

การวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวที่ปีกในคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่  
ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR FLANGE CRACKS IN I-SHAPED STEEL  
BEAMS REPAIRED WITH FIBER-REINFORCED POLYMER PATCHES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวที่ปีกในคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่เชื่อมแซมด้วยแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
โดย	นายกิตติชัย กั้นดงาม
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ฉวีไชย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี)

กิตติชัย กันต์งาม : การวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นสำหรับรอยร้าวที่ปีก  
 ในคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใย. ( ANALYSIS  
 OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR FLANGE CRACKS IN I-SHAPED STEEL  
 BEAMS REPAIRED WITH FIBER-REINFORCED POLYMER PATCHES) อ.ที่ปรึกษา  
 หลัก : รศ. ดร.อัครวัชร เล่นวารี

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF) สำหรับ  
 คานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรภายใต้แรงดึงหรือแรงดัดทั้งที่ไม่มีและมีการ  
 ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SIF และ  
 ความยาวรอยร้าวที่ปีกหรือเอว พบว่าเมื่อความยาวรอยร้าวที่ปีกหรือเอวมียาวมากขึ้นจะส่งผล  
 กระทบให้ค่า SIF (ที่ปีก) กรณีรับแรงดึง สูงกว่ากรณีรับแรงดัด ในขณะที่ค่า SIF (ที่เอว) กรณีรับ  
 แรงดัดมีค่าสูงกว่ากรณีรับแรงดึง ทั้งที่ไม่มีและมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ และการศึกษาผลกระทบ  
 ของมิติคานเหล็ก พบว่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอว  
 ส่งผลกระทบต่อค่า SIF กรณีที่ไม่มีมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ มากกว่าค่า SIF กรณีที่มีการซ่อมแซม  
 ด้วยแผ่นปะ และในทางกลับกันอัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก ส่งผล  
 กระทบต่อค่า SIF กรณีที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ มากกว่าค่า SIF กรณีที่ไม่มีมีการซ่อมแซมด้วย  
 แผ่นปะ ทั้งที่ปีกและเอวภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด ในขณะที่ความหนาและมอดุลัสของชั้นกาวส่งผล  
 กระทบให้ค่า SIF ลดลงเพียงเล็กน้อย สุดท้ายงานวิจัยนี้นำเสนอสมการทำนายค่า SIF โดยสมการที่  
 นำเสนอได้พัฒนาจากการวิเคราะห์ฐานข้อมูล SIF กว่า 43740 ข้อมูล ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์  
 เอลิเมนต์ กว่า 21870 ครั้ง ด้วยโปรแกรมเชิงพันธุกรรม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
 ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต .....  
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6070433221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Genetic programming, Fracture, Crack, I-Shaped, Finite element,  
Stress intensity factor, Steel beam

Kittichai Kanngam : ANALYSIS OF STRESS INTENSITY FACTORS FOR FLANGE  
CRACKS IN I-SHAPED STEEL BEAMS REPAIRED WITH FIBER-REINFORCED  
POLYMER PATCHES. Advisor: Assoc. Prof. AKHRAWAT LENWARI, Ph.D.

This research presents a stress intensity factor (SIF) analysis for I-shaped steel beams with symmetrical flange fractures under tension or bending in the absence of patch repair and with patch repair using the finite element method. Based on the study on the relationship between SIF values and the fracture length at flange or web, it was found that when the crack length increased, the SIF values at the flange in the case of tension were higher than the case of bending loads. While the SIF values at the web in the case of bending were higher than the case of tension both without and with patch repair. A study on the impact of steel beam dimensions showed that the ratio between the total flange cross-sectional area to the cross-sectional area of the web affected the SIF in the case without patch repair more than the case of patch repair. Vice versa, the ratio between the depth of the beam to the width of the flange affected to the SIF in the case of patch repair more than without patch repair for both flange and web crack tips under tension or bending. While the thickness and modulus of the adhesive layer had a slight impact on the SIF value. Finally, the research presents the SIF prediction equation that was developed from an analysis of 43,740 SIF data obtained from 21,870 finite element analyzes using a genetic programming.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้และคำแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จได้ด้วยดี รวมทั้งขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนงจันทร์ฉะไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร. ทักษิณ เทพชาติ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นสุดท้ายนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ ศึกษาและสามารถนำไปต่อยอดเพื่อการพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมโยธาต่อไป

กิตติชัย กันต์งาม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัย.....	6
2.1 การวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเห็นในองค์อาคารหลัก.....	6
2.2 การวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเห็นในองค์อาคารหลักที่ซุ่มแซมด้วยแผ่นปะ.....	16
2.3 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม <i>HeuristicLab</i> .....	21
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	23
3.1 กลศาสตร์แตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น.....	23
3.1.1 เกณฑ์การแตกหัก.....	23

3.1.2 อัตราการปลดปล่อยพลังงาน.....	26
3.1.3 การวิเคราะห์ความเค้นในวัตถุที่มีรอยร้าว .....	28
3.1.3.1 โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว .....	28
3.1.3.2 องค์ประกอบความเค้นและระยะเคลื่อนตัวบริเวณปลายรอยร้าว.....	28
3.1.3.3 ตัวประกอบความเข้มของความเค้น .....	31
3.1.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $K$ และ $G$ .....	33
3.1.3.5 สมการความเข้มของความเค้นในวัตถุที่มีขนาดจำกัด .....	33
3.2 การวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF) ด้วยโปรแกรม ABAQUS .....	35
3.3 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรม <i>HeuristicLab</i> .....	37
บทที่ 4 รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	42
4.1 การคัดเลือกข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลอง.....	42
4.1.1 มิติของคานเหล็ก .....	43
4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta$ และ $\gamma$ .....	46
4.1.3 ข้อมูลขนาดเหล็กและคุณสมบัติของวัสดุ .....	46
4.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานเหล็ก .....	48
4.2.1 การสร้างแบบจำลองของคานเหล็ก .....	48
4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์การรูดเข้าของผลเฉลย .....	49
4.2.1.2 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับคานเหล็ก ( $f_1$ ).....	53
4.2.1.3 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง.....	55
4.2.2 การสร้างแบบจำลองของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ .....	58
4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์การรูดเข้าของผลเฉลย .....	59
4.2.2.2 ค่าตัวประกอบปรับแก้เนื่องจากแผ่นปะ ( $f_2$ ) .....	62
4.2.2.3 การจำลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา .....	65
4.3 ระยะเวลาที่เห็นยวประสิทธิผล.....	66



บทที่ 5 ผลกระทบของตัวแปร .....	69
5.1 ผลกระทบของอัตราส่วนรอยร้าวและมิติคานเหล็กต่อ $f_1$ .....	69
5.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอว ( $\lambda_f, \lambda_w$ ) ต่อ $f_1$ .....	69
5.1.2 ผลกระทบของมิติของคานเหล็ก ( $\beta, \gamma$ ) ต่อ $f_1$ .....	72
5.2 ผลกระทบของวัสดุแผ่นปะ .....	76
5.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) และเอว ( $\lambda_w$ ) ต่อ $f_2$ .....	76
5.2.2 ผลกระทบของมิติของคานเหล็ก ( $\beta, \gamma$ ) ต่อ $f_2$ .....	79
5.2.3 ผลกระทบของตัวแปร ( $t_p, E_p$ ) แผ่นปะต่อค่าตัวประกอบปรับแก้ $f_2$ .....	84
5.2.4 ผลกระทบของตัวแปร ( $t_a, E_a$ ) ชั้นกาวต่อค่าตัวประกอบปรับแก้ $f_2$ .....	89
บทที่ 6 การพัฒนาสมการทำนาย SIF ด้วย <i>HeuristicLab</i> .....	93
6.1 การสร้างฐานข้อมูล .....	93
6.2 ขั้นตอนการพัฒนาสมการ .....	96
6.3 ผลกระทบของตัวแปรในสมการ .....	98
บทที่ 7 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	102
7.1 สรุปผลการวิจัย .....	102
7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง .....	103
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการวิเคราะห์ SIF ใน ABAQUS .....	104
ภาคผนวก ข การใช้งาน <i>HeuristicLab</i> .....	134
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ <i>HeuristicLab</i> กรณีไม่มีแผ่นปะ .....	142
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ <i>HeuristicLab</i> กรณีมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ .....	144
บรรณานุกรม .....	158
ประวัติผู้เขียน .....	163

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ $c_0$ ถึง $c_{11}$ [39].....	22
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบความเค้น และระยะเคลื่อนตัวบริเวณปลายรอยร้าวในวัสดุขนาดอนันต์ (ระบบพิกัด $xyz$ ).....	30
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบความเค้น และระยะเคลื่อนตัวบริเวณปลายรอยร้าวในวัสดุขนาดอนันต์ในเทอมของตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ระบบพิกัด $xyz$ ).....	32
ตารางที่ 3.3 สมการตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต สำหรับแผ่นแบนกว้าง $2W$ มีรอยร้าวที่กึ่งกลางขนาด $2a$ และรับความเค้นดึง $\sigma$ สม่่าเสมอ[40] [31].....	34
ตารางที่ 3.4 การกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมของตัวอย่างที่ 3.1.....	38
ตารางที่ 3.5 ค่า Pearson's r squared สำหรับสมการทำนายค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต.....	39
ตารางที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการที่ (3-37).....	41
ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบความแตกต่างของการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต.....	41
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลมิติขนาดของคานเหล็กและคุณสมบัติของวัสดุในงานวิจัยนี้.....	47
ตารางที่ 4.2 ช่วงขอบเขตของตัวแปรที่ใช้สำหรับศึกษาในงานวิจัยนี้.....	48
ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจสอบแบบจำลองของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดึง.....	66
ตารางที่ 6.1 จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้สำหรับพัฒนาสมการ.....	95
ตารางที่ 6.2 ผลของจำนวนการวิวัฒนาการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์.....	96
ตารางที่ 6.3 พารามิเตอร์ควบคุมในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์.....	96
ตารางที่ 6.4 ค่าสัมประสิทธิ์ $c_0$ ถึง $c_{13}$ กรณีรับแรงดึงและรับแรงดัด.....	99
ตารางที่ 6.5 ผลกระทบของตัวแปรในสมการที่ปีก กรณีรับแรงดึงและแรงดัด.....	100
ตารางที่ 6.6 ผลกระทบของตัวแปรในสมการที่เอว กรณีรับแรงดึงและแรงดัด.....	101
ตารางที่ 7.1 ขอบเขตของตัวแปรสำหรับสมการค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต.....	103

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างคานประกอบยึดด้วยหมุดย้ำและคานเหล็กตัดประกอบโดยการเชื่อม[4].....	2
รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกระทำซ้ำและขนาดรอยแตกร้าว[5] .....	2
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าวกับความขนาดรอยร้าว[5] .	6
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเติบโตของรอยร้าวในคานเหล็กรับแรงดัดภายใต้แรงกระทำเป็นรอบ (2.2a) กรณีที่แผ่นเหล็กเสริมตั้งเชื่อมกับแผ่นเอวของคานเหล็ก (2.2b) กรณีที่แผ่นเหล็กเสริมตั้งเชื่อมกับแผ่น เอวและปีกรับแรงดัด (2.2c) กรณีที่แผ่นเหล็กเสริมกำลังเชื่อมกับแผ่นปีกรับแรงดัด (2.2d) กรณีที่เกิด จากข้อบกพร่องของการเชื่อม[10].....	7
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งรอยร้าวที่กึ่งกลางของคานเหล็ก [12].....	8
รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของคานเหล็ก [12] .....	8
รูปที่ 2.5 แสดงการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และการปรับเส้นโค้ง[12] .....	9
รูปที่ 2.6 (ก) รอยร้าวบริเวณแผ่นเอว (web) ที่มีปลายรอยร้าวสองที่ (ข) รอยร้าวบริเวณปีกที่มีปลายรอยร้าวสามที่ [13].....	9
รูปที่ 2.7 แสดงการจำแนกรูปร่างของหน้าตัดคานเหล็ก[13].....	11
รูปที่ 2.8 ประเภทเอลิเมนต์เป็นผนังบาง (shell element, S8R5) [13].....	11
รูปที่ 2.9 รอยร้าวที่แผ่นเอวกรณีเกิดพฤติกรรมไม่ทับซ้อนกัน [14].....	12
รูปที่ 2.10 ผลกระทบของค่าความเข้มของความเค้นที่เอวต่ออัตราส่วนความยาวต่อความลึก (W40x149) เมื่อ 2.10a คือ ปลายรอยร้าวล่าง $K^A$ และ 2.10b ปลายรอยร้าวด้านบน $K^B$ [14] ..	12
รูปที่ 2.11 แสดงคานเหล็กที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดของรอยร้าวที่มุมและรอยร้าวตลอดความกว้างของ ปีกรับแรงดัด [15] .....	13
รูปที่ 2.12 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของรอยร้าวอยู่ที่มุมของปีกรับแรงดัด [15] .....	14
รูปที่ 2.13 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของรอยร้าวอยู่ที่ปีกยาวตลอดความกว้างของ ปีกรับ แรงดัด [15].....	14

รูปที่ 2.14 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต $\beta$ ของรอยร้าวอยู่ที่มุมของปีกรับแรงดึง และ $\beta$ ของแผ่นเหล็กแบน [15].....	15
รูปที่ 2.15 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต $\beta$ รอยร้าวอยู่ที่ใต้ปีกยาวตลอดความกว้างของ ปีกรับแรงดึง และ $\beta$ ของแผ่นเหล็กแบน [15].....	15
รูปที่ 2.16 แสดงขนาดมิติของแผ่นแซนวิช [16].....	16
รูปที่ 2.17 รูปแบบคานเหล็กที่เสริมด้วยแผ่นปะ FRP 2.17a หน้าตัดของเหล็กและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา 2.17b รูปแบบการปะด้วยFRP เพิ่มความกว้างของปีก 2.17c และ รูปแบบการปะด้วยFRP ครึ่งหนึ่งความกว้างของปีก 2.17d [28].....	18
รูปที่ 2.18 การวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลย[29].....	19
รูปที่ 2.19 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง [29].....	19
รูปที่ 2.20 มิติของแผ่นเหล็กที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ FRP และตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา [29].....	20
รูปที่ 2.21 แผนภาพเอ็กเซอร์ชันทรีของการวิเคราะห์เชิงพันธุกรรมด้วย [29].....	21
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัว ณ จุดที่ภาระกระทำ กรณีวัตถุเสียรูปยืดหยุ่นเชิงเส้น[40].....	24
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด กรณีวัตถุเสียรูปยืดหยุ่นเชิงเส้น[40].....	24
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนตัวตามแนวแรง ณ จุดที่แรงกระทำ ของวัตถุที่มีรอยร้าว [40].....	25
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนตัวตามแนวแรง ณ จุดที่แรงกระทำของแผ่นแบนที่มีรอยร้าวยาว $a$ และ $a + ad$ [40].....	27
รูปที่ 3.5 โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว [40].....	28
รูปที่ 3.6 องค์ประกอบความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว [40].....	29
รูปที่ 3.7 การกระจายความเค้น กรณีใช้ทุกเทอมและใช้เพียงเทอมแรกของสมการที่ (3.14) [40].....	30
รูปที่ 3.8 ผลของขนาดจำกัดต่อการถ่ายทอดแรงในวัตถุ [40].....	34
รูปที่ 3.9 วิธีในการคำนวณ J-integral [44].....	36
รูปที่ 3.10 แสดงขนาดของแผ่นเหล็กที่มีรอยร้าวทะลุผ่าน.....	37
รูปที่ 3.11 แผนภาพการกระจายสำหรับสมการรูปแบบที่ 3.....	39

รูปที่ 3.12 แผนภาพเอ็กเพรสชันทรีสำหรับสมการรูปแบบที่ 3.....40

รูปที่ 4.1 มิติของคานเหล็กและตัวแปรต่างๆ 4.1ก คานเหล็กที่มีรอยร้าว 4.1ข คานเหล็กที่มีรอยร้าวที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ.....44

รูปที่ 4.2 ต้นแบบการจำลองโมเดล 4.1ก รูปคาน 3 มิติ 4.2ข คานเหล็กที่มีรอยร้าวที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะกรณีรับแรงดึง (tension) 4.2ค คานเหล็กที่มีรอยร้าวที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ กรณีรับแรงดัด (bending) .....45

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  และ  $\gamma$  .....46

รูปที่ 4.4 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง.....50

รูปที่ 4.5 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าว ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$ .....51

รูปที่ 4.6 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าว ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$  .....51

รูปที่ 4.7 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าว ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$  .....52

รูปที่ 4.8 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าว ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$ .....52

รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นตลอดความหนาของปีก .....53

รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของค่า  $f_{1,t}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ .....54

รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของค่า  $f_{1,t}^f$  ในปีกของคานเหล็กที่ ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  .....54

รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของค่า  $f_{1,b}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ .....55

รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของค่า  $f_{1,b}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  .....55

รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Albrecht}^f$  ที่ปีกรับแรงอัดของเหล็กขนาด W1000x222 ภายใต้แรงดึง [48].....56

รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Albrecht}^f$  ที่เอร์รับแรงอัดของเหล็กขนาด W1000×222 ภายใต้อันตรึง [48] .....57

รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Albrecht}^f$  ที่เอร์รับแรงอัดของเหล็กขนาด W1000×222 ภายใต้อันตรึง [48].....57

รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Albrecht}^f$  ที่เอร์รับแรงอัดของเหล็กขนาด W1000×222 ภายใต้อันตรึง[48].....58

รูปที่ 4.18 ปีกคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ .....58

รูปที่ 4.19 ประเภทและการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ของแบบจำลองที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ .....59

รูปที่ 4.20 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีแผ่นปะ ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$ .....60

รูปที่ 4.21 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีแผ่นปะ ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$  .....61

รูปที่ 4.22 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีแผ่นปะ ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$  .....61

รูปที่ 4.23 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีแผ่นปะ ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$ .....62

รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นตลอดความหนาของปีก.....62

รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของค่า  $f_{2,t}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ .....63

รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของค่า  $f_{2,t}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ .....63

รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของค่า  $f_{2,b}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ .....64

รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของค่า  $f_{2,b}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ .....64

รูปที่ 4.29 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเหล็กภายใต้อันตรึง .....65

รูปที่ 4.30 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ.....	67
รูปที่ 4.31 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะต่อค่าตัวประกอบ ปรับแก้โรคาชนิดปีกและเอวทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด เมื่อ $\lambda_f = 0.7$ , $\lambda_w = 0.4$ , $t_p = 1.2\text{mm}$ , $t_a = 1.0\text{mm}$ , $E_a = 11200\text{ MPa}$ .....	67
รูปที่ 4.32 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะต่อค่าตัวประกอบ ปรับแก้โรคาชนิดที่ปีกและเอวทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด เมื่อ $\lambda_f = 0.7$ , $\lambda_w = 0.4$ , $t_p = 1.2\text{mm}$ , $t_a = 1.0\text{mm}$ , $E_p = 210\text{ GPa}$ .....	68
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f_{1,t}^f$ และความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอวของ W530x150 ภายใต้แรงดึง .....	70
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f_{1,b}^f$ และความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอวของ W530x150 ภายใต้แรง ดัด.....	71
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f_{1,t}^w$ และความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอวของ W530x150 ภายใต้แรง ดึง .....	71
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f_{1,b}^w$ และความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอวของ W530x150 ภายใต้แรง ดัด.....	72
รูปที่ 5.5 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ $f_{1,t}^f$ กรณีรับแรงดึง.....	73
รูปที่ 5.6 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ $f_{1,b}^f$ กรณีรับแรงดัด.....	74
รูปที่ 5.7 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ $f_{1,b}^w$ กรณีรับแรงดึง.....	74
รูปที่ 5.8 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ $f_{1,b}^w$ กรณีรับแรงดัด.....	75
รูปที่ 5.9 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ $f_{1(t,b)}^{f,w}$ .....	75
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f_{2,t}^f$ และ $\lambda_w$ เมื่อคานเหล็กขนาด W530x150 เมื่อ $E_p = 460\text{ GPa}$ , $t_p = 4.8\text{ mm}$ , $E_a = 11200\text{ MPa}$ และ $t_a = 1.0\text{ mm}$ .....	77
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f_{2,b}^f$ และ $\lambda_w$ เมื่อคานเหล็กขนาด W530x150 เมื่อ $E_p = 460\text{ GPa}$ , $t_p = 4.8\text{ mm}$ , $E_a = 11200\text{ MPa}$ และ $t_a = 1.0\text{ mm}$ .....	77
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f_{2,t}^w$ และ $\lambda_w$ เมื่อคานเหล็กขนาด W530x150 เมื่อ $E_p = 460\text{ GPa}$ , $t_p = 4.8\text{ mm}$ , $E_a = 11200\text{ MPa}$ และ $t_a = 1.0\text{ mm}$ .....	78

รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{2,b}^w$  และ  $\lambda_w$  เมื่อคานเหล็กขนาด W530x150  
 เมื่อ  $E_p = 460$  GPa,  $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm..... 78

รูปที่ 5.14 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{2,t}^f$  กรณีรับแรงดึงเมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ ,  $E_p = 460$  GPa,  
 $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm..... 80

รูปที่ 5.15 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{2,b}^f$  กรณีรับแรงดึงเมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ ,  $E_p = 460$  GPa,  
 $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm..... 81

รูปที่ 5.16 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{2,t}^w$  กรณีรับแรงดึงเมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ ,  $E_p = 460$  GPa,  
 $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm..... 82

รูปที่ 5.17 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{2,b}^w$  กรณีรับแรงดึงเมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ ,  $E_p = 460$  GPa,  
 $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm..... 83

รูปที่ 5.18 ผลกระทบของแผ่นปะต่อ  $f_{2(t,b)}^f$  เมื่อ  $t_p = 1.2, 2.4$  และ  $4.8$  mm โดยคานเหล็กขนาด  
 W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด..... 85

รูปที่ 5.19 ผลกระทบของแผ่นปะต่อ  $f_{2(t,b)}^w$  เมื่อ  $t_p = 1.2, 2.4$  และ  $4.8$  mm โดยคานเหล็กขนาด  
 W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด..... 86

รูปที่ 5.20 ผลกระทบของแผ่นปะต่อ  $f_{2(t,b)}^f$  เมื่อ  $E_p = 210, 300$  และ  $460$  GPa โดยคานเหล็กขนาด  
 W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด..... 87

รูปที่ 5.21 ผลกระทบของแผ่นปะต่อ  $f_{2(t,b)}^w$  เมื่อ  $E_p = 210, 300$  และ  $460$  GPa โดยคานเหล็กขนาด  
 W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด..... 88

รูปที่ 5.22 ผลกระทบของชั้นกาวต่อ  $f_{2(t,b)}^f$  เมื่อ  $t_a = 1.0, 2.0$  และ  $3.0$  mm โดยคานเหล็กขนาด  
 W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด ..... 89

รูปที่ 5.23 ผลกระทบของชั้นกาวต่อ  $f_{2(t,b)}^w$  เมื่อ  $t_a = 1.0, 2.0$  และ  $3.0$  mm โดยคานเหล็กขนาด  
 W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด ..... 90

รูปที่ 5.24 ผลกระทบของชั้นกาวต่อ  $f_{2(t,b)}^f$  เมื่อ  $E_a = 1815, 2944$  และ  $11200$  MPa โดยคานเหล็ก  
 ขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด..... 91

รูปที่ 5.25 ผลกระทบของชั้นกาวต่อ  $f_{2(t,b)}^w$  เมื่อ  $E_a = 1815, 2944$  และ  $11200$  MPa โดยคานเหล็ก  
 ขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด..... 92

รูปที่ 6.1 แผนภาพกระบวนการพัฒนาสมการ ..... 93



รูปที่ 6.2 แผนภาพการควบคุมตัวแปร.....	94
รูปที่ 6.3 การคำนวณจำนวนครั้งของการสร้างแบบจำลอง.....	95
รูปที่ 6.4 ขั้นตอนการพัฒนาสมการทั้ง 5 รอบ.....	97



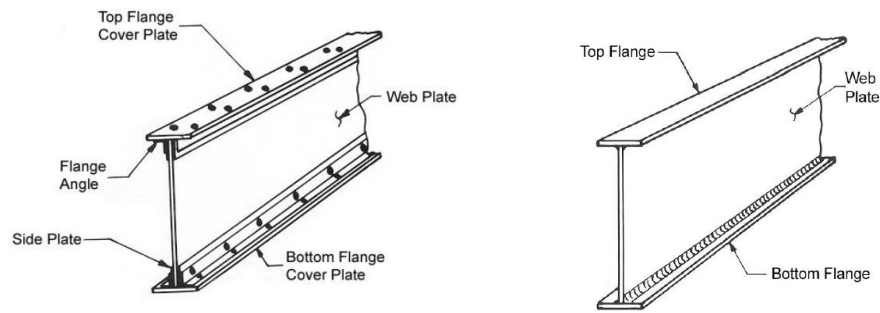
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การวิบัติของสะพานเกิดขึ้นได้จากหลายกรณีซึ่งที่ผ่านมาพบสาเหตุหลักที่ทำให้สะพานเกิดการวิบัติคือ วัสดุที่ใช้ก่อสร้างมีข้อบกพร่อง ความผิดพลาดในการออกแบบรวมถึงความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุกต่างๆที่ใช้ในการออกแบบสะพานและข้อบกพร่องในขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้าง[1] ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงมาอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับข้อกำหนดทางเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบ (AASHTO LRFD design specifications) [2] และคู่มือสำหรับการประเมินสภาพการใช้งานของสะพาน(AASHTO manual for bridge evaluation)[3] ด้วยความเข้าใจอย่างลึกซึ้งถึงการวิบัติของสะพานเพื่อให้มีข้อกำหนดอย่างมีมาตรฐานมากยิ่งขึ้น ในการออกแบบวิศวกรต้องตรวจสอบให้แน่ชัดว่าการออกแบบชิ้นส่วนประกอบต่างๆของสะพานมีความแข็งแรงเพียงพอ มีประสิทธิภาพไม่เกิดการล้าหรือเกิดการแตกหักระหว่างอายุการใช้งาน

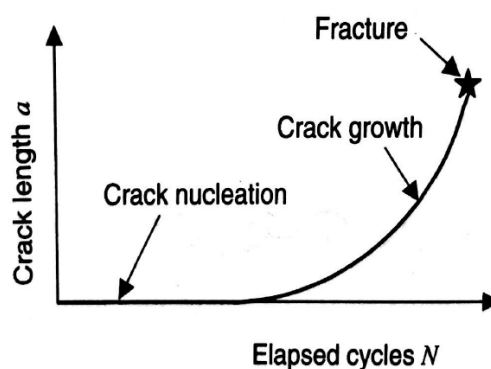
สะพานโครงสร้างเหล็กเป็นหนึ่งในโครงสร้างสะพานที่พบมากชิ้นทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศซึ่งส่วนประกอบของโครงสร้างสะพานที่เป็นคานเหล็ก (girders) มี 2 รูปแบบ แบบแรกคานเหล็กจะทำมาจากเหล็กรูปพรรณประเภทต่างๆมาประกอบเป็นคานเหล็กตัวไอ(I-shape) ด้วยหมุดยึด (riveted) ดังรูปที่ 1.1(ก) และแบบที่สองคานเหล็กทำจากแผ่นเหล็กมาตัดประกอบ(built-up) โดยการเชื่อมดังรูปที่ 1.1(ข) ซึ่งทั้งสองแบบได้รับความนิยมนำมาสร้างสะพานอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นรูปแบบที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากสะพานเหล็กในประเทศไทยที่มีการก่อสร้างได้แก่ สะพานเหล็กข้ามแม่น้ำต่างๆที่ยานพาหนะสัญจรไปกลับตลอดทั้งวันและสะพานเหล็กที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เดินรถไฟ ฯลฯ ซึ่งสะพานเหล่านี้ส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ห่างไกลและทุรกันดารยากต่อการซ่อมบำรุงและดูแลรักษาของโครงสร้างสะพานเหล็กซึ่งอาจก่อให้เกิดการวิบัติเนื่องจากการเติบโตของรอยร้าวที่เป็นผลมาจากการขาดการบำรุงและดูแลรักษาของโครงสร้างสะพานเหล็ก ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้เสนอการซ่อมแซมคานเหล็กที่มีรอยร้าวด้วยวัสดุแผ่นปะเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานขององค์อาคารเหล็กและชะลอการเติบโตของรอยร้าวลงได้



(ก) คานเหล็กประกอบยึดด้วยหมุดย้ำ (ข) คานเหล็กตัด-ประกอบโดยการเชื่อม

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างคานประกอบยึดด้วยหมุดย้ำและคานเหล็กตัดประกอบโดยการเชื่อม[4]

การจำลองโครงสร้างเหล็กในปัจจุบันได้มีการออกแบบมาเพื่อป้องกันความล้า (fatigue) และรอยร้าว (cracks) ซึ่งเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง โดยเป็นผลมาจากข้อบกพร่องของวัสดุ ข้อบกพร่องในขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้าง การเปลี่ยนแปลงรูปทรง ความเค้นและผลกระทบที่เกิดจากแรงกระทำของยานพาหนะ เช่น สะพานลอยที่มีความสูงจากพื้นถนนถึงใต้คานสะพานต่ำ เมื่อมียานพาหนะที่มีสูงลอดผ่านเข้ามาใต้สะพานจะสร้างความเสียหายแก่คานเหล็กส่วนล่าง เป็นเหตุให้เกิดรอยแตกร้าว ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกที่จะส่งผลให้สะพานเกิดรอยร้าว ยิ่งไปกว่านั้นจำนวนยานพาหนะเคลื่อนที่อยู่ด้านบนสะพานเป็นปัจจัยการเพิ่มรอยแตกให้มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 1.2 ต่ำหนึในวัสดุเป็นสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการรับภาระหรือความแข็งแรงของชิ้นส่วนลดลงซึ่งนำไปสู่การวิบัติ [1]



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกระทำซ้ำและขนาดรอยแตกร้าว[5]

ในปัจจุบันการซ่อมแซมรอยร้าวให้กับส่วนประกอบของโครงสร้างเหล็กใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber reinforced polymer, FRP) ที่สามารถซ่อมแซมให้กับส่วนประกอบของโครงสร้างเหล็ก ซึ่งได้รับการยอมรับถึงประสิทธิภาพในการซ่อมแซมชิ้นส่วนของโครงสร้างต่างๆ [6] การนำพอลิเมอร์

เสริมเส้นใยไปใช้ในการซ่อมแซมให้กับโครงสร้างเหล็กที่ยังไม่เสียหายก็จะนำไปสู่การเพิ่มภาระการรับน้ำหนักได้มากขึ้น และในกรณีที่โครงสร้างเหล็กเกิดความเสียหายจากแรงกระทำซ้ำๆ หรือการใช้งานของโครงสร้างมาเป็นเวลานานที่ทำให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างเกิดรอยร้าวขึ้น สามารถใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยมาซ่อมแซมให้กับชิ้นส่วนของโครงสร้างเพื่อช่วยยืดระยะเวลาการใช้งานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยมาซ่อมแซมให้กับชิ้นส่วนของโครงสร้างนั้นจะช่วยลดความเค้นที่ปลายรอยร้าวและขนาดช่องเปิดของรอยร้าวที่เกิดขึ้นลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ

Wu และคณะ 2012 [7] ได้ศึกษาทดลองเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมความล้าของคานเหล็กที่มีร่องบากซึ่งเสริมด้วยวัสดุเส้นใยผ่านการทดสอบภายใต้ความต้านทานต่อแรงดึงเทียบเท่า พบว่าผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่เพียงแต่ชะลอการเริ่มต้นของรอยแตกร้าว แต่ยังลดอัตราการเติบโตของรอยร้าวและยืดอายุความล้าได้ [8]

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเห็นถึงความสำคัญและปัญหาที่จะตามมาเมื่อชิ้นส่วนหรือองศาอาคารเหล็กนั้นไม่ได้ถูกบำรุงซ่อมแซมหรือไม่ได้ดูแลรักษาอย่างถูกวิธี จึงได้หาหนทางที่จะช่วยลดการเติบโตของรอยร้าวหรือชะลอการวิบัติด้วยการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ โดยเริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ที่เหมาะสม วิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปร และเสนอสมการทำนายค่าความเค้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าว ทั้งนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้และนำไปพัฒนาต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.2.1 พัฒนาแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method, FEM) ที่เหมาะสมเพื่อวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเค้มของความเค้น (stress intensity factor, SIF) ของรอยร้าวในองศาอาคารเหล็ก

1.2.2 วิเคราะห์ผลกระทบของแผ่นปะต่อค่าตัวประกอบความเค้มของความเค้น

1.2.3 พัฒนาสมการทำนายค่า SIF สำหรับรอยร้าวที่ปีกและเอวภายหลังการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยมีดังนี้

1.3.1 มอดูลัสของวัสดุเหล็กและชั้นกาวเป็นไอโซโทรปิกแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ในขณะที่แผ่นปะ FRP เป็นวิเคราะห์เป็นวัสดุออร์โททอปิกคอลยืดหยุ่นเชิงเส้น

1.3.2 การยึดเกาะของชั้นกาวกับผิวของเหล็กยึดเหนี่ยวโดยสมบูรณ์

1.3.3 มิติของคานเหล็กรูปตัวไอที่จะใช้ในการศึกษาวิจัยอ้างอิง AISC manual 2017[9]

1.3.4 ไม่พิจารณาผลกระทบหน่วยแรงคงค้าง (residual stresses) ขององค์อาคาร

1.3.5 ตัวแปรของแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ได้แก่ ความหนาของชั้นกาว ความหนาแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใย มอดูลัสยืดหยุ่นของคานเหล็ก มอดูลัสยืดหยุ่นของชั้นกาวและมอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

1.3.6 รอยแตกร้าวที่ปีกมีความสมมาตร (three-tip-cracks) อยู่ใต้ท้องคานเหล็ก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของคานเหล็กโดยอยู่ภายใต้แรงดัดและแรงดึง

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1.4.1 การทบทวนศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าวในองค์อาคารเหล็ก

1.4.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าวในองค์อาคารเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

1.4.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม *HeuristicLab*

1.4.2 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.2.1 ทฤษฎีกลศาสตร์แตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

1.4.2.2 วิธีหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF) โดยใช้ โปรแกรม ABAQUS ด้วยวิธี interaction integral

1.4.2.3 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม *HeuristicLab*

1.4.3 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และตรวจสอบความถูกต้องกับงานวิจัยก่อนหน้า

1.4.4 การใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาตัวแปรของระบบแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีผลกระทบต่อตัวประกอบความเข้มของความเค้น ของรอยร้าวในคานเหล็กภายหลังการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

1.4.5 ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อค่า SIF

1.4.6 การนำค่า SIF ทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS มาวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม *HeuristicLab*

1.4.7 การพัฒนาสมการทำนายค่า SIF

1.4.8 สรุปผลการวิจัย

1.4.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้คือ

1.4.1 แนวทางการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF) ของคานเหล็กที่เชื่อมแซมด้วยแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

1.4.2 เข้าใจผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเข้มของความเค้นสำหรับคานเหล็กที่มีรอยร้าวที่ปีกและเอว

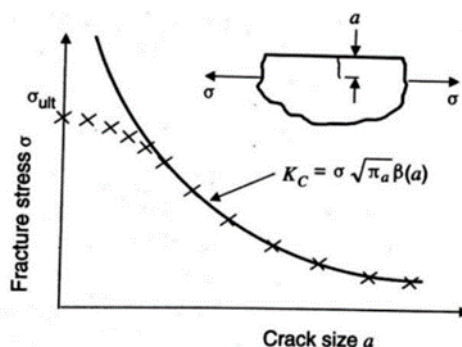
1.4.3 สมการทำนายค่า SIF ภายหลังจากการเชื่อมแซมด้วยแผ่นปะ

## บทที่ 2

### การทบทวนงานวิจัย

#### 2.1 การวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้นในองค์อาคารเหล็ก

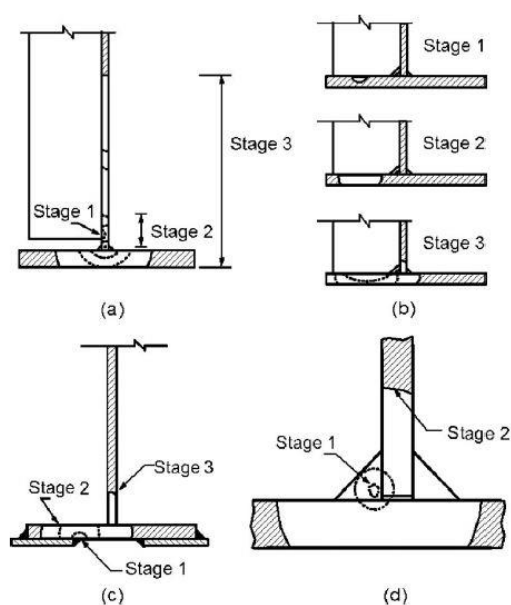
การแตกหักเป็นหนึ่งในรูปแบบของการวิบัติที่เกิดขึ้นขององค์อาคาร โดยไม่มีสัญญาณเตือนล่วงหน้า เมื่อเกิดขึ้นจะเป็นอันตรายอย่างมากต่อชีวิตและทรัพย์สิน การเกิดตำหนิหรือรอยร้าวเพียงเล็กน้อยที่ขึ้นส่วนโครงสร้างเหล็กจะทำให้ค่าความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าวมีค่าสูง ซึ่งทำให้เกิดการความเสียหายต่อเนื่องจนเกิดจากการแตกหักดังรูปที่ 2.1 ดังนั้นค่าความเข้มของความเค้น SIF จึงมีความสำคัญที่จะสามารถบ่งบอกได้ว่าองค์อาคารเหล่านี้จะสามารถต้านทานการแตกหักได้มากน้อยเพียงใด



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าวกับความขนาดรอยร้าว[5]

จากศึกษาในอดีตของ Fisher และคณะ (1970) [10] เกี่ยวกับกำลังความล้า (fatigue strength) ของรอยเชื่อมในสะพานเหล็กพบว่า ร้าวมีพัฒนาการมาจากข้อบกพร่องในการเชื่อม (weld defect) รูปที่ 2.2 แสดงการเติบโตของรอยร้าว ในคานเหล็กเชื่อมประกอบหน้าตัดรูปตัวไอรับแรงดัดในระยะต่างๆ โดยรูปที่ 2.2a แสดงรอยร้าวเริ่มต้นในกรณีที่แผ่นเหล็กเสริมตั้ง (transverse steel stiffener) เชื่อมกับแผ่นเอว (web) เท่านั้น โดยในระยะแรกรอยร้าวจะเติบโตเป็นรูปครึ่งวงรี (semielliptical shape) จนกระทั่งรอยร้าวทะลุความหนาของแผ่นเอว จากนั้นระยะที่สอง รอยร้าวจะเติบโตในแผ่นเอวโดยปลายรอยร้าวด้านบนขยายขึ้นด้านบนของแผ่นเอว ในขณะที่ปลาย ด้านล่างขยายลงไปจนกระทั่งรอยร้าวทะลุแผ่นปีก (flange) และกลายเป็นรอยร้าวที่มี 3 ปลาย (three-tip crack) ในระยะที่สาม ซึ่งปลายรอยร้าวในแผ่นเอวจะเติบโตขึ้นด้านบนต่อไป ในขณะที่ทั้ง 2 ปลายของรอยร้าวที่ปีกรับแรงดัดเติบโตตามแนวความกว้างในลักษณะสมมาตร (symmetrical flange

crack) รูปที่ 2.2b แสดงรอยร้าวเริ่มต้นในกรณีแผ่นเหล็กเสริมตั้งเชื่อมกับแผ่นเอวและปีกรับแรงดึง ในกรณีนี้การเติบโตของรอยร้าวจะแตกต่างจากรูปที่ 2.2a เนื่องจากการเติบโตของรอยร้าวจะมีลักษณะไม่สมมาตร รูปที่ 2.2c แสดงการเติบโตของรอยร้าวในกรณีแผ่นเหล็กเสริมกำลังเชื่อมกับปีกรับแรงดึง ในกรณีนี้การเติบโตของรอยร้าวคล้ายกับ รูป 1b โดยมีลักษณะไม่สมมาตร ข้อแตกต่างคือ รอยร้าวเริ่มต้นในรูปที่ 2.2b เกิดที่ผิวบนของปีก ในขณะที่รอยร้าวเริ่มต้นในรูปที่ 2.2c เกิดที่ผิวล่างของปีก และรูปที่ 2.2d แสดงการเติบโตของรอยร้าวที่เกิดข้อบกพร่องของการเชื่อม ซึ่งการเติบโตของรอยร้าวมีลักษณะค่อนข้างสมมาตร



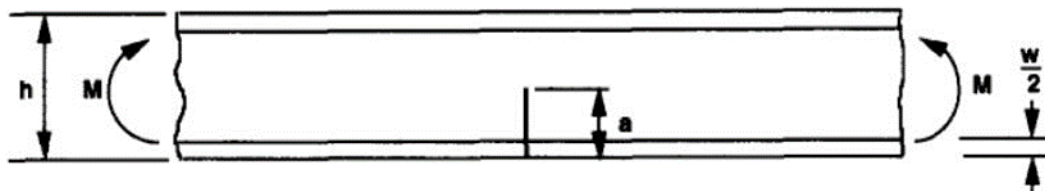
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเติบโตของรอยร้าวในคานเหล็กรับแรงดัดภายใต้แรงกระทำเป็นรอบ (2.2a) กรณีที่แผ่นเหล็กเสริมตั้งเชื่อมกับแผ่นเอวของคานเหล็ก (2.2b) กรณีที่แผ่นเหล็กเสริมตั้งเชื่อมกับแผ่นเอวและปีกรับแรงดึง (2.2c) กรณีที่แผ่นเหล็กเสริมกำลังเชื่อมกับแผ่นปีกรับแรงดึง (2.2d) กรณีที่เกิดจากข้อบกพร่องของการเชื่อม[10]

Haddad และคณะ (1979) [11] ได้ศึกษาวิจัยถึงวิธีการต่างๆ ในการหาค่าความเข้มของความเค้นสำหรับคานเหล็กรูปตัวไอ (I-beam) ที่มีรอยร้าวเฉพะ พบว่ารอยร้าวจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงอย่างฉับพลันที่บริเวณรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเอวกับปีกรับแรงดึงด้วยความเค้นที่เพิ่มขึ้นจากแรงกระทำซ้ำๆ อย่างต่อเนื่องทำให้รอยร้าวสามารถเติบโตต่อไปและนำไปสู่การวิบัติของอาคาร

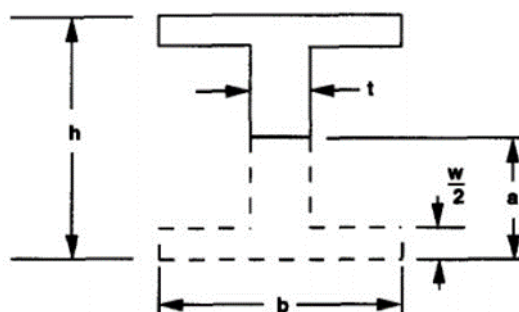
Dunn และคณะ (1997) [12] ได้ศึกษาวิจัยถึงการหาค่าความเข้มของความเค้นสำหรับคานเหล็กรูปตัวไอเพื่อหาค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (geometry correction factor,  $\beta$ ) โดยสมมุติ



ให้รอยร้าวที่ตัดผ่านปีกขึ้นมาถึงแผ่นเวอริงในรูปที่ 2.3 ซึ่งอยู่ภายใต้การรับโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2.3



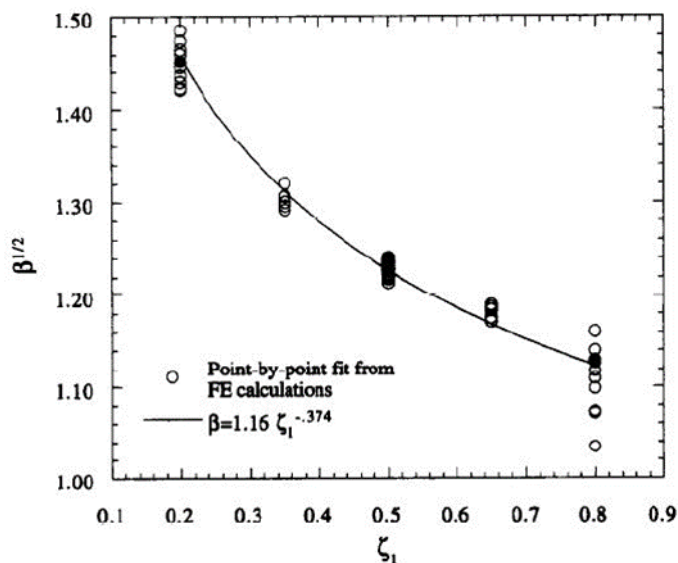
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งรอยร้าวที่กึ่งกลางของคานเหล็ก [12]



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของคานเหล็ก [12]

