

The research methodology composes of three tasks. First, the joint stiffness of combined adhesive-riveted specimens at various adhesive and also riveted-pitch distance are examined when the joints are subjected to static tensile loading with small deformation. Second, the finite element models of specimens are created and then the stiffness is obtained in order to validate with the first task. Third, after the FEA model are validated the SCF is then investigated from the models. It is found that: 1) SCF region of hole is reduced when the adhesive is high modulus. 2) SCF region of hole is increasing as riveted-pitch distance is increasing.

Keywords: Stress Concentration Factor, finite element models, and riveted lap joint

1. บทนำ

การต่อแผ่นโลหะด้วยหมุดย้ำเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในโครงสร้างเครื่องบิน การต่อแบบนี้เป็นการต่อแบบเกย (lap joint) ต้องเจาะรูแผ่นโลหะสำหรับหมุดยึด (rivet) มีข้อดีคือ ความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงกว่าการเชื่อมโดยตรง แต่มีข้อเสียคือ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration Factor, SCF) สูงบริเวณรูเจาะ ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบให้รอยต่อมีความคงทนต่อการล้าภายใต้แรงดึงสลับ (tensile cyclic loading) ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นบริเวณรูเจาะสูงจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของรอยต่อ

จากการศึกษาโดย Dechwayukul [1] พบว่า การเพิ่มการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อหมุดยั่วโดยการใช้น้ำยาอุดฟัน (sealants) ซึ่งเป็นกาวที่มีค่ามอดูลัสต่ำทำเป็นชั้นบางๆ มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยั่วลดลง เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของรอยต่อภายใต้ภาระแรงดึงสลับ การศึกษาดังกล่าวให้แนวทางในการพัฒนาปรับปรุงรอยต่อแบบเกลียวหมุดยั่วให้มีความทนทานมากขึ้น สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เป็นการศึกษาต่อเนื่องจากที่กล่าวมา โดยจะศึกษาผลการยึดติดของการระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อว่าส่งผลอย่างไรต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น เมื่อกาวมีความแข็งแรงในการยึดติดที่สูงขึ้น โดยพิจารณาจากค่ามอดูลัสของกาวที่สูงขึ้น พร้อมกันนี้จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหมุดยั่วว่าส่งผลอย่างไรต่อการเพิ่มผลของค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยั่ว ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการออกแบบรอยต่อหมุดยั่วให้สามารถต้านทานแรงดึงได้ดียิ่งขึ้นต่อไป

ก่อนหน้านี้ได้มีงานวิจัยของ Cheng [2] พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นขึ้นอยู่กับลักษณะของรูเจาะบนแผ่นที่ใช้ยึดหมุดยั่ว ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรูเจาะระหว่างแบบหัวหมุดจม (countersunk type) กับรูเจาะแบบกลม (standard type) ทะลุตรงกลางแผ่น ผลที่ได้คือ การเจาะรูแบบหัวหมุดจม มีค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นมากกว่าจากการศึกษาของ Chutima and Blackie [3] พบว่า ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างหมุด ระยะห่างระหว่างแถว และขนาดของหมุด พบว่า ระยะห่างระหว่างหมุด ระยะห่างระหว่างแถว และขนาดของหมุด มีผลต่อการส่งถ่ายแรงมายังตัวหมุดยั่ว (load transfer) จากการศึกษานี้ของ Iyer, Xue, Batias, Rubin และ Hahn [4] ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ศึกษาเปลือกของเครื่องบินที่ใช้การต่อด้วยหมุดยั่วโดยไม่ได้ใช้การร่วม ผลการวิเคราะห์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในบริเวณรูหมุดยั่วมีค่าอยู่ประมาณ 8 ถึง 10 จากการศึกษานี้ของ Iyer [5] ได้พัฒนาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการจำลองการเชื่อมต่อเกลียวกันของแผ่นอลูมิเนียมด้วยหมุดยั่วแบบหนึ่งและสองแถว โดยใช้หมุดยั่วแบบหัวมาตรฐานและหัวหมุดจม เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูของแผ่นอลูมิเนียม จากการศึกษานี้ของ Liu และ Sawa [6] ศึกษาโดยสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์รอยต่อหมุดยั่ว และหากาวบริเวณผิวหน้าสัมผัสของรอยต่อแต่ไม่ได้ทำในส่วนของรูหมุดยั่ว จากผลการวิเคราะห์พบว่า การหากาวลงบนรอยต่อทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อสูงขึ้น จากการศึกษานี้ของ Fongsamootr [7] ศึกษาโดยสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์รอยต่อหมุดยั่วร่วมกับกาวมอดูลัสต่ำ ได้ใช้สารกันรั่วบางๆ ทาลงไประหว่างผิวสัมผัสของรอยต่อทั้งหมด จากนั้นทำการทดสอบความแข็งแรงและการเสียรูปของรอยต่อ รวมทั้งความคงทนต่อการล้า พบว่าการทาสารกันรั่วซึ่งมีสมบัติคล้ายกาวบางๆ ที่มีค่ามอดูลัสต่ำช่วยให้ชิ้นงานยึดติดกัน กาวดังกล่าวช่วยลดการตัดตัวของรอยต่อส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มความคงทนต่อการล้ามากขึ้น จากการศึกษานี้ของ Imanaka [8] ทำการศึกษาความแข็งแรงของรอยต่อหมุดยั่วร่วมกับกาว เมื่อมีระยะความยาวของการเกลียว ชนิดของกาว และหมุดยั่วที่มีวัสดุแตกต่างกัน โดยการกระจายความเค้นในชั้นกาวถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใน

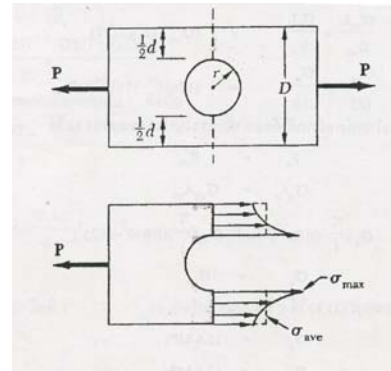
การศึกษานี้ใช้กาวประเภทอีพอกซีความแข็งแรงสูง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งแรงของกาวสามารถปรับปรุงให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ โดยการเชื่อมต่อชิ้นงานด้วยกาวกับหมุดยั่วร่วมกัน

ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรอยต่อหมุดยั่วขณะนี้ยังไม่สามารถทำได้โดยตรงด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากรอยต่อมีรูปทรงเรขาคณิตและการส่งผ่านแรงที่ซับซ้อน [1] อีกทั้งยังมีการยึดติดกับชั้นกาวบางระหว่างผิวสัมผัสของรอยต่อ จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) มาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรูเจาะหมุดยั่ว

2. ทฤษฎี

2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น

กรณีชิ้นส่วนโครงสร้างมีการเปลี่ยนรูปร่าง ดังแสดงในรูปที่ 1 [9] โดยการเจาะรูวงกลมตรงกลาง ทำให้มีความเข้มของความเค้นสูงบริเวณรูเจาะ ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวคล้ายคลึงกับแผ่นโลหะเจาะรูสำหรับยึดด้วยหมุดยั่ว



รูปที่ 1 การกระจายความเค้นที่รูเจาะ

ค่าความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่รูเจาะหาได้จากการคูณความเค้นเฉลี่ยกับค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น โดยความเค้นเฉลี่ยหาได้จากหารแรงด้วยพื้นที่หน้าตัดวิกฤติ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (1-3)

$$\sigma_{\max} = K \times \sigma_{\text{ave}} \quad (1)$$

$$\frac{P}{A} = K \times \left(\frac{P}{A_0} \right) \quad (2)$$

$$\frac{P}{(D \times t)} = K \times \left[\frac{P}{(D - 2r) \times t} \right] \quad (3)$$

โดยที่ $\sigma_{\max}$ คือความเค้นสูงสุด σ_{ave} คือความเค้นเฉลี่ย K คือค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น D คือความกว้างของแผ่นโลหะ P คือแรงดึง A_0 คือพื้นที่หน้าตัดวิกฤติ t คือความหนาของแผ่นโลหะ r คือรัศมีของรูเจาะตรงกลางแผ่นโลหะ

สำหรับการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดย้ำไม่สามารถใช้สมการที่ (1-3) คำนวณได้โดยตรง เพราะแรงที่กระจายบนพื้นที่หน้าตัดวิกฤติ (A_0) สำหรับคำนวณ σ_{ave} นั้นไม่สามารถระบุค่าที่แน่นอนได้ขณะนี้ เนื่องจากหมุดย้ำรับแรงไปบางส่วน อีกทั้งความเค้นที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด A_0 เกิดจากความเค้นผสมระหว่างการดัดของแผ่นอลูมิเนียม (plate bending due to eccentric loading) กับความเค้นเนื่องจากแรงดึง P [1] ดังนั้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรอยต่อหมุดย้ำจึงใช้สมการที่ (4) เป็นตัวกำหนดแทนเพราะรอยต่อรับความเค้นผสมจากแรงดึงและแรงดัด

$$SCF = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{apply}} \quad (4)$$

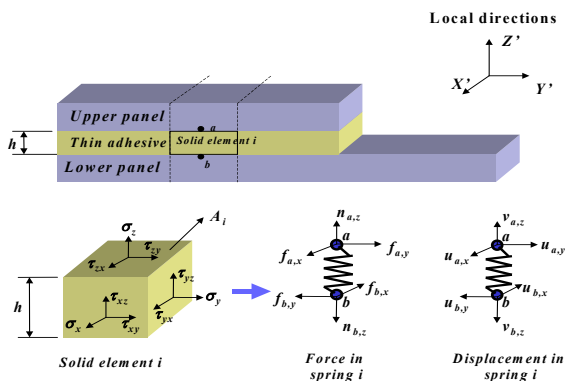
ทั้งนี้ σ_{max} สามารถหาจากการคำนวณทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ σ_{apply} ได้จากการคำนวณแรงที่กระทำกับชิ้นงานหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทั้งหมด สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (5)

$$\sigma_{apply} = \frac{P}{Dt} \quad (5)$$

โดย σ_{apply} คือความเค้นของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด เป็นความเค้นที่อยู่ในแนวเดียวกับ σ_{max} ได้ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1]

