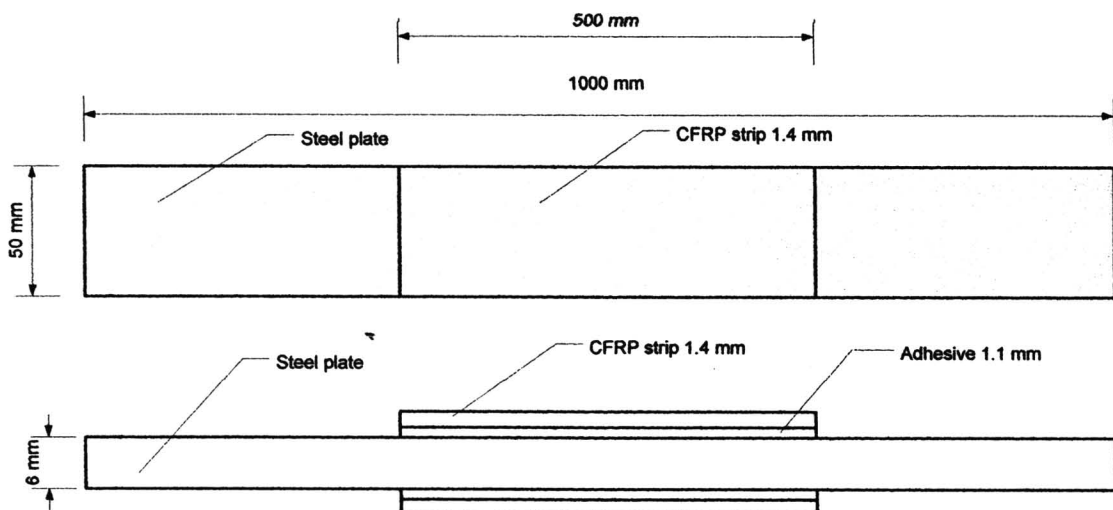


บทที่ 4

ผลการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์

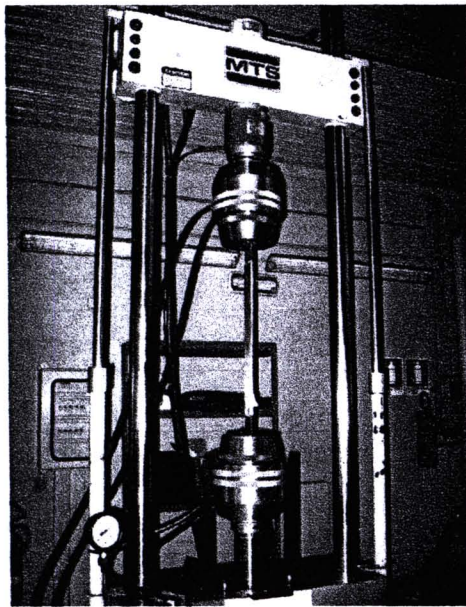
4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมความล้าภายใต้แรงดึงของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ สำหรับข้อมูลของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ในงานวิจัยฉบับนี้ได้อ้างอิงจากบทความที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ คือ "Fatigue Performance of Tensile Steel Members Strengthened with CFRP Plates" โดย Bocciarelli et al. (2009) ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดสอบที่ได้จากบทความที่เกี่ยวข้องในรูปแบบของการกระจายของหน่วยแรงในชิ้นกาว และการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 มิติและขนาดของวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลอง (ไม่ได้มาตราส่วน)

ทั้งนี้ชิ้นส่วนในภาพที่ได้ถูกทำการทดลองโดย Bocciarelli et al. (2009) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาในครั้งนี้ได้แสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.2 แสดงรูปการทดสอบที่ศึกษาโดย Bocciarelli et al. (2009)



ก) แบบ 3 มิติ

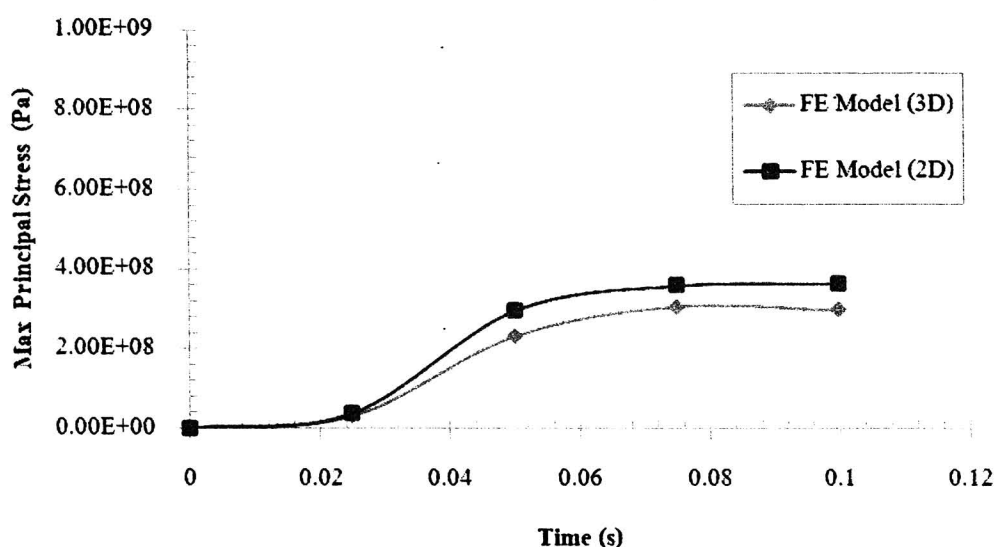


ข) แบบ 2 มิติ

ภาพที่ 4.3 แบบจำลองของชิ้นส่วนเกลียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.2 การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง 2 มิติ กับ 3 มิติ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสอบเทียบแบบจำลองแบบ 2 มิติ กับ 3 มิติ ภายใต้เงื่อนไขของจุดรองรับเดียวกัน ภายใต้แรงดึงแบบสถิตในระยะเวลา 0.1 วินาที แล้วทำการอ่านค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.4

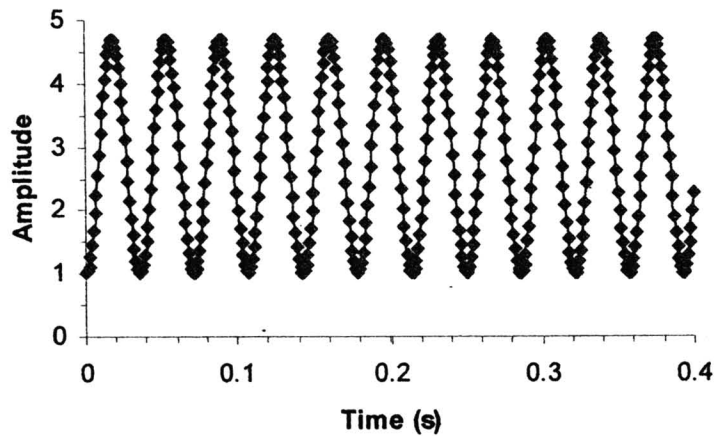


ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงสูงสุดของแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ

จากรูปพบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดในชิ้นส่วนของแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง 2 มิติ สามารถจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ใกล้เคียงพฤติกรรมจริง ดังนั้นเพื่อช่วยประหยัดเวลาในการคำนวณ อันเนื่องมาจากการวิเคราะห์โครงสร้างที่รับน้ำหนักกระทำแบบซ้ำๆ และมีคุณสมบัติแบบไร้เชิงเส้นของกาว ดังนั้นจึงจะทำการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 2 มิติ ตลอดการศึกษา

4.3 พฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

ในการศึกษาพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ ดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 แสดงตัวอย่างของ Amplitude ที่ป้อนลงในโปรแกรมโดยใช้สมการ

$$a = A_0 + A \times (\sin \cdot \omega \cdot t)^2$$

โดยความถี่ของแรงกระทำแบบซ้ำๆ นั้นใช้ค่าเดียวกับการทดลองของ Bocciarelli et al. (2009) คือ 14 Hz โดยช่วงหน่วยแรงที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มี 4 ช่วงหน่วยแรงได้แก่ 83, 100, 120 และ 160 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ค่า Stress Ratio มีค่าคงที่คือ 0.4 ทั้งนี้ค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุดของแต่ละช่วงหน่วยแรงได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1

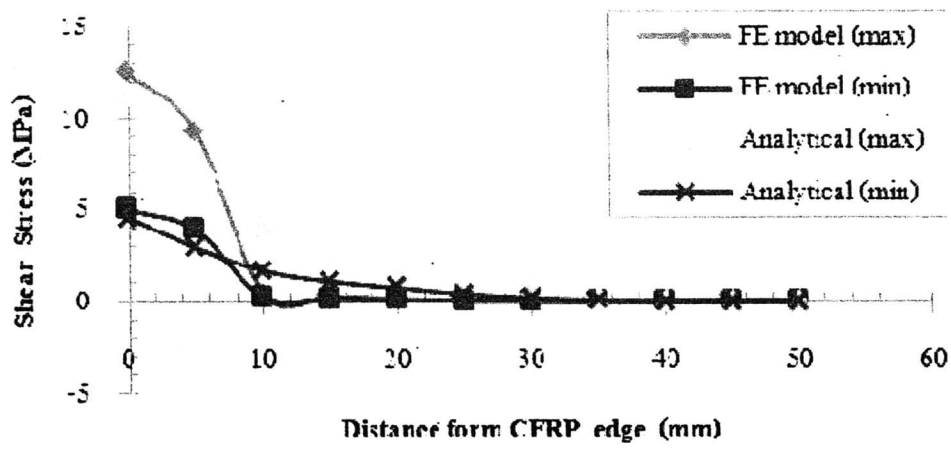
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าหน่วยแรงสูงสุดและค่าหน่วยแรงต่ำสุดของแต่ละช่วงหน่วยแรงที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

ชิ้นส่วนทดสอบ	แรงในแนวแกน (ต่ำสุด; สูงสุด [kN])	หน่วยแรงดึง (ต่ำสุด; สูงสุด) [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	อัตราส่วนหน่วยแรงดึง
CE1	(17; 42)	(57; 140)	83	0.4
CE2	(20; 50)	(67; 167)	100	0.4
CE3	(24; 60)	(80; 200)	120	0.4
CE4	(32; 80)	(107; 267)	160	0.4

4.3.1 ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงบริเวณชั้นกาว

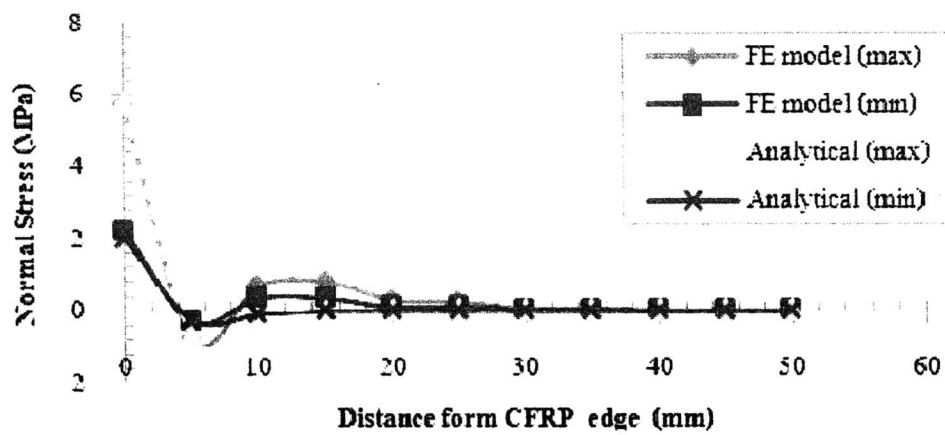
ภายหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ภายใต้หน่วยแรงกระทำซ้ำๆ แล้วก็ทำการอ่านค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นกาวที่เชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กกับแผ่น CFRP ซึ่งค่าหน่วยแรงดังกล่าวจะเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ในหัวข้อต่อไป โดยค่าที่อ่านได้จากแบบจำลองจะถูกแสดงเปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์โดย Bocciarelli et al. (2009) ดังแสดงในภาพที่ 4.6-4.9

Fatigue Stress Ranges 83 MPa



ก) หน่วยแรงเฉือน

Fatigue Stress Ranges 83 MPa

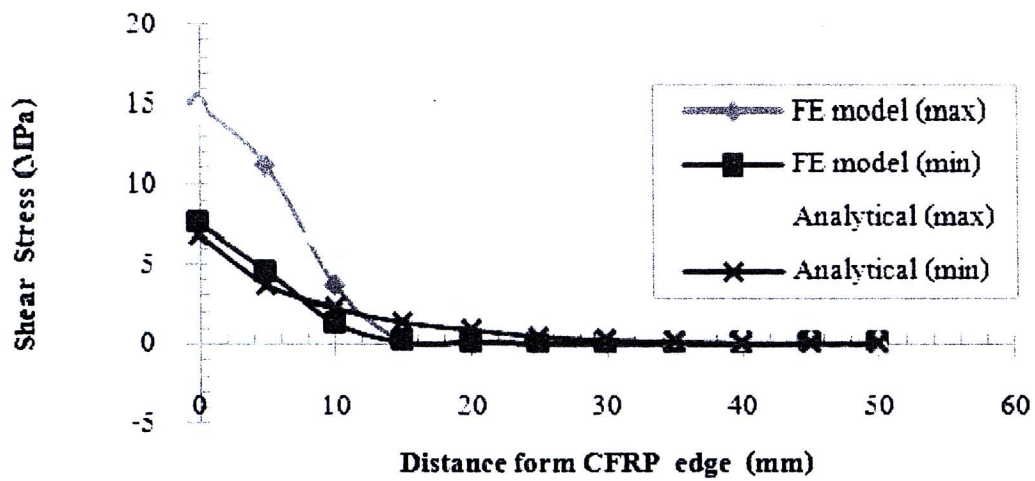


ข) หน่วยแรงตั้งฉาก

ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 83$ MPa)

