

ผลกระทบของความหนาของวัสดุประสาน
ต่อความเค้นซิงกูลาริตีแบบอีลาสโต-พลาสติก รอบจุดซิงกูลาในรอยต่อของวัสดุต่างชนิด
The effect of Interlayer Thickness on the Elasto-Plastic
Stress Singularity around the Singular Point in Dissimilar Material Joints

ณิชากรีย์ สอนอู่ไร และ อรรถพร วิเศษสินธุ์*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
*ติดต่อ: fengapw@ku.ac.th, 02-797-0999 ต่อ 1861

บทคัดย่อ

วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเปราะและวัสดุเหนียวเชื่อมติดกันโดยใช้วัสดุอ่อนเป็นตัวประสาน เมื่อถูกกระทำด้วยแรงภายนอกที่รอยต่อของวัสดุ จะมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นและมากที่สุดบริเวณมุมของรอยต่อ ทำให้เกิดความเสียหายบริเวณนี้ เนื่องจากการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยการศึกษาที่ใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ค่าความเค้นซิงกูลาริตีแบบอีลาสโต-พลาสติก รอบจุดซิงกูลาบริเวณรอยต่อของวัสดุ โดยใช้แบบจำลองที่มีวัสดุอ่อนเป็นตัวประสาน ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นอีลาสโต-พลาสติกและนำไปทดสอบรับแรงดัด 4 จุด (Four Point Bending) จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นซิงกูลาริตีที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อกับความหนาของตัวประสาน แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์แนวโน้มและผลกระทบการเกิดความเสียหายในชิ้นงาน โดยเป็นผลจากค่าความเค้นซิงกูลาริตีแบบอีลาสโต-พลาสติก เมื่อความหนาของตัวประสานแตกต่างกัน พบว่าการเพิ่มความหนาของตัวประสานจะเกิดบริเวณการเสียรูปแบบพลาสติกที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้สามารถลดความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุเปราะแบบอีลาสติกได้มากขึ้นอีกด้วย

คำหลัก: ความเค้นซิงกูลาริตีแบบอีลาสโต-พลาสติก; วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์; รอยต่อของวัสดุต่างชนิด

Abstract

Two thick pieces of brittle and ductile materials were joined by a thin piece of a soft material at the interlayer. When the dissimilar material joint was performed by any external loading, excessive stresses existed on the interface edges caused by mismatch properties of materials. In the present study, a dissimilar material joint model is simulated by finite element method (FEM) by using a model with soft material binder. This binder have an elasto-plastic properties and is applied to an interlayer material. The FEM model is subjected by four-point bending load to create stress singularities around a singular point. The relationship between stress singularities around a singular point and the thickness of the interlayer material is determined. The effect of an interlayer thickness has achieved. Increasing the interlayer thickness creates a larger plastic area which leads to decrease the stress of brittle elastic materials.

Keywords: The Elasto-Plastic Stress Singularity; Finite Elements Method; Dissimilar Material Joint

1. บทนำ

วัสดุต่างชนิดเมื่อเชื่อมติดกัน ความเค้นจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเข้าใกล้บริเวณรอยต่อ เนื่องจากความแตกต่างทางคุณสมบัติของวัสดุสองชนิด ทำให้บริเวณขอบของรอยต่อ เกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าบริเวณอื่นจากการศึกษาวิจัยที่มีในปัจจุบัน มีการวิเคราะห์ค่าความเค้นซิงกูลาริตีช่วงอีลาสโต-พลาสติก ซึ่งนิยมใช้เป็นตัวประสานระหว่างวัสดุต่างชนิด เช่น การเชื่อมของแผงวงจรรวมและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

