

# ผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อ ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นของรอยต่อหมุดคู่

จักรชัย สุวรรณเนา<sup>1</sup> เจริญยุทธ เดชวายุกุล<sup>2</sup> วิริยะ ทองเรือง<sup>3</sup>  
และ ธงชัย ฟองสมุทร<sup>4</sup>

## Abstract

Suwannao, J.<sup>1</sup>, Dechwayukul, C.<sup>1</sup>, Thongruang, W.<sup>1</sup> and Fongsamootr, T.<sup>2</sup>  
**Effects of thin adhesive layer and riveted-pitch distance  
on the stress concentration factor of riveted lap joints**  
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2007, 29(4) : 1069-1092

This research is to study the effects of the adhesion of thin adhesive layers in terms of modulus, and the riveted-pitch distance on the stress concentration factor (SCF) of riveted lap joints, when the joints are subjected to static tensile loading using Finite Element Method (FEM). The methodology comprises of three tasks. The first task is to perform tensile and simple shear tests of thin adhesive layers to determine the adhesion of adhesives in terms of modulus, which will be used in finite element models. The second task is to verify the finite element models by testing the stiffness of riveted lap joints. The third task is to vary the adhesion of thin adhesive layers and the riveted-pitch distance in finite element models, and then study the

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand. <sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Maung, Chiang Mai, 50200 Thailand

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโทหลักสูตร วศ.ม. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล <sup>2</sup>Ph.D. (Mechanical Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ <sup>3</sup>Ph.D. (Materials Science and Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 <sup>4</sup>Ph.D.(Mechanical Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Corresponding e-mail: dechwac@me.psu.ac.th

รับต้นฉบับ 25 สิงหาคม 2549      รับลงพิมพ์ 6 มีนาคม 2550

effects of these two variables on SCF at the rivet-shank hole. It is found that SCF is reduced when the adhesion of thin adhesive layers is increased. The increase in the adhesion reduces bending of the joints, resulting in the reduction of stresses at the rivet-shank hole. In addition, it is also found that SCF is reduced when the riveted-pitch distance is decreased. When the two variables are considered together, it is found that the riveted-pitch distance does not affect SCF when the adhesion of thin adhesive layers is 10 MPa or higher.

**Key words :** stress concentration factor, finite element models, and riveted lap joint

### บทคัดย่อ

จักรชัย สุวรรณเนาวิ เจริญยุทธ เดชวายุกุล วิริยะ ทองเรือง และ ธงชัย ฟองสมุทร  
ผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของ  
ความเค้มของรอยต่อหมุดย้ำ

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2550 29(4) : 1069-1092

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาวบางพิจารณาในรูปของมอดูลัส และระยะห่างระหว่างหมุดย้ำต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้มของรอยต่อหมุดย้ำ เมื่อรับแรงดึงด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย 1) การทดสอบความแข็งแรงดึงและเฉือนของชั้นกาวบาง เพื่อหา มอดูลัสของชั้นกาว สำหรับกำหนดพฤติกรรมการตอบสนองการเคลื่อนที่ของชั้นกาวต่อแรงดึงและแรงเฉือนในแบบ จำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2) ทดสอบความต้านทานแรงดึงของรอยต่อหมุดย้ำ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบ จำลอง 3) ปรับเปลี่ยนความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาว และระยะห่างระหว่างหมุดในแบบจำลอง จากนั้น ศึกษาว่าตัวแปรทั้งสองส่งผลอย่างไรต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้มในรูเจาะ จากการศึกษพบว่า การเพิ่ม ความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาว ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้มบริเวณรูเจาะหมุดย้ำลดลง ทั้งนี้ ชั้นกาวที่ยึดติดแข็งแรงขึ้นสามารถช่วยลดการคัดตัวของรอยต่อ ส่งผลให้ความเค้มที่เกิดขึ้นจากการคัดในรูเจาะลดลง นอกจากนี้ ยังพบว่าการลดระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ ช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้มในรูเจาะ เมื่อนำ ตัวแปรทั้งสองมาพิจารณาร่วมกัน พบว่า ระยะห่างระหว่างหมุดไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้ม เมื่อ กาวมีความแข็งแรงดึงมากกว่าหรือเท่ากับ 10 MPa

การต่อแผ่นโลหะด้วยหมุดย้ำโดยทั่วไปเป็นการต่อ แบบเกย (lap joint) ต้องเจาะรูแผ่นโลหะสำหรับหมุดยึด (rivet) มีข้อดีคือ ความแข็งแรงต่อน้ำหนักของโครงสร้างสูงกว่าการเชื่อมโดยตรง มีข้อเสียคือ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้ม (Stress Concentration Factor, SCF) สูง บริเวณรูเจาะเมื่อรอยต่อรับแรงดึง ค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้มเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบให้ รอยต่อมีความคงทนต่อการล้าภายใต้แรงดึงสลับ (tensile cyclic loading) ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้มบริเวณรูเจาะสูงจะส่งผลต่อความแข็งแรงและอายุ การใช้งานของรอยต่อ

จากการศึกษา (Dechwayukul, 2003) พบว่า การ

เพิ่มการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อหมุดย้ำ โดยการใช้ สารกันรั่ว (sealants) ซึ่งเป็นกาวที่มีค่ามอดูลัสต่ำทาเป็นชั้น บาง ๆ มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้ม บริเวณรูเจาะหมุดย้ำลดลง เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของ รอยต่อภายใต้ภาระแรงดึงสลับ ก่อนหน้านั้นได้มีงานวิจัย (Cheng, 1978) ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้ม พบว่า ค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับลักษณะของรูเจาะบนแผ่นที่ใช้ยึด หมุดย้ำ และได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้มของรู เจาะระหว่างแบบหัวหมุดจม (countersunk type) กับรู เจาะแบบกลม (standard type) ทะลุตรงกลางแผ่น ผลที่ ได้คือ การเจาะรูแบบหัวหมุดจม มีค่าสัมประสิทธิ์ความเค้ม ของความเค้มมากกว่า จากการศึกษโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิ

เมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Iyer, et al.,1996) ศึกษาเปลือกของเครื่องบินที่ใช้การต่อด้วยหมุดย้ำโดยไม่ได้ใช้กาวร่วม ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูหมุดย้ำมีค่าอยู่ประมาณ 8 ถึง 10 ต่อมาได้พัฒนาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ Iyer, (1997) จำลองการเชื่อมต่อกันของแผ่นอลูมิเนียมด้วยหมุดย้ำแบบหนึ่งและสองแถว โดยใช้หมุดย้ำแบบหัวมาตรฐานและหัวหมุดจม เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูของแผ่นอลูมิเนียม ต่อมาการศึกษาโดยสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ (Liu and Sawa, 1999) สำหรับวิเคราะห์รอยต่อหมุดย้ำ และทากาวบริเวณผิวหน้าสัมผัสของรอยต่อ แต่ไม่ได้ทำในส่วนของรูหมุดย้ำ พบว่าการทากาวลงบนรอยต่อทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อสูงขึ้น ต่อมา Fongsamootr, (2001) ศึกษาความคงทนต่อการล้าของรอยต่อหมุดย้ำร่วมกับกาวมอดูลัสต่ำ ได้ใช้สารกันรั่วบางๆ ทาลงไประหว่างผิวสัมผัสของรอยต่อทั้งหมด พบว่าการทาสารกันรั่วเพิ่มความคงทนต่อการล้ามากขึ้น จากการศึกษาความแข็งแรงของรอยต่อหมุดย้ำร่วมกับกาว เมื่อมีระยะความยาวของการเกย ชนิดของกาว และหมุดย้ำที่มีวัสดุ แตกต่างกัน โดยการกระจายความเค้นในชั้นกาวถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาครั้งนี้ใช้กาวประเภทอีพอกซีความแข็งแรงสูง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงของกาวสามารถปรับปรุงให้ชั้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ โดยการเชื่อมต่อนี้ขึ้นงานด้วยกาวกับหมุดย้ำร่วมกัน (Imanaka, 1995) จากการศึกษาโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างหมุด ระยะห่างระหว่างแถว และขนาดของหมุดพบว่า ระยะห่างระหว่างหมุด ระยะห่างระหว่างแถว และขนาดของหมุด มีผลต่อการส่งถ่ายแรง (load transfer) มายังตัวหมุดย้ำ (Chutima และ Blackie, 1996)

การศึกษาของ Iyer (1997) ให้แนวทางในการใช้ FEM ศึกษาความสัมพันธ์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในรูเจาะหมุดย้ำแบบต่างๆ โดยไม่มีการใช้กาวยึดติดรอยต่อ ต่อมางานของ Dechwayukul (2003) ได้นำแบบจำลองของ Iyer มาศึกษาผลการยึดติดของกาวซึ่งเป็นสารกันรั่วมีค่ามอดูลัสต่ำในรอยต่อหมุดย้ำพบว่าที่รูเจาะหมุดย้ำมีค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นลดลงเมื่อรับแรงดึงสถิต และเป็นที่ยืนยันผลการศึกษาดังกล่าว Fongsamootr

(2001) ได้ศึกษาเปรียบเทียบอายุการใช้งานของรอยต่อหมุดย้ำแบบใช้กาวและไม่ใช้กาวภายใต้แรงดึงสลับพบว่าอายุการใช้งานสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่ Dechwayukul (2003) ศึกษา และจากการศึกษาของ Liu และ Sawa (1999) กับ Imanaka (1995) ได้มีการศึกษาความแข็งแรงของรอยต่อหมุดย้ำที่ใช้กาวมอดูลัสสูง พบว่ากาวช่วยเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อขึ้นมา ประกอบกับงานของ Chutima และ Blackie (1996) ได้ศึกษาการถ่ายเทแรงในรอยต่อหมุดย้ำพบว่าการถ่ายเทแรงขึ้นกับระยะห่างระหว่างหมุด งานดังกล่าวได้ให้แนวทางการศึกษาว่ากาวและระยะระหว่างหมุดเจาะมีผลต่อการเกิดแรงภายในรูเจาะหมุด และจากงานที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรูเจาะหมุดย้ำเมื่อตัวแปรคือกาวที่ใช้ยึดติดมีมอดูลัสเปลี่ยนไปพร้อมกับการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหมุดในรอยต่อ การศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรดังกล่าวจะเป็นแนวทางในการลดจำนวนหมุดย้ำลงเมื่อใช้กาวร่วมยึดในรอยต่อ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการลดน้ำหนักต่อความยาวรอยต่อได้และยังคงความแข็งแรงไว้เช่นเดิม

## ทฤษฎี

### 1. ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น

ชั้นส่วนโครงสร้างแผ่นเจาะรูกลมตรงกลาง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเปลี่ยนแปลงตามขนาดของรูเจาะและความกว้างของแผ่นโลหะตามลักษณะการรับ การดึง และการตัด ดังแสดงใน Figure 1 และ 2 ตามลำดับ ค่าความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณรูเจาะหมุดย้ำหา ได้จากการคูณความเค้นเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะกับค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่หน้าตัดของรูเจาะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (1)-(6)

$$\sigma_o = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\sigma_o = \frac{F}{(w-d) \times t} \quad (2)$$