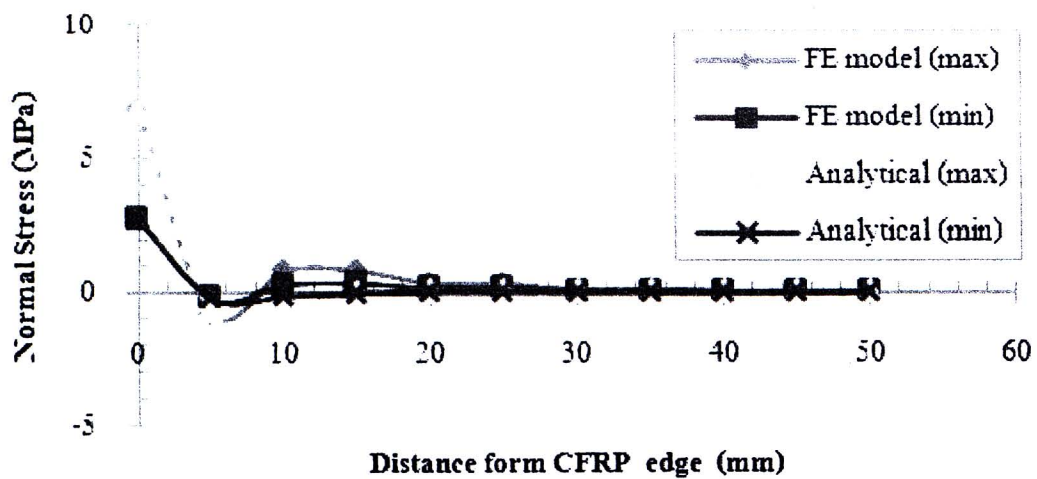


Fatigue Stress Ranges 100 MPa



ก) หน่วยแรงเฉือน

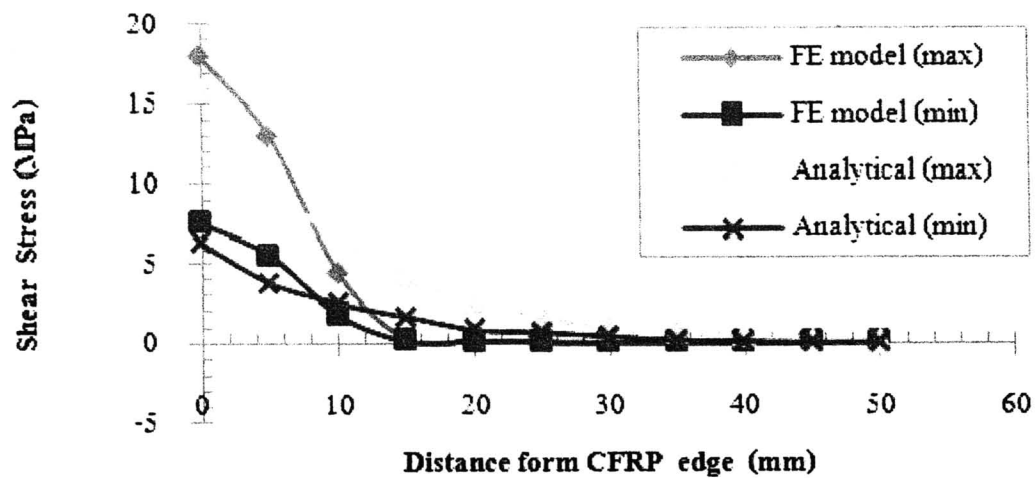
Fatigue Stress Ranges 100 MPa



ข) หน่วยแรงตั้งฉาก

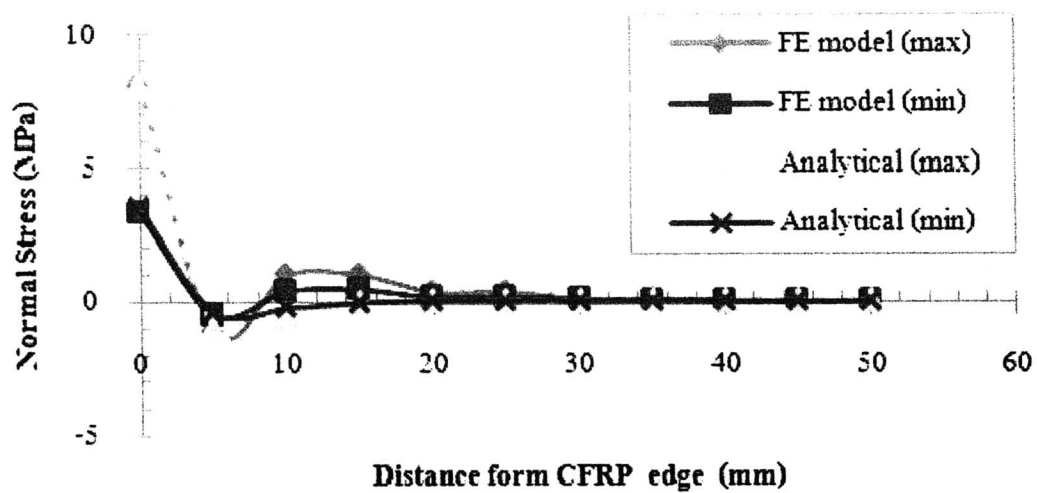
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 100$ MPa)

