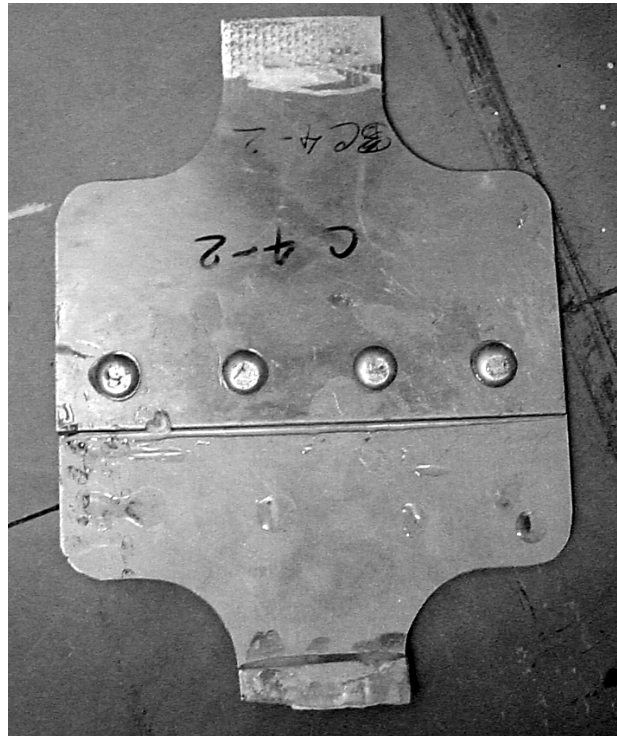
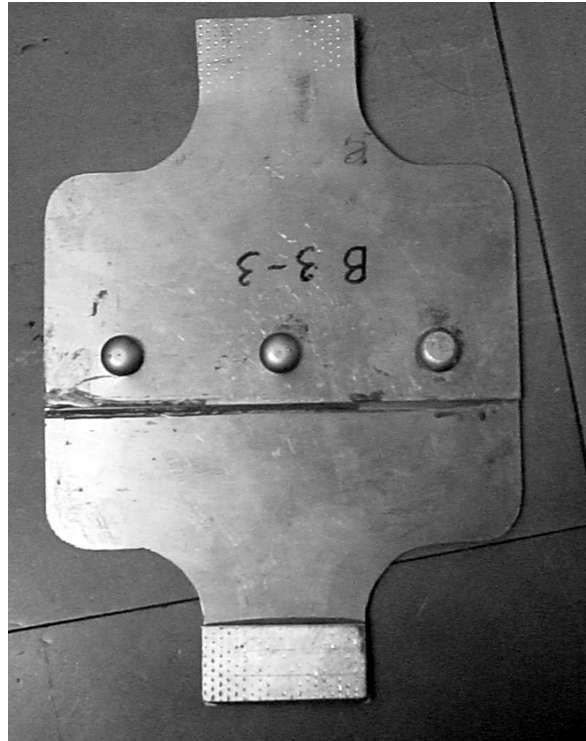




รูปที่ 3.4 ชิ้นงานตัวอย่างทดสอบระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานตัวอย่างทดสอบระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 50.8 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของชิ้นงานตัวอย่าง

แบบ	ชั้นที่	จำนวนหมุด ย้า	ระยะห่าง ระหว่าง หมุดย้า	ชนิดของกา	ความหนา ชั้นกา
S-3-0	1	3	50.8 mm	ไม่มีกา	-
	2	3	50.8 mm	ไม่มีกา	-
	3	3	50.8 mm	ไม่มีกา	-
S-4-0	1	4	38.1 mm	ไม่มีกา	-
	2	4	38.1 mm	ไม่มีกา	-
	3	4	38.1 mm	ไม่มีกา	-
S-5-0	1	5	30.6 mm	ไม่มีกา	-
	2	5	30.6 mm	ไม่มีกา	-
	3	5	30.6 mm	ไม่มีกา	-
S-3-1	1	3	50.8 mm	อาร์ลไคท์เสตนคาร์ท	0.04 mm
	2	3	50.8 mm	อาร์ลไคท์เสตนคาร์ท	0.08 mm
	3	3	50.8 mm	อาร์ลไคท์เสตนคาร์ท	0.03 mm
S-4-1	1	4	38.1 mm	อาร์ลไคท์เสตนคาร์ท	0.07 mm
	2	4	38.1 mm	อาร์ลไคท์เสตนคาร์ท	0.02 mm
	3	4	38.1 mm	อาร์ลไคท์เสตนคาร์ท	0.15 mm
S-5-1	1	5	30.6 mm	อาร์ลไคท์เสตนคาร์ท	0.07 mm
	2	5	30.6 mm	อาร์ลไคท์เสตนคาร์ท	0.20 mm
	3	5	30.6 mm	อาร์ลไคท์เสตนคาร์ท	0.15 mm
S-3-2	1	3	50.8 mm	อาร์ลไคท์สตีล	0.11 mm
	2	3	50.8 mm	อาร์ลไคท์สตีล	0.11 mm
	3	3	50.8 mm	อาร์ลไคท์สตีล	0.07 mm
S-4-2	1	4	38.1 mm	อาร์ลไคท์สตีล	0.11 mm
	2	4	38.1 mm	อาร์ลไคท์สตีล	0.07 mm
	3	4	38.1 mm	อาร์ลไคท์สตีล	0.22 mm
S-5-2	1	5	30.6 mm	อาร์ลไคท์สตีล	0.05 mm
	2	5	30.6 mm	อาร์ลไคท์สตีล	0.12 mm
	3	5	30.6 mm	อาร์ลไคท์สตีล	0.12 mm

3.1.2. การทดสอบ

3.1.2.1 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของกาว

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบคุณสมบัติของกาวตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.1.1.2 เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของกาวนั้น โดยที่จะทำการทดสอบชิ้นงานทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง ในแต่ละประเภทของกาว และ ในแต่ละประเภทของการทดสอบ

- สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงดึงของชิ้นกาว ชิ้นงานจะถูกทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ในลักษณะของ Displacement Control โดยที่กำหนดความเร็วของหัวจับเท่ากับ 0.01 มม. ต่อ วินาที และทำการทดสอบจนกระทั่งรอยต่อหลุดออกจากกัน โดยที่แต่ละการทดสอบจะทำการบันทึกขนาดของแรงและค่าการเสียรูป
- สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงกดของชิ้นกาว ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้ จะถูกทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ในลักษณะของ Load Control ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นที่ Load Cell โดยที่ทำการกำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงเท่ากับ 10 Newton ต่อ วินาที ทำการทดสอบจนกระทั่งแรงมีขนาดเท่ากับ 1000 Newton โดยที่แต่ละการทดสอบจะทำการบันทึกขนาดของแรงและค่าการเสียรูป
- สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงเฉือนของชิ้นกาว ชิ้นงานจะถูกทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ในลักษณะของ Displacement Control โดยที่ที่กำหนดความเร็วของหัวจับเท่ากับ 0.01 มม. ต่อ วินาที และทำการทดสอบจนกระทั่งรอยต่อหลุดออกจากกัน โดยที่แต่ละการทดสอบจะทำการบันทึกขนาดของแรงและค่าการเสียรูป

3.1.2.2 การทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง

เมื่อชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.1.1.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง เสร็จเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานดังกล่าวจะถูกนำมาทดสอบ โดยที่จุดประสงค์ในการทดสอบเพื่อที่จะทำการวัดค่าความแข็งแรงของรอยต่อในแต่ละแบบ โดยในการทำการทดสอบจะเป็นการทดสอบชิ้นงานในการรับแรงดึง โดยที่จะยึดปลายทั้งสองของชิ้นงานตัวอย่าง และ ทำการติดตั้งชุดวัดระยะยืดของรอยต่อ โดยใช้ Extensometer ดังรูปที่ 3.6 Extensometer จะสามารถใช้วัดความเครียด ณ. ที่จุดที่วัดนั้นๆ ได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 3.6 ลักษณะการติดตั้ง Extensometer

โดยในการทดสอบจะทำการดึงจนชิ้นงานเกิดการเสียหาย จากผลการทดสอบที่ได้ จะทำการเก็บค่าแรงที่ใช้ดึงและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นรอยต่อเกิดสามารถยืดตัวออกได้ โดยการเก็บค่าแรงดึงนั้นได้จากค่าที่อ่านได้จาก LOAD CELL ของเครื่องทดสอบ และสำหรับ ค่าการเสียรูปของรอยต่อได้ทำการเก็บโดยใช้ Extensometer

3.2. ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ (Computational Analyses Procedures)

ในการวิเคราะห์ปัญหาสำหรับการศึกษานี้โดยการคำนวณทางคอมพิวเตอร์นั้น ได้เลือกใช้วิธีที่เรียกว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method FEM) เนื่องจากวิธี FEM นั้นมีข้อดีอยู่มากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่นๆ เช่น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณโดยใช้ Closed-form Solution หรือ การทำการวิเคราะห์โดยการทดสอบจริง การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นจะสามารถแสดงภาพจำลองการเสียรูปของชิ้นงานให้เห็นเด่นชัดมากยิ่งขึ้นมากกว่าการสังเกตด้วยตา หรือสามารถที่จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ ในตัวชิ้นงาน ไม่ว่าจะเป็นการเสียรูปของแผ่นที่นำมาเชื่อมต่อ การเอียงของตัวหมุดยึดหรือ การเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในตัววัสดุ หรือ ภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ ที่สนใจ เทียบกับเวลา ทำให้สามารถทำการประเมินผล หรือ ทำการวิเคราะห์ผลได้ง่ายขึ้น

3.2.1. การออกแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธี FEA-TALA

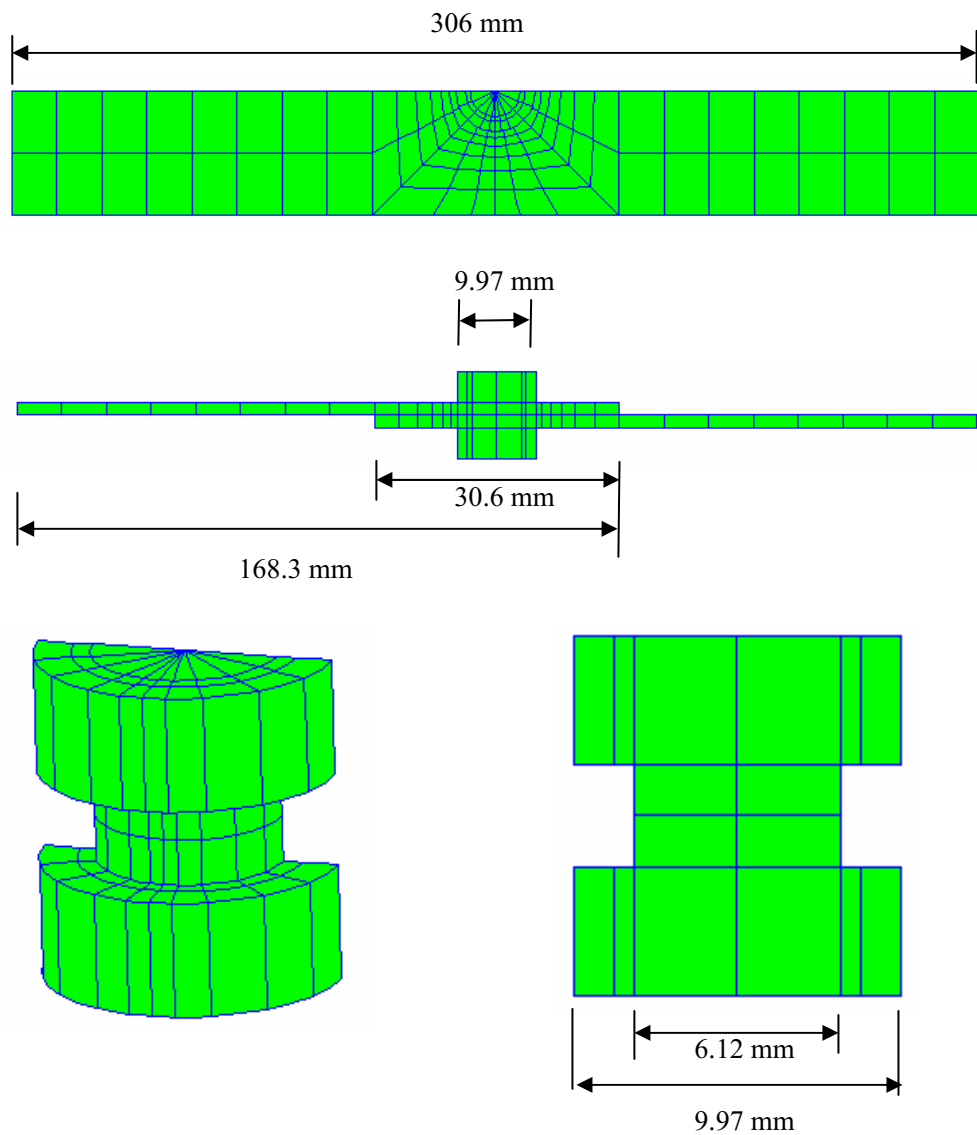
แบบจำลอง 3 มิติ ทางคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียม, หมุดยึด, และชั้นกาว ได้ถูกสร้างขึ้น โดยใช้วิธีระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ร่วมกับวิธีที่เรียกว่า TALA method (Thin Adhesives Layer Analyses method) โดยที่วิธี TALA นั้นเป็นวิธีที่ใช้จำลองชั้นกาวบางลงในแบบจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (โดยสามารถดูรายละเอียดของวิธี TALA เพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก.) เนื่องจากชั้นกาวที่ศึกษานั้นมีขนาดบางมากเมื่อเทียบกับความหนาของแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนั้นถ้ามีการจำลองชั้นกาวโดยใช้อีลิเมนต์ในลักษณะเดียวกับแผ่นอลูมิเนียม จะส่งผลทำให้ขนาดของแบบจำลองทั้งหมดมีขนาดใหญ่ อันเนื่องมาจากความละเอียดของชั้นกาว และจะส่งผลทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (CPU-time) สูงตามไปด้วย

ดังนั้นเพื่อเป็นการลดขนาดของไฟล์แบบจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ วิธี TALA จึงถูกเลือกที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์นี้ โดยที่หลักการของวิธี TALA คร่าว ๆ คือ การใช้สปริงอีลิเมนต์มาจำลองพฤติกรรมของชั้นกาว โดยเป็นการจำลองพฤติกรรมของชั้นกาวให้เปลี่ยนเป็นค่านิจของสปริง ตามสมการที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. หลังจากจำลองชั้นกาวด้วยสปริงแล้ว ผลของความหนาของชั้นกาวจะมีผลต่อค่านิจของสปริงแทน และไม่มีผลต่อความละเอียดของแบบจำลองทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลทำให้แบบจำลองทั้งหมดนั้นมีขนาดไม่ใหญ่มากเกินไป และการที่แบบจำลองทั้งหมดมีขนาดไม่ใหญ่มาก จะส่งผลให้การวิเคราะห์ทางวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ใช้เวลาไม่นาน ทำให้การวิเคราะห์เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

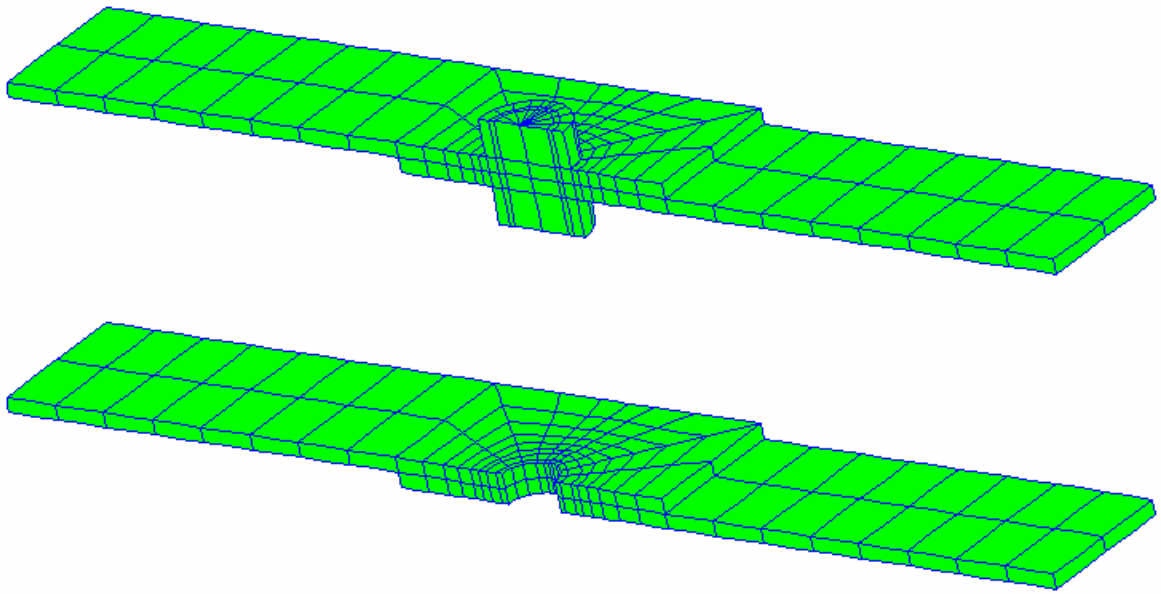
รูปที่ 3.7 แสดงรูปรายละเอียดของแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยที่รูปที่ 3.8 ถึง 3.10 ตัวอย่างของแบบจำลอง สำหรับกรณีของรอยต่อที่ใช้หมุดยึดโดยที่มีระยะห่าง

ระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร 38.1 มิลลิเมตร และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ แบบจำลอง จะเป็นการจำลองชิ้นงานตัวอย่างเพียงครึ่งหนึ่งของช่วงระยะห่างระหว่างหมุดย้า ในการจำลอง จะยึดหลักการของ Symmetry โดยที่ตัวเนื้อแผ่นอลูมิเนียมถูกจำลองโดยใช้อีลิเมนต์ชนิด 27 Node-Brick และ ตัวหมุดย้าจะถูกจำลองโดยใช้อีลิเมนต์ประเภท 15-Node Prism สำหรับ แบบจำลองนี้จะประกอบด้วยทั้งหมด 272 อีลิเมนต์ 2,423 โหนด และ รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่ง การวางของสปริงอีลิเมนต์ตามวิธี TALA โดยที่มีจำนวนของสปริงทั้งสิ้น 2,079 สปริง

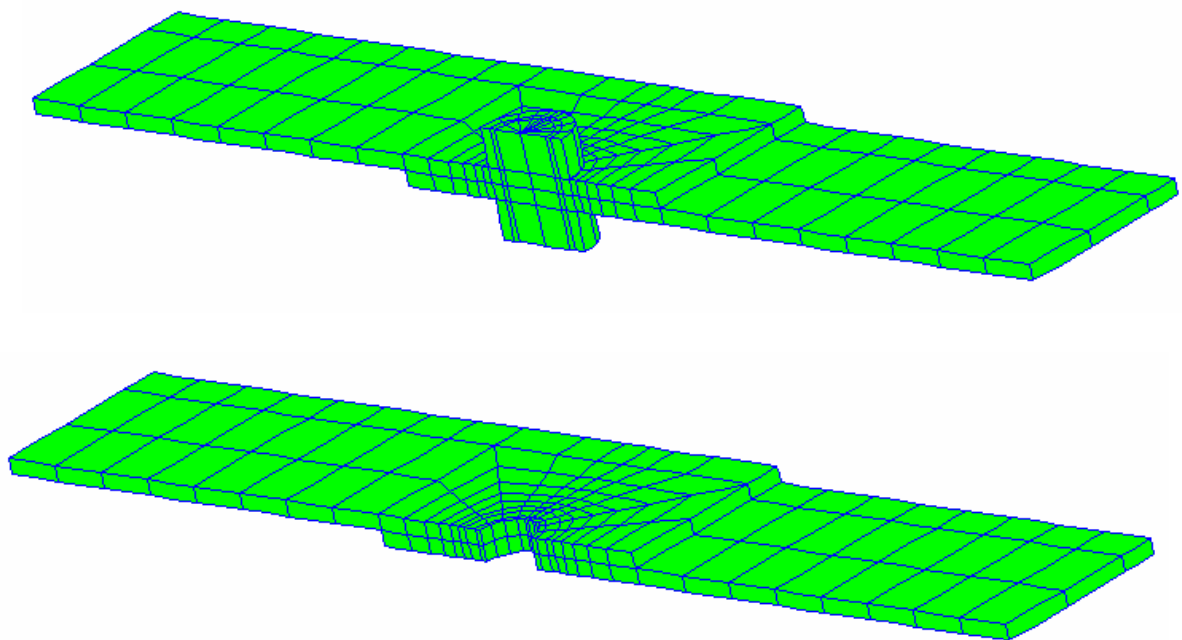
หลังจากที่ทำการวิเคราะห์แบบจำลอง จะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์กับ ผลการทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง



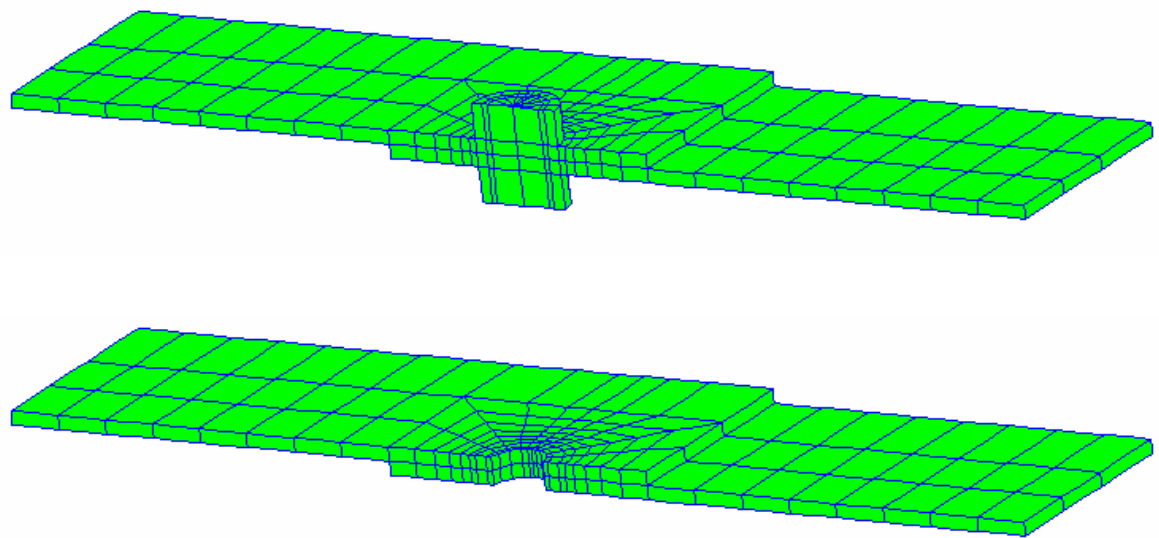
รูปที่ 3.7 แบบจำลองของชิ้นงานรอยต่อโดยรวม