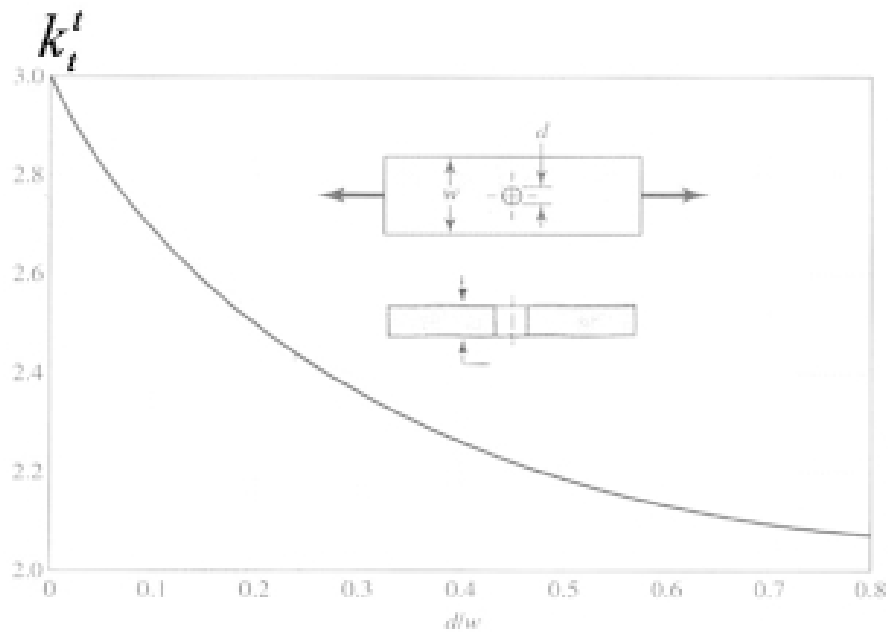


Figure 1. Bar in tension or simple compression with a transverse hole (Shigley, et al., 2003)

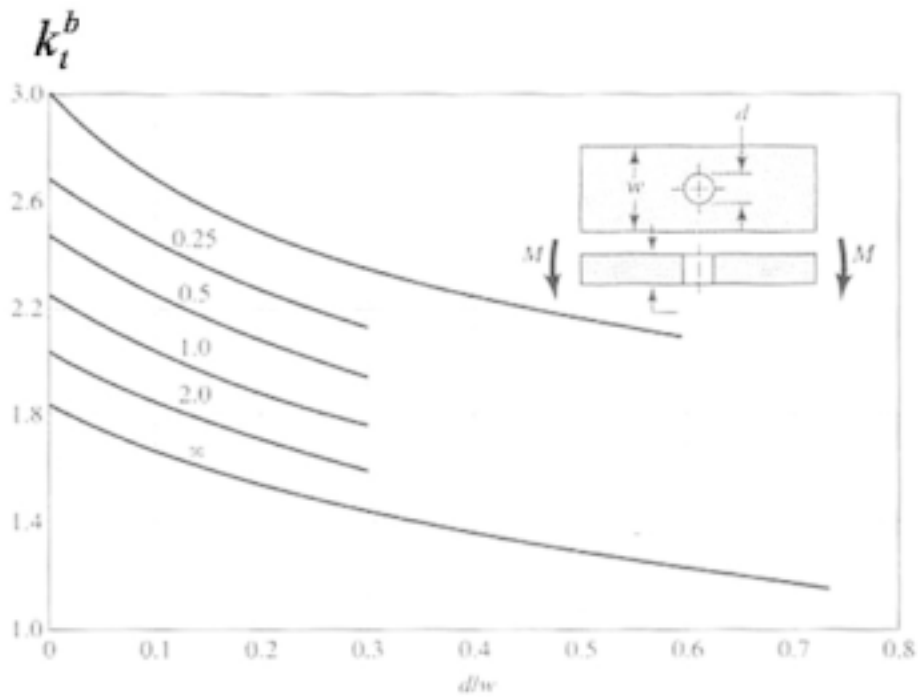


Figure 2. Rectangular bar with a transverse hole in bending (Shigley, et al., 2003)

ในแง่ของแรงดัด;

$$\sigma_o^b = \frac{Mc}{I} \quad (3)$$

$$\sigma_o^b = \frac{12Mc}{(w-d) \times t^3} \quad (4)$$

ในกรณี combined stress คิดเฉพาะความเค้นที่  
เกิดขึ้นที่ผิวของรูเจาะเท่ากับ

$$\sigma_{max}^t + \sigma_{max}^b = K_t^t \times \sigma_o^t + K_t^b \times \sigma_o^b \quad (5)$$

$$\sigma_{max}^t + \sigma_{max}^b = K_t^{eff} \times \sigma_o \quad (6)$$

โดยที่  $\sigma_{max}^t$  คือความเค้นดึงสูงสุด  $\sigma_{max}^b$  คือความเค้นดัด  
สูงสุด  $\sigma_o^t$  คือความเค้นเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ  $\sigma_o^b$   
คือความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ  $\sigma_o^b$  คือ  
ความเค้นดัดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ  $K_t^t$  คือค่า  
สัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเนื่องจากการดึง  $K_t^b$  คือ  
ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเนื่องจากการดัด  $K_t^{eff}$   
คือค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่หน้าตัดของรูเจาะ  
คือความกว้างของแผ่นโลหะ F คือแรงดึง A คือพื้นที่หน้า  
ตัดวิกฤติ t คือความหนาของแผ่นโลหะ d คือขนาดของรู  
เจาะตรงกลางแผ่นโลหะ M คือโมเมนต์ดัด I คือโมเมนต์  
ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด c คือระยะห่างกึ่งกลางความ  
หนาแผ่นโลหะ

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความ  
เค้นของรอยต่อหมุดยังไม่สามารถใช้สมการที่(1)-(6) ได้โดยตรง  
เพราะแรงที่กระจายบนพื้นที่หน้าตัดวิกฤติ สำหรับคำนวณ  $\sigma_o$   
นั้นไม่สามารถระบุค่าที่แน่นอนได้ขณะนี้ เนื่องจาก  
จากหมุดรับแรงไปบางส่วน อีกทั้งความเค้นที่เกิดขึ้นบน  
หน้าตัดวิกฤติ เกิดจากความเค้นผสมระหว่างการดัดของแผ่น  
อลูมิเนียม (plate bending due to eccentric loading)  
กับความเค้นเนื่องจากแรงดึง F (Dechwayukul, 2003)  
ดังนั้น ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรอย  
ต่อหมุดจึงใช้สมการที่ (7) เป็นตัวกำหนดแทนเพราะรอย  
ต่อรับความเค้นผสมจากแรงดึงและแรงดัด เนื่องจากเป็น  
ความเค้นผสม จึงกำหนดนิยามของค่าสัมประสิทธิ์ความเข้ม  
ของความเค้นที่หน้าตัดของรูเจาะขึ้นใหม่ สำหรับรอยต่อคือ  
SCF<sub>eff</sub> (Effective Stress Concentration Factor)

โดย  $\sigma_{apply}$  คือความเค้นดึงในแนวตั้งฉากที่กระทำต่อ  
ชิ้นงาน เป็นความเค้นที่อยู่ในแนวเดียวกับ  $\sigma_{max}$   
(Dechwayukul, 2003)

ทั้งนี้  $\sigma_{max}$  คือความเค้นสูงสุด สามารถหาจากวิธี  
ไฟไนต์เอลิเมนต์  $\sigma_{apply}$  คำนวณจากแรงดึงที่กระทำกับชิ้น  
งานหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทั้งหมด ตามสมการที่ (8)

$$\sigma_{apply} = \frac{F}{(w \times t)} \quad (8)$$

## 2. วิธีการวิเคราะห์ชั้นกาวบาง (Thin Adhesive Layer Analysis, TALA Method)

พฤติกรรมการยึดติดของชั้นกาวศึกษาในรูปของการ  
ต้านแรงและการเคลื่อนตัวระหว่างผิวสัมผัสที่กาวยึดติด การ  
จำลองพฤติกรรมการยึดติดกันด้วยชั้นกาวบางระหว่างสองผิว  
สัมผัสที่สนใจในแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้  
หลักการ TALA (Dechwayukul, 2003) ดังแสดงใน  
Figure 3 สปริงเอลิเมนต์หลายๆ ตัวจะนำมาใช้สำหรับจำลอง  
พฤติกรรมของชั้นกาวบางทั้งในแนวเฉือนและแนวตั้งฉากกับ  
ผิวสัมผัส โดยสปริงแต่ละตัวจะมีค่าความแข็งดึง (stiffness)  
ตามความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาวบางในแนวต่างๆ  
การเปลี่ยนความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาวระหว่างผิว  
สัมผัสให้เป็นค่าความแข็งดึงของสปริงทำได้โดยการเปลี่ยน  
มอดูลัสยืดหยุ่นและเงื่อนของชั้นกาวตามขนาดพื้นที่ผิวและ  
ความหนาของชั้นกาวที่ใช้ยึดติด

สมมุติให้ชั้นกาวบางมากเมื่อเทียบกับความหนาของ  
ชิ้นงานที่ใช้ยึดติด ชั้นกาวเปรียบเสมือนผิวบางที่มีเฉพาะ  $\sigma$ ,  
 $\tau_{zx}$  และ  $\tau_{zy}$  เกิดขึ้นเมื่อแรงผ่านมาถึงชั้นกาว พิจารณาพื้นที่  
ผิวกาวเล็กๆ  $A_i$  ที่ความหนา h เชื่อมต่อระหว่างจุด a และ b  
ระหว่างผิวสัมผัส ความเค้นในแนวตั้งฉากกับชั้นกาว  $\sigma$  รวม  
ทั้ง  $\tau_{zx}$  และ  $\tau_{zy}$  ซึ่งเป็นความเค้นเฉือนตามผิวของชั้นกาว  
ถูกเปลี่ยนเป็นแรงที่กระทำต่อชั้นกาว ขณะเดียวกันชั้นกาว  
จะต้านทานแรงเหล่านั้นด้วยความแข็งแรงของการยึดติด ซึ่ง  
อยู่ในรูปของค่ามอดูลัส โดยยอมให้ชั้นกาวเกิดการยึดตัวด้วย  
ความเครียด  $\epsilon_z$ ,  $\gamma_{zx}$  และ  $\gamma_{zy}$  จากหลักการดังกล่าวสามารถ  
หาค่าความแข็งดึงของชั้นกาวบนพื้นที่ A ในรูปของสปริง ซึ่ง  
สามารถจำลองพฤติกรรมการยึดติดของชั้นกาวได้ดังสมการที่  
(9)-(18)

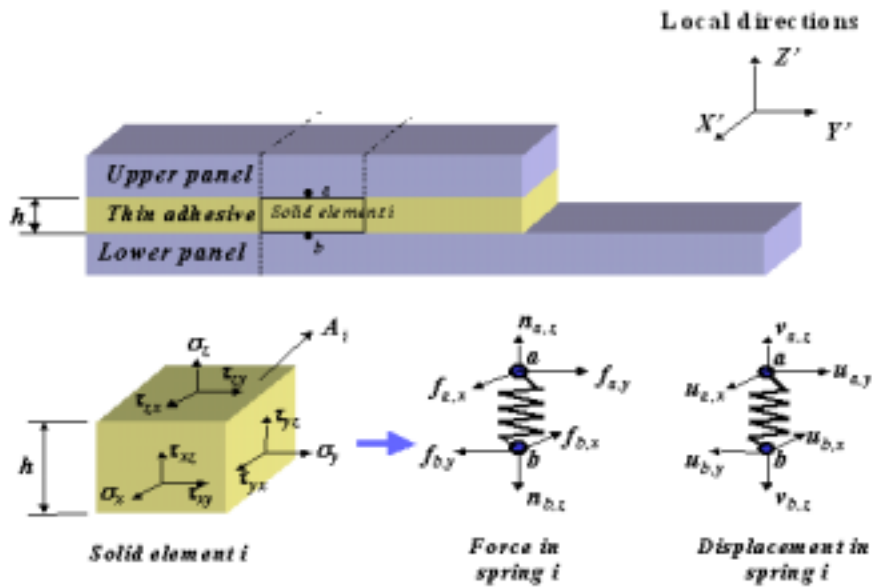


Figure 3. Schematic of spring representation of solid adhesive element

ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว;

$$\sigma_z = E \times \varepsilon_z \tag{9}$$

$$\begin{pmatrix} n_{a,z} \\ n_{b,z} \end{pmatrix} = \left( E \times \left( \frac{A_i}{h} \right) \right) \times (v_{a,z} + v_{b,z}) \tag{10}$$

$$\begin{pmatrix} n_{a,z} \\ n_{b,z} \end{pmatrix} = k_n \times (v_{a,z} + v_{b,z}) \tag{11}$$

$$F_{n,i} = k_{n,i} \times v_{n,i} \tag{12}$$

$$k_{n,i} = E \times \left( \frac{A_i}{h} \right) \tag{13}$$

เมื่อ  $F_{n,i}$  คือแรงลัพธ์ในสปริงในแนวตั้งฉาก  $v_{n,i}$  คือการยืดตัวของสปริงในแนวตั้งฉาก  $k_{n,i}$  คือความแข็งดึงของสปริงในแนวตั้งฉาก  $E$  คือมอดุลัสยืดหยุ่นของกาวบาง (elastic modulus of thin adhesive layer)  $n$  คือแรงยึดตัวในแนวตั้งฉากชั้นกาว ในกรณีการเฉือน เมื่อสมมติให้ชั้นกาวเป็นวัสดุแบบไอโซโทรปิก (isotropic);