Fatigue Stress Ranges 120 MPa



ก) หน่วยแรงเฉือน

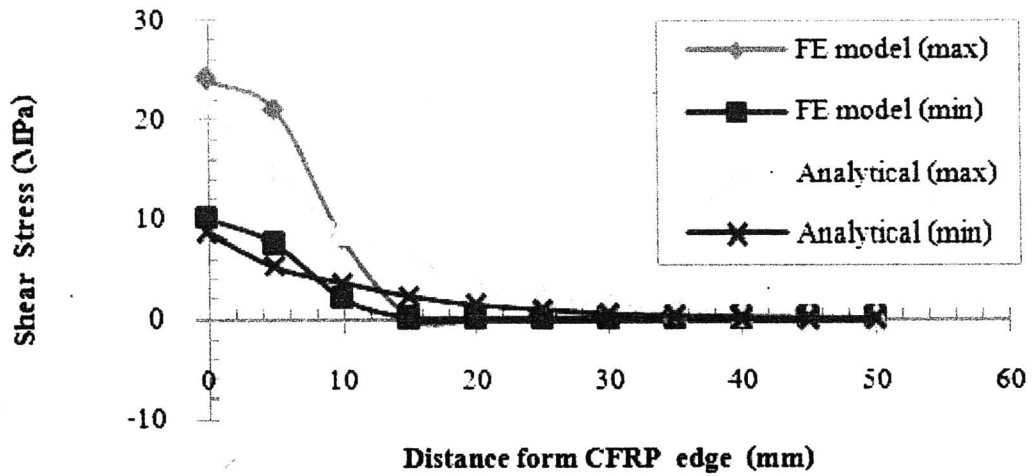
Fatigue Stress Ranges 120 MPa



ข) หน่วยแรงตั้งฉาก

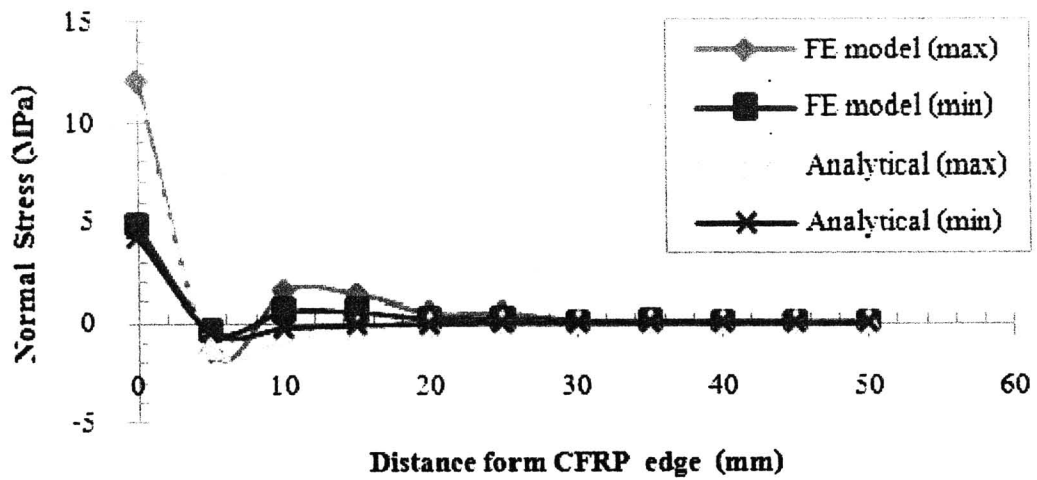
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 120$ MPa)

Fatigue Stress Ranges 160 MPa



ก) หน่วยแรงเฉือน

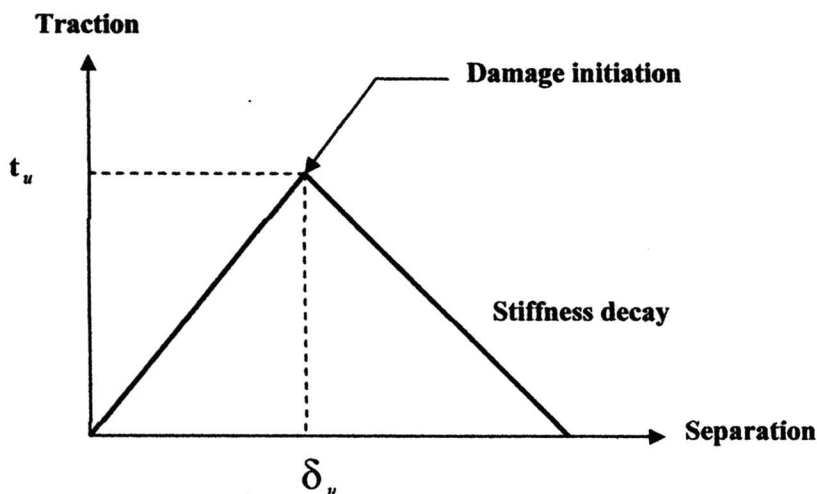
Fatigue Stress Ranges 160 MPa



ข) หน่วยแรงดึงฉาก

ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว ($\Delta\sigma = 160$ MPa)

จากภาพที่ 4.6-4.9 จะพบว่าค่าหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าที่ได้จาก Analytical model พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งในกรณีของ หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงดึงฉาก ซึ่งจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่บริเวณปลายของแผ่น CFRP นั้นหมายความว่า การหลุดล่อนของแผ่น CFRP จะเริ่มต้นจากจุดนี้นั่นเอง อย่างไรก็ตามก็จะสังเกตเห็นลักษณะการลดลงของหน่วยแรงที่วิเคราะห์ได้จาก FE model นั้นจะลดลงเร็วกว่า Analytical model เหตุผลของความแตกต่างนี้ก็คือ ใน Analytical model ได้สมมติให้พฤติกรรมของกาวให้เป็นแบบยืดหยุ่น (Elastic) แต่ในแบบจำลองได้จำลองพฤติกรรมของ interface ก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของความเสียหายจะสมมติให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเช่นกัน แต่หลังจากนั้น element จะมีค่าความเสียหายใน element จะมีค่าเพิ่มขึ้นในรูปแบบของเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 Linear element traction separation behavior ของ cohesive element

ซึ่งการสะสมของความเสียหายนี้เองจึงทำให้ element นั้นไม่สามารถรับแรงได้ ค่าหน่วยแรงจึงลดลงเร็วกว่า Analytical model เราจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นในการศึกษานี้มีความถูกต้องมากกว่า Analytical model ที่เสนอโดย Bocciarelli et al. (2009)

4.3.2 การทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

สืบเนื่องจากการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ โดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไปจนกระทั่งวัตถุนั้นวิบัตินั้นเป็นไปได้ยากมาก เนื่องจากจะต้องเผชิญกับปัญหาของความไร้เชิงเส้นของวัสดุ รวมทั้งหน่วยความจำขนาดใหญ่สำหรับบันทึกข้อมูล และที่สำคัญอย่างยิ่งเวลาในการวิเคราะห์ซึ่งต้องใช้เวลามาก ผู้ศึกษาจึงได้นำเสนอวิธีการประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ อย่างง่ายแต่ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง โดยผู้ศึกษาขออ้างถึงสมการที่จะใช้ประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบซ้ำๆ ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 อีกครั้งหนึ่ง

Caprino (2000) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อประมาณค่าอายุการใช้งานของแผ่น CFRP ภายใต้แรงดึงแบบซ้ำๆ ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$f_n = \bar{f}_u - \alpha S_{\max} (1-R)(n^\beta - 1) \quad (4.1)$$

- เมื่อ f_n = ค่ากำลังหลังจากให้แรงไป n รอบ (MPa)
 \bar{f}_u = ค่ากำลังของวัสดุตั้งต้น (กาว) (MPa)
 S_{\max} = ค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุดในระหว่างที่ทำการให้น้ำหนักบรรทุกเป็นรอบ (MPa)
 S_{\min} = ค่าหน่วยแรงเฉือนต่ำสุดในระหว่างที่ทำการให้น้ำหนักบรรทุกเป็นรอบ (MPa)
 R = stress ratio = $\frac{S_{\min}}{S_{\max}}$ (%)
 n = จำนวนรอบของรอบน้ำหนักบรรทุก
 α, β = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกาว

ให้ N_f เป็นอายุของความล้าของชิ้นส่วนทดสอบ ถ้า $n = N_f$, $f_n = S_{\max}$ ดังนั้น N_f จะหาได้จาก

$$N_f = \left[1 + \frac{1}{\alpha(1-R)} \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.2)$$

ในลำดับต่อมาหาค่า α, β จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จากสมการที่ 4.2

$$\left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \left(\frac{1}{1-R} \right) = \alpha (N_f^\beta - 1) \quad (4.3)$$

ให้ $K = \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \left(\frac{1}{1-R} \right)$, เมื่อ

$$K = \alpha (N_f^\beta - 1) \quad (4.4)$$

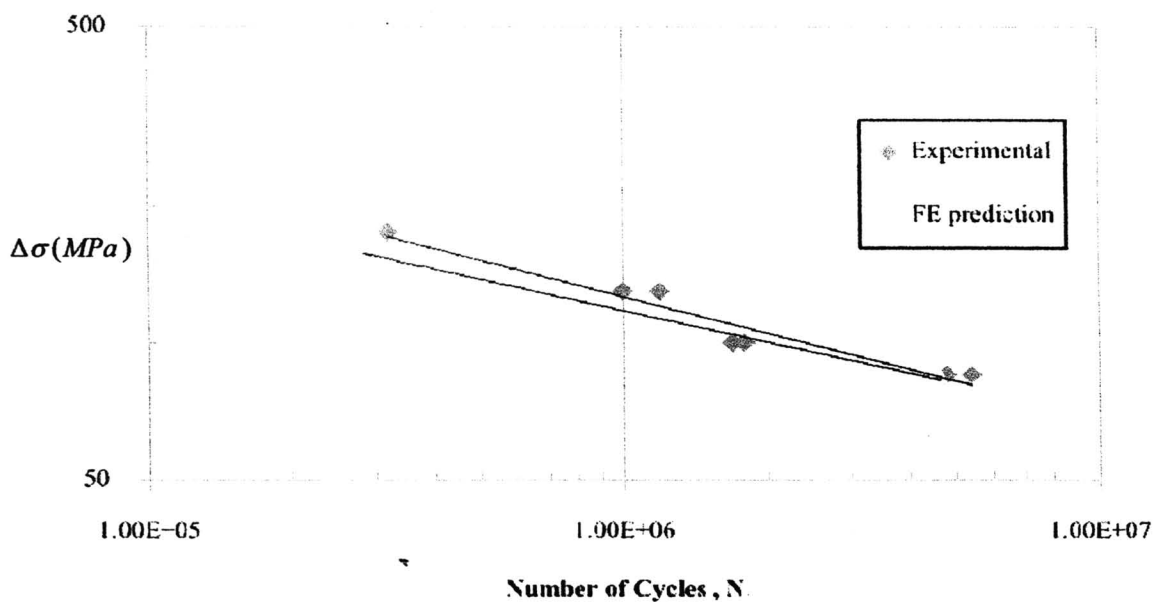
โดยที่ α คือ ความชัน ของเส้นตรง และเนื่องจากมีตัวแปรสองตัวในสมการคือ ค่า α และ β ซึ่งค่าทั้งสองสามารถหาได้โดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก ซึ่งจากการศึกษาของ Caprino (2000) พบว่าค่าทั้งสองคือ $\alpha = 0.004$ และ $\beta = 0.39$ ดังนั้นแบบจำลองหาค่าอายุของความล้าของแผ่น เหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะสามารถหาได้จากสมการ

$$N_f = \left[1 + \frac{1}{0.004(1-R)} \left(\frac{\bar{f}_u}{S_{\max}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{0.39}} \quad (4.5)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 4.5 ทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.11

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

$\Delta\sigma$ [MPa]	Fatigue life (cycles)		%Error
	Experiment	FE prediction	
83	4,800,000	4,642,896	3.27
100	1,800,000	1,953,872	8.55
120	1,000,000	822,355	17.76
160	320,000	285,277	10.87



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบกราฟ S-N ระหว่าง Experimental กับ FE prediction

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า %Error ที่เกิดขึ้นจากการทำนายมีค่าสูงสุดเพียง 18.82 % ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ถ้าหากพิจารณาจากกราฟที่ 4.11 แล้ว จะยิ่ง

พบว่าวิธีการทำนายที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยในการประเมินพฤติกรรมความล้าของแผ่นเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มช่วงของหน่วยแรงจาก 83, 100, 120 และ 160 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าค่า ความเสถียร ของชิ้นส่วนนั้นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด (ดูได้จากจำนวนรอบที่ลดลงอย่างมาก) ซึ่งการลดลงนี้เป็นผลมาจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP จากบริเวณปลายของแผ่น CFRP ซึ่งจุดนี้เองถือเป็นจุดอ่อนของการเสริมกำลังให้แก่โครงสร้างเหล็กด้วย CFRP

4.4 การศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

ภายหลังจากที่ได้ทำเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงบริเวณกาว และใช้ค่าหน่วยแรงที่ได้ไปใช้ในการประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ในหัวข้อที่ 4.3 ไปแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของหน่วยแรงบริเวณกาว และอายุการใช้งานของชิ้นส่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่ ความหนาของชั้นกาว และความหนาของแผ่น CFRP โดยกรณีศึกษาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบจะต้องทำการศึกษาใน 4 ช่วงหน่วยแรงคือ 83, 100, 120 และ 160 MPa ทำให้ต้องทำการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์จำนวน 36 โมเดล โดยการให้สัญลักษณ์ CT1.2/GT1.0 แทนกรณีศึกษาที่ความหนาของแผ่น CFRP 1.2 mm และ ความหนากาว 1.0 mm เป็นต้น

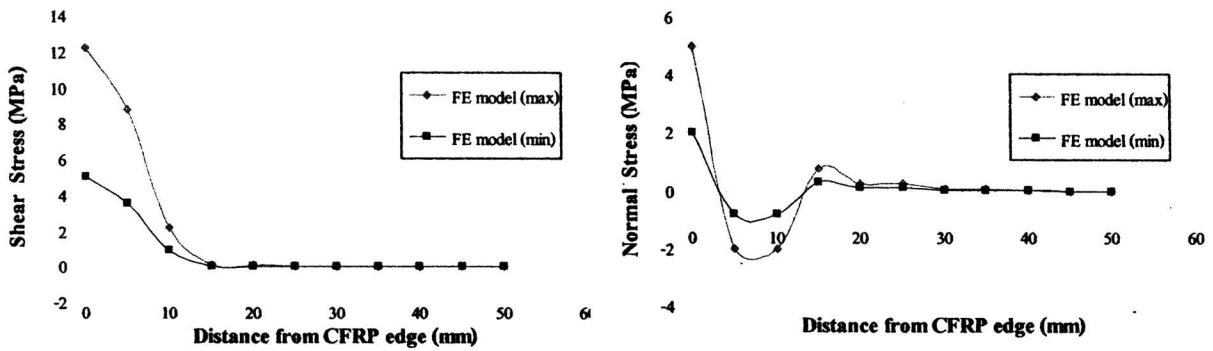
ตารางที่ 4.3 กรณีศึกษาในการศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