2.2 วิธีการวิเคราะห์ชั้นกาวบาง (TALA METHOD)

พฤติกรรมการยึดติดของชั้นกาวศึกษาในรูปของการต้านแรงและการเคลื่อนตัวระหว่างผิวสัมผัสที่กาวยึดติด การจำลองพฤติกรรมการยึดติดกันด้วยชั้นกาวบางระหว่างสองผิวสัมผัสที่สนใจในแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้หลักการ TALA ดังแสดงในรูปที่ 2 [1] สปริงเอลิเมนต์หลายๆตัวจะนำมาใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมของชั้นกาวบางทั้งในแนวเฉือนและแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส โดยสปริงแต่ละตัวจะมีค่าความแข็งตึง (stiffness) ตามความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาวบางในแนวต่างๆ การเปลี่ยนความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาวระหว่างผิวสัมผัสให้เป็นค่าความแข็งตึงของสปริงทำได้โดยการเปลี่ยนความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นกาวให้เป็นแรงและการเคลื่อนตัวที่เปลี่ยนไปตามขนาดพื้นที่ผิวและความหนาของชั้นกาวที่ใช้สัมผัส



รูปที่ 2 แสดงเปลี่ยนชั้นกาวบางเป็นสปริง

สมมุติให้ชั้นกาวบางมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นงานที่ใช้ยึดติด ชั้นกาวเปรียบเสมือนผิวบางที่มีเฉพาะ σ_z , τ_{zx} และ τ_{zy} เกิดขึ้นเมื่อรอยต่อส่งผ่านแรงมาถึงชั้นกาว พิจารณาพื้นที่ผิวกาวเล็ก ๆ A_i ที่ความหนา h ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างจุด a และ b ของผิวสัมผัสทั้งสอง ความเค้นในแนวตั้งฉากกับชั้นกาว σ_z รวมทั้ง τ_{zx} และ τ_{zy} ซึ่งเป็นความเค้นเฉือนตามผิวของชั้นกาว จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงที่กระทำต่อชั้นกาว ขณะเดียวกันชั้นกาวจะต้านทานแรงเหล่านั้นด้วยความแข็งแรงของการยึดติด ซึ่งอยู่ในรูปของค่ามอดุลัส โดยยอมให้ชั้นกาวเกิดการเคลื่อนตัวด้วยความเครียด ϵ_z , γ_{zx} และ γ_{zy} จากหลักการดังกล่าวสามารถหาค่าความแข็งตึงของสปริง ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมการยึดติดของชั้นกาวได้ดังสมการที่ (5)-(14)

$$\text{ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว; } \sigma_z = E \times \epsilon_z \quad (5)$$

$$(n_{a,z} + n_{b,z}) = \left(E \times \left(\frac{A_i}{h} \right) \right) \times (v_{a,z} + v_{b,z}) \quad (6)$$

$$(n_{a,z} + n_{b,z}) = K_n \times (v_{a,z} + v_{b,z}) \quad (7)$$

$$F_{n,i} = K_{n,i} \times v_{n,i} \quad (8)$$

$$K_{n,i} = E \times \left(\frac{A_i}{h} \right) \quad (9)$$

เมื่อ $F_{n,i}$ คือแรงลัพธ์ในสปริงในแนวตั้งฉาก $v_{n,i}$ คือการเคลื่อนตัวของสปริงในแนวตั้งฉาก $K_{n,i}$ คือความแข็งตึง (stiffness) ของสปริงในแนวตั้งฉาก E คือมอดุลัสยืดหยุ่นของกาวบาง (elastic modulus of thin adhesive layer)