ในแนวเฉือน;

$$\tau_{zx} = G \times \gamma_{zx} \tag{14}$$

$$\begin{pmatrix} f_{a,x} + f_{b,x} \end{pmatrix} = \left( G \times \left( \frac{A_i}{h} \right) \right) \times (u_{a,x} + u_{b,x}) \tag{15}$$

$$\begin{pmatrix} f_{a,x} + f_{b,x} \end{pmatrix} = k_f \times (u_{a,x} + u_{b,x}) \tag{16}$$

$$F_{f,i} = k_{f,i} \times u_{f,i} \tag{17}$$

$$k_{f,i} = G \times \left( \frac{A_i}{h} \right) \tag{18}$$

เมื่อ  $F_{f,i}$  คือแรงลัพธ์ในสปริงในแนวเฉือน  $u_{f,i}$  คือการยืดตัวของสปริงในแนวเฉือน  $k_{f,i}$  คือความแข็งดึงของสปริงในแนวเฉือน  $G$  คือมอดุลัสเฉือนของกาวบาง (shear modulus of thin adhesive layer)  $f$  คือแรงเฉือนในแนวชั้นกาว ซึ่งจะแยกเป็นแนวแกน  $x$  และ  $y$

จากสมการข้างต้นเมื่อทราบค่า  $E$  และ  $G$  ซึ่งได้จากการทดสอบชั้นกาวบางในห้องปฏิบัติการ สามารถเปลี่ยนค่าดังกล่าวเป็นค่าความแข็งดึงของสปริง เมื่อรู้ความหนาและพื้นที่สัมผัสในแบบจำลองที่สนใจจะศึกษา

2.1 การเปลี่ยนกาวบางเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 3 มิติ

หนึ่งเอลิเมนต์เปลี่ยนเป็นสปริงแก้ตัว วิธีนี้จะทำการเปลี่ยนกาวบางหนึ่งเอลิเมนต์เป็นสปริงเอลิเมนต์แก้ตัว ดังแสดงใน Figure 4 โดยที่จุดบนผิวสัมผัส a-b-c-d ของ element  $U_i$  จะเชื่อมต่อกับจุดบนผิวสัมผัส a'-b'-c'-d' ของ element  $L_i$  สปริง  $S_i$  จะจำลองพฤติกรรมจริงของชั้นกาวในสามทิศทาง ประกอบด้วยทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ผิว (z direction) และขนานกับผิวสัมผัส (x and y direction) ซึ่งสปริงจะเชื่อมต่อระหว่างจุด  $u_i$  และ  $l_i$  ส่วนสปริงที่เหลือ ( $S_{i+1}$  -  $S_{i+8}$ ) ก็แสดงพฤติกรรมในลักษณะเช่นเดียวกัน โดยพื้นที่ของสปริงในแต่ละตัวแสดงใน Table 1

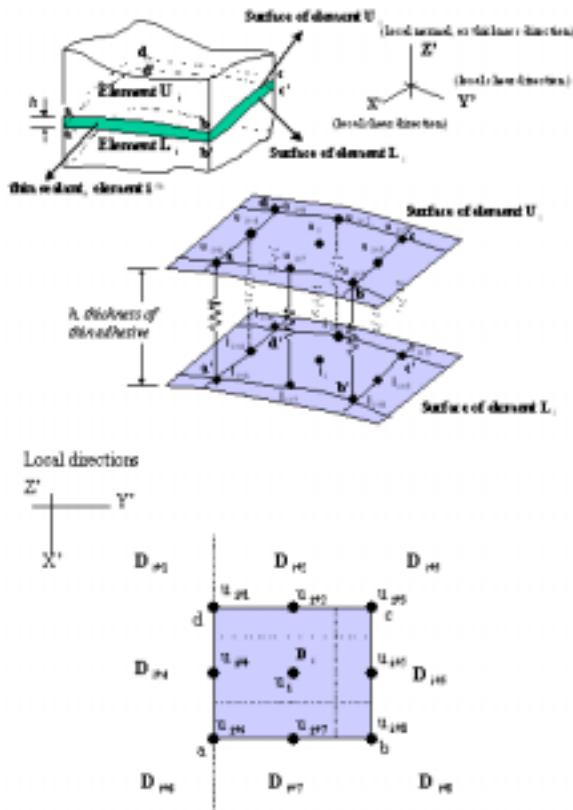


Figure 4. Schematic for representing solid adhesive element with spring elements

Table 1. Formulation for calculating the spring area for the 3-D model

Spring	Spring Area
$S_i$	$A_{i-1} = 4(D_i)/16$
$S_{i+1}$	$A_{i+1} = (D_i)/16+(D_{i+1})/16+(D_{i+2})/16+(D_{i+4})/16$
$S_{i+2}$	$A_{i+2} = (D_i)/8+(D_{i+2})/8$
$S_{i+3}$	$A_{i+3} = (D_i)/16+(D_{i+2})/16+(D_{i+3})/16+(D_{i+5})/16$
$S_{i+4}$	$A_{i+4} = (D_i)/8+(D_{i+4})/8$
$S_{i+5}$	$A_{i+5} = (D_i)/8+(D_{i+5})/8$
$S_{i+6}$	$A_{i+6} = (D_i)/16+(D_{i+4})/16+(D_{i+6})/16+(D_{i+7})/16$
$S_{i+7}$	$A_{i+7} = (D_i)/8+(D_{i+7})/8$
$S_{i+8}$	$A_{i+8} = (D_i)/16+(D_{i+5})/16+(D_{i+7})/16+(D_{i+8})/16$

วิธีการทดลอง

เริ่มจากการทดสอบความต้านทานการยึดติดของชั้นกาวต่อแรงดึงและแรงเฉือนเป็นหลัก เพื่อกำหนดพฤติกรรมของชั้นกาวบางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element models) จากนั้นทดสอบหาความต้านทานแรงดึงของรอยต่อหมุดยึดแบบต่างๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง หลังจากนั้นปรับเปลี่ยนความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาวและระยะห่างระหว่างหมุดในแบบจำลอง ศึกษาว่าตัวแปรทั้งสองส่งผลอย่างไรต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรูเจาะ

1. การทดสอบการยึดติดของชั้นกาวบางภายใต้แรงดึงและเฉือน

การศึกษาการยึดติดของชั้นกาวในแนวตั้งฉากกับผิวกาวภายใต้แรงดึง เพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (E) ของชั้นกาวบาง และในแนวสัมผัสหรือแนวขนานกับผิวกาวภายใต้แรงเฉือนเพื่อหาค่ามอดูลัสเฉือน (G) ของชั้นกาวบาง สำหรับเป็นข้อมูลในการกำหนดค่าความแข็งแรงของสปริงในแนวตั้งฉาก และแนวเฉือน ของชั้นกาวบางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน JIS (Japan Industrial Standard) K6849-1994: Testing methods for tensile

strength of adhesive bonds และ K6850-1994: Testing methods for shear strength of adhesive bonds by tensile loading ดังแสดงใน Figure 5 มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเหล็กแท่งกลมตันและเหล็กแผ่นมาขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดที่บริเวณผิวสัมผัสที่เชื่อมต่อกันด้วยกาว หลังจากนั้นทำความสะอาดด้วยอะซิโตน เพื่อล้างคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกออก

2. นำเหล็กแท่งกลมตันที่ทำความสะอาดมาประกบกันแบบชน (butt joint) ซึ่งชั้นกาวทดสอบอยู่ระหว่างชั้นประกบทั้งสอง โดยใช้เครื่องควบคุมความหนาของชั้นกาวบางในการควบคุมความหนาของกาวให้มีความหนาประมาณ 200 ไมครอน ดังแสดงใน Figure 6 ส่วนเหล็กแผ่นที่ทำความสะอาดมาประกบกันแบบเกย (single lap joint) แต่มีการรับภาระในแนวเดียวกันซึ่งไม่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดในรอยต่อ

ซึ่งชั้นกาวทดสอบอยู่ระหว่างชั้นประกบทั้งสอง โดยทำการทดสอบกาวที่มีความหนาประมาณ 100 ไมครอน โดยใช้แผ่นฟิล์มบาง ๆ เป็นตัวสร้างความหนาของชั้นกาวบาง และใช้ซีแลคม์ในการยึดจับ หลังจากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 16 ชั่วโมง

3. ทำการทดสอบการยึดติดของชั้นกาวบางในแนวตั้งฉากและแนวเอียงอย่างละ 5 ชิ้นงานตัวอย่าง ในแต่ละประเภทของกาว ดังแสดงใน Table 2 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ ดังแสดงใน Figure 7 ด้วยอัตราการดึงคงที่ 50 มม./นาที ทำการทดสอบจนกระทั่งรอยต่อหลุดออกจากกัน