CFRP Thickness (mm)	Glue Thickness (mm)
1.2	1.0
	1.1
	1.2
1.4	1.0
	1.1
	1.2
1.6	1.0
	1.1
	1.2

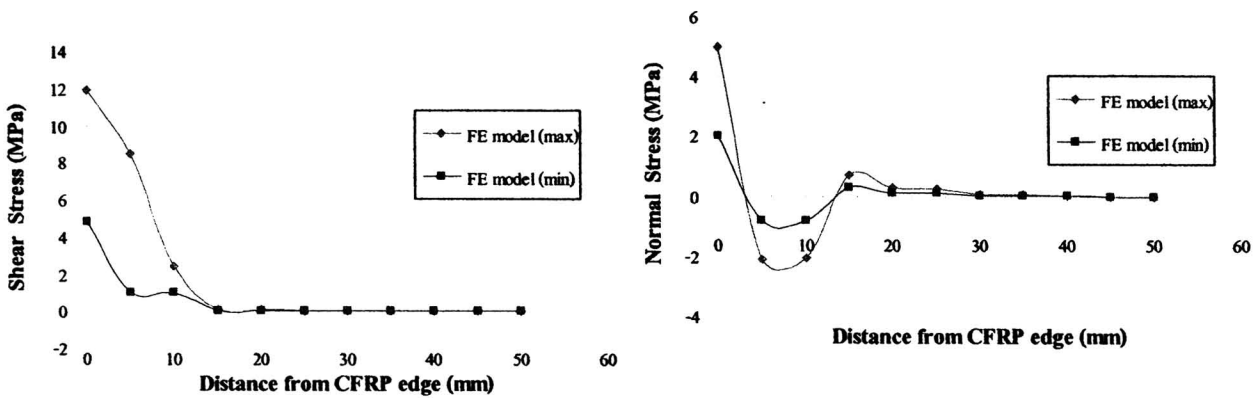
4.4.1 ผลของความหนาของชั้นกาบต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

การกระจายของหน่วยแรง

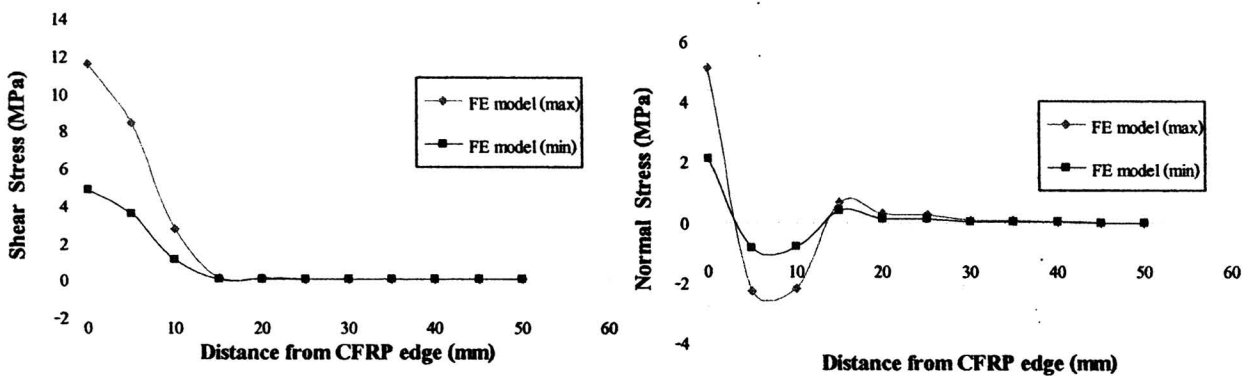
ขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงบริเวณกาบของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะนำเสนอผลอย่างละเอียดในกรณีที่มีความหนาของแผ่น CFRP คงที่ที่ 1.2 mm แต่เปลี่ยนความหนาภาวเป็น 1.0, 1.1 และ 1.2 mm (โมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.2/GT1.1 และ CT1.2/GT1.2) ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa ดังภาพที่ 4.12



ก) โมเดล CT1.2/GT1.0



ข) โมเดล CT1.2/GT1.1



ค) โมเดล CT1.2/GT1.2

ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบค่า หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงดึงจาก ในกรณีที่ความหนา CFRP คงที่แต่เปลี่ยนความหนาของกาว ($\Delta\sigma = 83 \text{ MPa}$)

จากภาพที่ 4.12 พบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุดที่บริเวณกาวจะมีค่ามากที่สุดบริเวณของแผ่น CFRP และค่อยลดลงเมื่อเลื่อนเข้าไปในตัวชิ้นส่วน โดยถ้าหากมีการเพิ่มความหนาเป็น 1.1 mm และ 1.2 mm (รูป 4.12 ข และ 4.12 ค) จะพบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุด จะลดลงจาก 12.2 MPa เหลือ 11.9 MPa และ 11.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของค่า หน่วยแรงเฉือน นี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาของกาวก็จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนขึ้น ส่วนค่าหน่วยแรงเฉือน ต่ำสุดก็จะมีแนวโน้มลดลงตามความหนาของกาวที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในส่วนของค่า หน่วยแรงดึงฉาก ที่เกิดขึ้นในชั้นกาวจะพบว่าค่า หน่วยแรงดึงฉากนั้นจะไม่ได้ขึ้นกับการเปลี่ยนความหนาของกาวเลย อย่างไรก็ตามตัวแปรที่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนก็คือ ค่า หน่วยแรงเฉือน ดังนั้นการที่ค่า หน่วยแรงเฉือน ลดลงนั้นจะมีผลดี คือจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นเพิ่มขึ้น ดังจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป สำหรับผลการวิเคราะห์ในกรณีอื่น ๆ สามารถดูได้จากภาคผนวก ก