จากงานวิจัยของ Siagsanan Waratchaya and Wisessint Attaporn [1] ได้ศึกษาว่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุอ่อนที่เสีรูปลงในช่วงพลาสติก มีผลต่อความเค้นที่อยู่บริเวณรอยต่อ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain hardening exponent, n) โดยเปลี่ยนไปแบบเส้นตรง (Linear Elastic, $n = 1$) จนถึงพลาสติกสมบูรณ์ (Perfect Plastic, $n = 0$) การวิเคราะห์ค่าความเค้นซิงกูลาริตีใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวัสดุอ่อนทองแดง มีคุณสมบัติเป็นวัสดุอีลาสโต-พลาสติกเป็นตัวประสานให้เซรามิกติดกัน ซึ่งเซรามิกมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแข็งที่ยากต่อการเสีรูปล พบว่าวัสดุอ่อนที่มีคุณสมบัติเชิงกลแบบพลาสติก ส่งผลให้ค่าความเค้นของวัสดุแข็งบริเวณรอยต่อลดลง เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นของวัสดุแข็งไม่เป็นไปตามคุณสมบัติแบบอีลาสติกเป็นผลมาจากได้รับอิทธิพลของวัสดุอ่อน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Jirapat Malai and Attaporn Wisessint [2] ที่ได้หาค่าความเค้นซิงกูลาริตีรอบจุดซิงกูลา บริเวณรอยต่อของวัสดุแข็งที่เป็นวัสดุอีลาสติก และวัสดุอ่อนที่เป็นวัสดุอีลาสโต-พลาสติก ซึ่งได้รับแรงดึงบริเวณด้านบนของชิ้นงาน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าความเค้นซิงกูลาริตีรอบจุดซิงกูลามีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็งเพิ่มขึ้น และค่าอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง (Young's Modulus) มากขึ้นเช่นกัน และจากการทดลองของ Lition Kumar S., ARAI Y. และ TSUCHIDA E. [3] ผลของความเค้นซิง

กูลาริตีจะมีค่าเปลี่ยนไปตามแรงที่มากกระทำกับวัสดุ โดยนำเซรามิกและสแตนเลสมาเชื่อมติดกันด้วยทองแดง ซึ่งทองแดงมีคุณสมบัติเป็นอีลาสโต-พลาสติก ($n = 2.4$) โดยใช้สเตรนเกจวัดระยะยึดตัวที่เปลี่ยนไป บริเวณรอยเชื่อมของชิ้นงาน และวิเคราะห์ค่าความเค้นซิงกูลาริตี โดยวิธี Moiré Interferometry Technique เมื่อเพิ่มแรงกระทำจนทองแดงเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก พบว่าค่าความแข็งเครียดของวัสดุอ่อนของการทดลอง ใกล้เคียงกับการใช้ Ramberg-Osgood law ของงานวิจัย Le Van Lich และ Do Van Thuong [4] ที่ใช้ค่าความแข็งเครียด Power-law hardening index, n ($2 < n < 10$) โดยงานวิจัยนี้สร้างโมเดลที่มีมุมของรอยเชื่อมแตกต่างกันเพื่อวิเคราะห์ความเค้นและความเสียหายที่จะเกิด เมื่อมีมุมเชื่อมที่แตกต่างกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงศึกษาผลกระทบค่าความเค้นซิงกูลาริตีบริเวณรอยต่อ ที่ถูกกระทำด้วยแรงดัด 4 จุด (Four Point Bending) โดยมีวัสดุอ่อนทองแดงเป็นตัวประสานระหว่างวัสดุเปราะและเหนียว ซึ่งทองแดงมีคุณสมบัติแบบอีลาสโต-พลาสติก ($n = 2.4$) ส่งผลให้ค่าความเค้นซิงกูลาริตีบริเวณรอยเชื่อมลดลง เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติพลาสติกของทองแดง ที่ขนาดความหนาต่างๆ

2. วัตถุประสงค์และขอบเขต

ความเค้นซิงกูลาริตีจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเข้าใกล้บริเวณรอยต่อของวัสดุต่างชนิด โดยวัสดุอ่อนเป็นตัวประสานระหว่างวัสดุเปราะและเหนียว ซึ่งมีคุณสมบัติแบบอีลาสโต-พลาสติกที่ยากต่อการเสีรูปล ทำให้ค่าความเค้นบริเวณรอยต่อของวัสดุลดลง เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นของวัสดุเปราะ ไม่เป็นไปตามสมบัติเชิงกลแบบอีลาสติก ดังนั้นความหนาของตัวประสาน จึงมีผลต่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่รอยต่อของวัสดุ

ในการวิเคราะห์ค่าความเค้นซิงกูลาริตีที่ถูกกระทำด้วยแรงดัด 4 จุด โดยใช้โปรแกรม MSC.Marc/

