

การวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อแบบกาวสำหรับวัสดุที่ไม่เหมือนกัน ภายใต้ภาวะรับแรงดึง

Analysis of Mechanical Behavior of Dissimilar Adherends Adhesive Joints Under Tension Loading

สุธรรม อรุณ¹ และ ธงชัย ฟองสมุทร²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

E-mail : Sutham_eng@hotmail.com¹, Thongchai@dome.eng.cmu.ac.th²

บทคัดย่อ

ปัจจุบันงานเกี่ยวกับรอยต่อแบบกาว (Adhesive joint) นั้นถูกใช้กันอย่างมากมายในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องจักร อุตสาหกรรมยานยนต์ งานโครงสร้างของยานอวกาศ และอุตสาหกรรมเกี่ยวกับไม้และพลาสติก ซึ่งข้อดีของรอยต่อแบบกาวคือ วัสดุสามารถรักษาค่าความแข็งแรงและค่าความแข็ง (stiffness) ไว้ได้ ไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับสนิมที่บริเวณรอยต่อเหมือนรอยต่อแบบอื่น ๆ และยังสามารยึดติดชิ้นงานที่ทำมาจากวัสดุที่ไม่เหมือนกัน (dissimilar adherend) ได้ง่าย อีกทั้งยังทำให้น้ำหนักของโครงสร้างที่ใช้รอยต่อแบบนี้จะมีน้ำหนักเบากว่าวิธีอื่น ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อชนิดลิ้นแบบใช้กาวอย่างง่าย (single adhesive joint) ในขณะที่รับแรงดึงตามแนวรอยต่อ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองสภาวะการรับแรงของรอยต่อร่วมกับวิธี TALA (Thin Adhesive Layer Analysis method) และนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากการคำนวณทางตัวเลขจากสมการของ Wu ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกัน

Abstract

Now, adhesive bonding techniques have been widely used to assemble the machine part in fields of, automobile, flight and space vehicle structure and wood – plastic works. The advantages of adhesive joint are: keep the strength and stiffness of material, eliminate rust problem, easy to use in dissimilar adherend joints and also reduces structure weight. The objective of this study is to analysis the behavior of single adhesive joint under tension loading by using finite element method with TALA method. The FEA-TALA results will be compared with Wu's solution. From the compared results, they are showed the agreement of both results.

1. บทนำ

เทคนิคการเชื่อมต่อกาวถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานโครงสร้างและในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคนี้มาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมมากขึ้น โดยเฉพาะงานเกี่ยวกับรอยต่อแบบใช้กาวนั้นถูกใช้กันอย่างมากมายในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักร อุตสาหกรรมยานยนต์ งานโครงสร้างของยานอวกาศ และในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับไม้และพลาสติก ซึ่งข้อดีของรอยต่อแบบใช้กาว คือ วัสดุสามารถรักษาค่าความแข็งแรงและค่าความแข็งไว้ได้รวมทั้งไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับสนิมที่บริเวณรอยต่อเหมือนรอยต่อแบบอื่น น้ำหนักของโครงสร้างที่ใช้รอยต่อแบบนี้จะมีน้ำหนักเบากว่าวิธีอื่นและสามารยึดติดชิ้นงานที่ทำมาจากวัสดุที่ไม่เหมือนกันได้ง่าย

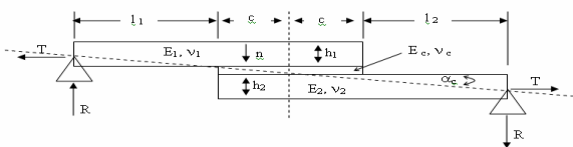
ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อแบบใช้กาวนั้นมีจำนวนมากตัวอย่าง เช่น ทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายสภาวะของความเค้นในกาวของรอยต่อชนิดลิ้นแบบใช้กาวอย่างง่ายของ Goland และ Reissner โดยชิ้นงาน (adherend) ที่ใช้ในการสร้างรอยต่อจะมีลักษณะเป็นแผ่นแบน (plate) ที่ทำจากวัสดุเดียวกันและมีขนาดเท่ากัน (similar adherend) ซึ่งต่อมา Z. J. Wu, A. Romeijn และ J. Wardenier ได้ทำการแก้ไขทฤษฎีของ Goland และ Reissner ให้มีความถูกต้องมากขึ้นรวมทั้งพัฒนาให้สามารถใช้กับรอยต่อแบบใช้กาวที่สร้างจากชิ้นงานที่ไม่เหมือนกันได้