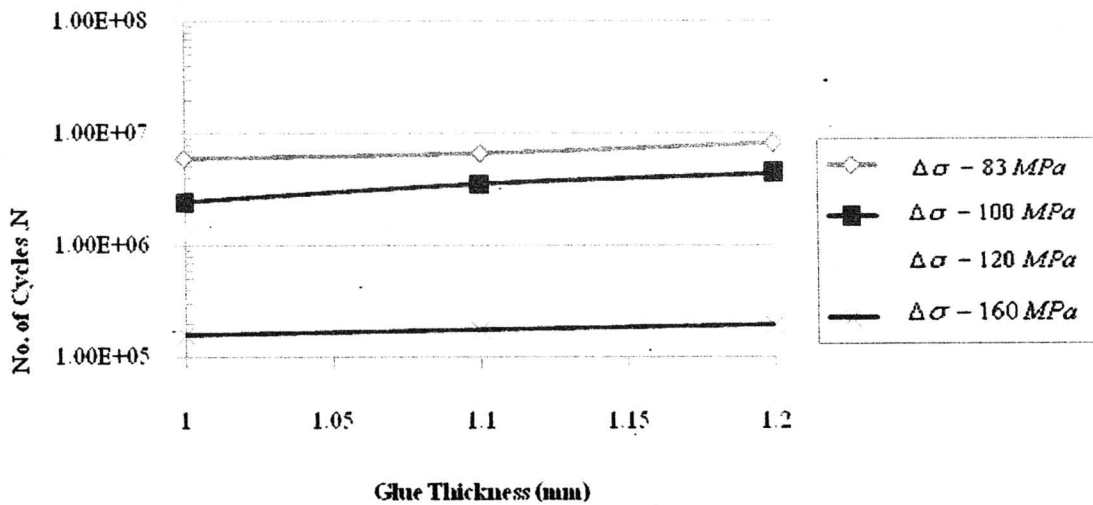
อายุการใช้งาน

จากค่า Shear Stress ที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ โดยการใช้สมการที่ 4.5 ซึ่งขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดในกรณีที่ความหนาของแผ่น CFRP คงที่ที่ 1.2 mm แต่เปลี่ยนความหนากาวเป็น 1.0, 1.1 และ 1.2 mm (โมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.2/GT1.1 และ CT1.2/GT1.2) ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งานของโมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.2/GT1.1 และ CT1.2/GT1.2 ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa

CFRP Thickness (mm)	Glue Thickness (mm)	Fatigue life (cycles)	% Increase
1.2	1.0	6052972	-
	1.1	6612790	9.24
	1.2	8072866	33.37

จากตารางที่ 4.4 จะพบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นกาวจาก 1 mm ไปเป็น 1.2 mm สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้มากถึง 33% ในส่วนของกรณีศึกษาอื่น ๆ สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 4.13



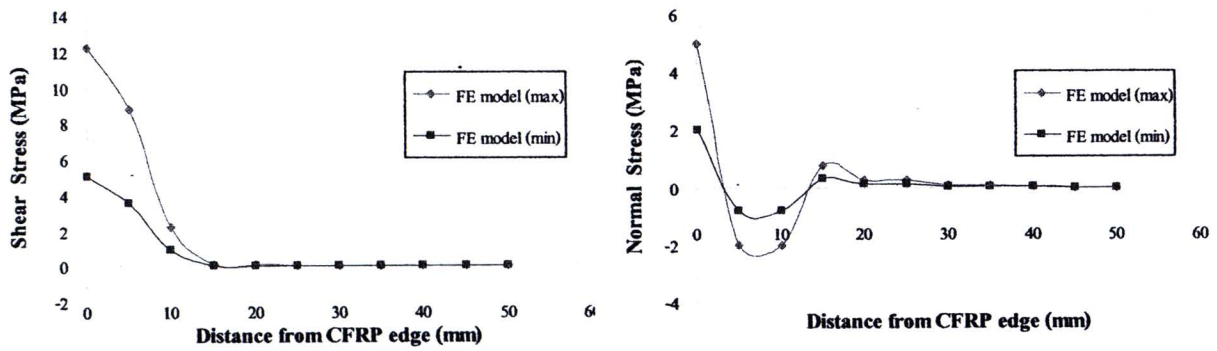
ภาพที่ 4.13 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้นกาวต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนา CFRP คงที่ = 1.2 mm)

จากภาพที่ 4.13 จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกช่วงของหน่วยแรง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาของชั้นกาวสามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ ในส่วนของผลการวิเคราะห์ในกรณีศึกษาอื่นๆ สามารถดูได้ในภาคผนวก ข

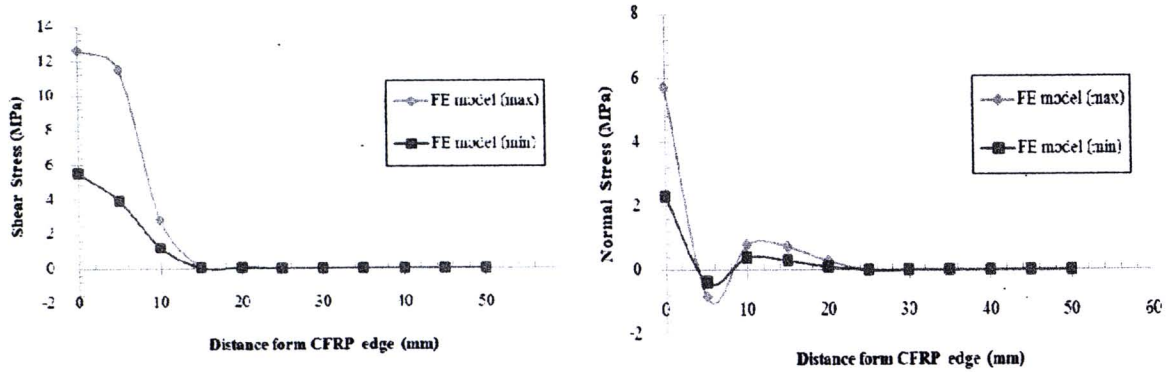
4.4.2 ผลของความหนาของแผ่น CFRP ต่อพฤติกรรมความล้าของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP

การกระจายของหน่วยแรง

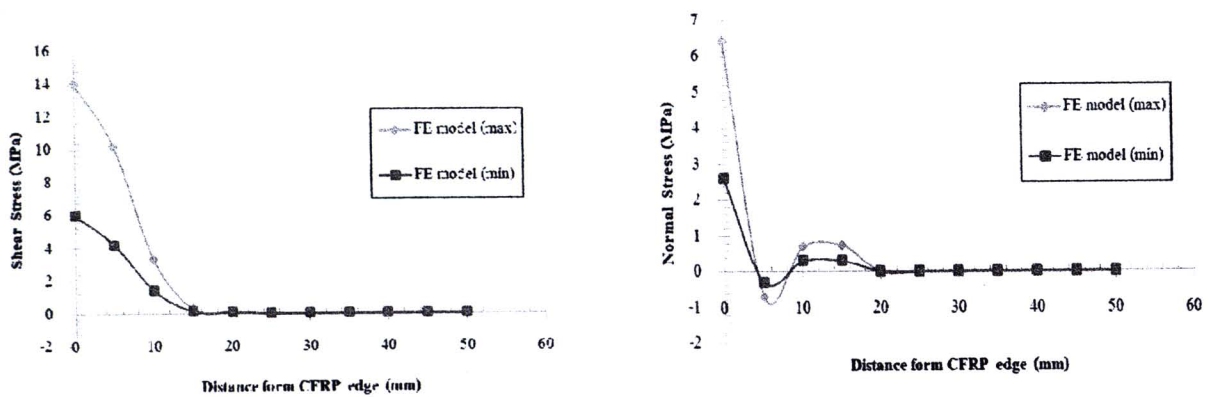
ขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์หาลักษณะการกระจายของหน่วยแรงบริเวณกาวของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP จะนำเสนอผลอย่างละเอียดในกรณีที่ความหนาของกาว คงที่ที่ 1.0 mm แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP เป็น 1.2, 1.4 และ 1.6 mm (โมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0) ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa ดังภาพที่ 4.14