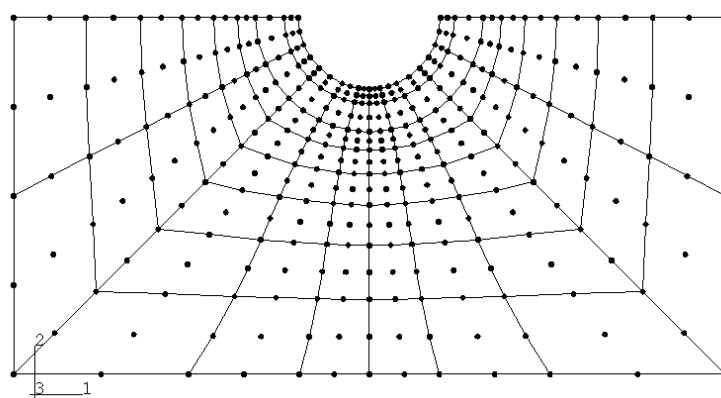
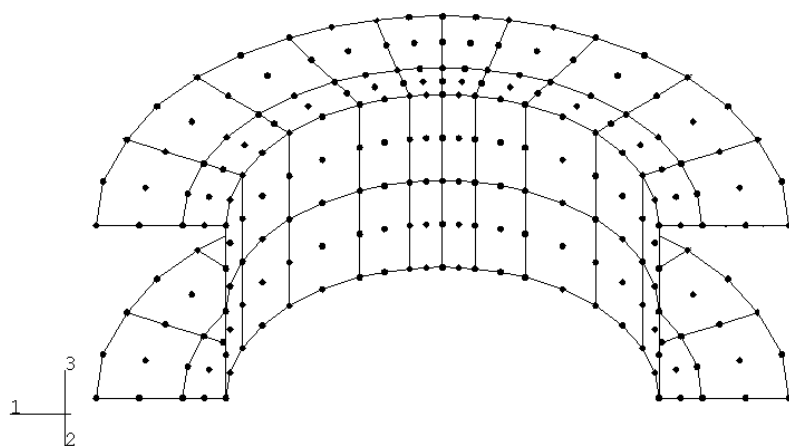
รูปที่ 3.8 แบบจำลองของชิ้นงานรอยต่อที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.9 แบบจำลองของชิ้นงานรอยต่อที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 แบบจำลองของชิ้นงานรอยต่อที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งสปริงอีลิเมนต์

3.2.2. การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

หลังจากที่ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางระเบียบไฟไนต์อีลิเมนต์ทั้งหมด โดยที่สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังแสดงในตารางที่ 3.2 แบบจำลองทั้งหมดจะถูกทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ABAQUS และหลังจากนั้น ผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่สนใจจะถูกคำนวณ เช่น ค่าความเค้นดึงสูงสุด ค่ามุมเอียงของหมุดย้า และ ค่าระยะการเปิดของขอบรอยต่อ

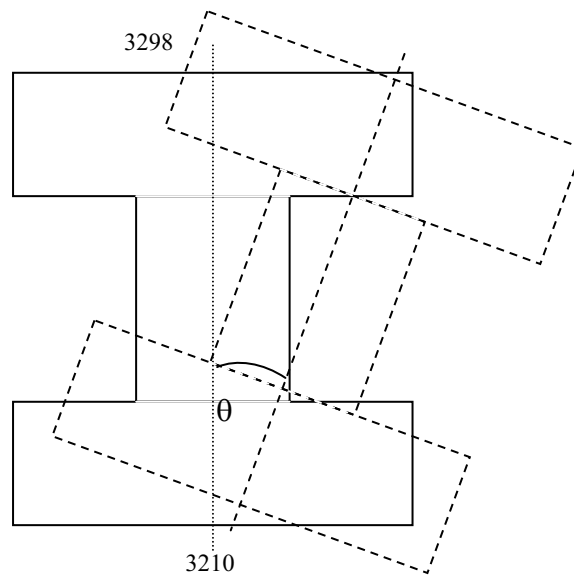
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของแบบจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

แบบจำลอง	ค่าระยะห่างระหว่างหมุดย้า (มม.)	ประเภทท้าว
S306_1	30.6	ไม่ท้าว
S306_2	30.6	อาร์ลไคท์สเตนคาร์ท
S306_3	30.6	อาร์ลไคท์สตีล
S381_1	38.1	ไม่ท้าว
S381_2	38.1	อาร์ลไคท์สเตนคาร์ท
S381_3	38.1	อาร์ลไคท์สตีล
S508_1	50.8	ไม่ท้าว
S508_2	50.8	อาร์ลไคท์สเตนคาร์ท
S508_3	50.8	อาร์ลไคท์สตีล

ค่ามุมเอียงของหมุดย้ำ (Rivet Tilt)

รูปที่ 3.12 แสดงวิธีการคำนวณมุมเอียงของหมุดย้ำ โดยจะทำการวิเคราะห์จากโหนดหมายเลข 3210 และ 3298 โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

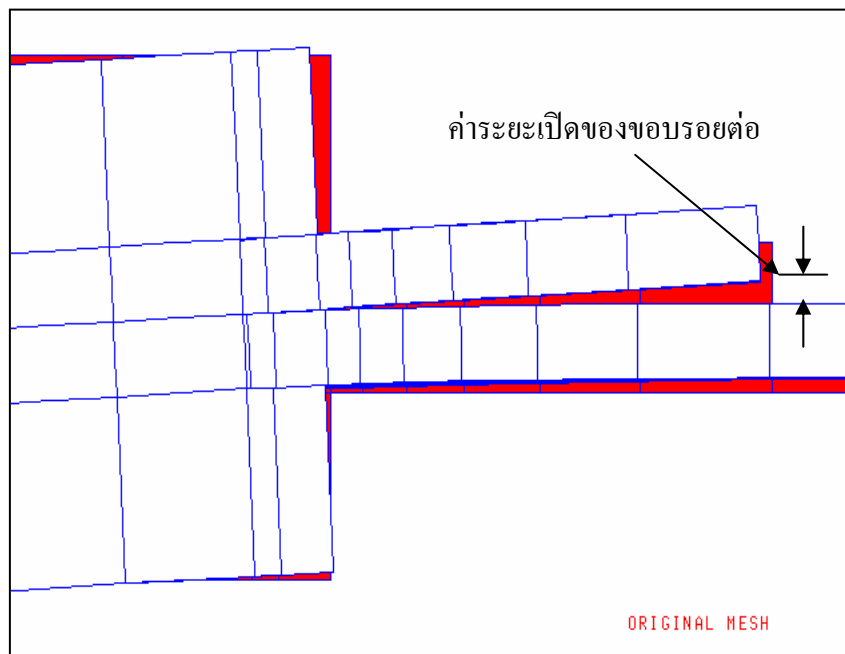
$$Rivet\ Tilt = TAN^{-1} \left(\frac{X_{3298} - X_{3210}}{Z_{3298} - Z_{3210}} \right) * \frac{360}{2 * \pi}$$



รูปที่ 3.12 การเอียงของหมุดย้ำ

ค่าระยะเปิดของขอบรอยต่อ (Overlapping end Opening)

ค่าระยะเปิดของขอบรอยต่อจะถูกคำนวณจากค่าการระยการเสียรูปที่จุดบริเวณขอบของรอยต่อ ดังรูปที่ 3.13 โดยดูจากการค่าระยการเสียรูปของโหนดที่ 369 และ 2068



รูปที่ 3.13 ค่าระยการเปิดของขอบรอยต่อ

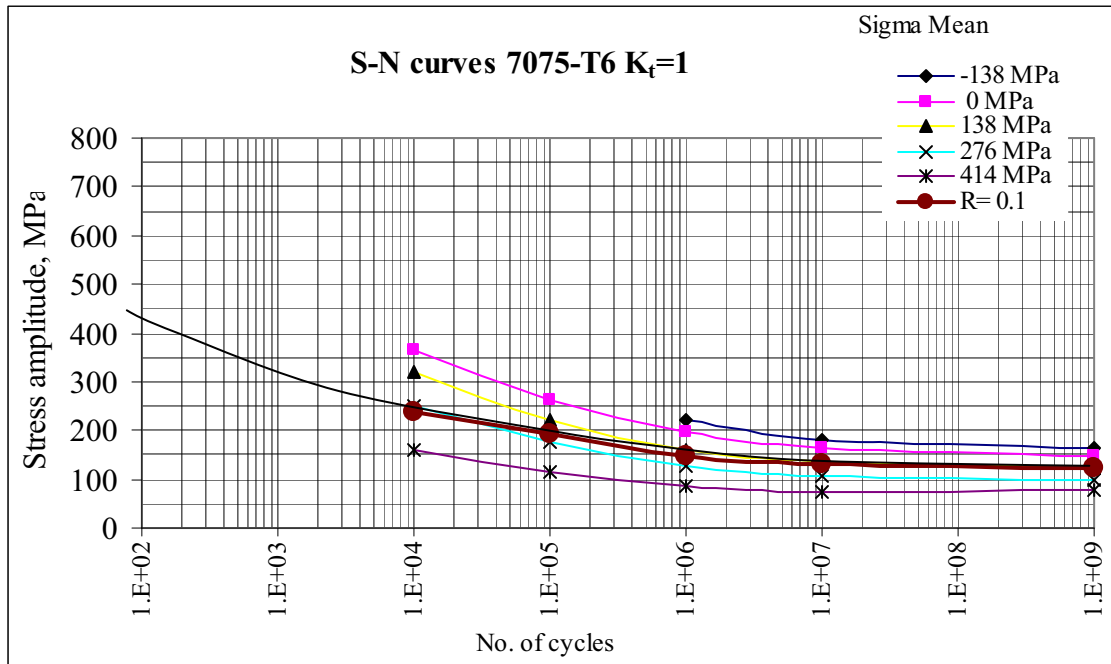
3.2.3. การวิเคราะห์การล้าของรอยต่อ

จากการศึกษาที่ผ่านมา Y. Huang [24] K. Al-Dakkan [25] และ T. Fongsamootr [2] ได้ทำการประเมินค่าอายุการใช้งานของรอยต่อแบบใช้หมุดย้ำเมื่อรับแรงในลักษณะซ้ำ ๆ (Cyclic Loading) จาก ค่า SCF ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน และ S-N Curve ของวัสดุ

รูปที่ 3.14 แสดง S-N curve สำหรับ Aluminum 7075 – T6 ที่ไม่มีตำหนิ (SCF = 1) ภายใต้การรับแรงแบบซ้ำ ๆ โดยที่มีความถี่อยู่ที่ 1 รอบต่อวินาที และค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุด กับ ความเค้นสูงสุดเท่ากับ $R = 0.1$

ดังนั้นในการศึกษานี้จะได้ใช้วิธีเดียวกันนี้ในการประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นงานตัวอย่าง ในการรับแรงดึง ในลักษณะซ้ำ ๆ ทั้งนี้ในการประเมินค่าอายุการใช้งานของชิ้นงานนั้นจะมีสมมติฐานเบื้องต้นดังต่อไปนี้

- ชิ้นงานจะรับแรงที่เป็นลักษณะซ้ำ ๆ ที่อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุด และความเค้นสูงสุดมีค่า เท่ากับ 0.1
- ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจากการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์จะถูกนำไปคูณด้วยตัวเลข 1.2 และถือว่าเป็นความเค้นสูงสุดของแรงซ้ำ ๆ ที่จะนำไปประเมินค่าอายุการใช้งานต่อไป
- (ตัวเลข 1.2 เป็นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบจริงและผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ จากงานของ Y. Huang [24] และ K. Al-Dakkan [25] แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการทดสอบจริงนั้นจะสูงกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์อยู่ประมาณ 1.2 เท่า)



รูปที่ 3.14 S-N curve สำหรับ Al 7075 –T6

(ที่มา: N. Dowling, “Mechanical Behavior of Materials”, 1998)

ตัวอย่างเช่น ถ้าจากการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์พบว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานนั้นอยู่ที่ 300 MPa และต้องการประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นงานนี้ สามารถประมาณค่าได้ดังนี้

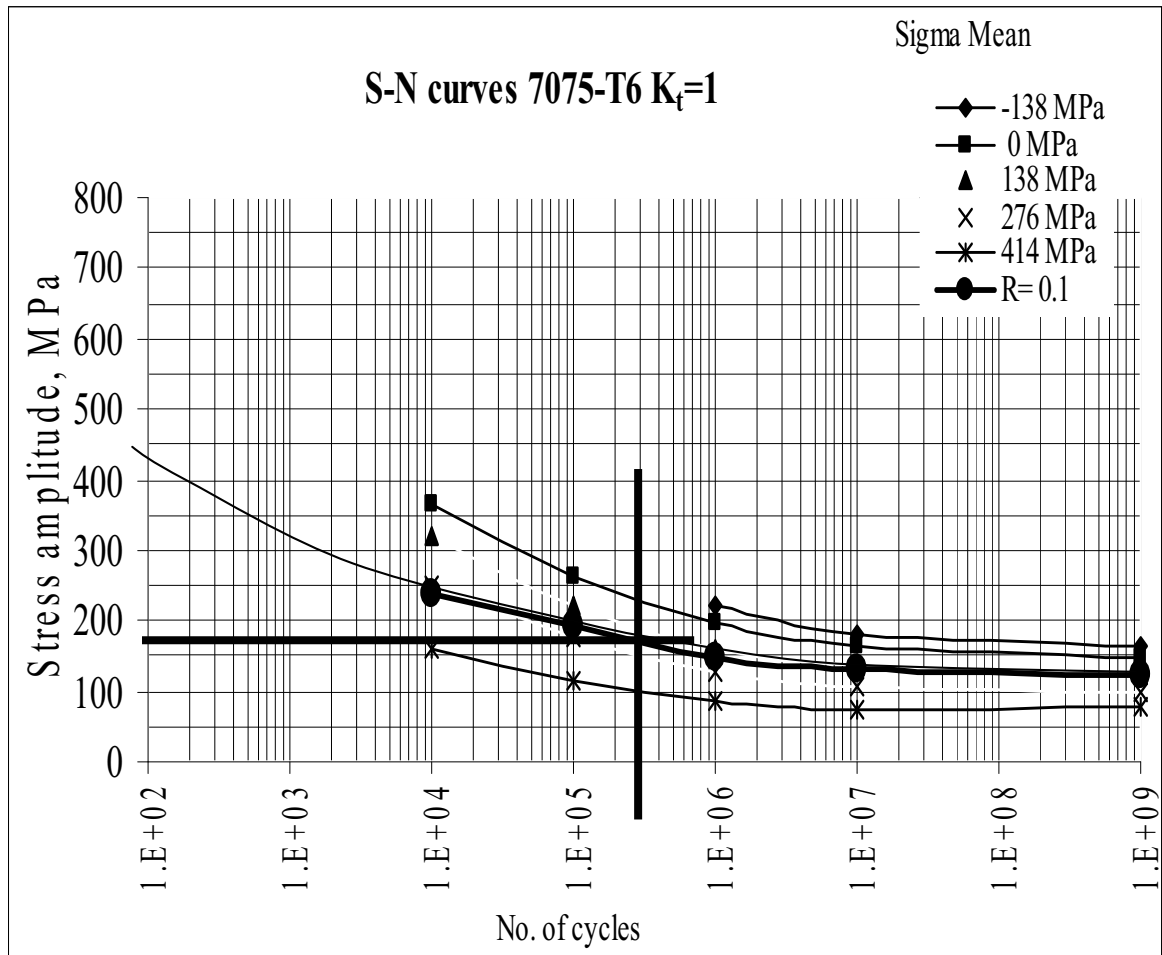
จากความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ ได้เท่ากับ 300 MPa

ดังนั้นจะได้ว่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ที่ใช้ในการประมาณค่าอายุการใช้งาน เท่ากับ $1.2 \times 300 = 360$ MPa

กำหนดว่า $R = 0.1$ ดังนั้นจะได้ว่า

ความเค้นต่ำสุด (Minimum Stress)	เท่ากับ 36 MPa
ความเค้นกลาง (Mean Stress)	เท่ากับ 198 MPa
ความเค้นแอมพลิจูด (Amplitude Stress)	เท่ากับ 162 MPa

เมื่อนำค่าที่ได้มา plot ลง S-N Curve (รูปที่ 3.13) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 จะได้ว่าอายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ $3 \times 10^5 = 300,000$ รอบ เป็นต้น



รูปที่ 3.15 การประมาณอายุการใช้งาน

อย่างไรก็ตามวิธีนี้เป็นวิธีการประมาณค่าอายุของชิ้นงานเท่านั้น ข้อได้เปรียบของวิธีนี้ก็คือน่าจะสามารถประมาณการอายุการใช้งานของชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว โดยที่ไม่ต้องทำการทดลองในลักษณะของ Fatigue testing ซึ่งจะใช้เวลาในการทดสอบนาน แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการทราบค่าอายุการใช้งานจริง จำเป็นต้องทำการทดลองจริงเพื่อเทียบผล

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

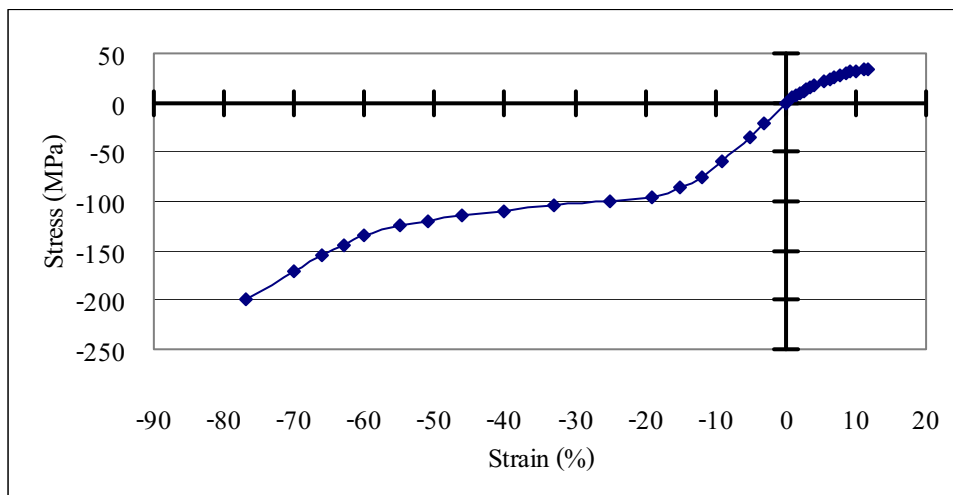
EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL RESULTS

ผลที่ได้จากการทดลองและ ผลที่ได้การวิเคราะห์จะถูกนำมาแสดง ในบทนี้ โดยการแสดงผลจะมีรายละเอียดดังนี้

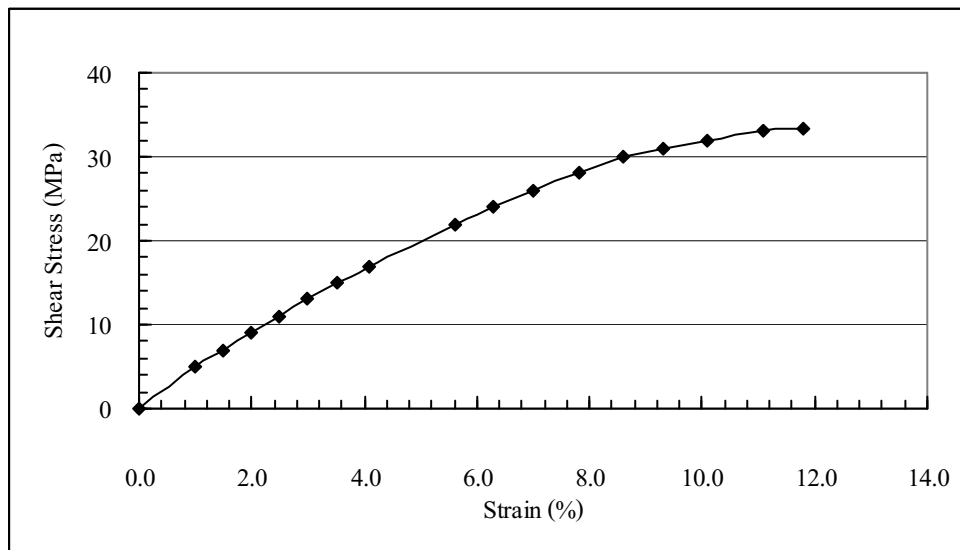
- ผลจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของกาว
- ผลจากการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์
- ผลจากการทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง

4.1. ผลจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของกาว

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของกาว “อาร์ลไดท์แสดนคาร์ท” สำหรับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงของชั้นกาวในแนวแกน (แรงดึงและแรงกด) และการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงเฉือน ตามลำดับ

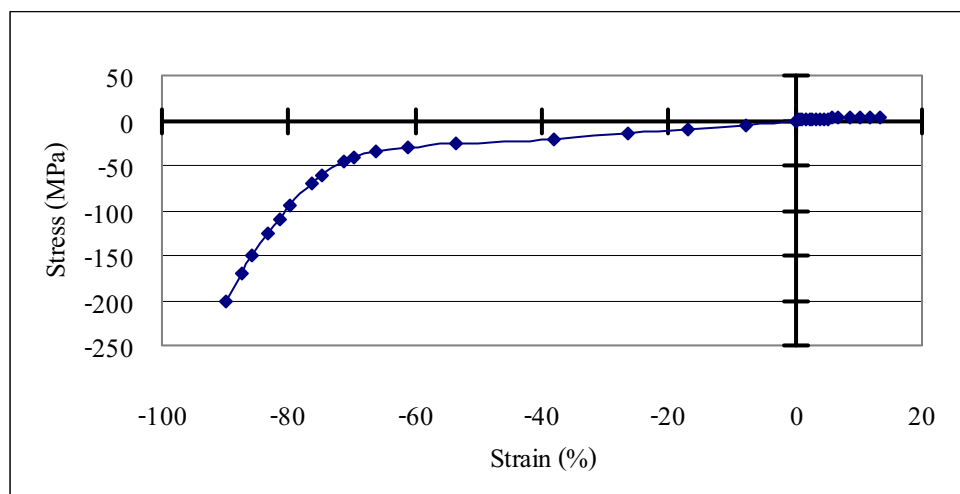


รูปที่ 4.1 พังความเค้นและความเครียดในการรับแรงดึงและกด กาว อาร์ลไดท์แสดนคาร์ท

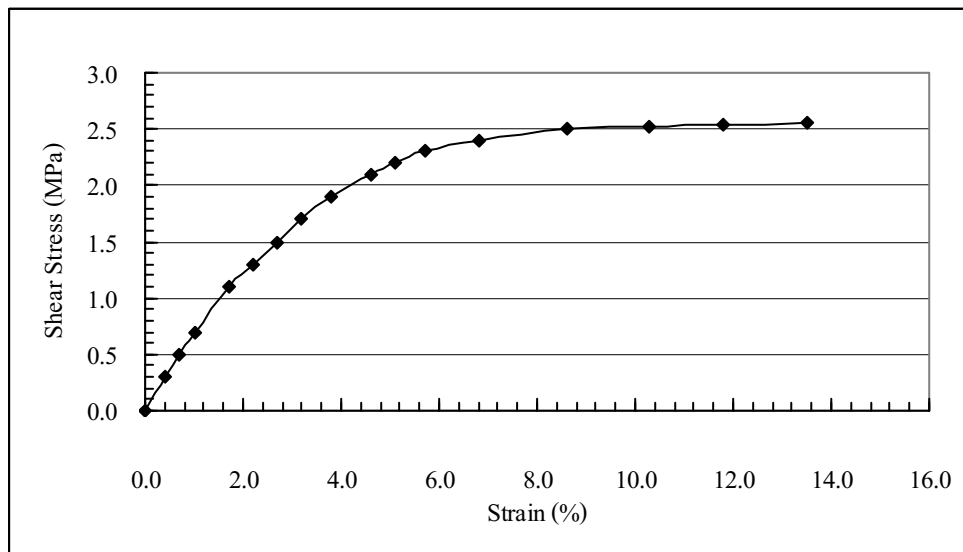


รูปที่ 4.2 ฟังก์ชันความเค้นและความเครียดในการรับแรงเฉือนสำหรับ กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของกาว “อาร์ลไคท์ สตีล” สำหรับ การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงของชั้นกาวในแนวแกน (แรงดึงและแรงกด) และการทดสอบ คุณสมบัติเชิงกลในการรับแรงเฉือน ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันความเค้นและความเครียดในการรับแรงดึงและกด กาว อาร์ลไคท์สตีล



รูปที่ 4.4 พังความเค้นและความเครียดในการรับแรงเฉือนสำหรับ กาวอาร์ลไคท์สตีล

จากรูปเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของกาวทั้งสองชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่ากาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ทมีคุณสมบัติเชิงกลแข็งแรงกว่ากาวอาร์ลไคท์สตีลอยู่ประมาณ 15 เท่า

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของกาว อาร์ลไคท์สแตนดาร์ท และ กาวอาร์ลไคท์สตีล

	อาร์ลไคท์สแตนดาร์ท	อาร์ลไคท์สตีล
Tension Modulus @ 10% Strain	300 MPa	20 MPa
Compression Modulus @ 10% Strain	800 MPa	50 MPa
Shear Modulus @ 10% Strain	310 MPa	25 MPa

จากนั้น คุณสมบัติเชิงกล ในการรับแรงดึงและแรงกด และ ในการรับแรงเฉือน ของกาวทั้งสองชนิด จะถูกนำไปป้อนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ต่อไป

4.2. ผลการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 4.2 สรุปผลที่ได้การวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ และแสดงถึงผลของชั้นกาวที่มีต่อการเสียรูปของรอยต่อแบบหมุดย้ำ ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้นในแนวแกนสูงสุด ค่าความเค้น Von Mises สูงสุด ค่ามุมเอียงของหมุดย้ำ และ ระยะเปิดของรอยต่อ เมื่อมีการทาากาวทั้งสองประเภท โดยเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ทาากาว สำหรับระยะห่างของหมุดย้ำเท่ากับ 30.6 มม. 38.1 มม. และ 50.8 มม.