Mentat 2018 ในการวิเคราะห์ จากแบบจำลองลักษณะโครงสร้างแบบแซนด์วิช ที่มีวัสดุอ่อนคือทองแดง (Copper) มีคุณสมบัติเป็นอิลาสโต-พลาสติกเป็นตัวประสานอยู่ตรงกลาง (Interlayer) ทำหน้าที่ยึดติดวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังตารางที่ 1 พฤติกรรมวัสดุเปราะของเซรามิกนั้นเสียรูปได้เล็กน้อยก่อนที่จะเริ่มแตกหัก ส่วนวัสดุเหนียวของสแตนเลสมีคุณสมบัติในการรับแรงได้ดี ซึ่งสามารถเสียรูปได้มากก่อนเกิดการแตกหัก ดังนั้นงานวิจัยนี้ คิดความเค้นที่บริเวณจุดต่อของวัสดุเปราะกับตัวประสาน เนื่องจากวัสดุเปราะเมื่อได้รับภาระที่มากเกินไปจะรับไม่ได้ จะเกิดการขยายตัวของ การแตกหักอย่างรวดเร็ว

คุณสมบัติของตัวประสานเป็นวัสดุแบบอิลาสโต-พลาสติก ในงานวิจัยนี้เป็นไปตาม Ramberg-Osgood law สมการที่ 1 ดังนี้

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad (1)$$

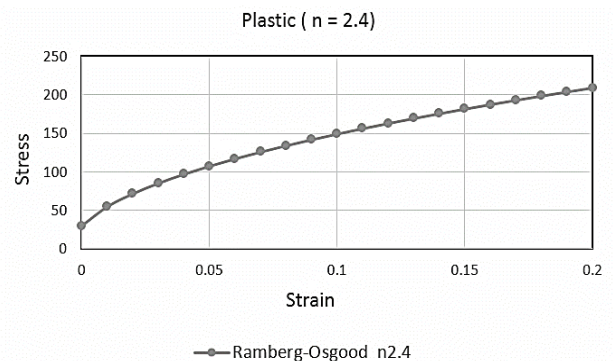
จากสมการดังกล่าว ϵ คือความเครียด (Strain), σ คือความเค้น (Stress), E คือมอดูลัสของยัง (Young's modulus), σ_0 คือความเค้นคราก (Yield Stress), α คือค่ากำหนดในการหาจุดคราก สำหรับกรณีวัสดุไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน (Yield offset), n คือเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Hardening exponent) งานวิจัยนี้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Lition Kumar S., ARAI Y. และ TSUCHIDA E. [3] ซึ่งคุณสมบัติพลาสติกของตัวประสาน ดังตารางที่ 2 พบว่าทองแดงที่เป็นวัสดุอ่อนมีคุณสมบัติแบบอิลาสโต-พลาสติก จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติกที่เป็นเส้นตรง (Linear) สามารถคืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิมได้ จนกระทั่งมีความเค้นที่มากกว่าความเค้นคราก จึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เสียรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) ดังรูปที่ 1 โดยการทดลองใช้ความเค้นครากเท่ากับ 30 เมกกะปาสคาล (MPa)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

Material	Ceramic (Si ₃ N ₄)	Copper (Cu)	Metal (SUS304)
Young's Modulus (GPa)	304	108	196
Poisson Ratio	0.27	0.33	0.3
Material Response	Elastic	Elasto-Plastic	Plastic

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพลาสติกของตัวประสาน

Material properties	Copper
Yield Stress (MPa)	30
Hardening exponent n	2.4
Yield offset α	10.1



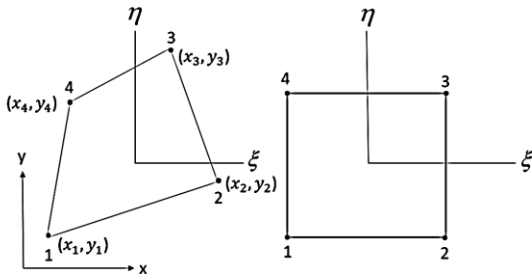
รูปที่ 1 ความเค้น-ความเครียดของตัวประสานในช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก

3. การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมในการแก้ปัญหา โดยการหาผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) ที่มีค่าต่างๆจำนวนมากนั้นจะคำนวณได้ยาก จึงเปลี่ยนเป็นค่าโดยประมาณที่แทนด้วยเอลิเมนต์ (Elements) ซึ่งผลเฉลยที่ได้จะเป็นผลเฉลยของจุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ ดังนั้นผลของการวิเคราะห์ทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะนำค่าผลเฉลยมารวมกัน การคำนวณหาเอลิเมนต์เมตริกซ์ที่ต้องอินทิเกรตบนพื้นที่เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ากันนั้นยาก ดังนั้นจึงแปลงรูปเอลิเมนต์อยู่