หนึ่งในวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อหาค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับคานเหล็กดังในรูปที่ 2.4 ซึ่งในอดีตที่ผ่านวิศวกรและนักวิจัยส่วนใหญ่ได้ใช้ค่า  $\beta = 1$  อย่างไรก็ตามค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับการศึกษานี้ใช้ได้สำหรับหน้าตัดที่เป็นคานเหล็กไวต์แฟรงค์ด์เท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตออกมาเป็น 3 เทอม ได้แก่  $\zeta^1 = a/h$ ,  $\zeta^2 = t/b$  และ  $\zeta^3 = w/h$  ตามรูปที่ 2.4 โดยที่ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต  $\beta$  นั้นได้จากการกำหนดค่า  $\zeta^1$  เพียงพารามิเตอร์เดียวเท่านั้น เนื่องจากค่า  $\zeta^1$  มีผลกระทบต่อค่าความเข้มของความเค้นมากที่สุด และได้ทำการวิเคราะห์ด้วย FEM เพื่อนำมาค่ามาปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ตามรูปที่ 2.5

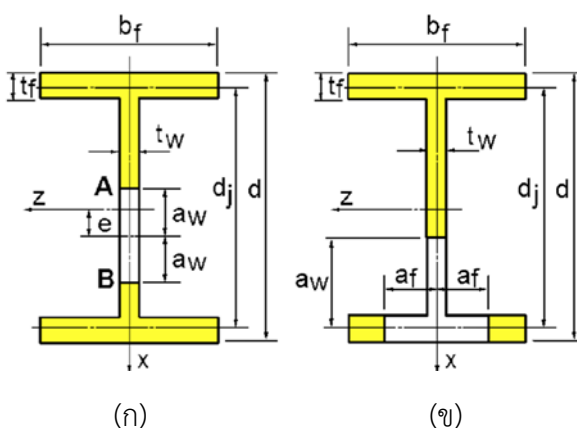
$$\beta = 1.16\zeta^{1-0.374} \quad (2-1)$$



รูปที่ 2.5 แสดงการวิเคราะห์หัดด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และการปรับเส้นโค้ง[12]

จากค่าอัตราส่วนความยาวของรอยร้าวต่อความลึกของคานเหล็ก  $\zeta_1$  ในช่วงค่า 0.2 ถึง 0.8 นั้นมีผลให้ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต  $\beta$  นั้นมีการเปลี่ยนแปลงถึง 40% แต่ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตอีกสองตัวของคานเหล็ก  $\zeta_2$  และ  $\zeta_3$  นั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ 11% ซึ่งมีผลกระทบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ  $\zeta_1$  Dunn และคณะ (1997) [12]

งานวิจัยของ Albrecht และคณะ (2008) [13] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาสมการเกี่ยวกับค่าความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าว กรณีแรกสำหรับรอยร้าวบริเวณแผ่นเอวของคานเหล็กรูปตัวไอมีปลายรอยร้าวสองที่ และกรณีที่สองสำหรับรอยร้าวบริเวณปีกของคานเหล็กรูปตัวไอซึ่งมีปลายรอยร้าวอยู่สามที่ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก.) และ 2.6 (ข.) ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 (ก) รอยร้าวบริเวณแผ่นเอว (web) ที่มีปลายรอยร้าวสองที่  
(ข) รอยร้าวบริเวณปีกที่มีปลายรอยร้าวสามที่ [13]

รูปที่ 2.6 (ก) แสดงรอยร้าวบริเวณแผ่นเอวของคานเหล็กรูปตัวไอซึ่งมีค่าการเยื้องศูนย์  $e$  ดังนั้นค่าความเข้มของความเค้นจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของรอยร้าวและระยะการเยื้องศูนย์ ในขณะที่รอยร้าวบริเวณปีกของคานเหล็กรูปตัวไอซึ่งมีปลายรอยร้าวอยู่สามที่ ตามรูปที่ 2.6(ข) นั้นขนาดร้าวที่ปีกจะสมมาตรกันซึ่งจะได้ค่าความเข้มของความเค้นสองค่าคือที่ปีก และ ที่เอว

สำหรับรอยร้าวบริเวณแผ่นเอวของคานเหล็กรูปตัวไอซึ่งมีปลายรอยร้าวสองที่ได้เสนอสมการสำหรับหาค่าความเข้มของความเค้นภายใต้แรงดึงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดตั้งสมการที่ (2-2)

$$K^{A,B} = f^{A,B} (\lambda_w, \varepsilon, \beta) \sigma \sqrt{\pi a_w} \quad (2-2)$$

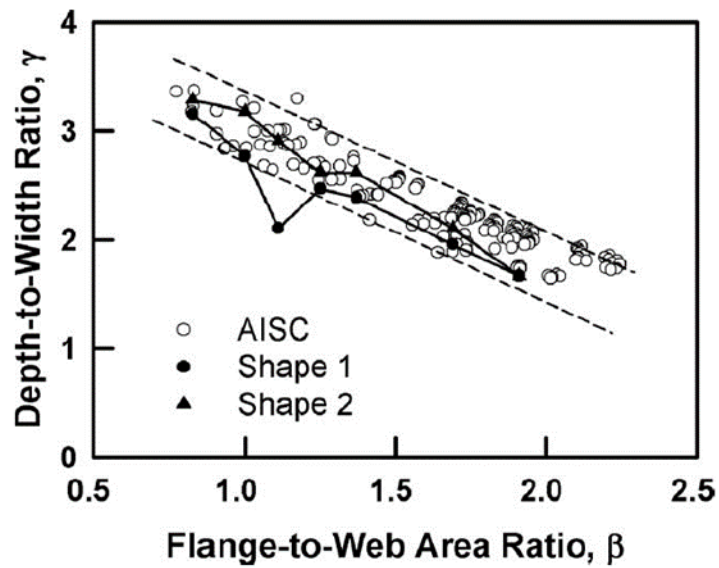
โดยที่ A และ B แสดงถึงปลายรอยร้าวบนและปลายรอยร้าวล่างตามลำดับ เมื่อ  $a_w$  คือระยะครึ่งหนึ่งของระยะรอยแตกร้าวทั้งหมด  $\sigma$  คือหน่วยแรงตามแนวแกนหรือหน่วยแรงดัดที่ผิวสูงสุดที่กระทำกับหน้าตัดเหล็ก  $\varepsilon = e / (d_j / 2)$  คืออัตราส่วนการเยื้องศูนย์ของรอยร้าวของคานเหล็กและ  $\lambda_w = a_w / (d_j - e)$  คืออัตราส่วนขนาดของรอยร้าวที่แผ่นเอว โดยตัวแปรทั้งหมดอ้างอิงตามรูปที่ 2.6(ก)

สำหรับรอยร้าวบริเวณปีกของคานเหล็กรูปตัวไอซึ่งมีปลายรอยร้าวอยู่สามที่ (three-tip crack) ภายใต้แรงดึงและโมเมนต์ดัด ได้เสนอสมการค่าความเข้มของความเค้นตั้งสมการที่ (2-3)

$$K^{w,f} = f^{w,f} (\lambda_w, \lambda_f, \beta) \sigma \sqrt{\pi a_{w,f}} \quad (2-3)$$

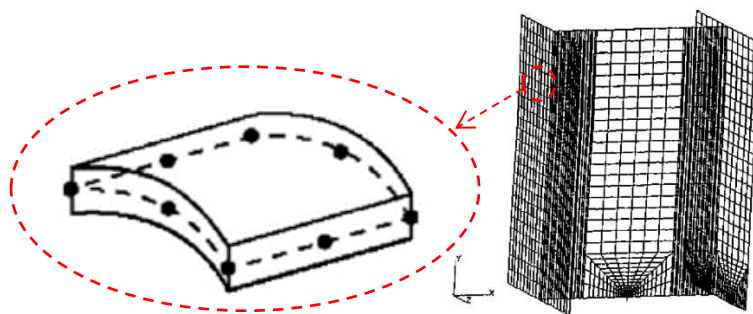
โดยที่  $w$  และ  $f$  แทน ปลายรอยร้าวที่ส่วนเอวและปลายรอยร้าวที่ปีกสองด้านที่สมมาตร เมื่อ  $a_w$  คือระยะของรอยร้าวส่วนเอว  $a_f$  คือระยะของรอยแตกที่ปีก  $\lambda_w = a_w / d_j$  คืออัตราส่วนขนาดของรอยร้าวที่แผ่นเอว และ  $\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$  คืออัตราส่วนขนาดของรอยร้าวที่ปีก โดยตัวแปรทั้งหมดอ้างอิงตามรูปที่ 2.6(ข)

อีกสองพารามิเตอร์ที่รวมอยู่ในสมการ  $\beta = 2A_f / A_w$  คืออัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของปีกต่อพื้นที่หน้าตัดของส่วนเอว  $\gamma = d_j / b_f$  คืออัตราส่วนความลึกของปีกคานต่อความกว้างของปีก และ  $f$  คือค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (geometry correction factor) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความเข้มของความเค้น จากคู่มือขนาดหน้าตัดเหล็กของ (AISC manual) ได้มีการพิจารณาโดยนำขนาดหน้าตัดของคานเหล็ก(W-shape) มาทั้งหมด 7 ชุดเพื่อมาคำนวณหาค่า  $\beta$  ที่ใกล้เคียงกันและค่า  $\gamma$  ที่ค่าแตกต่างกัน ตามรูปที่ 2.7 เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรทั้งสอง



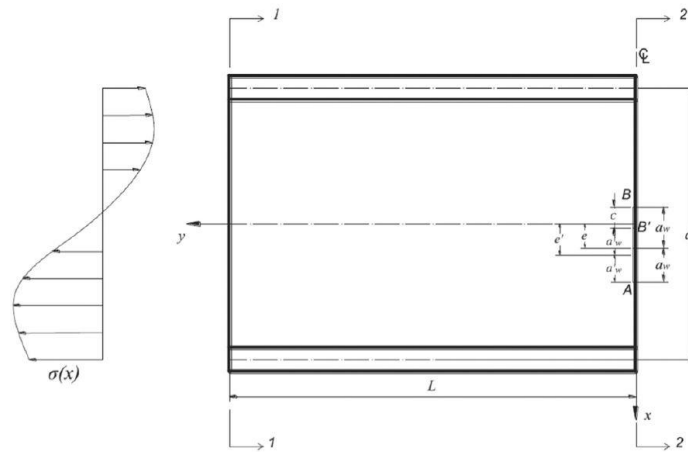
รูปที่ 2.7 แสดงการจำแนกรูปร่างของหน้าตัดคานเหล็ก[13]

ในการหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นของ Albrecht และคณะ (2008) [13] ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS ในการประมาณค่าความเข้มของความเค้นโหมดที่หนึ่งซึ่งด้วยวิธี J-integral ซึ่งเลือกใช้ประเภทเอลิเมนต์เป็นผนังบาง (shell element, S8R5) ตามรูปที่ 2.8 โดยค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต ได้มาจากการหาค่าความเข้มของความเค้นโดยการใส่แรงกระทำกับคานเหล็ก ปรับค่าอัตราส่วนรอยร้าวที่ปีกและที่เอว  $\lambda_f, \lambda_w$  และค่า  $\beta, \gamma$  จากการศึกษาพบว่า  $\gamma$  ไม่มีผลต่อค่า  $f$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและกรณีรับแรงดัดซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าสมการที่เสนอมมาได้แก่ (2-2) และ (2-3) ไม่มีตัวแปร  $\gamma$  ดังนั้นค่า  $\beta$  สามารถนำมาใช้เพื่อระบุลักษณะเพื่อคำนวณหาค่าความเข้มของความเค้นของคานเหล็กไวด์แฟรงค์[13]

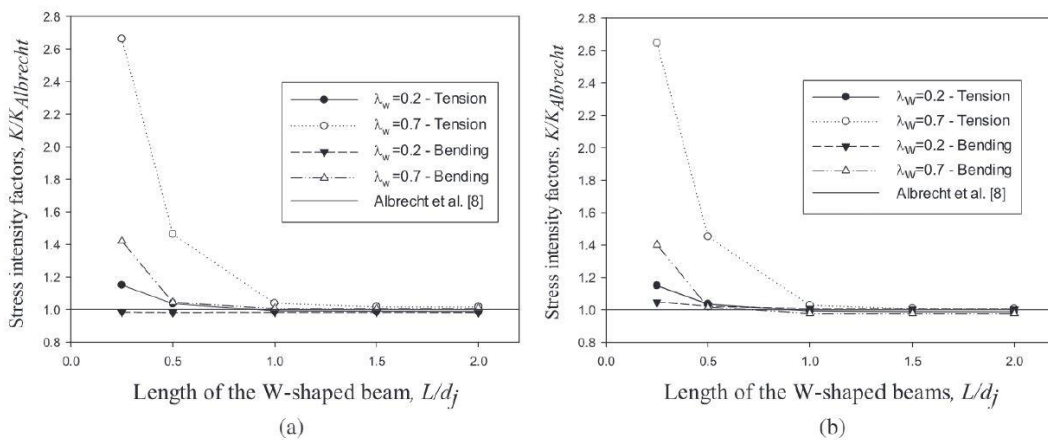


รูปที่ 2.8 ประเภทเอลิเมนต์เป็นผนังบาง (shell element, S8R5) [13]

Hieu และ Lenwari (2018) [14] ได้ศึกษาวิจัยการหาค่าความเข้มของความเค้น,  $K^{A,B}$  สำหรับคานเหล็กรูปตัวไอของรอยร้าวที่แผ่นเอวทั้งกรณีรับแรงดึงและรับแรงดัด โดยการใช้โปรแกรม ANSYS ซึ่งเลือกใช้ eight-node quadrilateral shell elements (SHELL281) ในการวิเคราะห์หาค่า เพื่อศึกษาผลกระทบของค่า  $K^{A,B}$  ที่ปลายรอยร้าวล่าง  $K^A$  และด้านบน  $K^B$  ของแผ่นเอวตามรูปที่ 2.9 เนื่องจากการเกิดการไม่ซ้อนทับกันของรอยร้าวด้านบนที่แผ่นเอวกรณีรับแรงดัด (non-overlapping) ซึ่งการศึกษานี้พบว่าค่า  $K^A$  ที่ปลายรอยร้าวล่างจะสูงเกินความเป็นจริง ถ้าไม่ได้ใช้เทคนิคในการจำลองโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย contact element (CONTA177) เพื่อให้เกิดพฤติกรรมไม่ซ้อนทับกันที่ปลายรอยร้าวด้านบนของเอว และอีกหนึ่งอย่างที่มีผลกระทบกับค่า  $K^{A,B}$  คือ ความยาว  $L$  ที่ใช้ในจำลองโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ค่า  $L/d_j$  น้อยกว่า 2 ทั้งกรณีรับแรงดึงและรับแรงดัดจะทำให้ค่า  $K^{A,B}$  เกิดความคลาดเคลื่อนตามรูปที่ 2.10

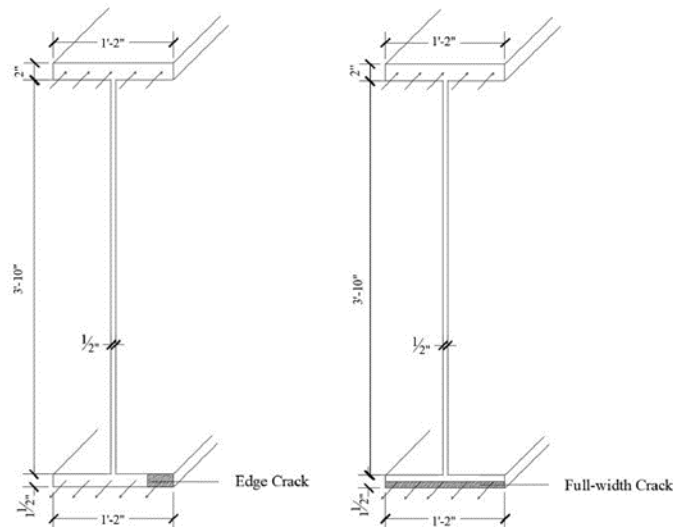


รูปที่ 2.9 รอยร้าวที่แผ่นเอวกรณีเกิดพฤติกรรมไม่ทับซ้อนกัน [14]



รูปที่ 2.10 ผลกระทบของค่าความเข้มของความเค้นที่เอวต่ออัตราส่วนความยาวต่อความลึก (W40x149) เมื่อ 2.10a คือ ปลายรอยร้าวล่าง  $K^A$  และ 2.10b ปลายรอยร้าวด้านบน  $K^B$  [14]

Someshwara (2019) [15] ได้ศึกษาวิจัยถึงการหาค่าความเข้มของความเค้นสำหรับคาน เหล็กรูปตัวไอเพื่อหาค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตโดยในการหาค่าของกรณีแรกคือการสมมุติให้ รอยร้าวอยู่ที่มุมของปีกรับแรงดึง (edge crack) และกรณีที่สองนั้นสมมุติให้รอยร้าวอยู่ที่ใต้ปีกยาว ตลอดความกว้างของปีกรับแรงดึง (full-width crack) อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัด ตามรูปที่ 2.11 ตามลำดับ

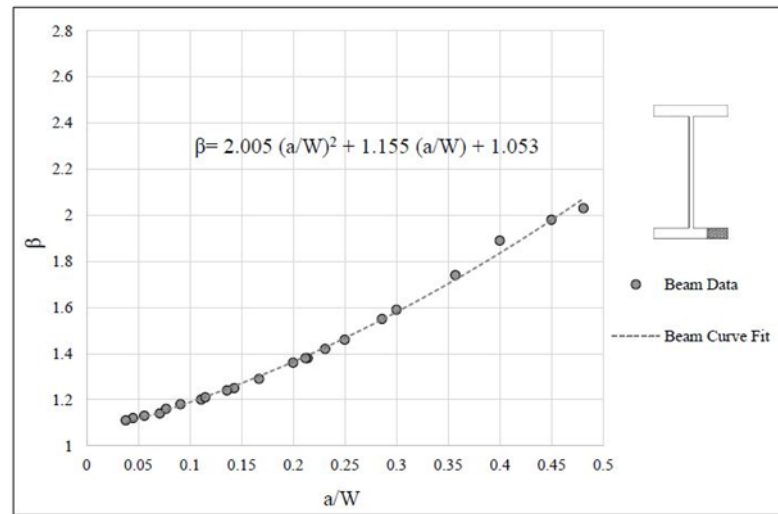


รูปที่ 2.11 แสดงคานเหล็กที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดของรอยร้าวที่มุมและรอยร้าวตลอดความกว้างของปีกรับแรงดึง [15]

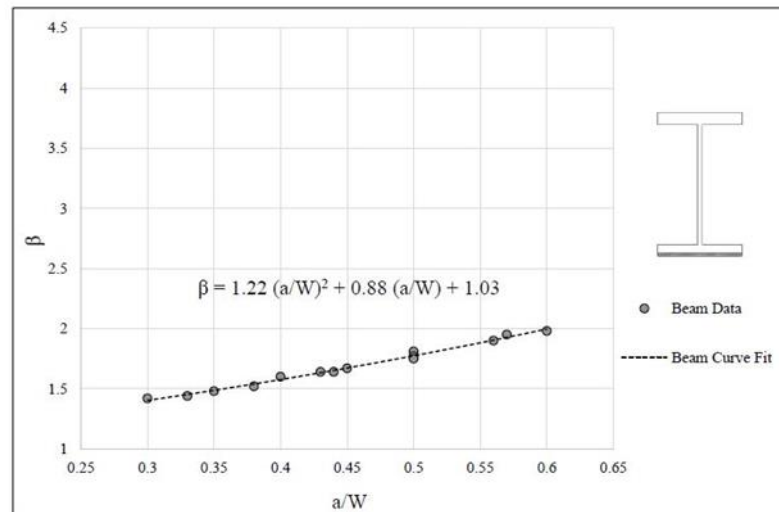
การหาค่าความเข้มของความเค้นในการวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS ซึ่งเลือกใช้ ประเภทเอลิเมนต์เป็นผนังบาง (shell element, S8R5) ในการหาค่าความเข้มของความเค้นเพื่อนำมาประมาณค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต แสดงในสมการที่ (2-4)

$$\beta = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi a}} \quad (2-4)$$

ซึ่งในการหาค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของกรณีแรกคือการสมมุติให้รอยร้าวอยู่ที่ขอบของปีกรับแรงดึง (edge crack) นั้นได้กำหนดค่า  $\beta = a/w$  ทั้งหมด 22 แบบจำลอง ( $a$  คือความยาวของรอยร้าว และ  $w$  คือความกว้างของปีกรับแรงดึง) เพื่อนำมาค่ามาปรับเส้นโค้งด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนามระดับที่สอง (second-degree polynomial function) ตามรูปที่ 2.12 และกรณีที่สองนั้นสมมุติให้รอยร้าวอยู่ที่ใต้ปีกยาวตลอดความกว้างของปีกรับแรงดึง (full-width crack) ตามรูปที่ 2.13

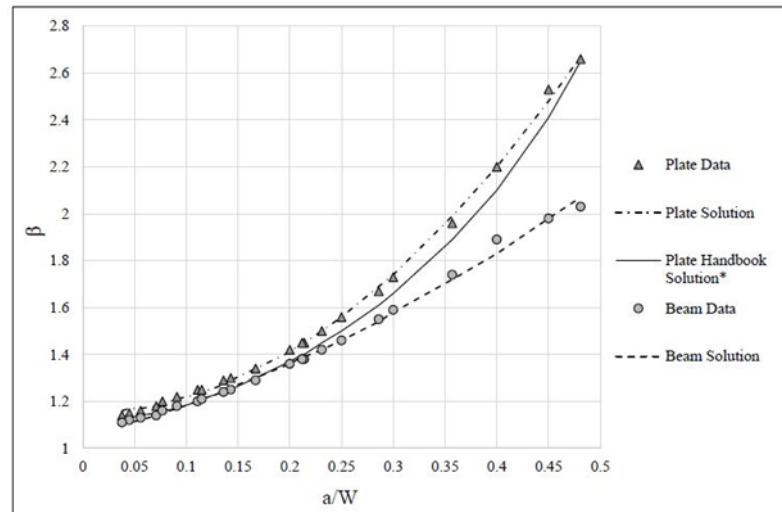


รูปที่ 2.12 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของรอยร้าวอยู่ที่มุมของปีกรับแรงดึง [15]

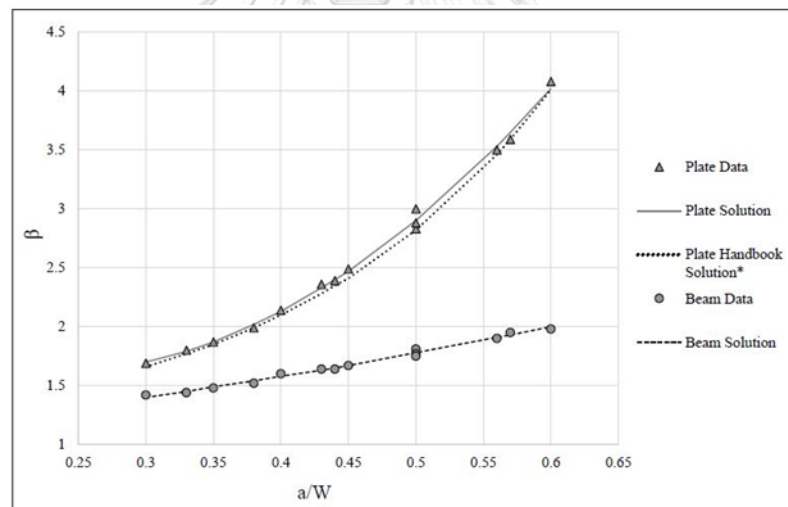


รูปที่ 2.13 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของรอยร้าวอยู่ที่ใต้ปีกยาวตลอดความกว้างของปีกรับแรงดึง [15]

หลังจากได้มีการหาค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต  $\beta$  ของรอยร้าวได้ทั้งสองกรณีแล้วทางผู้วิจัยได้นำค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต  $\beta$  มาเปรียบเทียบกับ  $\beta$  ของแผ่นเหล็กแบนที่มีขนาด, ความกว้างและความยาวของรอยร้าวที่เหมือนกันคานเหล็กพบว่าค่า  $\beta$  ของกรณีแรกนั้นมีค่า  $\beta$  ในช่วงแรกที่  $a/w$  เท่ากับ 0.05 ถึง 0.2 นั้นมีค่าใกล้เคียงกับ  $\beta$  ของแผ่นเหล็กแบน และเริ่มมีค่า  $\beta$  ต่างกันมากขึ้นเมื่อ  $a/w$  เท่ากับ 0.2 ถึง 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของรอยร้าวกรณีที่สองพบว่าค่า  $\beta$  ของกรณีที่สองนั้น ในช่วงแรกที่  $a/w$  เท่ากับ 0.3 ถึง 0.6 นั้นมีค่า  $\beta$  ต่างกันมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต  $\beta$  ของรอยร้าวอยู่ที่มุมของปีกรับแรงดึง และ  $\beta$  ของแผ่นเหล็กแบน [15]



รูปที่ 2.15 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต  $\beta$  รอยร้าวอยู่ที่ใต้ปีกยาวตลอดความกว้างของปีกรับแรงดึง และ  $\beta$  ของแผ่นเหล็กแบน [15]

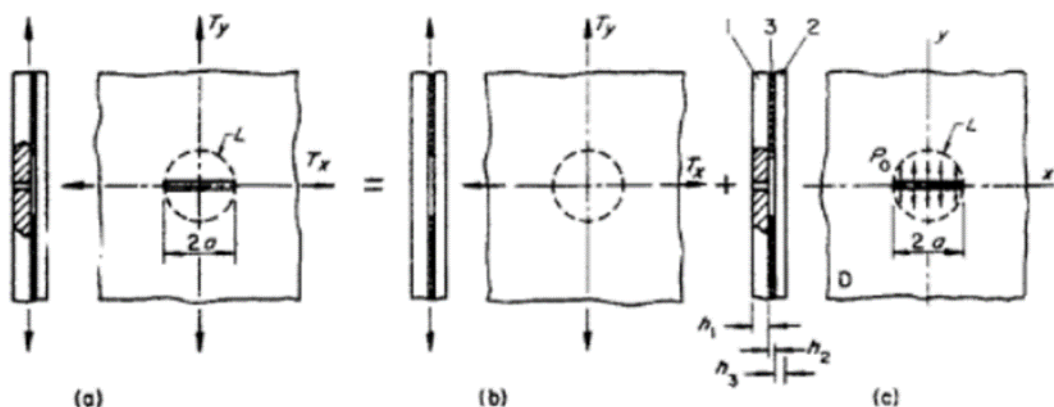


## 2.2 การวิเคราะห์ตัวประกอบความเข้มของความเค้นในองค์อาคารเหล็กที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

การลดค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโดยใช้การซ่อมแซมด้วยแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้รับความสนใจจากนักวิจัยมากมาย เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นของเส้นใยคาร์บอนคือมีความแข็งแรงสูง ต้านทานแรงดึงสูง น้ำหนักเบา ทนต่อสารเคมีสูง และ ทนต่ออุณหภูมิสูง เส้นใยคาร์บอนจึงเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากในอุตสาหกรรมการบินและวิศวกรรมอวกาศ

ดังนั้น ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและเชิงการทดลองเพื่อที่จะอธิบายกลไกที่สำคัญที่ทำให้ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นนั้นลดลง ซึ่งจะสรุปโดยย่อของการศึกษาเหล่านี้

ในงานวิเคราะห์แผ่นแบนคอมโพสิตขนาดอนันต์ (infinite plate) ที่มีรอยร้าวทะลุความหนา ยาว  $2a$  ในสภาวะควบคุมระยะเคลื่อนตัวของ Erdogan และ Arin (1972) [16] และ Ratwani (1979) [17] ได้เสนอการแก้ปัญหาในหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นร่วมกับชั้นกาว และแผ่นปะคอมโพสิตโดยได้ใช้วิธีหลักการซ้อนทับ (superposition principle) ร่วมกับ (integral equation) เพื่อหาอัตราการปลดปล่อยพลังงาน (energy release rate,  $G$ ) โดยการแยกปัญหาที่สนใจซึ่งยังไม่ทราบผลเฉลย SIF ออกเป็นปัญหาย่อยที่ทราบผลเฉลยตัวประกอบความเข้มของความเค้นเมื่อรวม (ซ้อนทับ) ผลเฉลยตัวประกอบความเข้มของความเค้นของปัญหาย่อยก็จะได้ผลเฉลย  $K$  ของปัญหาที่สนใจ และในงานวิจัยนี้ได้สมมุติการหลุดร่อนระหว่างแผ่นเหล็กกับชั้นกาวเป็นรูปร่างกลม เนื่องจากค่าความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวนั้นมีค่าสูงจึงอาจจะทำให้เกิดการหลุดของชั้นกาวดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงขนาดมิติของแผ่นแซนวิช [16]

และในงานวิเคราะห์แผ่นแบนขนาดอนันต์ที่ปะด้วยวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปทรงวงรี (elliptical) ซึ่งวัสดุของแผ่นปะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุออร์โธโทรปิก(orthotropic material)ที่มีรอยร้าวทะลุความหนา  $2a$  ของ (Rose.,1988) [18, 19] ได้เสนอการแก้ปัญหาในหาตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นร่วมกับชั้นกาวและแผ่นปะคอมโพสิตโดยใช้วิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์และคำนวณดังกล่าวมีพื้นฐานมาจากข้อสันนิษฐานบางอย่างที่อาจไม่เหมาะสมกับปัญหาที่ซับซ้อน ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นที่ซับซ้อนขึ้นนี้จึงเป็นเรื่องที่ยากลำบากในการคำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น จึงมีการแก้ปัญหาเหล่านี้ด้วยการวิเคราะห์ด้วย FEM ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการคำนวณตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยแตกที่มีแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

Sun และคณะ(1996) [20] นำเสนอวิธีการวิเคราะห์อย่างง่ายโดยใช้ mindlin plate elements สำหรับแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและชั้นกาวนั้นได้ใช้ three springs for adhesive layer และ Naboulsi และ Mall (1996) [21] เสนอเทคนิคสามชั้นซึ่ง mindlin plate elements สองมิติที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างเฉือนตามขวางถูกนำมาใช้สำหรับแผ่นที่มีรอยร้าวร่วมกับคอมโพสิตแพทช์และชั้นกาว และ (Ayatollahi และ Hashemi (2007) [22] ได้ศึกษาค่า SIF สำหรับแผ่นปะคอมโพสิตทั้งสองโหมดคือ โหมดผสม I ร่วมกับ II โดยใช้เป็น 3D brick elements ทั้งสามวัสดุและที่บริเวณปลายรอยร้าว (crack-tip) ได้ใช้ singular elements เพื่อที่จะได้คำนวณหาค่า SIF ได้แม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ต่อมา Lam และคณะ (2010) [23] ได้เสนอการดัดแปลง three-layer technique โดยใช้ 3d brick elements เพื่อสำหรับใช้ในการจำลองโมเดล และ Gu และคณะ (2011) [24] ได้ใช้ hex-dominated quadratic elements สำหรับการขึ้นโมเดล FEM ทั้งสามวัสดุ ที่มีการยุบ node เข้ามา  $\frac{1}{4}$  ของขนาดองค์ประกอบ (elements) โดย โหนด(node) ที่เลื่อนมาใกล้ปลายรอยร้าวมีมากถึง 20 node เพื่อเพิ่มความสามารถในการหาความเค้นที่ปลายรอยร้าวได้ดีขึ้น และ Wang และคณะ (2013) [25] ได้ใช้องค์ประกอบ (elements) เป็นที่ดีขึ้นคือ 8 และ 20 โหนด (3d solid elements) สำหรับวัสดุแผ่นเหล็กแบนและวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยส่วนของชั้นกาวนั้นได้ใช้องค์ประกอบ (elements) เป็น 3d spring-damper elements

Hmiden (2011-2015) [26] [27] [28] ได้ศึกษาการหาค่าความเข้มของความเค้นในคานเหล็กรูปตัวไอที่มีปลายรอยร้าวที่แผ่นเอวโดยกำหนดให้ปีกของคานเหล็กถูกตัดขาดออกจากกันภายใต้แรงดัดตามรูปที่ 2.17b โดยใช้โปรแกรม ANSYS ในการหาค่าความเข้มของความเค้นและในส่วนของการจำลองโมเดลของคานเหล็กและแผ่นปะ FRP ได้เลือกใช้ประเภทเอลิเมนต์ 8 จุดเป็นผนังบาง (eight node shell element, SHELL281) จากผลการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่า  $K_I$  คือค่า  $Y$  คือค่าตัวประกอบปรับแก้แลชคาณิตที่มีตัวแปรลองคือ  $\lambda, \zeta, \psi, \eta$  ทั้งกรณีมีแผ่นปะและไม่

มีแผ่นปะตามสมการที่ (2-5) และสมการที่ (2-6) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้เสนอสมการ  $Y$  สำหรับกรณีไม่มีแผ่นปะ และกรณีที่มีแผ่นปะ FRP โดยการใช้ the response surface-regression analysis ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS) ในการสร้างสมการทำนายค่า  $Y$  จากฐานข้อมูลทั้งหมด 1240 ตัวอย่าง สำหรับผู้อ่านที่สนใจสามารถดูสมการทำนายค่า  $Y$  ตามเอกสารอ้างอิงที่ [28]

$$K_I = Y(\lambda, \zeta) \sigma \sqrt{\pi a_0} \quad (\text{กรณีไม่มีแผ่นปะ FRP}) \quad (2-5)$$

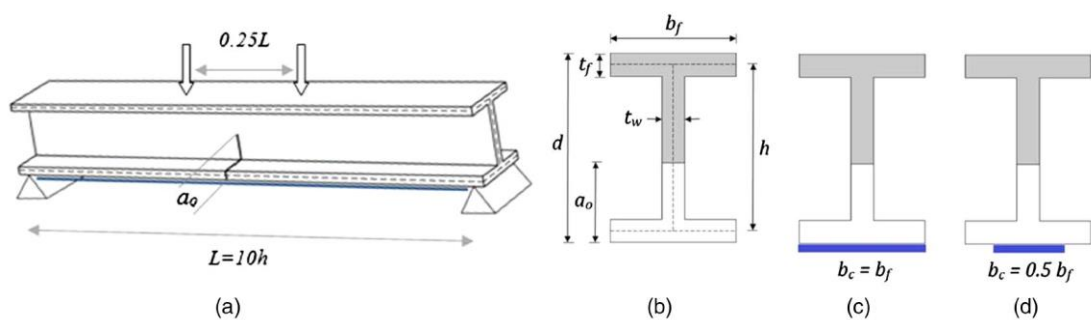
$$K_I = Y(\lambda, \zeta, \psi, \eta) \sigma \sqrt{\pi a_0} \quad (\text{กรณีมีแผ่นปะ FRP}) \quad (2-6)$$

เมื่อ  $K_I$  คือตัวประกอบความเข้มของความเค้นในโหมดที่ 1

$Y$  คือตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต ซึ่งขึ้นอยู่กับผลของตัวแปรดังนี้  $\lambda = A_f / A_w$  คืออัตราส่วนของพื้นที่ของปีกต่อแผ่นเอว  $\zeta = a_0 / h$  คือระยะปลายรอยร้าวของแผ่นเอวต่อความลึกของคาน คือ  $\psi = A_c / A_s$  คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของแผ่นปะ FRP ต่อพื้นที่ของคานเหล็ก และ  $\eta = E_f / E_s$  คืออัตราส่วนระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นปะ FRP ต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคานเหล็ก ซึ่งตัวแปรย่อยสามารถดูได้จากรูปที่ 2.17b

$\sigma = My / I$  คือหน่วยแรงที่กระทำกับหน้าตัดคานเหล็ก เมื่อ  $M$  คือโมเมนต์  $y$  คือระยะจากศูนย์กลางของคานเหล็กถึงผิวบน และ  $I$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของคานเหล็ก

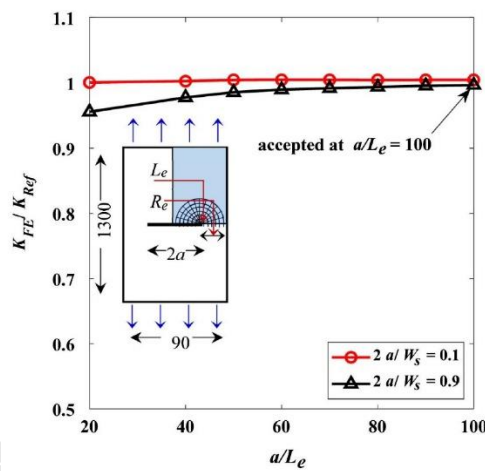
$a_0$  คือความยาวของรอยร้าวจากปีกถึงแผ่นเอวตามรูปที่ 2.17b



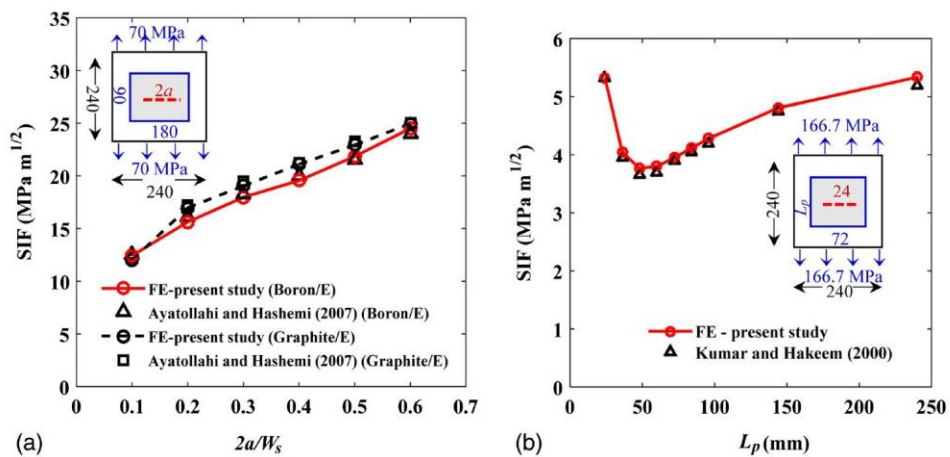
รูปที่ 2.17 รูปแบบคานเหล็กที่เสริมด้วยแผ่นปะ FRP 2.17a หน้าตัดของเหล็กและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา 2.17b รูปแบบการปะด้วยFRP เต็มความกว้างของปีก 2.17c และ รูปแบบการปะด้วยFRP ครึ่งหนึ่งความกว้างของปีก 2.17d [28]

Do และ Lenwari [29] ได้เสนอการออกแบบแผ่นปะอย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อซ่อมแซมเหล็กที่มีรอยร้าวโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งเป็นแผ่นเหล็กแบนที่มีแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่ทั้งสองด้าน ซึ่งในขั้นตอนได้ใช้วิธีไฟน์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS ในการสร้างแบบจำลอง โดยเลือกใช้ประเภทของ Elements คือ 20-node quadratic solid element(C3D20) ซึ่งทาง

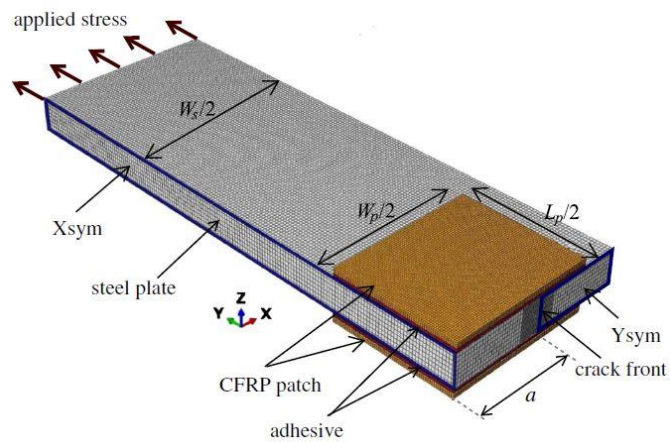
ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลย (sensitivity analysis of results) ก่อนที่จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของผู้วิจัยท่านอื่น[22, 30]ตามรูปที่ 2.19 เพื่อสร้างความเชื่อถือในแบบจำลองของผู้วิจัย หลังจากนั้นได้ใช้โปรแกรมเชิงพันธุกรรม (GP) เพื่อหาปริมาณที่น้อยที่สุดของแผ่นปะที่ทำให้ช่วงของตัวประกอบความเค้มของความชื้นที่ปลายรอยร้าวหลังซ่อมแซมมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดความล้าของเหล็กภายใต้แรงกระทำเป็นรอบ ซึ่งในงานวิจัยได้สร้างแบบจำลองไนต์เอลิเมนต์สามมิติจำนวน 864 แบบ และได้มีการวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลย เทียบกับสมการ  $K_{Ref}$  ของ Tada และคณะ [31] เมื่อ  $a/L_e = 100$  และใช้รัศมีความเท่ากับ  $R_e = (a/12) - (a/5)$  จะทำให้ค่า  $K_{FE}$  ลู่เข้าใกล้เคียงกัน ตามรูปที่ 2.18 จากนั้นสร้างฐานข้อมูลของ SIF เพื่อทำนายสมการ  $F_2(2-8)$  ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญญาณด้วยโปรแกรมเชิงพันธุกรรม เมื่อพิจารณาค่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตตามได้แก่ค่า  $x_1, x_2, x_3, x_4$  ซึ่งแสดงตามสมการที่ (2-7) และ (2-8) ทั้งกรณีไม่มีแผ่นปะและมีแผ่นปะ ตามรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.18 การวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลย[29]



รูปที่ 2.19 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง [29]



รูปที่ 2.20 มิติของแผ่นเหล็กที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ FRP และตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา [29]

$$K = F_1(x_1)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{กรณีไม่มีแผ่นปะ FRP}) \quad (2-7)$$

$$K = F_1(x_1)F_2(x_1, x_2, x_3, x_4)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (\text{กรณีมีแผ่นปะ FRP}) \quad (2-8)$$

เมื่อ  $F_1 = \left[ 1 - 0.025(2a/W_s)^2 + 0.06(2a/W_s)^4 \right] \sqrt{\sec(\pi a/W_s)}$  คือค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (Correction Factor) จากแผ่นเหล็กที่ไม่มีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยนำสมการนี้มาจาก (Tada และคณะ 2000) [31]

$F_2 = c_0x_1 + c_1x_4 + c_2x_1x_2 + c_3x_2e^{c_4x_1x_3} + c_5e^{c_6x_2}e^{c_7x_4}e^{c_8x_1x_2^2} + c_9$  คือค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต(Correction Factor) จากแผ่นเหล็กที่มีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย[29]

$x_1 = 2a/W_s$  คืออัตราส่วนความกว้างของแผ่นเหล็กต่อความยาวของรอยร้าว

$x_2 = W_p/W_s$  คืออัตราส่วนความกว้างของแผ่นปะต่อความกว้างของแผ่นเหล็ก

$x_3 = L_p/2a$  คืออัตราส่วนความยาวของแผ่นปะต่อความยาวของรอยร้าว

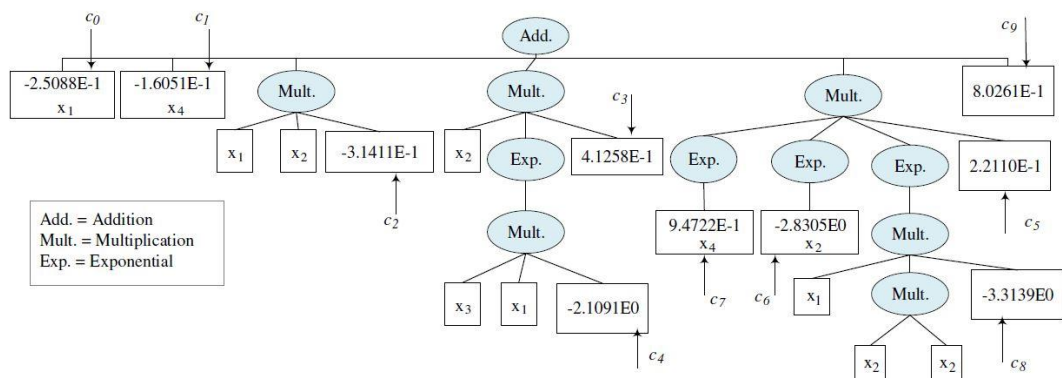
$x_4 = 2(E_p t_p + E_a t_a)/(E_s t_s)$  คืออัตราส่วนมอดุลัสและความหนาของวัสดุ

ซ่อมแซมรอยร้าวต่อมอดุลัสและความหนาของแผ่นเหล็ก

ในขณะเดียวกันงานทดลองเกี่ยวกับค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นของโครงสร้างที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้นมีการวิจัยและศึกษาอยู่อย่างจำกัด ซึ่งการใช้วิธีการทดลองสามารถตีความการหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นจากการสะท้อนกลับด้วยรังสีเอกซ์[32] วิธีการกัตกร่อน (caustics method) [33, 34] วิธีเทคนิคโฟโตอีลาสติค (photoelasticity technique) [35, 36] วิธีเทคนิคเทอร์โมอีลาสติค(thermoelectricity technique) และการวัดด้วยเซ็นเซอร์ [37, 38] (piezoelectric sensor measurement)