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้รับจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ที่ได้ค่อนข้างสูง ตัวอย่างเช่น ในกรณีของชิ้นงานที่ทำด้วยกาว อารัลไคท์แสดนคาร์บ ระยะห่างหมุดย้ำเท่ากับ 30.8 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีระยะห่างหมุดย้ำเท่ากัน แต่ไม่มีการทาากาว พบว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงถึง 76.1% ในขณะที่ มุมบิดของหมุดย้ำลดลง 71.9% และ ระยะเปิดของปลายรอยต่อมีค่าลดลงถึง 99.4% นั่นหมายถึงการที่ชิ้นงานออลูมิเนียมทั้งสองชิ้นไม่แยกออกจากกัน ซึ่งเปรียบเสมือนว่าชิ้นงานบริเวณรอยต่อจะมีความหนามากขึ้น 2 เท่า

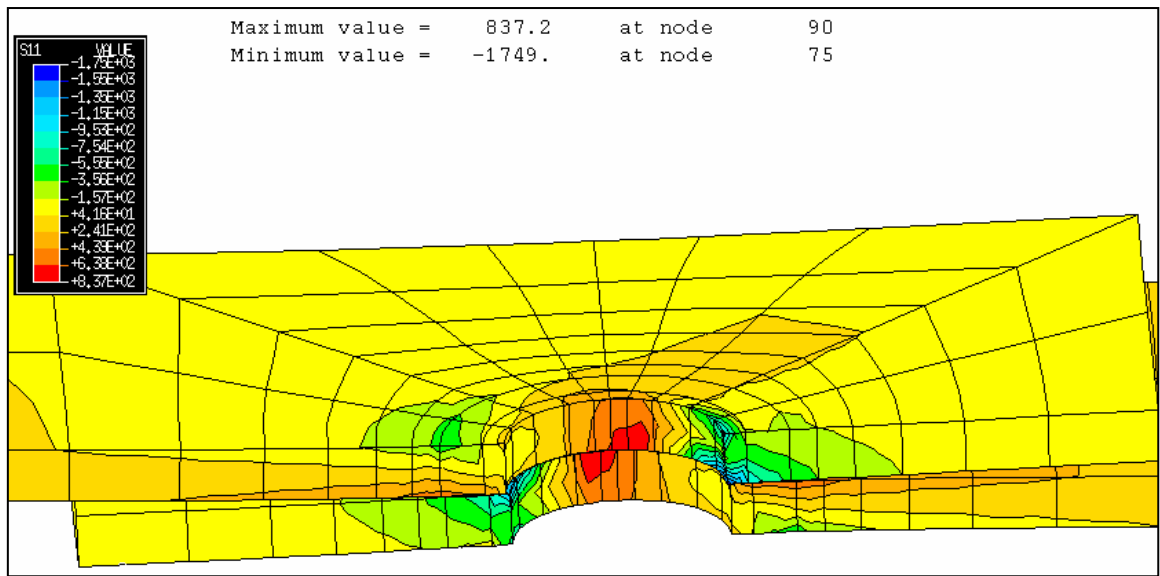
รูปที่ 4.5 ถึง 4.22 แสดงการกระจายของความเค้น ในแนวแกน และ ความเค้น Von Mises สำหรับทั้ง 9 กรณี

ตารางที่ 4.2 ผลของชั้นการเชื่อมต่อการเสียบของรอยต่อ

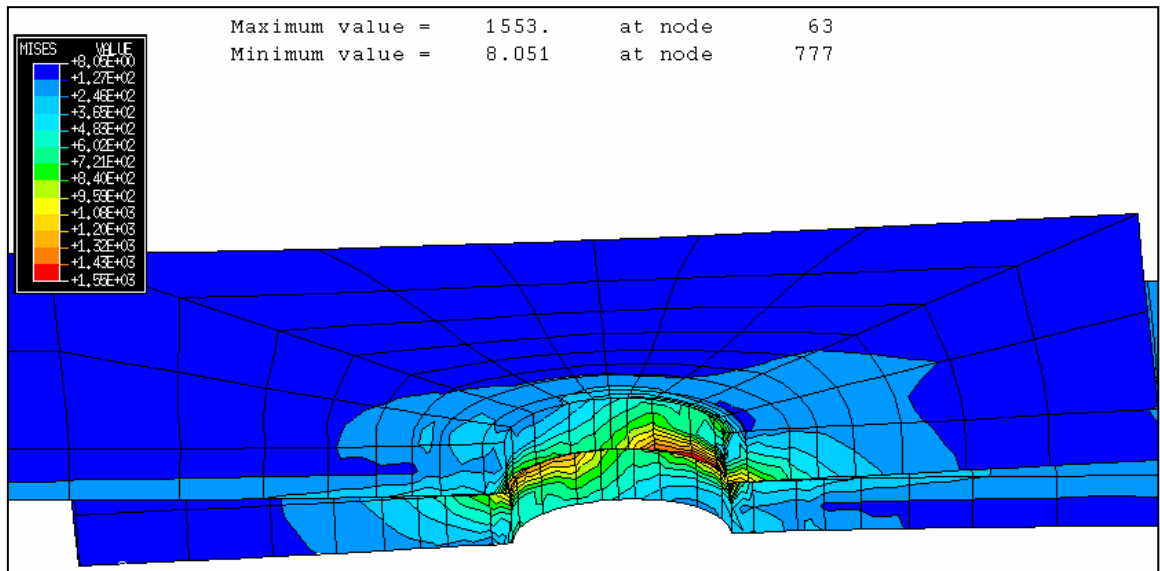
ประเภทการ	ระยะห่าง หมุดยึด (มม)	Max σ_{Mises} (MPa)	Max σ_{11} (MPa)	Rivet Tilt (Degree)	Opening Distant (mm)
ไม่ทากาว	30.6	1553.0	837.2	3.04	0.465
กาวอาร์ลไคท์สตีล	30.6	753.7	363.0	1.76	0.016
กาวอาร์ลไคท์สแตน คาร์ท	30.6	371.0	254.7	0.86	0.003
ไม่ทากาว	38.1	1923.0	1037.0	3.31	0.527
กาวอาร์ลไคท์สตีล	38.1	1241.0	532.6	2.14	0.021
กาวอาร์ลไคท์สแตน คาร์ท	38.1	372.4	245.2	0.86	0.003
ไม่ทากาว	50.8	2239.0	1403.0	3.85	0.638
กาวอาร์ลไคท์สตีล	50.8	1654.0	704.0	2.40	0.024
กาวอาร์ลไคท์สแตน คาร์ท	50.8	371.4	244.0	0.86	0.003

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ ที่สำคัญ เนื่องจากผลของชั้นการ

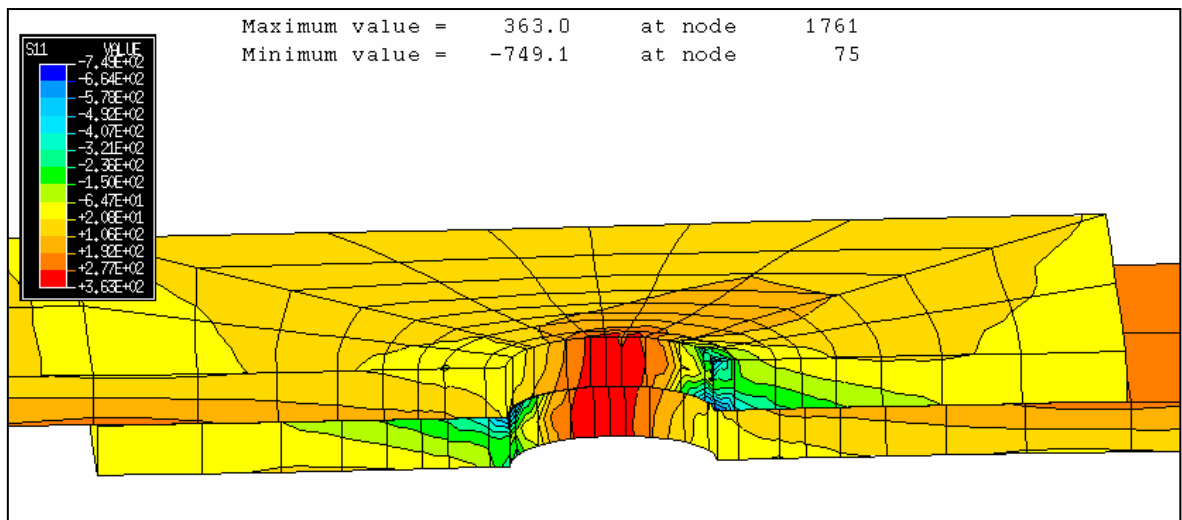
ประเภทการ	อาร์ลไคท์สตีล			อาร์ลไคท์สแตนคาร์ท		
ระยะห่างหมุดยึด	30.6	38.1	50.8	30.6	38.1	50.8
Max σ_{Mises}	-56.6%	-48.6%	-49.8%	-69.6%	-76.4%	-82.6%
Max σ_{11}	-51.5%	-35.5%	-26.1%	-76.1%	-80.6%	-83.4%
Rivet Tilt	-42.1%	-35.5%	-37.5%	-71.9%	-74.2%	-77.8%
SCF	-51.5%	-35.5%	-26.1%	-76.1%	-80.6%	-83.4%
Opening Distant	-96.6%	-96.0%	-96.2%	-99.4%	-99.4%	-99.5%



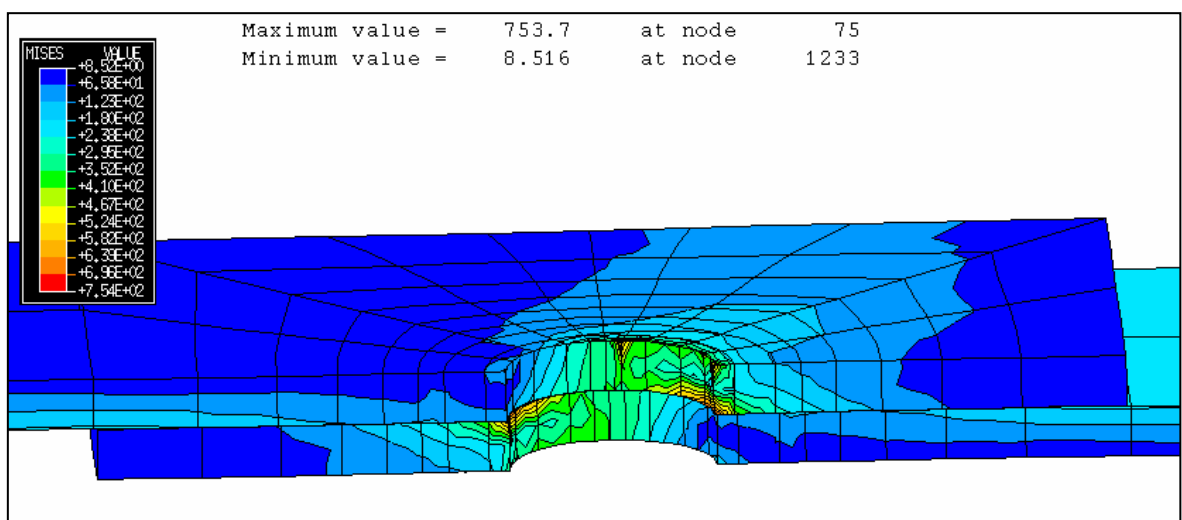
รูปที่ 4.5 การกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ
ในกรณีที่ไม่தாகว ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



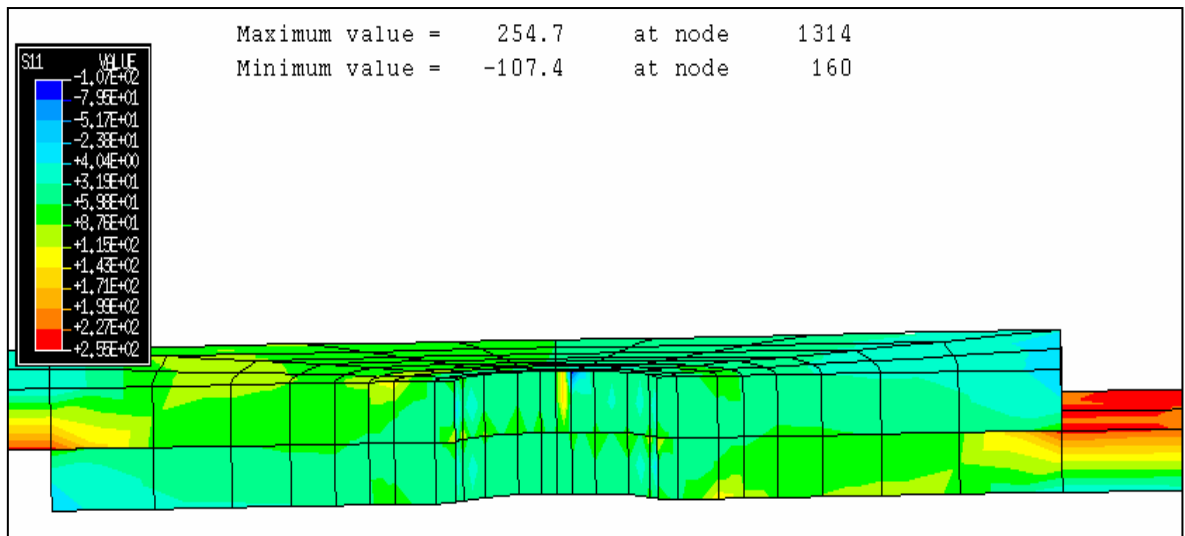
รูปที่ 4.6 การกระจายของความเค้น Von Mises ของรอยต่อ
ในกรณีที่ไม่தாகว ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



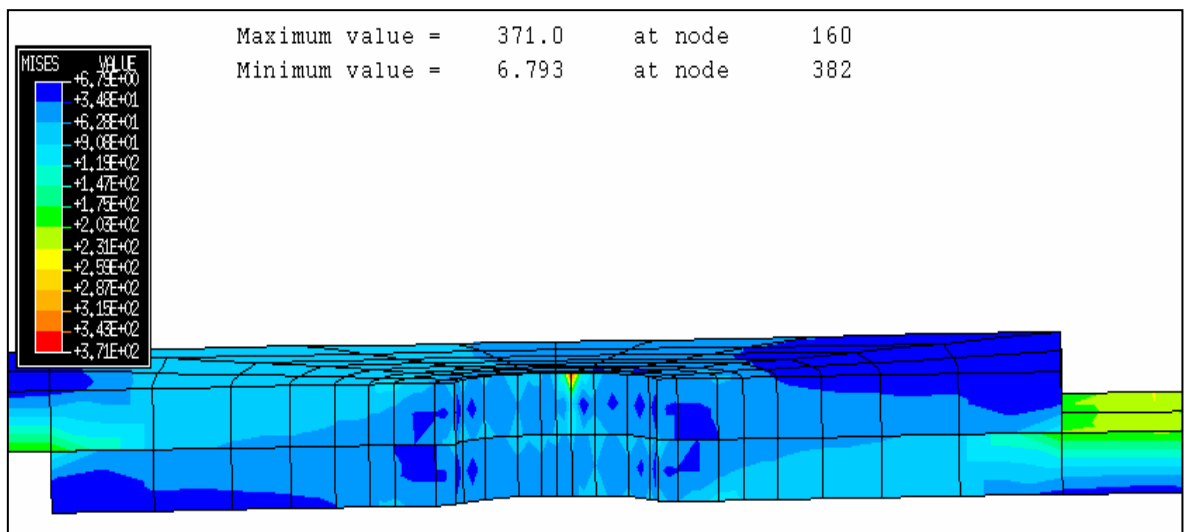
รูปที่ 4.7 การกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ
ในกรณีที่ทำทาวอาร์ลไดท์สตีล ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



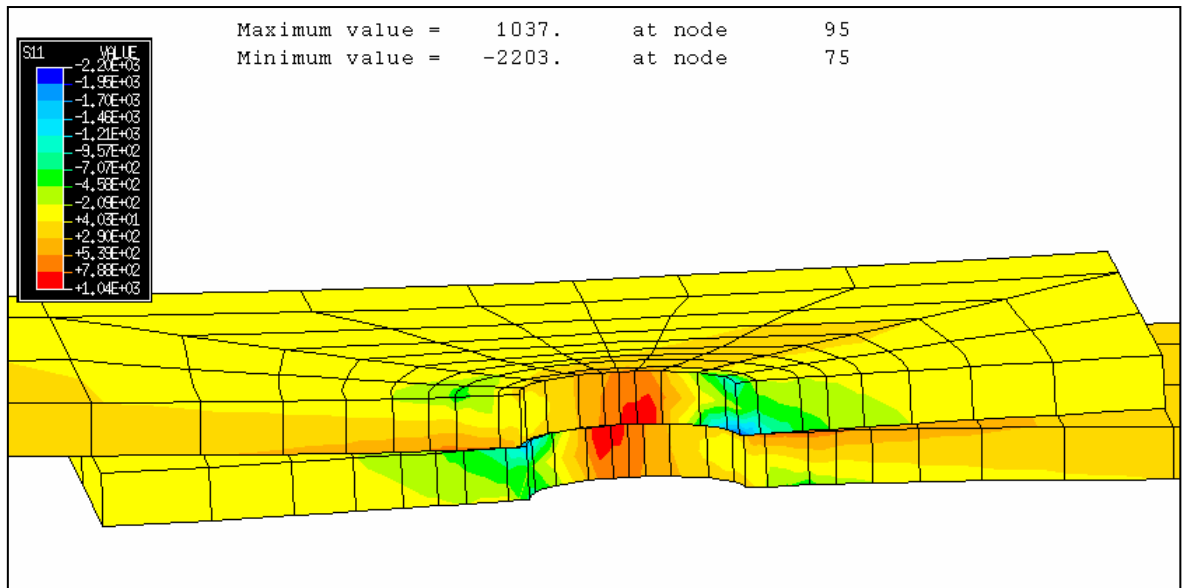
รูปที่ 4.8 การกระจายของความเค้น Von Mises ของรอยต่อ
ในกรณีที่ทำทาวอาร์ลไดท์สตีล ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



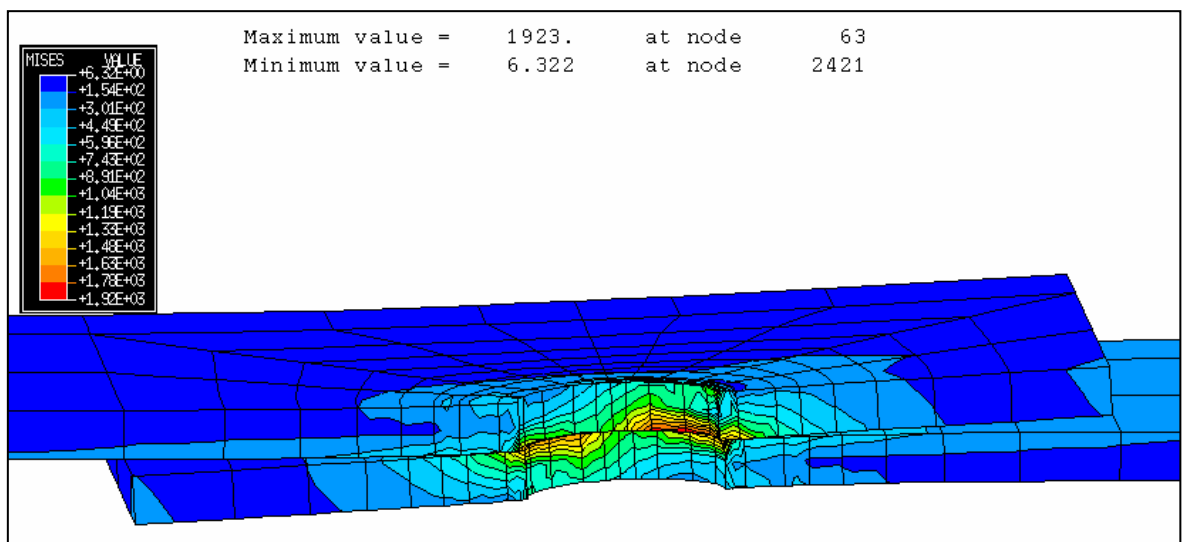
รูปที่ 4.9 การกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ
ในกรณีที่ทากาวอาร์ลไดท์สเตนคาร์ท ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



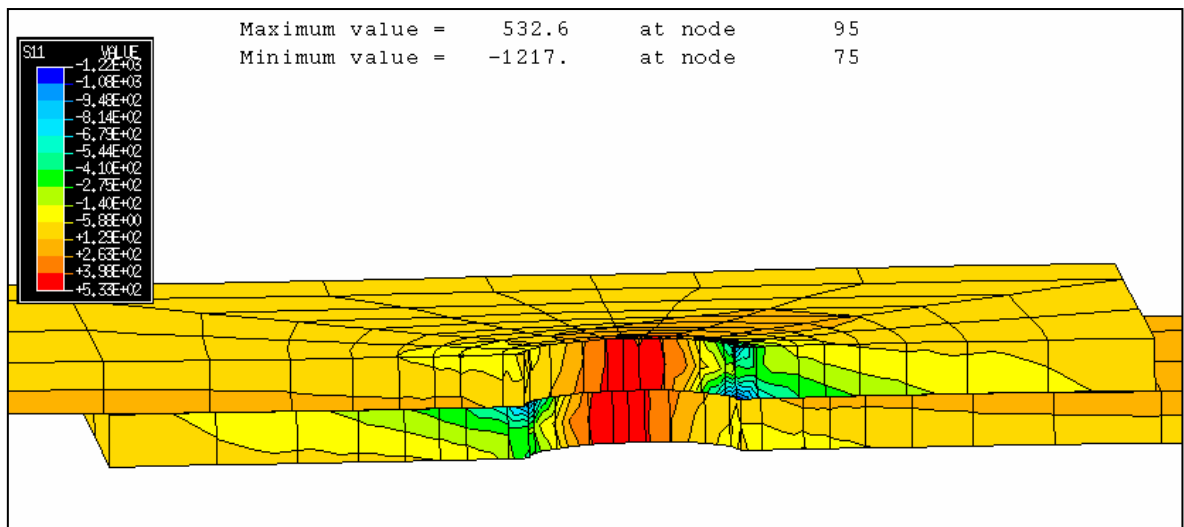
รูปที่ 4.10 การกระจายของความเค้น Von Mises ของรอยต่อ
ในกรณีที่ทากาวอาร์ลไดท์สเตนคาร์ท ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