ก) โมเดล CT1.2/GT1.0



ข) โมเดล CT1.4/GT1.0



ค) โมเดล CT1.6/GT1.0

ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบค่า หน่วยแรงเฉือน และ หน่วยแรงดัดฉาก ในกรณีที่ความหนาของ กาวคงที่ แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP ($\Delta\sigma = 83$ MPa)

จากภาพที่ 4.14 พบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุดที่บริเวณกาวจะมีค่ามากที่สุดบริเวณของแผ่น CFRP และค่อยลดลงเมื่อเลื่อนเข้าไปในตัวชิ้นส่วน โดยถ้าหากมีการเพิ่มความหนาเป็น 1.4 mm และ 1.6 mm (รูป 4.12 ข และ 4.12 ค) จะพบว่าค่า หน่วยแรงเฉือน สูงสุดในบริเวณกาวจะเพิ่มขึ้นจากจาก 12.2 MPa เป็น 13.3 MPa และ 14 MPa ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า หน่วยแรงเฉือน นี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความหนาแผ่น CFRP ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนสามารถรับแรงได้มากขึ้นก็จริง อย่างไรก็ตามการเพิ่มเฉพาะความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวโดยไม่เพิ่มความหนาของชั้นกาวทำให้การส่งผ่านแรงไปให้แผ่น CFRP นั้นเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ จุดนี้เองทำให้กาวเป็นตัวควบคุมการส่งผ่านของแรงระหว่างแผ่นเหล็กไปยังแผ่น CFRP ส่วนค่า หน่วยแรงเฉือน ต่ำสุดก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่น CFRP ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในส่วนของค่า หน่วยแรงดึงจาก ที่เกิดขึ้นในชั้นกาวจะพบว่าค่า หน่วยแรงดึงจาก นั้นจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า หน่วยแรงเฉือน อย่างไรก็ตามตัวแปรที่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนก็คือ ค่า หน่วยแรงเฉือน ดังนั้นการที่ค่า หน่วยแรงเฉือน เพิ่มขึ้นนั้นจะมีผลเสียคือจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลง ดังจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป สำหรับผลการวิเคราะห์ในกรณีอื่นๆสามารถดูได้จากภาคผนวก ก

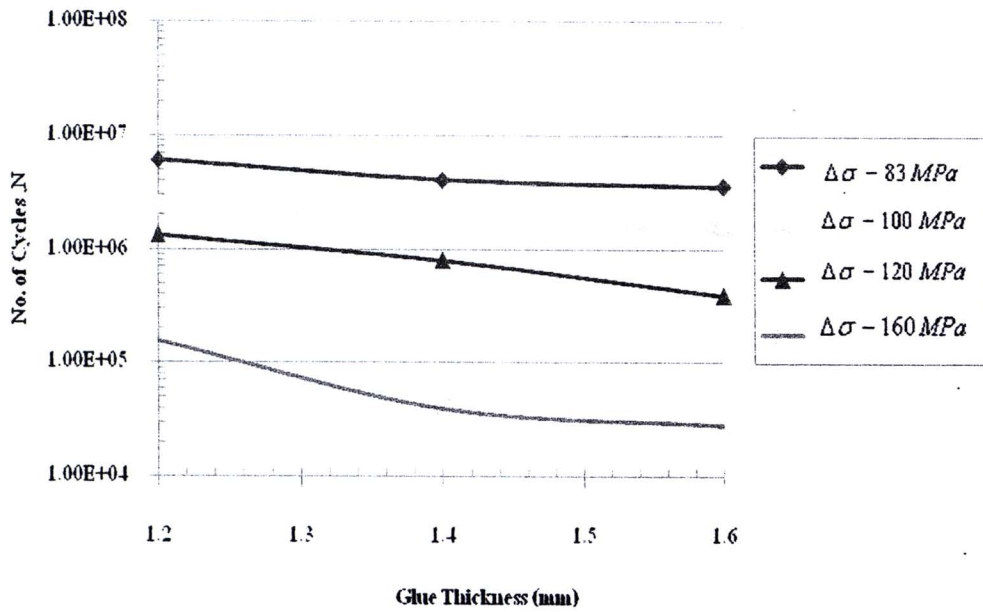
อายุการใช้งาน

จากค่า หน่วยแรงเฉือน ที่วิเคราะห์ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้สามารถประมาณค่าอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ได้ โดยการใช้สมการที่ 4.5 ซึ่งขั้นตอนนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์อย่างละเอียดในกรณีที่มีความหนาของกาว คงที่ที่ 1.0 mm แต่เปลี่ยนความหนาของแผ่น CFRP เป็น 1.2, 1.4 และ 1.6 mm (โมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0) ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งานของโมเดล CT1.2/GT1.0, CT1.4/GT1.0 และ CT1.6/GT1.0 ภายใต้ช่วงหน่วยแรงขนาด 83 MPa

Glue Thickness (mm)	CFRP Thickness (mm)	Fatigue life (cycles)	% Decrease
1.0	1.2	6052972	-
	1.4	4071221	32.74
	1.6	3540645	41.51

จากตารางที่ 4.5 จะพบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP จาก 1.2 mm ไปเป็น 1.6 mm โดยที่ความหนาของกาวคงที่นั้น จะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลงสูงสุดประมาณ 41.51% ในส่วนของกรณีศึกษาอื่นๆสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP ต่ออายุการใช้งานเมื่อมีการเพิ่มช่วงของหน่วยแรง (ความหนากระดาษที่ = 1.0 mm)

จากภาพที่ 4.15 จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียวจะทำให้ อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP มีค่าลดลงในทุกช่วงของหน่วยแรง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความหนาของแผ่น CFRP เพียงอย่างเดียว นั้น จะทำให้ อายุการใช้งานของชิ้นส่วนเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP นั้นลดลง ในส่วนของผลการวิเคราะห์ในกรณีศึกษาอื่นๆ สามารถดูได้ในภาคผนวก ข