### 2.3 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม *HeuristicLab*

Do และ Lenwari [29] ได้เสนอการออกแบบแผ่นปะอย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อซ่อมแซมเหล็กที่มีรอยร้าวโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งเป็นแผ่นเหล็กแบนที่มีแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่ทั้งสองด้าน โดยหนึ่งในวัตถุประสงคนั้นได้ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรม *HeuristicLab* เพื่อพัฒนาฟังก์ชันของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (geometry correction factor) โดยการมีการจำลองโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย ABAQUS ทั้งหมด 864 โมเดล เพื่อหาค่า SIF ที่มีกำหนดค่าตัวแปรพารามิเตอร์ต่างๆไว้ได้แก่  $x_1 = 2a / W_s$ ,  $x_2 = W_p / W_s$ ,  $x_3 = L_p / 2a$  และ  $x_4 = 2(E_{p1}t_p + E_a t_a) / (E_s t_s)$  โดยข้อมูลที่ได้ถูกแบ่งออกมาเป็น 4 กลุ่มซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีค่า SIF ทั้งหมด 216 ค่า จากนั้นได้มีการนำข้อมูลทั้งหมดไปใช้กับโปรแกรม *HeuristicLab* เพื่อหาค่า  $R^2$  (Pearson's) ของกลุ่มข้อมูลทั้งหมดที่มีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากที่สุด จากนั้นนำแผนภาพเอ็กเพรสชันทรี (expression tree) จากโปรแกรมซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนหลักได้แก่ฟังก์ชันนอล (functional) และเทอร์มินอล (terminal) ซึ่งทั้งสองส่วนสามารถกำหนดได้จากเซตของฟังก์ชันนอล ( $F$ ) และเซตของเทอร์มินอล ( $T$ ) ดังในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แผนภาพเอ็กเพรสชันทรีของการวิเคราะห์เชิงพันธุกรรมด้วย [29]

จากรูปที่ 2.13 สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับแผนภาพเอ็กเพรสชันทรีของการวิเคราะห์เชิงพันธุกรรม(GP)แสดงดังสมการที่ (2.9)

$$F_2 = c_0 x_1 + c_1 x_4 + c_2 x_1 x_2 + c_3 x_2 e^{c_4 x_1 x_3} + c_5 e^{c_6 x_2} e^{c_7 x_4} e^{c_8 x_1 x_2^2} + c_9 \quad (\text{B. Do [29](2-9)})$$

เมื่อ  $c_1, c_2, c_3, \dots, c_9$  คือค่าคงที่ที่ได้จากโปรแกรม *HeuristicLab* ตามรูปที่ 2.21

$x_1, x_2, x_3, x_4$  คือ ค่าอัตราส่วนต่างๆที่ได้กล่าวที่ข้างต้น (Terminal) และได้เลือกใช้ตัว

ดำเนินการทางคณิตศาสตร์(operators) เป็น  $F(\text{functional}) = \{+, *, e, \text{power}\}$

เมื่อทราบค่าประมาณของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ได้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดยโปรแกรม *HeuristicLab* จึงสามารถเขียนฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น SIF ตามสมการที่ (2-8)

Horsangchai [39] (2018) ได้ศึกษาการประเมินกำลังของเสาวัสดุผสมโดยใช้ฐานข้อมูลทดสอบ โดยหนึ่งในวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรม *HeuristicLab* เพื่อทำนายกำลังของเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์ ซึ่งการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์นั้นได้รวบรวมข้อมูลการทดสอบกำลังของเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตภายใต้แรงอัดตรงศูนย์ในอดีตตั้งแต่ ค.ศ 1970 จนถึงปัจจุบัน โดยในการกำหนดเซตของฟังก์ชันนอลและเซตของเทอร์มินอลดังนี้:  $F = \{+, -, *\}$  และ  $T = \{D, t, L_e, f_c', f_y\}$  เมื่อ  $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อเหล็กกลม,  $t$  คือความหนาของท่อเหล็ก,  $L_e$  คือความยาวของเสาวัสดุผสม,  $f_c'$  คือกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก,  $f_y$  คือหน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์จะทราบถึงฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับแผนภาพเอ็กเพรสชันตรีของการวิเคราะห์เชิงพันธุกรรม(GP)แสดงดังในสมการที่(2-10) ซึ่ง  $P_u$  หมายถึงกำลังอัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตหน้าตัดกลม [39]

$$P_u = (c_0 L_e + c_1 D + c_2 f_y + c_3 f_c' + (c_4 t + c_5) c_6 D) (c_7 f_c' + c_8 D) c_9 + c_{10} D^2 + c_{11} \quad (2-10)$$

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์  $c_0$  ถึง  $c_{11}$  [39]

$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
0.4287	0.9230	-2.2094	9.3889	-0.8921	-18.5375
$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$	$c_{11}$
0.9230	2.5992	0.9230	-0.0037	-0.0252	-612.3284

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 3.1 กลศาสตร์แตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM) ใช้กับการเสียรูปของวัสดุบริเวณปลายรอยร้าวเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบนี้ต้องเป็นวัสดุเปราะ เช่น แก้ว เซรามิกส์ เป็นต้น เพราะไม่มีการเสียรูปถาวร อย่งไรก็ตาม ทฤษฎีของ LEFM สามารถใช้ได้กับ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (high strength steel) เพราะบริเวณคราก (yield zone) มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดรอยร้าว และขนาดของชิ้นส่วน ดังนั้นพฤติกรรมของรอยร้าวจึงสามารถอ้างอิงได้จากพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุที่อยู่นอกบริเวณคราก [40]

สำหรับการแตกหักเปราะ เมื่อความเค้นถึงค่าวิกฤติรอยร้าวจะเติบโตจากขนาดเริ่มต้นอย่างรวดเร็วจนทำให้ชิ้นส่วนเสียหาย เนื่องจากอัตราการเติบโตสูงมาก จึงเรียกว่าเป็นการเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ (unstable growth) สำหรับวัสดุที่มีความเหนียวพอสมควร เช่น เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง หรือสถานะความเค้นที่ปลายรอยร้าวเป็นแบบความเค้นระนาบ (plane stress) นั้นเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นถึงค่าวิกฤติ รอยร้าวจะเติบโตจากความยาวเดิมด้วยอัตราเร็วที่ต่ำกว่ากรณีการแตกหักเปราะอย่างมาก รอยร้าวจะเติบโตเป็นระยะทางหนึ่งแล้วจะหยุดการเติบโตของรอยร้าวในลักษณะนี้เรียกว่าการเติบโตอย่างมีเสถียรภาพ (stable growth) ขณะที่เพิ่มแรงกระทำขึ้นเรื่อย ๆ รอยร้าวก็จะเติบโตต่อไปอย่างมีเสถียรภาพ จนกระทั่งภาระเพิ่มถึงขีดจำกัดค่าหนึ่งรอยร้าวก็จะเติบโตอย่างไร้เสถียรภาพ ในที่สุด [40]

##### 3.1.1 เกณฑ์การแตกหัก

ในปี ค.ศ. 1921 A.A. Griffith นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ เสนอวิธีพลังงานสำหรับทำนายความเค้นแตกหัก ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ห้วงกว้าง (global analysis) เพราะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของวัตถุทั้งชิ้นเนื่องจากการเติบโตของรอยร้าว แนวคิดนี้ได้รับการยกย่องว่าเป็นต้นกำเนิดของวิชากลศาสตร์การแตกหัก [40]

กฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy theorem) กล่าวว่า สำหรับวัตถุที่ไม่มีรอยร้าว งานของภาระภายนอก (external work) ที่กระทำต่อวัตถุ  $W$  จะไม่สูญหายแต่จะสะสมในรูปพลังงานความเครียด (strain energy)  $U$  ภายในวัตถุ ดังนั้น

$$W = U \quad (3-1)$$



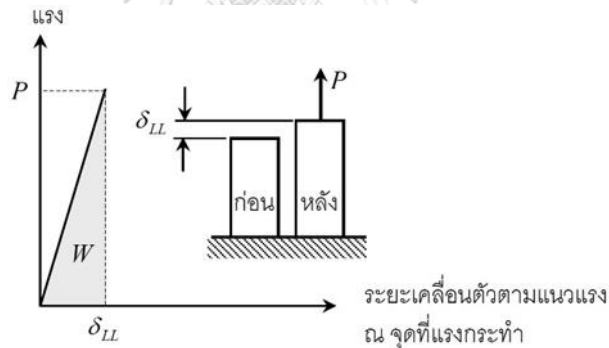
สำหรับปัญหาการเสียรูปแนวแกน งานของภาระภายนอก  $W$  สัมพันธ์กับแรงดึง  $P$  และระยะเคลื่อนตัวในทิศทางของภาระ ณ จุดที่ภาระกระทำ (load-line displacement)  $\delta_{LL}$  ตามสมการต่อไปนี้

$$W = \int P d\delta_{LL} \tag{3-2}$$

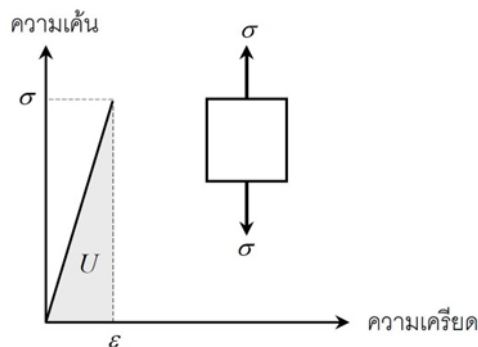
ถ้าวัตถุเสียรูปยืดหยุ่นเชิงเส้นตลอดช่วงเวลาที่รับแรงแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนตัวจะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 3.1 พื้นที่ใต้กราฟคือ งานของแรงภายนอก  $W = (1/2)P\delta_{LL}$  ดังนั้น และจากสมการที่ (3-2) จะได้  $U = (1/2)P\delta_{LL}$

ถัดไปพิจารณาเอลิเมนต์ความเค้นรูปสี่เหลี่ยมขนาดหนึ่งหน่วย รับความเค้นดึง  $\sigma$  ความเครียดตามแนวของความเค้นที่เกิดขึ้นคือ  $\epsilon$  ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกรณีทีเอลิเมนต์เสียรูปยืดหยุ่นเชิงเส้นแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2 ในกรณีนี้พลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรหรือพลังงานความเครียดหนาแน่น (strain energy density)  $U_d$  มีค่าเท่ากับ  $(1/2)\sigma\epsilon$  หรือ  $(1/2)(\sigma^2 / E)$  ดังนั้น

$$U = \iiint \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} dx dy dz \tag{3-3}$$

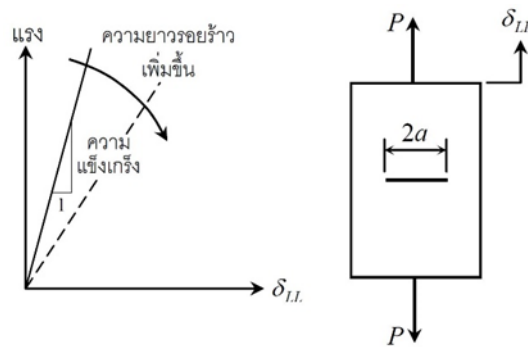


รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะเคลื่อนตัว ณ จุดที่ภาระกระทำ กรณีวัตถุเสียรูปยืดหยุ่นเชิงเส้น[40]



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด กรณีวัตถุเสียรูปยืดหยุ่นเชิงเส้น[40]

สำหรับวัตถุที่มีรอยร้าวเช่น แผ่นแบนมีรอยร้าวทะลุความหนาที่กึ่งกลางความกว้าง (central through crack plate) ยาว  $2a$  และรับแรงดึง  $P$  ในรูปที่ 3.3 หากบริเวณร้าวที่ปลายรอยร้าวมีขนาดเล็กแล้ว พฤติกรรมการเสียรูปหรือความสัมพันธ์ระหว่าง  $P$  และ  $\delta_{LL}$  ก็ยังคงเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ความชันของกราฟซึ่งหมายถึงสติฟเนส (stiffness) ของวัตถุจะลดลงเมื่อความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนตัวตามแนวแรง ณ จุดที่แรงกระทำ ของวัตถุที่มีรอยร้าว [40]

สำหรับวัตถุที่มีรอยร้าว งานของแรงภายนอก  $W$  จะสะสมในรูปแบบพลังงานความเครียด  $U$  และใช้ไปกับการสร้างผิวรอยร้าวใหม่  $W_s$  เนื่องจากพิจารณาขณะที่รอยร้าวเติบโตจากขนาดเริ่มต้น กฎทรงพลังงานจึงต้องเขียนในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับพื้นที่รอยร้าว  $dA$  ดังนี้

$$\frac{dW}{dA} = \frac{dU}{dA} + \frac{dW_s}{dA} \quad \text{or} \quad \frac{dW_s}{dA} = \frac{d}{dA}(W - U) \quad (3-4)$$

สมการที่ (3-4) ใช้คำนวณหาสถานะที่รอยร้าวเริ่มต้นเติบโตจากความยาวเดิม ซึ่งในกรณีของการแตกหักเปราะสถานะนี้คือสถานะที่ขึ้นส่วนแตกหักโดยสมบูรณ์ ดังนั้นสมการนี้ก็คือ เกณฑ์การแตกหัก (fracture criteria) จากนิยามของพลังงานศักย์รวม (total potential energy)  $\Pi$

$$\Pi = U - W \quad (3-5)$$

เขียนสมการที่ (3-4) ได้เป็น

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dW_s}{dA} \quad (3-6)$$

เนื่องจากเทอมทางขวามือเป็นบวกเสมอ ดังนั้นพลังงานศักย์รวมของระบบจะลดลงเมื่อรอยร้าวเติบโต [40]

ในปี ค.ศ.1956 Irwin [41] เรียกเทอมด้านซ้ายของสมการที่ (3-6) หรือสมการที่ (3-4) ว่า อัตราปลดปล่อยพลังงาน (energy release rate,  $G$ ) แต่หรือ แรงขับเคลื่อนรอยร้าว (crack driving force) และเรียกเทอมด้านขวาว่า ความต้านทานการเติบโตของรอยร้าว (crack growth resistance,  $R$ ) ดังนั้น

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} = -\frac{d\Pi}{dA} \text{ and } R = \frac{dW_s}{dA} \quad (3-7)$$

เกณฑ์การแตกหักจึงเขียนได้เป็น

$$G = R \quad (3-8)$$

เมื่อรอยร้าวเริ่มเติบโตจากความยาวเดิมตามเงื่อนไขในสมการที่ (3-8) การเติบโตจะมีเสถียรภาพหรือไม่ ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $G$  และ  $R$  เทียบกับพื้นที่รอยร้าว (หรือ  $dG/dA$  และ  $dR/dA$ ) โดยถ้า

$$\frac{dG}{dA} > \frac{dR}{dA} \text{ (แล้วการเติบโตจะไร้เสถียรภาพ)} \quad (3-9)$$

$$\frac{dG}{dA} < \frac{dR}{dA} \text{ (แล้วการเติบโตจะมีเสถียรภาพ)} \quad (3-10)$$

$$\frac{dG}{dA} = \frac{dR}{dA} \text{ (แล้วยังบอกไม่ได้ว่าเติบโตแบบใด)} \quad (3-11)$$

เงื่อนไขในสมการที่ (3-9) หมายความว่าแรงต้านเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่าแรงขับเคลื่อน เมื่อรอยร้าวเริ่มเติบโต รอยร้าวจะเติบโตต่อไปอย่างควบคุมไม่ได้เพราะแรงต้านเพิ่มขึ้นเพื่อหยุดรอยร้าวไม่ทัน การแตกหักอย่างสมบูรณ์ของวัตถุจะเกิดอย่างแน่นอน สำหรับเงื่อนไขในสมการที่ (3-10) แรงต้านจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่เร็วกว่า ดังนั้นเมื่อรอยร้าวเติบโตไปได้สักระยะหนึ่งรอยร้าวจะหยุดเติบโตเอง (หากแรงขับเคลื่อนยังเท่าเดิม,  $G$ ) เพราะแรงต้านทาน  $R$  สามารถเพิ่มขึ้นจนเอาชนะแรงขับเคลื่อนได้ทัน

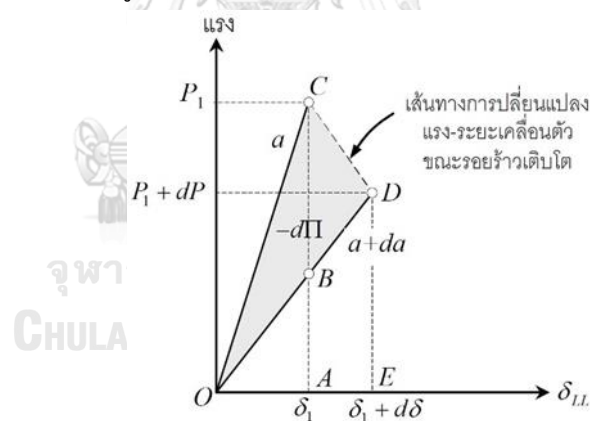
### 3.1.2 อัตราการปลดปล่อยพลังงาน

ขณะที่แผ่นแบนซึ่งมีรอยร้าวยาว  $a$  รับแรงดึงถึง  $P_1$  (และ  $\delta_{LL}$  เท่ากับ  $\delta_1$ ) แล้วรอยร้าวเติบโตจากความยาว  $a$  เป็น  $a + ad$  (ขณะนั้นแรงดึง  $P_1$  และ  $\delta_1$  เปลี่ยนไปเป็น  $P + dP_1$  และ  $\delta_1 + d\delta$  ตามลำดับ) เหตุการณ์นี้เทียบเท่ากับการพิจารณาพฤติกรรมของแผ่นแบนสองแผ่น มีรอยร้าวยาว  $a$  และ  $a + ad$  ตามลำดับ (รูปที่ 3.4) จากรูปจุด  $O$  แสดงสถานะเริ่มต้นของแผ่นแบนทั้งสอง จุด  $C$  และ

จุด  $D$  แทนสถานะของแผ่นแบนขณะที่รอยร้าวเริ่มต้นและสิ้นสุดการเติบโต ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงและระยะเคลื่อนตัวระหว่างที่รอยร้าวเติบโตเป็นระยะทาง  $da$  อาจประมาณได้ด้วยเส้นตรงที่ลากจากจุด  $C$  ไปยังจุด  $D$  จากรูปการเปลี่ยนแปลงงานของแรงภายนอก  $dW$  คือ พื้นที่  $ACDE$  การเปลี่ยนแปลงพลังงานความเครียด  $dU$  คือ ผลต่างของพื้นที่สามเหลี่ยม  $ODE$  กับสามเหลี่ยม  $OCA$  จากนิยามของพลังงานศักย์รวม สมการที่ (3-5) [40]

$$\begin{aligned}
 -\frac{d\Pi}{dA} &= ACDE - (ODE - OCA) \\
 -\frac{d\Pi}{dA} &= ACDE - [(OBA + ABDE) - OCA] \\
 -\frac{d\Pi}{dA} &= (OCA - OBA) + (ACDE - ABDE) \\
 -\frac{d\Pi}{dA} &= OCD
 \end{aligned}$$

ดังนั้นพื้นที่ระหว่างกราฟแรงกระทำ ลบด้วยระยะเคลื่อนตัวของวัตถุสองชั้นที่มีความยาวรอยร้าวต่างกัน  $da$  (พื้นที่แรเงา) ดังรูปที่ 3.4



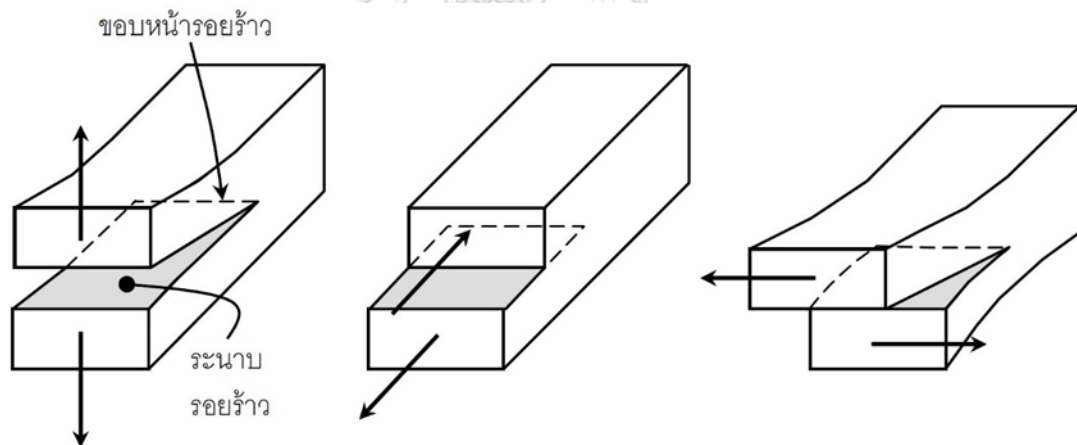
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนตัวตามแนวแรง ณ จุดที่แรงกระทำของแผ่นแบนที่มีรอยร้าวยาว  $a$  และ  $a + ad$  [40]

### 3.1.3 การวิเคราะห์ความเค้นในวัสดุที่มีรอยร้าว

#### 3.1.3.1 โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว

การนิยามโหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว พิจารณาจากทิศการเคลื่อนตัวของระนาบรอยร้าวเทียบกับระนาบรอยร้าว หรือขอบหน้ารอยร้าว จากนิยามนี้จะแบ่งโหมดการเสียรูปได้ 3 โหมด คือ

- 1) โหมดเปิด (opening mode) หรือโหมดที่ 1 ในโหมดนี้ ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนตัวตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว รูปที่ 3.5(ก)
- 2) โหมดเฉือนบนระนาบ (in-plane shear mode) หรือโหมดไถล (sliding mode) หรือ โหมดที่ 2 ในโหมดนี้ ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมผัสกันในทิศตั้งฉากกับขอบหน้ารอยร้าว รูปที่ 3.5(ข)
- 3) โหมดเฉือนนอกระนาบ (out-of-plane shear mode) หรือโหมดฉีก (tearing mode) หรือโหมดที่ 3 ในโหมดนี้ ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมผัสกันในทิศทางขนานกับขอบหน้ารอยร้าว รูปที่ 3.5(ค)



(ก) โหมดเปิดโหมดที่ 1 (ข) โหมดเฉือนบนระนาบโหมดที่ 2 (ค) โหมดเฉือนนอกระนาบโหมดที่ 3  
รูปที่ 3.5 โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว [40]

#### 3.1.3.2 องค์ประกอบความเค้นและระยะเคลื่อนตัวบริเวณปลายรอยร้าว

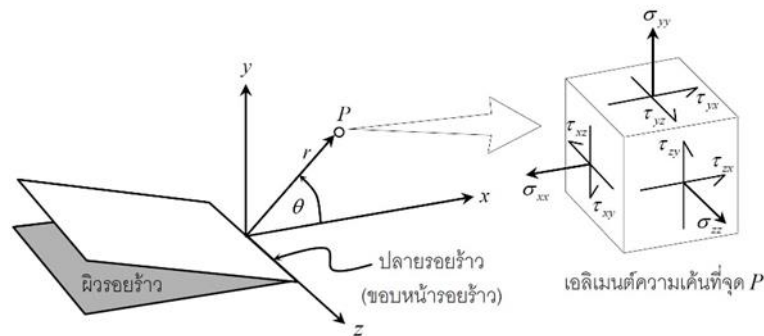
ในหัวข้อนี้จะพิจารณาองค์ประกอบความเค้นและระยะเคลื่อนตัวบริเวณปลายรอยร้าวของวัสดุ ซึ่งทำจากวัสดุไอโซทรอปิก (isotropic) ยืดหยุ่นเชิงเส้น ผลเฉลยขององค์ประกอบความเค้นในวัสดุที่มีรอยร้าว  $\sigma_{ij}$  รูปที่ 3.6 จากระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์เขียนอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้[40]

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \left( \frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) + A_0 g_{ij,0}(\theta) + \sum_{m=1}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij,m}(\theta) \quad (3-12)$$

โดย  $r$  และ  $\theta$  คือ ระยะจากปลายรอยร้าวไปยังจุดใด ๆ และมุมที่ทำกับระนาบรอยร้าว

$k$  และ  $A$  คือ สัมประสิทธิ์

$f_{ij}$  และ  $g_{ij}$  คือ ฟังก์ชันไร้หน่วยที่ขึ้นกับ  $\theta$



รูปที่ 3.6 องค์ประกอบความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว [40]

เทอมด้านขวามือของสมการที่ (3-12) ประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกคูณกับ  $r^{-1/2}$  ส่วนที่สองคูณกับ  $r_0$  (จึงไม่ขึ้นกับระยะจากปลายรอยร้าว) และส่วนที่สามคูณกับ  $r$  ซึ่งมีเลขชี้กำลังเป็นจำนวนจริงบวก เทอมที่คูณกับ  $r^{-1/2}$  จะเป็นเทอมเด่น (dominant term) เมื่อค่า  $r$  เข้าใกล้ศูนย์ (หรือจุด  $P$  เข้าใกล้ปลายรอยร้าว) แต่เมื่อค่า  $r$  เพิ่มขึ้น (หรือจุด  $P$  อยู่ห่างจากปลายรอยร้าวมากขึ้น) แล้วเทอมส่วนที่สามจะกลายเป็นเทอมเด่น เพราะว่าเทอมที่คูณกับ  $r^{-1/2}$  มีค่าเข้าสู่ศูนย์ สำหรับปัญหาการรอยร้าว องค์ประกอบความเค้นและระยะเคลื่อนตัวบริเวณใกล้กับปลายรอยร้าวคือสิ่งที่สำคัญ ดังนั้นสมการที่ (3-12) จึงลดรูปเหลือตามสมการที่ (3.13)

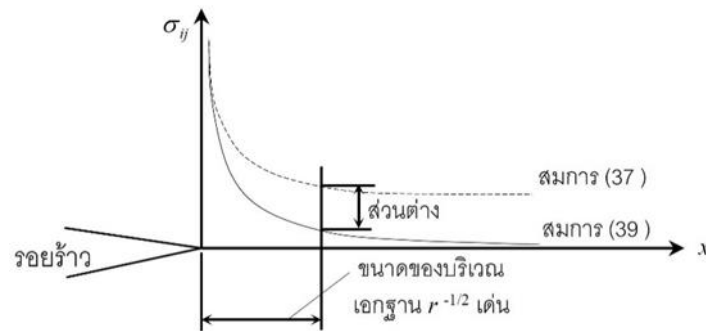
$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \left( \frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) + A_0 g_{ij,0}(\theta) \quad (3-13)$$

เทอมที่ไม่ขึ้นกับ  $r$  ในสมการที่ (3.13) มีชื่อเรียกว่า ความเค้น-ที (T-stress) เทอมนี้มีผลต่อสถานะความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมการครากและการแตกหักของวัสดุ ขนาดและเครื่องหมายของความเค้น-ที ขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของวัตถุและโหมดของภาระ ในงานวิจัยนี้จะละเทอมที่สองของสมการที่ (3.13) ดังนั้นสนามความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวจะลดรูปเหลือ[40]

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \left( \frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) \quad (3-14)$$

องค์ประกอบความเค้นที่จุดปลายรอยร้าวมีค่าเข้าสู่อันต์เพราะว่า  $r$  เท่ากับศูนย์ จุดปลายรอยร้าวจึงเป็นจุดเอกฐาน (singular point) และเรียกบริเวณที่ความเค้นซึ่งคำนวณด้วยสมการที่

(3.14) ต่างจากที่คำนวณด้วยสมการที่ (3.12) ไม่เกิน 10 [42] เพอร์เซ็นต์ ว่าบริเวณเอกฐานเด่น (singularity dominated zone) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การกระจายความเค้น กรณีใช้ทุกเทอมและใช้เพียงเทอมแรกของสมการที่ (3.14) [40]  
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบความเค้น และระยะเคลื่อนตัวบริเวณปลายรอยร้าวในวัตถุขนาดอนันต์ (ระบบพิกัด xyz)

โหมด	องค์ประกอบความเค้น	องค์ประกอบระยะเคลื่อนตัว
1	$\sigma_{xx} = Ar^{-1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$ $\sigma_{yy} = Ar^{-1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$ $\tau_{xy} = Ar^{-1/2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}$	$u = \frac{Ar^{1/2}}{2\mu} \cos \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$ $v = \frac{Ar^{1/2}}{2\mu} \sin \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$
2	$\sigma_{xx} = Br^{-1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$ $\sigma_{yy} = Br^{-1/2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$ $\tau_{xy} = Br^{-1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$	$u = \frac{Br^{1/2}}{2\mu} \sin \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$ $v = \frac{Br^{1/2}}{2\mu} \cos \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$
3	$\tau_{xz} = -\frac{c}{2} \mu r^{-1/2} \sin \frac{\theta}{2}$ $\tau_{yz} = \frac{c}{2} \mu r^{-1/2} \cos \frac{\theta}{2}$	$w = \frac{Cr^{1/2}}{\mu} \sin \frac{\theta}{2}$

### 3.1.3.3 ตัวประกอบความเข้มของความเค้น

จากตารางที่ 3.1 พบว่าผลเฉลยทั่วไปขององค์ประกอบความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวของ โหมดที่ 1 คือ

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \left( \frac{A}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}'(\theta) \quad (3-15)$$

จากสมการที่ (3.15) จะได้

$$A = \frac{\sqrt{r} \sigma_{ij}(r, \theta)}{f_{ij}'(\theta)} \quad (3-16)$$

บนระนาบรอยร้าว ( $\theta = 0$ ) จะได้

$$A = \frac{\sqrt{r} \sigma_{ij}(r, 0)}{f_{ij}'(\theta)} \quad (3-17)$$

จากตารางที่ 3.1 ถ้าตัวห้อย  $ij$  คือ  $yy$  แล้ว  $f_{ij}'(0) = 1$  ดังนั้น

$$A = \sqrt{r} \sigma_{yy}(r, 0) \quad (3-18)$$

กำหนดให้  $A = \frac{A'}{\sqrt{2\pi}}$  ดังนั้น

$$A' = \sqrt{2\pi} \sigma_{yy}(r, 0) \quad (3-19)$$

Irwin [41] เรียกค่าของตัวแปร  $A'$  เมื่อ  $r$  เข้าใกล้ศูนย์ว่า ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor, SIF) สำหรับตัวประกอบความเข้มของความเค้นในโหมดที่ 1 นิยมแทนด้วย สัญลักษณ์  $K_I$  ดังนั้น

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left( \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0^\circ) \right) \quad (3-20)$$

สำหรับโหมดที่ 2 และ 3 นั้นใช้นิยามตัวประกอบความเข้มของความเค้นของ Irwin [41] จะได้

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \left( \sqrt{2\pi r} \tau_{xy}(r, 0^\circ) \right) \quad (3-21)$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \left( \sqrt{2\pi r} \tau_{yz}(r, 0^\circ) \right) \quad (3-22)$$

โดย  $K_{II}$  และ  $K_{III}$  คือ ตัวประกอบความเข้มของความเค้นในโหมดที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

องค์ประกอบความเค้นและระยะเคลื่อนตัวในตารางที่ 3.1 สามารถเขียนในเทอมของตัวประกอบความเข้มของความเค้นได้ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จากตารางจะเห็นว่าพารามิเตอร์นี้แสดงแอมพลิจูดของความเค้นเอกฐาน (singularity stress amplitude) ซึ่งสะท้อนความรุนแรงที่ปลายรอยร้าว ดังนั้นพารามิเตอร์นี้จึงมีความสำคัญต่อการแตกหักและการเติบโตของรอยร้าว [40]



ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบความเค้น และระยะเคลื่อนตัวบริเวณปลายรอยร้าวในวัตถุขนาดอนันต์ใน  
เทอมของตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ระบบพิกัด  $xyz$ )

โหมด	องค์ประกอบความเค้น	องค์ประกอบระยะเคลื่อนตัว
1	$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$ $\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$ $\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}$ <p>กรณีความเค้นดัดระนาบ</p> $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ <p>และ <math>\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0</math></p>	$u = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$ $v = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$ <p>กรณีความเค้นดัดระนาบ</p> $w = 0$
2	$\sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$ $\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$ $\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$ <p>กรณีความเค้นดัดระนาบ</p> $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ <p>และ <math>\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0</math></p>	$u = \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)$ $v = \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$ <p>กรณีความเค้นดัดระนาบ</p> $w = 0$
3	$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}$ $\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}$	$w = \frac{K_{III}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2}$

### 3.1.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $K$ และ $G$

ในปี ค.ศ. 1957 Irwin [41] พิสูจน์ว่าอัตราปลดปล่อยพลังงาน  $G$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์กว้าง มีความสัมพันธ์กับตัวประกอบความเข้มของความเค้น  $K$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์เฉพาะที่ การค้นพบนี้มีประโยชน์กับการหาค่า  $K$  ด้วยการทดสอบ เพราะในการทดสอบ ข้อมูลที่สามารถวัดได้คือ แรงกระทำที่กระทำกับวัตถุ และระยะเคลื่อนตัว ณ จุดที่ภาระกระทำ (หรือจุดอื่น ๆ ที่ต้องการ) ในหัวข้อนี้จะแสดงการสร้างความสัมพันธ์ของโหมด 1, 2 และ 3 ตามสมการที่ (3-23)

$$G = \left\{ \begin{array}{l} \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \text{ Plane Stress} \\ \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} (1 - \nu^2) + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \text{ Plane Strain} \end{array} \right\} \quad (3-23)$$

เมื่อ  $E$  คือมอดุลัสยืดหยุ่น ;  $\nu$  คืออัตราส่วนของปัวซอง และ  $\mu$  คือมอดุลัสเฉือน

### 3.1.3.5 สมการความเข้มของความเค้นในวัตถุที่มีขนาดจำกัด

ในหัวข้อที่ 3.1.3.3 กล่าวถึงผลเฉลย  $K$  สำหรับวัตถุขนาดไม่จำกัด (ใหญ่มาก) หรือขนาดอนันต์ เมื่อเทียบกับขนาดของรอยร้าว เมื่อรอยร้าวมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือวัตถุมีขนาดเล็กลงแล้วขอบเขตของวัตถุจะมีผลต่อค่า  $K$  ซึ่งโดยทั่วไปทำให้ค่า  $K$  เพิ่มขึ้น ผลกระทบนี้เรียกว่า ผลของขนาดจำกัด (effect of finite size) ผลเฉลย  $K$  ในวัตถุขนาดจำกัดแทบทั้งสิ้นไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำ วิธีหาผลเฉลยใช้กันอยู่ ได้แก่ วิธีเชิงวิเคราะห์แบบประมาณ วิธีวัดคอมพิวเตอร์ และวิธีเชิงตัวเลข เป็นต้น

พิจารณาแผ่นแบนขนาดความกว้างไม่จำกัด มีรอยร้าวทะลุความหนา  $2a$  รูปที่ 3.8(ก) และแผ่นแบนขนาดความกว้างจำกัด (finite width plate) รูปที่ 3.8(ข) รับความเค้นดึงสม่ำเสมอ  $\sigma$  ถ้าพิจารณาเส้นการไหลของแรง (force flow line) ที่ตำแหน่งห่างจากปลายรอยร้าวเท่ากับ  $W$  แล้วจะพบว่าไม่เหมือนกัน ในแผ่นแบนขนาดอนันต์เส้นการไหลของแรงจะมีองค์ประกอบของแรงทั้งในแนวแกน  $x$  และ  $y$  แต่ในแผ่นแบนขนาดจำกัดจะไม่มียังมีองค์ประกอบในทิศทาง  $x$  เพราะเป็นขอบอิสระ (free edge) ดังนั้นเส้นแรงในกรณีหลังจะถูกบีบให้หนาแน่นมากกว่าหรือมีเกรเดียนต์ (gradient) ของความเค้นมากกว่า ทำให้พารามิเตอร์  $K$  มีค่าเพิ่มขึ้น

ผลเฉลย  $K$  ในวัตถุขนาดจำกัด นิยมเขียนในรูปผลคูณระหว่างผลเฉลย  $K$  ในวัตถุขนาดอนันต์กับตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (geometry correction factor) ซึ่งนิยมทำให้เป็นฟังก์ชันไร้หน่วย ยกตัวอย่างเช่น

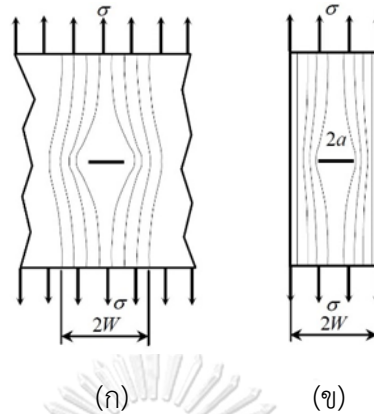
ผลเฉลย  $K$  ของกรณีในรูปที่ 3.8(ก) คือ

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3-24)$$

แต่กรณีในรูปที่ 3.8(ข) คือ

$$K_I = f(a/W) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3-25)$$

โดย  $f(a/W)$  คือ ตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต ในกรณีนี้เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างความยาวรอยร้าวกับความกว้างของแผ่นแบน



รูปที่ 3.8 ผลของขนาดจำกัดต่อการถ่ายทอดแรงในวัตถุ [40]

เนื่องจากไม่มีผลเฉลยแม่นยำตรง จึงมีผลเฉลย  $K$  หลายแบบในปัญหาเดียวกัน แต่ละผลเฉลยจะมีระดับความแม่นยำต่างกันขึ้นกับระเบียบวิธีที่ใช้หาผลเฉลย ตารางที่ 3.3 แสดงตัวอย่างตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับปัญหาในรูปที่ 3.8(ข) ตารางที่ 3.3 สมการตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต สำหรับแผ่นแบนกว้าง  $2W$  มีรอยร้าวที่กึ่งกลางขนาด  $2a$  และรับความเค้นดึง  $\sigma$  สม่ำเสมอ[40] [31]

ผู้เสนอ	$f(a/W)$	ความแม่นยำ
Irwin (1957)	$\sqrt{(2W/\pi a) \tan(\pi a/2W)}$	ดีกว่า 5% สำหรับ $a/W \leq 0.5$
Brown (1964)	$1 + 0.128(a/W) - 0.288(a/W)^2 + 1.525(a/W)^3$	0.5% สำหรับ $a/W \leq 0.7$
Fedderson (1966)	$\sqrt{\sec(\pi a/2W)}$	0.3% $a/W \leq 0.7$ และ
Koiter (1973)	$\frac{1 - 0.5(a/W) + 0.326(a/W)}{\sqrt{1 - (a/W)}}$	1% สำหรับ $a/W$ ใดๆ
Tada และ คณະ(1973)	$\frac{1 - 0.5(a/W) + 0.370(a/W)^2 - 0.044(a/W)^3}{\sqrt{1 - (a/W)}}$	0.3% สำหรับ $a/W$ ใดๆ
Tada และ คณະ(2000)	$[1 - 0.025(a/W)^2 + 0.06(a/W)^4] \sqrt{\sec(\pi a/2W)}$	0.1% สำหรับ $a/W$ ใดๆ

### 3.2 การวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF) ด้วยโปรแกรม ABAQUS

การคำนวณค่า SIF ในโปรแกรม ABAQUS ได้ใช้วิธี interaction integral [43] ซึ่งกำหนดโดยค่าอัตราปลดปล่อยพลังงาน (J- integral) สำหรับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นที่มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง อธิบายได้ตามสมการที่ (3-26)

$$J = \frac{1}{8\pi} K^T B^{-1} K \quad (3-26)$$

เมื่อ  $K = [K_I \quad K_{II} \quad K_{III}]^T$  และ  $B$  คือ pre-logarithmic energy factor matrix ซึ่งสามารถเขียนอย่างง่ายได้ ดังสมการที่ (3-27)

$$J = \frac{1}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2G} K_{III}^2 \quad (3-27)$$

เมื่อ  $\bar{E} = E$  สำหรับระนาบความเค้น,  $\bar{E} = E / (1 - \nu^2)$  สำหรับระนาบความเครียด และ  $G = E / 2(1 + \nu)$  คือค่าโมดูลัสเฉือน ในกรณีภายใต้แรงกระทำโหมดที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง J- integral และ  $K_I$  ใน 3 มิติสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$J_I = K_I^2 \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) \quad (3-28)$$

วิธี interaction integral สามารถใช้หาค่า SIF ในกรณีโหมดผสมได้ โดยเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณหาค่า SIF ในเทอมของ interaction integral ซึ่งใช้วิธีของ J- integral มาเป็นหลักในการหาค่า SIF ด้วยวิธี interaction integral นี้จะใช้พจน์ช่วย โดยพจน์ช่วยประกอบด้วยหน่วยแรงและความเครียด รอบปลายรอยร้าว ดังนั้น J- integral ของพจน์จริงซึ่งนิยามโดย  $J$ , J- integral ของพจน์ช่วยซึ่งนิยามโดย  $J_{aux}$  และ J- integral ของพจน์ interaction integral ซึ่งนิยามโดย  $J_{int}$  เมื่อทั้งหมดรวมเข้าด้วยกันจะได้  $J_{tot} = J + J_{aux} + J_{int}$  หากย้ายข้างสมการและกำหนดโหมดต่างๆเป็น  $\alpha$  จะเขียนใหม่ได้ดังนี้  $J_{int}^\alpha = J_{tot}^\alpha - J_{aux}^\alpha - J$  ซึ่งสามารถใช้ในการหาค่า SIF ได้ต่อไป จากสมการที่ (3-26) สามารถกระจายพจน์ออกมาเป็นในแต่ละโหมดได้ตามสมการที่ (3-29) และ J- integral สำหรับพจน์ช่วยดังสมการที่ (3-30) และการรวมกันระหว่างสมการที่ (3-27) และ (3-30) จึงเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (3-31)

$$J = \frac{1}{8\pi} (K_I B_{11}^{-1} K_I + 2K_I B_{12}^{-1} K_{II} + 2K_I B_{13}^{-1} K_{III}) + [\text{terms without } K_I] \quad (3-29)$$

$$J_{aux}^I = \frac{1}{8\pi} (k_1 B_{11}^{-1} k_1) \quad (3-30)$$

$$J_{tot}^I = \frac{1}{8\pi} \left( [K_I + k_I] B_{11}^{-1} [K_I + k_I] + 2[K_I + k_I] B_{12}^{-1} K_{II} + 2[K_I + k_I] B_{13}^{-1} K_{III} \right) + [\text{terms without } K_I \text{ and } k_I] \quad (3-31)$$

จากนั้น อัตราปลดปล่อยพลังงานในวิธี interaction integral คำนวณได้ดังสมการที่ (3-32) ซึ่งอัตราปลดปล่อยพลังงานของวิธี interaction integral ของทั้ง 3 โหมดอธิบายได้ตามสมการที่ (11) และสามารถหาค่าผลเฉลยของ SIF ได้ดังสมการที่ (3-34)

$$J_{int}^I = J_{tot}^I - J_{aux}^I - J = \frac{k_I}{4\pi} \left( B_{11}^{-1} K_I + B_{12}^{-1} K_{II} + B_{13}^{-1} K_{III} \right) \quad (3-32)$$

$$J_{int}^\alpha = \frac{k_\alpha}{4\pi} B_{\alpha\beta}^{-1} K_\beta \quad (3-33)$$

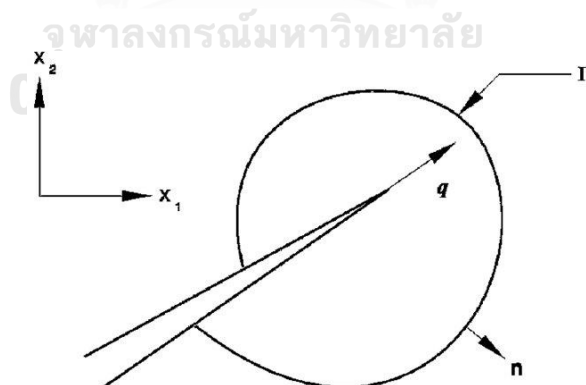
$$K = 4\pi B J_{int} \quad (3-34)$$

เมื่อ  $J_{int} = [J_{int}^I \quad J_{int}^{II} \quad J_{int}^{III}]^T$  ซึ่งวิธี interaction integral สามารถที่จะประเมินให้มีพฤติกรรมที่คล้ายกับ J-integral ในการหาค่าอัตราปลดปล่อยพลังงานของทั้ง 3 โหมดอธิบายได้ดังสมการที่ (3-35) ซึ่งขอบเขตและตัวแปรแสดงดังรูปที่ 3.9

$$J_{int}^\alpha = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} n M^\alpha q d\Gamma \quad (3-35)$$

$$\text{เมื่อ } M^\alpha = \sigma : \epsilon_{aux}^\alpha I - \sigma \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{aux}^\alpha - \sigma_{aux}^\alpha \frac{\partial u}{\partial x}$$