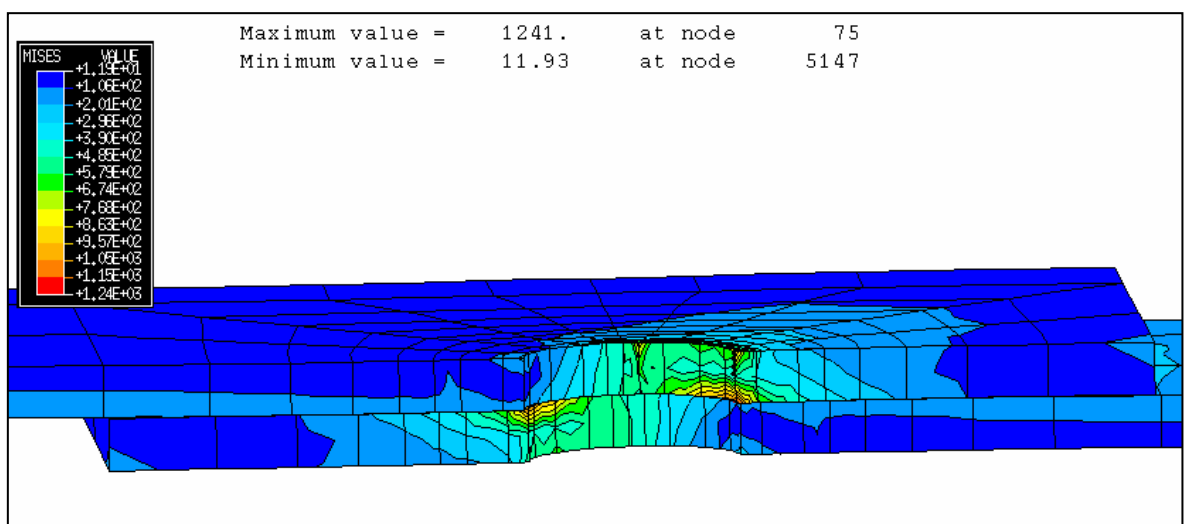
รูปที่ 4.11 การกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ
ในกรณีที่ไม่ทาการ ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



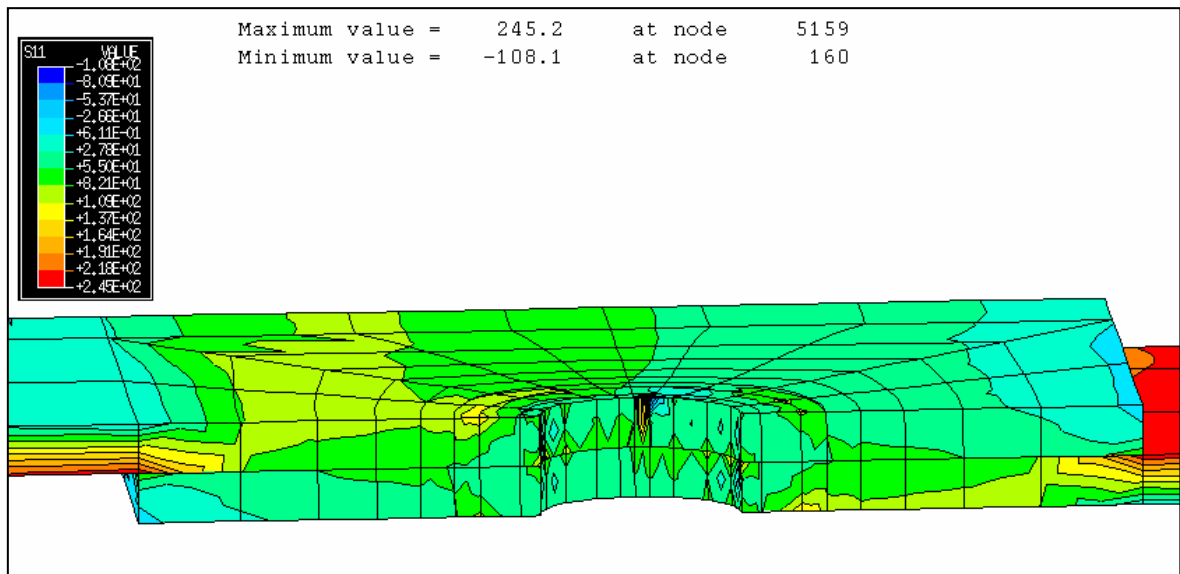
รูปที่ 4.12 การกระจายของความเค้น Von Mises ของรอยต่อ
ในกรณีที่ไม่ทาการ ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



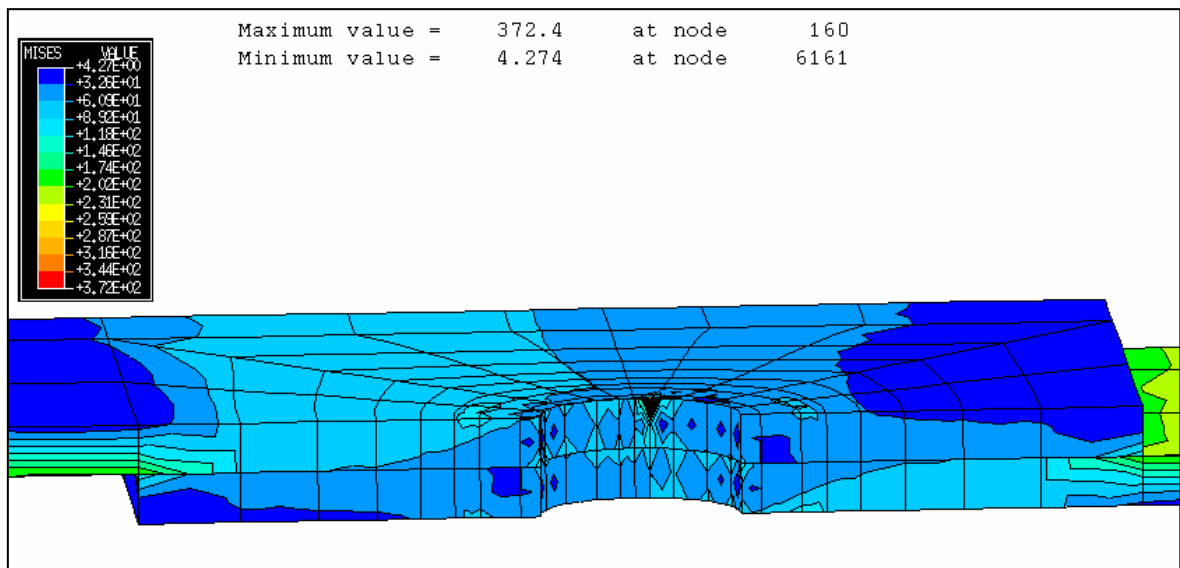
รูปที่ 4.13 การกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ
ในกรณีที่ทำกาอวาล์ไคท์สตีล ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



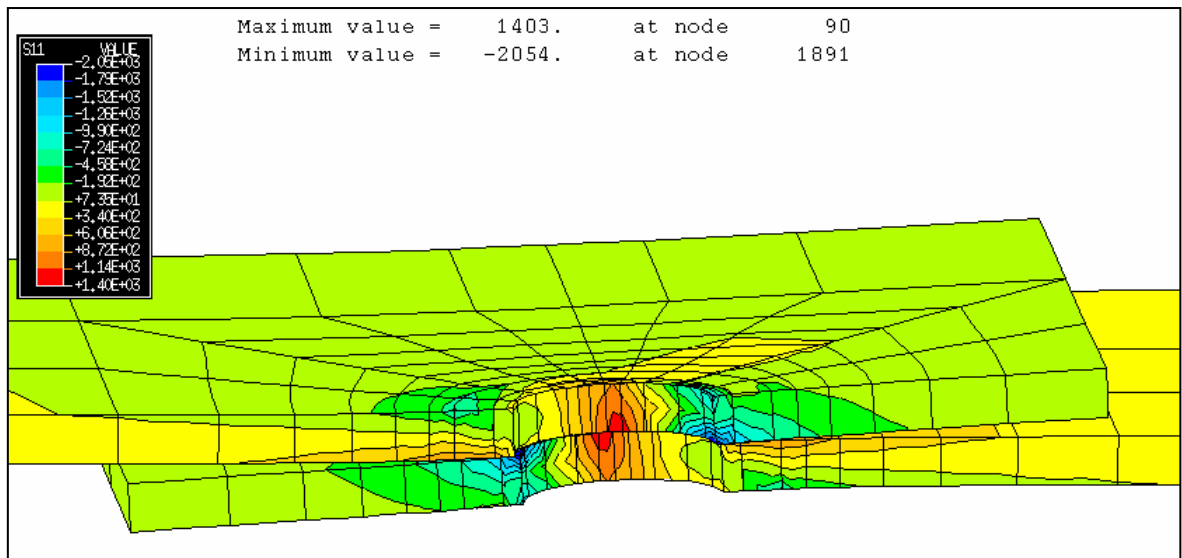
รูปที่ 4.14 การกระจายของความเค้น Von Mises ของรอยต่อ
ในกรณีที่ทำกาอวาล์ไคท์สตีล ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



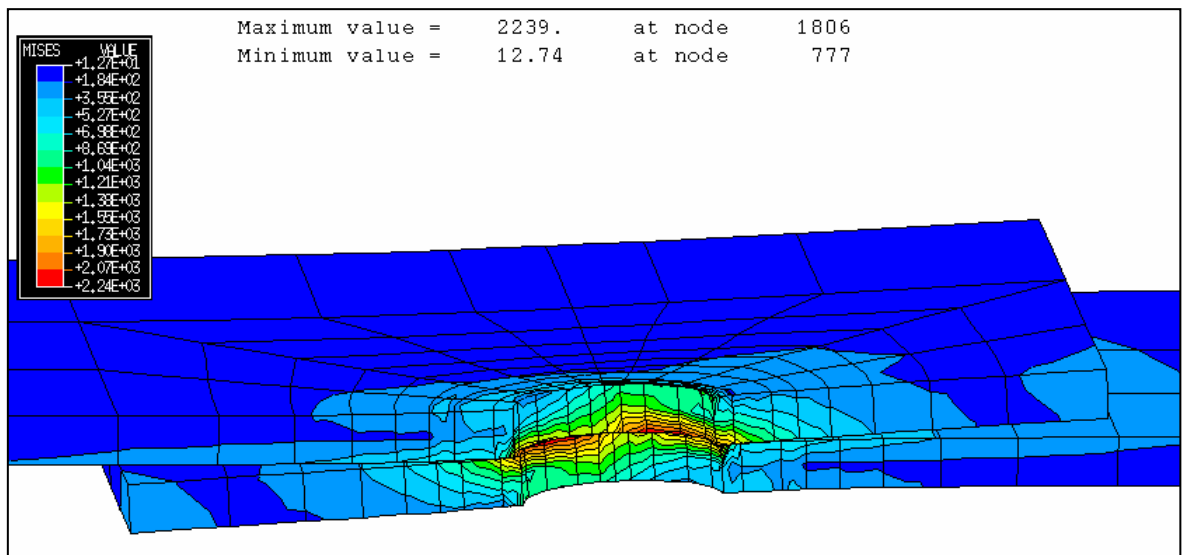
รูปที่ 4.15 การกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ
ในกรณีที่ทากาวอาร์ลไคท์สเตนคาร์ท ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



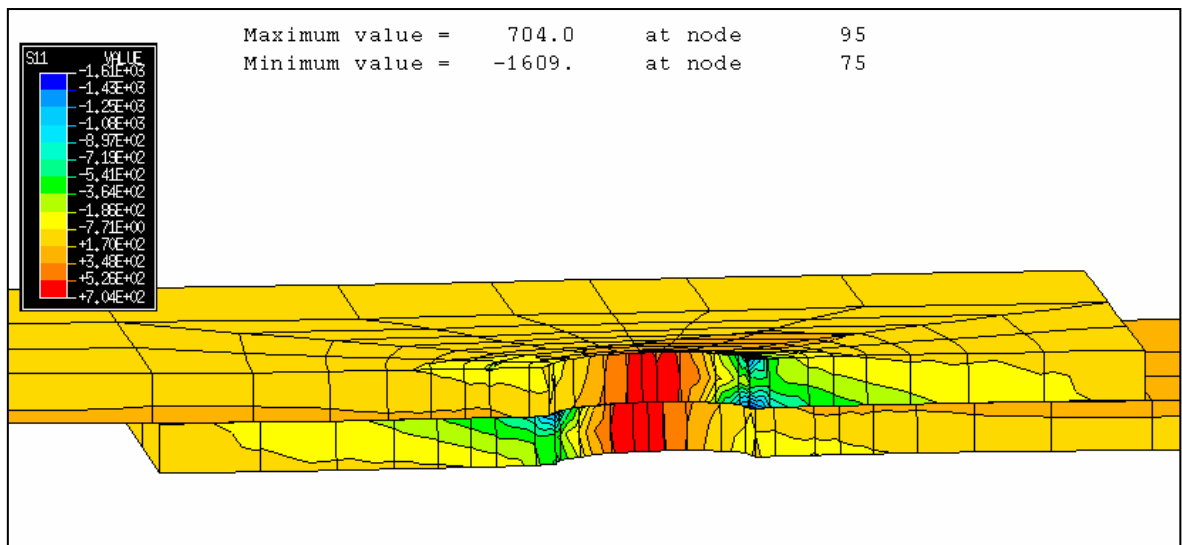
รูปที่ 4.16 การกระจายของความเค้น Von Mises ของรอยต่อ
ในกรณีที่ทากาวอาร์ลไคท์สเตนคาร์ท ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



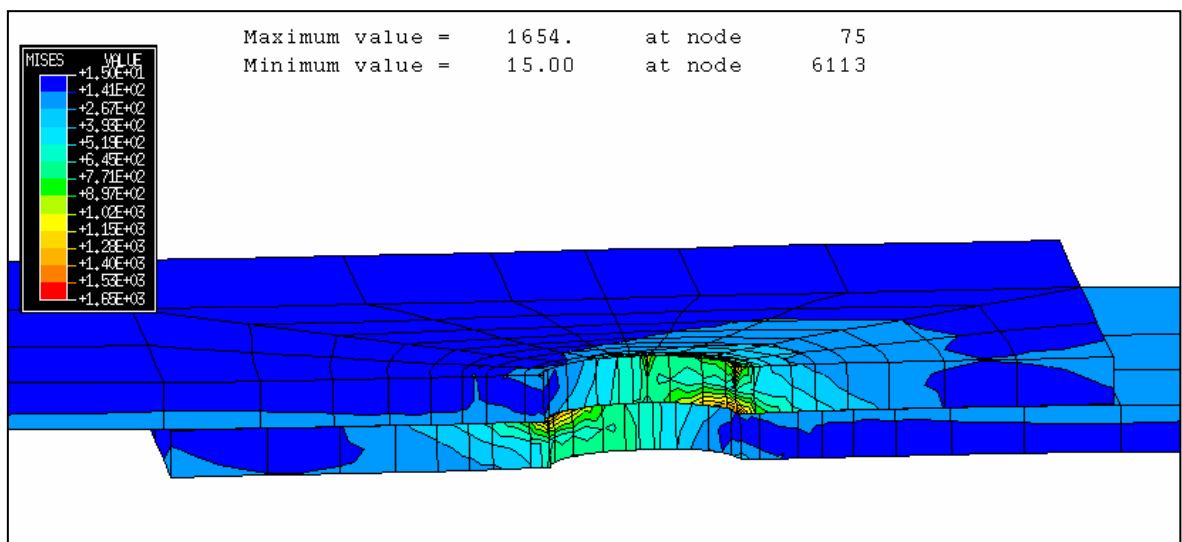
รูปที่ 4.17 การกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ
ในกรณีที่ไม่ทาการ ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



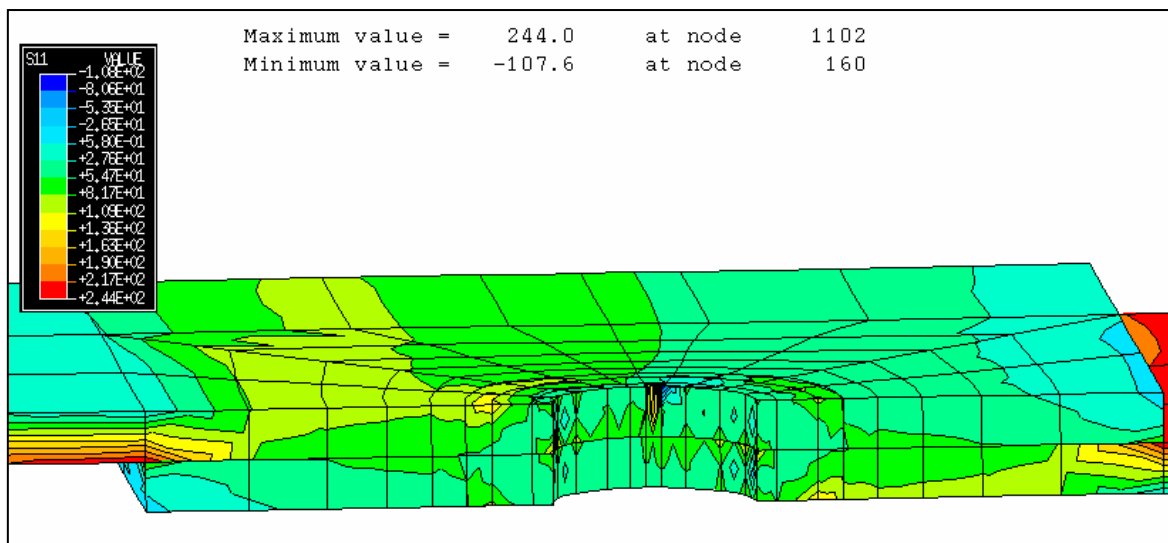
รูปที่ 4.18 การกระจายของความเค้น Von Mises ของรอยต่อ
ในกรณีที่ไม่ทาการ ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



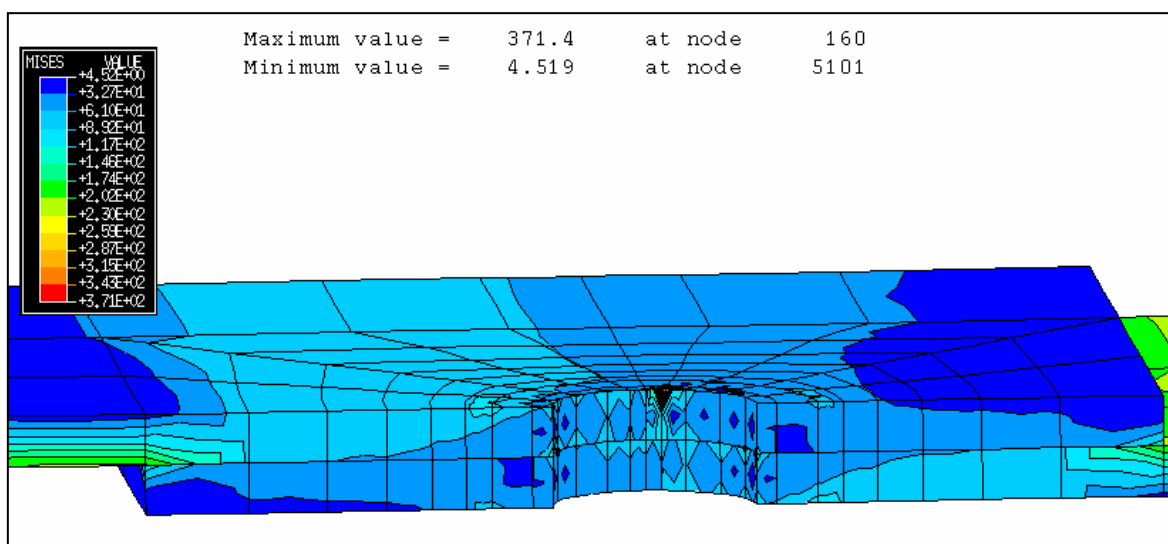
รูปที่ 4.19 การกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ
ในกรณีที่ทำกาอวาล์ดไคท์สตีล ระยะห่างหมุดย้ำเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.20 การกระจายของความเค้น Von Mises ของรอยต่อ
ในกรณีที่ทำกาอวาล์ดไคท์สตีล ระยะห่างหมุดย้ำเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



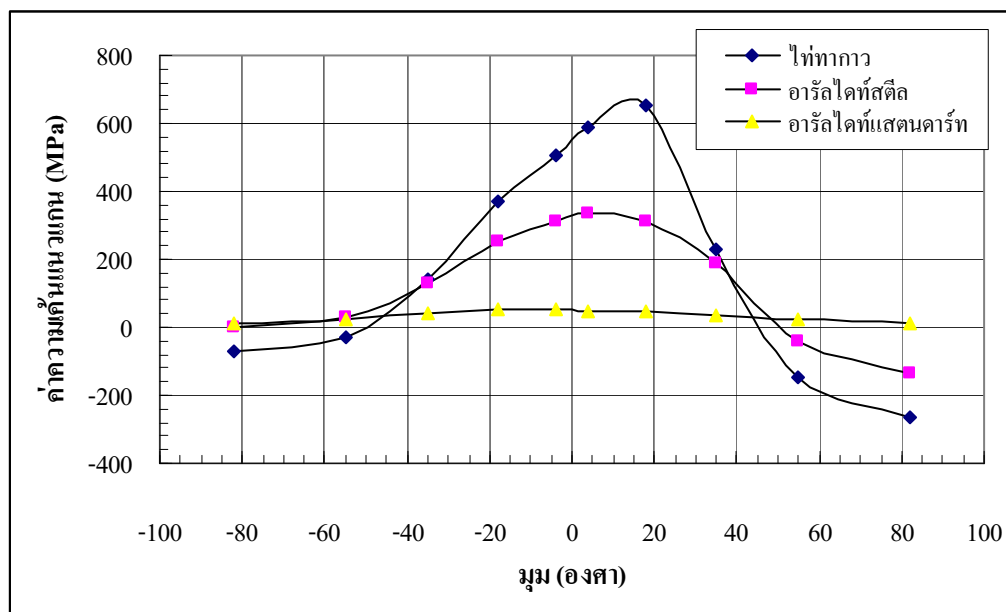
รูปที่ 4.21 การกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ
ในกรณีที่ทากาวอาร์ลไดท์สเตนคาร์ท ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