ในพิกัด $x-y$ ให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในพิกัดธรรมชาติ $\xi-\eta$ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเปลี่ยนเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าเป็นจัตุรัส

การคำนวณการเคลื่อนที่ในทิศทาง $x-y$ ของแต่ละจุดต่อในเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเป็นไปตามสมการที่ 2

$$u_i = \sum_{n=1}^e N_n \bar{u}_{in} \quad (2)$$

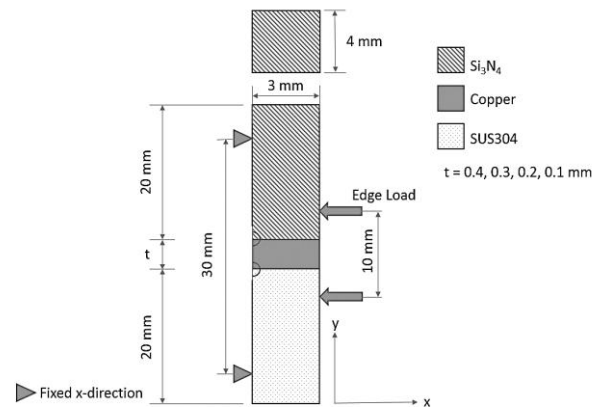
โดย u_i คือ การกระจัดในทิศทาง i , \bar{u}_{in} คือ การกระจัดที่จุดต่อ n มีทิศทางเดียวกับ i และ N_n คือ ฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน (Interpolation Function) ของจุดต่อ n แล้วนำไปหาค่าความเครียดและความเค้นในทิศทางต่างๆ

3.2 ขอบเขตและแรงกระทำต่อแบบจำลอง

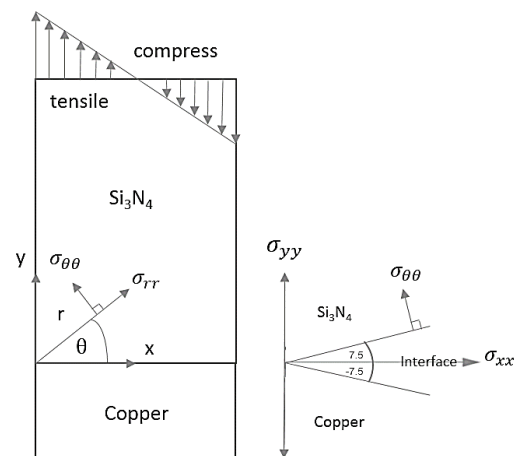
ขนาดของแบบจำลองในงานวิจัยนี้อ้างอิงมาจากการทดลองของ Lition Kumar S., ARAI Y. และ TSUCHIDA E. [3] ซึ่งความหนาของทองแดง (Copper, Cu) เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร และลดความหนาเป็น 0.3, 0.2, 0.1 มิลลิเมตร ทำหน้าเป็นตัวประสานวัสดุ 2 ชนิดระหว่างเซรามิก (Ceramic, Si_3N_4) กับสแตนเลส (Metal, SUS304) โดยมีความกว้าง 3 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดของวัสดุมีความหนามากกว่าความกว้าง จึงต้องวิเคราะห์เป็นแบบจำลองสองมิติแบบ

ระนาบความเครียด (Plane strain) และแรงที่มากระทำเป็นแรงดัด 4 จุด ขนาด 273 MPa ดังรูปที่ 3

การสร้างเอลิเมนต์ตรงบริเวณรอยต่อ หรือเรียกว่าบริเวณจุดซิงกูลาที่มีความเค้นสูงชันอย่างรวดเร็วจนมีค่าเข้าสู่อนันต์ จำเป็นต้องสร้างเอลิเมนต์ที่มีความละเอียดสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้มีขนาดของเอลิเมนต์ที่น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.00001 มิลลิเมตร สร้างบริเวณจุดต่อที่มีแรงดึงมากระทำ (Tensile) เนื่องจากเป็นแรงที่นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดได้ เพื่อนำมาวิเคราะห์ความสามารถในการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและการเสียรูปแบบถาวรได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ขนาดและระยะแรงที่กระทำต่อแบบจำลอง



รูปที่ 4 การขยายตัวจากการรับแรงดัด

4. ผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 เปรียบเทียบการทดลองของ Kumar และคณะ