เมื่อ  $aux$  นิยามให้เป็นพจน์ช่วยของโหมด 1, 2 และ 3 ที่ปลายรอยร้าว

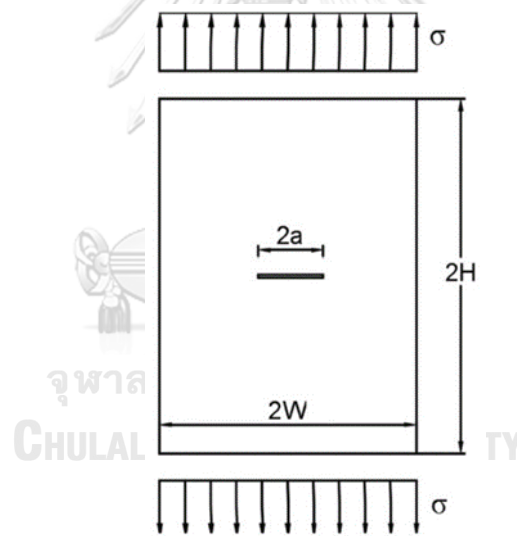


รูปที่ 3.9 วิธีในการคำนวณ J-integral [44]

### 3.3 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรม *HeuristicLab*

โปรแกรม *HeuristicLab* [45] เป็นซอฟต์แวร์ประเภทโอเพนซอร์ส (open source software) ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางฮิวริสติก *HeuristicLab* และขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary algorithm) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม *HeuristicLab* ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์เพื่อพัฒนาสมการทำนายค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (geometry correction factor) ของคานเหล็กที่มีรอยร้าวที่ปีกภายใต้แรงดัด โดยในขั้นตอนของการศึกษานี้ได้ทดสอบการใช้โปรแกรมกับโจทย์ปัญหาตัวอย่างเพื่อให้เห็นถึงวิธีการใช้งานและการทำงานของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.10

ให้พัฒนาสมการทำนายค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตโดยกำหนดให้ปัญหานี้เป็นแผ่นเหล็กที่มีรอยร้าวทะลุผ่าน โดยกำหนดให้ขนาดรอยร้าวเท่ากับ  $a$  ความกว้างเท่ากับ  $W$  และสูงเท่ากับ  $H$  มีค่าเป็นสองเท่าของ  $W$  เมื่อมอดุลัสของแผ่นเหล็ก  $E = 200$  GPa และอัตราส่วน ปัวซอง  $\nu = 0.3$  ตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงขนาดของแผ่นเหล็กที่มีรอยร้าวทะลุผ่าน

ขั้นตอนการพัฒนาสมการทำนายค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของแผ่นเหล็กที่มีรอยร้าวทะลุผ่านนั้นได้ประมาณค่าความเข้มของความเค้นจากสมการค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของ Tada [31] ตามตารางที่ 3.3 เพื่อใช้ในการสร้างสมการทำนายค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตจากโปรแกรม *HeuristicLab* โดยข้อมูลค่า SIF ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (3-25) ได้จัดเตรียมค่า SIF ไว้ทั้งหมด 99 ตัวอย่างซึ่งในตัวอย่างนี้ข้อมูลผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์อยู่ในรูปตัวแปรเดียวเท่านั้นคือ อัตราส่วนของขนาดรอยร้าวต่อความกว้างของแผ่นเหล็ก ( $a/W$ ) มีค่าตั้งแต่ 0.01 0.02 0.03+...+0.99

โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์นั้น ข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นสองชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลสำหรับเทรนนิ่ง (training set) และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ (testing set) โดยชุดข้อมูลสำหรับเทรนนิ่งจะใช้สำหรับพัฒนาสมการ และชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบจะใช้สำหรับตรวจสอบสมการที่พัฒนาขึ้นมา ซึ่งตัวอย่างนี้ได้กำหนดจำนวนข้อมูลสำหรับการเทรนนิ่งและสำหรับการทดสอบเท่ากับร้อยละ 75 และ 25 ของข้อมูลทั้งหมด ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนต่อไปจะเป็นการกำหนดเซตของฟังก์ชันนอล ( $F$ ) และเซตของเทอร์มินอล ( $T$ ) รวมถึงทำการกำหนดตัวแปรควบคุม (control ( $F$ ) parameters) สำหรับกระบวนการวิเคราะห์เชิงพันธุกรรม (GP) ในตัวอย่างนี้ เซตของฟังก์ชันนอล และ เซตของเทอร์มินอล ( $T$ ) สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์คือ  $F = \{+, -, *, Exponential\}$  และ  $T = \{x_i [-10,10]\}$  เมื่อ  $x_i$  คืออัตราส่วนของขนาดรอยร้าวต่อความกว้างของแผ่นเหล็ก ( $a/W$ ) และกำหนดสำหรับการกำหนดตัวแปรควบคุมเบื้องต้นในกระบวนการวิเคราะห์ของ GP ได้กำหนดไว้ 6 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมีการตั้งค่าที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.4 เนื่องจากตัวแปรควบคุมต่างๆส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของของสมการโดยการตั้งค่าที่เหมาะสมนั้นไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่ชัดแต่จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาที่วิเคราะห์ [46] [47]

จากการวิเคราะห์ 6 ครั้ง เมื่อกำหนดตัวแปรควบคุมที่แตกต่างกันจะได้สมการที่ทำนายกำลังของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตจำนวน 6 รูปแบบตามตารางที่ 3.4 โดยเปรียบเทียบค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ทำนายได้จากสมการแต่ละรูปแบบกับค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ได้จากผลการทดสอบในชุดข้อมูลสำหรับเทรนนิ่งและชุดข้อมูลสำหรับทดสอบสามารถแสดงค่า  $R^2$  (Pearson's) ได้จากตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 การกำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรมของตัวอย่างที่ 3.1

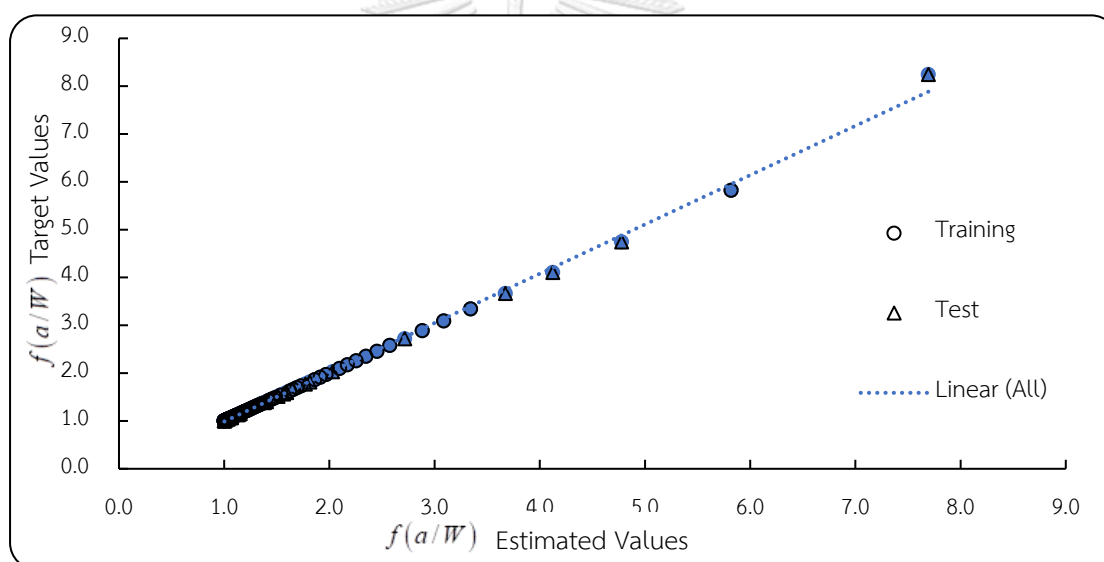
ตัวแปรควบคุม	รูปแบบ					
	1	2	3	4	5	6
Maximum Generation	100	100	100	100	100	100
Population Size	500	1000	500	1000	500	1000
Mutation Probability	5%	5%	10%	10%	20%	20%
Elites Count*	2	2	2	2	2	2

\*หมายเหตุ: Elites Count คือ จำนวนคำตอบที่ดีที่สุด (the best fitness values) ในรุ่นข้อมูลปัจจุบันที่ถูกส่งผ่านไปยังยุคข้อมูลถัดไปโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทางพันธุกรรม.

ตารางที่ 3.5 ค่า Pearson's r squared สำหรับสมการทำนายค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต

ชุดข้อมูล	รูปแบบ					
	1	2	3	4	5	6
$R^2$ ชุดข้อมูลเทรนนิ่ง	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
$R^2$ ชุดข้อมูลทดสอบ	0.987	0.997	0.998	0.990	0.998	0.996

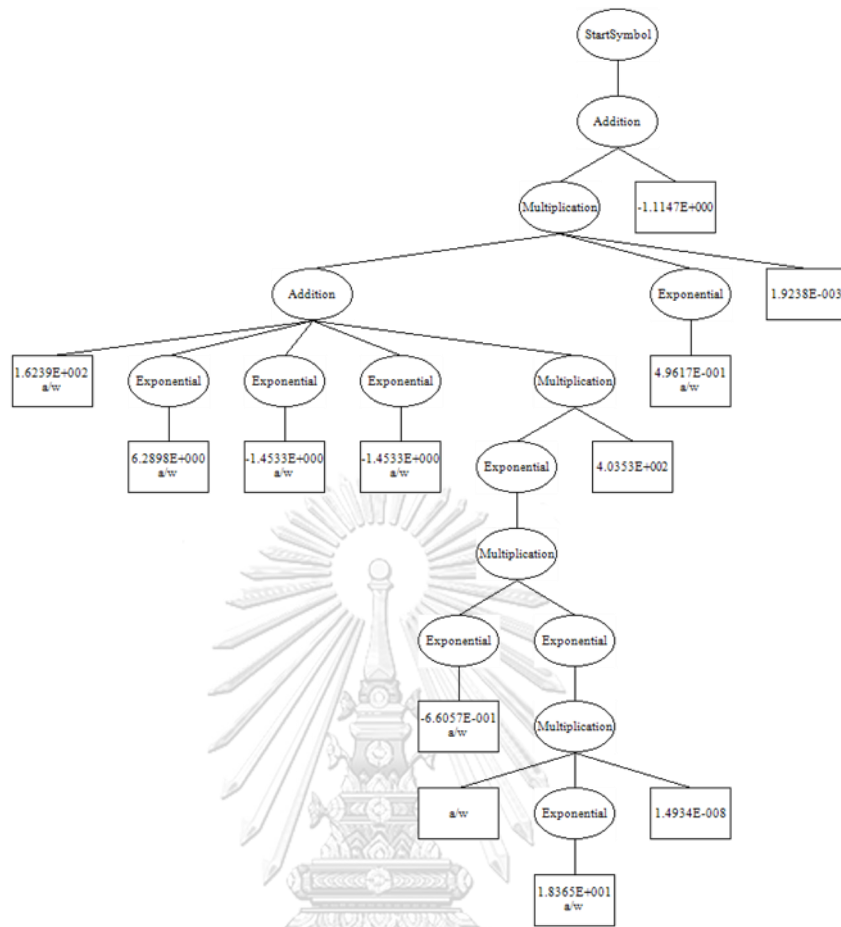
จากตารางที่ 3.5 พบว่าสมการรูปแบบที่ 3 มีค่า  $R^2$  มากที่สุดทั้งสำหรับชุดข้อมูลเทรนนิ่งและชุดข้อมูลทดสอบ โดยรูปที่ 3.11 แสดงภาพกระจาย (scatter plot) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ทำนายได้กับค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ได้จากผลการทดสอบ



รูปที่ 3.11 แผนภาพการกระจายสำหรับสมการรูปแบบที่ 3

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดย GP สมการทำนายค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของสมการรูปแบบที่ 3 สามารถแสดงในรูปแบบภาพเอ็กซ์เพรสชันตรีดังรูปที่ 3.12 โดยสามารถอธิบายเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันตรีของการวิเคราะห์เชิงพันธุกรรม(GP)แสดงดังสมการที่ (3-37)





รูปที่ 3.12 แผนภาพเอ็กเพรสชันทรี่สำหรับสมการรูปแบบที่ 3

ทั้งนี้สมการทำนายค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตตั้งสมการที่ 3.25 สามารถใช้ได้เฉพาะภายในขอบเขตของข้อมูลที่กำหนดข้างต้นเท่านั้น

$$K = f\left(\frac{a}{W}\right) \sigma \sqrt{\pi a} \tag{3-36}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = c_0 \left(\frac{a}{W}\right) + e^{c_2 \left(\frac{a}{W}\right)} + e^{c_3 \left(\frac{a}{W}\right)} + e^{c_7} e^{c_8 \left(\frac{a}{W}\right)} c_9 + c_{10} \tag{3-37}$$

โดยที่  $\lambda = e^{c_4 \left(\frac{a}{W}\right)} e^{\left(\frac{a}{W}\right)^{c_5}} c_6$

เมื่อ  $K$  คือค่าตัวประกอบความเค้มของความชื้น  $\sigma$  คือหน่วยแรงกระทำตามรูปที่ 3.10  $a$  คือขนาดรอยร้าว  $(a/W)$  คืออัตราส่วนของขนาดรอยร้าวต่อความกว้างของแผ่นเหล็ก และสำหรับค่าสัมประสิทธิ์  $c_0$  ถึง  $c_{10}$  แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการที่ (3-37)

$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
162.39	6.2898	-1.4533	-1.4533	-0.66057	18.365
$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$	
1.4934e-08	403.53	0.49617	0.0019238	-1.1147	

สมการที่ (3-37) เป็นค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ทำนายมาจากโปรแกรมตั้งนั้นในตัวอย่างนี้จึงมีการนำค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตจากตารางที่ 3.3 Tada [31] มาเปรียบเทียบกับเพื่อตรวจสอบความแตกต่างของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบความแตกต่างของการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต

จำนวน	$\frac{a}{W}$	$f\left(\frac{a}{W}\right)$	$f\left(\frac{a}{W}\right)$	Diff. %
		Tada [31]	HeuristicLab [45]	
1	0.1	1.00597	1.00566	0.03
2	0.2	1.02448	1.02404	0.04
3	0.3	1.05753	1.05765	0.01
4	0.4	1.10905	1.10959	0.05
5	0.5	1.18623	1.18653	0.03
6	0.6	1.30274	1.30233	0.03
7	0.7	1.48735	1.48681	0.04
8	0.8	1.81433	1.81505	0.04
9	0.9	2.57666	2.57537	0.05

จากตารางที่ 3.7 แสดงให้เห็นแล้วว่าการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์โดย (GP) นั้นมีประสิทธิภาพที่สูงมากเมื่อมีข้อมูลมากพอและโปรแกรมนั้นมีความยืดหยุ่นสูงทั้งในเรื่องของการเพิ่มตัวแปร  $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  ใดๆ โดยไม่จำกัดและยังสามารถกำหนดเซตของฟังก์ชันนอล (operator) และเซตของเทอร์มินอลได้อย่างหลากหลายและยังสามารถดูผลกระทบของตัวแปร  $x$  ใดๆ ว่ามีผลกับตัวแปร  $y$  มากเพียงใด ดังนั้นโปรแกรม HeuristicLab [45] จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำนายค่า  $y$  ต่างๆ ได้อย่างดี

## บทที่ 4

### รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 4 แสดงรายละเอียดการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การคัดเลือกข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลอง การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานเหล็ก การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ค่าตัวประกอบปรับแก้สำหรับคานเหล็ก และผลกระทบของระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลต่อค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต

สมการพื้นฐานที่ใช้สำหรับหาค่าความเข้มของความเค้นในคานเหล็กที่มีรอยร้าว  $K^{f,w}$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด แสดงตามสมการที่ (4-1) [48] กรณีค่าความเข้มของความเค้นในคานเหล็กที่มีรอยร้าวที่ปีก  $K^f$  และสมการที่ (4-2) [48] กรณีค่าความเข้มของความเค้นในคานเหล็กที่มีรอยร้าวที่เอว  $K^w$  ซึ่งตำแหน่งของรอยร้าวในคานเหล็กสามารถดูได้จากรูปที่ 4.1a

$$K^f = f_{1,(t,b)}^f \sigma_{t,b} \sqrt{\pi a_f} \quad (4-1)$$

$$K^w = f_{1,(t,b)}^w \sigma_{t,b} \sqrt{\pi a_w} \quad (4-2)$$

สมการตัวประกอบความเข้มของความเค้นในคานเหล็กที่มีรอยร้าวที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด นั้นเสนอเป็นผลคูณกันระหว่างค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต ( $f$ ) กรณีไม่มีแผ่นปะ  $f_1$  คูณกับกรณีที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ  $f_2$  แสดงตามสมการที่ (4-3) กรณีค่า  $K^f$  ที่ปีก และสมการที่ (4-4)  $K^w$  ที่เอว ซึ่งตำแหน่งของรอยร้าวในคานเหล็กสามารถดูได้จากรูปที่ 4.1b

$$K^f = f_{1,(t,b)}^f f_{2,(t,b)}^f \sigma_{t,b} \sqrt{\pi a_f} \quad (4-3)$$

$$K^w = f_{1,(t,b)}^w f_{2,(t,b)}^w \sigma_{t,b} \sqrt{\pi a_w} \quad (4-4)$$

ในส่วนของรายละเอียดและความหมายของตัวแปรในสมการค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นในคานเหล็กที่มีรอยร้าวทั้งกรณีไม่มีแผ่นปะและกรณีมีแผ่นปะดูได้จากหัวข้อ 4.1

#### 4.1 การคัดเลือกข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลอง

ในการคัดเลือกข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองจะเริ่มจากกำหนดตัวแปรต่างๆได้แก่ขนาดมิติของคานเหล็ก ความหนา และคุณสมบัติของวัสดุ รวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอว ( $\beta$ ) และอัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก ( $\gamma$ )

#### 4.1.1 มิติของคานเหล็ก

จากสมการในภาคผนวก ค และ ง คือค่าความเข้มของความเค้นในคานเหล็กที่มีรอยร้าว  $K^{f,w}$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัดสามารถให้ความหมายและรายละเอียดของตัวแปรได้ดังนี้

เมื่อ  $K^f$  คือค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ปีก

$K^w$  คือค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่เอว

$f_{1,t}^f$  และ  $f_{2,t}^f$  คือค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับที่ปีกกรณีรับแรงดึง

$f_{1,b}^f$  และ  $f_{2,b}^f$  คือค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับที่ปีกกรณีรับแรงดัด

$f_{1,t}^w$  และ  $f_{2,t}^w$  คือค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับที่เอวกรณีรับแรงดึง

$f_{1,b}^w$  และ  $f_{2,b}^w$  คือค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับที่เอวกรณีรับแรงดัด

$\lambda_w = a_w / d_j$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่แผ่นเอวต่อความลึกของคานเหล็ก

$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$  คืออัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่ปีกต่อความกว้างปีก

$\beta = A_f / A_w$  คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอว โดยที่  $A_f = 2b_f t_f$  คือพื้นที่ของปีกบนและปีกล่าง และ  $A_w = (d - 2t_f) t_w$  คือพื้นที่ของเอว

$\gamma = d_j / b_f$  คืออัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก

$\psi_p = A_p / A_{bf}$  คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่แผ่นปะ (FRP) ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก เมื่อ โดยที่  $A_p = b_f t_p$  คือพื้นที่ของวัสดุแผ่นปะ (FRP) และ  $A_{bf} = b_f t_f$  คือพื้นที่ปีกล่าง

$\psi_a = A_a / A_{bf}$  อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของชั้นกาว (adhesive) ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของปีกล่าง โดยที่  $A_a = b_f t_a$  คือพื้นที่ของวัสดุชั้นกาว และ  $A_{bf} = b_f t_f$  คือพื้นที่ปีกล่าง

$\eta_f = E_p / E_s$  คืออัตราส่วนระหว่างมอดุลัสของแผ่นปะ (FRP) ต่อ มอดุลัสของเหล็ก

$\eta_a = E_a / E_s$  คืออัตราส่วนระหว่างมอดุลัสของวัสดุชั้นกาวต่อมอดุลัสของเหล็ก

$\alpha_p = E_p A_p / E_s A_s$  คืออัตราส่วนสติเฟนสของแผ่นปะต่อสติเฟนสของ

$\alpha_a = E_a A_a / E_p A_p$  คืออัตราส่วนสติเฟนสของชั้นกาวต่อสติเฟนสของแผ่นปะ

$\zeta = L_p / 2d_j$  คืออัตราส่วนระหว่างความยาวของแผ่นปะต่อความลึกคานเหล็ก

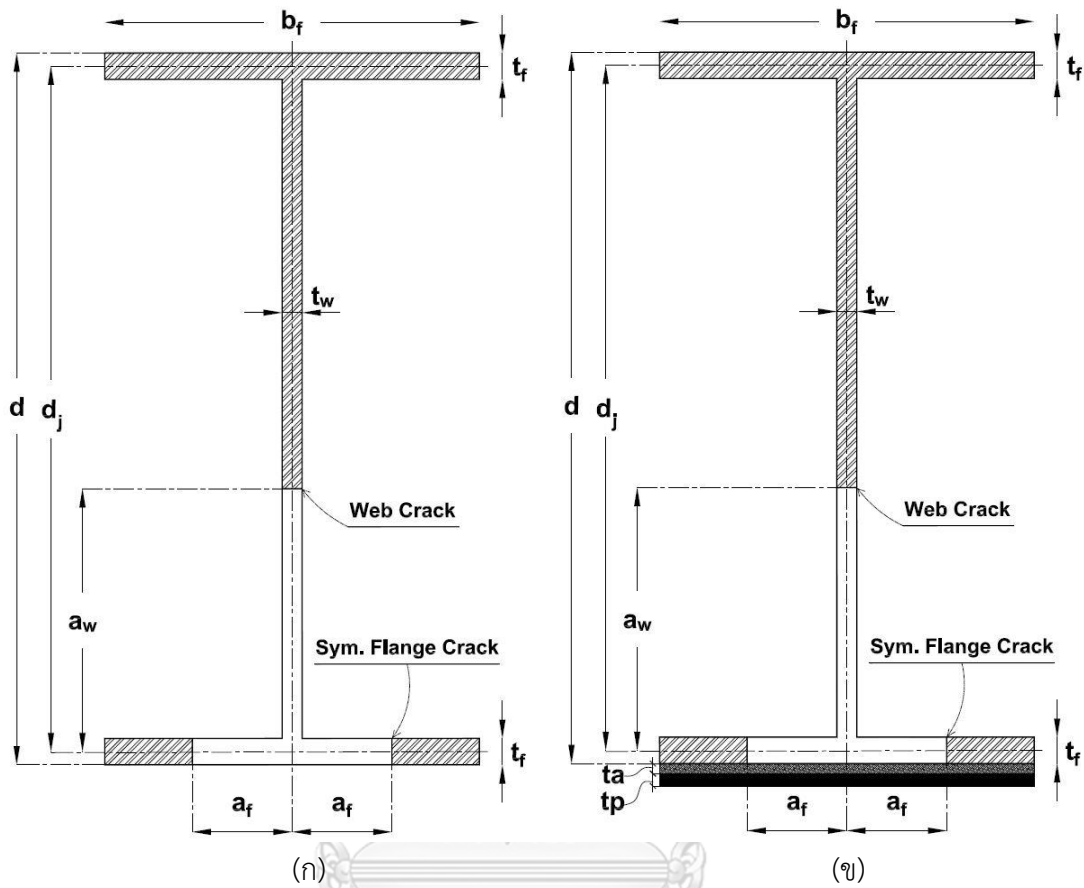
$\sigma_t$  คือหน่วยแรงที่กระทำกับหน้าตัดกรณีรับแรงดึง (MPa) ตามรูปที่ 4.2b

$\sigma_b$  คือหน่วยแรงที่กระทำกับหน้าตัดสูงสุดกรณีรับแรงดัด (MPa) ตามรูปที่ 4.2c

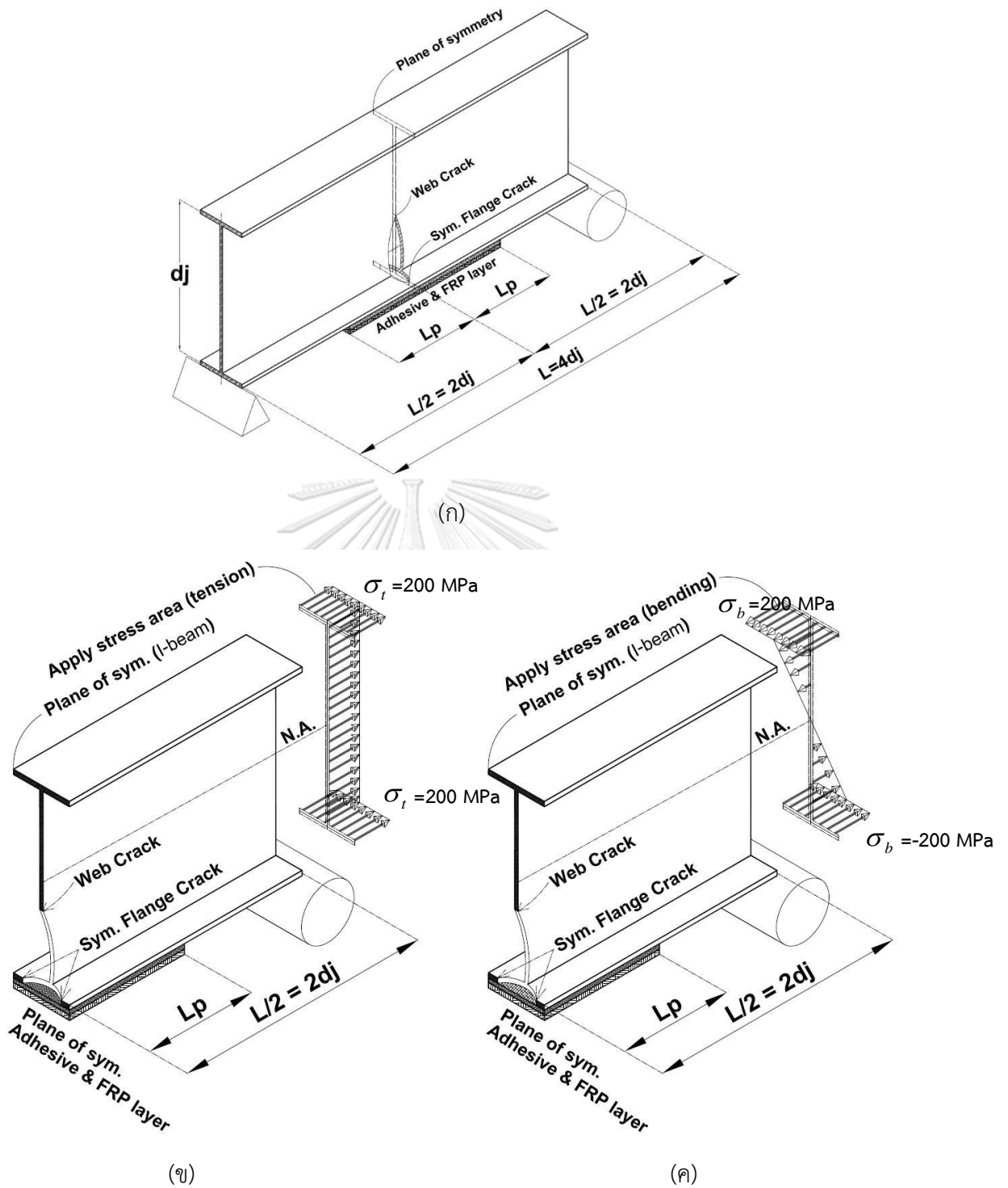
$a_w$  คือความยาวรอยร้าวที่เอว (mm)

$a_f$  คือความยาวรอยร้าวที่ปีกของคานเหล็ก (mm)

รายละเอียดแสดงในรูปที่ 4.1 และรายละเอียดของสมการของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตของคานเหล็กที่ยังไม่มีและมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ  $f_{1(t,b)}^{f,w}$ ,  $f_{2(t,b)}^{f,w}$  พร้อมค่าสัมประสิทธิ์แสดงใน ภาคผนวก ค และ ง ตามลำดับ



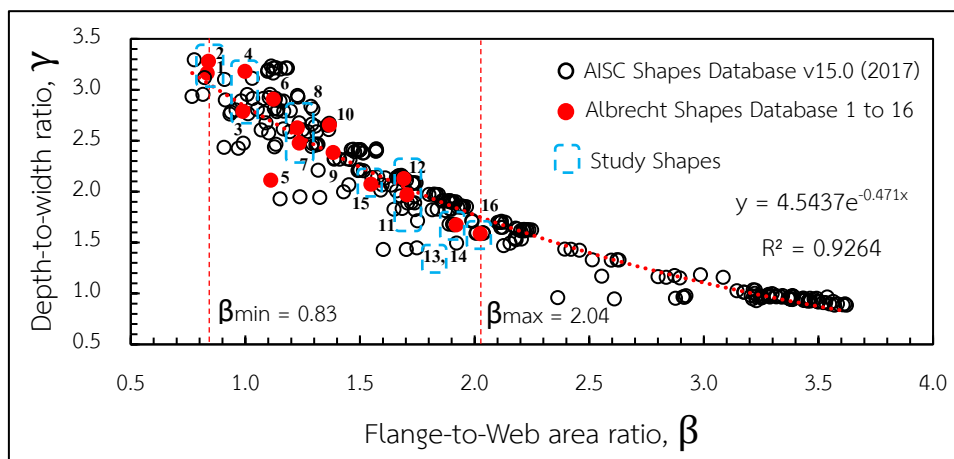
รูปที่ 4.1 มิติของคานเหล็กและตัวแปรต่างๆ 4.1ก คานเหล็กที่มีรอยร้าว 4.1ข คานเหล็กที่มีรอยร้าวที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ



รูปที่ 4.2 ต้นแบบการจำลองโมเดล 4.1ก รูปคาน 3 มิติ 4.2ข คานเหล็กที่มีรอยร้าวที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นประกรณรับแรงดึง (tension) 4.2ค คานเหล็กที่มีรอยร้าวที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นประกรณรับแรงดัด (bending)

#### 4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta$ และ $\gamma$

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกขนาดเหล็ก 16 ขนาด อ้างอิงจากงานวิจัยของ Albrecht และคณะ [14] และได้ทำการเทียบกับข้อมูลของ AISC Shapes Database v15.0 (2017) [9] เพื่อมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  และ  $\gamma$  เนื่องจากเพื่อจะได้ทราบขอบเขตของขนาดเหล็กที่เลือกใช้จากข้อมูลของ Albrecht [14] และดูแนวโน้มของของ  $\beta$  และ  $\gamma$  ตามรูป 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  และ  $\gamma$

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  และ  $\gamma$  โดยชุดข้อมูลวงกลมกลางสีดำได้จากข้อมูลของ AISC Shapes Database v15.0 [9] ทั้งหมด 248 ข้อมูล วงกลมทึบสีแดงเป็นข้อมูลจากงานวิจัยของ Albrecht [14] ทั้งหมด 16 ข้อมูล ซึ่งหลักการเลือกขนาดของคานเหล็กของงานวิจัยของ Albrecht [14] นั้นเลือกโดยให้ค่า  $\beta$  ใกล้เคียงกันเนื่องจากผลการศึกษาของ Albrecht [14] ชี้ให้เห็นว่าค่า  $\gamma$  ไม่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น และในการวิจัยครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกขนาดเหล็กทั้งหมด 11 ขนาดด้วยกันจาก 16 ขนาดตามกรอบเส้นปะสีฟ้า เพื่อที่จะใช้ในการศึกษาวิจัยนี้

#### 4.1.3 ข้อมูลขนาดเหล็กและคุณสมบัติของวัสดุ

หัวข้อ 4.1.2 ได้อธิบายถึงความเป็นมาและวิธีการเลือกขนาดเหล็กเพื่อมาใช้สำหรับศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ในส่วนต่อมาก็เป็นตารางข้อมูลมิติขนาดรวมไปถึงคุณสมบัติของวัสดุที่เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้ตามตารางที่ 4.1 และสุดท้ายก็จะกล่าวถึงขอบเขตของช่วงตัวแปรที่จะใช้ในการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่แผ่นเอวต่อความลึกของคานเหล็ก  $\lambda_w$  อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่ปีกต่อความกว้างปีก  $\lambda_f$  ความหนาของชั้นกาว (adhesive)  $t_a$  และ ความหนาของแผ่นปะ (FRP) ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลมิติขนาดของคานเหล็กและคุณสมบัติของวัสดุในงานวิจัยนี้

Section Name	$d$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_f$ (mm)	$t_w$ (mm)	$E_s$ (Gpa)	$\beta$	$\gamma$
1.W1000X222	970.3	300.0	21.1	16.0	200	0.83	3.16
2.W610X92	603.0	178.8	15.0	10.9	200	0.84	3.29
3.W760X161	757.7	266.1	19.3	13.8	200	1.01	2.77
4.W1000X249	980.2	300.0	26.0	16.5	200	0.99	3.18
7.W530X92	533.1	209.3	15.6	10.2	200	1.24	2.47
8.W690X170	693.1	255.8	23.6	14.5	200	1.24	2.62
11.W760X284	779.3	382.0	30.1	18.0	200	1.71	1.96
12.W920x417	927.6	421.5	39.9	22.5	200	1.68	2.11
13.530x150	542.5	312.2	20.3	12.7	200	1.91	1.67
15.W840x299	855.5	399.9	29.2	18.2	200	1.55	2.07
16.W460x144	472.2	283.1	22.1	13.6	200	2.04	1.59
FRP patch		$E_{p1}$ (Mpa)	$E_{p2}$ (Mpa)	$G_{12}$ (Mpa)	$G_{13}$ (Mpa)	$G_{23}$ (Mpa)	$\nu_{12}$
Sika CarboDur M <sup>a</sup>		210000	12000	5000	5000	5000	0.30
Sika CarboDur H <sup>a</sup>		300000	12000	5000	5000	5000	0.30
MBRACE 460/1500 <sup>b</sup>		460000	12000	5000	5000	5000	0.30
Adhesive layer		$E_a$ (Mpa)				$\nu_a$	
FM36 <sup>c</sup>		1815				0.35	
FM400 <sup>c</sup>		2944				0.35	
Sikadur®-30 <sup>a</sup>		11200				0.35	

<sup>a</sup> Sika® <sup>b</sup> Wu และคณะ (2012) <sup>c</sup> Duong และ Wang (2010)

ตารางที่ 4.2 ได้อธิบายถึงขอบเขตของช่วงตัวแปรที่ใช้สำหรับศึกษาซึ่งได้แบ่งออกเป็นในส่วน  
ของคานเหล็กที่มีรอยร้าวทั้งหมดจากตารางที่ 4.1 และในส่วนของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่น  
ปะ FRP ซึ่งในส่วนของแต่ละแถวที่สองของตารางที่ 4.2 กรณีที่ยังไม่มีแผ่นปะ FRP จะวิเคราะห์ค่า  $K$  อยู่  
ในช่วง  $\beta = 0.83$  ถึง  $2.04$   $\gamma = 1.59$  ถึง  $3.16$   $\lambda_f = 0.1, 0.2, 0.3$  ถึง  $0.9$  และ  $\lambda_w = 0.1, 0.2, 0.3$  ถึง  
 $0.7$  และในส่วนของแต่ละแถวที่ 3 ถึงสุดท้ายจะเป็นกรณีที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะซึ่งช่วงตัวแปรที่  
กำหนดจะมีเปลี่ยนแปลงคือ  $\lambda_f = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$  และ  $0.9$  และ  $\lambda_w = 0.1, 0.4$  และ  $0.6$  ทั้งกรณี  
รับแรงดึงและแรงดัดเนื่องจาก  $\lambda_w > 0.6$  นั้นจะทำให้  $K^w$  นั้นติดลบกรณีรับแรงดัดและทำให้ค่า  
 $K^f$  สูงเกินจากความเป็นจริงเพราะเกิดการซ้อนทับกันของผิวรอยร้าวในแผ่นเอว(overlapping) [15]  
ดังนั้นเพื่อเป็นการลดจำนวนการเก็บของมูลจึงกำหนดขอบเขตของตัวแปรให้น้อยลงทั้งกรณีรับแรงดึง  
และแรงดัดตามตารางที่ 4.2



ตารางที่ 4.2 ช่วงขอบเขตของตัวแปรที่ใช้สำหรับศึกษาในงานวิจัยนี้

Name	$\lambda_f$	$\lambda_w$	$t_p$ (mm)	$t_a$ (mm)
Section Name (No-Patch)				
All steel Section	0.1, 0.2+...+0.9	0.1, 0.2+...+0.7	-	-
FRP. patch				
Sika CarboDur M <sup>a</sup>	0.1,0.3+...+0.9	0.1, 0.4, 0.6	1.2, 2.4, 4.8	1.0, 2.0, 3.0
Sika CarboDur H <sup>a</sup>	0.1,0.3+...+0.9	0.1, 0.4, 0.6	1.2, 2.4, 4.8	1.0, 2.0, 3.0
MBRACE 460/1500 <sup>b</sup>	0.1,0.3+...+0.9	0.1, 0.4, 0.6	1.2, 2.4, 4.8	1.0, 2.0, 3.0
Adhesive layer				
FM36 <sup>c</sup>	0.1,0.3+...+0.9	0.1, 0.4, 0.6	1.2, 2.4, 4.8	1.0, 2.0, 3.0
FM400 <sup>c</sup>	0.1,0.3+...+0.9	0.1, 0.4, 0.6	1.2, 2.4, 4.8	1.0, 2.0, 3.0
Sikadur®-30 <sup>a</sup>	0.1,0.3+...+0.9	0.1, 0.4, 0.6	1.2, 2.4, 4.8	1.0, 2.0, 3.0

<sup>a</sup> Sika® <sup>b</sup> Wu และคณะ (2012) <sup>c</sup> Duong และ Wang (2010)

#### 4.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานเหล็ก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าวและคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะโดยในรายละเอียดจะมีความละเอียดของเอลิเมนต์หรือเรียกกันว่าผลการวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลย (sensitivity analysis results) และหลังจากความละเอียดของเอลิเมนต์ของแบบจำลองลู่เข้าแล้ว ต่อไปก็จะเป็นการตรวจสอบความถูกต้อง (validation) ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เราสร้างขึ้นมาเทียบกับผลงานวิจัยในอดีต เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองและยังสร้างความน่าเชื่อถือได้มากขึ้น เมื่อแบบจำลองมีความถูกต้องแล้วขั้นตอนถัดไปก็จะเป็นหาการกระจายตัวของค่า  $f^f$  ที่รอยร้าวปีกตามความหนาของปีกคานเหล็กทั้งกรณีไม่มีการซ่อมแซม และกรณีที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ (FRP) เพื่อที่จะได้เลือกค่า  $f^f$  ที่เหมาะสมสำหรับทั้งสองกรณีที่ได้กล่าวไปข้างต้น และในหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงผลกระทบของความยาวของแผ่นปะ (FRP) ต่อค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต เพื่อที่จะได้เลือกความยาวแผ่นปะที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อค่า  $f^{f,w}$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด

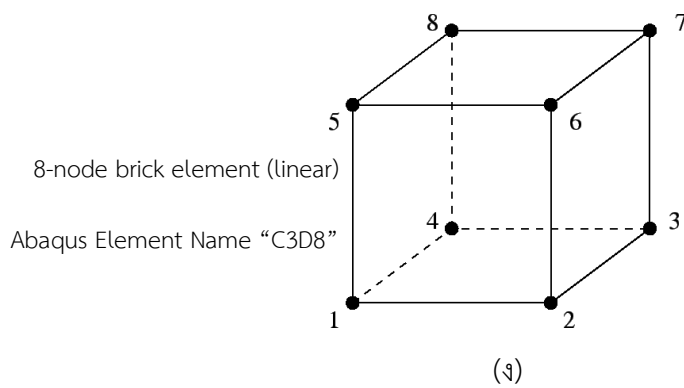
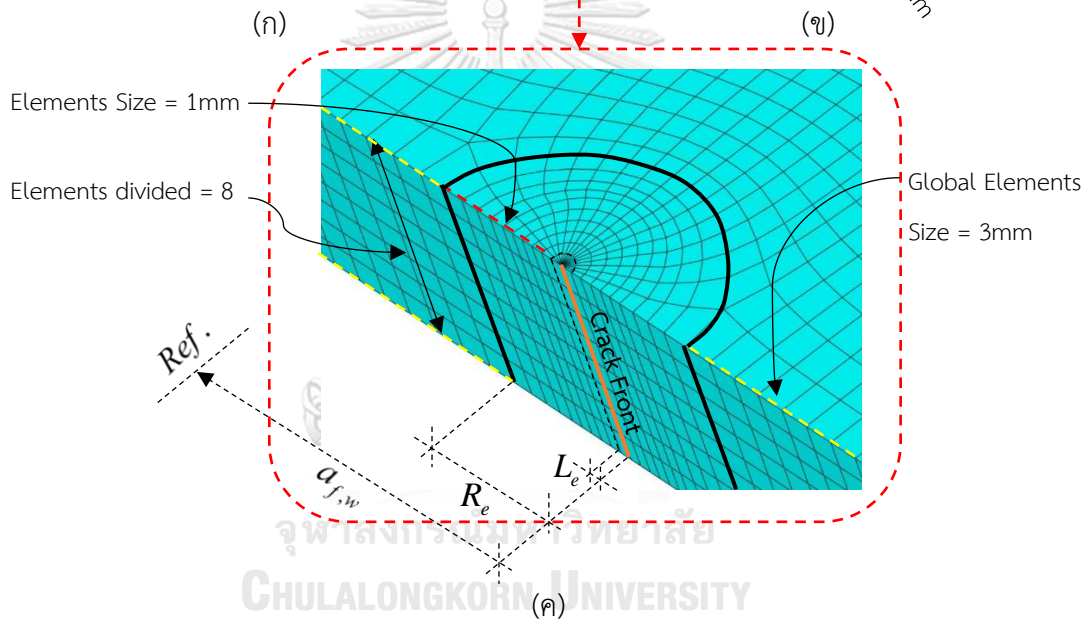
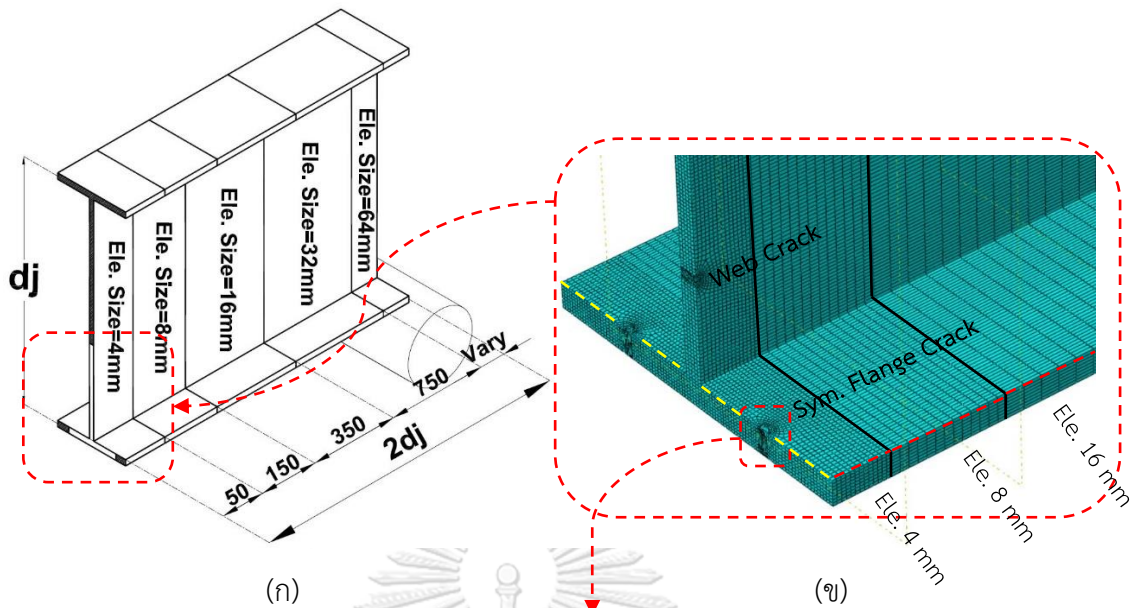
##### 4.2.1 การสร้างแบบจำลองของคานเหล็ก

ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าวได้ใช้โปรแกรม ABAQUS (version 2017) ในการสร้างแบบจำลอง สำหรับขั้นตอนในการขึ้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้ใช้ตัวอย่างและเทคนิคเริ่มต้นแบบง่าย ๆ จากงานวิจัยของ Do และ Lenwari [29] ที่ศึกษาการออกแบบแผ่นปะอย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อซ่อมแซมเหล็กที่มีรอยร้าวโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งเป็นแผ่น