ที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดความพยายามที่จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อแบบใช้กาวที่ทำขึ้นระหว่างชิ้นงานที่ทำจากวัสดุที่ไม่เหมือนกัน โดยปัจจุบันการคำนวณพฤติกรรมของวัสดุด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รุดหน้าไปอย่างมากซึ่งมีความสามารถช่วยในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อแบบใช้กาวของชิ้นงานที่มีเนื้อวัสดุแตกต่างกันโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับวิธี TALA (Thin Adhesive

Layer Analysis method) ในการจำลองสภาวะการรับแรงของรอยต่อ โดยที่จะทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS และนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับคำตอบแม่นยำ (exact solution) ที่ได้จากการคำนวณทางตัวเลข และยังนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงอีกครั้ง สุดท้ายให้สามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ประโยชน์ในงานออกแบบทางด้านวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาและออกแบบรอยต่อไปในอนาคต

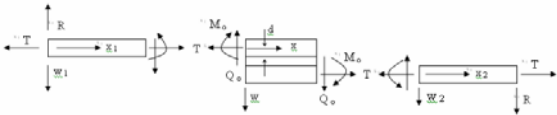
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในรอยต่อชนิดแล็พแบบใช้กาวอย่างง่ายของ Z.J.Wu และคณะ

พิจารณารอยต่อแบบใช้กาวที่สร้างขึ้นจากชิ้นงานที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกันและมีขนาดแตกต่างกันดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. แสดงตัวแปรทางด้านวัสดุและกายภาพของรอยต่อ

ทำการวิเคราะห์การเสียรูปของรอยต่อโดยใช้แกนอ้างอิง 3 แกนคือ (x_1, w_1) , (x_2, w_2) และ (x, w) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2. free – body diagrams ภายใต้การรับแรง

และใช้ทฤษฎีของ small bending of thin cylindrical bent plate จะได้สมการของการเสียรูปในแนวตั้งของรอยต่อในรูปที่ 1 คือ

$$w_1 = A_1 \cosh(\mu_1 x_1) + B_1 \sinh(\mu_1 x_1) + \alpha_c x_1$$

$$w = A \cosh(\mu x) + B \sinh(\mu x) + \alpha_c (l_1 + x) - \frac{h_1}{2} + d$$

$$w_2 = A_2 \cosh(\mu_2 x_2) + B_2 \sinh(\mu_2 x_2) + \alpha_c (l_1 + 2c + x_2) - \frac{h_1 + h_2}{2}$$

โดยที่
$$\mu_1 = \sqrt{\frac{T}{D_1}}, \mu_2 = \sqrt{\frac{T}{D_2}}, \mu_3 = \sqrt{\frac{T}{D_3}}$$

$$D_1 = \frac{E_1 h_1^3}{12(1-\nu_1^2)}, D_2 = \frac{E_2 h_2^3}{12(1-\nu_2^2)}$$

$$D = \frac{E_1}{3(1-\nu_1^2)} [(h_1 - d)^3 + d^3] + \frac{E_2}{3(1-\nu_2^2)} [(h_2 + d)^3 - d^3]$$