τ_{zx} และ τ_{zy} จะเท่ากันทั้งนี้วัสดุเป็นแบบไอโซโทรปิก

$$\text{ในแนวเฉือน; } \tau_{zx} = G \times \gamma_{zx} \quad (10)$$

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

$$(f_{a,x} + f_{b,x}) = K_f \times (u_{a,x} + u_{b,x}) \quad (12)$$

$$F_{f,i} = K_{f,i} \times u_{f,i} \quad (13)$$

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

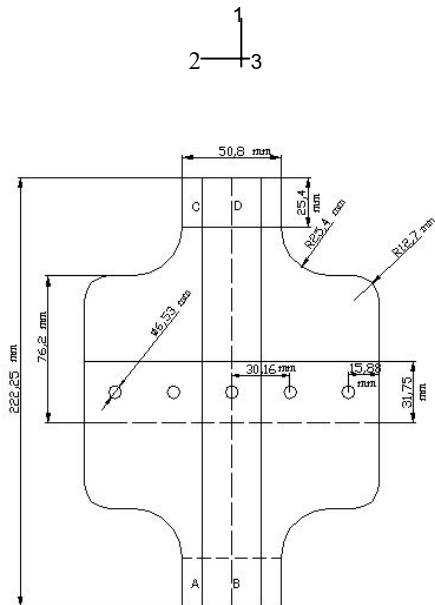
เมื่อ $F_{f,i}$ คือแรงลัพธ์ในสปริงในแนวเฉือน $u_{f,i}$ คือการเคลื่อนตัวของสปริงในแนวเฉือน $K_{f,i}$ คือความแข็งตึงเฉือน (shear stiffness) ของสปริงในแนวเฉือน G คือมอดุลัสเฉือนของกาวบาง (shear modulus of thin adhesive layer)

3. วิธีการทดลอง

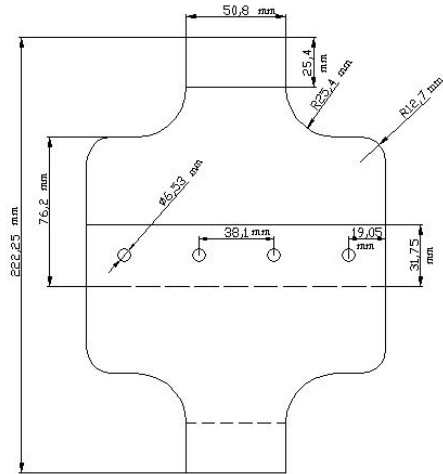
การวิจัยเริ่มจากการทดสอบพฤติกรรมการยึดติดของชั้นกาว โดยพิจารณาในแง่โมดูลัสของชั้นกาวที่ต้านทานแรงดึงและแรงเฉือนเป็นหลัก เพื่อเป็นข้อมูลในการกำหนดพฤติกรรมเชิงกลของชั้นกาวบางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) จากนั้นทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างที่ต่อกันด้วยหมุดยั่วร่วมกับกาว เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงสถิตที่ใช้ดึง (static tensile loading) กับการเคลื่อนตัว (F- Δ X curve) ของชิ้นงาน นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องตามการทดลอง ทำการศึกษาเปลี่ยนแปลงตัวแปร คือเปลี่ยนพฤติกรรมการยึดติดของกาวโดยการเปลี่ยนค่าโมดูลัส และระยะห่างระหว่างหมุดยั่ว ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ว่าส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในรอยต่อหมุดยั่วอย่างไร

3.1 การทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง

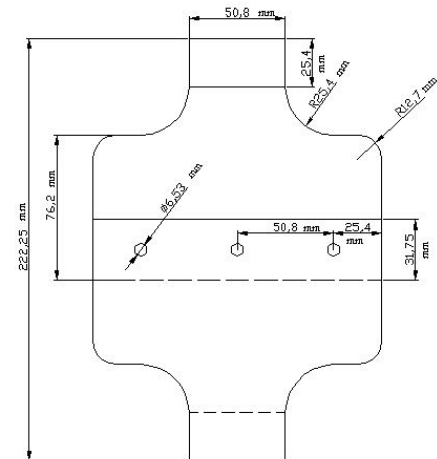
รูปที่3-5 แสดงถึงขนาดของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ (Al T6-7075) สองแผ่น มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร เชื่อมต่อด้วยหมุดยั่ว (Al T4-2117) 5, 4, และ 3 หมุด ซึ่งมีระยะห่างระหว่างหมุด 30.16, 38.1, และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยมีการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหมุดยั่ว และชนิดของกาว ตามแบบของแต่ละชิ้นงานตัวอย่าง ดังมีรายละเอียดต่างๆแสดงในตารางที่1 และนำชิ้นงานตัวอย่างมาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ ด้วยอัตราการดึงคงที่ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยการทดสอบจะทำการดึงชิ้นงานตัวอย่างในช่วงยึดตัวน้อยๆ



รูปที่3 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยั่ว 30.16 มิลลิเมตร



รูปที่4 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยั่ว 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่5 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยั่ว 50.8 มิลลิเมตร

ตารางที่1 รายละเอียดของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

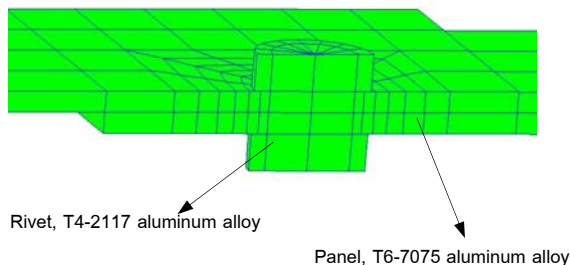
ชั้นที่	จำนวนหมุดยั่ว	ระยะห่างระหว่างหมุด	ชนิดของกาว	ความหนาของชั้นกาว
1	3	50.80 mm	กาวยาง	0.11 mm
2	3	50.80 mm	กาวยาง	0.20 mm
3	3	50.80 mm	กาวยาง	0.08 mm
1	4	38.10 mm	กาวยาง	0.09 mm
2	4	38.10 mm	กาวยาง	0.20 mm
3	4	38.10 mm	กาวยาง	0.15 mm
1	5	30.16 mm	กาวยาง	0.22 mm
2	5	30.16 mm	กาวยาง	0.13 mm
3	5	30.16 mm	กาวยาง	0.07 mm
1	3	50.80 mm	กาวอีพอกซี	0.04 mm
2	3	50.80 mm	กาวอีพอกซี	0.08 mm