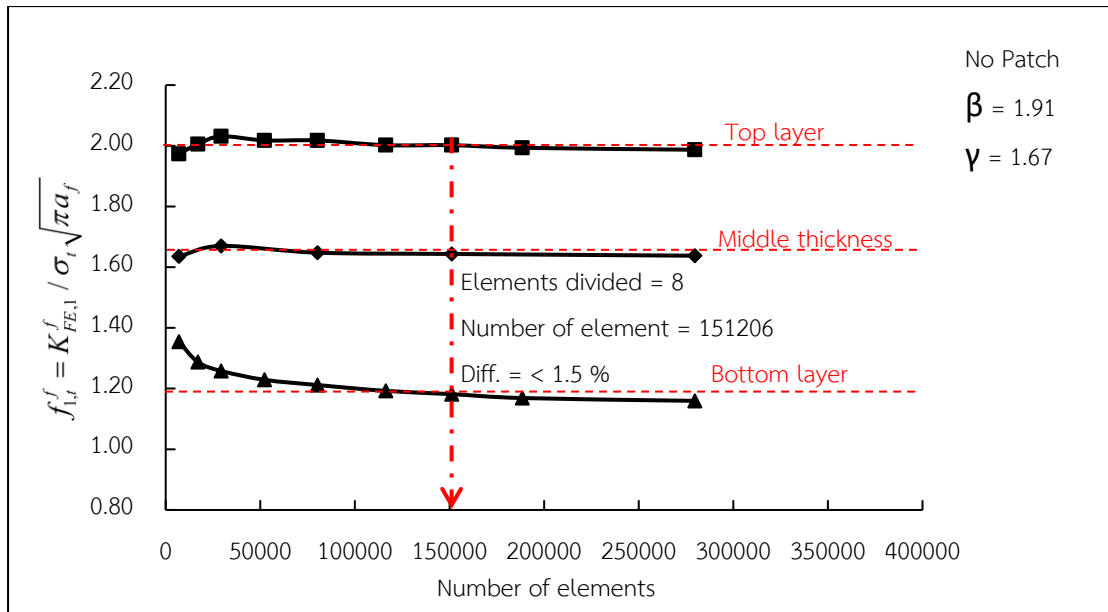
เหล็กแบนที่มีแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่ทั้งสองด้าน ด้วยโปรแกรม ABAQUS ทั้งนี้หลังจากได้ฝึกฝนวิธีการสร้างแบบจำลองจนเกิดความชำนาญแล้วจึงได้นำเทคนิคดังกล่าวไปสร้างแบบจำลองของคานเหล็กสามมิติที่มีรอยร้าวโดยใช้ประเภทของเอลิเมนต์เป็น 8-node brick element (linear), C3D8 ของคานเหล็ก เนื่องจากงานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่จะนิยมใช้เป็น Shell เป็นใหญ่เพราะใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่า  $K$  ที่สั้นอย่างมาก และค่าของ  $K$  จะทราบเฉพาะที่กึ่งกลางของความหนาเท่านั้นแต่ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ประเภทของเอลิเมนต์เป็นแบบ Solid ข้อดีคือเราจะทราบค่า  $K$  ตลอดความหนาของปีกเพื่อที่จะได้เลือกค่า  $K$  ที่เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างฐานข้อมูลต่อไป

#### 4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลย

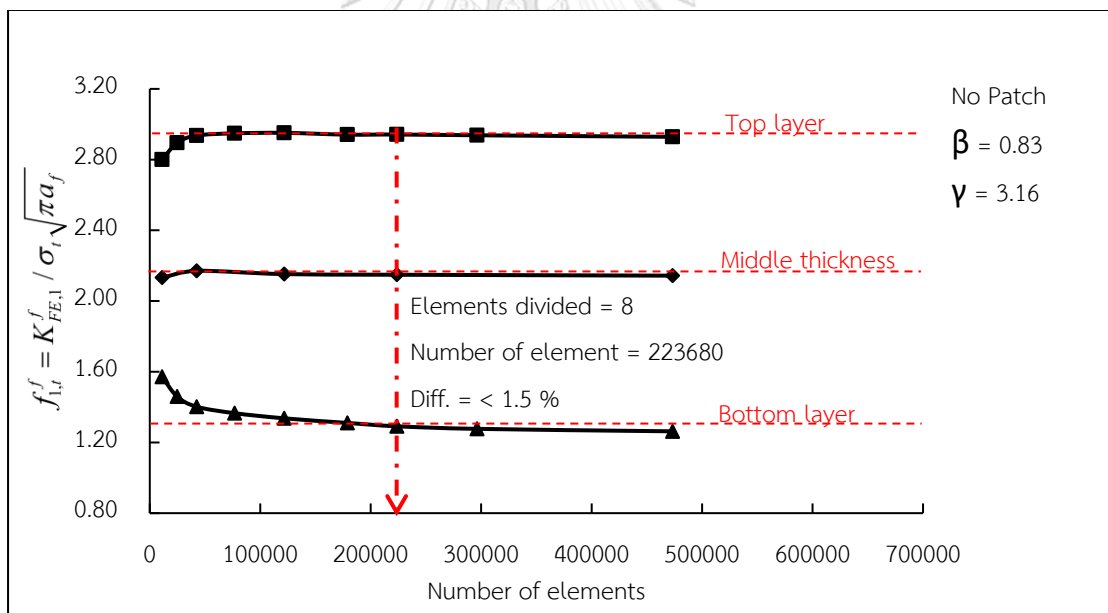
จากผลการวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลยของงานวิจัยของ Do และ Lenwari [29] ดังรูปที่ 2.18 ได้ข้อสรุปคือเมื่อค่า  $a/L_e > 100$  และค่ารัศมี  $R_e = (a/12) - (a/5)$  จะทำให้ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นลู่เข้าใกล้ 1 เมื่อเทียบกับสมการของ Tada [31] ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้เลือกใช้เทคนิคดังกล่าวในการกำหนดค่าของแบบจำลองคือ  $a_{f,w}/L_e = 100$  และค่ารัศมี  $R_e = 10$  มม. ตามรูปที่ 4.4ค และได้ทำการแบ่งความละเอียดของเอลิเมนต์ตามความยาวออกเป็น 4 ช่วงด้วยกัน โดยมีค่าเท่ากับ 50, 150, 350, 750 มิลลิเมตร ซึ่งได้กำหนดจำนวนความเอียดของเอลิเมนต์ตามแนวขวางไว้ตามรูปที่ 4.4ก และ 4.4ข และกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ที่ความหนาปีกของคานเหล็กเท่ากับจำนวน 8 เอลิเมนต์ตามรูปที่ 4.4ค เนื่องจากผลการวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลย ตามรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 ได้แสดงถึงค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตตามความหนาของปีกคานต่อด้วยจำนวนเอลิเมนต์กรณีรับแรงดึงและแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$  ของคานเหล็ก W530x150  $\beta = 2.04$  และ W1000x222  $\beta = 0.83$  พบว่าเมื่อเราเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ของปีกคานไปถึง 8 เอลิเมนต์แล้ว และเอลิเมนต์ทั้งหมดของแบบจำลองมีมากกว่า 151,206 เอลิเมนต์ สำหรับคานเหล็กที่มีรอยร้าวขนาด W530x150 และเอลิเมนต์ทั้งหมดของแบบจำลองมีมากกว่า 223,680 เอลิเมนต์ สำหรับคานเหล็กที่มีรอยร้าวขนาด W1000x222 จะทำให้ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตลู่เข้าเป็นเส้นตรงแนวนอนและมีความคลาดเคลื่อนของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตน้อยกว่า 1.5% เมื่อเพิ่มความละเอียดของ เอลิเมนต์เป็นสองเท่าทั้งในส่วนที่ผิวบนของปีก(top layer) ตรงกลาง(middle thickness) และด้านล่าง(bottom layer) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในงานวิจัยจะเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์ของปีกคานเท่ากับ 8 เอลิเมนต์และรายละเอียดเพิ่มเติมดัง รูปที่ 4.4



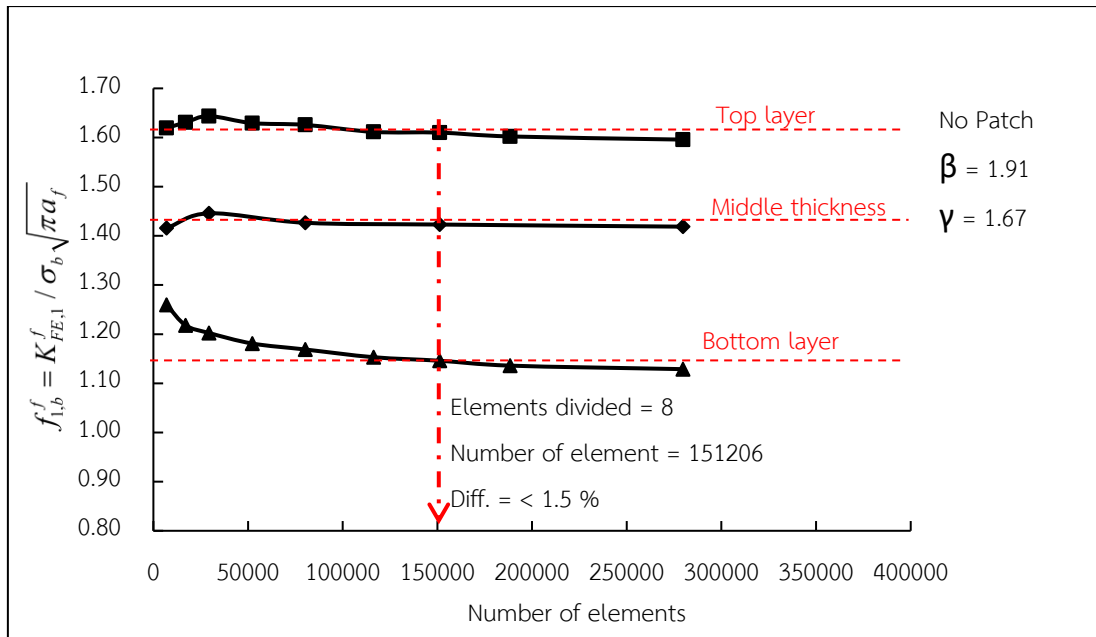
รูปที่ 4.4 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ของแบบจำลอง



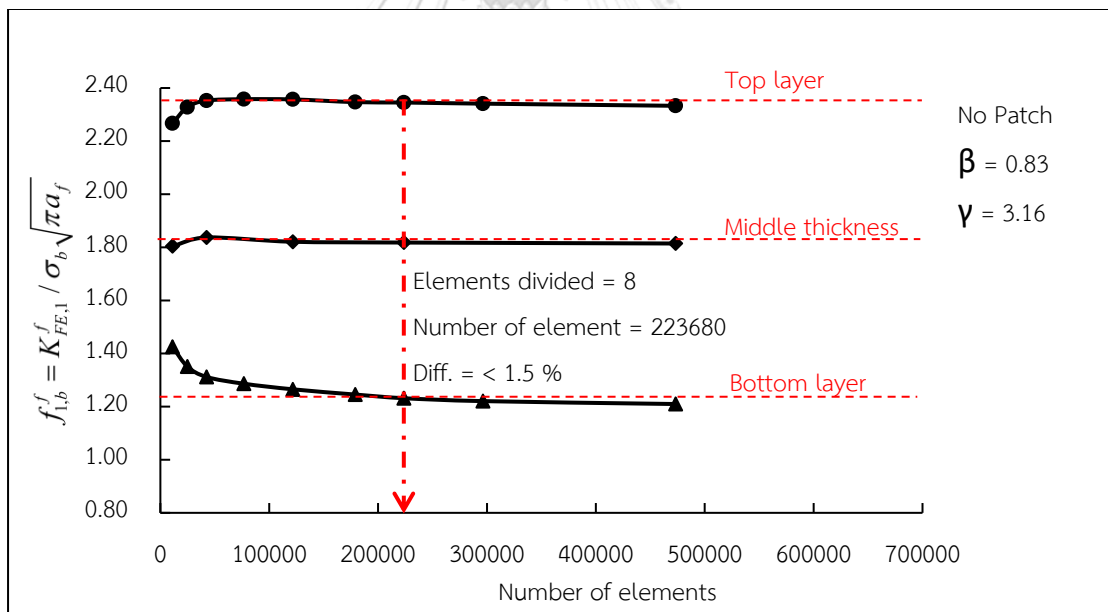
รูปที่ 4.5 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าว  
ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$



รูปที่ 4.6 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าว  
ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$



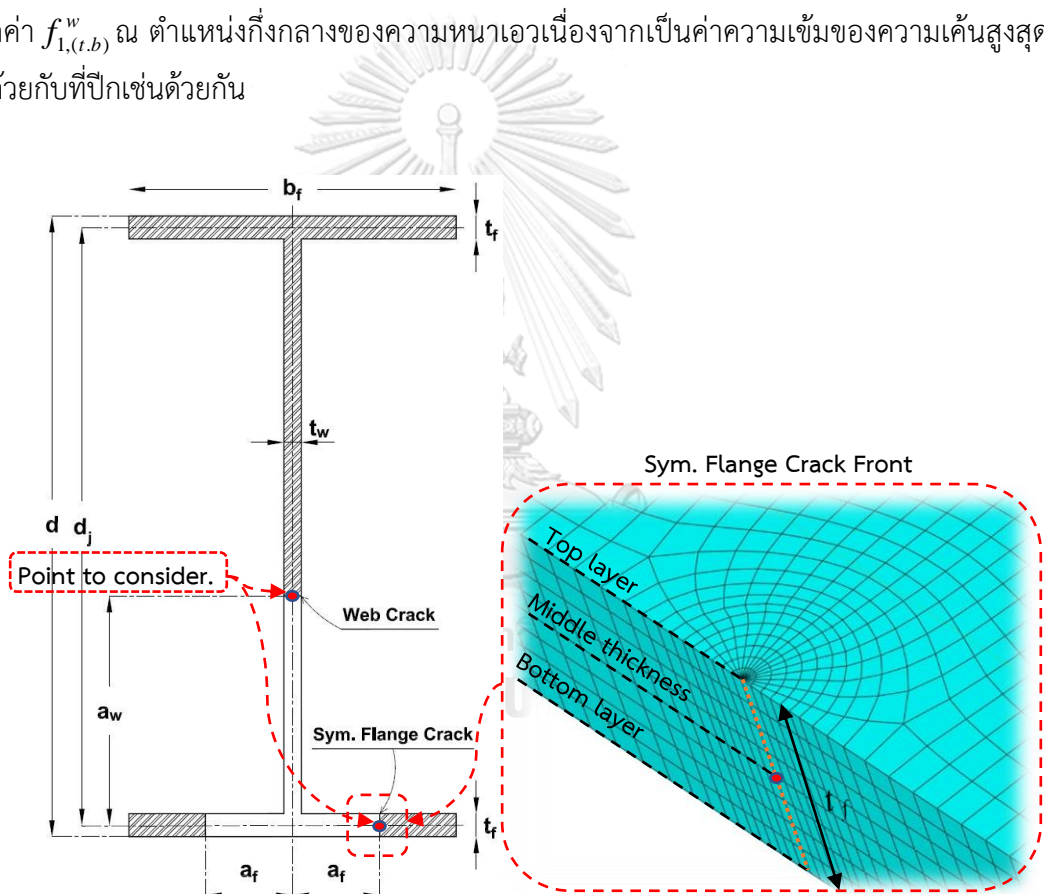
รูปที่ 4.7 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าว  
ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$



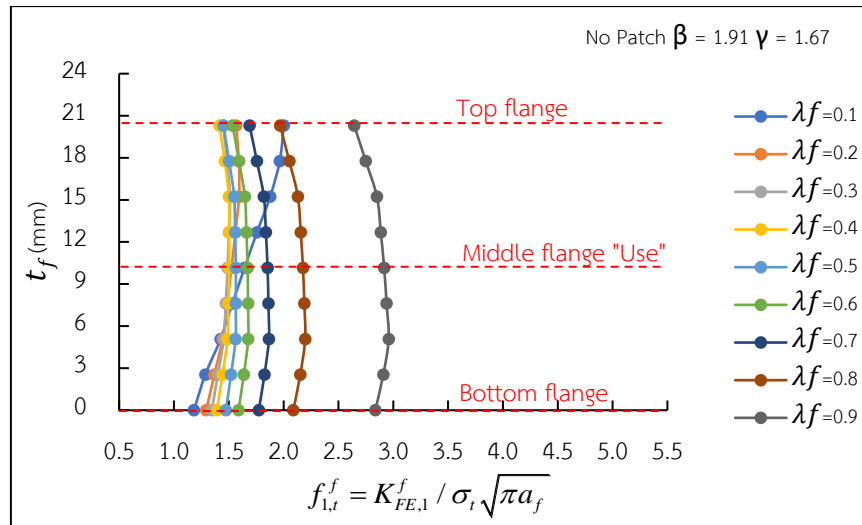
รูปที่ 4.8 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีรอยร้าว  
ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$

#### 4.2.1.2 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับคานเหล็ก ( $f_1$ )

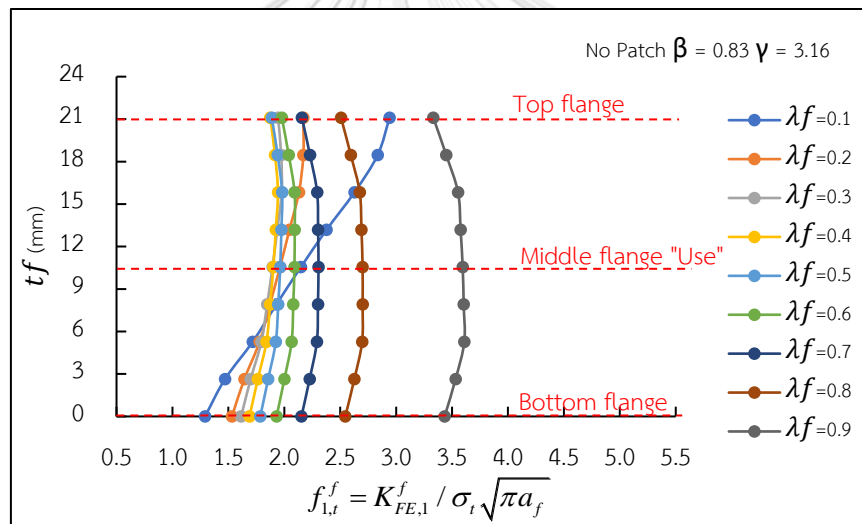
จากหัวข้อ 4.2.1.1 ได้ทำการตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย เป็นที่เรียบร้อยแล้วและในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการกระจายตัวของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตในปีกของคานเหล็กที่มีรอยร้าว ตามรูปที่ 4.9 โดยมีขนาดคานเหล็ก W530x150,  $\beta = 1.91$  และ W1000x222,  $\beta = 0.83$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและรับแรงดัด ตามรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 ตามลำดับ จากผลวิเคราะห์พบว่าค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตในปีกของคานเหล็กที่มีรอยร้าวนี้มีค่าสูงสุดอยู่ที่กึ่งกลางความหนาของปีก (middle flange) ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้เราจะเลือกค่า  $f_{1,(t,b)}^f$  ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของความหนาปีกของคานเหล็กที่ยังไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ  $f_{1,(t,b)}^f$  และเลือกค่า  $f_{1,(t,b)}^w$  ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของความหนาเวอเนื่องจากเป็นค่าความเข้มของความเค้นสูงสุดเช่นเดียวกับที่ปีกเช่นเดียวกัน



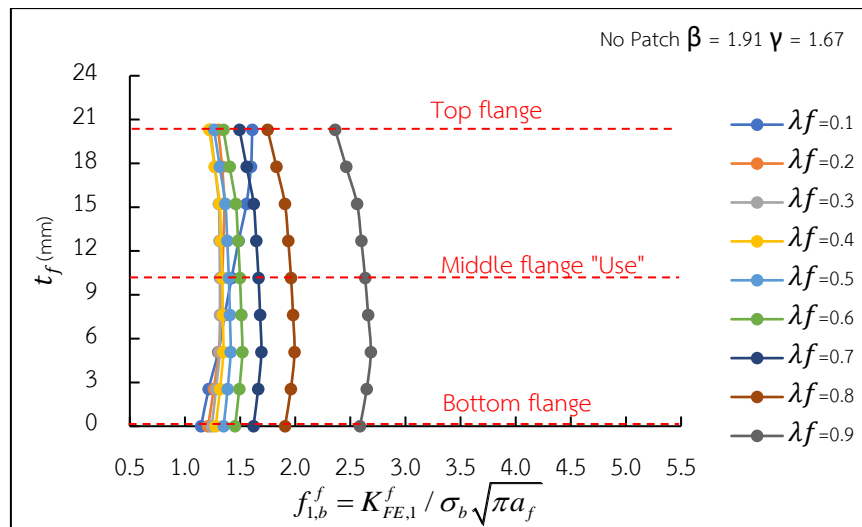
รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นตลอดความหนาของปีก



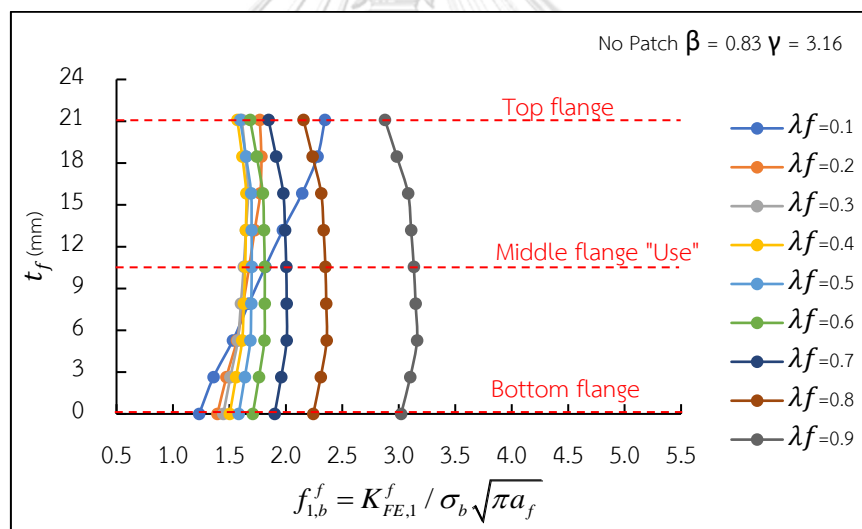
รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของค่า  $f_{1,t}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของค่า  $f_{1,t}^f$  ในปีกของคานเหล็กที่ ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$



รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของค่า  $f_{1,b}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W530x150  
กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$



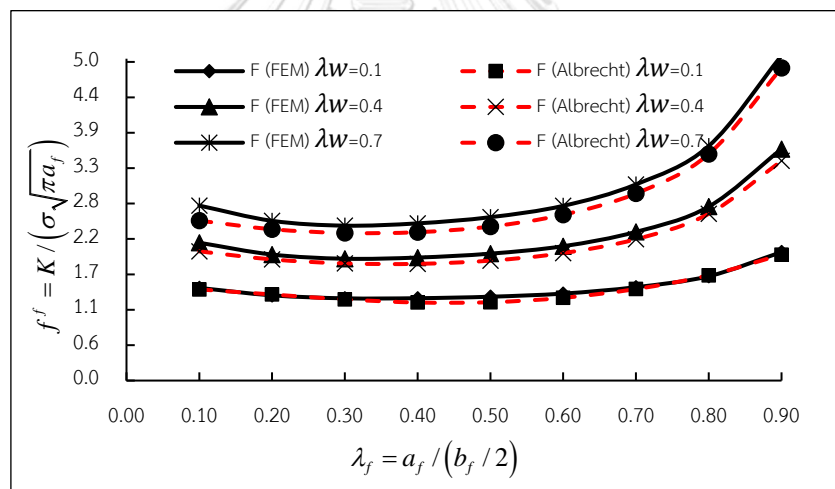
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของค่า  $f_{1,b}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W1000x222  
กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$

#### 4.2.1.3 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง

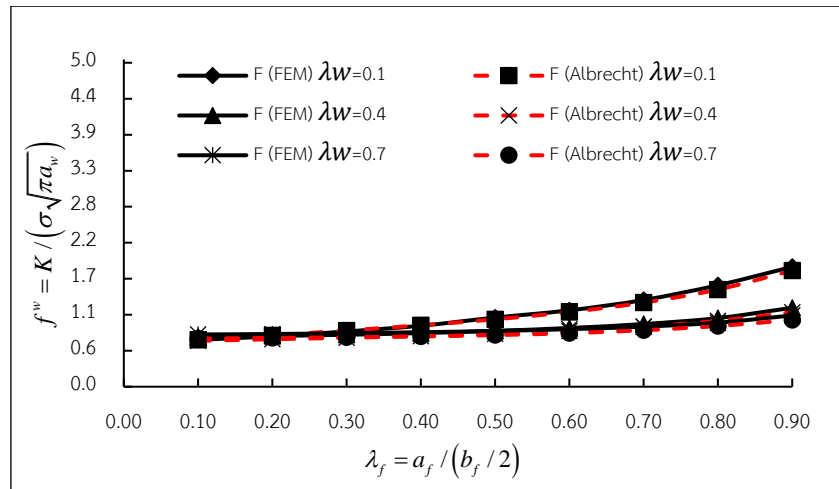
ในการศึกษาของ Albrecht และคณะ (2008) [13] ได้ใช้ประเภทเอลิเมนต์เป็นผนังบาง (shell element, S8R5) ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีข้อจำกัดคือไม่ทราบการกระจายของค่า  $f_{1,b}^f$  ที่ปลายรอยร้าวในแนวความหนาของแผ่นปีกและเอว ในการศึกษานี้จึงใช้ 8-node brick element (linear), C3D8 ดังรูปที่ 4.4d ซึ่งจะทราบการกระจายค่า  $f_{1,b}^f$  ในแนวความหนาของแผ่นได้ซึ่งพบว่า กระจาย



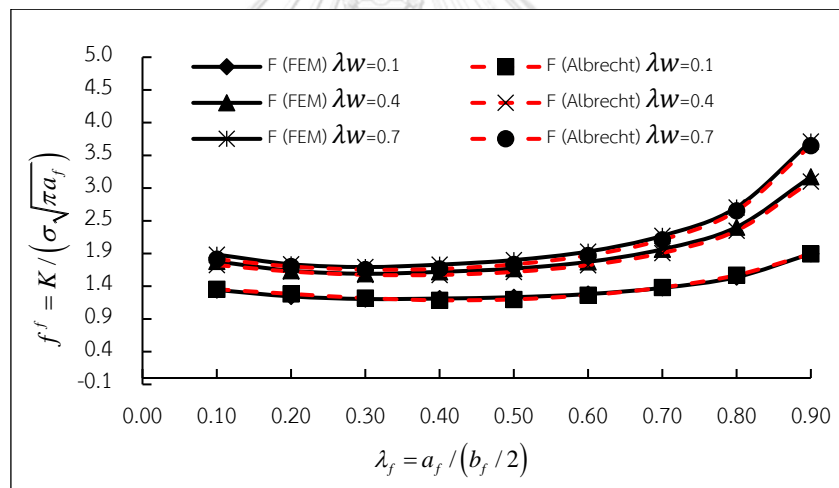
ของค่า  $f^{f,w}$  ตามแนวความหนาของแผ่นจะไม่สม่ำเสมอโดยมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความหนา ปีก รูปที่ 4.10 ถึง 4.13 แสดงตัวอย่างการกระจายของค่า  $f^f$  ตามแนวความหนาของแผ่นปีกภายใต้แรงดึงเมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  (คานามีหน้าตัด W1000×222) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า  $f^{f,w}$  สูงสุดที่กึ่งกลางความหนาของแผ่นเทียบกับผลของ Albrecht และคณะ 2008 พบว่ามีแนวโน้มที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ถึง 4.17 โดยในกรณีรับแรงดึง ค่า  $f^f$  และ  $f^w$  ในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าผลของ Albrecht และคณะ (2008) [13] โดยเฉลี่ยที่ 3 - 6 % ซึ่งค่าความแตกต่างสูงสุดเมื่อ  $\lambda_w = 0.7$  และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ  $\lambda_w$  มีค่าต่ำกว่า 0.7 ดังรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 และในกรณีรับแรงดัดค่า  $f^f$  และ  $f^w$  ในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าผลของ Albrecht และคณะ 2008 โดยเฉลี่ยที่ 2 - 3 % ซึ่งค่าความแตกต่างสูงสุดเมื่อ  $\lambda_w = 0.7$  และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ  $\lambda_w$  มีค่าต่ำกว่า 0.7 ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 เช่นเดียวกัน[48]



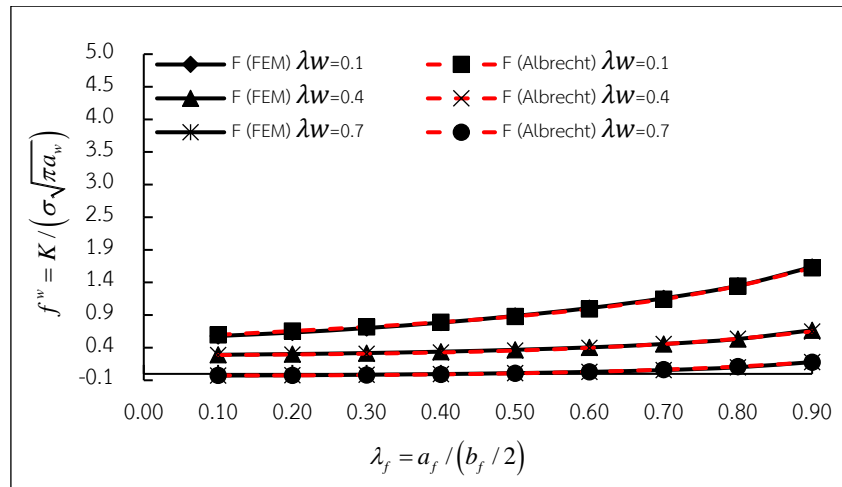
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Albrecht}^f$  ที่ปีกรับแรงอัดของเหล็กขนาด W1000×222 ภายใต้แรงดึง [48]



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Albrecht}^f$  ที่เออร์รับแรงอัดของเหล็กขนาด W1000×222 ภายใต้อัดแรงดึง [48]



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Albrecht}^f$  ที่บีบรับแรงอัดของเหล็กขนาด W1000×222 ภายใต้อัดแรงดึง [48]

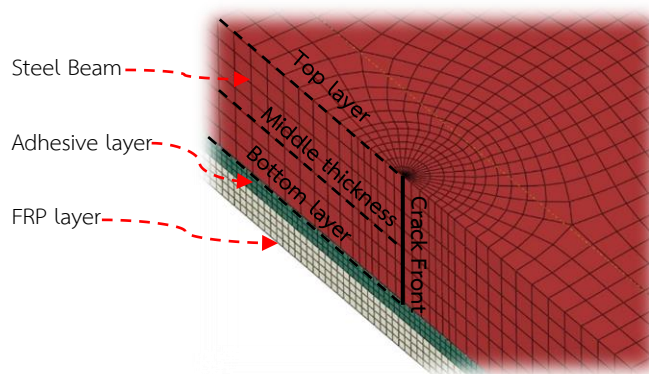


รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Albrecht}^f$  ที่เอวรับแรงอัดของเหล็กขนาด W1000×222 ภายใต้แรงดัด[48]

#### 4.2.2 การสร้างแบบจำลองของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

หลังจากหัวข้อ 4.2.1 ได้อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองของคานเหล็กที่มีรอยร้าวตั้งนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองของคานเหล็กที่มีรอยร้าวและซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ โดยยังคงเทคนิคการสร้างแบบจำลองจากหัวข้อ 4.2.1 แต่สร้างแบบจำลองเพิ่มเติมคือแบบจำลองของชั้นกาวและในส่วนของแผ่นปะติดอยู่ใต้ท้องของคานเหล็กที่มีรอยร้าว ทั้งกรณีแรงดึงและแรงดัดตามรูปที่ 4.2

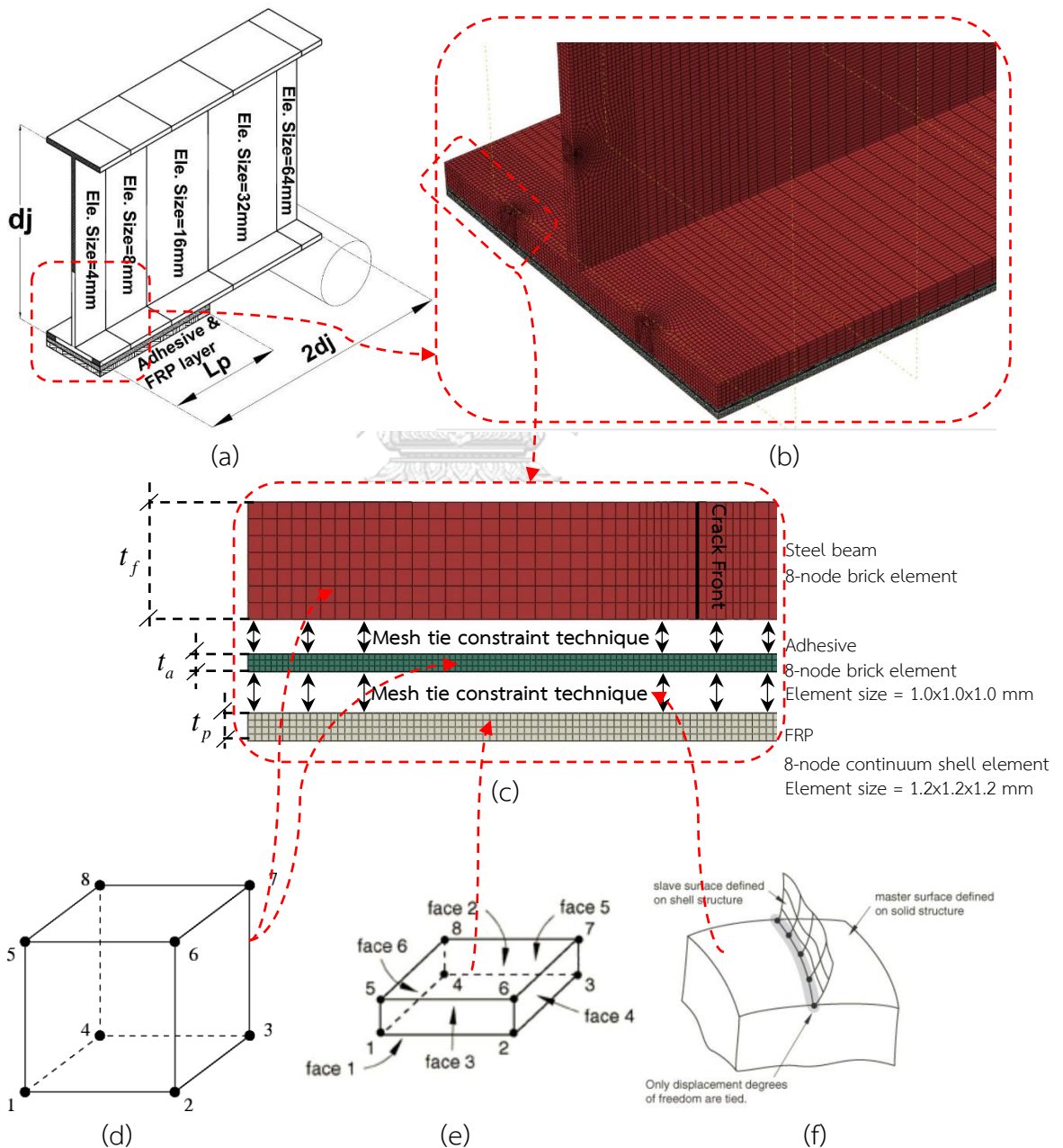
โดยการเลือกใช้ประเภทของเอลิเมนต์ของเหล็กยังคงใช้ 8-node brick element (linear), C3D8 ตามหัวข้อ 4.2.1 และในส่วนของวัสดุที่จะนำมาปะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือวัสดุที่เป็นชั้นกาว (Adhesive layer) ที่ต้องทำก่อนที่ท้องของคานเหล็กก่อนที่จะมีวัสดุ FRP มาปะทับอีกครั้ง ซึ่งเลือกใช้ประเภทของเอลิเมนต์เหมือนกับเหล็ก และวัสดุแผ่นปะ FRP เลือกใช้ประเภทของเอลิเมนต์ 8-node continuum shell element ตามรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ปีกคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

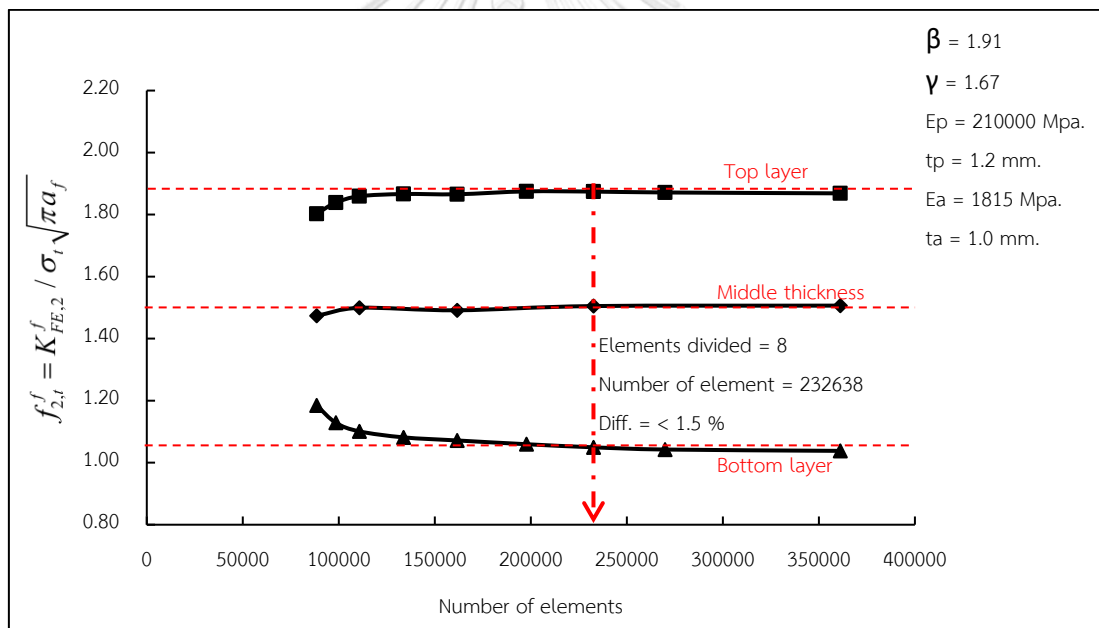
### 4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์การรู่เข้าของผลเฉลย

การแบ่งความละเอียดเอลิเมนต์และประเภทของเอลิเมนต์ของคานเหล็กยังคงใช้ ตามหัวข้อ 4.2.1 เมื่อวัสดุที่จะนำมาปะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือวัสดุที่เป็นชั้นกาว (Adhesive layer) ที่ต้องทาก่อนที่ท้องของคานเหล็กก่อนที่จะมีวัสดุ FRP มาปะทับอีกครั้ง ซึ่งชั้นกาวนี้เลือกใช้ประเภทของเอลิเมนต์เหมือนกับเหล็ก และวัสดุแผ่นปะ FRP เลือกใช้ประเภทของเอลิเมนต์ 8-node continuum shell element โดยใช้เทคนิค tie constraint ในการเชื่อมประสานของเอลิเมนต์ระหว่างผิวเหล็กกับวัสดุชั้นกาวและแผ่นปะ FRP ตามรูปที่ 4.19

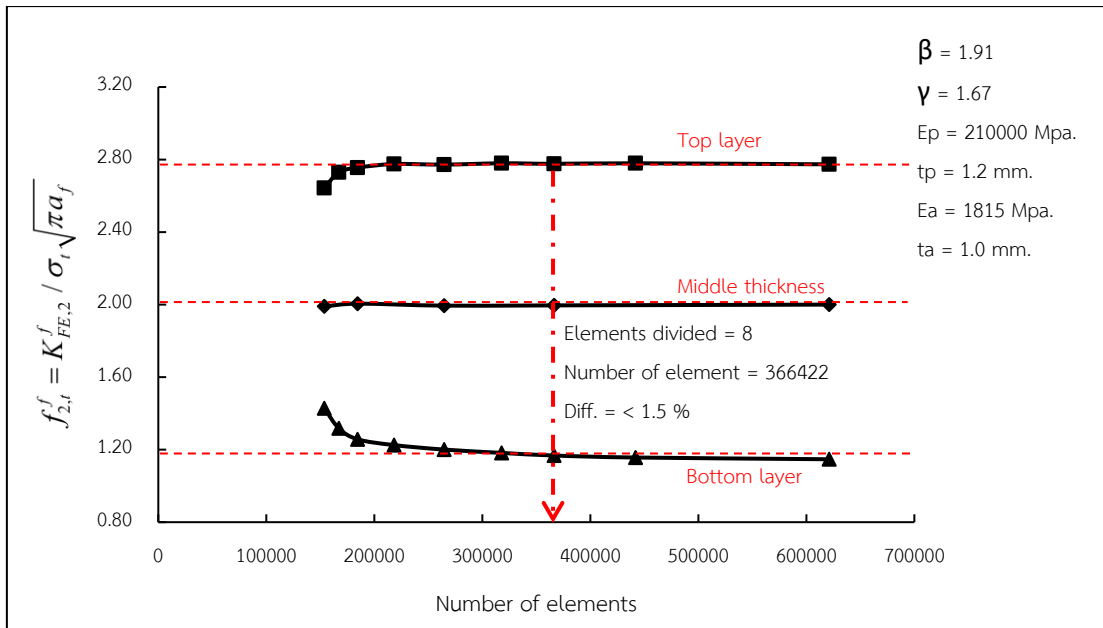


รูปที่ 4.19 ประเภทและการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ของแบบจำลองที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

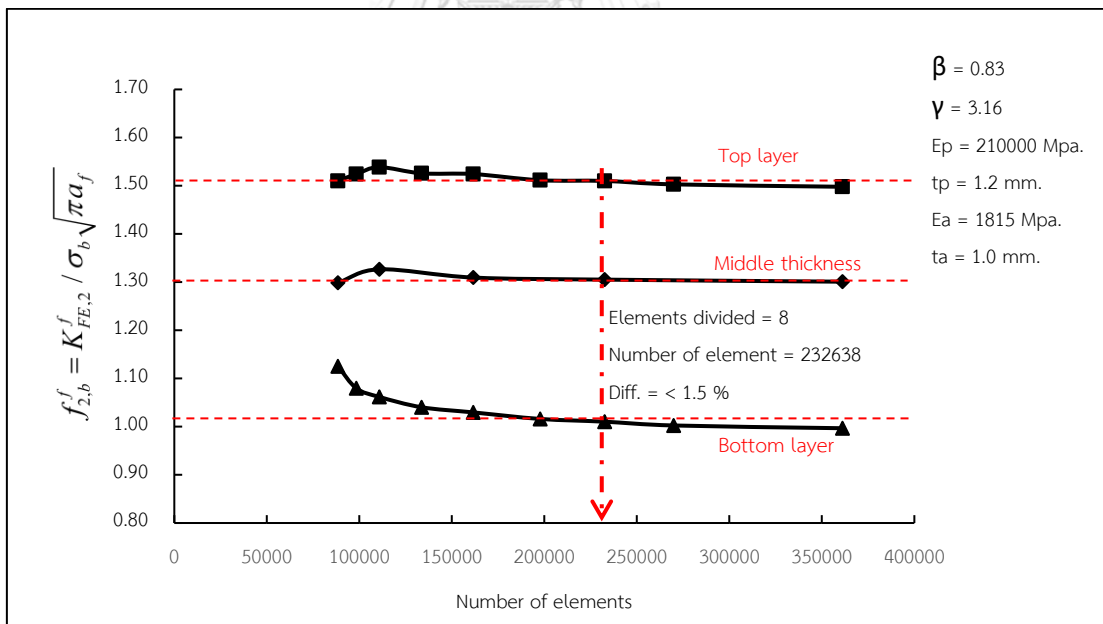
จากผลการวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลย ตามรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 ได้แสดงถึงค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตตามความหนาของปีกคานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ FRP ต่อจำนวน เอลิเมนต์กรณีรับแรงดึงและแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$  ของคานเหล็ก W530x150  $\beta = 2.04$  และ W1000x222  $\beta = 0.83$  พบว่าเมื่อเราเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ของปีกคานไปถึง 8 เอลิเมนต์แล้ว และเอลิเมนต์ทั้งหมดของแบบจำลองมีมากกว่า 232,638 เอลิเมนต์ สำหรับคานเหล็กที่มีรอยร้าวขนาด W530x150 และเอลิเมนต์ทั้งหมดของแบบจำลองมีมากกว่า 366,422 เอลิเมนต์ สำหรับคานเหล็กที่มีรอยร้าวขนาด W1000x222 จะทำให้ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตลู่เข้าเป็นเส้นตรงแนวนอนและมีความคลาดเคลื่อนของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตน้อยกว่า 1.5% เมื่อเพิ่มความละเอียดของเอลิเมนต์เป็นสองเท่าทั้งในส่วนที่ผิวบนของปีก(top layer) ตรงกลางความหนาปีก(middle thickness) และด้านล่าง(bottom layer) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในงานวิจัยจะเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์ของปีกคานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะเท่ากับ 8 เอลิเมนต์และรายละเอียดเพิ่มเติมตามรูปที่ 4.18