3. Thin Adhesive Layer Analysis method (TALA)

วิธี TALA (Thin Adhesive Layer Analysis method) เป็นวิธีที่ใช้จำลองเอลิเมนต์ของชั้นกาวในแบบจำลอง เนื่องจากชั้นกาวจริงที่มีความหนาอย่างมากเมื่อเทียบกับแผ่นลุ่มิเนียม การจำลองชั้นกาวจริงลงในแบบจำลองจะทำให้แบบจำลองมีขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์ใช้เวลามาก ดังนั้นจึงมีการใช้สปริงอีลิเมนต์แทนในการจำลองชั้นของกาวรูปที่ 3 แสดงถึงแนวความคิดของวิธี TALA โดยที่กำหนดให้โหนด 2 โหนดที่อยู่จุดเดียวกันจะสัมผัสกันด้วยสปริงเอลิเมนต์ 3 ตัว คือ มีสปริง 1 ตัวที่รับแรงดึงและแรงกด (tension-compression spring) กับสปริง 2 ตัวที่รับแรงเฉือน (shear spring) และเนื่องจากชั้นกาวบางมากจึงทำให้เหลือแค่ทอม σ_z, τ_{zx} และ τ_{zy} ที่ใช้ในการคำนวณ โดยที่ σ_z คือ ความเค้นตั้งฉากในแนวขวางและ τ_{zx} และ τ_{zy} คือความเค้นเฉือนในระนาบ โดยที่ σ_z, τ_{zx} และ τ_{zy} จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแรงและค่าความเครียด $\epsilon_x, \gamma_{zy}, \gamma_{zx}$ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นระยะยืด หดของสปริงแต่ละตัว ในการเปลี่ยนค่าความเค้นและความเครียดเป็นแรงและระยะยืด หดจะเป็นไปตามสมการดังนี้

สำหรับทิศทางตั้งฉาก

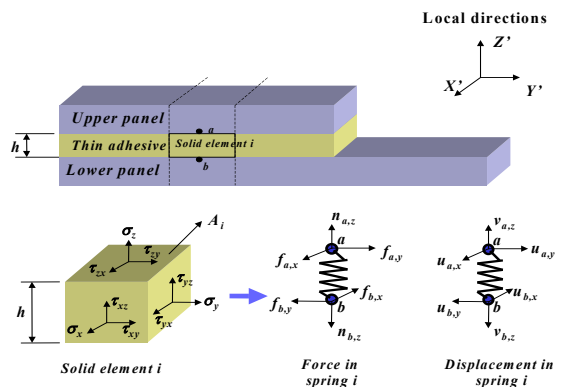
$$F_{n,i} = K_{n,i} \times v_{n,i}$$

$$K_{n,i} = E \frac{A_i}{h}$$

สำหรับทิศทางเฉือน

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

$$K_{f,i} = G \frac{A_i}{h}$$



รูปที่ 3. การใช้สปริงเอลิเมนต์แทนชั้นกาว

โดยที่ $F_{n,i}$ เป็นแรงในแนวตั้งฉากของสปริง
 $V_{n,i}$ เป็นระยะยืด-หดในทิศทางตั้งฉาก
 $K_{n,i}$ เป็นค่าความแข็งของสปริง i ในทิศทางตั้งฉาก
 E เป็นค่า Young's Modulus ของกาว
 $F_{f,i}$ เป็นแรงในแนวตั้งฉากของสปริง i ,
 $u_{f,i}$ เป็นระยะยืด-หดในทิศทางตั้งฉาก
 $K_{f,i}$ เป็นค่าความแข็งของสปริง i ในทิศทางตั้งฉาก
 G เป็นค่าโมดูลัสของสภาพแข็งเกร็ง (modulus of rigidity) ของกาว

$$w_1 = 0.0120482 x_1 - 6.6940480 \times 10^{-6} \sinh(82.3974109 x_1)$$

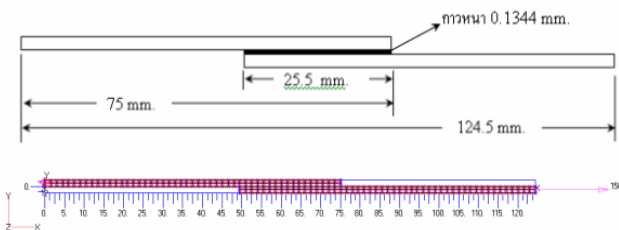
$$w = -0.00002 + 0.01205(0.0495 + x) - 0.00017 \cosh(75.07752 x) - 0.00022 \sinh(75.07752 x)$$

$$w_2 = -0.0015 + 0.01205(0.075 + x_2) + 0.00015 \cosh(652.17585 x_2) - 0.00015 \sinh(652.17585 x_2)$$