ค่าความเค้นในแนวแกน y ไปตามวัสดุในแกน y เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Lition Kumar S., ARAI Y. [3] ที่ใช้ความหนาของตัวประสานอยู่ที่ 0.4 มิลลิเมตร โดยใช้ Laser Moiré Interferometry เพื่อวัดระยะยืดตัวจากจุดซิงกูลาริตีจนถึงเนื้อของเซรามิก ที่ระยะ 0.01 ถึง 1.5 มิลลิเมตร เมื่อถูกกระทำด้วยแรงดัด 68, 132, 195 และ 273 เมกกะปาสคาล เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง โดยเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองในวัสดุเซรามิกที่มีคุณสมบัติเป็นอริสติกกับค่าที่ได้มาจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 5

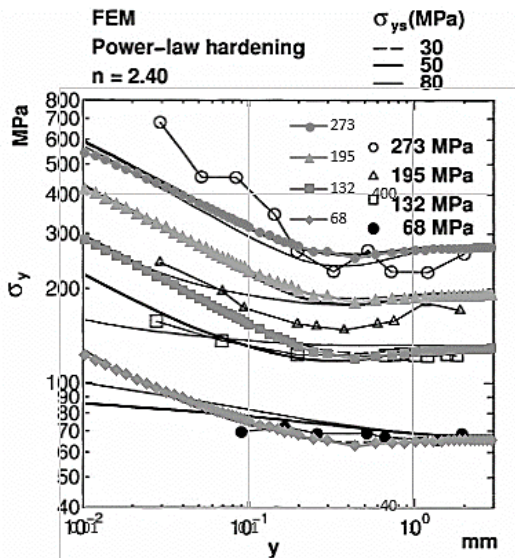


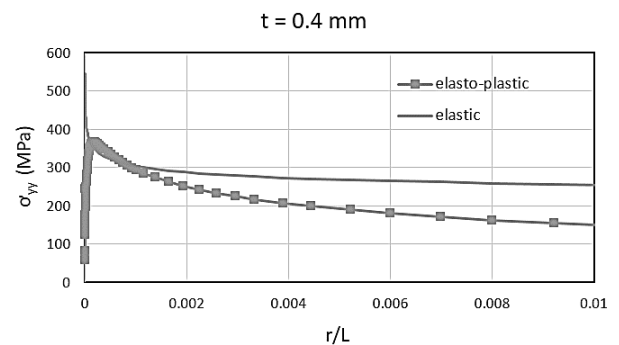
Fig. 8 Effect of yield strength of interlayer on stress distribution around interface edge

รูปที่ 5 เปรียบเทียบความเค้นในแนวแกน y

4.2 ผลกระทบต่อเซรามิกบริเวณรอยต่อเมื่อตัวประสานเป็นวัสดุแบบอริสติก-พลาสติก

ผลกระทบค่าความเค้นซิงกูลาริตีของเซรามิกบริเวณรอยต่อที่ถูกกระทำด้วยแรงดัด 4 จุด จะมีค่าสูงมากเมื่อเข้าใกล้มุมขอบของบริเวณรอยต่อ เนื่องจากแรงดึงที่สูงสุดเกิดบนพื้นผิวฝั่งที่เกิดแรงดึง เมื่อกระทำด้วยแรงดัดและคุณสมบัติของเซรามิกที่ไม่เกิดการเสียรูปหรือเสียรูป

น้อยมาก จะมีแรงต้านทานการเสียรูปเยอะ ทำให้ความเค้นที่เกิดภายในวัสดุมีค่ามาก แต่การที่มีทองแดงเป็นตัวประสานซึ่งเป็นวัสดุแบบอริสติก-พลาสติก ($n = 2.4$) พบว่าความเค้นของเซรามิกลดลง เนื่องด้วยได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติพลาสติกของตัวประสานที่ใช้วัสดุทองแดง ซึ่งคุณสมบัติพลาสติกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเสียรูปอย่างถาวร การเสียรูปแบบถาวรทำให้พื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุน้อยลง ทำให้มีพื้นที่ต้านทานแรงลดลง ความเค้นที่เกิดภายในวัสดุทองแดงจึงมีค่าลดลง นั่นเป็นสาเหตุที่ว่า การที่มีตัวประสานเป็นวัสดุแบบอริสติก-พลาสติก ซึ่งมีคุณสมบัติพลาสติกมาเกี่ยวข้องทำให้เซรามิกที่มีคุณสมบัติเป็นอริสติก มีความเค้นลดลงบริเวณรอยต่อ ได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความเค้นของเซรามิกบริเวณ $\theta = 7.5^\circ$ เมื่อตัวประสานเป็นวัสดุแบบอริสติก-พลาสติก