ตารางที่ 1 รายละเอียดของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ต่อ)

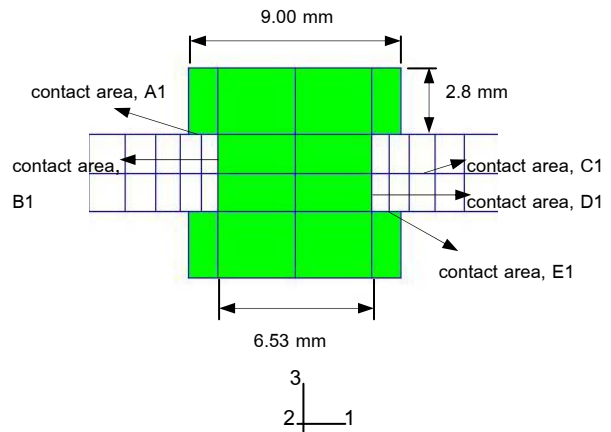
ชั้นที่	จำนวน หมุดย้ำ	ระยะห่าง ระหว่างหมุด	ชนิดของกาว	ความหนาของ ชั้นกาว
3	3	50.80 mm	กาวอีพอกซี	0.03 mm
1	4	38.10 mm	กาวอีพอกซี	0.02 mm
2	4	38.10 mm	กาวอีพอกซี	0.07 mm
3	4	38.10 mm	กาวอีพอกซี	0.13 mm
1	5	30.16 mm	กาวอีพอกซี	0.05 mm
2	5	30.16 mm	กาวอีพอกซี	0.12 mm
3	5	30.16 mm	กาวอีพอกซี	0.02 mm

3.2 การจำลองรอยต่อหมุดย้ำ

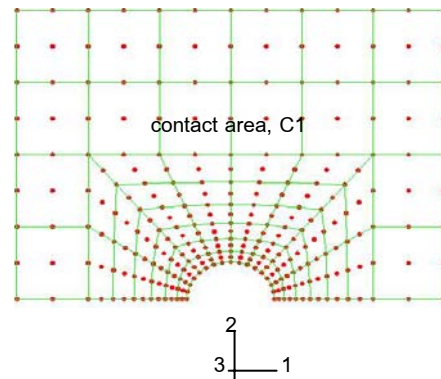
รอยต่อหมุดย้ำรวมกับการระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เป็นชิ้นงานตัวอย่างในหัวข้อ 3.1 ถูกสร้างขึ้นเป็นแบบจำลองสามมิติสำหรับใช้กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจำลองเฉพาะส่วนที่สมมาตรครึ่งในรูปที่ 5 เนื่องจากบริเวณตรงกลางเป็นส่วนที่ส่งถ่ายแรงได้ดี จึงไม่จำเป็นต้องจำลองรอยต่อหมุดย้ำทั้งหมด โดยแบบจำลองรอยต่อหมุดย้ำมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6 การเปลี่ยนระยะหมุดในแบบจำลองทำได้โดยการเปลี่ยนระยะ AB และ CD ตามระยะห่างระหว่างหมุด ในแบบจำลองประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์สองแผ่นประกบกัน และยึดติดกันด้วยหมุดย้ำ เอลิเมนต์แบบลูกบาศก์หกหน้า (27-node brick elements) ใช้สำหรับจำลองแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ และเอลิเมนต์แบบปริซึมห้าหน้า (15-node triangular prisms) ใช้สำหรับจำลองหมุดย้ำเพื่อต้องการให้หมุดยามีความแข็งแรงสูงกว่าแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งเหมือนกับความเป็นจริง โดยมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 228 เอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ที่อยู่บริเวณที่ต่อแยกกันมีจำนวนมาก เนื่องจากเป็นบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องของชิ้นงาน ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 0.2 [5] ขนาดรูปร่าง พื้นที่ผิวสัมผัสของหมุดย้ำแสดงในรูปที่ 7 และมอดูลัสยืดหยุ่นของอลูมิเนียมอัลลอยด์และหมุดย้ำเท่ากับ 70 GPa อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.25 โดยวิเคราะห์ผลรูปทรงเรขาคณิตเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น (NLGEOM) [1] ใช้แรงดึงในช่วง 0-6000 N และไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทางในระนาบ AB ส่วน AC และ BD ไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง 2 เมื่อได้แบบที่สมบูรณ์แล้วทำการคำนวณด้วยโปรแกรม ABAQUS [10]