4. ทำการบันทึกขนาดของแรงดึง และการเปลี่ยนรูปของชั้นกาวในชิ้นงานตัวอย่าง

5. นำข้อมูลระหว่างแรงที่ใช้ดึงกับการเปลี่ยนรูปของ

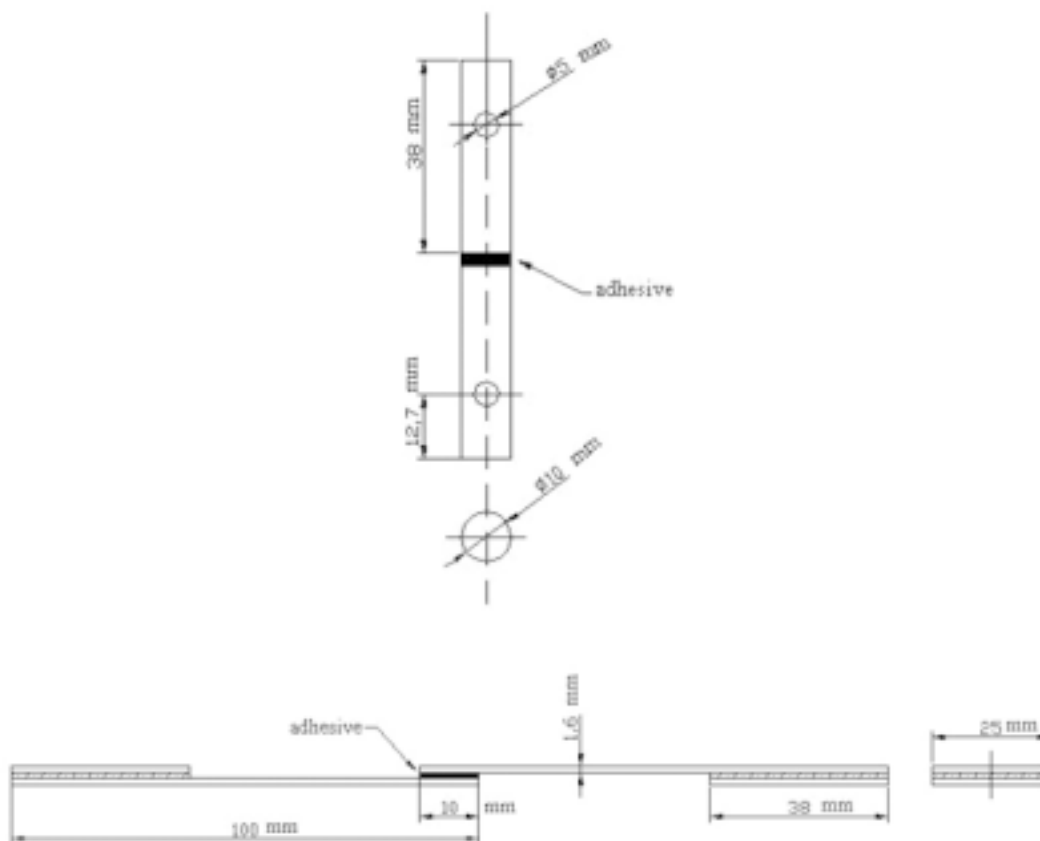


Figure 5. Butt joint and single lap joint for JIS K6849 and K6850





ชั้นกาวในแนวแรงมาวิเคราะห์ เพื่อหาค่า E และ G ของชั้นกาวบาง

## 2. การทดสอบชิ้นงาน

ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างแสดงใน Figure 8 ถึง 10 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ (Al 7075-T6) สองแผ่น มีความหนา 1.6 มม. เชื่อมต่อด้วยหมุดย้า (Al 2117-T4) 3, 4, และ 5 หมุด ซึ่งมีระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มม. ตามลำดับ โดยมีการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหมุดย้า และชนิดของกาว ตามแบบของแต่ละชิ้นงานตัวอย่าง ดังมีรายละเอียดต่างๆแสดงใน Table 3 และนำชิ้นงานตัวอย่างมาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องที่มีอุปกรณ์ทดสอบความแข็งแรงของวัสดุด้วยอัตราการดึงคงที่ 10 มม./นาที่ โดยการทดสอบจะทำการดึงชิ้นงานตัวอย่างในช่วงยืดตัวน้อยๆแบบเชิงเส้น (linear and small deformation) หลังจากนั้นทำการบันทึกขนาดของแรงดึง (0-6000 N) และค่าการยืดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง

Figure 6. Control thickness of adhesive machine

Table 2. Detail of specimens for adhesive bonds

Piece NO.	Standard	Type of Adhesive	Thickness of Adhesive
A1	JIS K6849-1994	Rubber glue	0.2 mm
A2	JIS K6849-1994	Rubber glue	0.2 mm
A3	JIS K6849-1994	Rubber glue	0.2 mm
A4	JIS K6849-1994	Rubber glue	0.2 mm
A5	JIS K6849-1994	Rubber glue	0.2 mm
B1	JIS K6850-1994	Rubber glue	0.1 mm
B2	JIS K6850-1994	Rubber glue	0.1 mm
B3	JIS K6850-1994	Rubber glue	0.1 mm
B4	JIS K6850-1994	Rubber glue	0.1 mm
B5	JIS K6850-1994	Rubber glue	0.1 mm
C1	JIS K6849-1994	Epoxy	0.2 mm
C2	JIS K6849-1994	Epoxy	0.2 mm
C3	JIS K6849-1994	Epoxy	0.2 mm
C4	JIS K6849-1994	Epoxy	0.2 mm
C5	JIS K6849-1994	Epoxy	0.2 mm
D1	JIS K6850-1994	Epoxy	0.1 mm
D2	JIS K6850-1994	Epoxy	0.1 mm
D3	JIS K6850-1994	Epoxy	0.1 mm
D4	JIS K6850-1994	Epoxy	0.1 mm
D5	JIS K6850-1994	Epoxy	0.1 mm

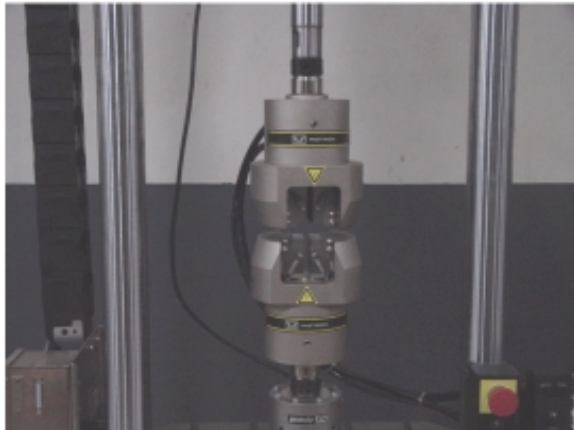


Figure 7. Dimension of specimens, riveted-pitch distance as 38.1 mm

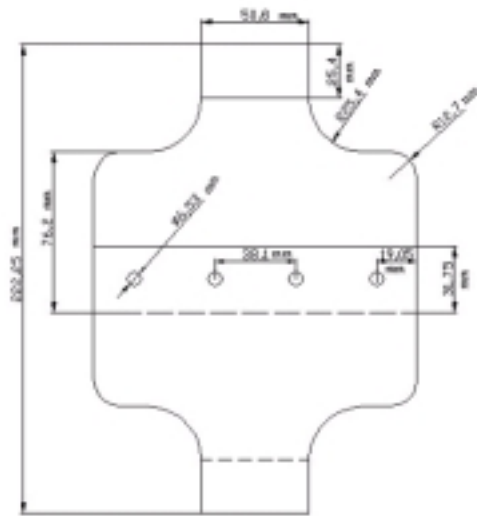


Figure 9. Dimension of specimens, riveted-pitch distance as 38.1 mm

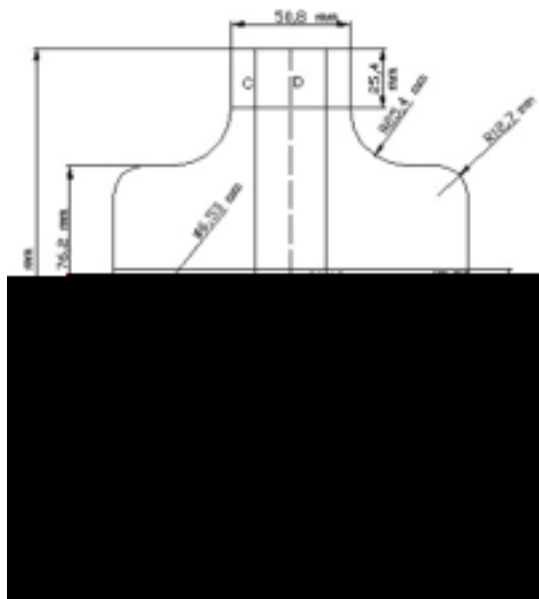


Figure 8. Dimension of specimens, riveted-pitch distance as 30.16 mm

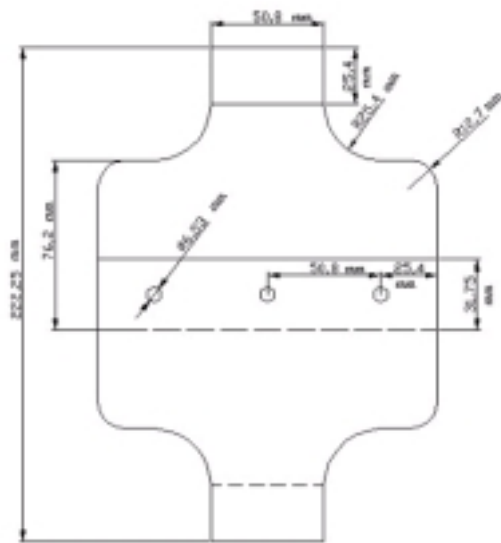


Figure 10. Dimension of specimens, riveted-pitch distance as 50.8 mm

3. การจำลองชิ้นงาน

รอยต่อหมุดยาระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มม. ซึ่งใช้เป็นชิ้นงานทดสอบ ถูกสร้างขึ้นเป็นแบบจำลองสามมิติสำหรับใช้กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจำลองเฉพาะส่วนที่สมมาตรดังแสดงใน Figure 8 เนื่องจากบริเวณตรงกลางเป็นส่วนที่ส่งถ่ายแรงได้ดี (สมมุติให้แรงที่ส่งผ่านมายังหมุดย้ากระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนรอยต่อ) จึงไม่จำเป็นต้องจำลองรอยต่อหมุดย้าทั้งหมด โดยแบบจำลองรอยต่อหมุดย้ามีลักษณะดังแสดงใน Figure 11 การเปลี่ยนระยะหมุดในแบบจำลองทำได้โดยการเปลี่ยนระยะ AB และ CD ดัง Figure 8 ตามระยะห่างระหว่างหมุด ในแบบจำลองประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ (Al 7075-T6) สองแผ่นประกบกัน และยึดติดกันด้วยหมุดย้า (Al 2117-T4) เอลิเมนต์แบบลูกบาศก์หกหน้า (27-node brick elements) ใช้สำหรับจำลองแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ และเอลิเมนต์แบบปริซึมห้าหน้า (15-node triangular prisms) ใช้สำหรับจำลองหมุดย้าเพื่อต้องการให้หมุดย้ามีความแข็งสูงกว่าแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งเหมือนกับความเป็นจริง โดยมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 228 เอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ที่อยู่บริเวณที่ต่อเกยกันมีจำนวนมาก เนื่องจากเป็นบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องของชิ้นงาน ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 0.2 (Iyer, 1997) ซึ่งมีขนาดรูปร่าง พื้นที่ผิวสัมผัสของหมุดย้าดังแสดงใน Figure 12 โมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของอลูมิเนียมอัลลอยด์และหมุดย้าเท่ากับ 70 GPa อัตราส่วนปัวซอง(Poisson's ratio,  $\nu$ ) เท่ากับ 0.25 (Dechwayukul, 2003) โดยวิเคราะห์ผลรูปทรงเรขาคณิตเปลี่ยนแปลงแบบ

Table 3. Detail of all riveted lap joints

Code of Specimen	Number of Rivet	Riveted-Pitch	Type of Adhesive	Thickness of Adhesive
TJR-50.8-01-Exp	3	50.80 mm	Rubber glue	0.11 mm
TJR-50.8-02-Exp	3	50.80 mm	Rubber glue	0.20 mm
TJR-50.8-03-Exp	3	50.80 mm	Rubber glue	0.08 mm
TJR-38.1-01-Exp	4	38.10 mm	Rubber glue	0.09 mm
TJR-38.1-02-Exp	4	38.10 mm	Rubber glue	0.20 mm
TJR-38.1-03-Exp	4	38.10 mm	Rubber glue	0.15 mm
TJR-30.16-01-Exp	5	30.16 mm	Rubber glue	0.22 mm
TJR-30.16-02-Exp	5	30.16 mm	Rubber glue	0.13 mm
TJR-30.16-03-Exp	5	30.16 mm	Rubber glue	0.07 mm
TJE-50.8-01-Exp	3	50.80 mm	Epoxy	0.04 mm
TJE-50.8-02-Exp	3	50.80 mm	Epoxy	0.08 mm
TJE-50.8-03-Exp	3	50.80 mm	Epoxy	0.03 mm
TJE-38.1-01-Exp	4	38.10 mm	Epoxy	0.02 mm
TJE-38.1-02-Exp	4	38.10 mm	Epoxy	0.07 mm
TJE-38.1-03-Exp	4	38.10 mm	Epoxy	0.13 mm
TJE-30.16-01-Exp	5	30.16 mm	Epoxy	0.05 mm
TJE-30.16-02-Exp	5	30.16 mm	Epoxy	0.12 mm
TJE-30.16-03-Exp	5	30.16 mm	Epoxy	0.02 mm
TJF-50.8-01-Exp	3	50.80 mm	Free bonding	-
TJF-50.8-02-Exp	3	50.80 mm	Free bonding	-
TJF-50.8-03-Exp	3	50.80 mm	Free bonding	-
TJF-38.1-01-Exp	4	38.10 mm	Free bonding	-
TJF-38.1-02-Exp	4	38.10 mm	Free bonding	-
TJF-38.1-03-Exp	4	38.10 mm	Free bonding	-
TJF-30.16-01-Exp	5	30.16 mm	Free bonding	-
TJF-30.16-02-Exp	5	30.16 mm	Free bonding	-
TJF-30.16-03-Exp5	30.16 mm	Free bonding	-	-