4.3 ความเค้นในแนวแกน $\theta\theta$ ($\sigma_{\theta\theta}$)

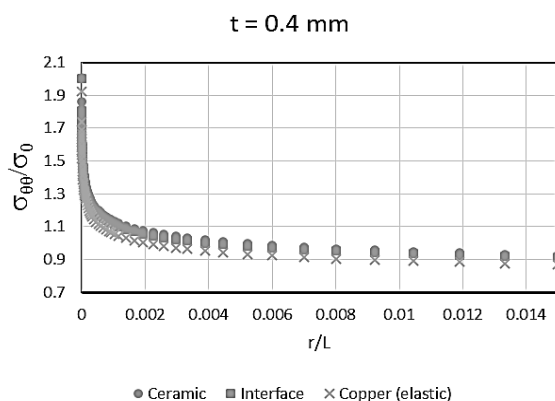
ค่าความเค้นในแนวแกน $\theta\theta$ เป็นความเค้นตามแนวแกน $\theta\theta$ ที่มีทิศทางตั้งฉากกับรัศมี ความเค้นนี้เป็นความเค้นทำให้บริเวณรอยต่อของวัสดุแยกออกจากกัน โดยความเค้นนี้หาได้จากสมการที่ 3 ประกอบด้วยความเค้นในแนวแกน x , y และ xy ซึ่งใช้ระยะจากจุดซิงกูลาริตีไปยังเนื้อของเซรามิกตามแนววงศาต่างๆ (r) หากกับความยาวของรอยเชื่อม ($L=0.3$) จะได้อัตราส่วนระยะที่เก็บค่ากับความยาวรอยเชื่อม เพื่อสามารถนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นได้ โดยองศาที่นำมาเปรียบเทียบกับได้แก่ $\theta = -7.5, 0, 7.5$ เนื่องจากเป็นองศาที่

ใกล้ที่สุดของรอยต่อ ($\theta = 0$) ระหว่างเซรามิก ($\theta = 7.5$)
กับทองแดง ($\theta = -7.5$)

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \right) - \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right) \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3)$$

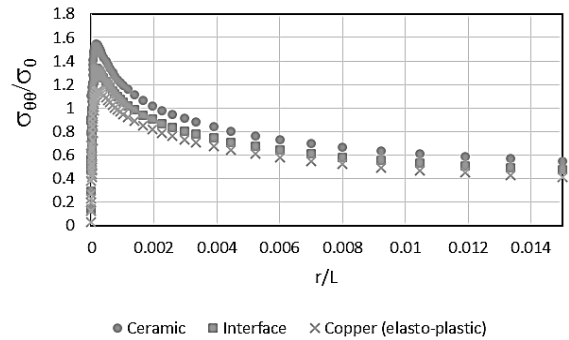
4.3.1 ผลกระทบต่อความเค้นในแนวแกน $\theta\theta$ ($\sigma_{\theta\theta}$)

รูปที่ 7 กำหนดให้แกน x คือ รัศมี (r) จากจุดมุมของรอยต่อหารด้วยความยาวของรอยต่อ (L), (r/L) และแกน y คือ ความเค้นในแนวแกน $\theta\theta$ หารด้วยขนาดของภาระแรงที่กระทำ ($\sigma_{\theta\theta}/\sigma_0$) พบว่าคุณสมบัติเชิงกลของตัวประสาน มีผลต่อความเค้นในเนื้อเซรามิกบริเวณรอยต่อ เนื่องจากว่าถ้าตัวประสานมีคุณสมบัติเป็นอโลหะ ความเค้นของทองแดงที่เป็นตัวประสานและเนื้อวัสดุเซรามิกบริเวณรอยต่อจะมีค่าสูงขึ้น ในลักษณะความเค้นซิงกูลาริตี้ แต่ถ้าตัวประสานมีคุณสมบัติเป็นอโลหะ-พลาสติก พบว่าความเค้นของเซรามิกบริเวณรอยต่อเนื่องจากตัวประสานเกิดการเสียรูปถาวร ทำให้ความเค้นมีค่าลดลง ตามคุณสมบัติแบบพลาสติก ดังรูปที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Siagsanan Waratchaya and Wisessint Attaporn [1] ดังนั้นบริเวณรอยต่อจึงได้รับผลกระทบ ทำให้ค่าความเค้นของเซรามิกและรอยต่อที่มีค่ามากนั้นน้อยลง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ความเค้น $\sigma_{\theta\theta}/\sigma_0$ เมื่อตัวประสานมีคุณสมบัติแบบอโลหะ