จากนั้นนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 5

4. แบบจำลองสำหรับไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองของรอยต่อชนิดแล็พแบบใช้กาวอย่างง่ายในระบบ 2 มิติ ถูกจำลองขึ้นโดยที่แบบจำลองประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมอยู่ด้านบน (Al-2117-T4) และพีวีซี (PVC molding compound 20% glass fiber reinforced) อยู่ด้านล่าง มาประกบกันโดยมีกาวอีพ็อกซียึดติดรูปที่ 4 ซึ่งแผ่นอะลูมิเนียมและแผ่นพีวีซีที่ใช้จะมีขนาดเท่ากันคือ ยาว 75 มิลลิเมตรหนา 1.5 มิลลิเมตร โดยที่ช่วงรอยต่อที่แผ่นอะลูมิเนียมและพีวีซีวางทับกันมีความยาวเท่ากับ 25.5 มิลลิเมตร และมีแรงกระทำที่ปลายด้านที่ไม่ใช่รอยต่อของพีวีซีมีค่าเท่ากับ 150 นิวตัน ขณะที่ปลายด้านที่ไม่ใช่รอยต่อของอะลูมิเนียมถูกบังคับไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวแกนที่ 1 และ 2 โดยที่คุณสมบัติของอะลูมิเนียม พีวีซีและกาวถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 1. สำหรับบริเวณชั้นกาวจะถูกจำลองด้วยวิธี TALA ในบริเวณที่มีการสัมผัสทั้งหมดระหว่างอะลูมิเนียมและพีวีซีโดยความหนาของชั้นกาวจะมีค่าเท่ากับ 0.1344 มิลลิเมตร (วัดด้วยไมโครมิเตอร์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของรอยต่อและนำมาหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต, \bar{x})

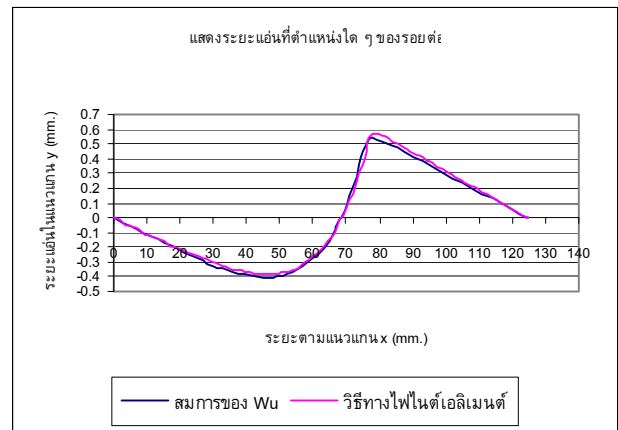


รูปที่ 4. แบบจำลองของรอยต่อชนิดแล็พแบบใช้กาวอย่างง่าย

ตารางที่ 1. คุณสมบัติของแผ่นอะลูมิเนียม พีวีซีและกาวอีพ็อกซี

วัสดุ	E (GPa)	G (GPa)
Al-2117-T4	70	
PVC	1	
epoxy	5×10^{-5}	4.7×10^{-5}

จากการวิเคราะห์โดยการแทนค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานและกาวลงในสมการของ Z.J.Wu สมการระยะแ่งนที่ได้อคือ

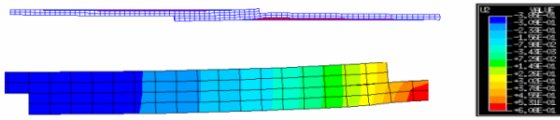


รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างสมการของ Wu และวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