รูปที่ 6 ลักษณะเอลิเมนต์ของแบบจำลองรอยต่อหมุดย้ำ



รูปที่ 7 ขนาดรูปร่าง และพื้นที่ผิวสัมผัสของหมุดย้ำ



รูปที่ 8 พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของกาว

โดยในส่วนของชั้นกาวบางเมื่อนำมาใช้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถูกนำมาใช้โดยหลักการที่เรียกว่า TALA ในงานวิจัยครั้งนี้สมมุติให้กาวบางมีเฉพาะในบริเวณส่วนที่ต่อแยกกันระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยด์แผ่นบนกับล่าง (contact area, C1) เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 8 โดยชั้นกาวบางจะถูกเปลี่ยนเป็นสปริงเอลิเมนต์หลายๆตัวที่สามารถจำลองพฤติกรรมเชิงกลของชั้นกาวบางในสามทิศทาง ประกอบด้วยทิศตั้งฉากกับพื้นที่ผิวและขนานกับผิวสัมผัส ซึ่งมีจำนวนของสปริงเอลิเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนพฤติกรรมการยึดติดของชั้นกาวแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 จำนวนสปริงเอลิเมนต์ที่เชื่อมต่อผิวสัมผัสทั้งหมด

Contact area	No. of nonlinear springs	
	Normal direction	Shear direction
A1	0	0
B1	0	0
C1	293	586
D1	0	0
E1	0	0
Total for two standard rivet	293	586

ตารางที่ 3 แสดงพฤติกรรมการยืดตัวของชั้นกาว

adhesive	Elastic Modulus, E (MPa)	Shear Modulus, G (MPa)
rubber glue ยี่ห้อ ACT No. 354 H	1.128	0.154
epoxy adhesive ยี่ห้อ Araldite Standard	23.147	9.385

จากนั้นค่ามอดุลัสยืดหยุ่น และมอดุลัสเฉือนของกาวทั้งสองชนิดถูกนำไปใช้สำหรับเป็นข้อมูลในการกำหนดพฤติกรรมเชิงกลของชั้นกาวบางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

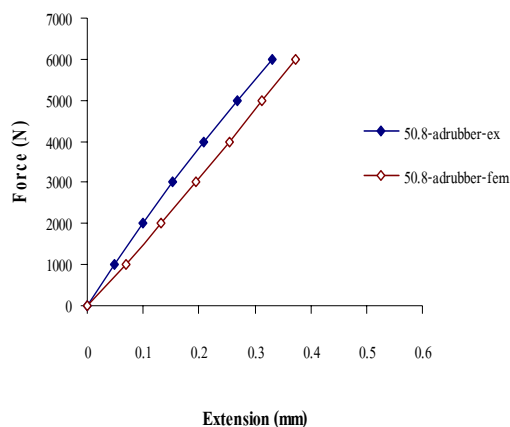
4. ผลการทดลอง

4.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

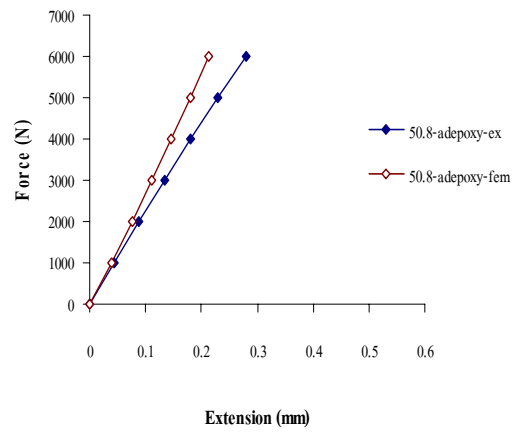
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวของรอยต่อเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างนำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปรียบเทียบที่แรงดึงเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 9-14 จากนั้นวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการทดลองกับการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงจากเปอร์เซ็นต์ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการเคลื่อนตัวที่แรงดึงต่างๆ โดยมีนิยามดังสมการที่ (15)

$$\text{Average value of \% Difference} = \frac{\sum |F_{em} - Exp| / Exp}{\text{Total no. of calculated force}} \times 100 \quad (15)$$

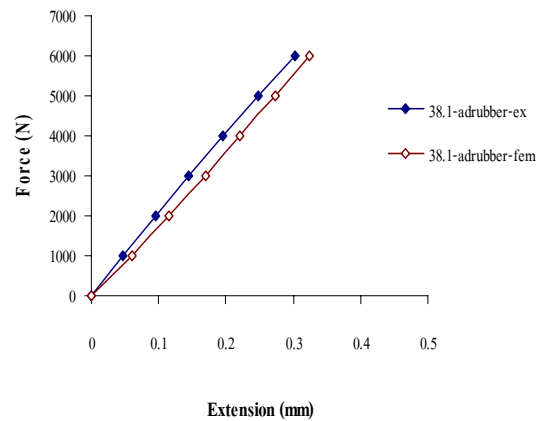
เมื่อ F_{em} คือค่าระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ $Exp.$ คือค่าระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวที่ได้รับจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง