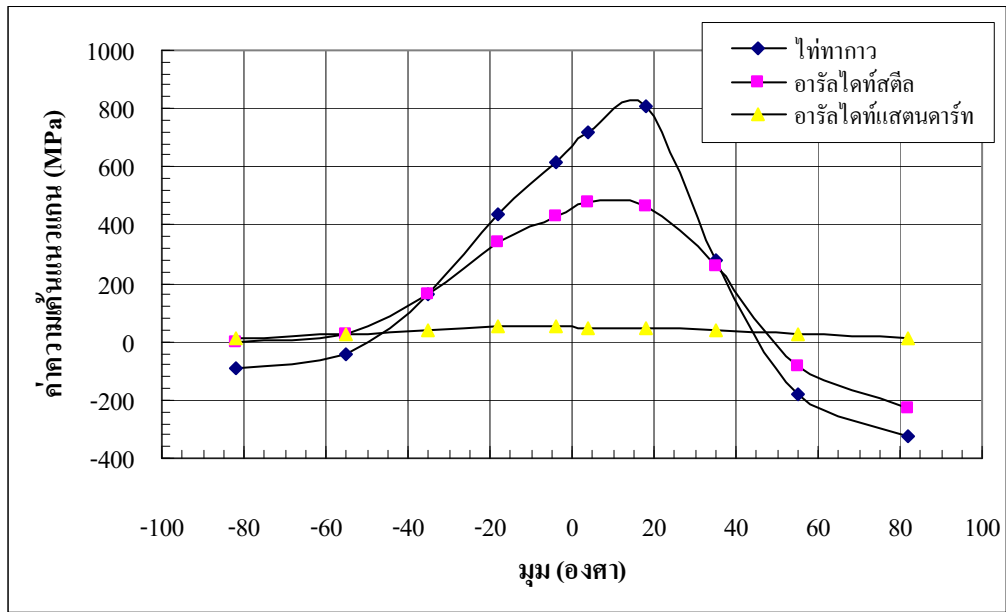
รูปที่ 4.22 การกระจายของความเค้น Von Mises ของรอยต่อ
ในกรณีที่ทากาวอาร์ลไดท์สเตนคาร์ท ระยะห่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.23 ถึง 4.25 แสดงการกระจายของความเค้นที่แนวแกนรอบรูปหมุดย้ำ สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างหมุดย้ำมีค่าเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร 38.1 มิลลิเมตร และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าการกระจายของความเค้นรอบรูปของหมุดย้ำนั้น มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก ความเค้นที่เป็นลักษณะของความเค้นกด ที่บริเวณ 0 และ 90 องศา และ จะมีค่าสูงสุดที่ ประมาณ 5 -10 องศา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Dechwayukul [24] และ Fongsamootr [2]

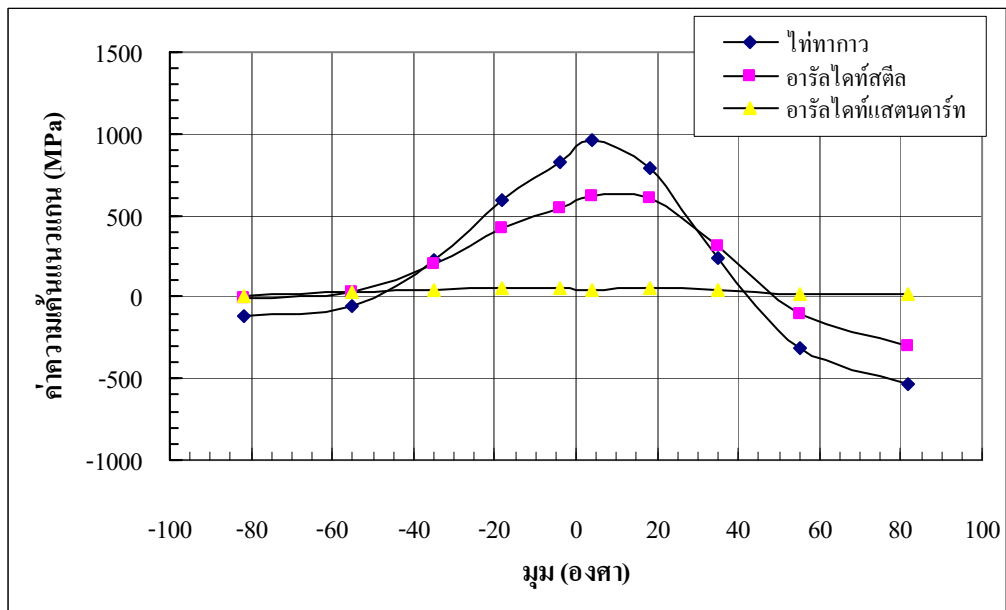
จากผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถบอกได้ว่าเมื่อมีการทากาวที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของชิ้นงาน จะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบรูปหมุดย้ำน้อยลง ในกรณีที่ทากาวอีพ็อกซีเรซินคาร์บ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเกือบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ในทุกค่าของระยะห่างของหมุดย้ำ



รูปที่ 4.23 ค่าความเค้นในแนวแกนรอบรูปหมุดย้ำ
สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.24 ค่าความเค้นในแนวแกนรอบรูปหมุดย้า
สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร

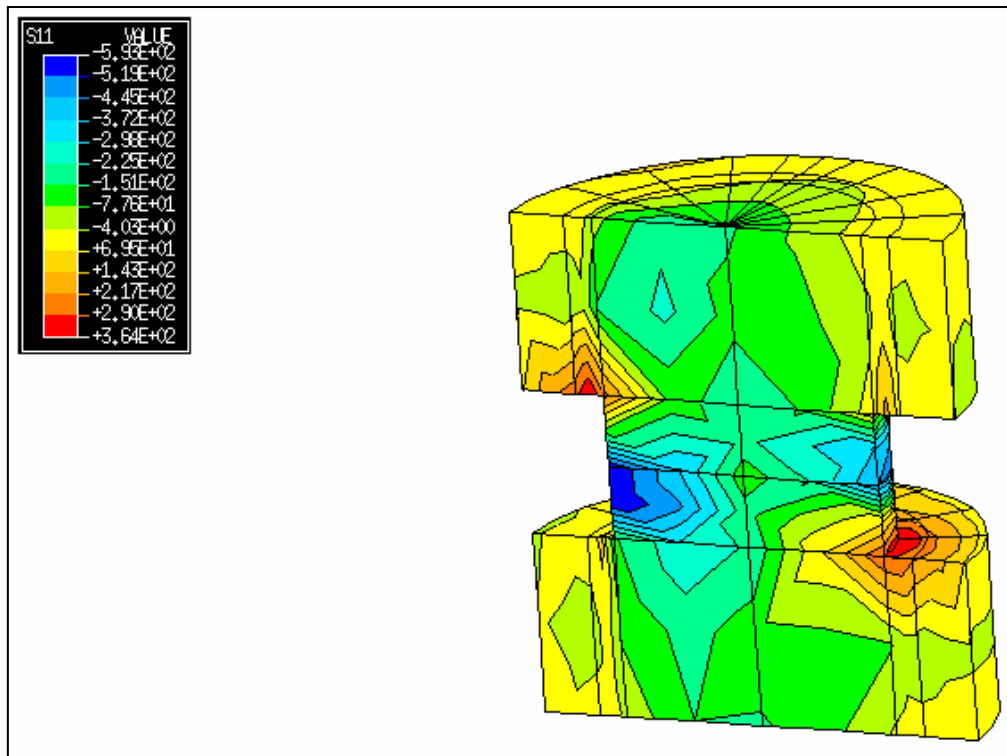


รูปที่ 4.25 ค่าความเค้นในแนวแกนรอบรูปหมุดย้า
สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร

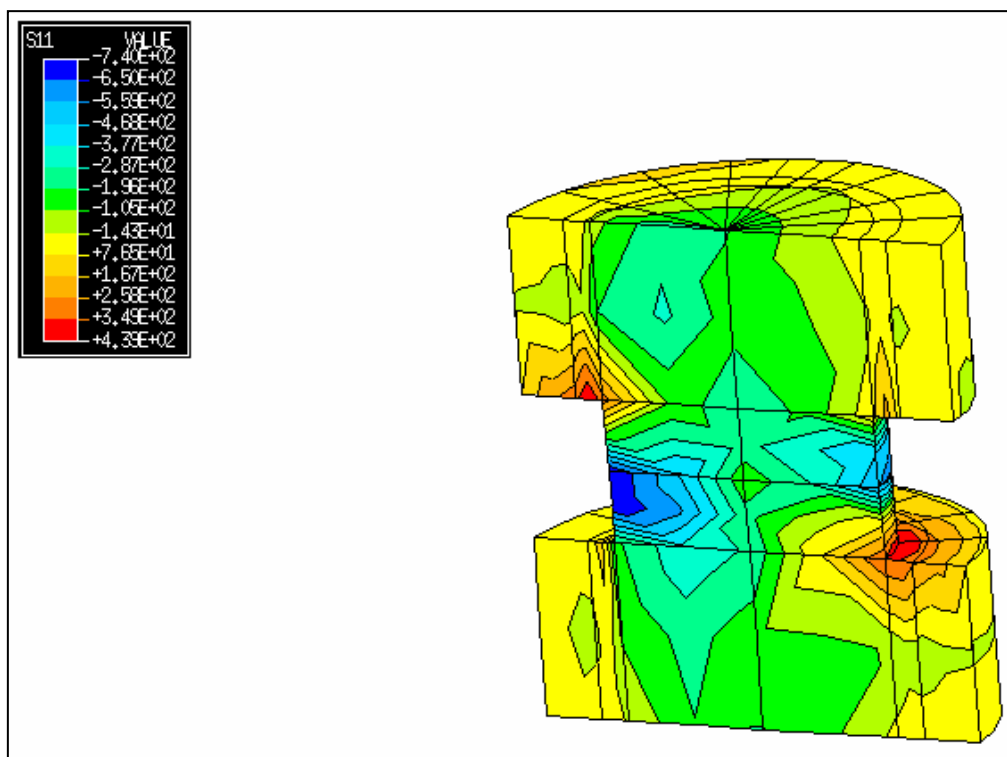
ในการพิจารณาการถ่ายทอดของความเค้นในตัวหมุดย้ำ ซึ่งจะเห็นว่าตัวหมุดย้ำจะถูกระงับทั้งแรงกดและ แรงดึง โดยที่

- รูปที่ 4.26 ถึง 4.28 แสดงการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่ไม่มีการทากาว สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร
- รูปที่ 4.29 ถึง 4.31 แสดงการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่มีการทากาวอารัลไดท์สตีล สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร
- รูปที่ 4.32 ถึง 4.34 แสดงการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่มีการทากาวอารัลไดท์สแตนดาร์ด สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร

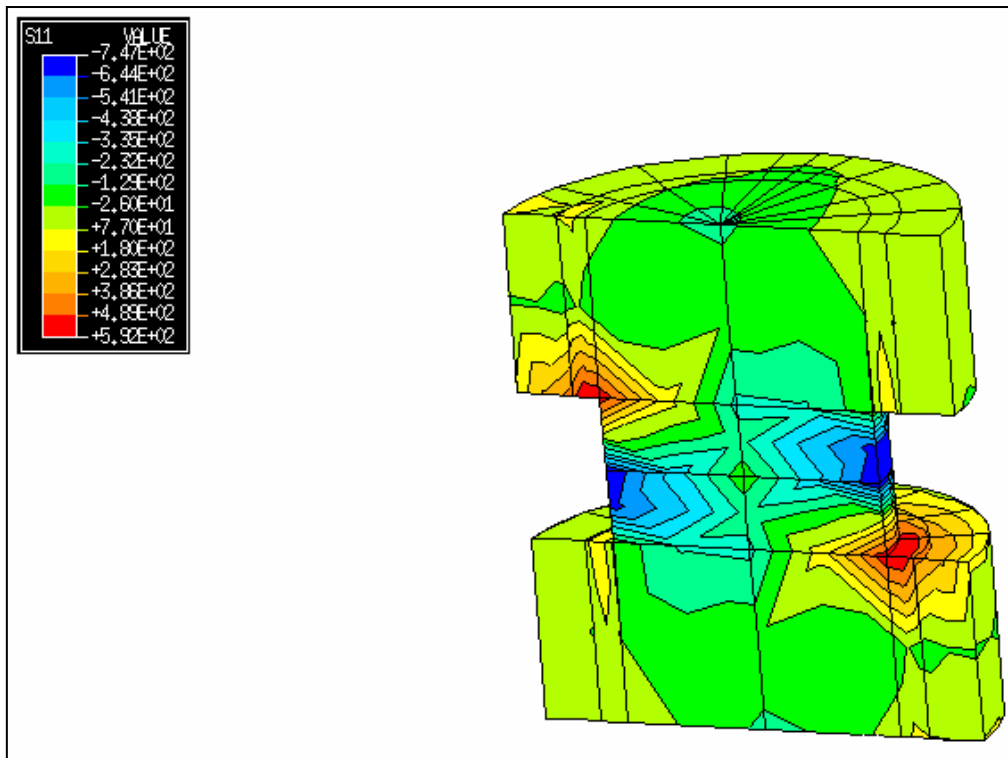
จากรูปการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำอาจสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของการเสียรูปของชิ้นงานรอยต่อได้ ดังนี้ เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้น จะเห็นว่าการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในหมุดย้ำของชิ้นงานที่ไม่มีการทากาวนั้น ค่าความเค้นจะค่อนข้างกระจายตัวไปทั่วทั้งตัวหมุดย้ำ ในขณะที่เมื่อมีการทากาว การกระจายตัวของความเค้นจะแคบลง โดยที่ค่าสูงจะอยู่ที่บางจุด ในขณะที่พื้นที่ส่วนใหญ่ยังคงมีความเค้นกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะในกรณีของชิ้นงานที่ทากาวอารัลไดท์สแตนดาร์ด การกระจายตัวของความเค้นจะมีค่าเท่ากันเสียส่วนใหญ่



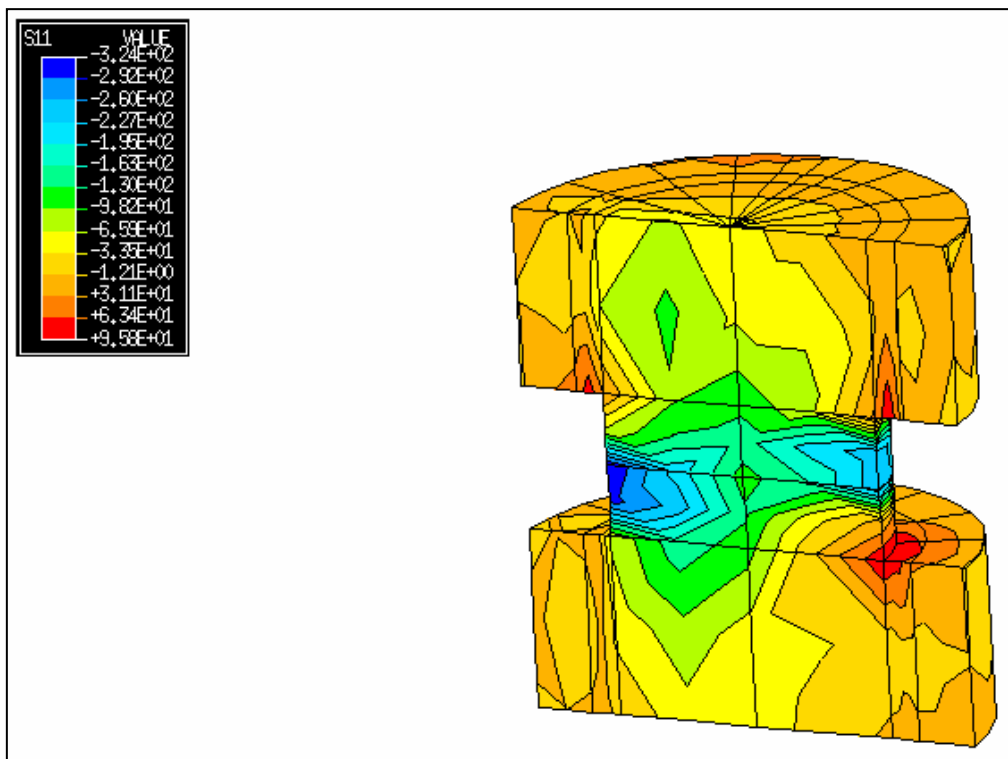
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่ไม่มีการทาการ
สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



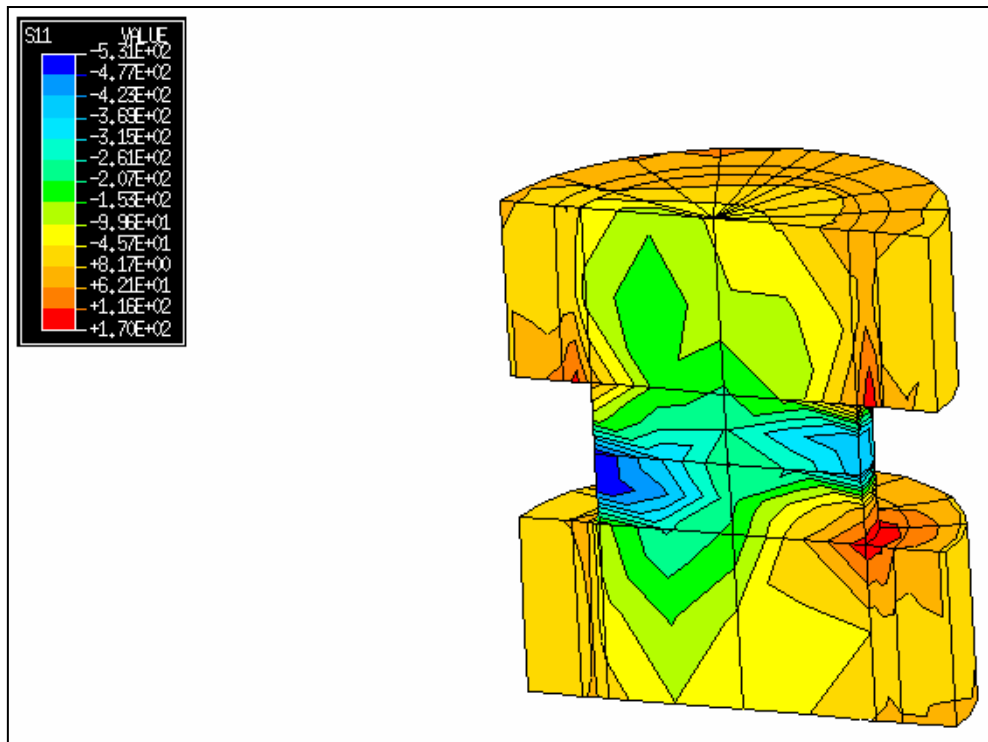
รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่ไม่มีการทาการ
สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



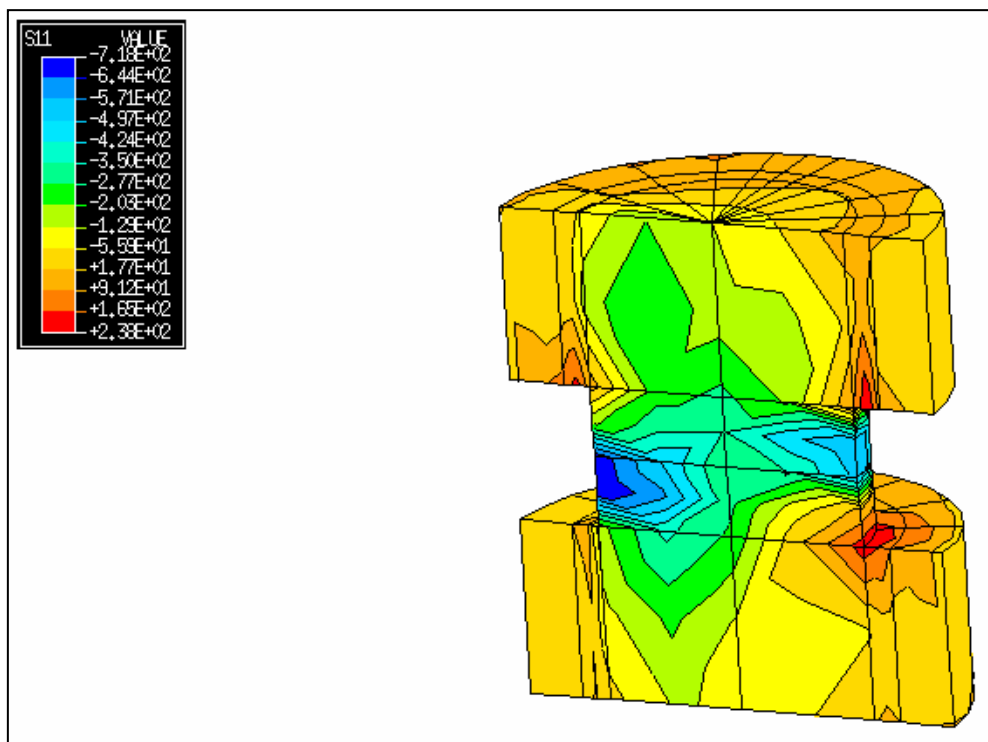
รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่ไม่มีการทากาว สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



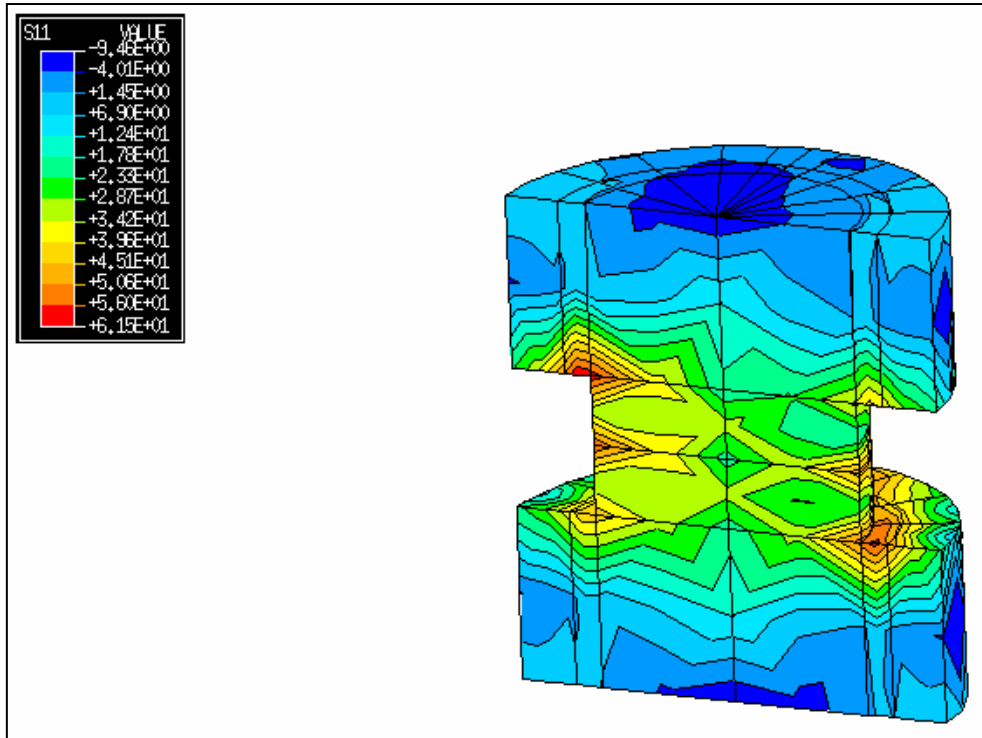
รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่มีการทากาวอาร์ลไดท์ สติล สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