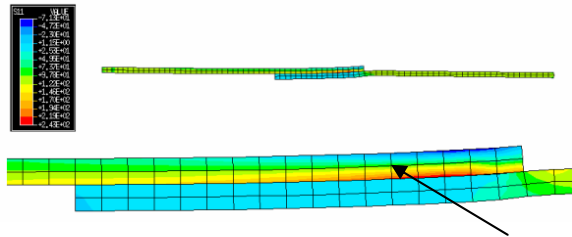
5. สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับคำตอบที่ได้จากสมการของ Wu แต่ผลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนกันไปบ้างทั้งนี้อาจเกิดจากผลการตัดทอนที่มีความสำคัญน้อยบางเทอมของสมการ Wu เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นตั้งนั้นเพื่อความเชื่อมั่นว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์มีความถูกต้องจึงควรตรวจสอบกับค่าที่ได้การทดลองจริงอีกครั้งหนึ่ง

จากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสรุปได้ว่าระยะแ่งนสูงสุดเกิดที่ตำแหน่ง $x = 87$ mm. โดยระยะแ่งนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.608 mm. ดังแสดงในรูปที่ 6 และค่ากระจายของความเค้นแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นค่าความเค้นในแนวแกน x โดยที่มีค่าความเค้นสูงสุดในแนวแกน x อยู่ในบริเวณที่เป็นรอยต่อ คือ ที่ตำแหน่ง $x = 70.5$ mm. มีค่าเท่ากับ 242.8 MPa.



รูปที่ 6. แสดงระยะแฉ่งที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของรอยต่อด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์



242.8 MPa

รูปที่ 7. แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของรอยต่อด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ดังนั้นผลการวิเคราะห์จากสมการของ Wu และจากวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสรุปได้ว่าเมื่อรอยต่อชนิดแล็พอย่างง่ายแบบใช้กาวที่ทำจากวัสดุที่แตกต่างกันรับแรงดึงนั้นระยะแฉ่งมากที่สุดจะเกิดที่บริเวณชิ้นงานที่เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า (ในกรณีนี้คือ พีวีซี) และค่าความเค้นสูงสุดจะเกิดในรอยต่อโดยจะค่อนข้างไปทางชิ้นงานที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า

6. เอกสารอ้างอิง

1. David, E. and Lazar, A. (2003). Adhesive bonding between aluminium and polytetrafluoroethylene. *Journal of Materials Processing Technology*. 143-144, 191-194.
2. Goland, M.,Buffalo, N. Y. and Reissner, E. (1994). The Stresses in Cemented Joints. *Journal of Applied Mechanics*. 11, A17 – A27.
3. Lui, J. and Sawa, T. (1999). Stress analysis and strength evaluation of single-lap band adhesive joints of dissimilar adherends subjected to external bending moments. *J. Adhesion Sci. Technol.* 13, 67-92.
4. Liu, J., Sawa, T. and Toratani, H. (1998). A Two-dimensional Stress Analysis and Strength of Single-lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherends Subjected to External Bending Moments. *J. Adhesion*. 69, 263-291.
5. Robert D. Adams and William C. Wake. (1984). *Structural Adhesive Joint in Engineering*, Elsevier Applied Science Publishers Ltd , New Yoke

6. Sawa, T., Liu, J., Nakano, K. and Tanaka, J. (1999). A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads. *J. Adhesion Sci. Technol.* 14, 44-66.
7. Sawa, T., Temma, K., Nishigaya, T. and Ishikawa, H. (1994). A two-dimensional stress analysis of adhesive butt joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads. *J. Adhesion Sci. Technol.* 9, 215-236.
8. Takiguchi, M. and Yoshida, F. (2001). Plastic bending of adhesive-bonded sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 113, 743-748.
9. Wu, Z. J., Romeijn, A. and Wardenier, J. (1997). Stress expressions of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends. *Composite Structures* 38, 273-280