ไม่เป็นเชิงเส้น (NLGEOM) ใช้แรงดึงในช่วง 0-6000 N (แรงดึงประมาณ 3000 N มีค่าความเค้นดึงเท่ากับ 36.9 MPa) และไม่ให้มีการเคลื่อนที่ทุกทิศทางในระนาบ AB ส่วน AC และ BD ไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง 2 ดัง Figure 13 เมื่อได้แบบที่สมบูรณ์แล้วทำการคำนวณด้วยโปรแกรม ABAQUS (ABAQUS Users Manual, 2000)

โดยในส่วนของชั้นกาวบางเมื่อนำมาใช้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้โดยหลักการที่เรียกว่า TALA ในงานวิจัยครั้งนี้สมมุติให้กาวบางมีเฉพาะในบริเวณส่วนที่ต่อเกยกันระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยด์แผ่นบนกับล่าง (contact area, C1) เท่านั้นดังแสดงใน Figure 14 โดยชั้นกาวบางจะถูกเปลี่ยน

เป็นสปริงเอลิเมนต์หลาย ๆ ตัวที่สามารถจำลองพฤติกรรมเชิงกลของชั้นกาวบางในสามทิศทาง ประกอบด้วยทิศตั้งฉากกับพื้นที่ผิวและขนานกับผิวสัมผัส ซึ่งมีจำนวนของสปริงเอลิเมนต์ดังแสดงใน Table 4

Table 4. Number of spring element

Contact area	No. of linear springs	
	Normal direction	Shear direction
C1	293	586
Total for two-standard rivet	293	586

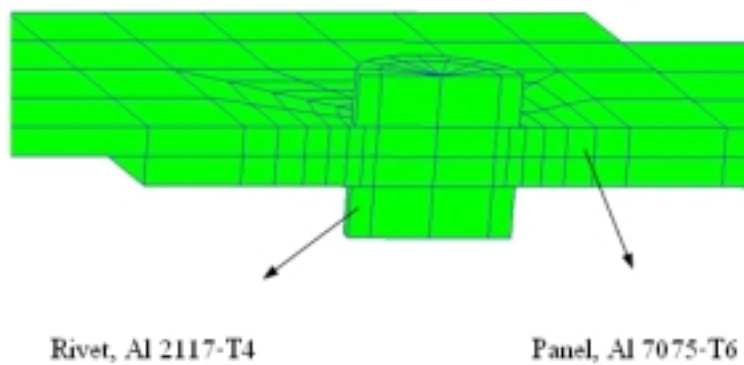


Figure 11. Schematic element of riveted lap

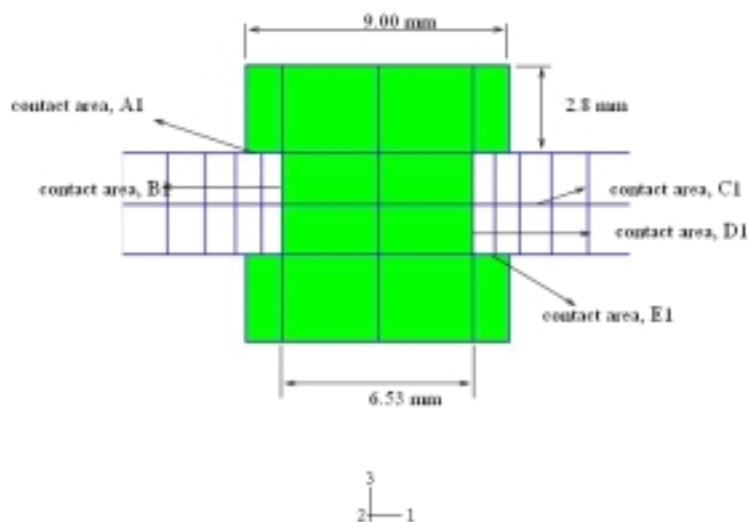


Figure 12. Dimension and contact area of rivet  
(Color figure can be viewed in the electronic version)

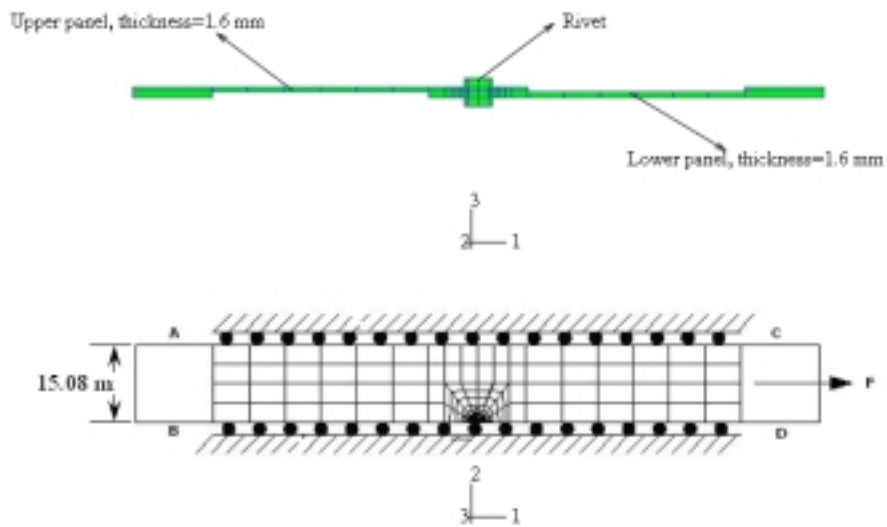


Figure 13. Modeling of riveted lap joints

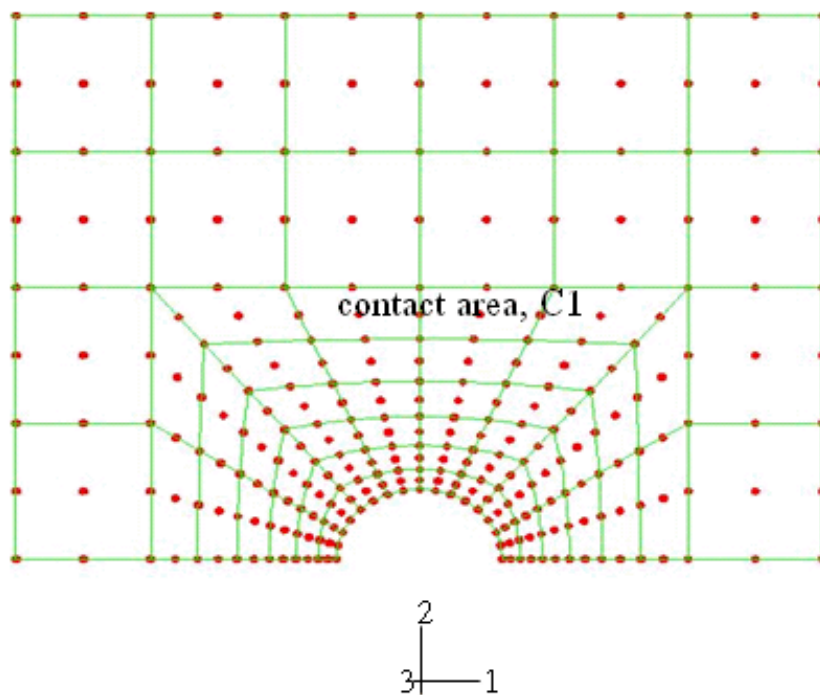


Figure 14. Contact area of adhesive layer

(Color figure can be viewed in the electronic version)

ส่วนพฤติกรรมการยึดติดของชั้นกาว เมื่อพิจารณาการยึดติดของชั้นกาวในแง่ของมอดุลัสทำได้โดยนำข้อมูลระหว่างแรงที่ใช้ตั้งกับการเปลี่ยนรูปของชั้นกาวในแนวแรงมาวิเคราะห์ โดยสามารถหาค่ามอดุลัสของกาวได้ดังแสดงใน Table 5

**Table 5. The adhesion of thin adhesive layer in terms of modulus**

Adhesive	Elastic Modulus, E (MPa)	Shear Modulus, G (MPa)
Rubber glue	1.128	0.154
ACT No. 354 H		
Epoxy adhesive	23.147	9.385
Araldite Standard		

**4. การศึกษาตัวแปร (parametric study)**

มอดุลัสของกาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อ และระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ จะถูกนำมาปรับเปลี่ยนในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการยืนยันความถูกต้องแล้ว เพื่อศึกษาผลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดย้ำ โดยแสดงแบบจำลองไฟไนต์

**Table 6. All modeling of riveted lap joints**

Adhesive	Pitch distance (mm)			
	30.16	38.10	50.80	76.20
No adhesive	○	○	○	△
rubber glue (E=1.128MPa, G=0.154 MPa)	○	○	○	△
adhesive A (E=10 MPa, G=3.84 MPa)	△	△	△	△
epoxy adhesive (E=23.147 MPa, G=9.385 MPa)	○	○	○	△
adhesive B (E=100 MPa, G=38.46 MPa)	△	△	△	△

○ Modeling in comparison with the experiment

△ Modeling to use parametric study (Do not have the experiment)

เอลิเมนต์ของชิ้นงานทั้งหมดตั้งใน Table 6

โดยที่มอดุลัสที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อของกาวยาง (rubber glue) และกาวอีพอกซี (epoxy adhesive) ได้ข้อมูลจากการทดสอบการยึดติดของชั้นกาวบางตามมาตรฐาน JIS K6849 และ K6850 ส่วนมอดุลัสที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อของกาว adhesive A, adhesive B, และค่าระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 76.20 มม. ได้จากการปรับข้อมูลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าดังกล่าวข้างต้นต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรูเจาะหมุดย้ำ

การวิเคราะห์ชั้นกาวบางหรือที่เรียกว่าวิธี TALA จะมีเฉพาะ  $\sigma_z$ ,  $\tau_{zx}$  และ  $\tau_{zy}$  เกิดขึ้นเมื่อรอยต่อส่งผ่านแรงมาถึงชั้นกาว ให้กาว adhesive A และ adhesive B วัสดุเป็นแบบไอโซโทรปิก (isotropic) ค่ามอดุลัสเหนือนหาได้จากสมการที่ (19) ดังนี้

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{19}$$

เมื่อ E คือมอดุลัสยืดหยุ่น G คือมอดุลัสเฉือน  $\nu$  คืออัตราส่วนปัวซอง

ในส่วนของแบบจำลองที่นำไปใช้ในการศึกษาตัวแปร (ไม่มีกรทดลองจริง) จะใช้ค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.33 (Dowling, 1993) ซึ่งสมมุติให้กาว adhesive A และ adhesive B เป็นกาวประเภทอีพอกซี และความหนาของชั้นกาวได้จากการเฉลี่ยชั้นกาวทั้งหมดจากชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.10 มม. ค่าเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในแบบจำลองที่นำไปใช้ในการศึกษาตัวแปร