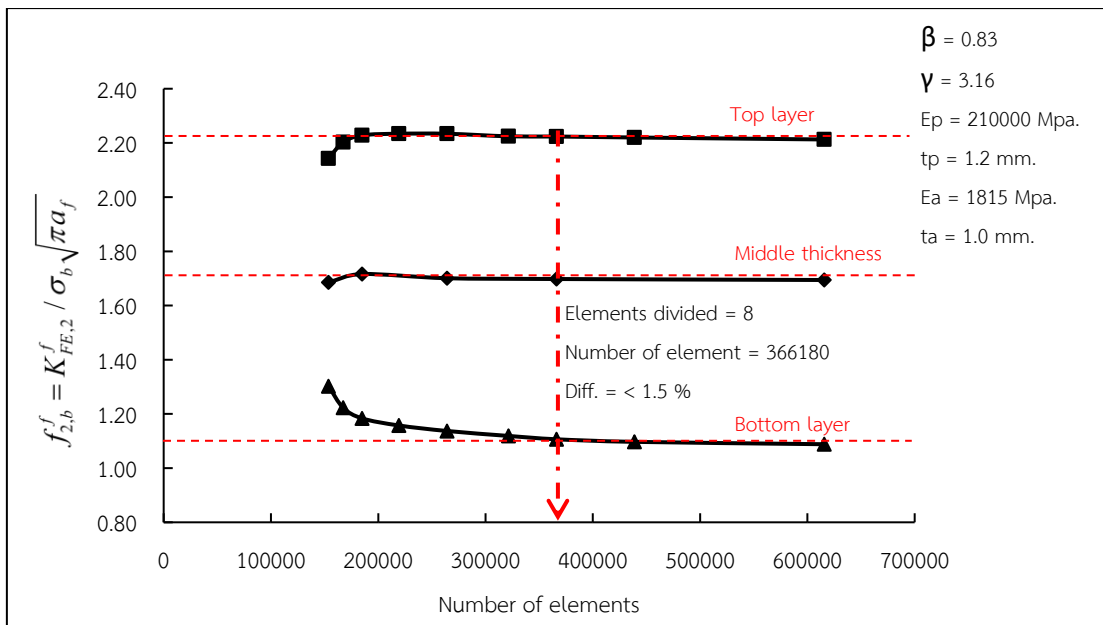
รูปที่ 4.20 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีแผ่นปะขนาด W530x150 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$



รูปที่ 4.21 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีแผ่นปะ  
ขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$



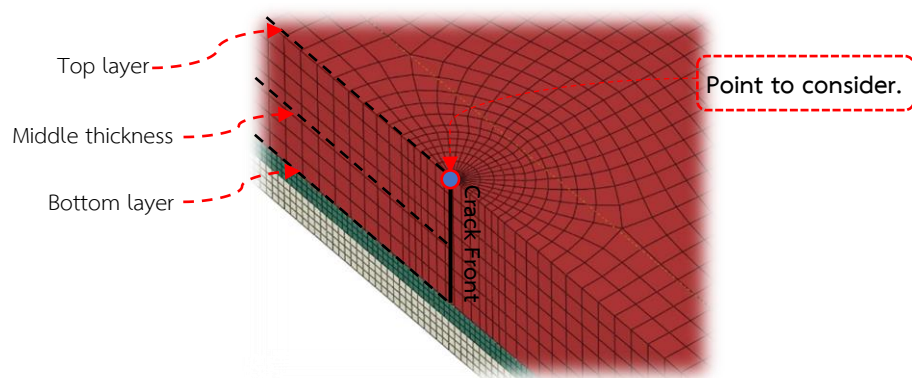
รูปที่ 4.22 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีแผ่นปะ  
ขนาด W530x150 กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$



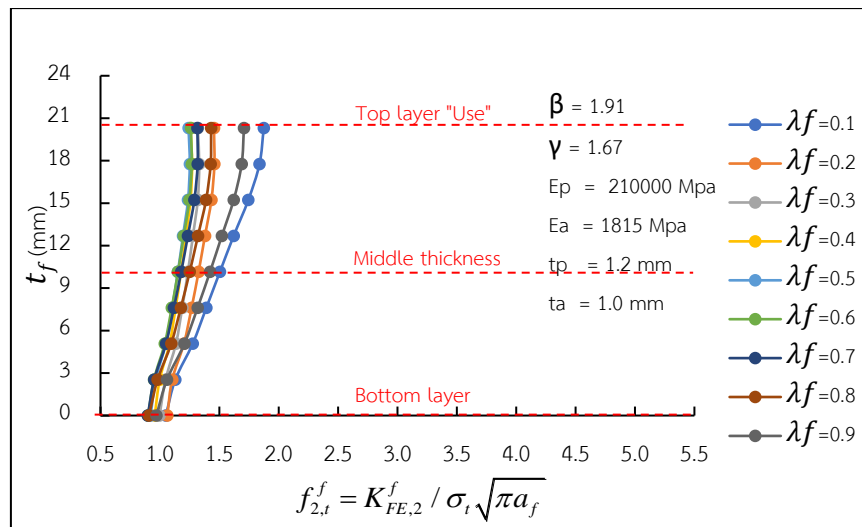
รูปที่ 4.23 ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อจำนวนเอลิเมนต์ของคานเหล็กที่มีแผ่นปะขนาด W1000x222 กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  และ  $\lambda_f = 0.1$

#### 4.2.2.2 ค่าตัวประกอบปรับแก้เนื่องจากแผ่นปะ ( $f_2$ )

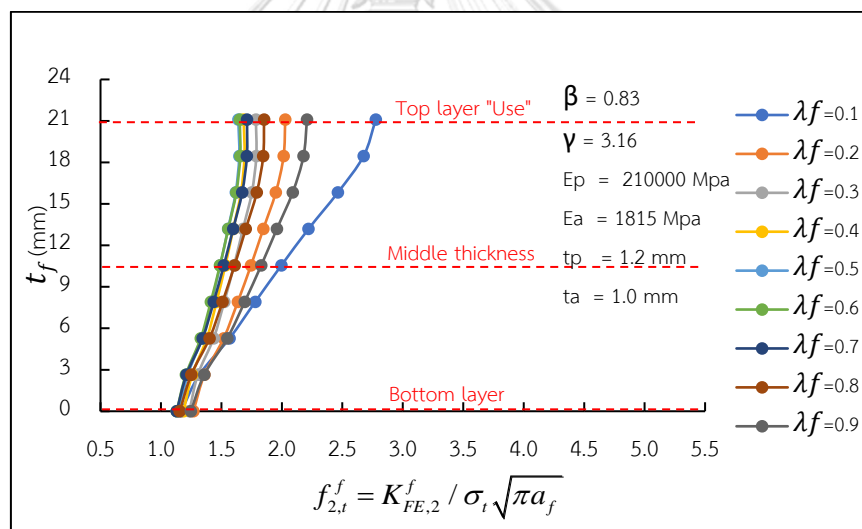
จากหัวข้อ 4.2.2.1 ได้ทำการตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลยเป็นที่เรียบร้อยแล้วและในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับคานเหล็กที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะตามรูปที่ 4.24 โดยมีขนาดคานเหล็ก W530x150,  $\beta = 1.91$  และ W1000x222,  $\beta = 0.83$  ทั้งกรณีรับแรงดิ่งและรับแรงดัด ตามรูปที่ 4.25, 4.26, 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ จากผลวิเคราะห์พบว่าค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตในปีกของคานเหล็กที่มีรอยร้าวนั้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่บนของความหนาของปีก (top layer) ทั้งกรณีรับแรงดิ่งและแรงดัด ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้เราจะเลือกค่า  $f_{2,(t,b)}^f$  ณ ตำแหน่งบนของความหนาปีกของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะเป็นข้อมูลในการนำไปสร้างสมการ  $f_{2,(t,b)}^f$  ต่อไป



รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นตลอดความหนาของปีก

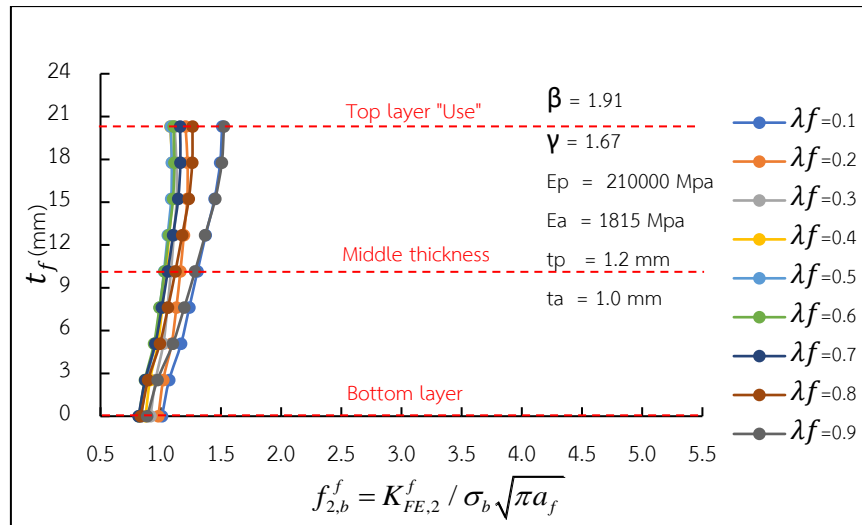


รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของค่า  $f_{2,t}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W530x150  
กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$

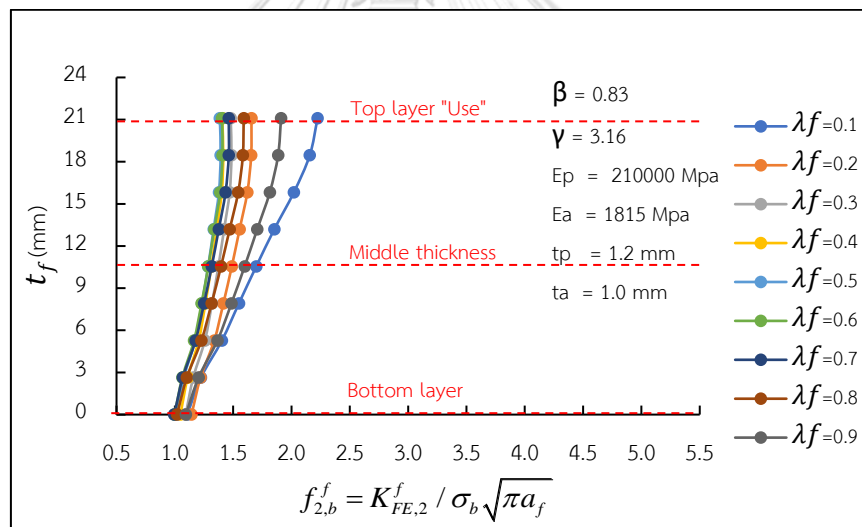


รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของค่า  $f_{2,t}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W1000x222  
กรณีรับแรงดึง เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$





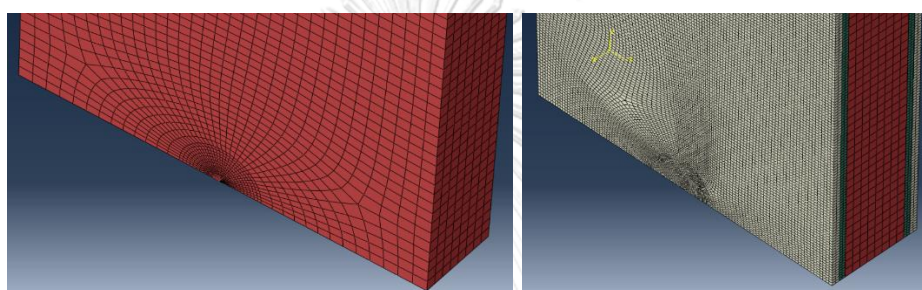
รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของค่า  $f_{2,b}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W530x150  
กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$



รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของค่า  $f_{2,b}^f$  ในปีกของคานเหล็ก ขนาด W1000x222  
กรณีรับแรงดัด เมื่อ  $\lambda_w = 0.4$

### 4.2.2.3 การจำลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา

จากการทบทวนงานวิจัยของ Do และ Lenwari [29] ทางผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองเป็นแผ่นเหล็กแบนที่มีแผ่นปะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดอยู่ทั้งสองด้านที่เหมือนกันกับงานวิจัยของ Do และ Lenwari [29] ซึ่งความแตกต่างของแบบจำลอง ต่างกันที่การเลือกใช้ได้ใช้ประเภทเอลิเมนต์ 8-node brick element (linear), C3D8 จากเดิม 20-node quadratic solid element (C3D20) ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์การลู่เข้าของผลเฉลยไว้เป็นที่เรียบร้อยแล้วก่อนที่จะนำแบบจำลองนั้นมาตรวจสอบกับของ Do และ Lenwari [29] อีกครั้งทั้งกรณีไม่มีแผ่นปะซ่อมแซม (no-patch) ตามรูปที่ 4.24ก และกรณีมีแผ่นปะ(patch) ตามรูป 4.24ข



(ก) กรณีไม่มีแผ่นปะ

(ข) กรณีมีแผ่นปะสองด้าน

รูปที่ 4.29 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดึง

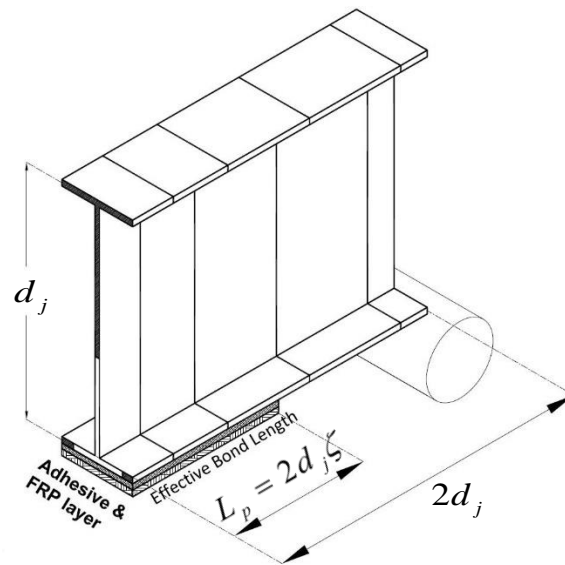
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตจากการสร้างแบบจำลองของผู้วิจัยซึ่งได้นำเทคนิคจากหัวข้อ 4.2.2.1 มาเป็นวิธีการหลักในการทำแบบจำลองพบว่าในกรณีไม่มีแผ่นปะแบบจำลองมีความแตกต่างกันเมื่อเทียบกับผลเฉลยของ Tada และคณะ [31] เฉลี่ยอยู่ที่ 0.32 % และในกรณีที่มีแผ่นปะมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลเฉลยของ Do และ Lenwari [29] เฉลี่ยอยู่ที่ 1.00 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนประเภทของเอลิเมนต์จาก 20 โหนด ของ Do และ Lenwari [29] เป็น 8 โหนด มีผลกระทบต่อค่า  $f_1$  และ  $f_2$  ที่ต่ำกว่า 1% ดังนั้นแบบจำลองของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะจะมีความน่าเชื่อถือมาก

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจสอบแบบจำลองของแผ่นเหล็กภายใต้แรงดึง

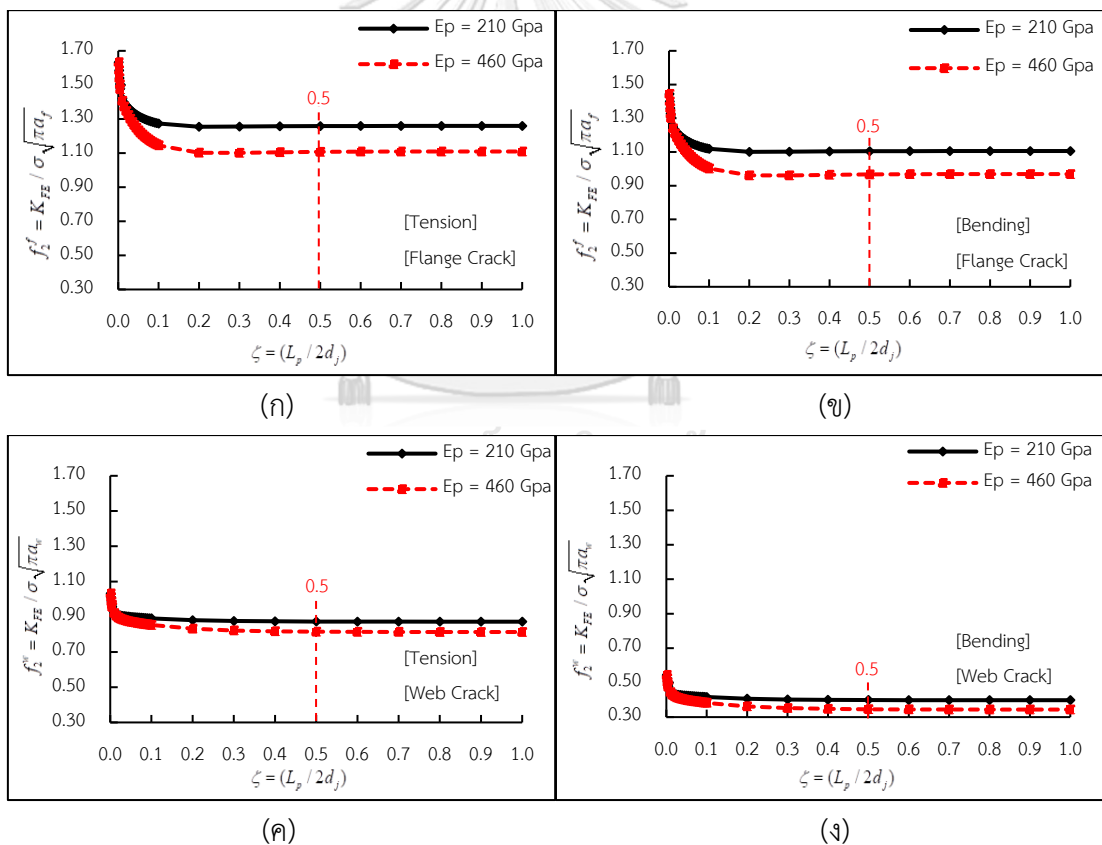
$a/W_s$	No Patch $f_1$			Patch $f_2$		
	Correction Factor $f_1$ (FE)	Correction Factor $f_1$ (Tada และคณะ) [31]	Diff. %	Correction Factor $f_2$ (FE)	Correction Factor $f_2$ (Do และคณะ) [29]	Diff %
0.1	1.00252	1.00597	0.34	0.80537	0.80000	0.67
0.2	1.02349	1.02448	0.10	0.76467	0.76000	0.61
0.3	1.05564	1.05753	0.18	0.64397	0.64000	0.62
0.4	1.10681	1.10905	0.20	0.60410	0.60000	0.68
0.5	1.18405	1.18623	0.18	0.52414	0.52000	0.80
0.6	1.29857	1.30274	0.32	0.48493	0.48000	1.03
0.7	1.48325	1.48735	0.28	0.43506	0.43000	1.18
0.8	1.80672	1.81433	0.42	0.37492	0.37000	1.33
0.9	2.55397	2.57666	0.88	0.32667	0.32000	2.09

#### 4.3 ระยะเวลาเหนี่ยวประสิทธิผล

ระยะเวลาเหนี่ยวของแผ่นปะ ( $L_p$ ) มีผลกระทบโดยตรงกับค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น เมื่อระยะเวลาเหนี่ยวของแผ่นปะสั้นมากๆ จะทำให้ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นมีความคลาดเคลื่อนได้สูง หรือ ถ้าระยะเวลาเหนี่ยวของแผ่นปะยาวมากเกินไปก็จะทำให้สิ้นเปลืองวัสดุโดยไม่จำเป็น ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงต้องการที่จะกำหนดระยะเวลาเหนี่ยวประสิทธิผลที่ไม่ทำให้ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นมีความคลาดเคลื่อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซม โดยมีวิธีการดังนี้ จากรูปที่ 4.30 ระยะเวลาเหนี่ยวถูกกำหนดด้วย  $L_p = 2d_j \zeta$  เมื่อ  $d_j$  คือความลึกของคานเหล็กวัดจากครึ่งกลางของความหนาปีกบนถึงครึ่งกลางของความหนาปีกล่าง และ  $\zeta = L_p / (2d_j)$  คือทำให้ปกติ(normalize)ของความยาวแผ่นปะที่ทางผู้วิจัยจะกำหนดค่าตั้งแต่ 0.1, 0.2, +...+1.0 โดยทางผู้วิจัยได้ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาเหนี่ยวประสิทธิผลแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตต่อระยะเวลาเหนี่ยวประสิทธิผลที่ปีกและที่เอวทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัดเมื่อค่า  $E_p$  สูงขึ้นตามรูปที่ 4.30ก ถึง 4.30ง พบว่าค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% เมื่อ  $\zeta = 0.5$  และในส่วนที่สอง  $E_s$  สูงขึ้นตามรูปที่ 4.31a ถึง 4.31d พบว่า  $f_2$  คลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% เมื่อ  $\zeta = 0.5$  ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ทางผู้วิจัยจึงได้กำหนดค่า  $\zeta = 0.5$  ในการหาค่า  $K$  ทั้งหมด

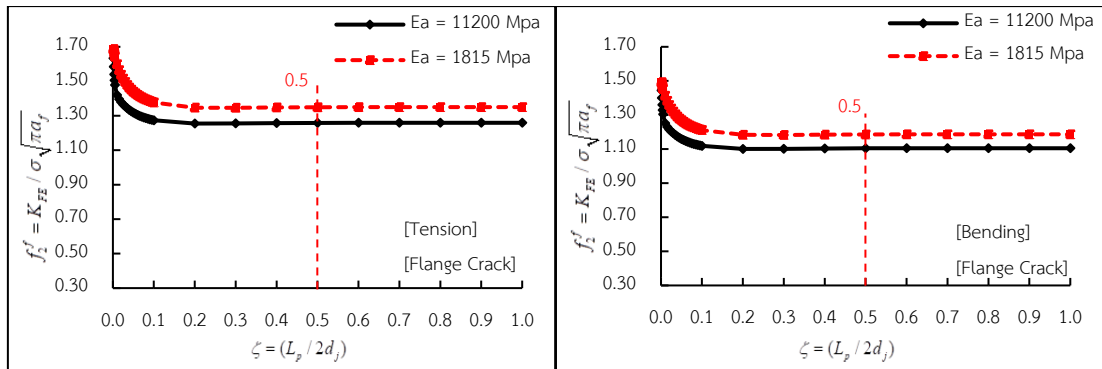


รูปที่ 4.30 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ



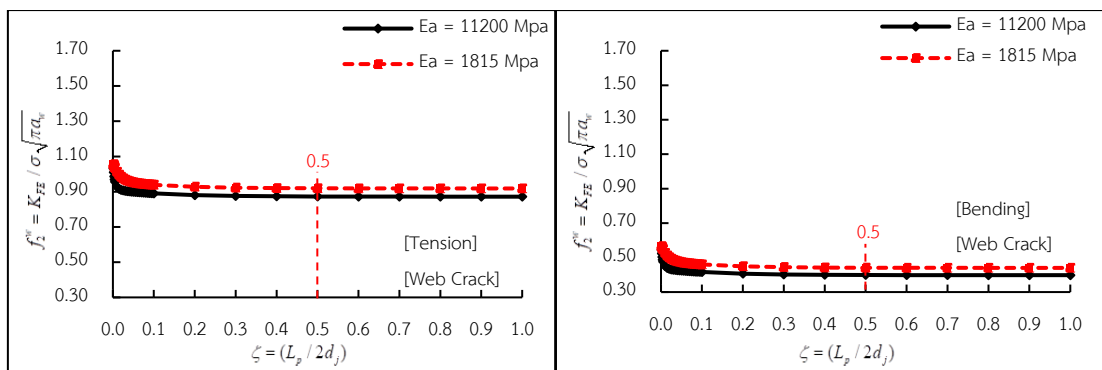
รูปที่ 4.31 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะต่อค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตปีกและเอวทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด เมื่อ  $\lambda_f = 0.7$ ,  $\lambda_w = 0.4$ ,  $t_p = 1.2\text{mm}$ ,

$$t_a = 1.0\text{mm}, E_a = 11200\text{ MPa}.$$



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4.32 ระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของคานหลักที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะต่อค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ปีกและเอวทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด เมื่อ  $\lambda_f = 0.7$ ,  $\lambda_w = 0.4$ ,  $t_p = 1.2$  mm,

$$t_a = 1.0 \text{ mm}, E_p = 210 \text{ GPa.}$$

## บทที่ 5

### ผลกระทบของตัวแปร

บทที่ 5 จะกล่าวถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต ซึ่งแบ่งออกเป็นสองหัวข้อได้แก่ ผลกระทบของอัตราส่วนรอยร้าวและมิติคานเหล็กต่อ  $f_1^{f,w}$  และ  $f_2^{f,w}$  ภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด และสุดท้ายคือผลกระทบของวัสดุแผ่นปะต่อค่า  $f_2^{f,w}$  เมื่อสมการที่ (5-1) และ (5-2) เป็นค่าประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ยังไม่มีการซ่อมแซมและมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะตามลำดับ ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ค่า  $f_1^{f,w}$  หรือ  $f_2^{f,w}$  เป็นหลักในการเปรียบเทียบกับตัวแปรต่างๆได้แก่ ขนาดรอยร้าวที่ปีกหรือเอวของคานเหล็ก ( $\lambda_f, \lambda_w$ ) มิติของคานเหล็ก ( $\beta, \gamma$ ) และตัวแปรของวัสดุซ่อมแซมคือความหนาของแผ่นปะ FRP ( $t_p$ ) โมดูลัสของแผ่นปะ ( $E_p$ ) ความหนาของชั้นกา ( $t_a$ ) และโมดูลัสของชั้นกา ( $E_a$ ) เป็นต้น โดยสมการที่ (5-2) นั้นมีสมการที่ (5-1) เป็นตัวหาร ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าสมการที่ (5-2) ถ้าค่ามากกว่าหนึ่งหมายถึงการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะไม่มีประสิทธิภาพ และถ้าค่าน้อยกว่าหนึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของวัสดุที่นำมาซ่อมแซมนั้นได้ดี เช่น  $f_{2(t,b)}^{f,w} = 0.5$  หมายถึงสามารถลดค่าความเข้มของความเค้นที่ปลายรอยร้าวได้ลง 50% เมื่อมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด

$$f_{1(t,b)}^{f,w} = \frac{K_{FE,1}}{\sigma_{t,b} \sqrt{\pi a_{f,w}}} \quad (5-1)$$

$$f_{2(t,b)}^{f,w} = \frac{K_{FE,2}}{f_{1(t,b)}^{f,w} \sigma_{t,b} \sqrt{\pi a_{f,w}}} \quad (5-2)$$

#### 5.1 ผลกระทบของอัตราส่วนรอยร้าวและมิติคานเหล็กต่อ $f_1$

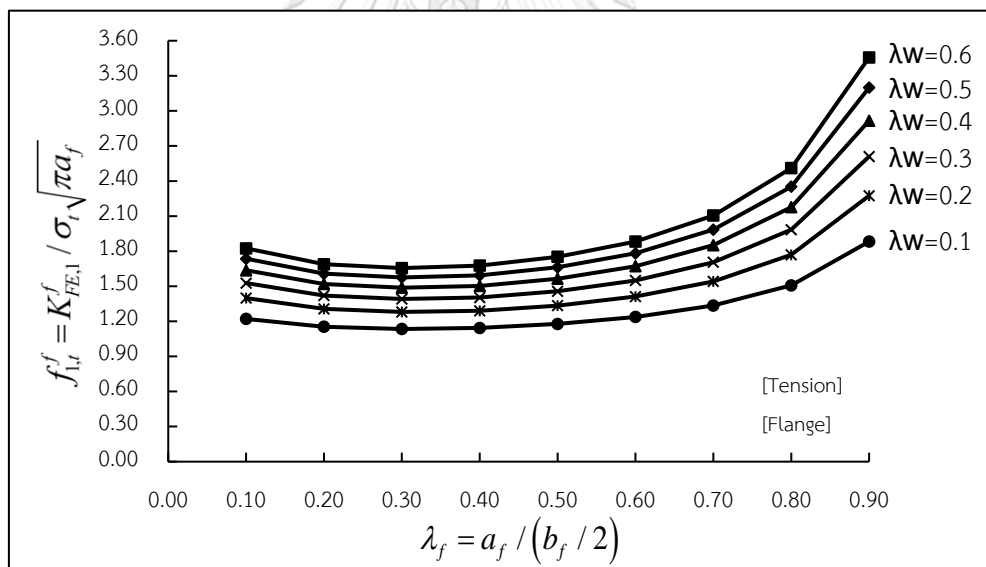
เนื่องจากขนาดรอยร้าวที่ปีกและเอว ( $\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$ ,  $\lambda_w = a_w / d_j$ ) มีผลกระทบโดยตรงต่อค่า  $f_{1(t,b)}^{f,w}$  ทั้งกรณีแรงดึงและแรงดัด จึงเป็นหัวข้อแรกๆที่จำเป็นต้องศึกษา และหัวข้อต่อมาจะเป็นผลกระทบของมิติคานเหล็กคือ  $\beta$  และ  $\gamma$

##### 5.1.1 ผลกระทบของอัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอว ( $\lambda_f, \lambda_w$ ) ต่อ $f_1$

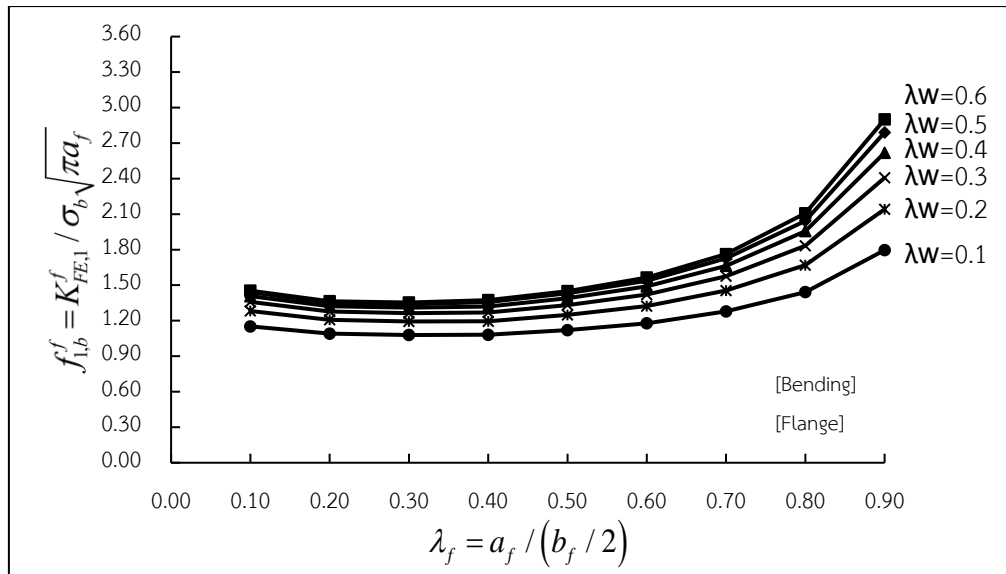
รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{1,t}^f$  ที่ปีก และอัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่ปีก  $\lambda_f$  เมื่ออัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่เอว  $\lambda_w$  สูงขึ้น ภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด พบว่าค่า  $f_{1,t}^f$  ที่ปีกเมื่อรอยร้าวที่ปีกและเอวเติบโตมากขึ้นของกรณีรับแรงดึงค่า  $f_{1,t}^f$  จะสูงกว่าค่า  $f_{1,t}^f$  กรณีรับแรงดัด

โดยค่า  $f_{1,t}^f$  และ  $f_{1,b}^f$  มีค่าสูงขึ้นเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่ปีกและเอวมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ แต่ในทางกลับกันตามรูปที่ 5.3 และ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{1,t}^w$  ที่เอว และอัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่ปีก  $\lambda_f$  เมื่ออัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่เอว  $\lambda_w$  สูงขึ้น พบว่าค่า  $f_{1,t}^f$  ที่ปีกเมื่อรอยร้าวที่ปีกและเอวเติบโตมากขึ้นของกรณีรับแรงดัดค่า  $f_{1,b}^f$  จะสูงกว่าค่า  $f_{1,t}^w$  กรณีรับแรงดึง โดยค่า  $f_{1,t}^w$  และ  $f_{1,b}^w$  มีค่าสูงขึ้นเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่เอวมีค่าน้อยลงตามรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

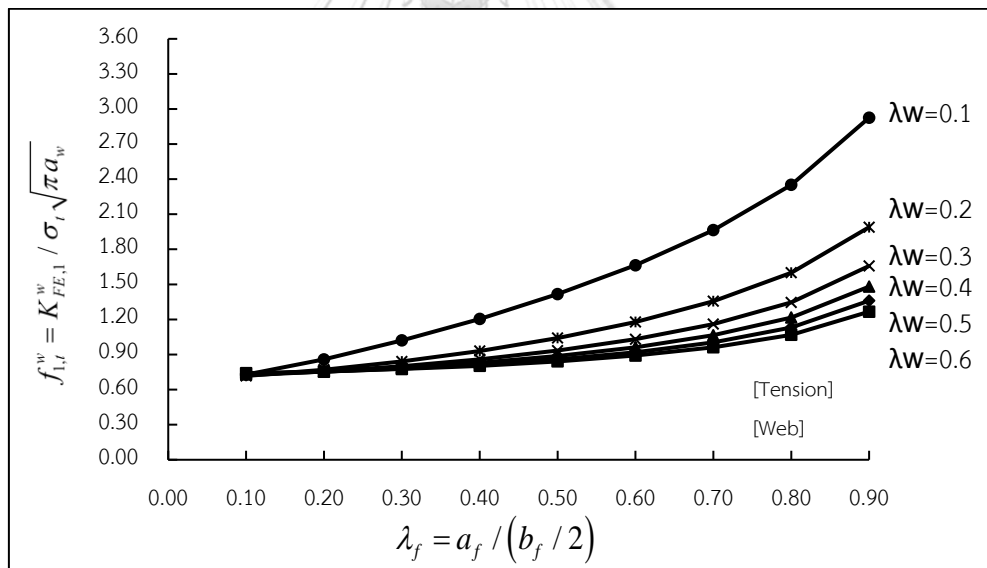
จากการศึกษาผลกระทบของค่าตัวประกอบทั้งแก๊วระชาคณิตที่ปีกและเอวกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัดสรุปได้ว่า ค่าตัวประกอบปรับแก๊ว  $f_{1,t}^f$  ที่ปีก กรณีรับแรงดึง มีค่าสูงกว่า  $f_{1,b}^f$  ที่ปีก กรณีรับแรงดัด โดยค่า  $f_{1,t}^f$  และ  $f_{1,b}^f$  มีค่าสูงขึ้นเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่ปีกและเอวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าตัวประกอบปรับแก๊ว  $f_{1,t}^w$  ที่เอว กรณีรับแรงดัด มีค่าสูงกว่า  $f_{1,t}^f$  ที่เอว กรณีรับแรงดึง โดยค่า  $f_{1,t}^w$  และ  $f_{1,b}^w$  มีค่าสูงขึ้นเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่เอวมีค่าน้อยลงตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{1,t}^f$  และความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอวของ W530x150 ภายใต้แรงดึง

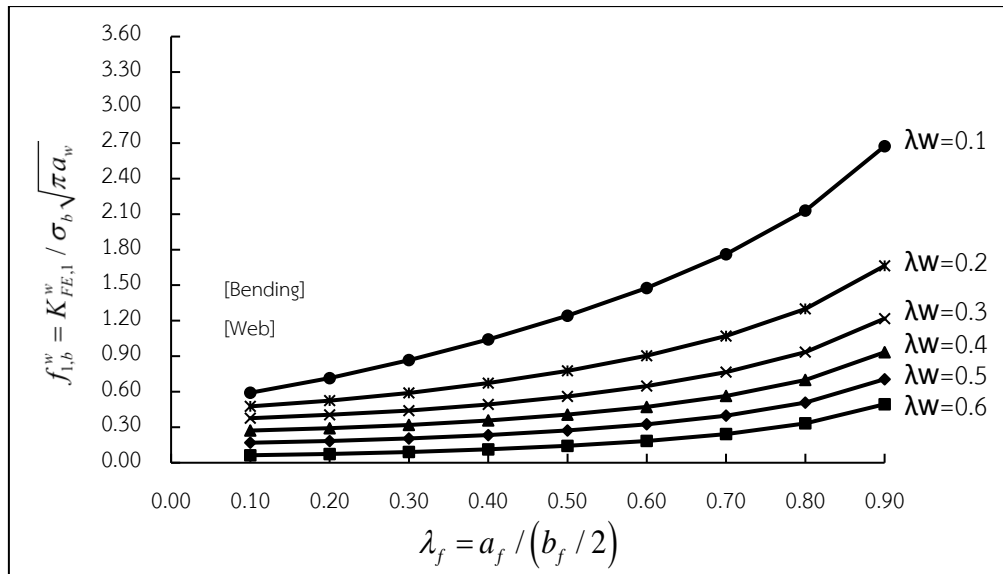


รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{1,b}^f$  และความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอวของ W530x150 ภายใต้แรงดัด



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{1,t}^w$  และความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอวของ W530x150 ภายใต้แรงดึง





รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{1,b}^w$  และความยาวรอยร้าวที่ปีกและเอวของ W530x150 ภายใต้แรงดัด

### 5.1.2 ผลกระทบของมิติของคานเหล็ก ( $\beta, \gamma$ ) ต่อ $f_1$

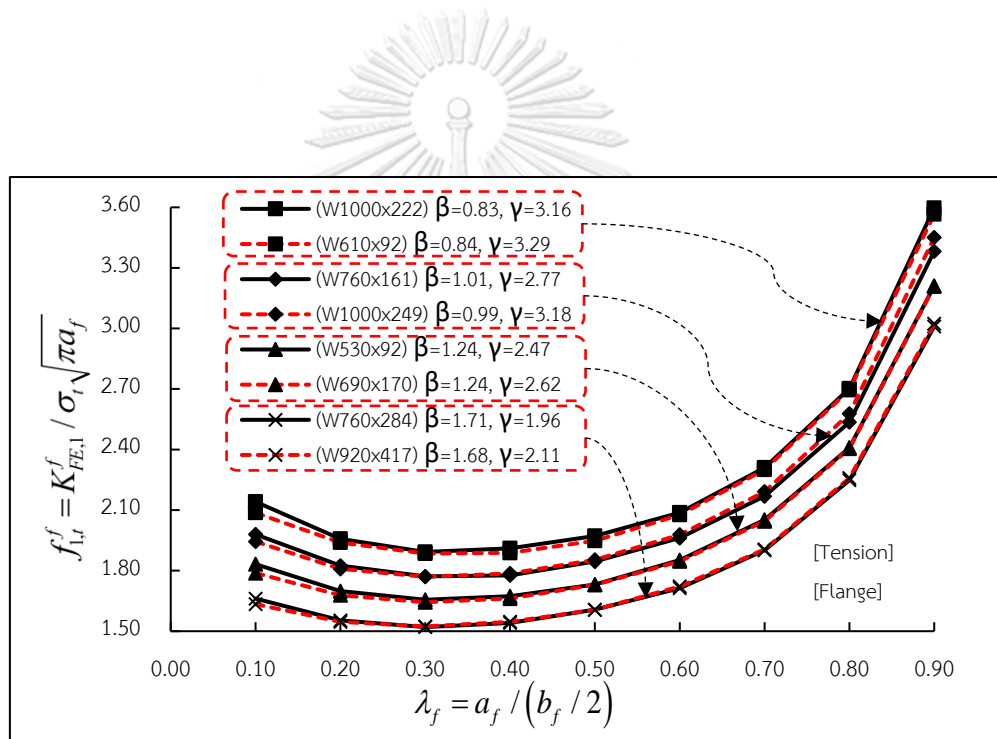
จากตารางที่ 4.1 ผู้วิจัยได้เลือกจับคู่ขนาดเหล็กที่มีค่า  $\beta$  ที่ใกล้เคียงกันมาทั้งหมด 4 คู่ กรณี  $f_{1(t,b)}^f$  ที่ปีก และ 2 คู่ กรณี  $f_{1(t,b)}^w$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลของ ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต  $f_{1(t,b)}^{f,w}$  ต่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอว  $\beta = A_f / A_w$  และอัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก  $\gamma = d_j / b_f$  ว่ามีผลกระทบมากนักน้อยเพียงโดยสรุปได้ดังนี้

จากรูปที่ 5.5 ถึง 5.8 พบว่าค่า  $\beta$  มีผลกระทบต่อค่า  $f_{1,t}^{f,w}$  กรณีรับแรงดึงสูงกว่าค่า  $f_{1,b}^{f,w}$  กรณีรับแรงดัด โดยค่า  $f_{1,t}^f$  (กรณีรับแรงดึง) หรือ  $f_{1,b}^f$  (กรณีรับแรงดัด) ที่ปีกจะมีค่าสูงขึ้นเฉลี่ย 10% และ 5% เมื่อเทียบกับค่า  $\beta = 1.71$  กับค่า  $\beta = 1.24$  ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่า  $f_{1(t,b)}^f$  ที่ปีกจะสูงขึ้นเมื่อค่า  $\beta$  ต่ำลงตามรูปที่ 5.5 และ 5.6 และในขณะที่ค่า  $f_{1,t}^w$  (กรณีรับแรงดึง) หรือ  $f_{1,b}^w$  (กรณีรับแรงดัด) ที่เอวจะมีค่าสูงขึ้นเฉลี่ย 2% และ 10% เมื่อค่าอัตราส่วนรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) เท่ากับ 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ โดยเทียบกับค่า  $\beta = 1.71$  กับค่า  $\beta = 0.83$  ตามรูปที่ 5.7 และ 5.8 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่า  $f_{1(t,b)}^w$  ที่เอวจะสูงขึ้นเมื่อค่า  $\beta$  เพิ่มมากขึ้น

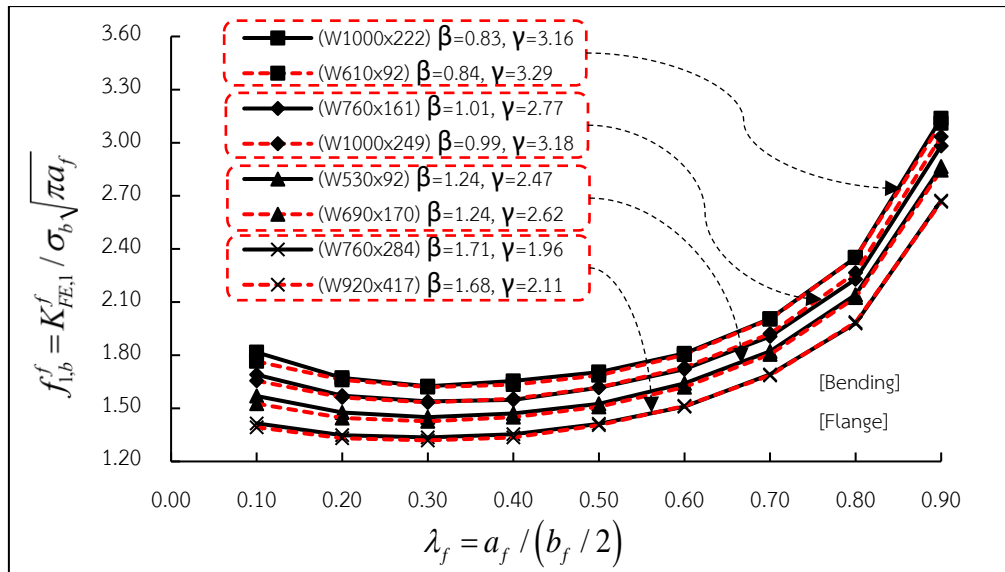
และสุดท้ายจากรูปที่ 5.5 ถึง 5.8 พบว่าค่า  $\gamma$  มีผลกระทบต่อค่า  $f_{1(t,b)}^{f,w}$  ที่ปีกหรือเอว ทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด อยู่ที่ 2% ถึง 5% เมื่อเปรียบเทียบกับค่า  $\beta$  ที่เท่ากันแต่ค่า  $\gamma$  ที่แตกต่างกัน

ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่า  $\gamma$  จะส่งผลกระทบต่อค่า  $f_{1(t,b)}^w$  ที่เอว สูงกว่าค่า  $f_{1(t,b)}^f$  ที่ปีกเล็กน้อย เมื่อค่าอัตราส่วนรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) เท่ากับ 0.5 ถึง 0.9 ตามรูปที่ 5.7 และ 5.8