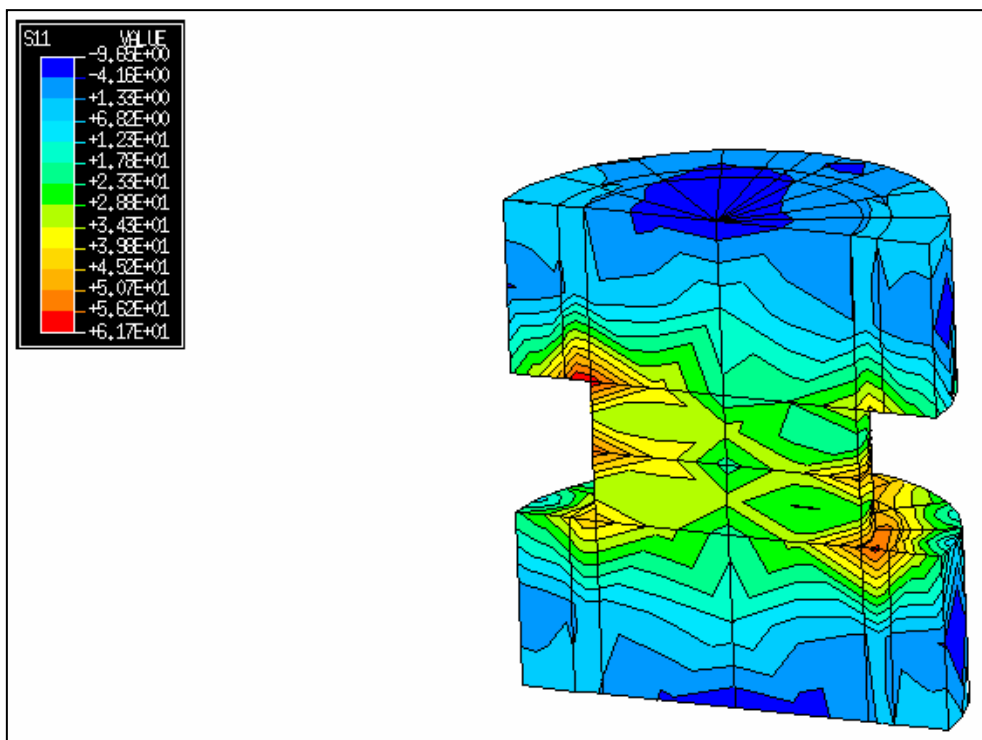
รูปที่ 4.30 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่มีการทากาวอาร์ลไดท์
สตีล สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



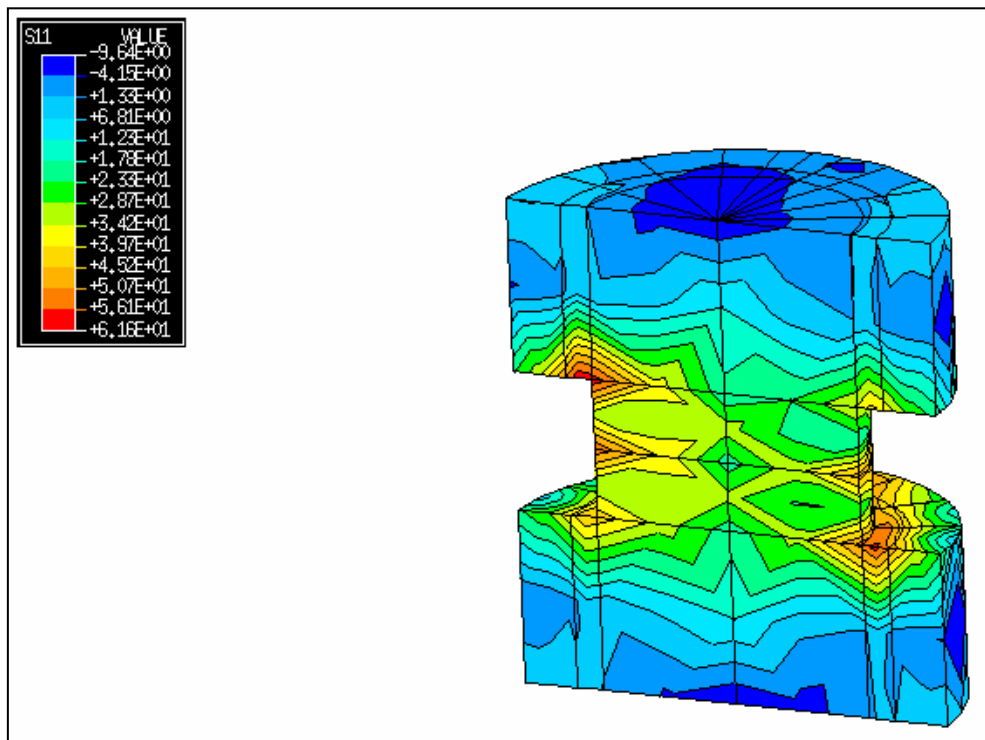
รูปที่ 4.31 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่มีการทากาวอาร์ลไดท์
สตีล สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.32 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้า ในกรณีของรอยต่อที่มีการทาขาวอาร์ล
ไดท์แสดงนคาร์ท สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.33 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้า ในกรณีของรอยต่อที่มีการทาขาวอาร์ล
ไดท์แสดงนคาร์ท สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร

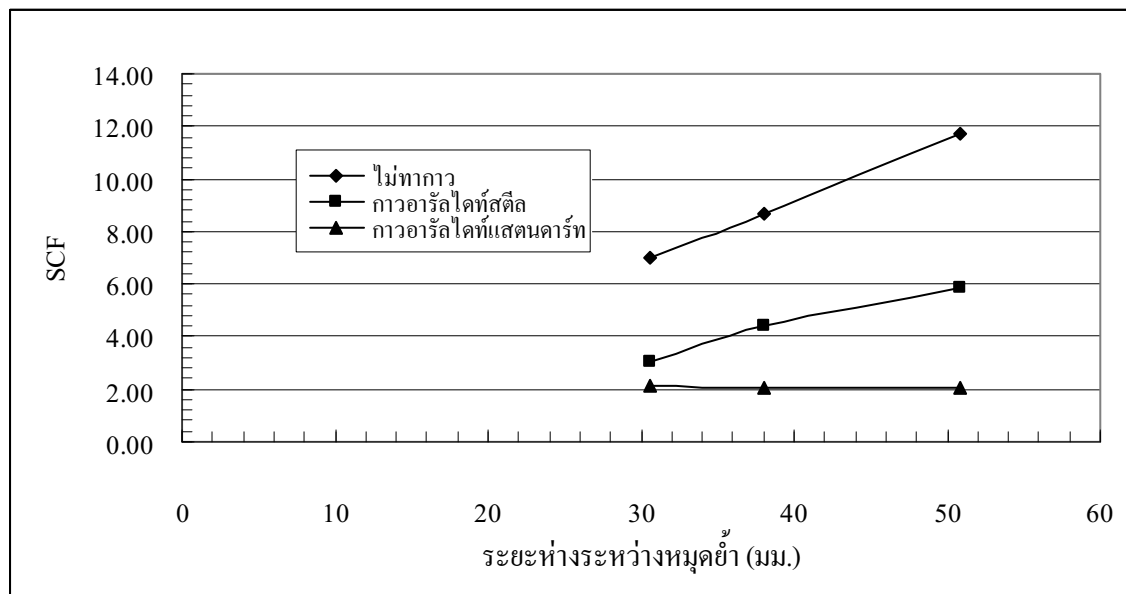


รูปที่ 4.34 การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวหมุดย้ำ ในกรณีของรอยต่อที่มีการทาการอาร์ลโดทส์แสดงนคาร์ท สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร

สุดท้าย จากผลการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ทั้งหมดสามารถนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของความเค้นได้ดังสรุปแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.35 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความหนาแน่นของความเค้น เทียบกับ ประเภทของกาว และ ระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ จากผลที่ได้ นั้นจะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความหนาแน่นของความเค้นสำหรับชิ้นงานทดสอบนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างหมุดย้ำมีค่าลดลง และค่า สัมประสิทธิ์จะมีค่าลดลงเมื่อคุณสมบัติของกาวมีค่าแข็งแรงมากขึ้น แต่ทั้งนี้จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fongsamootr [2] ที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของกาว ค่า สัมประสิทธิ์ความหนาแน่นของความเค้นจะลดลงมาเหลืออยู่ที่ 2 ไม่สามารถลดลงไปอีก

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นของความเค้น (SCF) สำหรับรอยต่อแบบใช้หมุดย้ำ

ประเภทกาว	ระยะห่างหมุดย้ำ (มม)	Max σ_{11} (MPa)	SCF
ไม่ทากาว	30.6	837.2	6.98
กาวอารัลไดท์สตีล	30.6	363.0	3.03
กาวอารัลไดท์สแตนดาร์ด	30.6	254.7	2.12
ไม่ทากาว	38.1	1037.0	8.64
กาวอารัลไดท์สตีล	38.1	532.6	4.44
กาวอารัลไดท์สแตนดาร์ด	38.1	245.2	2.04
ไม่ทากาว	50.8	1403.0	11.69
กาวอารัลไดท์สตีล	50.8	704.0	5.87
กาวอารัลไดท์สแตนดาร์ด	50.8	244.0	2.03



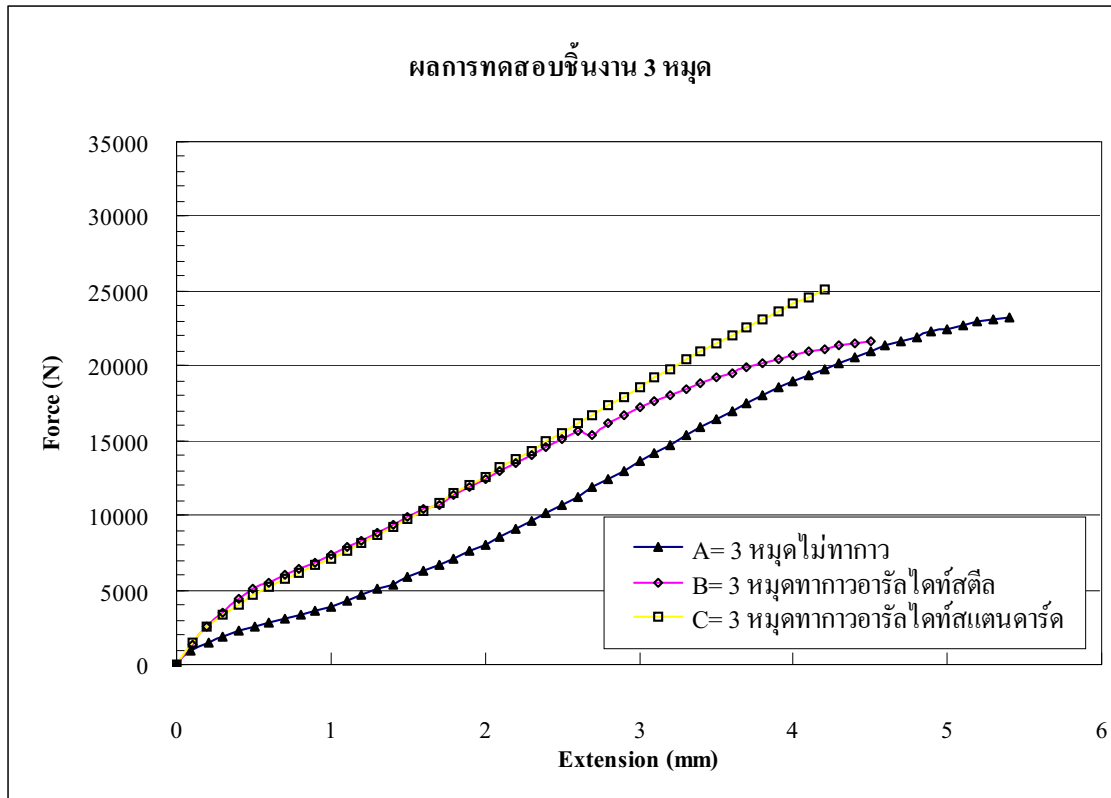
รูปที่ 4.35 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของความเค้นเทียบกับระยะห่างของหมุดย้ำ และประเภทของกาว

4.3. ผลจากการทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง

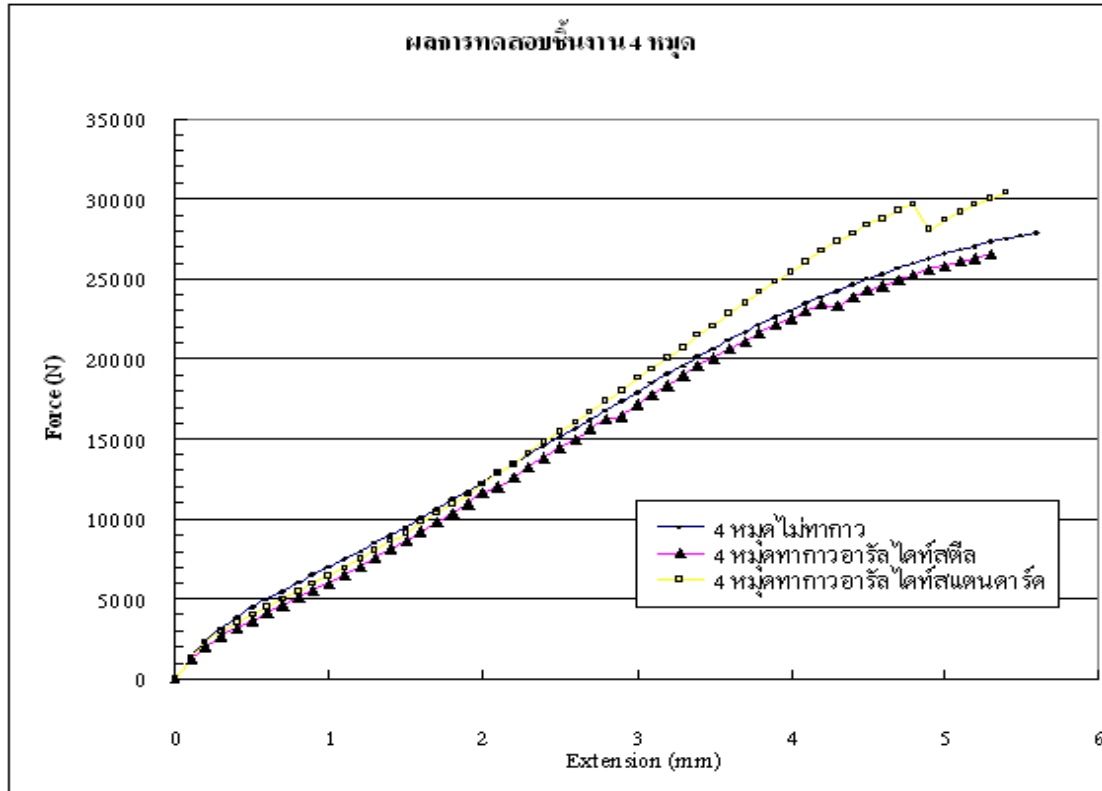
จากการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างในการรับแรงดึงทั้งสิ้น 27 ชิ้นงานตัวอย่าง โดยการทำการเปลี่ยนแปลง 2 ตัวแปร คือ (1) คุณสมบัติของกาว เปลี่ยนแปลง 3 ค่า (ไม่ทา กาว ทากาวอาร์ลไคท์สแตนคราร์ด และ ทากาวอาร์ลไคท์สตีล) และ (2) ระยะห่างของหมุดย้า 3 ค่า (30.6 มิลลิเมตร 38.1 มิลลิเมตร และ 50.8 มิลลิเมตร) โดยทำการทดสอบทุกกรณี รวมทั้งสิ้น 9 กรณี กรณีละ 3 ตัวอย่าง

โดยที่ ในกรณีของ 3 หมุดย้า คือกรณีที่ระยะห่างระหว่างรูหมุดย้ามีค่าเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร และ กรณี 4 หมุดย้า และ กรณี 5 หมุดย้า คือสำหรับ กรณี ระยะห่างระหว่างรูหมุดย้าเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร และ 30.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดูรายละเอียดดังตารางที่ 3.1) หลังจากนั้นทำการประมวลผลเบื้องต้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละกรณี และนำมาเขียนสรุปเป็นกราฟระหว่างแรงที่กระทำ และ ระยะยืดทั้งหมดของรอยต่อ ได้ดังนี้

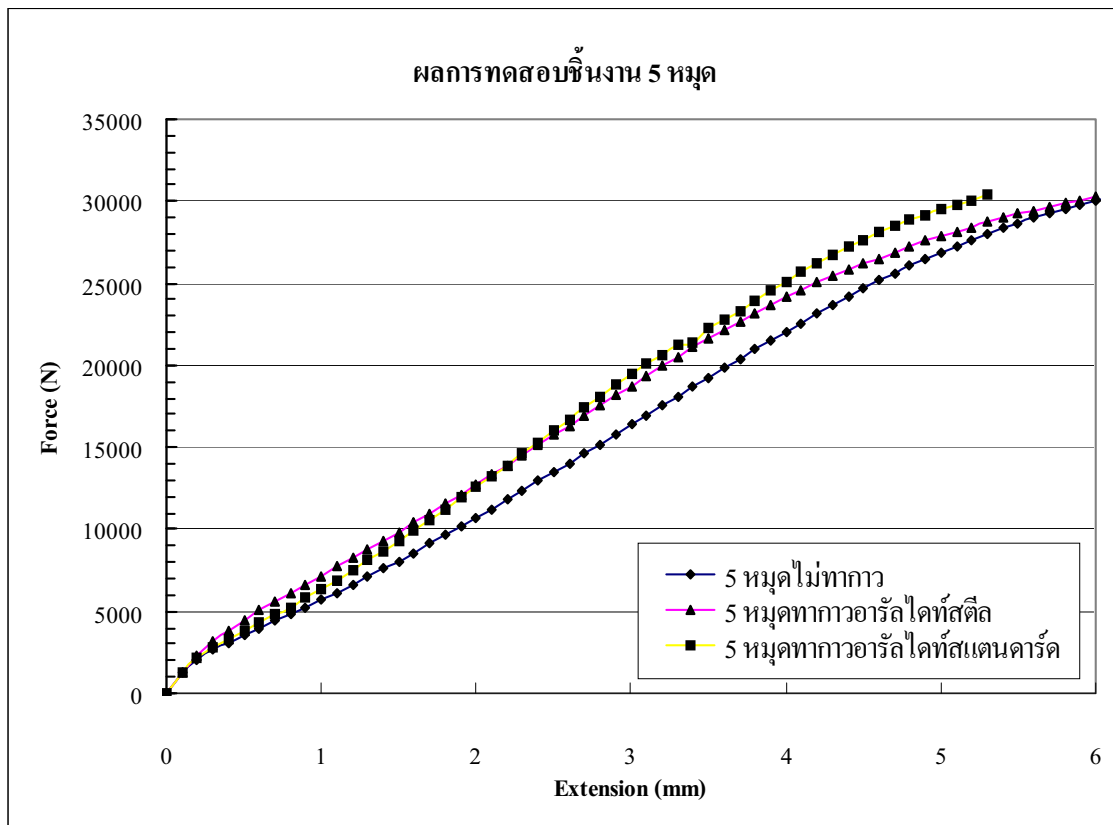
- รูปที่ 4.36 แสดงผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง สำหรับ ระยะห่างหมุดย้า 50.8 มิลลิเมตร
- รูปที่ 4.37 แสดงผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง สำหรับ ระยะห่างหมุดย้า 38.1 มิลลิเมตร
- รูปที่ 4.38 แสดงผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง สำหรับ ระยะห่างหมุดย้า 30.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการยืดของรอยต่อ สำหรับ ระยะห่างหมุดย้ำ 50.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการยืดของรอยต่อ สำหรับ ระยะห่างหมุดย้ำ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการยืดของรอยต่อ สำหรับ ระยะห่างหมุดย้ำ 30.6 มิลลิเมตร

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อมีการทากาวไปที่ชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานตัวอย่างนั้นจะมีค่าความแข็งแรงสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกาวทั้ง 2 ชนิดจะเห็นว่ากาวด้วยกาว อารัลไดท์สแตนดาร์ด จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่ากาวด้วยกาว อารัลไดท์สตีล เนื่องจากคุณสมบัติของกาว จะพบว่ากาวประเภทอารัลไดท์สแตนดาร์ด มีค่าความแข็งแรงมากกว่า กาว อารัลไดท์สตีล และสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวอเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

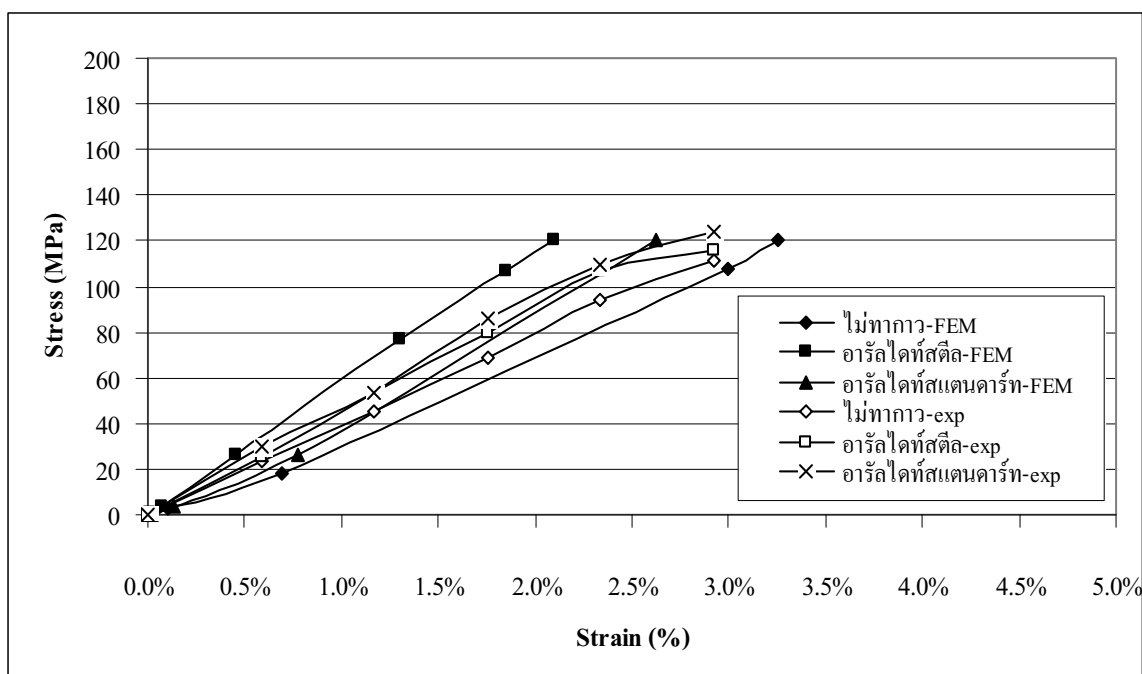
แต่เมื่อพิจารณาการรับแรงดึงสูงสุดในแต่ละชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่าเดิม เมื่อมีการทากาวด้วยกาวอารัลไดท์สแตนดาร์ด จะสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้มีการทากาว แต่ในกรณีที่ทากาวด้วย อารัลไดท์สตีล ความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดกับต่ำกว่ากรณีที่ไม่ทากาว และ ในกรณีที่กาวประเภทเดียวกัน ระยะห่างระหว่างหมุดย้ำที่น้อยจะสามารถรับแรงดึงได้สูงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดึงสูงสุดสำหรับแต่ละชิ้นงานตัวอย่าง และ แรงดึงสูงสุดเฉลี่ยในแต่ละกรณี