**ผลการทดลอง**

**1. การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง**

นำความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยึดตัวของรอยต่อที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างนำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเปรียบเทียบที่แรงดึงเดียวกันดังแสดงใน Figure 15 ถึง 23

จากนั้นวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการทดลอง กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงจากเปอร์เซ็นต์ (%) ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการยึดตัวที่แรงดึงต่างๆ (วิลโพร และ มนัส, 2545) โดยมีนิยามดังสมการที่ (20)

$$\text{Average value of \% Difference} = \frac{\sum |U_{F,FEM} - \Delta U_{F,Exp}|}{\text{Total no. of calculated force}} \times 10 \quad (20)$$

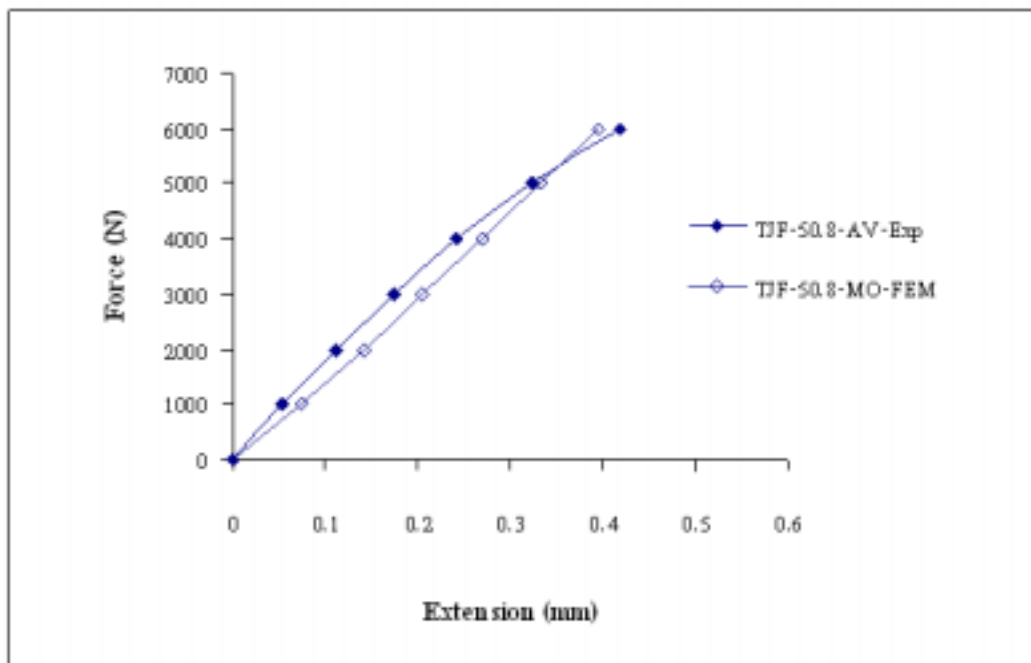
เมื่อ  $\Delta U_{F,FEM}$  คือค่าการยึดตัวที่เปลี่ยนไปเมื่อแรงดึงต่างกันที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์  $\Delta U_{F,Exp}$  คือค่าการยึดตัวที่เปลี่ยนแปลงได้จากการทดลอง

จาก Figure 15 ถึง 23 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงจากเปอร์เซ็นต์ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของ

การเคลื่อนตัวที่แรงดึงต่างๆ (0-6000 N) ดังแสดงใน Table 7

**Table 7. Average value of % difference the experiment in comparison with the modeling**

Pitch distance (mm)	Average value of % Difference		
	no-adhesive	rubber glue	epoxy adhesive
50.8	14.8 %	22.1 %	14.4 %
38.1	6.3 %	13.9 %	15.6 %
30.16	5.2 %	8.8 %	15.9 %



**Figure 15. The experiment in comparison with the modeling, riveted-pitch distance as 50.8 mm (free bonding)**

(Color figure can be viewed in the electronic version)

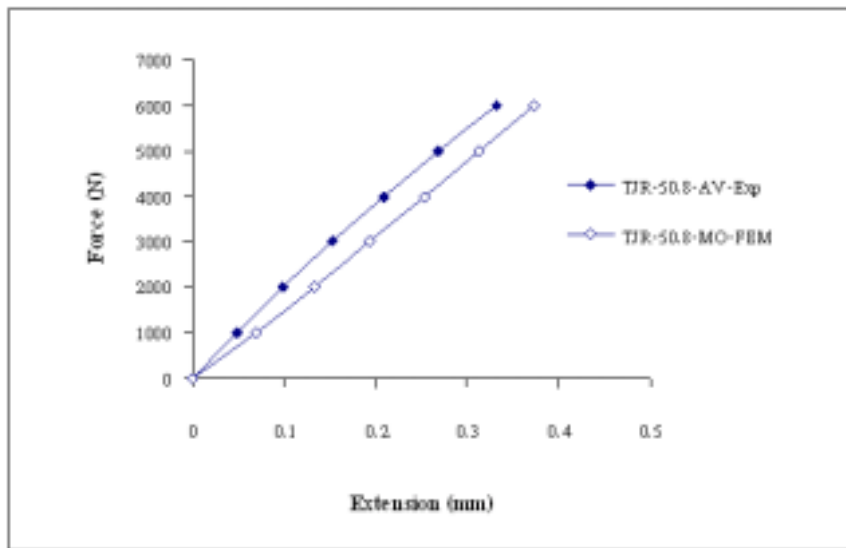


Figure 16. The experiment in comparison with the modeling, riveted-pitch distance as 50.8 mm (rubber glue)

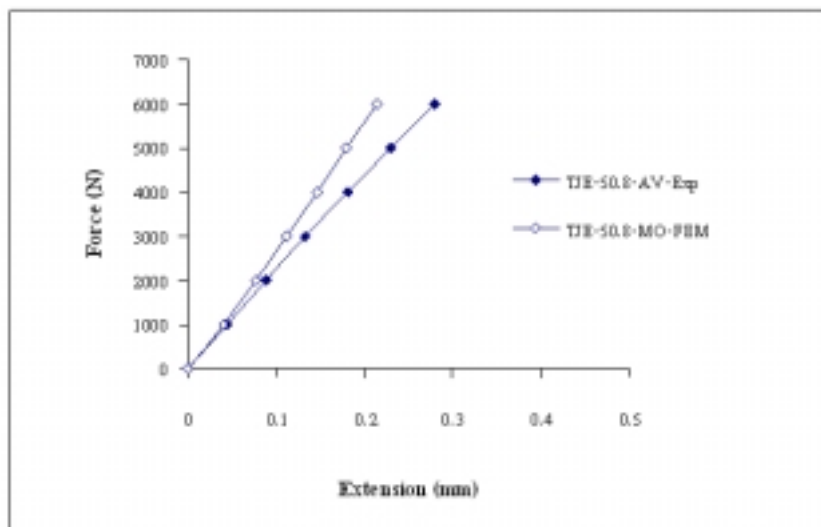


Figure 17. The experiment in comparison with the modeling, riveted-pitch distance as 50.8 mm (epoxy adhesive)

(Color figure can be viewed in the electronic version)



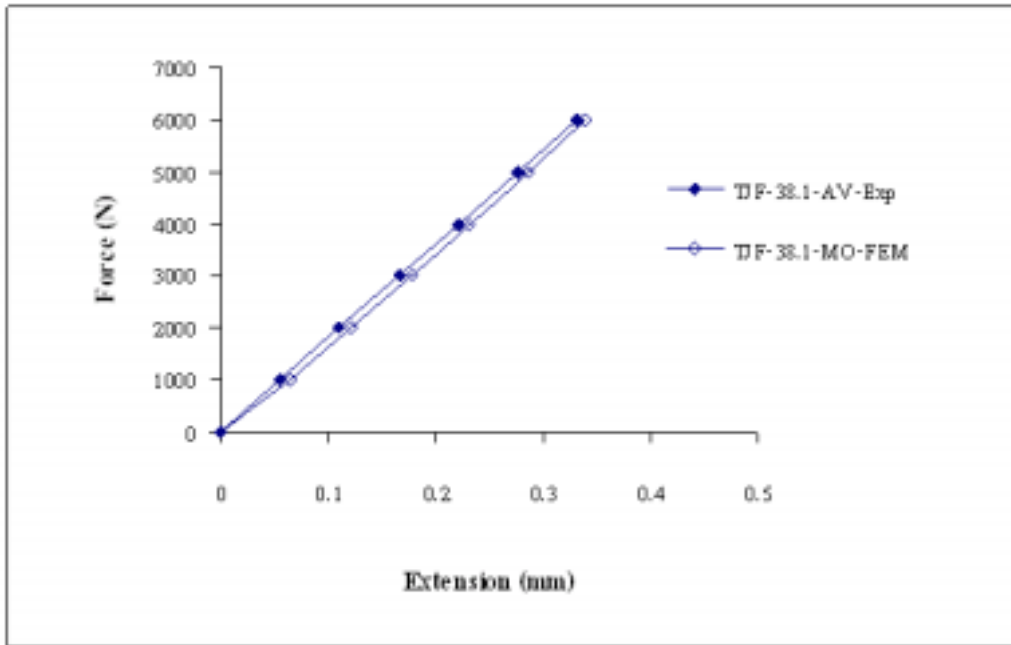


Figure 18. The experiment in comparison with the modeling, riveted-pitch distance as 38.1 mm (free bonding)

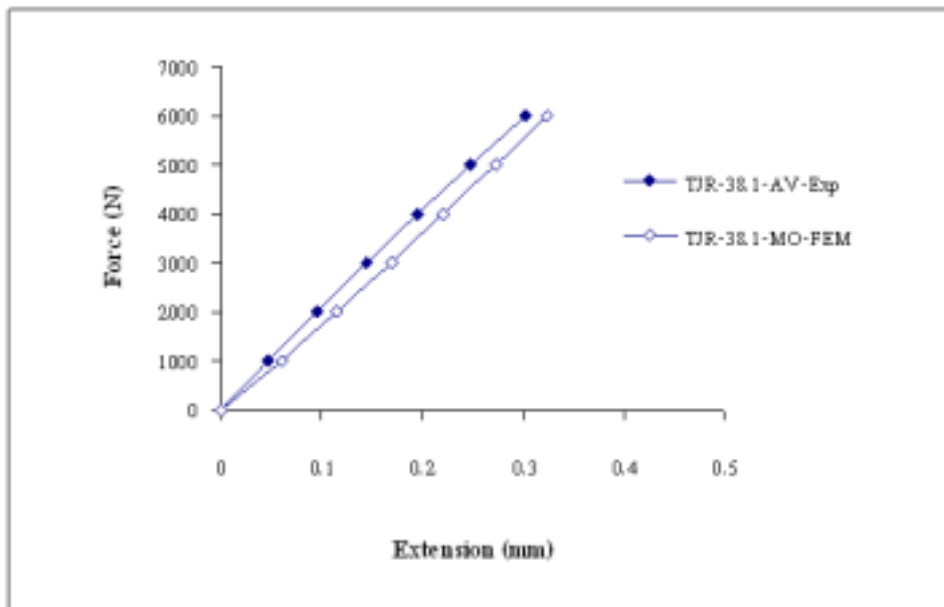


Figure 19. The experiment in comparison with the modeling, riveted-pitch distance as 38.1 mm (rubber glue)

(Color figure can be viewed in the electronic version)