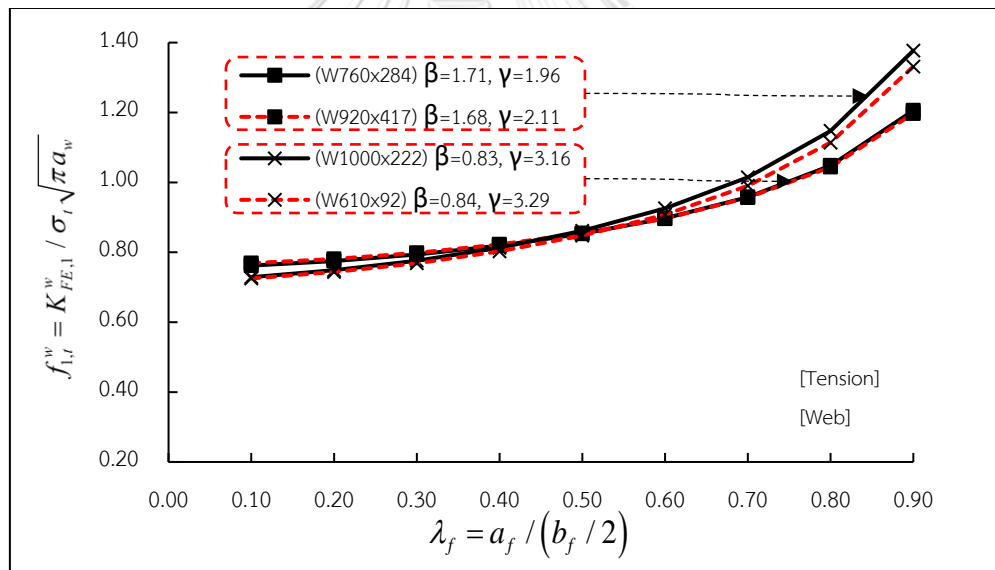
จึงสรุปได้ว่าค่า  $\beta$  ส่งผลกระทบต่อค่า  $f_1^f$  ที่ปีกจะปรับตัวสูงขึ้นเมื่อค่า  $\beta$  ลดลง และในทางกลับกันค่า  $f_1^w$  ที่เอวปรับตัวสูงขึ้นเมื่อค่า  $\beta$  เพิ่มขึ้น ทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด และค่า  $\gamma$  ส่งผลกระทบต่อค่า  $f_1^{f,w}$  ที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับค่า  $\beta$  ที่เท่ากันแต่ค่า  $\gamma$  ที่แตกต่างกัน ดังนั้นค่า  $\beta$  จึงมีผลกระทบต่อค่า  $f_1$  สูงกว่าค่า  $\gamma$  ทั้งที่ปีกและเอวภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด



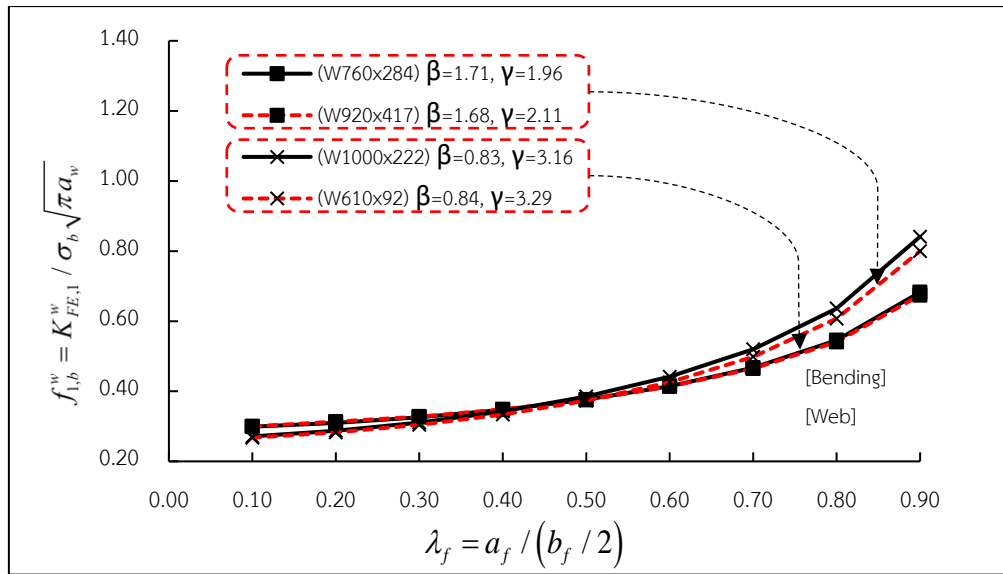
รูปที่ 5.5 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{1,t}^f$  กรณีรับแรงดึง



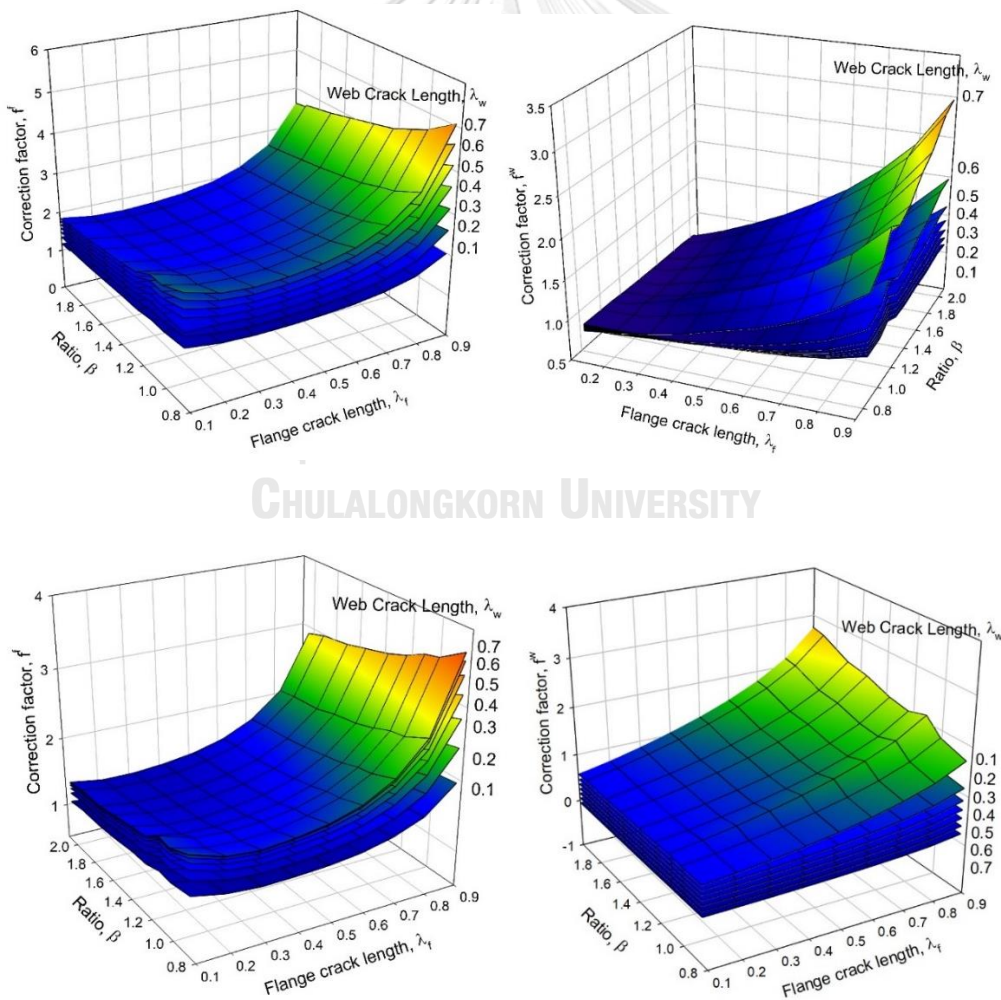
รูปที่ 5.6 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{1,b}^f$  กรณีรับแรงดัด



รูปที่ 5.7 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{1,t}^w$  กรณีรับแรงดึง



รูปที่ 5.8 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{1,b}^w$  กรณีรับแรงดัด



รูปที่ 5.9 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{1(t,b)}^{f,w}$

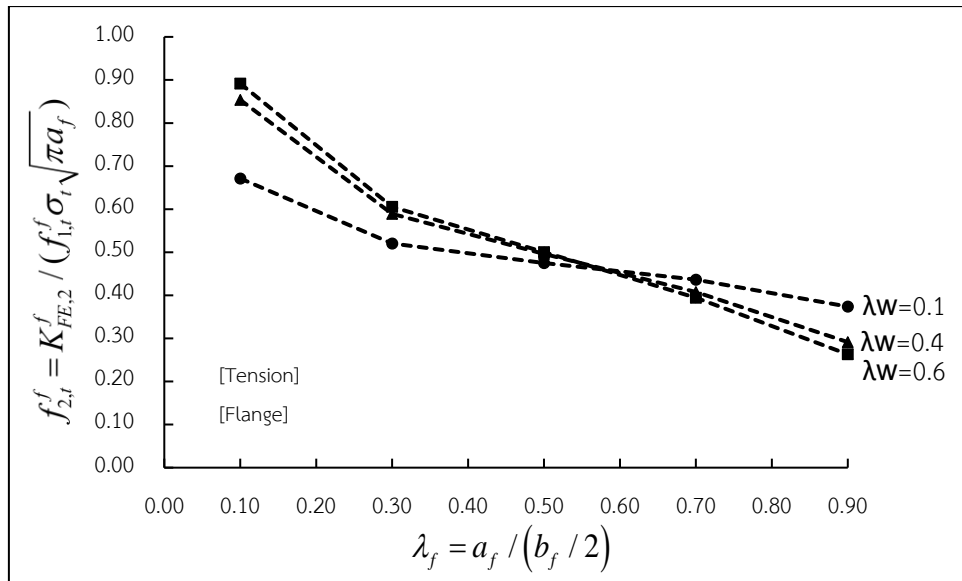
## 5.2 ผลกระทบของวัสดุแผ่นปะ

### 5.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) และเอว ( $\lambda_w$ ) ต่อ $f_2$

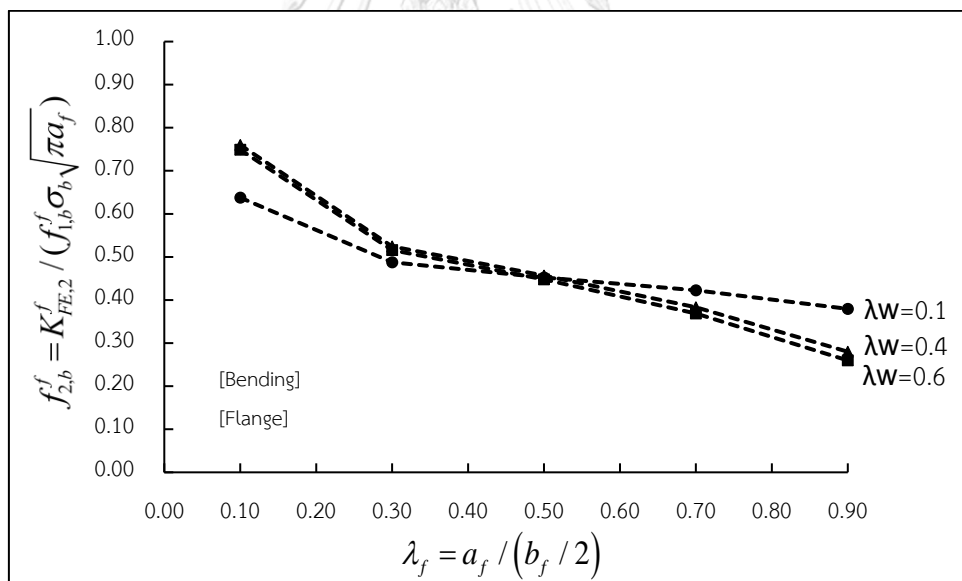
รูปที่ 5.10 และ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_2^f$  ที่ปีก และอัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่ปีก  $\lambda_f$  เมื่ออัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่เอว  $\lambda_w$  สูงขึ้น ภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด พบว่าค่า  $f_2^f$  ที่ปีก เมื่อรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) และเอว ( $\lambda_w$ ) เติบโตมากขึ้นค่า  $f_{2,t}^f$  จะมีค่าสูงกว่า  $f_{2,b}^f$  เพียงเล็กน้อย โดยค่า  $f_{2,t}^f$  และ  $f_{2,b}^f$  มีค่าสูงสุดเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) อยู่ในช่วงเริ่มต้นเท่ากับ 0.1 และรอยร้าวที่เอว ( $\lambda_w$ ) เท่ากับ 0.6 และค่า  $f_{2(t,b)}^f$  จะมีค่าลดลงเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) และเอว ( $\lambda_w$ ) มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ

รูปที่ 5.12 และ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_2^w$  ที่เอว และอัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่ปีก  $\lambda_f$  เมื่ออัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่เอว  $\lambda_w$  สูงขึ้น ภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด พบว่าค่า  $f_2^w$  ที่เอว เมื่อรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) และเอว ( $\lambda_w$ ) เติบโตมากขึ้นค่า  $f_{2,t}^w$  จะมีค่าสูงกว่า  $f_{2,b}^w$  โดยค่า  $f_{2,t}^w$  และ  $f_{2,b}^w$  มีค่าสูงสุดเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) อยู่ในช่วงเริ่มต้นเท่ากับ 0.1 และรอยร้าวที่เอว ( $\lambda_w$ ) เท่ากับ 0.6 และค่า  $f_{2(t,b)}^w$  จะมีค่าลดลงเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) และเอว ( $\lambda_w$ ) มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ

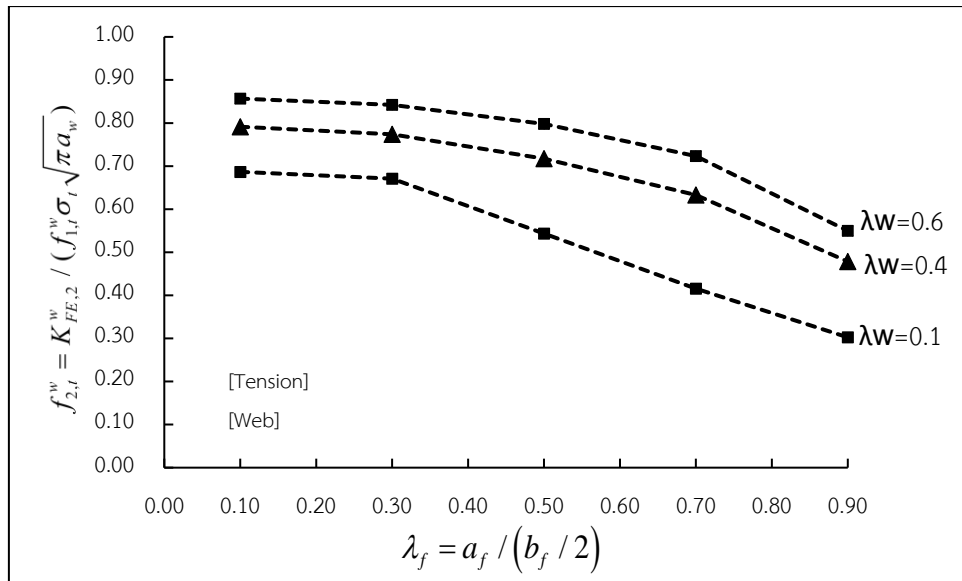
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_2$  และอัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่ปีก  $\lambda_f$  เมื่ออัตราส่วนความยาวรอยร้าวที่เอว  $\lambda_w$  สูงขึ้น ทั้งที่ปีกและเอว และกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด สรุปได้ว่าค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{2,t}^f$  ที่ปีก กรณีรับแรงดึง มีค่าสูงกว่า  $f_{2,b}^f$  ที่ปีก กรณีรับแรงดัด เล็กน้อย โดยค่า  $f_{2,t}^f$  และ  $f_{2,b}^f$  มีค่าสูงขึ้นเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่ปีกอยู่ในช่วงเริ่มต้นและในขณะที่การเติบโตของรอยร้าวที่เอวมีค่าเพิ่มมากขึ้น และค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{1,t}^w$  ที่เอว กรณีรับแรงดึง มีค่าสูงกว่า  $f_{2,b}^w$  ที่เอว กรณีรับแรงดัด โดยค่า  $f_{1,t}^w$  มีน้อยลงเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่เอวมีค่าน้อยลง และค่า  $f_{1,b}^w$  มีน้อยลงเมื่อการเติบโตของรอยร้าวที่เอวมีค่าสูงขึ้น



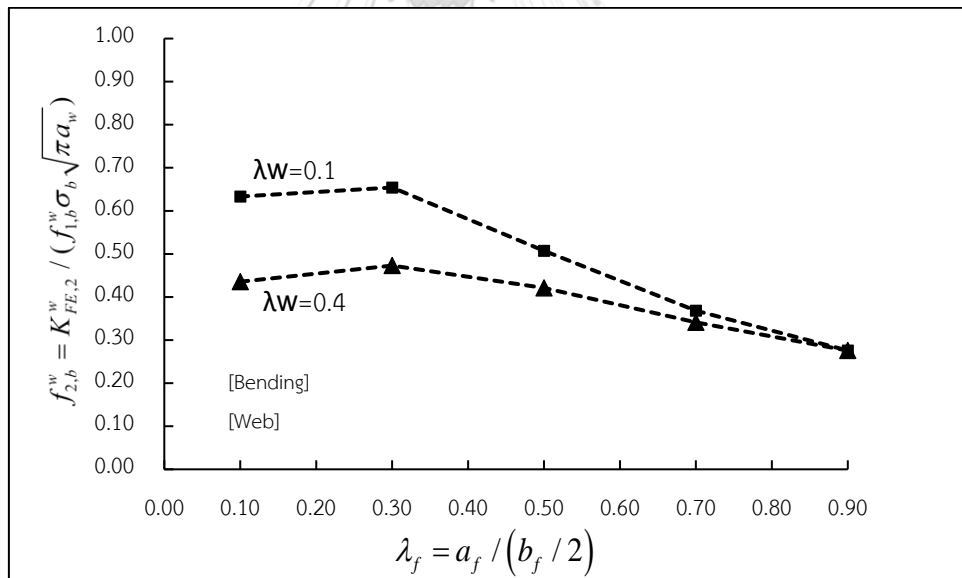
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{2,t}^f$  และ  $\lambda_w$  เมื่อคานเหล็กขนาด W530x150 เมื่อ  $E_p = 460$  GPa,  $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{2,b}^f$  และ  $\lambda_w$  เมื่อคานเหล็กขนาด W530x150 เมื่อ  $E_p = 460$  GPa,  $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{2,t}^w$  และ  $\lambda_w$  เมื่อคานเหล็กขนาด W530x150 เมื่อ  $E_p = 460$  GPa,  $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $f_{2,b}^w$  และ  $\lambda_w$  เมื่อคานเหล็กขนาด W530x150 เมื่อ  $E_p = 460$  GPa,  $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm

### 5.2.2 ผลกระทบของมิติของคานเหล็ก ( $\beta, \gamma$ ) ต่อ $f_2$

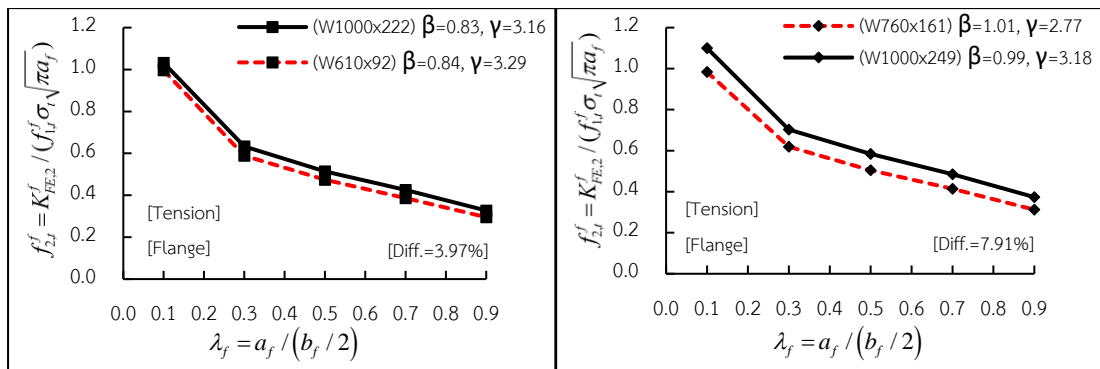
จากตารางที่ 4.1 ทางผู้วิจัยได้เลือกจับคู่ขนาดเหล็กที่มีค่า  $\beta$  ที่ใกล้เคียงกันมาทั้งหมด 3 คู่ กรณี  $f_{2(t,b)}^f$  ที่ปีก และ กรณี  $f_{2(t,b)}^w$  ที่เอว ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{2(t,b)}^{f,w}$  ต่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอว  $\beta = A_f / A_w$  และอัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก  $\gamma = d_j / b_f$  ว่ามีผลกระทบมากน้อยเพียงใดโดยสรุปได้ดังนี้

จากรูปที่ 5.14 ถึง 5.17 พบว่าค่า  $\beta$  มีผลกระทบต่อค่า  $f_{2,t}^f$  (กรณีรับแรงดึง) หรือ  $f_{2,b}^f$  (กรณีรับแรงดัด) ที่ปีกลดลงเฉลี่ย 6% และ 5% เมื่อเทียบกับค่า  $\beta = 1.24$  กับค่า  $\beta = 0.83$  ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่า  $f_{2(t,b)}^f$  ที่ปีกจะลดลงเมื่อค่า  $\beta$  มีค่าสูงขึ้นตามรูปที่ 5.14 และ 5.15 และในขณะที่ค่า  $\beta$  มีผลกระทบต่อค่า  $f_{2,t}^w$  (กรณีรับแรงดึง) หรือ  $f_{2,b}^w$  (กรณีรับแรงดัด) ที่เอวลดลงเฉลี่ย 3% และ 2% เมื่อเทียบกับค่า  $\beta = 1.24$  กับค่า  $\beta = 0.83$  ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่า  $\beta$  มีผลกระทบต่อค่า  $f_2^w$  ที่เอวเล็กน้อยทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด ตามรูปที่ 5.16 และ 5.17

และสุดท้ายจากรูปที่ 5.14 ถึง 5.17 พบว่าค่า  $\gamma$  มีผลกระทบต่อค่า  $f_{2(t,b)}^{f,w}$  ที่ปีกหรือเอว ทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด อยู่ที่ 4% ถึง 14% เมื่อเปรียบเทียบกับค่า  $\beta$  ที่เท่ากันแต่ค่า  $\gamma$  ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่า  $\gamma$  มีผลกระทบสูงกว่าค่า  $\beta$  เมื่อมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

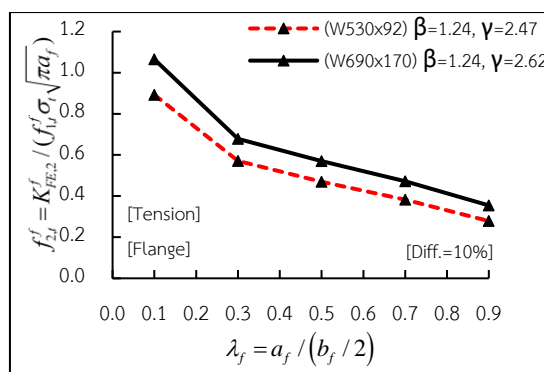
จึงสรุปได้ว่าค่า  $\beta$  ส่งผลกระทบต่อค่า  $f_1^{f,w}$  มากกว่าค่า  $f_2^{f,w}$  และในทางกลับกันค่า  $\gamma$  ส่งผลกระทบต่อค่า  $f_2^{f,w}$  มากกว่าค่า  $f_1^{f,w}$  ทั้งที่ปีกและเอวภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด





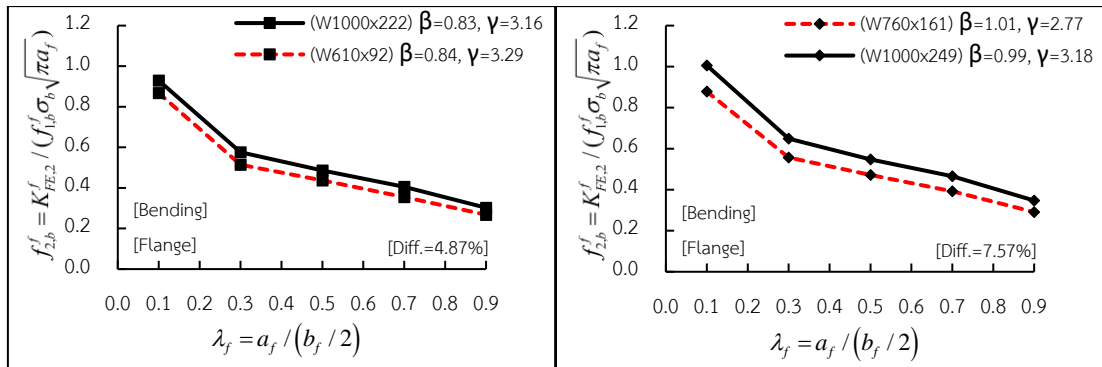
(ก)

(ข)



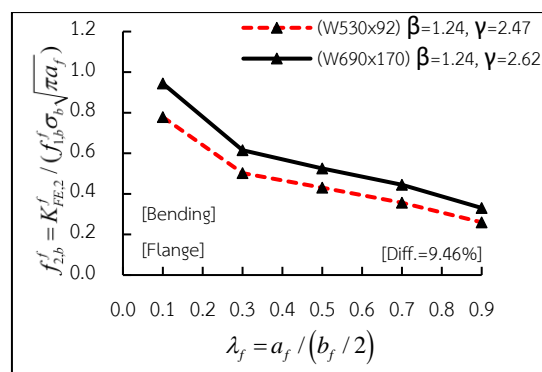
(ค)

รูปที่ 5.14 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{2,t}^f$  กรณีรับแรงดึงเมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ ,  $E_p = 460$  GPa,  $t_p = 4.8$  mm,  $E_d = 11200$  MPa และ  $t_d = 1.0$  mm



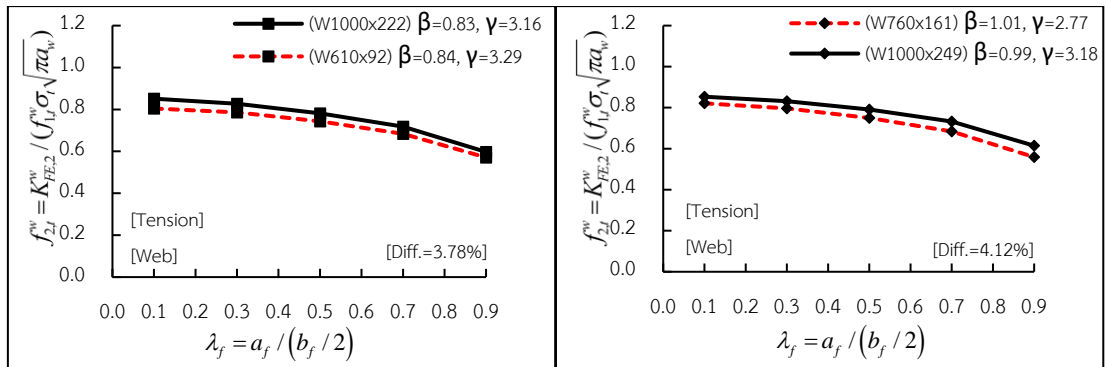
(ก)

(ข)



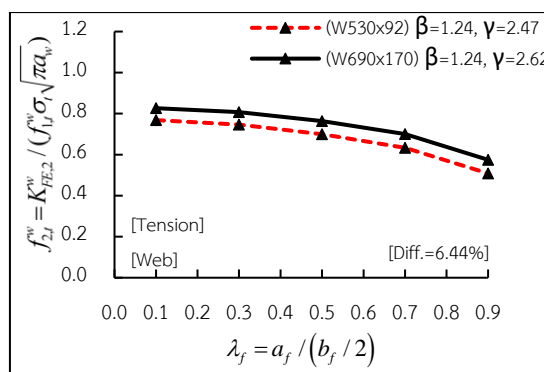
(ค)

รูปที่ 5.15 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{2,b}^f$  กรณีรับแรงดัดเมื่อ  $\lambda_w=0.4$ ,  $E_p=460$  GPa,  $t_p=4.8$  mm,  $E_d=11200$  MPa และ  $t_d=1.0$  mm



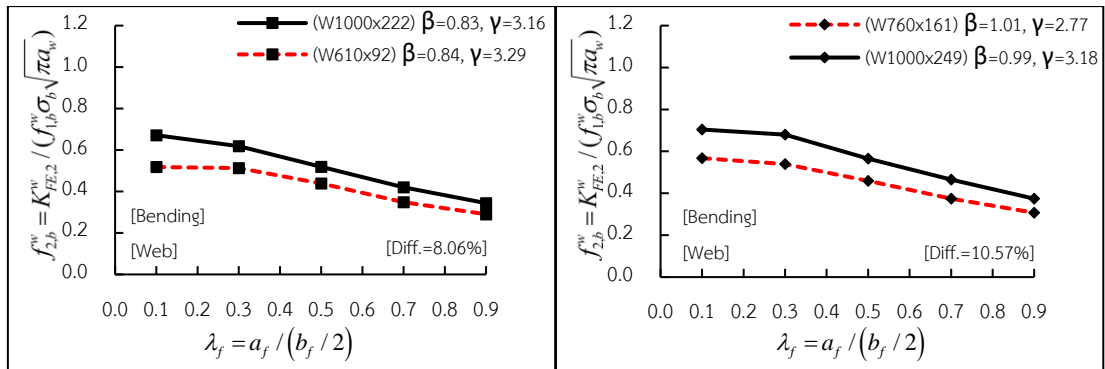
(ก)

(ข)



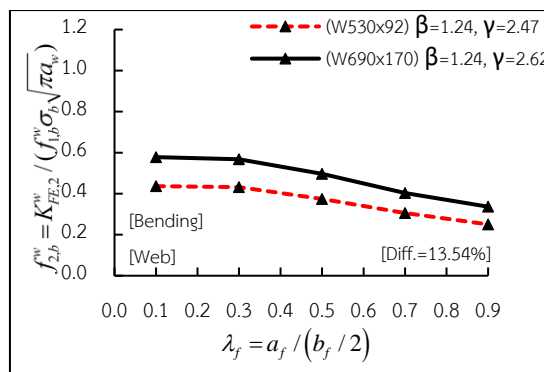
(ค)

รูปที่ 5.16 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{2,t}^w$  กรณีรับแรงดึงเมื่อ  $\lambda_w=0.4$ ,  $E_p=460$  GPa,  $t_p=4.8$  mm,  $E_d=11200$  MPa และ  $t_d=1.0$  mm



(ก)

(ข)



(ค)

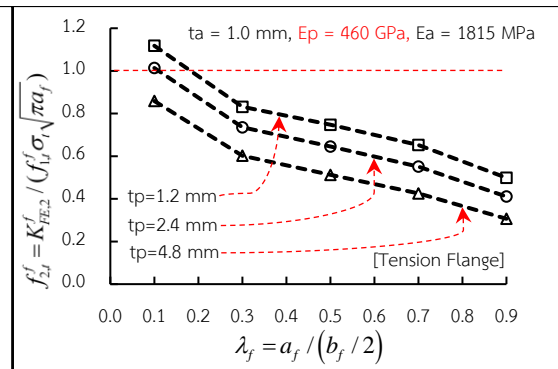
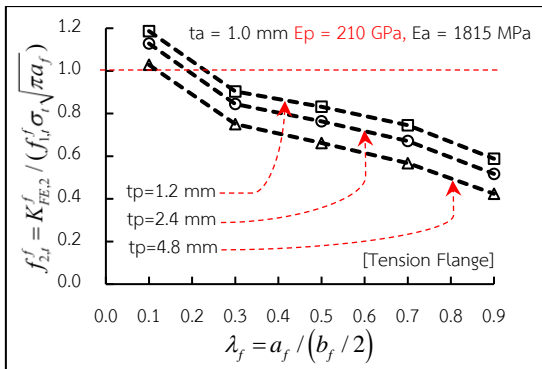
รูปที่ 5.17 ผลกระทบของมิติคานเหล็กต่อ  $f_{2,b}^w$  กรณีรับแรงดัดเมื่อ  $\lambda_w = 0.4$ ,  $E_p = 460$  GPa,  $t_p = 4.8$  mm,  $E_a = 11200$  MPa และ  $t_a = 1.0$  mm

### 5.2.3 ผลกระทบของตัวแปร ( $t_p$ , $E_p$ ) แผ่นปะต่อค่าตัวประกอบปรับแก้ $f_2^f$

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ต่ออัตราส่วนความยาวรอยร้าวในปีก ( $\lambda_f$ ) เมื่อมีความหนาและคุณสมบัติที่ของวัสดุที่นำมาซ่อมแซมที่เปลี่ยนแปลง ทั้งที่ปีกและเอวภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด แต่ค่า  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ที่แสดงในรูปทั้งหมดในหัวข้อนี้นั้นจะสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการช่วยลดค่าความเข้มของความเค้น (SIF) ที่ปลายรอยร้าวได้มากน้อยเพียง เมื่อ  $f_{2,(t,b)}^{f,w} > 1.0$  แสดงว่าการเลือกใช้ความหนาและคุณสมบัติที่ของวัสดุที่นำมาซ่อมแซมรอยร้าวนั้นไม่ได้ช่วยให้ค่า SIF ที่ปลายรอยร้าวลดลง แต่ถ้า  $f_{2,(t,b)}^{f,w} < 1.0$  แสดงว่าการเลือกใช้ความหนาและคุณสมบัติที่ของวัสดุที่นำมาซ่อมแซมด้วยแผ่นปะนั้นจะช่วยให้ค่า SIF ที่ปลายรอยร้าวลดลงและชะลอการเติบโตของรอยร้าวอย่างมีประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างเช่นเมื่อ ค่า  $f_{2,(t,b)}^{f,w} = 0.8$  หมายความว่าเมื่อมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะจะช่วยลดค่า SIF ที่ปลายรอยร้าวลง 20% เมื่อเทียบกับคานเหล็กที่ยังไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

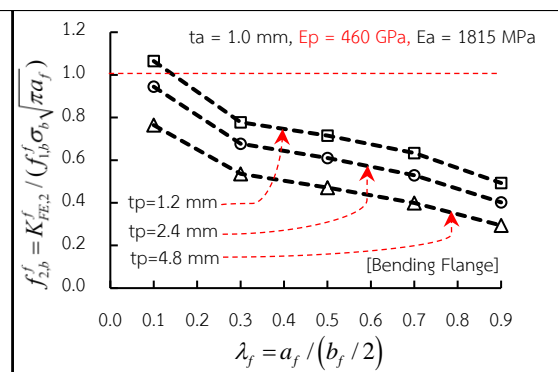
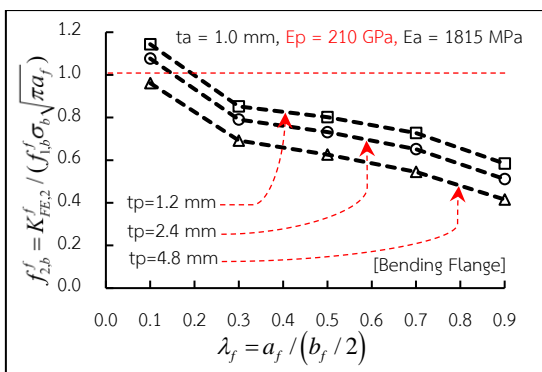
รูปที่ 5.18 และ 5.19 แสดงผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ที่ปีกและเอวต่อค่า  $\lambda_f$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด เมื่อค่าความหนาของแผ่นปะ  $t_p$  มีค่าเท่ากับ 1.2, 2.4 และ 4.8 mm พบว่าค่า  $f_{2,t}^f$  มีค่าเฉลี่ยลดลงทุกๆ 10% เมื่อเทียบกับค่า  $t_p$  ที่มากขึ้นตามลำดับ โดยค่ามอดุลัสของแผ่นปะ  $E_p = 210$  GPa และค่า  $f_{2,t}^f$  มีค่าเฉลี่ยลดลงทุกๆ 15% เมื่อเทียบกับค่า  $t_p$  ที่มากขึ้นตามลำดับ โดยค่ามอดุลัสของแผ่นปะ  $E_p = 460$  GPa ทั้งกรณีรับแรงดึงและดัด ในขณะเดียวกันผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ที่ปีกและเอวต่อค่า  $\lambda_f$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด เมื่อค่ามอดุลัสของแผ่นปะเพิ่มขึ้น  $E_p = 210, 300$  และ 460 GPa ตามรูปที่ 5.20 และ 5.21 พบว่า  $f_{2,t}^{f,w}$  ที่ปีกและที่เอวมีค่าเฉลี่ยลดลงทุกๆ 3 ถึง 8% และ 10 ถึง 13% เมื่อเทียบกับค่า  $E_p$  ที่มากขึ้นตามลำดับโดยความหนาของแผ่นปะ  $t_p = 1.2$  และ 4.8 mm ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาของวัสดุแผ่นปะที่บาง  $t_p = 1.2$  จะทำให้ค่า  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  สูงเกิน 1.0 เมื่อ  $\lambda_f$  อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 และจะต่ำกว่า 1.0 เมื่อ  $\lambda_f$  เกิน 0.2 จึงสรุปได้ว่าเมื่อความหนาของวัสดุแผ่นปะบางมากไม่ควรมานำไปใช้ในการซ่อมแซมรอยร้าว เนื่องจากการนำวัสดุแผ่นปะที่บาง นำไปใช้ในการซ่อมแซมรอยร้าวของคานเหล็กจะทำให้ค่า SIF สูงขึ้นที่ปลายรอยร้าวที่ปีกเมื่ออัตราส่วนรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) อยู่ในช่วงเริ่มต้น แต่สามารถที่จะแก้ไขได้โดยใช้ความหนาของวัสดุแผ่นปะที่หนาขึ้นจะช่วยให้ค่า  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  น้อยกว่า 1.0 ได้ เมื่อ  $\lambda_f$  อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 ตามรูปที่ 5.18 และ 5.19 ดังนั้นความหนา  $t_p$  ของวัสดุแผ่นปะนั้นมีผลกระทบต่อค่า  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ที่สูงมากและในขณะที่ค่ามอดุลัสของวัสดุแผ่นปะ  $E_p$  นั้นสูงขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ได้ดีขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุแผ่นปะเท่าเดิม



(ก) กรณีรับแรงดึงที่ปีกเมื่อ  $E_p = 210$  GPa

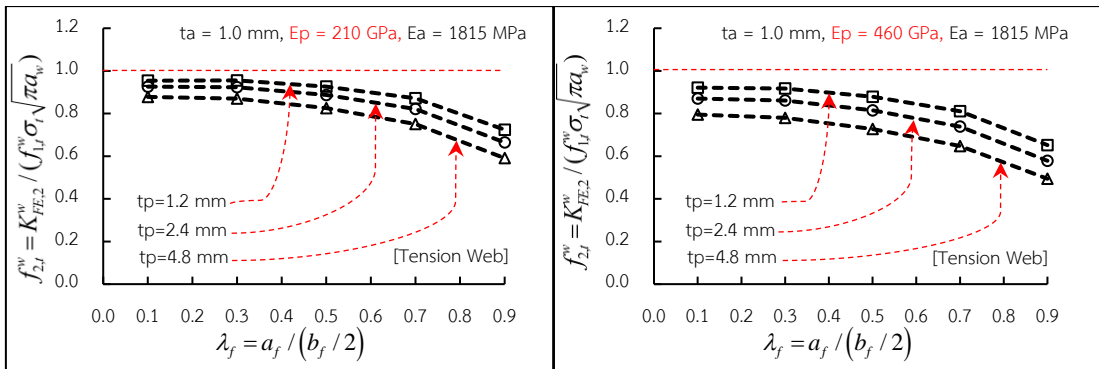
(ข) กรณีรับแรงดึงที่ปีกเมื่อ  $E_p = 460$  GPa



(ค) กรณีรับแรงดัดที่ปีกเมื่อ  $E_p = 210$  GPa

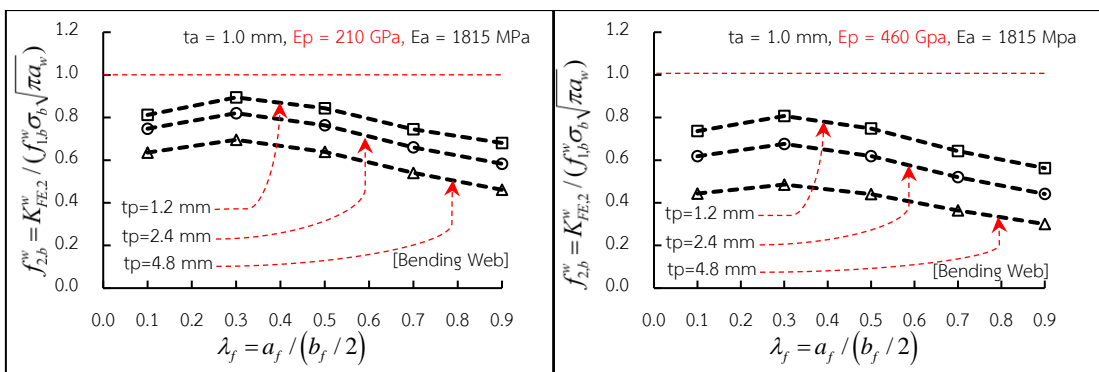
(ง) กรณีรับแรงดัดที่ปีกเมื่อ  $E_p = 460$  GPa

รูปที่ 5.18 ผลกระทบของแผ่นปะต่อ  $f_{2(t,b)}^f$  เมื่อ  $t_p = 1.2, 2.4$  และ  $4.8$  mm โดยคานเหล็กขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด



(ก) กรณีรับแรงดึงที่เอวเมื่อ  $E_p = 210$  GPa

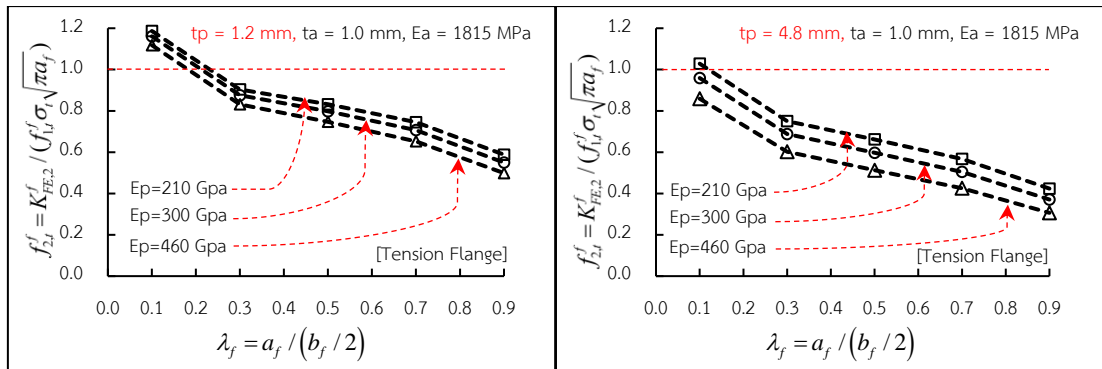
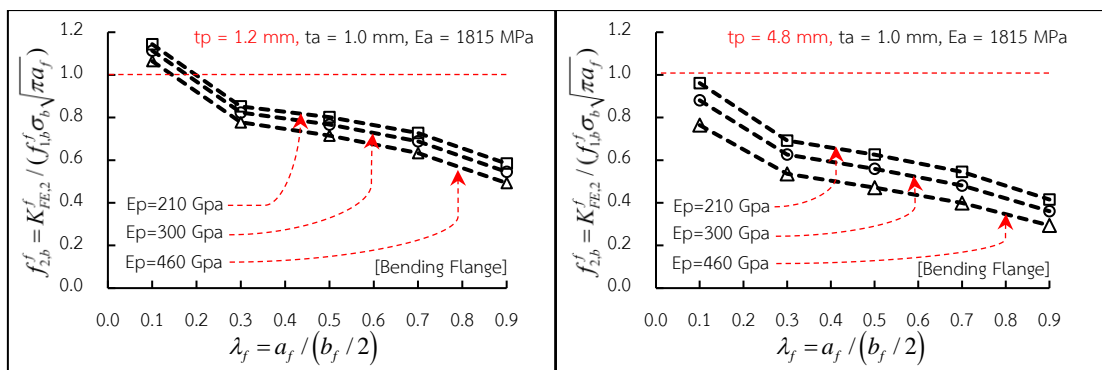
(ข) กรณีรับแรงดึงที่เอวเมื่อ  $E_p = 460$  GPa



(ค) กรณีรับแรงดัดที่เอวเมื่อ  $E_p = 210$  GPa

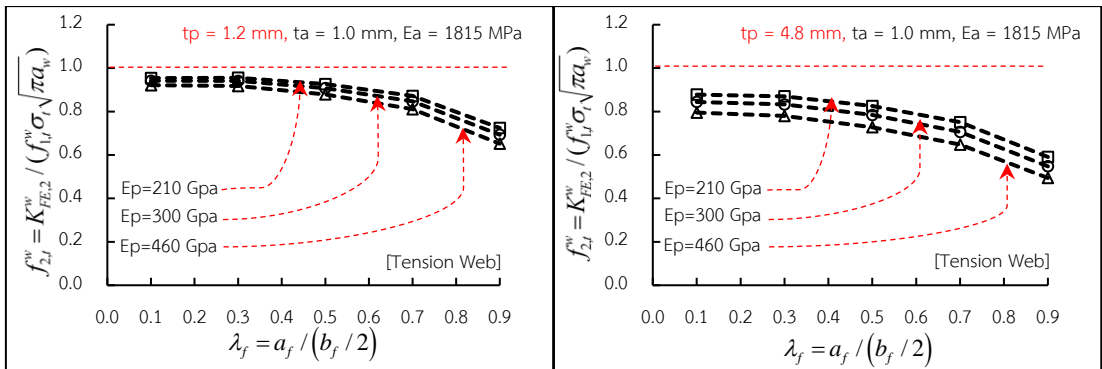
(ง) กรณีรับแรงดัดที่เอวเมื่อ  $E_p = 460$  GPa

รูปที่ 5.19 ผลกระทบของแผ่นปะต่อ  $f_{2(t,b)}^w$  เมื่อ  $t_p = 1.2, 2.4$  และ  $4.8$  mm โดยคานเหล็กขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด

(ก) กรณีรับแรงดึงที่ปีกเมื่อ  $t_p = 1.2$  มม.(ข) กรณีรับแรงดึงที่ปีกเมื่อ  $t_p = 4.8$  มม.(ค) กรณีรับแรงดัดที่ปีกเมื่อ  $t_p = 1.2$  มม.(ง) กรณีรับแรงดัดที่ปีกเมื่อ  $t_p = 4.8$  มม.