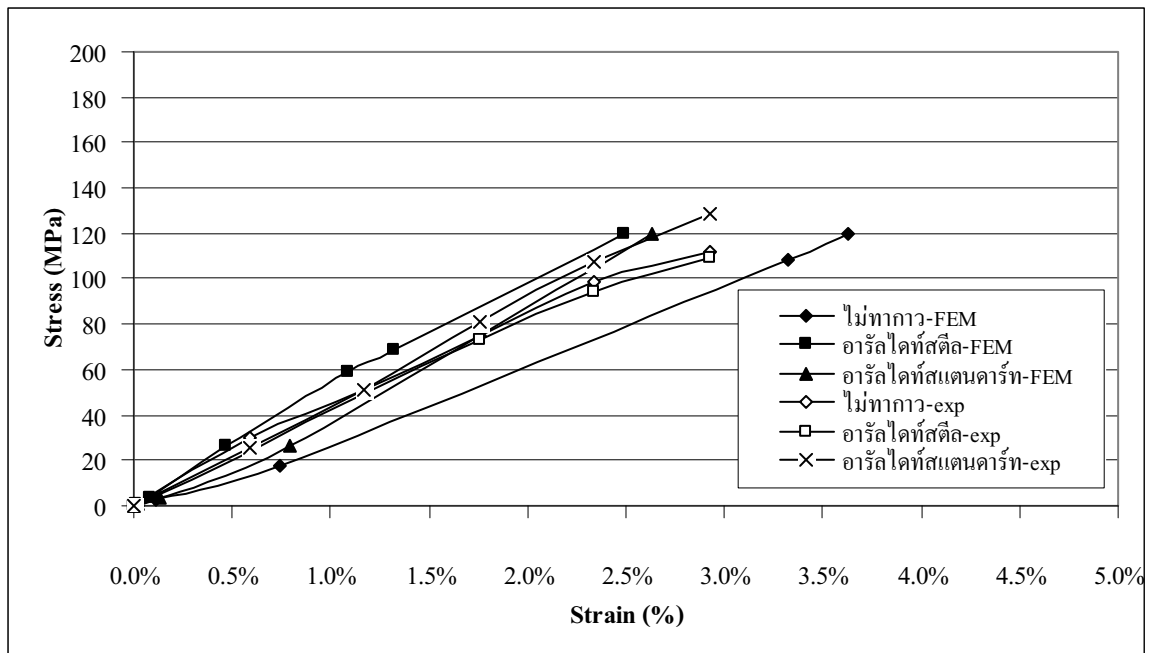
ประเภททากาว	ระยะห่างหมุดยึด	Maximum Load (N)	เฉลี่ย
ไม่ทากาว	50.8	23,675.00	23,387.50
ไม่ทากาว	50.8	-	
ไม่ทากาว	50.8	23,100.00	
กาวอาร์ลไคท์สตีล	50.8	23,300.00	21,908.33
กาวอาร์ลไคท์สตีล	50.8	21,875.00	
กาวอาร์ลไคท์สตีล	50.8	20,550.00	
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	50.8	30,000.00	28,333.33
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	50.8	27,640.00	
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	50.8	27,360.00	
ไม่ทากาว	38.1	26,400.00	28,400.00
ไม่ทากาว	38.1	30,280.00	
ไม่ทากาว	38.1	28,520.00	
กาวอาร์ลไคท์สตีล	38.1	25,320.00	26,973.33
กาวอาร์ลไคท์สตีล	38.1	29,240.00	
กาวอาร์ลไคท์สตีล	38.1	26,360.00	
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	38.1	28,920.00	31,573.33
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	38.1	31,800.00	
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	38.1	34,000.00	
ไม่ทากาว	30.6	29,720.00	31,866.67
ไม่ทากาว	30.6	30,800.00	
ไม่ทากาว	30.6	35,080.00	
กาวอาร์ลไคท์สตีล	30.6	32,000.00	30,893.33
กาวอาร์ลไคท์สตีล	30.6	31,680.00	
กาวอาร์ลไคท์สตีล	30.6	29,000.00	
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	30.6	30,280.00	31,786.67
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	30.6	31,200.00	
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	30.6	33,880.00	

4.4. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

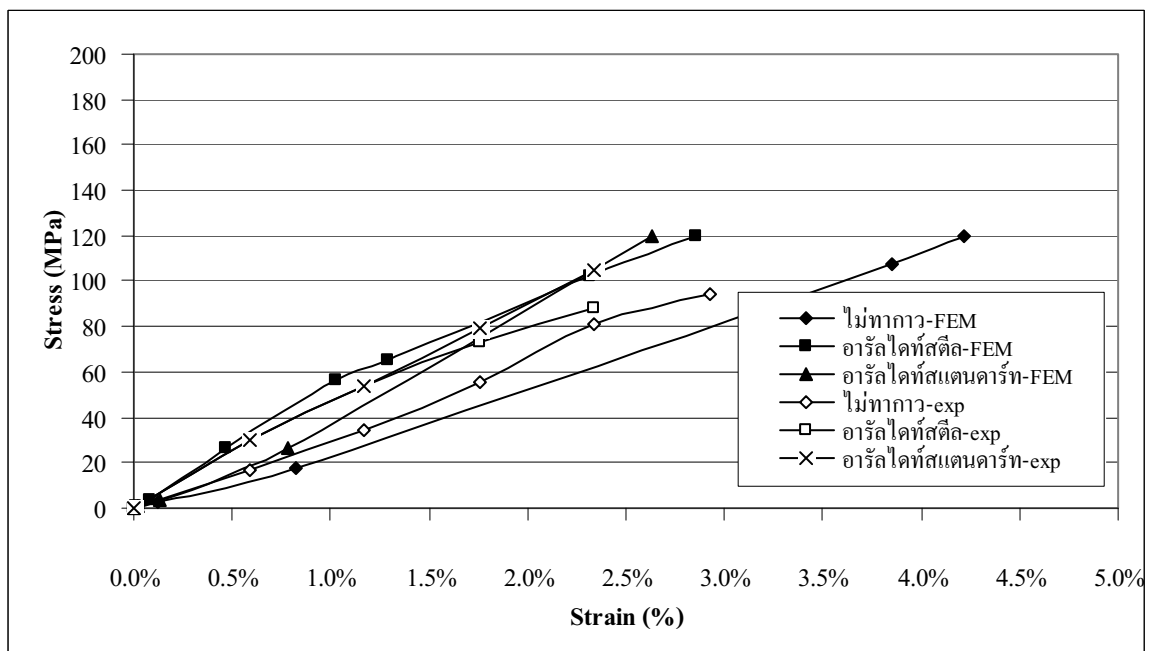
ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลเพื่อเป็นการยืนยันคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคอมพิวเตอร์ โดยจะทำการเปรียบเทียบผลระหว่าง ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจากทั้งสองวิธี รูปที่ 4.39 ถึง 4.41 แสดงผังความเค้นและความเครียด สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างหมุดย่ำเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร 38.1 มิลลิเมตร และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ และสุดท้ายตารางที่ 4.6 สรุปค่าความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.39 ผังความเค้นและความเครียด กรณีระยะห่างระหว่างหมุดย่ำเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.40 พังความเค้นและความเครียด กรณีระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.41 พังความเค้นและความเครียด กรณีระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดระหว่างผลที่ได้จากการทดสอบและ วิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

ประเภทกาว	ระยะระหว่างหมุดยึด (มม.)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (@ Stress = 80 MPa)
ไม่ทา กาว	30.6	13%
ไม่ทา กาว	38.1	32%
ไม่ทา กาว	50.8	26%
กาวอาร์ลไคท์สดีล	30.6	18%
กาวอาร์ลไคท์สดีล	38.1	16%
กาวอาร์ลไคท์สดีล	50.8	15%
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	30.6	6%
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	38.1	6%
กาวอาร์ลไคท์สแตนดาร์ด	50.8	6%

บทที่ 5

วิจารณ์ผล

DISCUSSION

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดได้แสดงถึงผลของชั้นกาวบางที่มีต่อพฤติกรรมเชิงกลของรอยต่อแบบใช้หมุดยัดได้แสดงไว้ในบทที่ 4 นั้น สามารถพอที่จะสรุปได้ดังนี้คือ เมื่อมีการทา กาวบางใน ชิ้นงานแล้ว ทำให้ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานมีค่าลดลง โดยที่ จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของชั้น กาวที่ป้อนเข้าไป โดยที่เมื่อทาด้วยกาวอีพ็อกซีเรซิน ทำให้ความเค้นสูงสุดลดลงถึง 51.1% 35.5% และ 26.1% สำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยัดเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ และ เมื่อมีการทาด้วยกาวอีพ็อกซีเรซิน ทำให้ค่าความเค้นสูงสุดลดลงประมาณ 76.1% 80.6% และ 83.4% สำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยัดเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยที่ การลดลงของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานนั้นสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากการลดการแอ่น ของรอยต่อ โดยที่ค่าที่สามารถบ่งบอกถึงการแอ่นของรอยต่อ อาจจะดูได้จากผลการวิเคราะห์ทาง คอมพิวเตอร์โดยตรง แต่ในงานนี้จะดูที่มุมเอียงของหมุดยัด และ ค่าระยะเปิดของปลายรอยต่อ

เริ่มต้นจะพิจารณามุมเอียงของหมุดยัด โดยที่เมื่อดูจากผลการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ พบว่า เมื่อมีการทาด้วยกาวอีพ็อกซีเรซิน มุมเอียงของหมุดยัดลดลงประมาณ 42.1% 35.5% และ 37.5% สำหรับ ชิ้นงานที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยัดเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ และ เมื่อมีการทา ด้วยกาวอีพ็อกซีเรซิน มุมเอียงของหมุดยัดลดลงประมาณ 71.9% 74.2% และ 77.8% สำหรับ ชิ้นงานที่มีระยะห่างระหว่างหมุดยัดเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยที่การเอียงของ หมุดยัดจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการแอ่นของรอยต่อ ซึ่งถ้าหมุดยัดมีการบิดตัวน้อยลง แสดงว่าชิ้นงานมีการ แอ่นตัวน้อยลง และเมื่อการแอ่นตัวน้อยลง ก็จะส่งผลทำให้ความเค้นที่จะเกิดขึ้นในชิ้นงานมีค่าลดลงตามไป ด้วย เนื่องจากจะเหลือเพียงแค่แรงในแนวแกนเท่านั้น ซึ่งจากผลที่ได้รับได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการทา ด้วยชั้นกาวทำให้ชิ้นงานมีการแอ่นตัวลดลง โดยที่เมื่อเพิ่มความแข็งแรงของชั้นกาว ส่งผลทำให้การแอ่น ตัวของรอยต่อจะมีค่าลดลง

และเมื่อพิจารณาค่าระยะเปิดของปลายรอยต่อ ก็จะไปในทิศทางเดียวกันกับมุมเอียงของหมุดยัด คือ เมื่อมีการทาด้วยกาวประเภท อีพ็อกซีเรซิน ค่าระยะเปิดของปลายรอยต่อจะลดลงถึง 96% และ เมื่อ มีการทาด้วยกาว อีพ็อกซีเรซิน ค่าระยะเปิดของปลายรอยต่อสามารถลดลงถึง 99.5% ซึ่งนั่น หมายความว่าชิ้นงานจะยึดแผ่นอลูมิเนียมทั้งสองไว้ด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานทั้งสองเปรียบเสมือนเป็น ชิ้นงานเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลทำให้การแอ่นตัวของชิ้นงานมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาถึงการรับแรง ช้ำ ๆ หรือ

การทนต่อการล้าของชิ้นงานที่มีการทาผิวทั้งสองประเภทนี้ ก็จะสามารถลดการเกิด fretting ลงได้ เนื่องจากการเลื่อนไถลระหว่างชิ้นงานจะมีค่าน้อยลง

ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของความเค้น ยังชี้ให้เห็นว่า ในกรณีที่ไม้ทาผิวและ ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตรนั้น สัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่นของความเค้นจะอยู่ที่ 6.9 ซึ่งใกล้เคียงกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา และในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างหมุดยึดออกไป ก็ทำให้สัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่นของความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น เป็น 8.64 และ 11.69 สำหรับ ระยะห่างของหมุดยึดเท่ากับ 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อชิ้นงานเมื่อมีการรับแรง เนื่องจากความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น ในกรณีของระยะห่างเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร จะมีค่าสูงถึง 2 เท่าของกรณีที่ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร แต่เมื่อมีผิวทาผิวทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่นของความเค้นลดลง เช่น กรณีของผิวอาร์ลไดท์สตีล ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่นของความเค้นลดลงเป็น 3.03 4.44 และ 5.87 สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ากรณีนี้ความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีของระยะห่างเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร ยังมีค่าน้อยกว่ากรณีของไม้ทาผิวและมีระยะห่างของหมุดยึดเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร นั้นหมายความว่าเราสามารถลดจำนวนหมุดยึดได้ โดยที่ชิ้นงานยังสามารถรับภาระเดิมได้ และสุดท้ายกรณีทาผิวด้วยผิวอาร์ลไดท์สตีล จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่นของความเค้น ทั้งสามค่าของระยะห่างระหว่างหมุดยึดมีค่าประมาณ 2 ทุกกรณี ซึ่งหมายความว่าไม่ว่าจะใส่หมุดยึดเท่าไรก็ตามค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความเค้นที่ใส่เข้าไป

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์ พบว่ามีค่าอยู่ที่ 6% 15% และ 30% สำหรับกรณีทาผิวด้วยผิวอาร์ลไดท์สตีล ทาผิวอาร์ลไดท์สตีล และ ในกรณีที่ไม้ทาผิว ซึ่งจะเห็นว่าในกรณีที่ทาผิวด้วยผิวอาร์ลไดท์สตีลเนื่องจากผิวจะช่วยลดผลของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากผลของการจับชิ้นงานก่อนการทดสอบ ในขณะที่กรณีที่ไม้ทาผิว นั้นผลของโมเมนต์ดัดในช่วงเวลาจับชิ้นงานก่อนทดสอบน่าจะมีส่วนมาทำให้ค่าทดสอบที่ได้มีค่าผิดพลาดมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ก็น่าจะนำไปใช้งานต่อไปได้

การประเมินอายุการทนต่อการล้าสำหรับชิ้นงานรอยต่อแบบใช้หมุดยึดนั้น โดยใช้หลักการดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 ไปแล้วนั้น ตารางที่ 5.1 แสดงค่าการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นงานเมื่อรับแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 60 MPa

ตารางที่ 5.1 ผลการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นงานรอยต่อที่รับแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 60 MPa

ประเภทกาว	ระยะระหว่างหมุดย้ำ (มม.)	ความเค้นสูงสุดที่ เกิดขึ้น (MPa)	ความคงทนต่อการล้า โดยประมาณ (รอบ)
ไม่ทา กาว	30.6	418.60	20,000
ไม่ทา กาว	38.1	518.50	4,000
ไม่ทา กาว	50.8	701.50	200
กาวอีพ็อกซีเรซิน	30.6	181.50	ทนได้ไม่จำกัด
กาวอีพ็อกซีเรซิน	38.1	266.30	1,000,000
กาวอีพ็อกซีเรซิน	50.8	352.00	100,000
กาวอีพ็อกซีเรซิน	30.6	127.35	ทนได้ไม่จำกัด
กาวอีพ็อกซีเรซิน	38.1	122.60	ทนได้ไม่จำกัด
กาวอีพ็อกซีเรซิน	50.8	122.00	ทนได้ไม่จำกัด

จากผลการประมาณค่าความคงทนต่อการล้า จะเห็นว่าเมื่อมีการทา กาวในชิ้นงานรอยต่อแล้วทำให้อายุการใช้งานนั้นสูงขึ้น และโดยเฉพาะถ้าทาด้วยกาวอีพ็อกซีเรซิน จะเห็นว่าชิ้นงานสามารถรับแรงซ้ำ ๆ ได้ไม่จำกัดจำนวนรอบ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ว่าผลที่ได้นี้เป็นเพียงการประมาณค่าเพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการทดสอบ เช่นถ้าจำเป็นต้องทดสอบ 1 ล้านรอบ ซึ่งหมายถึง 11.5 วัน ซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองเวลา

บทที่ 6

สรุปผล

SUMMARY

1. เมื่อมีการทากาวบางในชิ้นงานแล้ว ทำให้ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานมีค่าลดลง โดยที่ จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของชั้นกาวที่ป้อนเข้าไป โดยที่การลดลงของความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงานนั้นสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากการลดการแอ่นของรอยต่อ โดยที่เมื่อเพิ่มความ แข็งแรงของชั้นกาว ส่งผลทำให้การแอ่นตัวของรอยต่อจะมีค่าลดลง
2. เมื่อมีการทาด้วยกาวอาร์ลไคท์สตีล มุมเอียงของหมุดย้าลดลงประมาณ 42.1% 35.5% และ 37.5% สำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ และ เมื่อมีการทาด้วยกาวอาร์ลไคท์ แสตนดาร์ท มุมเอียงของหมุดย้าลดลงประมาณ 71.9% 74.2% และ 77.8% สำหรับชิ้นงานที่มีระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 30.6 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ
3. เมื่อมีการทาด้วยกาวประเภท อาร์ลไคท์สตีล ค่าระยะเปิดของปลายรอยต่อจะลดลงถึง 96% และ เมื่อมีการทาด้วยกาว อาร์ลไคท์ แสตนดาร์ทค่าระยะเปิดของปลายรอยต่อสามารถลดลงถึง 99.5% ซึ่งนั่นหมายความว่าชั้นกาวจะยึดแผ่นอลูมิเนียมทั้งสองไว้ด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานทั้งสอง เปรียบเสมือนเป็นชิ้นงานเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลทำให้การแอ่นตัวของชิ้นงานมีค่าลดลง
4. จากผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของความเค้น ยังชี้ให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างหมุด ย้าออกไป ในกรณีที่ไม่ทากาว ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่นของความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 6.8 เป็น 8.64 และ 11.69 สำหรับ ระยะห่างของหมุดย้าเพิ่มขึ้นจาก 30.6 เป็น 38.1 และ 50.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ
5. เมื่อมีทาด้วยกาวทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่นของความเค้นลดลง ซึ่งจะเห็นว่ากรณีนี้ ความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีของระยะห่างเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร ยังมีค่าน้อยกว่ากรณีของไม่ทากาว และมีระยะห่างของหมุดย้าเท่ากับ 30.6 มิลลิเมตร นั้นหมายความว่าเราสามารถลดจำนวนหมุดย้า ลงได้ โดยที่ชิ้นงานยังสามารถรับภาระเดิมได้
6. กรณีทาด้วยกาวอาร์ลไคท์ แสตนดาร์ท จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ค่าความหนาแน่นของความเค้น ทั้ง สามค่าของระยะห่างระหว่างหมุดย้ามีค่าประมาณ 2 ทุกกรณี ซึ่งหมายความว่าไม่ว่าจะใส่หมุดย้า เท่าไรก็ตามค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความเค้นที่ใส่เข้าไป
7. จากผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทาง คอมพิวเตอร์ พบว่ามีค่าอยู่ที่ 6% 15% และ 30% สำหรับกรณีทาด้วยกาวอาร์ลไคท์ แสตนดาร์ท กาว อาร์ลไคท์สตีล และ ในกรณีที่ไม่ทากาว ซึ่งจะเห็นว่าในกรณีที่ทาด้วยกาวมีค่าผิดพลาดน้อย

เนื่องจากกาวจะช่วยลดผลของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากผลของการจับชิ้นงานก่อนการทดสอบ ในขณะที่กรณีที่ไม่ทาากาวนั้นผลของโมเมนต์ดัดในช่วงเวลาจับชิ้นงานก่อนทดสอบน่าจะมีส่วนมา ทำให้ค่าทดสอบที่ได้มีค่าผิดพลาดมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ก็ยังน่าจะนำไปใช้งานต่อไปได้

8. จากผลการประมาณค่าความคงทนต่อการล้า จะเห็นว่าเมื่อมีการทาากาวในชิ้นงานรอยต่อแล้วทำให้อายุการใช้งานนั้นสูงขึ้น และโดยเฉพาะถ้าทาด้วยกาวอีพ็อกซีเรซินจะเห็นว่าชิ้นงานสามารถรับแรงซ้ำ ๆ ได้ไม่จำกัดจำนวนรอบ

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุน สกอ. และ สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์

Thongchai Fongsamootr, Tawan Sucharitkul, and Carol Rubin, “Analysis of Distortion of Combined adhesive-Riveted Lap joints” Strength, Fracture and Complexity, an International Journal, ****อยู่ในขั้นตอนการดำเนินการ****

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

นำไปใช้พัฒนาการเรียนการสอนในวิชา Fracture Mechanics, Finite Element Analysis, และ Mechanical Behavior of Materials.