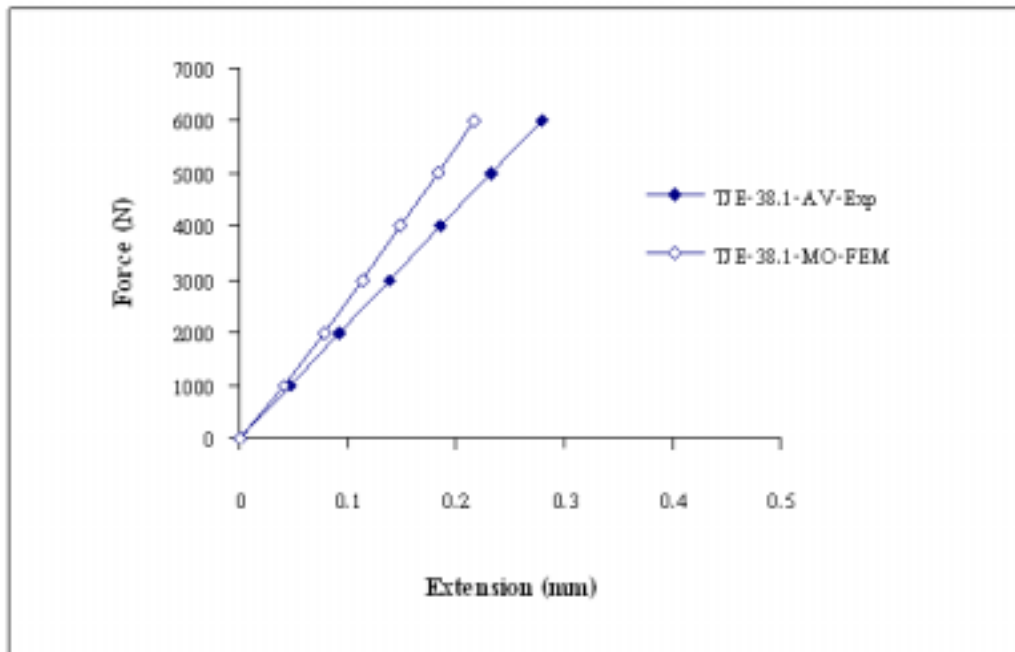


Figure 20. The experiment in comparison with the modeling, riveted-pitch distance as 38.1 mm (epoxy adhesive)

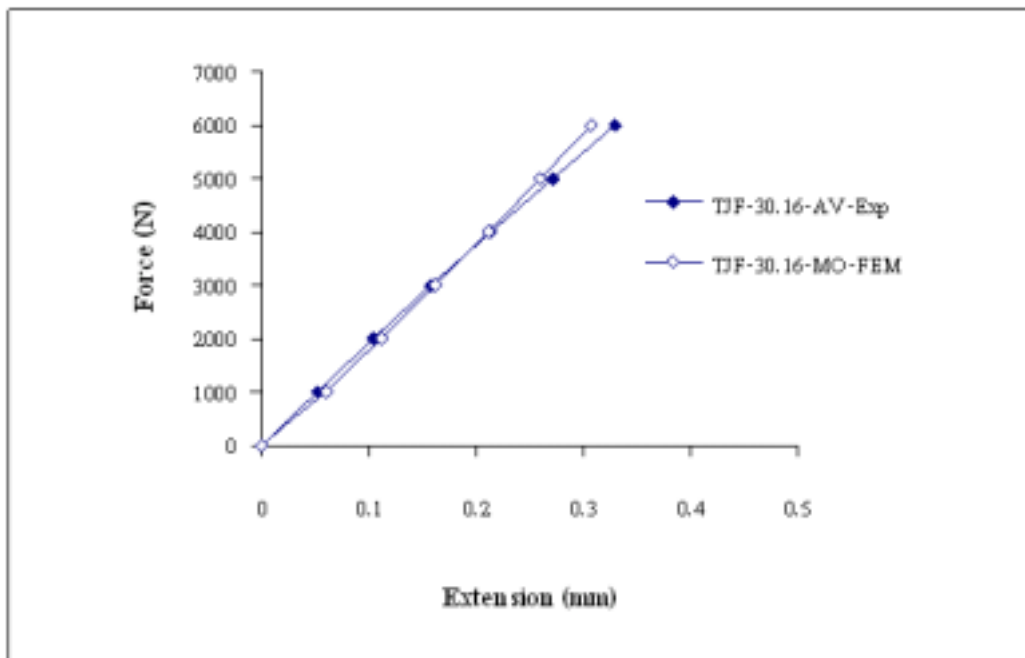


Figure 21. The experiment in comparison with the modeling, riveted-pitch distance as 30.16 mm (free bonding)

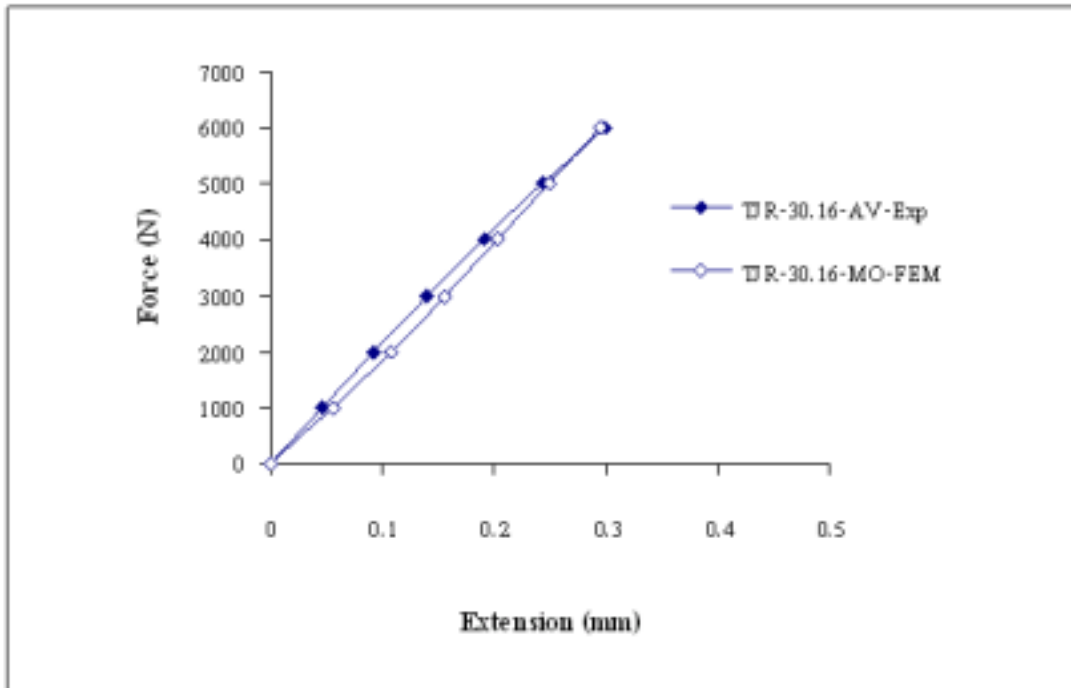


Figure 22. The experiment in comparison with the modeling, riveted-pitch distance as 30.16 mm (rubber glue)

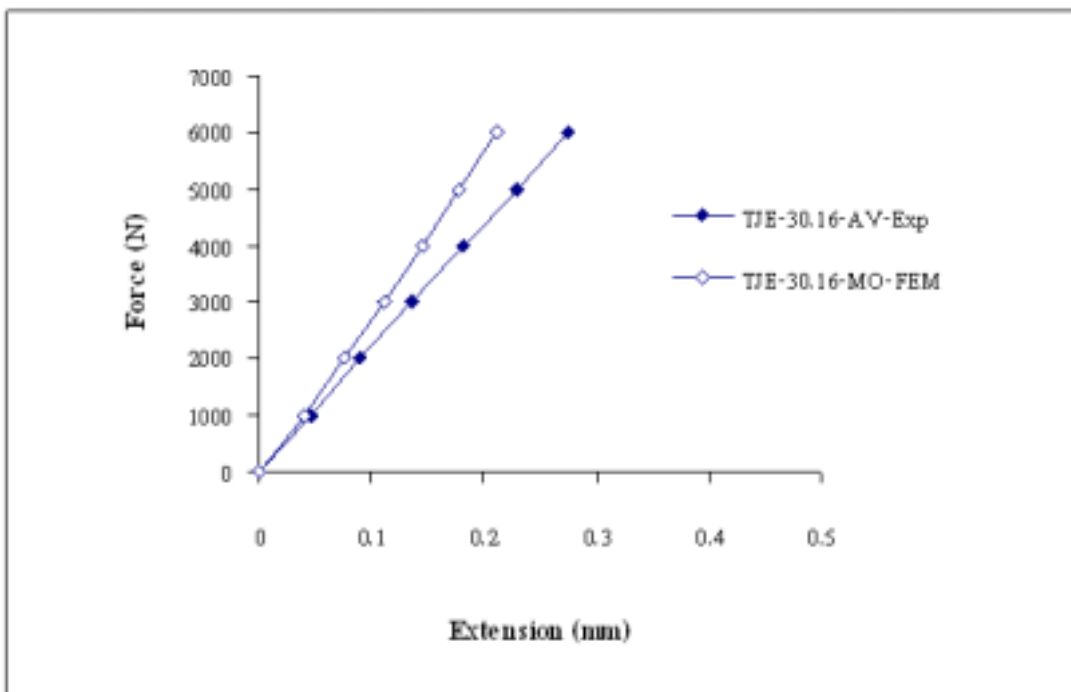


Figure 23. The experiment in comparison with the modeling, riveted-pitch distance as 30.16 mm (epoxy adhesive)

### สาเหตุของรอยละความแตกต่าง

1. รูปทรงของชิ้นงานตัวอย่างมีลักษณะไม่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยม เพราะตัวจับของเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุมีระยะความกว้างยึดจับที่ส่วนปลายของชิ้นงานตัวอย่างเพียง 2 นิ้ว จึงจำเป็นต้องมีการตัดแปลงชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปทรงดัง Figure 8 ถึง 10 ทำให้การยึดตัวที่ส่วนปลายของชิ้นงานตัวอย่างมีการยึดตัวสูง เนื่องจากตรงบริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นส่วนโค้งเว้า ถ้าส่วนปลายของชิ้นงานตัวอย่างมีระยะความกว้าง 6 นิ้ว ซึ่งทำให้ชิ้นงานตัวอย่างมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม ทำให้การส่งถ่ายแรงมายังหมุดยึดเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ อาจส่งผลให้รอยละความแตกต่างมีค่าลดลงตลอดจนไม่สามารถควบคุมความหนาของชั้นกาวบางของรอยต่อหมุดยึดได้

2. สมบัติเชิงกลของชั้นกาวบาง ถูกเปลี่ยนเป็นสปริงเอนทิเมนต์ โดยการวิจัยครั้งนี้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน JIS K6849 และ K6850 เพื่อศึกษาการยึดติดของชั้นกาวในแง่ของมอดูลัสยืดหยุ่น และมอดูลัสเฉือน โดยค่ามอดูลัสที่นำมาใช้จะเป็นค่าเชิงเส้นคงที่ แต่ในพฤติกรรมจริงของชั้นกาวบางจะแสดงพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) และพฤติกรรมของสปริงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสจะแสดงทั้งการยึดตัวและการหดตัว

## 2. ผลการศึกษาตัวแปร

### 2.1 ผลการศึกษาตัวแปรจากแบบจำลองที่ได้รับการยืนยันความถูกต้องจากการทดลองจริง

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น ซึ่งหาค่าได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 50.8 มม. กรณีไม่ทากาว ทากาวยาง และทากาวอีพอกซีมีค่า 8.30, 7.74, และ 1.68 ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 38.1 มม. กรณีไม่ทากาว ทากาวยาง และทากาวอีพอกซีมีค่า 6.48, 6.14, และ 1.99 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 30.16 มม. กรณีไม่ทากาว ทากาวยาง และทากาวอีพอกซีมีค่า 5.41, 5.17, และ 1.88 ตามลำดับ