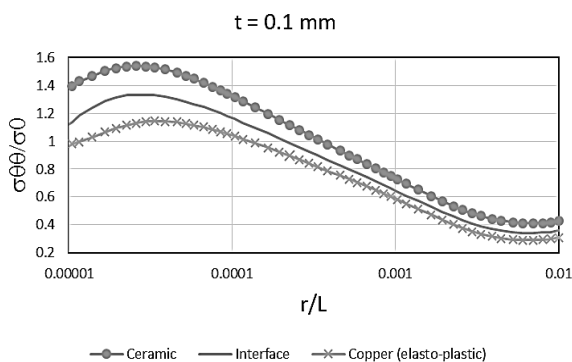
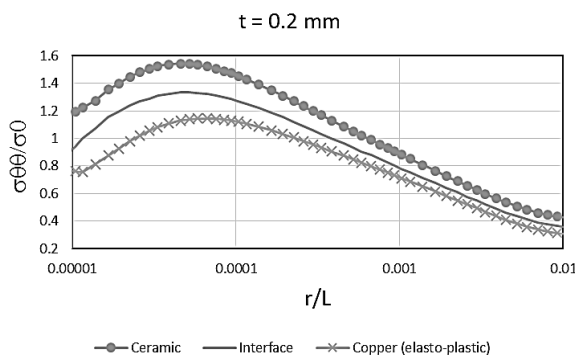
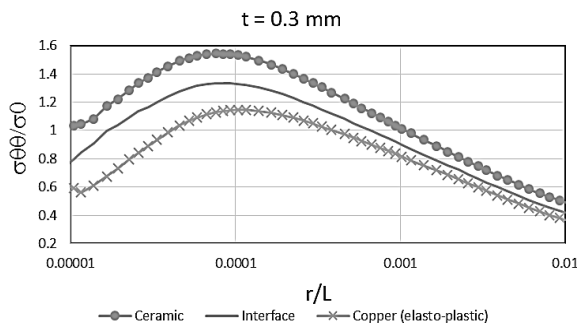
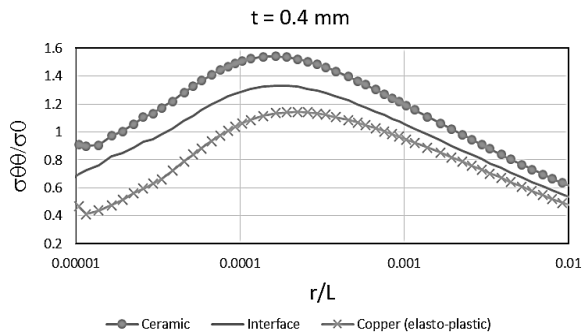
$t = 0.4 \text{ mm}$



รูปที่ 8 ความเค้น $\sigma_{\theta\theta}/\sigma_0$ เมื่อตัวประสานมีคุณสมบัติแบบอโลหะ-พลาสติก