3. อื่นๆ

Thongchai Fongsamootr, Charoenyut Dechwayukul, Notsanop Kammerdtong, Carol, A. Rubin and George T. Hahn, “Parametric Study of Combined Adhesive-Riveted Lap joints, Key Engineering Materials Vol. 261-263, 2004, pp. 399-404

ธงชัย ฟองสมุทร, “การวิเคราะห์ความเค้นของรอยต่อแบบหมุดย้ำและกาว”, การประชุมและการสัมมนาทางวิชาการ องค์กรเครือข่ายวิศวกรรมการบินและอวกาศ ครั้งที่ 2 ประจำปี 2547 “100 ปี การบินโลก 40 ปี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่” 18-19 สิงหาคม 2547, เชียงใหม่

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

TALA Method

วิธี TALA (Thin Adhesive Layer Analysis method) เป็นวิธีที่ใช้เพื่อการจำลองอีลิเมนต์ของชั้นกาวในแบบจำลองทางระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เนื่องจากชั้นกาวจริงในการวิเคราะห์จะมีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับแผ่นอูมิเนียม ดังนั้นการจำลองชั้นกาวจริงลงในแบบจำลองจะทำให้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ทั้งหมดมีขนาดใหญ่ และจะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์สูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงได้มีแนวความคิดที่ใช้สปริงอีลิเมนต์แทนในการจำลองชั้นของกาวด้วยอีลิเมนต์ธรรมดา Dechwayukul [24] ได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธี TALA กับผลการวิเคราะห์ที่มีอยู่แล้ว จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า วิธี TALA มีประสิทธิภาพพอที่จะใช้ในการ วิเคราะห์ชั้นกาวบางดังกล่าว

รูปที่ ก.1 แสดงถึงแนวความคิดของวิธี TALA โดยที่กำหนดให้โหนด 2 โหนดที่อยู่ติดกันจะสัมผัสกันด้วยสปริงอีลิเมนต์ 3 ตัว:

- สปริงที่รับแรงดึงและแรงกด (tension-compression spring) 1 ตัว และ
- สปริงที่รับแรงเฉือน (shear spring) 2 ตัว

และเนื่องจากชั้นกาวที่ทำการวิเคราะห์บางมาก จึงทำให้เหลือแค่เทอม σ_z , τ_{zx} และ τ_{zy} ที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยที่ σ_z คือ ความเค้นนอร์มัล และ τ_{zx} และ τ_{zy} คือความเค้นเฉือนในระนาบ จากนั้น ค่าความเค้นทั้งสาม σ_z , τ_{zx} และ τ_{zy} จะถูกเปลี่ยนไปเป็นขนาดของแรง และ ค่าความเครียดทั้งสาม ϵ_z , γ_{zy} , γ_{zx} จะถูกเปลี่ยนไปเป็นระยะยืด-หดของสปริงแต่ละตัว ในการเปลี่ยนค่าความเค้นและความเครียดเป็นแรงและระยะยืด-หดจะเป็นไปตามสมการดังนี้

สำหรับทิศทางนอร์มัล (Tension and Compression spring):

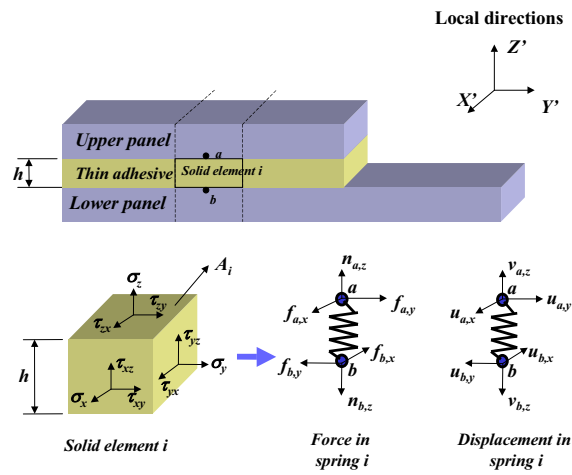
$$F_{n,i} = K_{n,i} * v_{n,i},$$

$$\text{และ } K_{n,i} = E * (A_i/h)$$

สำหรับทิศทางเฉือน (Shear spring):

$$F_{f,i} = K_{f,i} * u_{f,i}$$

$$\text{และ } K_{f,i} = G * (A_i/h)$$



รูปที่ ก.1.การใช้สปริงอีลิเมนต์แทนชั้นกาว

โดยที่ $F_{n,i}$ เป็นแรงในแนวแกนปกติของสปริง i , $v_{n,i}$ เป็นระยะยืด-หดในทิศทางปกติ
 $K_{n,i}$ เป็นค่าความแข็งของสปริง i ในทิศทางปกติ และ E เป็นค่าโมดูลัสของกาว

ภาคผนวก ข

ตัวอย่าง ไฟล์ Input สำหรับการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

ข.1 ตัวอย่างไฟล์ Input กรณีไม่ทากาว

*HEADING,UNSYMM

2723M

**

** NODE DEFINITIONS

**

*NODE

1,1.183800600E+01,1.183800600E+01,0.000000000E+00
2,1.183800600E+01,1.183800600E+01,-7.650001050E-01
3,1.183800600E+01,1.183800600E+01,-1.530000210E+00
4,1.126546190E+01,1.251570320E+01,0.000000000E+00

=====

4382,1.869248770E+01,1.389478590E+01,3.829999690E+00
4383,1.890161710E+01,1.458441930E+01,3.829999450E+00
4384,1.897200200E+01,1.530000020E+01,3.829999690E+00
4386,1.809865190E+01,1.342981240E+01,3.829999920E+00
4387,1.840978050E+01,1.401188660E+01,3.829999920E+00
4388,1.860136600E+01,1.464347650E+01,3.829999920E+00
4389,1.866600230E+01,1.530000020E+01,3.830000160E+00

**

**

** ELEMENT DEFINITIONS

**

*ELEMENT, TYPE=C3D15V , ELSET=RIVETA

197 3107 3188 3117 3157 3210 3167 3179 3183 3112 3201 3205 3162 3132 3199 3142
3190 3194 3137
198 3117 3188 3127 3167 3210 3177 3183 3187 3122 3205 3209 3172 3142 3199 3152
3194 3198 3147
199 3211 3221 3215 3233 3243 3237 3212 3216 3213 3234 3238 3235 3222 3232 3226
3223 3227 3224
200 3215 3221 3219 3237 3243 3241 3216 3220 3217 3238 3242 3239 3226 3232 3230
3227 3231 3228

=====

265 3941 3243 4258 3783 3188 4138 3942 4259 4256 3867 4204 4133 3956 3254 4269
3957 4270 4267
266 4258 3243 4262 4138 3188 4148 4259 4263 4260 4204 4208 4143 4269 3254 4273
4270 4274 4271
267 4240 3221 4236 4313 3298 4311 4241 4237 4238 4318 4317 4312 4302 3287 4300
4307 4306 4301
268 4236 3221 3911 4311 3298 4010 4237 3912 4234 4317 4017 4310 4300 3287 3995
4306 4002 4299

*ELEMENT, TYPE=C3D27 , ELSET=SHEET1

1 1 3 9 7 31 33 39 37 2 6 8 4 32 36 38
34 16 18 24 22 19 5 35 17 21 23 20
2 7 9 15 13 37 39 45 43 8 12 14 10 38 42 44
40 22 24 30 28 27 11 41 23 26 29 25

=====

269 4025 4322 4332 4039 4095 4372 4382 4109 4321 4327 4331 4032 4371 4377 4381
4102 4060 4347 4357 4074 4351 4326 4376 4346 4352 4356 4067
270 4322 4324 4334 4332 4372 4374 4384 4382 4323 4329 4333 4327 4373 4379 4383
4377 4347 4349 4359 4357 4353 4328 4378 4348 4354 4358 4352

```

271 4039 4332 4236 3911 4109 4382 4311 4010 4331 4337 4234 4046 4381 4387 4310
4116 4074 4357 4300 3995 4361 4336 4386 4356 4362 4299 4081
272 4332 4334 4240 4236 4382 4384 4313 4311 4333 4339 4238 4337 4383 4389 4312
4387 4357 4359 4302 4300 4363 4338 4388 4358 4364 4301 4362
*ELSET,ELSET=RIVET
RIVETA,RIVETB
*****
*NSET,NSET=ZZ,GENERATE
1539,1551,3
3088,3092,1
*NSET,NSET=XX,GENERATE
3088,3102,1
*NSET,NSET=YY1
361
*NSET,NSET=YY2,GENERATE
13, 15,1
28, 30,1
43, 45,1
58, 60,1
=====
2653,2664,1
2718,2729,1
2783,2794,1
2867,3097,5
3102,3107,1
3128,3132,1
3153,3157,1
*BOUNDARY
    ZZ, 3,3, 0.0
    XX, 1,, 0.0
    361, 2,, 0.0
    362, 2,, 0.0
    363, 2,, 0.0
    556, 2,, 0.0
=====
    3088, 2,, 0.0
    3093, 2,, 0.0
    3098, 2,, 0.0
    YY2, 2,, 0.0
*****
*SOLID SECTION,ELSET=SHEET1, MATERIAL=ALUMINUM
*SOLID SECTION,ELSET=SHEET2, MATERIAL=ALUMINUM
*SOLID SECTION,ELSET=RIVET, MATERIAL=ALUMINUM
*MATERIAL, NAME=ALUMINUM
*ELASTIC, TYPE=ISO
7.0000E+4,0.25
*ELSET,ELSET=S1SURF,GENERATE
5,20,1
33,80,1
*ELSET,ELSET=S2SURF,GENERATE
97,176,1
*ELSET,ELSET=RIVSURF1,GENERATE
193,196,1
209,214,1
233,238,1
257,260,1
*ELSET,ELSET=RIVSURF2,GENERATE
205,208,1
227,232,1
251,256,1

```

```

269,272,1
*ELSET,ELSET=RIVSURF3,GENERATE
199,202,1
218,223,1
242,247,1
263,266,1
*ELSET,ELSET=SHNSURB1,GENERATE
97,116,1
122,176,6
*ELSET,ELSET=SHNSURB2,GENERATE
98,116,2
*ELSET,ELSET=SHNSURT1,GENERATE
1,4,1
31,32
*ELSET,ELSET=SHNSURT2,GENERATE
5,20,1
*ELSET,ELSET=SHNSURT2
SHNSURT2,38,44,50,56,62,68,74,80
*ELSET,ELSET=SHNSURT3
3,4
*ELSET,ELSET=SHNSURT4,GENERATE
6,20,2
*ELSET,ELSET=DIFF,GENERATE
21,32,1
*ELSET,ELSET=DIFF
DIFF,1,2,3,4
*****
**CONTACT BETWEEN SHEETS
*****
*SURFACE DEFINITION,NAME=S1FACE
S1SURF,S1
DIFF,S4
*SURFACE DEFINITION,NAME=S2FACE
S2SURF,S2
*CONTACT PAIR,INTERACTION=GRATING,SMALL SLIDING,ADJUST=.001
S2FACE,S1FACE
*SURFACE INTERACTION,NAME=GRATING
*FRICTION
0.2
*****
***CONTACT BETWEEN RIVET AND SHANK
*****
*SURFACE DEFINITION,NAME=RIVFACE1
RIVSURF1,S1
*SURFACE DEFINITION,NAME=RIVFACE2
RIVSURF2,S1
*SURFACE DEFINITION,NAME=RIVFACE3
RIVSURF3,S5
*SURFACE DEFINITION,NAME=RIVFACE
RIVSURF1,S1
RIVSURF2,S1
RIVSURF3,S5
*SURFACE DEFINITION,NAME=SHNFACT1
SHNSURT1,S6
SHNSURT2,S2
*SURFACE DEFINITION,NAME=SHNFACT2
SHNSURT3,S2
SHNSURT4,S4
*SURFACE DEFINITION,NAME=SHANFATA
SHNSURT1,S6

```

```

SHNSURT2,S2
*SURFACE DEFINITION,NAME=SHANFATB
SHNSURT3,S2
SHNSURT4,S4
*SURFACE DEFINITION,NAME=SHNFACB1
SHNSURB1,S1
*SURFACE DEFINITION,NAME=SHNFACB2
SHNSURB2,S4
*SURFACE DEFINITION,NAME=SHANFABD
SHNSURB1,S1
*SURFACE DEFINITION,NAME=SHANFABE
SHNSURB2,S4
*CONTACT PAIR,INTERACTION=GRATING,SMALL SLIDING,ADJUST=.001
SHANFATA,RIVFACE
*CONTACT PAIR,INTERACTION=GRATING,SMALL SLIDING,ADJUST=.001
SHANFATB,RIVFACE
*CONTACT PAIR,INTERACTION=GRATING,SMALL SLIDING,ADJUST=.001
SHANFABD,RIVFACE
*CONTACT PAIR,INTERACTION=GRATING,SMALL SLIDING,ADJUST=.001
SHANFABE,RIVFACE
*****
**WAVEFRONT MINIMIZATION,NODES,METHOD=2
**1522,3076
*****
*STEP,INC=100,NLGEOM
*STATIC
0.00005,1.0,0.000001,0.2
*CONTROLS, PARAMETERS= TIME INCREMENTATION
,,,,,24,
*DLOAD,OP=MOD
95,P2,-120
96,P2,-120
*CONTACT PRINT
CFN,CFS,CAREA
CMN,CMS
CFT,CMT
XN,XS,XT
*CONTACT PRINT
*PRINT,CONTACT=YES
*EL PRINT,FREQUENCY=100
*NODE PRINT,FREQUENCY=100
*EL FILE, FREQUENCY=100
S
SINV
E
COORD
*NODE FILE,FREQUENCY=100
U
*RESTART,WRITE,FREQUENCY=250
*END STEP

```

ข.2 ตัวอย่างไฟล์ Input กรณีทากาว

```
*HEADING,UNSYMM
2723M
**
** NODE DEFINITIONS
**
*NODE
1,1.183800600E+01,1.183800600E+01,0.000000000E+00
2,1.183800600E+01,1.183800600E+01,-7.650001050E-01
3,1.183800600E+01,1.183800600E+01,-1.530000210E+00
4,1.126546190E+01,1.251570320E+01,0.000000000E+00
5,1.126546100E+01,1.251570320E+01,-7.650001050E-01
=====
4386,1.809865190E+01,1.342981240E+01,3.829999920E+00
4387,1.840978050E+01,1.401188660E+01,3.829999920E+00
4388,1.860136600E+01,1.464347650E+01,3.829999920E+00
4389,1.866600230E+01,1.530000020E+01,3.830000160E+00
**
**
** ELEMENT DEFINITIONS
**
*ELEMENT, TYPE=C3D15V , ELSET=RIVETA
197 3107 3188 3117 3157 3210 3167 3179 3183 3112 3201 3205 3162 3132 3199 3142
3190 3194 3137
198 3117 3188 3127 3167 3210 3177 3183 3187 3122 3205 3209 3172 3142 3199 3152
3194 3198 3147
199 3211 3221 3215 3233 3243 3237 3212 3216 3213 3234 3238 3235 3222 3232 3226
3223 3227 3224
=====
267 4240 3221 4236 4313 3298 4311 4241 4237 4238 4318 4317 4312 4302 3287 4300
4307 4306 4301
268 4236 3221 3911 4311 3298 4010 4237 3912 4234 4317 4017 4310 4300 3287 3995
4306 4002 4299
*ELEMENT, TYPE=C3D27 , ELSET=SHEET1
1 1 3 9 7 31 33 39 37 2 6 8 4 32 36 38
34 16 18 24 22 19 5 35 17 21 23 20
2 7 9 15 13 37 39 45 43 8 12 14 10 38 42 44
40 22 24 30 28 27 11 41 23 26 29 25
3 31 33 39 37 61 63 69 67 32 36 38 34 62 66 68
64 46 48 54 52 49 35 65 47 51 53 50
=====
95 1507 1509 1515 1513 1537 1539 1545 1543 1508 1512 1514 1510 1538 1542 1544
1540 1522 1524 1530 1528 1526 1511 1541 1523 1527 1529 1525
96 1513 1515 1521 1519 1543 1545 1551 1549 1514 1518 1520 1516 1544 1548 1550
1546 1528 1530 1536 1534 1532 1517 1547 1529 1533 1535 1531
*ELEMENT,TYPE=C3D27,ELSET=SHEET2
97 1552 1554 1564 1562 1602 1604 1614 1612 1553 1559 1563 1561 1603 1609 1613
1611 1577 1579 1589 1587 1585 1560 1610 1578 1584 1588 1586
98 1554 1556 1566 1564 1604 1606 1616 1614 1555 1557 1565 1559 1605 1607 1615
1609 1579 1581 1591 1589 1583 1558 1608 1580 1582 1590 1584
=====
271 4039 4332 4236 3911 4109 4382 4311 4010 4331 4337 4234 4046 4381 4387 4310
4116 4074 4357 4300 3995 4361 4336 4386 4356 4362 4299 4081
272 4332 4334 4240 4236 4382 4384 4313 4311 4333 4339 4238 4337 4383 4389 4312
4387 4357 4359 4302 4300 4363 4338 4388 4358 4364 4301 4362
*ELSET,ELSET=RIVET
RIVETA,RIVETB
*****
```

```

*BOUNDARY
  ZZ, 3,3, 0.0
  XX, 1, , 0.0
  YY11, 2, , 0.0
  YY12, 2, , 0.0
  YY21, 2, , 0.0
  YY22, 2, , 0.0
  RIV, 2, , 0.0
*****
*SOLID SECTION,ELSET=SHEET1, MATERIAL=ALUMINUM
*SOLID SECTION,ELSET=SHEET2, MATERIAL=ALUMINUM
*SOLID SECTION,ELSET=RIVET, MATERIAL=ALUMINUM
*MATERIAL, NAME=ALUMINUM
*ELASTIC, TYPE=ISO
7.0000E+4,0.25
*****
*****
*****
** ORIENTATION
*****
*ORIENTATION,NAME=XY501
1,0,0,0,1,0
*ORIENTATION,NAME=XY502
1,0,0,0,1,0
*ORIENTATION,NAME=XY503
1,0,0,0,1,0
*ORIENTATION,NAME=XY504
1,0,0,0,1,0
=====
*ORIENTATION,NAME=XY834
-1,0,0,0,1,0
*ORIENTATION,NAME=XY835
-1,0,0,0,1,0
*ORIENTATION,NAME=XY836
-1,0,0,0,1,0
*****
*****
*****LIST_1
**SPRING ELEMENT,Thickness,0.08
**SHEAR SPRINGS,DATA POINTS,37
*****
**SPRING NO#,FIRST NODE,SECOND NODE,AREA (mm^2),
**1,1102,2783,1.3501875,
*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR11
100011,1102,2783
*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR12
100012,1102,2783
*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR13
100013,1102,2783
*SPRING,ELSET=SPR11,NONLINEAR
1,1
-47.256563,-0.08
-45.906375,-0.04
-45.096263,-0.00944
-44.556188,-0.00888
-43.206,-0.00808
-41.855813,-0.00744
-40.505625,-0.00688
-37.80525,-0.00624
-35.104875,-0.0056

```

```

-32.4045,-0.00504
-29.704125,-0.00448
-22.953188,-0.00328
-20.252813,-0.0028
-17.552438,-0.0024
-14.852063,-0.002
-12.151688,-0.0016
-9.451313,-0.0012
-6.750938,-0.0008
0,0
6.750938,0.0008
9.451313,0.0012
12.151688,0.0016
14.852063,0.002
17.552438,0.0024
20.252813,0.0028
22.953188,0.00328
29.704125,0.00448
32.4045,0.00504
35.104875,0.0056
37.80525,0.00624
40.505625,0.00688
41.855813,0.00744
43.206,0.00808
44.556188,0.00888
45.096263,0.00944
45.906375,0.04
47.256563,0.08
*SPRING,ELSET=SPR12,NONLINEAR
2,2
-47.256563,-0.08
-45.906375,-0.04
-45.096263,-0.00944
-44.556188,-0.00888
-43.206,-0.00808
-41.855813,-0.00744
-40.505625,-0.00688
-37.80525,-0.00624
-35.104875,-0.0056
-32.4045,-0.00504
-29.704125,-0.00448
-22.953188,-0.00328
-20.252813,-0.0028
-17.552438,-0.0024
-14.852063,-0.002
-12.151688,-0.0016
-9.451313,-0.0012
-6.750938,-0.0008
0,0
6.750938,0.0008
9.451313,0.0012
12.151688,0.0016
14.852063,0.002
17.552438,0.0024
20.252813,0.0028
22.953188,0.00328
29.704125,0.00448
32.4045,0.00504
35.104875,0.0056
37.80525,0.00624

```

```

40.505625,0.00688
41.855813,0.00744
43.206,0.00808
44.556188,0.00888
45.096263,0.00944
45.906375,0.04
47.256563,0.08
*SPRING,ELSET=SPR13,NONLINEAR
3,3
-1350.1875,-0.08
-270.0375,-0.0616
-229.531875,-0.056
-209.279063,-0.0528
-195.777188,-0.0504
-182.275313,-0.048
-168.773438,-0.044
-162.0225,-0.0408
-155.271563,-0.0368
-148.520625,-0.032
-141.769688,-0.0264
-135.01875,-0.02
-128.267813,-0.0152
-114.765938,-0.012
-101.264063,-0.0096
-81.01125,-0.0072
-47.256563,-0.004
-27.00375,-0.0024
0,0
6.750938,0.0008
9.451313,0.0012
12.151688,0.0016
14.852063,0.002
17.552438,0.0024
20.252813,0.0028
22.953188,0.00328
29.704125,0.00448
32.4045,0.00504
35.104875,0.0056
37.80525,0.00624
40.505625,0.00688
41.855813,0.00744
43.206,0.00808
44.556188,0.00888
45.096263,0.00944
=====
*****
**WAVEFRONT MINIMIZATION,NODES,METHOD=2
**1522,3076
*****
*STEP,INC=100,NLGEOM
*STATIC
0.00005,1.0,0.000001,0.2
*CONTROLS, PARAMETERS= TIME INCREMENTATION
,,,,,24,
*DLOAD,OP=MOD
95,P2,-120.0
96,P2,-120.0
*EL PRINT,FREQUENCY=5
*NODE PRINT,FREQUENCY=5
*EL FILE, FREQUENCY=5

```

```
S
SINV
E
COORD
*NODE FILE,FREQUENCY=5
U
*RESTART,WRITE,FREQUENCY=5
*END STEP
```

บรรณานุกรม

- 1) K. Iyer, G.T. Hahn, P.C. Bastias, and C.A. Rubin., “Local stresses and distortions of a three-dimensional, riveted lap joint.” USAF Structural Integrity Program Conference, San Antonio, Nov 28-30, 1995.
- 2) T. Fongsamootr, “The Dilatational 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 USA. 2001
- 3) M. Goland, and E. Reissner., “The Stresses in Cemented Joints.” Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 66, 1944, pp. A17-A27.
- 4) R.W. Cornell., “Determination of Stresses in Cemented Lap Joints.” Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, 1953, pp. 355-364.
- 5) F. Dalale, F. Erdogan, and M.N. Aydinoglu., “Stresses in Adhesively bonded Joints: A Closed-Form Solution.” Journal of Composite Materials, Vol. 15, 1981, pp. 249-271.
- 6) Chien-Chang Lin, and Yee-Shown Lin., “A Finite Element Model of Single-Lap Adhesive Joints.” International Journal Solids Structures, Vol. 30, No. 12, 1993, pp.1679-1692.
- 7) J. Pascal, E. Darque-Ceretti, E. Felder, and A. Pouchelon., “Rubber-like adhesive in simple shear: stress analysis and fracture morphology of a single lap joint.” Journal of Adhesion Science Technology, Vol. 8, No. 5, 1994, pp. 553-573.
- 8) P.C. Pandey, H. Shankaragouda, and Arbind Kr. Singh., “Nonlinear analysis of adhesively bonded lap joints considering viscoplasticity in adhesives.” Computers and Structures, Vol. 70, 1999, pp. 387-413.
- 9) T. Sawa, K. Temma, T. Nishigaya and H. Ishikawa, “A two-dimensional stress analysis of adhesive butt joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads”, Journal of Adhesion Sci, Technol, Vol.9, 1995, pp. 215-236.
- 10) Z.J. Wu, A. Romeijn, and J. Wardenier., “Stress expressions of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends.” Composite Structure, Vol. 38, No. 1-4, 1997, pp. 273-280.
- 11) J. Liu, T. Sawa, and H. Toratani, “A two-dimensional Stress Analysis and Strength of Single-lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherends Subjected to External Bending Moments”, Journal of adhesion, Vol. 69, 1999, pp. 263-291.

- 12) J. Liu and T. Sawa, "Stress analysis and Strength evaluation of single-lap band adhesive joints of dissimilar adherends subjected to external bending moments", *Journal of Adhesion*, Vol 69, 1999, pp. 67-92.
- 13) T. Sawa, J. Liu, K. Nakano, and J. Tanaka, "A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads". *Journal of Adhesion Sci. Technol* Vol. 14, 2000, pp.43-66.
- 14) M. Takiguchi and F. Yoshida, "Plastic Bending of adhesive-bonded sheet metals". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, 2001, pp. 743-748.
- 15) E. David and A. Lazar, "Adhesive bonding between aluminum and polytetrafluoroethylene", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144, 2004 pp. 191-194.
- 16) John C. Ekvall., "Fatigue of Riveted Metallic Joints." *Fatigue in Mechanically Fastened Composite and Metallic Joints*, ASTM STP 927, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, pp. 172-189.
- 17) Gao Husheng, Gu Haicheng, and Zhou Huijiu., "Effect of slip amplitude on fretting fatigue." *Wear*, Vol. 148, 1991, pp. 15-23.
- 18) C.P. Fung, and J. Smart., "An experimental and numerical analysis of riveted single lap joints." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G, Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 208, 1994, pp. 79-90.
- 19) K.N. Shivakumar, and J.C Newman Jr., "Stress concentration equations for straight shank and countersunk holes in plates." *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 62, 1995, pp. 248-259.
- 20) C. Dechowayukul, C.A. Rubin, and G. T. Hahn., *Analysis of the Effect of Thin Sealant Layers in Aircraft Structures Joints*, *AIAA Journal*, 41, 2216-2218, 2003.
- 21) J.Y Mann, R.A. Pell, R. Jones, and M. Heller., "Reducing the effects of rivet holes on fatigue life by adhesive bonding." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol.3, no.2, 1985, pp. 113-124.
- 22) Makoto Imanaka., "Fatigue Strength of Adhesive/Rivet Combined Lap Joints." *Journal of Adhesion*, Vol. 49, 1995, pp. 197-209.
- 23) Jiemin Liu, and Toshiyuki 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.

- 24) Yun Huang., “The effect of interference on fatigue life in single and double-rivet row, aluminum lap joints.” Master of Sciences Thesis, Vanderbilt University, Nashville, TN, 2000.
- 25) Khalid A. Al-Dakkan., “The effect of interference on fatigue life in single –rivet row, aluminum lap joints.” Master of Sciences Thesis, Vanderbilt University, Nashville, TN, 2000.
- 26) Norman E. Dowling., “Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue.” 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey, 1998.