### 2.2 ผลการศึกษาตัวแปรจากแบบจำลองที่นำไปใช้ในการศึกษาตัวแปร (ไม่มีการทดลองจริง)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น ซึ่งหาค่าได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 76.20 มม. กรณีไม่ทากาว ทากาวยาง ทากาว adhesiveA ทากาวอีพอกซี และทากาว adhesiveB มีค่า 12.16, 10.42, 3.53, 2.19 และ 1.35 ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 50.8 มม. กรณีทากาว adhesiveA และทากาว adhesiveB มีค่า 3.49 และ 1.41 ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 38.1 มม. กรณีทากาว adhesiveA และทากาว adhesiveB มีค่า 3.34 และ 1.43 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 30.16 มิลลิเมตร กรณีทากาว adhesiveA และทากาว adhesive B มีค่า 3.18 และ 1.45 ตามลำดับ

ดังแสดงตำแหน่งการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อหมุดยึดใน Figure 24 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการทากาวที่ผิวสัมผัสของรอยต่อหมุดยึด ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรูหมุดยึดลดลง ในกรณีทากาวอีพอกซี, adhesiveA, และ adhesiveB พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเกือบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงในทุกค่าของระยะห่างระหว่างหมุดยึด

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของแบบจำลองทั้งหมดเสนอในรูปของตาราง ดังแสดงใน Table 8 และกราฟแสดงค่ามอดูลัสของกาว และระยะห่างระหว่างหมุดยึด มีผลต่อการเพิ่มลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นแสดงดัง Figure 25

## สรุป

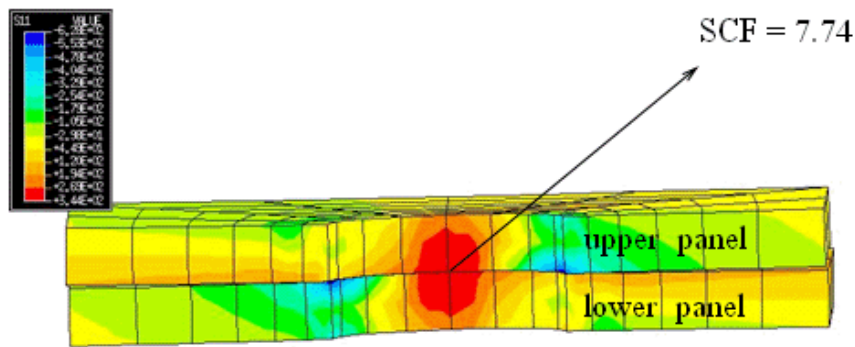
1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยึดตัวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้รับจากการทดสอบของชิ้นงานตัวอย่าง พบว่า แบบจำลองรอยต่อหมุดยึดระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มม. มีค่าเฉลี่ยของรอยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง

(0-6000 N) สูงสุดประมาณ 15 % ส่วนแบบจำลองรอยต่อหมุดยั่วร่วมกับการระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มม. (กรณีทา กาวยาง) มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) สูงสุดประมาณ 22% และแบบจำลองรอยต่อหมุดยั่วร่วมกับการระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มม. (กรณีทา กาวอีพอกซี) มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) สูงสุดประมาณ 16 % แสดงว่าแบบจำลองและการทดสอบจริงมีความใกล้เคียงกันในระดับหนึ่งในช่วงการยึดตัวในระยะน้อยๆ ซึ่งอยู่ในช่วงของการยึดตัวแบบเชิงเส้น ดังนั้นแบบจำลองจึงมีความเชื่อถือได้ระดับหนึ่งในช่วงที่มีการยึดตัวน้อยๆ เนื่องจากสาเหตุความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากรอยเว้าของชิ้นงาน และการควบคุมความหนาของชั้นกาวบาง

2. การลดระยะห่างระหว่างหมุดยั่ว ช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะ (กรณีไม่ทา กาว, Figure 25) เนื่องจากระยะห่างระหว่างหมุดมีผลต่อการส่งถ่ายแรงมายังตัวหมุดยั่วทำให้หมุดยั่วรับแรงไปบางส่วนด้วย ดังนั้นการต่อแผ่นโลหะด้วยหมุดยั่วที่มีระยะห่างระหว่างหมุดน้อยกว่าย่อมมีจำนวนหมุดยั่วมากกว่าจะสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นลดลงได้

3. การเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาว (Figure 25) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยั่วลดลง ทั้งนี้ชั้นกาวที่ยึดติดแข็งแรงขึ้นสามารถช่วยลดการตัดตัวของรอยต่อ ส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการตัดในรูเจาะลดลง

4. การทา กาวชั้นบางในรอยต่อหมุดยั่ว สามารถช่วย



(Color figure can be viewed in the electronic version)

Figure 24. Stress distribution near a hole in a riveted lap joint, riveted-pitch distance as 50.8 mm (rubber glue)

Table 8. The stress concentration factor (SCF) of the modeling

Adhesive in terms of Modulus	Pitch distance (mm)			
	76.20	50.80	38.10	30.16
	SCF	SCF	SCF	SCF
No adhesive	12.16	8.30	6.48	5.41
rubber glue (E=1.128MPa, G=0.154 MPa)	10.42	7.74	6.14	5.17
adhesive A (E=10 MPa, G=3.84 MPa)	3.53	3.49	3.34	3.18
epoxy adhesive (E=23.147 MPa, G=9.385 MPa)	2.19	1.68	1.99	1.88
adhesive B (E=100 MPa, G=38.46 MPa)	1.35	1.41	1.43	1.45

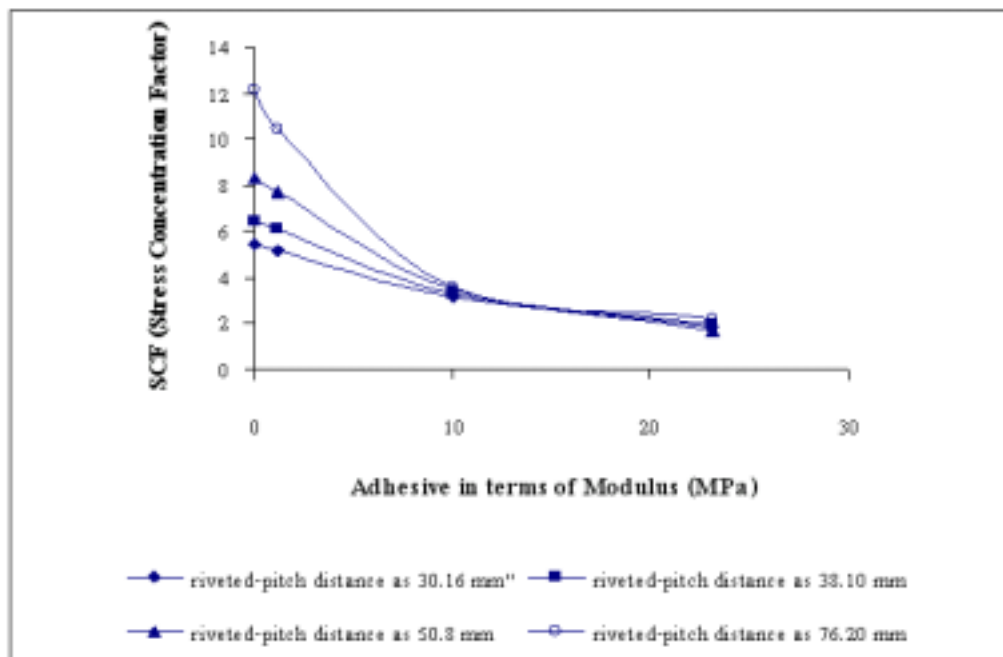


Figure 25. Modulus and riveted-pitch distance affect SCF

ลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยาลง การเพิ่มค่ามอดูลัสของกาวมากขึ้น ( 10 MPa, Figure 25) ทำให้ค่าระยะห่างระหว่างหมุดย้าไม่มีผลต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น เนื่องจากการทากาวที่มีค่ามอดูลัสสูงส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อมากกว่าระยะห่างระหว่างหมุด ในแต่ละประเภทของกาวค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นมีแนวโน้มคงที่ทุกระยะห่างระหว่างหมุด แสดงว่าการต่อแผ่นโลหะด้วยหมุดย้าร่วมกับกาวมอดูลัสสูงสามารถลดจำนวนหมุดยาลงได้ ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง

#### ข้อเสนอแนะ

การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดย้า มีข้อเสนอแนะและควรปรับปรุงดังนี้

1. ในการวิจัยครั้งนี้ไม่พิจารณาผลของความหนาของชั้นกาวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน ดัง

นั้นในการวิจัยครั้งต่อไปควรที่จะควบคุมความหนาของชั้นกาวในรอยต่อหมุดย้า

2. ควรมีการทดสอบการล้า (fatigue test) ของชิ้นงาน เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดย้า ไปทำนายอายุในการใช้งานของชิ้นงานได้ ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในการศึกษานี้ เป็นผลการคำนวณจากวิธีของไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อรอยต่อรับแรงดึงสถิตย์ (static tensile loading) เท่านั้น ในการศึกษารุ่นนี้ยังไม่ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นต่อการล้า (fatigue Stress Concentration Factor, SCF) ภายใต้แรงดึงสลับ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่ได้จากการศึกษารุ่นนี้สามารถเชื่อมโยงหรือสัมพันธ์กันได้เมื่อทราบค่า notch sensitivity (Shigley, et al., 2003)

3. ควรมีการวัดค่าระยะเปิดบริเวณส่วนที่เกยของรอยต่อ และมุมเอียงของหมุดย้า เพราะค่าเหล่านี้สามารถอธิบายค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นได้ เนื่องจากค่า

สัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในรอยต่อหมุดย้า มีสองกรณีคือ ความเค้นจากการดึงผสมกับความเค้นจากการคดของแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งกาวจะไปช่วยในการยึดติดแผ่นอลูมิเนียมทั้งสองไว้ด้วยกัน ทำให้การตัดตัวของชิ้นงานลดลง

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- วิไลพร ลักขมวิมานิชย์ และ มนต์ แซ่ด่าน. 2545. การวิเคราะห์พฤติกรรมการคดของอลาสติกแบริงด้วยเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์. รายงานวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมศาสตร์ ฉบับสมบูรณ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- ABAQUS Users Manual Version 5.8.2. 2000. Hibbit, Karlsson&Sorensen, Inc.
- Cheng, Y.F. 1978. Stress-concentration factors for a countersunk hole in a flat bar in tension and transverse bending. J. Appl. Mech., 45: 929-932.
- Chutima, S. and Blackie, A.P. 1996. Effect of pitch distance, row spacing, end distance and bolt diameter on multi-fastened composite joints. Composite Part A, 27(2): 105-110.
- Dechwayukul, C. 2003. Analysis of the effects of thin

sealant layers in aircraft structural joints. AIAA J, 41(11): 2216-2228.

- Norman, E.D. 1993. Mechanical behavior of materials : engineering methods for deformation, fracture, and fatigue, New Jersey : Prentice-Hall.
- Fongsamootr, T. 2001. 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.
- Imanaka, M. 1995. Fatigue strength of adhesive/rivet combined lap joints. J. Adhe., 49: 197-209.
- Iyer, K. 1997. Three-dimensional finite element analyses of the local mechanical behavior of riveted lap joints. Ph.D. Dissertation, Vanderbilt University, Nashville TN.
- Iyer, K., Xue, M., Bastias, P.C., Rubin, C.A. and Hahn, G.T. 1996. Analysis of fretting and fretting corrosion in airframe riveted connections, AGARD conference proceeding 589, Tribology for Aerospace Systems, North Atlantic treaty organization.
- Liu, J. and Sawa, T. 1999. 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: 51-63.
- Shigley, J.E., Mischke, C.R. and Budynas, R.G. 2003. Mechanical engineering design, seventh edition. New York: McGraw-Hill.