4.3.2 เปรียบเทียบความเค้น $\sigma_{\theta\theta}$ เมื่อลดความหนาของตัวประสาน

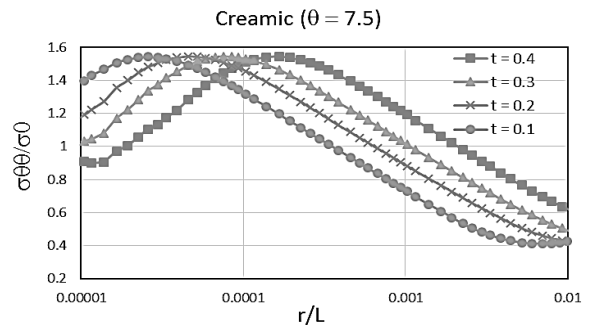
เมื่อทดสอบที่ความหนาต่างๆของตัวประสานที่มีคุณสมบัติแบบอโลหะ-พลาสติก พบว่าความเค้นบริเวณพลาสติกที่เกิดขึ้นใกล้จุดซิงกูลาของตัวประสานนั้น ส่งผลกระทบต่อค่าความเค้นบริเวณอโลหะ ใกล้จุดซิงกูลาของรอยต่อและเซรามิกใกล้รอยต่อ ดังรูปที่ 9 และการลดความหนาของตัวประสานลง พบว่าทำให้บริเวณพลาสติกใกล้จุดซิงกูลาในตัวประสานเล็กลง ส่งผลให้ได้ค่าความเค้นที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้อาจเกิดจากการลดความหนาของตัวประสานลง ทำให้เกิดระยะการเคลื่อนตัวตามแนวแรงที่ลดลง ความเค้นที่เกิดขึ้นจะลดลงในช่วงอโลหะ และเกิดบริเวณพลาสติกที่เล็กลง ขอบของบริเวณพลาสติกของแต่ละความหนาตัวประสานจะแตกต่างกันออกไป และพฤติกรรมของความเค้นในบริเวณพลาสติกที่เหมือนกัน จะเกิดในบริเวณที่แตกต่างกันไปอีกด้วย จึงทำให้การใช้ความหนาของตัวประสานที่น้อย จะเกิดความเค้นที่มากที่สุดบริเวณพลาสติก และความหนาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเค้นบริเวณรอยต่อบริเวณพลาสติกของเซรามิกมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจะช่วยลดโอกาสของการเกิดการแตกร้าวในรอยต่อและในเซรามิกได้



รูปที่ 9 ความเค้น $\sigma_{\theta\theta}$ บริเวณ $\theta = 7.5^\circ$ 0° และ -7.5°
 ของแต่ละความหนาของตัวประสาน

พฤติกรรมการลดลงของความเค้นในบริเวณ
 พลาสติกในแต่ละความหนาของตัวประสาน ส่งผลให้

ความเค้นที่เกิดขึ้นในเซรามิกใกล้บริเวณพลาสติกของตัว
 ประสานลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งการเพิ่มความหนา
 ของตัวประสาน จะทำให้ความเค้นบริเวณรอยต่อของ
 เซรามิกมีค่าน้อยลง ซึ่งการลดลงของความเค้นในเซรามิก
 นี้ ส่งผลให้ความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดการแตกร้าวในเซรามิก
 ลดลงได้



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของความเค้น $\sigma_{\theta\theta}$ บริเวณ
 $\theta = 7.5^\circ$ (Ceramic) จากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง
 ความหนาของตัวประสาน

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้พบว่าคุณสมบัติแบบอิลาสโต-
 พลาสติกที่ง่ายต่อการเสียรูป ทำให้ค่าความเค้นบริเวณ
 รอยต่อของวัสดุลดลง เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นของ
 เซรามิก ได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติพลาสติกของตัว
 ประสาน ซึ่งคุณสมบัติพลาสติกจะเกิดการเปลี่ยนแปลง
 รูปร่างหรือเสียรูปอย่างถาวร ทำให้ความเค้นที่เกิดภายใน
 วัสดุทองแดงมีค่าลดลง นั้นเป็นสาเหตุที่ว่ากรณีที่ตัว
 ประสานเป็นวัสดุแบบอิลาสโต-พลาสติก ทำให้เซรามิกที่มี
 คุณสมบัติเป็นอิลาสติกมีความเค้นลดลงบริเวณรอยต่อ
 นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มความหนาของตัวประสานทำให้
 เกิดบริเวณการเสียรูปแบบพลาสติกที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้
 ความเค้นที่เกิดขึ้นในเซรามิกลดลงมากยิ่งขึ้น ซึ่ง
 หมายความว่า จะช่วยลดโอกาสของการเกิดการแตกร้าว
 ในรอยต่อและในเซรามิก ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเปราะ
 แบบอิลาสติกได้



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Siagsanan Waratchaya and Wisessint Attaporn, 2017. Intensity of Stress Singularity around A Singular Point of An Elasto-Plastic Dissimilar Material Joint using FEM, The 28th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, 2014, khonkaen, Thailand.
- [2] Jirapat Malai and Attaporn Wisessint, 2013. Elasto-Plastic stress singularity field near the vertex of bi-material joint, The 4 th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 2013, Pattaya, Chonburi, Thailand.
- [3] Liton Kumar S., ARAI Y. and Tsuchida E., 2005. An Analysis on Singular Fields around an Interface Edge of Ceramic/ Metal Joints using Moiré Interferometry Technique, JSME Int. Journal, Series A, 48 (4) : 240-245.
- [4] Le Van Lich and Do Van Thuong, Plastic stress singularity near interface edge of elastio-plastic/elastic bi-material, Computational Materials Science 78, 2013, 140-146.