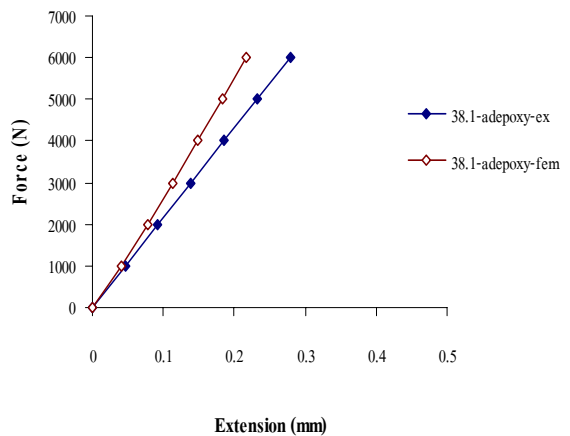
รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบจริงกับแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 50.8 มิลลิเมตร กรณีทาากาวยาง



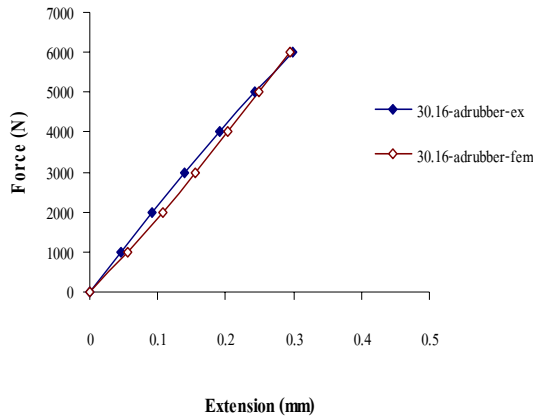
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบจริงกับแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 50.8 มิลลิเมตร กรณีทาากาวอีพอกซี



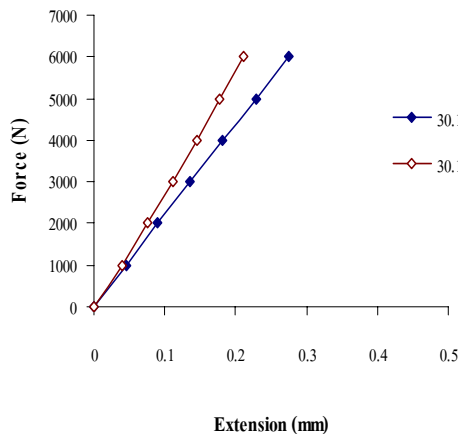
รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบจริงกับแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 38.1 มิลลิเมตร กรณีทาากาวยาง



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบจริงกับแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 38.1 มิลลิเมตร กรณีทาากาวอีพอกซี



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบจริงกับแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 30.16 มิลลิเมตร กรณีทาकाวยา



รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบการทดสอบจริงกับแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 30.16 มิลลิเมตร กรณีทาการอีพอกซี

จากรูปที่ 9-14 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงจากเปอร์เซ็นต์ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการเคลื่อนตัวที่แรงดึงต่างๆได้ ดังแสดงในตารางที่ 4

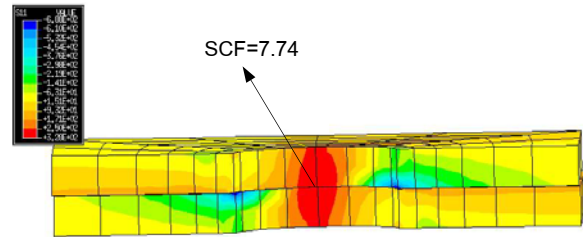
ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นต์ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการทดลองกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Pitch distance (mm)	Average value of % Difference	
	rubber glue	epoxy adhesive
50.8	22.1 %	14.4 %
38.1	13.9 %	15.6 %
30.16	8.8 %	15.9 %

4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น ซึ่งหาค่าได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยี่ห้อที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 50.8 มิลลิเมตร กรณีทา

กาวยา และทาการอีพอกซีมีค่า 7.74, และ 1.68 ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยี่ห้อที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 38.1 มิลลิเมตร กรณีทาकाวยา และทาการอีพอกซีมีค่า 6.14, และ 1.99 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยี่ห้อที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 30.16 มิลลิเมตร กรณีทาकाวยา และทาการอีพอกซีมีค่า 5.17, และ 1.88 ตามลำดับ ดังแสดงภาพตัวอย่างตำแหน่งที่เกิดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรอยต่อหมุดยี่ห้อในรูปที่ 15 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เหลือเสนอในรูปของตาราง ดังแสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 15 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทาकाวยา ระยะห่างระหว่างหมุดยี่ห้อเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของแบบจำลอง

Modulus of adhesive	Pitch distance (mm)		
	50.80	38.10	30.16
	SCF	SCF	SCF
rubber glue (E=1.128 MPa, G=0.154 MPa)	7.74	6.14	5.17
epoxy adhesive (E=23.147 MPa, G=9.385 MPa)	1.68	1.99	1.88

5. สรุป

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้รับจากการทดสอบของชิ้นงานตัวอย่าง พบว่าแบบจำลองรอยต่อหมุดยี่ห้อ ร่วมกับกาวยา ระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร (กรณีทาकाวยา) มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) สูงสุดประมาณ 22 % และแบบจำลองรอยต่อหมุดยี่ห้อ ร่วมกับกาวยา ระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร (กรณีทาการอีพอกซี) มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) สูงสุดประมาณ 16 % แสดงว่าแบบจำลองและการทดสอบจริงมีความใกล้เคียงกันในระดับหนึ่งในช่วงการยึดตัวในระยะน้อยๆ ซึ่งอยู่ในช่วงของการยึดตัวแบบเชิงเส้น ดังนั้นแบบจำลองจึงมีความเชื่อถือได้ระดับหนึ่งในช่วงที่มีการยึดตัวน้อยๆ

2. การทาการขึ้นบางในรอยต่อหมุดยี่ห้อ สามารถช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยี่ห้อลง เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของรอยต่อภายใต้ภาระแรงดึงสลับ การทาการที่มีค่ามอดูลัสสูงมากขึ้น ย่อมทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นมีแนวโน้มลดลงทุกระยะห่างระหว่างหมุด เนื่องจากความแข็งแรงของการยึดติดของกาวยาเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการยึดติดของแผ่นอลูมิเนียมให้เป็นชั้น

เดียวกัน ทำให้เกิดการตัดตัวของชิ้นงานน้อยลง แสดงว่าการต่อแผ่นโลหะด้วยหมุดยั่วร่วมกับกาวมอดุลีสูง สามารถลดจำนวนหมุดยั่วลงได้ ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง

3. ระยะห่างระหว่างหมุดมีผลต่อการส่งถ่ายแรงมายังตัวหมุดยั่ว ทำให้หมุดยั่วรับแรงไปบางส่วนด้วย ดังนั้นการต่อแผ่นโลหะด้วยหมุดยั่วที่มีระยะห่างระหว่างหมุดน้อยกว่าย่อมมีจำนวนหมุดยั่วมากกว่าสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นลดลงได้

4. จากตารางที่ 5 พบว่าการทากาวที่มีค่ามอดุลีสูงขึ้นในรอยต่อหมุดยั่วทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นมีค่าประมาณ 2 เท่าระยะห่างระหว่างหมุด หมายความว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรูเจาะหมุดยั่วมีแนวโน้มขึ้นกับค่ามอดุลีของกาวเป็นหลัก โดยที่ระยะห่างระหว่างหมุดอาจเป็นปัจจัยรองลงมา

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Dechwayukul, "Analysis of the Effects of Thin Sealant Layers in Aircraft Structural Joints," AIAA JOURNAL, Vol. 41, No. 11, 2003, pp. 2216-2228.
- [2] Y.F. Cheng, "Stress-Concentration Factors for a Countersunk Hole in a Flat Bar in Tension and Transverse Bending," Journal of Applied Mechanics, Vol. 45, 1978, pp. 929-932.
- [3] S. Chutima, and A.P. Blackie, "Effect of pitch distance, row spacing, end distance and bolt diameter on multi-fastened composite joints," Composite Part A, Vol. 27A, No. 2, 1996, pp. 105-110.
- [4] K. Iyer, M. Xue, P.C. Bastias, C.A. Rubin, and G.T. Hahn, "Analysis of fretting and fretting corrosion in Airframe riveted connections," AGARD conference proceedings 589, Tribology for Aerospace Systems, North Atlantic treaty organization, 1996, pp. 13.1-13.12
- [5] K. Iyer, "Three-Dimensional Finite Element Analyses of the Local Mechanical Behavior of Riveted Lap Joints," Ph.D. Dissertation, Vanderbilt University, Nashville TN, 1997.
- [6] J. Liu, and T. Sawa, "Stress analysis and strength evaluation of single lap adhesive joints combining rivets subjected to external bending moments," DE-Vol. 105, Reliability, Stress Analysis and Failure Prevention Issues in Adhesive and Bolted Connections, ASME, 1999, pp. 51-63.
- [7] T. Fongsamootr, "The Dilation and Compressive Properties of a Polymer Sealant and Analyses of the Distortion and Fatigue of Sealed Riveted Lap Joints," Ph.D. Dissertation, Vanderbilt University, Nashville TN, 2001.
- [8] M. Imanaka, "Fatigue Strength of Adhesive/Rivet Combined Lap Joints", Journal of Adhesion, Vol. 49, 1995, pp. 197-209.

[9] บัณฑิต หิรัญสถิตพร. 2542. กลศาสตร์ของแข็ง. เชียงใหม่ : ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[10] ABAQUS Users Manual, Version 5.8.2, Hibbit, Karlsson&Sorensen, Inc., 2000.