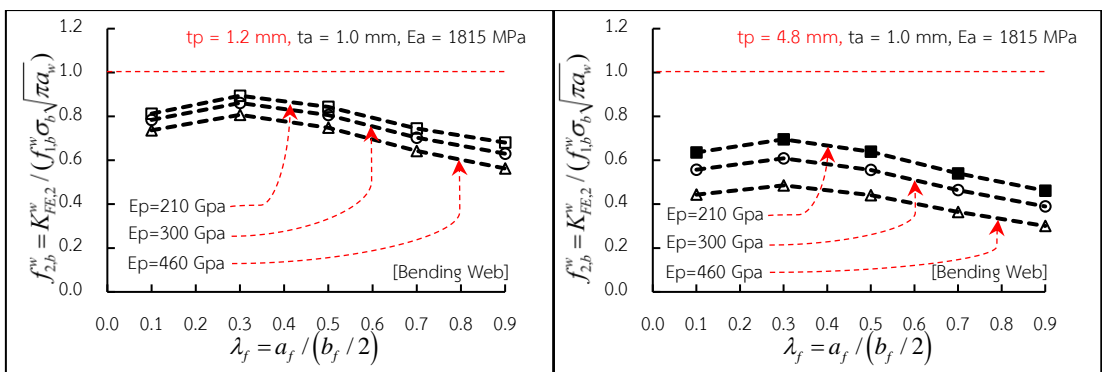
รูปที่ 5.20 ผลกระทบของแผ่นปะต่อ  $f_{2(t,b)}^f$  เมื่อ  $E_p = 210, 300$  และ  $460$  GPa โดยคานเหล็กขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด





(ก) กรณีรับแรงดึงที่เอวเมื่อ  $t_p = 1.2$  มม.

(ข) กรณีรับแรงดึงที่เอวเมื่อ  $t_p = 4.8$  มม.



(ค) กรณีรับแรงดัดที่เอวเมื่อ  $t_p = 1.2$  มม.

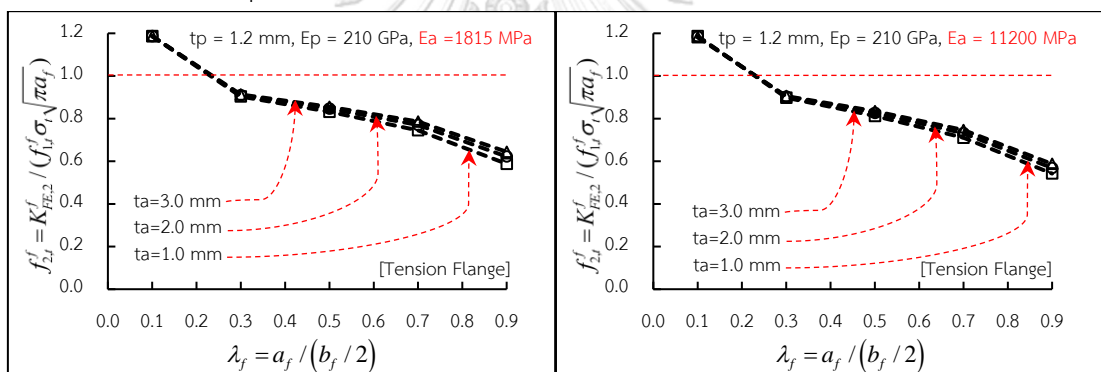
(ง) กรณีรับแรงดัดที่เอวเมื่อ  $t_p = 4.8$  มม.

รูปที่ 5.21 ผลกระทบของแผ่นปะต่อ  $f_{2(t,b)}^w$  เมื่อ  $E_p = 210, 300$  และ  $460$  GPa โดยคานเหล็กขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด

### 5.2.4 ผลกระทบของตัวแปร ( $t_a, E_a$ ) ชั้นกาวต่อค่าตัวประกอบปรับแก้ $f_2$

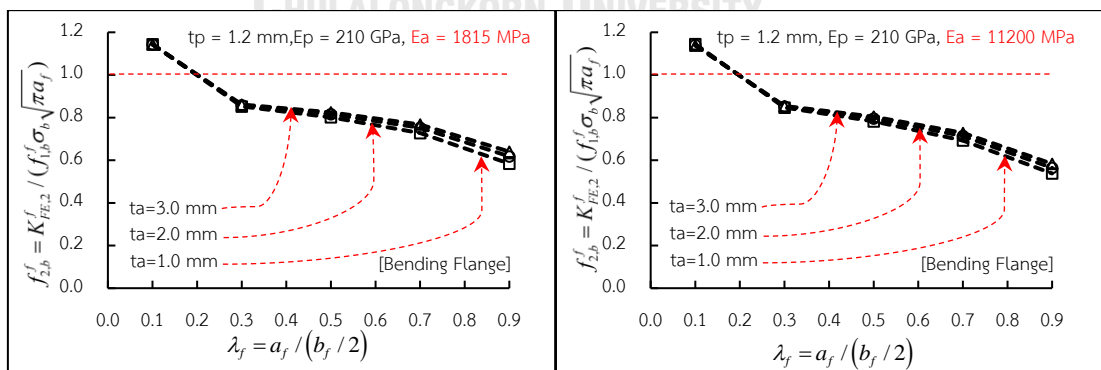
รูปที่ 5.22 และ 5.23 แสดงผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ที่ปีกและเอวต่อค่า  $\lambda_f$  ทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัดตามลำดับ เมื่อค่าความหนาของชั้นกาว  $t_a$  มีค่าเท่ากับ 1.0, 2.0 และ 3.0 mm พบว่าค่า  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  มีค่าเฉลี่ยลดลงทุกๆ 1.5% เมื่อเทียบกับค่า  $t_a$  ที่น้อยลงตามลำดับ โดยค่ามอดุลัสของแผ่นปะ  $E_a = 1815$  และ 11200 MPa ทั้งกรณีรับแรงดึงและดัด ในขณะเดียวกันผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ที่ปีกและเอวต่อค่า  $\lambda_f$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด เมื่อค่ามอดุลัสของชั้นกาวมีค่า 1815 2944 และ 11200 MPa ตามรูปที่ 5.24 และ 5.25 พบว่า  $f_{2,t}^{f,w}$  ที่ปีกและที่เอวมีค่าเฉลี่ยลดลงทุกๆ 2 ถึง 4% เมื่อเทียบกับค่า  $E_a$  ที่มากขึ้นตามลำดับ

จากผลวิเคราะห์สรุปได้ว่าผลกระทบของค่า  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ที่ปีกและเอวต่อค่า  $\lambda_f$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด เมื่อค่าความหนาของชั้นกาว  $t_a = 1.0, 2.0$  และ 3.0 mm และค่ามอดุลัสของชั้นกาว  $E_a = 1815, 2944$  และ 11200 MPa มีผลกระทบต่อค่า  $f_{2,(t,b)}^{f,w}$  ที่ต่ำมากทุกกรณี ไม่ว่าจะปรับความหนาของชั้นกาวหรือค่ามอดุลัสของชั้นกาวเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม



(ก) กรณีรับแรงดึงที่ปีกเมื่อ  $E_a = 1815$  MPa

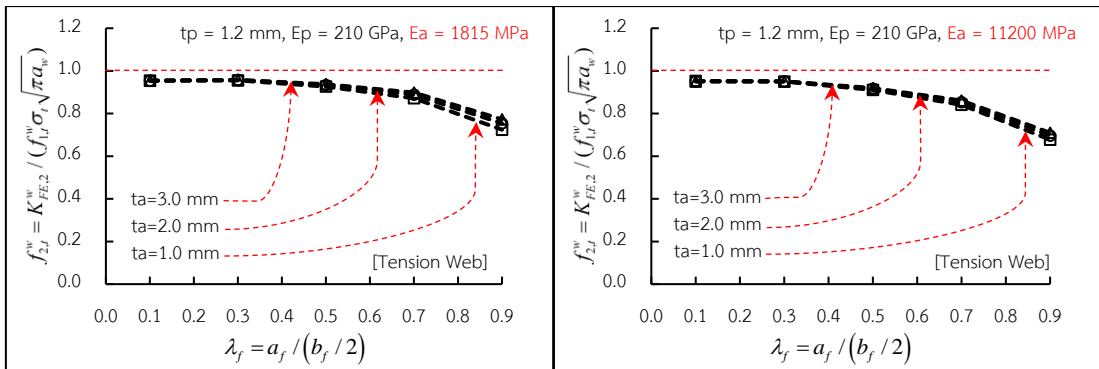
(ข) กรณีรับแรงดึงที่ปีกเมื่อ  $E_a = 11200$  MPa



(ค) กรณีรับแรงดัดที่ปีกเมื่อ  $E_a = 1815$  MPa

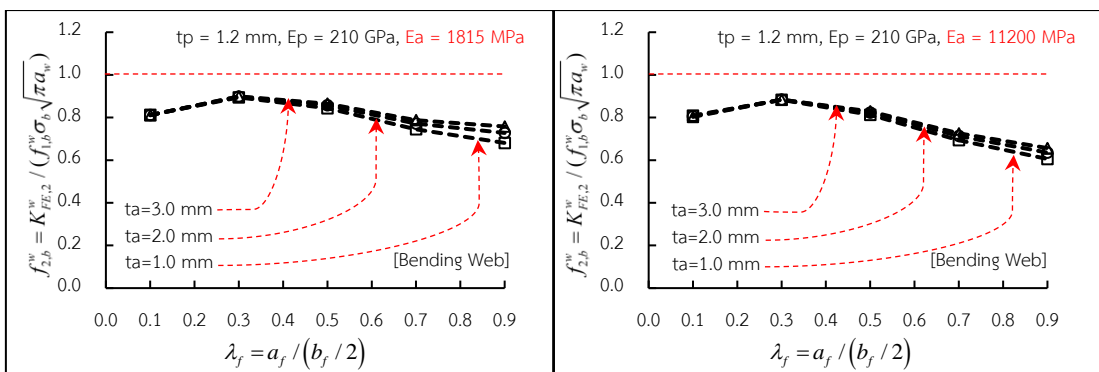
(ง) กรณีรับแรงดัดที่ปีกเมื่อ  $E_a = 11200$  MPa

รูปที่ 5.22 ผลกระทบของชั้นกาวต่อ  $f_{2,(t,b)}^f$  เมื่อ  $t_a = 1.0, 2.0$  และ 3.0 mm โดยคานเหล็กขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด



(ก) กรณีรับแรงดึงที่เอวเมื่อ  $E_a = 1815$  MPa

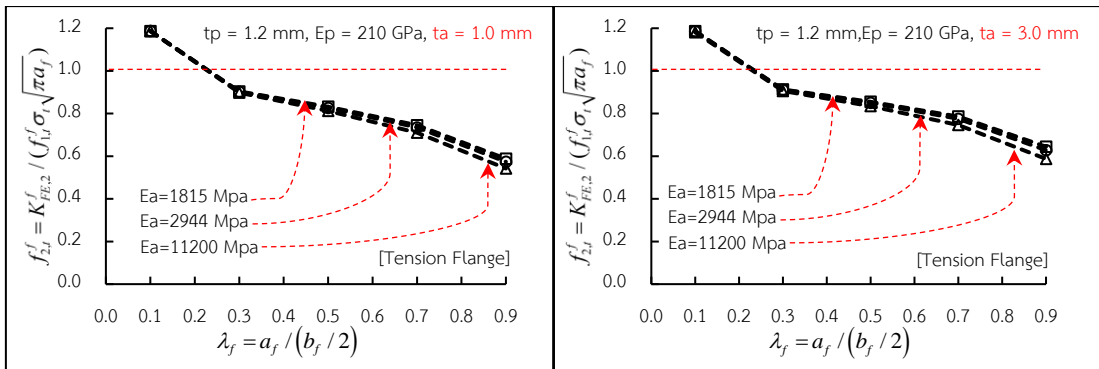
(ข) กรณีรับแรงดึงที่เอวเมื่อ  $E_a = 11200$  MPa



(ค) กรณีรับแรงดัดที่เอวเมื่อ  $E_a = 1815$  MPa

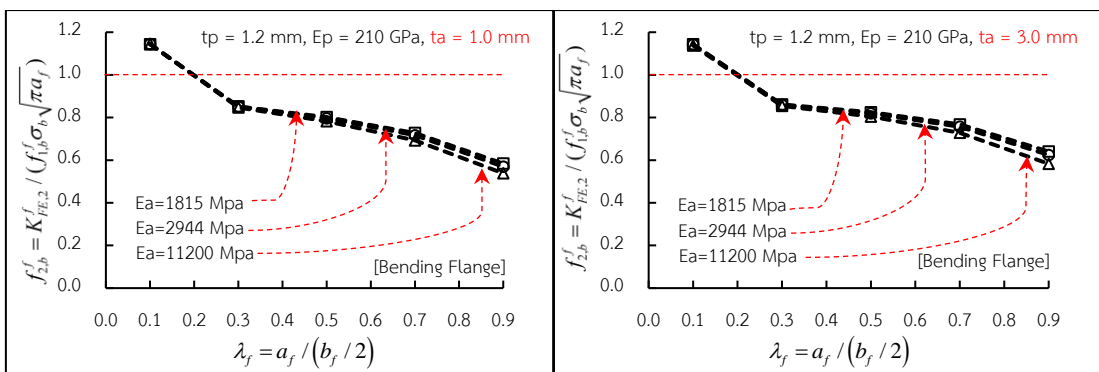
(ง) กรณีรับแรงดัดที่เอวเมื่อ  $E_a = 11200$  MPa

รูปที่ 5.23 ผลกระทบของชั้นกาวต่อ  $f_{2(t,b)}^w$  เมื่อ  $t_a = 1.0, 2.0$  และ  $3.0$  mm โดยคานเหล็กขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด



(ก) กรณีรับแรงดึงที่ปีกเมื่อ  $t_a = 1.0$  มม.

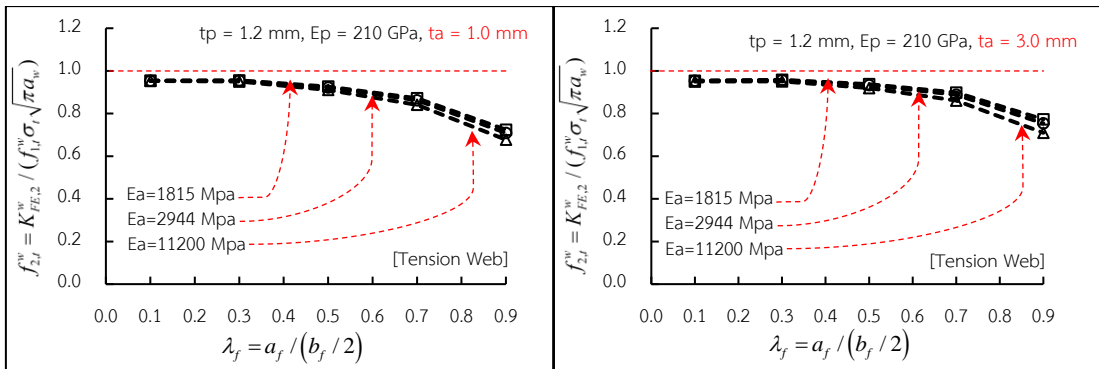
(ข) กรณีรับแรงดึงที่ปีกเมื่อ  $t_a = 3.0$  มม.



(ค) กรณีรับแรงดัดที่ปีกเมื่อ  $t_a = 1.0$  มม.

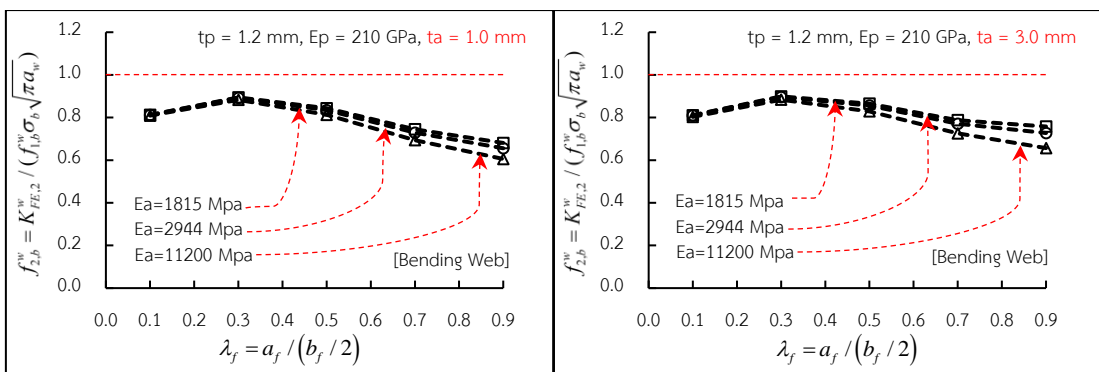
(ง) กรณีรับแรงดัดที่ปีกเมื่อ  $t_a = 3.0$  มม.

รูปที่ 5.24 ผลกระทบของชั้นกาวต่อ  $f_{2(t,b)}^f$  เมื่อ  $E_a = 1815, 2944$  และ  $11200$  MPa โดยคานเหล็ก ขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด



(ก) กรณีรับแรงดึงที่เอวเมื่อ  $t_a = 1.0$  มม.

(ข) กรณีรับแรงดึงที่เอวเมื่อ  $t_a = 3.0$  มม.



(ค) กรณีรับแรงดัดที่เอวเมื่อ  $t_a = 1.0$  มม.

(ง) กรณีรับแรงดัดที่เอวเมื่อ  $t_a = 3.0$  มม.

รูปที่ 5.25 ผลกระทบของชั้นกาวต่อ  $f_{2(t,b)}^w$  เมื่อ  $E_a = 1815, 2944$  และ  $11200$  MPa โดยคานเหล็ก ขนาด W530x150 และ  $\lambda_w = 0.4$  ทั้งกรณีรับแรงดึงและแรงดัด

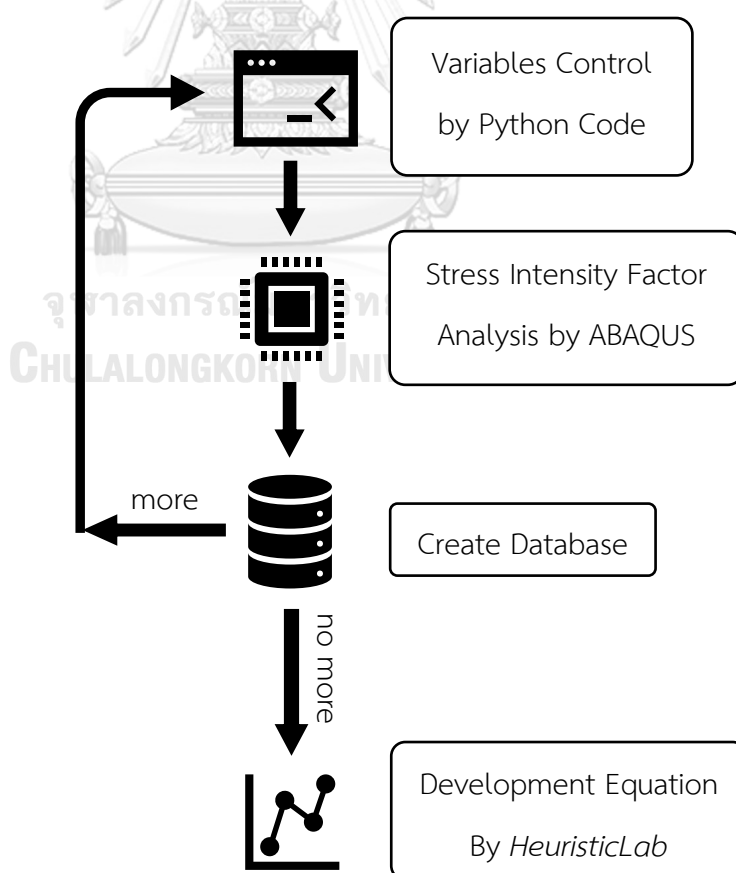
## บทที่ 6

### การพัฒนาสมการทำนาย SIF ด้วย *HeuristicLab*

บทที่ 6 จะกล่าวถึงขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลและนำข้อมูลทั้งหมดกำหนดขั้นตอนการพัฒนาสมการซึ่งในสุดท้ายจะทราบถึงผลกระทบของตัวแปรในสมการและเลือกสมการตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้

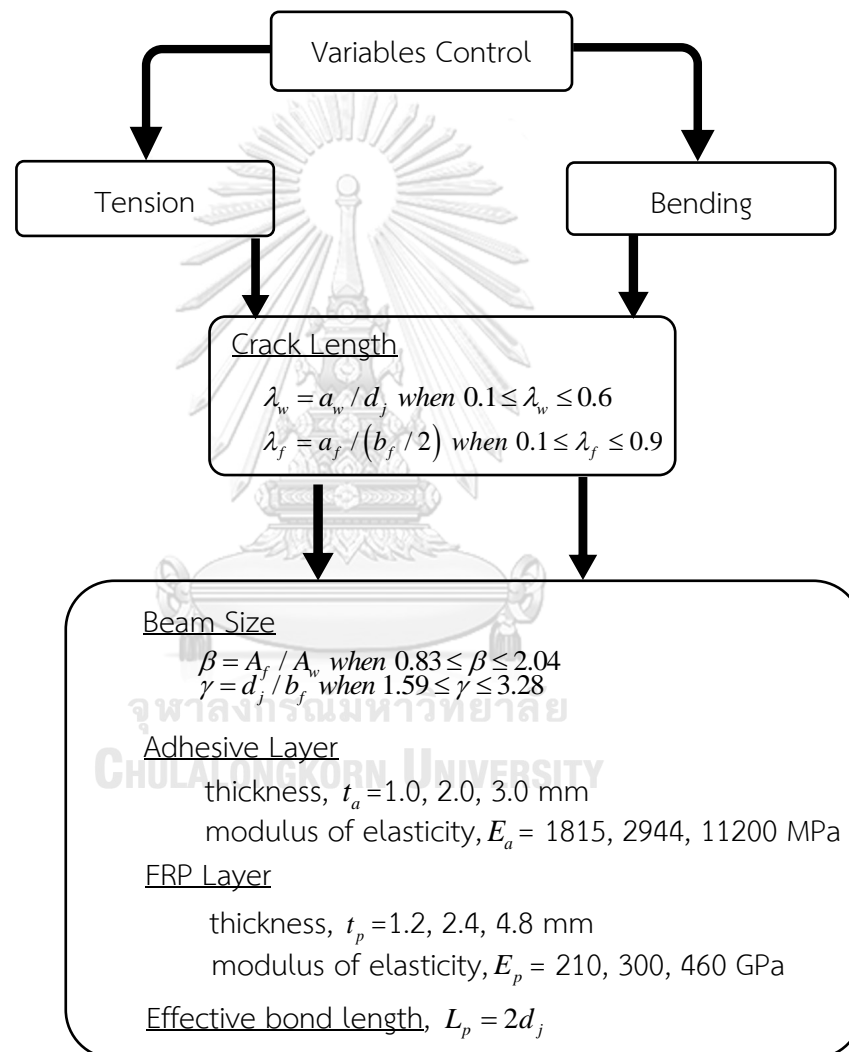
#### 6.1 การสร้างฐานข้อมูล

รูปที่ 6.1 อธิบายขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลโดยเริ่มต้นจากการวางแผนกำหนดขอบเขตของตัวแปรที่สนใจได้แก่ ขนาดคานเหล็ก ความยาวรอยร้าว และคุณสมบัติของวัสดุต่างๆเป็นต้น เมื่อกำหนดขอบเขตของตัวแปรที่จะทำการศึกษาเราก็จะทราบถึงจำนวนครั้งที่ต้องทำการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโดยใช้โปรแกรม ABAQUS ต่อมาก็จะทำการบันทึกข้อมูลผลวิเคราะห์และทำซ้ำไปจนกว่าจะครบตามแผนที่วางไว้ เมื่อบันทึกข้อมูลได้ครบทั้งหมดแล้วจะเป็นการนำข้อมูลที่บันทึกไปใช้ในการพัฒนาสมการโดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรม *HeuristicLab*



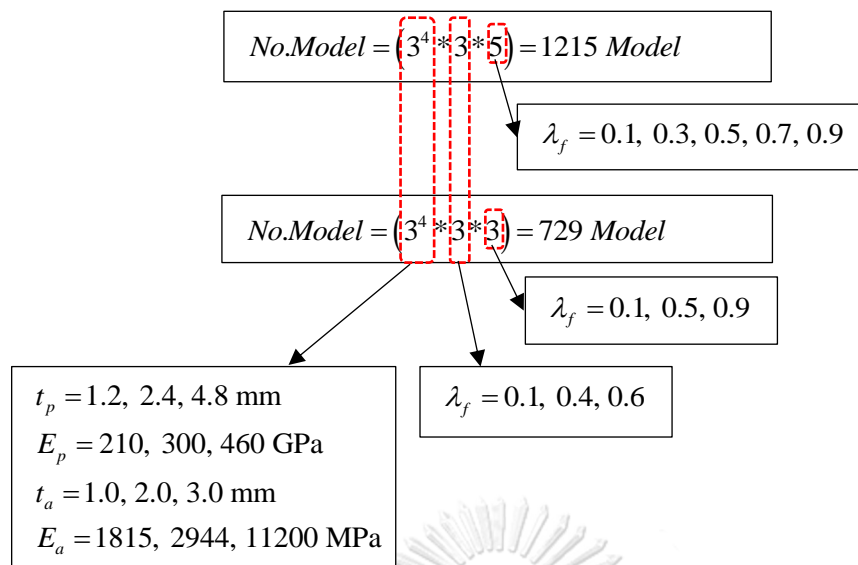
รูปที่ 6.1 แผนภาพกระบวนการพัฒนาสมการ

รูปที่ 6.2 อธิบายถึงขอบเขตการควบคุมตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิจัยโดยแบ่งกรณีออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆคือ กรณีรับแรงดึง และกรณีรับแรงดัด ซึ่งทั้งสองกลุ่มนี้ได้ถูกกำหนดช่วงของอัตราส่วนความยาวรอยร้าวปีกและเอวที่ดังรูปที่ 6.2 และ ขนาดคานเหล็ก ความหนาของชั้นกาว คุณสมบัติของชั้นกาว ความหนาของวัสดุแผ่นปะ คุณสมบัติของวัสดุแผ่นปะ และระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของวัสดุซ่อมแซมยังคงใช้เหมือนกันทั้งสองกรณี เมื่อตัวแปรคงที่อื่นๆเช่นมอดุลัสของคานเหล็กและอัตราส่วนปีกของ ฯลฯ สามารถดูได้เพิ่มเติมตามตารางที่ 4.1



รูปที่ 6.2 แผนภาพการควบคุมตัวแปร

ซึ่งผู้วิจัยได้วางแผนในการสร้างฐานข้อมูลไว้ทั้งหมด 43,740 ข้อมูลโดยแบ่งออกเป็นกรณีรับแรงดึง ที่ปีก 10,935 ข้อมูล ที่เอว 10,935 ข้อมูล และกรณีรับแรงดัด ที่ปีก 10,935 ข้อมูล ที่เอว 10,935 ข้อมูล จากการสร้างแบบจำลองทั้งหมด 21,870 ครั้ง ตามตารางที่ 6.1 ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณจำนวนการสร้างแบบจำลอง ได้แสดงไว้ที่รูป 6.3



รูปที่ 6.3 การคำนวณจำนวนครั้งของการสร้างแบบจำลอง

ตารางที่ 6.1 จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ใช้สำหรับพัฒนาสมการ

Section Name	No. tension models	No. bending models	No. Data points (tension)		No. Data points (bending)		Total No. Data points
			1.Flange	2.Web	3.Flange	4.Web	
1.W1000X222	1215	1215	1215	1215	1215	1215	4860
2.W610X92	729	729	729	729	729	729	2916
3.W760X161	1215	1215	1215	1215	1215	1215	4860
4.W1000X249	729	729	729	729	729	729	2916
7.W530X92	1215	1215	1215	1215	1215	1215	4860
8.W690X170	729	729	729	729	729	729	2916
11.W760X284	1215	1215	1215	1215	1215	1215	4860
12.W920x417	729	729	729	729	729	729	2916
13.530x150	1215	1215	1215	1215	1215	1215	4860
15.W840x299	729	729	729	729	729	729	2916
16.W460x144	1215	1215	1215	1215	1215	1215	4860
<u>total</u>	<u>10935</u>	<u>10935</u>	<u>10935</u>	<u>10935</u>	<u>10935</u>	<u>10935</u>	
<u>Total models analyzed:</u>		<u>21870</u>	<u>Total Data:</u>		<u>43740</u>		



## 6.2 ขั้นตอนการพัฒนาสมการ

ในขั้นตอนการพัฒนาสมการด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรม *HeuristicLab* ผู้วิจัยได้ทำควบคุมพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ตามตารางที่ 6.3 และทำการทดสอบจำนวนการวิวัฒนาการ (generation) เพื่อหาค่า  $R^2$  ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1% เมื่อเทียบกับจำนวนการวิวัฒนาการที่น้อยกว่า พบว่าจำนวนการวิวัฒนาการ 5000 ครั้ง มีค่าความแตกต่างน้อยกว่า 1% เมื่อเทียบกับจำนวนการวิวัฒนาการที่ 3000 ครั้ง ดังตารางที่ 6.2 ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดจำนวนการวิวัฒนาการของการพัฒนาสมการทุกรอบไว้ที่ 5000 ครั้ง โดย

ตารางที่ 6.2 ผลของจำนวนการวิวัฒนาการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

จำนวนการ วิวัฒนาการ (Generation)	ชุดข้อมูลที่ 1. $f_{2i}^f$		ชุดข้อมูลที่ 2. $f_{2i}^w$		ชุดข้อมูลที่ 3. $f_{2b}^f$		ชุดข้อมูลที่ 4. $f_{2b}^w$	
	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing
	70%	30%	70%	30%	70%	30%	70%	30%
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
1000	0.921	0.921	0.911	0.916	0.906	0.908	0.887	0.881
3000	0.971	0.973	0.951	0.951	0.956	0.958	0.920	0.919
5000	<u>0.975</u>	<u>0.974</u>	<u>0.952</u>	<u>0.951</u>	<u>0.961</u>	<u>0.959</u>	<u>0.921</u>	<u>0.920</u>

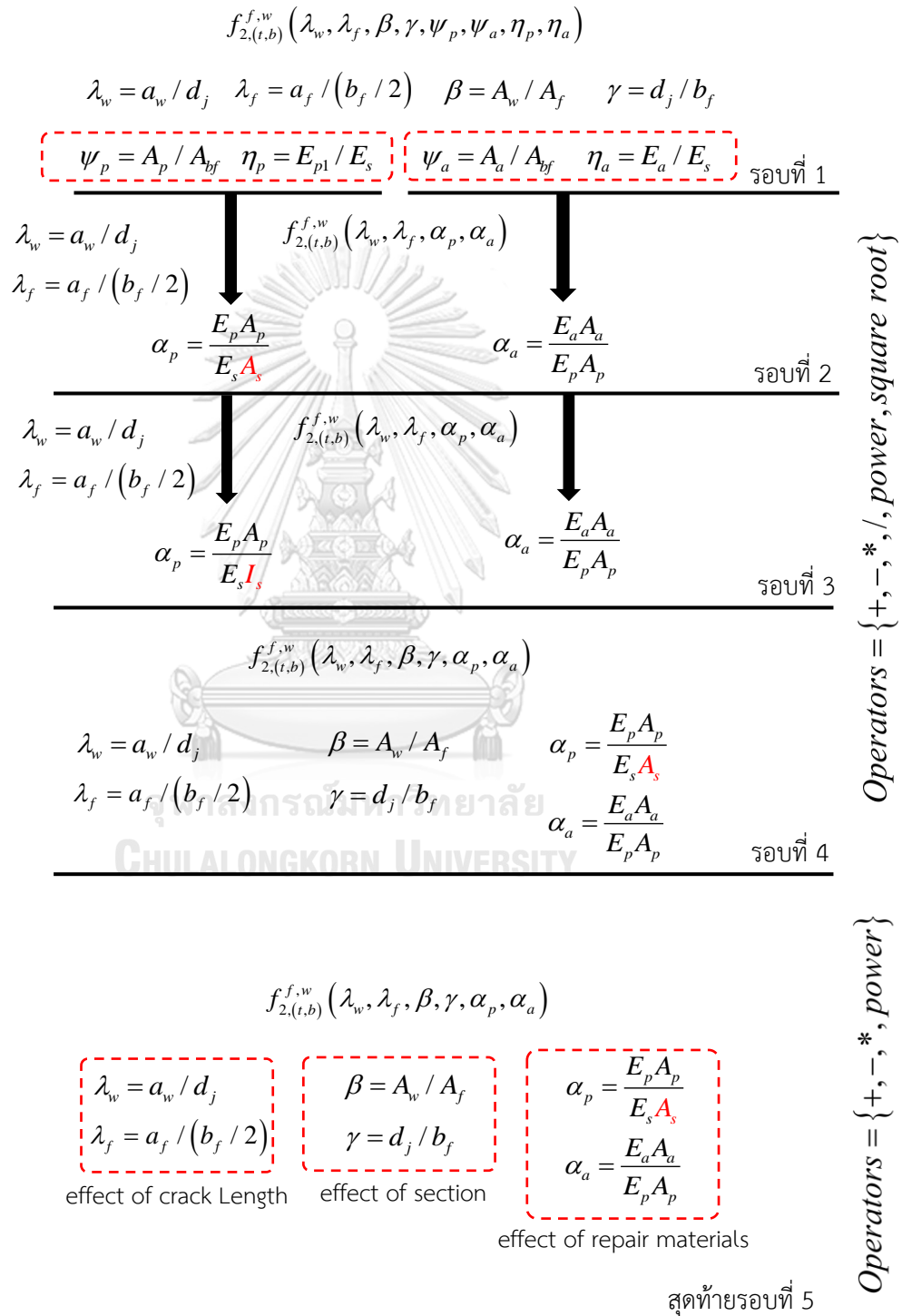
ตารางที่ 6.3 พารามิเตอร์ควบคุมในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

Parameter	Value
Number of tree structures	10,000
Probability of mutation	25%
Elite count (reproduction option)	2
Maximum number of tree depth	20
Maximum number of tree length	20

ในการพัฒนาสมการผู้วิจัยได้วางแผนการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ รวมตัวแปรเข้าด้วยกัน และปรับเปลี่ยนตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ เพื่อต้องค้นหาแบบสมการที่เหมาะสมและค่า  $R^2$  ที่มากกว่า 0.90 ขึ้นไป โดยสมการต้องไม่ซับซ้อนเกินไปและสามารถนำไปใช้งานได้สะดวก

รูปที่ 6.4 แสดงการพัฒนาสมการทั้งหมด 5 รอบด้วยกัน โดยการพัฒนาสมการรอบที่ 1 ถึง รอบที่ 4 ทางผู้วิจัยได้ปรับลดตัวแปรต่างๆ และรวมคุณสมบัติของวัสดุแผ่นปะกับวัสดุของชั้นกาว เพื่อให้สมการนั้นง่ายขึ้น พบว่าสมการที่ได้มายังมีความซับซ้อนและยากต่อไปนำไปใช้ดังนั้นรอบสุดท้าย คือรอบที่ 5 จึงได้ปรับเปลี่ยนตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ให้ลดลงคือ +. -. \* และ power

ซึ่งผลลัพธ์ของสมการที่ได้ง่ายขึ้นและไม่ซับซ้อนและค่า  $R^2$  มากกว่า 0.90 จึงหยุดการพัฒนาสมการไว้ที่รอบสุดท้ายนี้ โดยความหมายของตัวแปรต่างๆและรายละเอียดการวิเคราะห์สามารถดูเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ง



รูปที่ 6.4 ขั้นตอนการพัฒนาสมการทั้ง 5 รอบ

### 6.3 ผลกระทบของตัวแปรในสมการ

ตารางที่ 6.5 และ 6.6 ได้อธิบายถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อสมการที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรม *HeuristicLab* ซึ่งความหมายเปอร์เซ็นต์ที่ปรากฏในตารางนั้นหมายถึงผลกระทบของตัวแปรต่อสมการโดยคิดรวมเป็น 100% และในแต่ละตัวแปรย่อยจะส่งผลกระทบต่อสมการ  $f_2$  มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ที่ปรากฏในตาราง

ในขั้นตอนการพัฒนาสมการทั้ง 5 รอบ แสดงให้เห็นว่าผลกระทบของอัตราส่วนรอยร้าวที่ปีกและแหวต่อสมการค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_2$  เฉลี่ยถึงร้อยละ 42% และ 23% ตามลำดับและรองลงมาคือผลกระทบของวัสดุแผ่นปะ(FRP)ต่อสมการค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_2$  เฉลี่ยร้อยละ 18% และผลกระทบของมิติของคานเหล็กต่อสมการค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_2$  เฉลี่ยร้อยละ 7.3% เมื่อผลกระทบที่น้อยที่สุดคือวัสดุชั้นกาว(adhesive)ที่มีผลกระทบต่อสมการค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_2$  เฉลี่ยร้อยละ 3.0% ทั้งกรณีรับแรงดึงและรับแรงดัดตามตารางที่ 6.5 และ 6.6

ดังนั้นจากการพัฒนาสมการทั้ง 5 รอบ ผู้วิจัยจึงได้เลือกสมการในรอบสุดท้ายคือรอบที่ 5 เป็นสมการที่จะเสนอเป็นค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_2$  ที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะเนื่องจากสมการรอบที่ 5 นั้นจะมีค่า  $R^2$  อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือมีค่ามากกว่า 0.90 ขึ้นไป ซึ่งก็ไม่ได้เป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสมการในรอบอื่นๆ แต่ด้วยรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการนำไปใช้งานกว่าสมการในรอบอื่นๆ บวกกับค่าสัมประสิทธิ์ที่น้อยกว่าคือ  $c_0$  ถึง  $c_{13}$  ที่เท่ากันทั้งกรณีรับแรงดึงและรับแรงดัดจึงเสนอสมการดังต่อไปนี้

$$K^f = f_{1,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta) f_{2,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma, \alpha_p) \sigma_{t,b} \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{กรณีปีก})(6-1)$$

$$K^w = f_{1,t}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) f_{2,t}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma, \alpha_p) \sigma_t \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{กรณีแหว})(6-2)$$

$$K^w = f_{1,b}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) f_{2,b}^w(\lambda_w, \lambda_f, \gamma, \alpha_p) \sigma_b \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{กรณีแหว})(6-3)$$

เมื่อ  $f_{1,(t,b)}^{f,w}$  คือค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

สามารถดูรายละเอียดได้ตามภาคผนวก ค

$\lambda_w = a_w / d_j$  คืออัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่แผ่นแหวต่อความลึกของคานเหล็ก

$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$  คืออัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่ปีกต่อความกว้างปีก

$\beta = 2A_f / A_w$  คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปีกต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นแหว

$\gamma = d_j / b_f$  คืออัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก

$$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s} = \frac{E_p (b_f t_p)}{E_s (2t_f b_f + (d - 2t_f) t_w)}$$
 คืออัตราส่วนสติฟเนสของแผ่นปะต่อสติฟเนสของ

$\sigma_{t,b}$  คือหน่วยแรงกระทำกรณีรับแรงดึงหรือรับแรงดัด และ  $a_{f,w}$  คือความร้าวรอยร้าวที่ปีกหรือเอว

6.3.1 สมการค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะกรณีรับแรงดึงที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,t}^f = \left( \left( (c_0 \lambda_w + c_1 \gamma) (c_2 \lambda_f)^{c_3} - ((c_4 \lambda_f + c_5 \alpha_p) + c_6 \alpha_p) c_7 \right) + c_8 \beta \right) - (c_9 \lambda_f)^{c_{10}} c_{11} \lambda_w \Big) c_{12} + c_{13}$$

$$f_{2,t}^w = \left( (c_0 \lambda_w + c_1 \lambda_f c_2 \lambda_f (c_3 \lambda_w - c_4 \lambda_f)) - ((c_6 \beta (c_6 \lambda_w - c_7 \lambda_f) + c_8 \gamma c_9 \lambda_w) - c_{10}) c_{11} \alpha_p \right) c_{12} + c_{13}$$

6.3.2 สมการค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะกรณีรับแรงดัดที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,b}^f = \left( \left( c_0 \gamma \left( (c_1 \lambda_f)^{c_2} - c_3 \lambda_f \right) + (c_4 \alpha_p)^{c_5} \right) c_6 \lambda_w + \left( c_7 c_8 \alpha_p + \left( (c_9 \lambda_f)^{c_{10}} - c_{11} \lambda_f \right) \right) \right) c_{12} + c_{13}$$

$$f_{2,b}^w = \left( (c_0 \lambda_w - c_1 \gamma) - \left( (c_2 \alpha_p - c_3 \lambda_w) + \left( (c_4 - c_5 \gamma) + (c_6 \lambda_w c_7 \lambda_f + c_8 \alpha_p) \right) \right) (c_9 \alpha_p + c_{10} \lambda_f c_{11} \lambda_f) \right) c_{12} + c_{13}$$

ตารางที่ 6.4 ค่าสัมประสิทธิ์  $c_0$  ถึง  $c_{13}$  กรณีรับแรงดึงและรับแรงดัด

	$f_{2,t}^f$	$f_{2,t}^w$	$f_{2,b}^f$	$f_{2,b}^w$
$c_0$	1.89820	0.95342	2.54470	2.32810
$c_1$	0.25819	1.05180	2.58490	0.60991
$c_2$	0.84866	1.04940	-1.0000	3.14410
$c_3$	-1.0000	1.01020	3.59010	2.4390
$c_4$	0.63033	2.09630	4.08330	-7.0069
$c_5$	2.95480	1.51950	-1.0000	0.83084
$c_6$	2.98460	1.75020	0.25675	2.65260
$c_7$	13.6440	2.12030	-22.9510	2.04270
$c_8$	1.00890	0.96563	1.32870	3.13440
$c_9$	1.19270	1.75020	2.76300	3.15420
$c_{10}$	16.0000	9.39190	-1.0000	0.23950
$c_{11}$	2.21320	-0.96136	2.16780	2.09130
$c_{12}$	0.026124	0.160880	0.059116	-0.10110
$c_{13}$	0.824260	0.90690	0.787220	0.918610

จากสมการที่เสนอ (6.1) ถึง (6.3) ทางผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างสมการที่เสนอของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{Eq}$  กับ  $f_{FE}$  ที่ปีกและเอว ภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด แสดงในภาคผนวก ง ของรูปที่ ง.5.2 ถึง ง.5.5 เพื่อตรวจสอบสมการที่เสนอ พบว่าสมการที่เสนอค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{Eq}$  นั้นมีแนวโน้มและสอดคล้องกันดีกับ  $f_{FE}$  ทั้งกรณีที่ไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะและกรณีที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

ตารางที่ 6.5 ผลกระทบของตัวแปรในสมการที่ปีก กรณีรับแรงดึงและแรงดัด

ตัวแปร (Variable)	ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 1 (ร้อยละ,%)		ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 2 (ร้อยละ,%)		ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 3 (ร้อยละ,%)		ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 4 (ร้อยละ,%)		ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 5 (ร้อยละ,%)	
	ที่ปีก (แรงดึง)	ที่ปีก (แรงดัด)	ที่ปีก (แรงดึง)	ที่ปีก (แรงดัด)	ที่ปีก (แรงดึง)	ที่ปีก (แรงดัด)	ที่ปีก (แรงดึง)	ที่ปีก (แรงดัด)	ที่ปีก (แรงดึง)	ที่ปีก (แรงดัด)
$\lambda_f$	26%	54%	45%	41%	43%	41%	33%	48%	34%	57%
$\lambda_w$	36%	9%	29%	28%	30%	35%	24%	25%	16%	13%
$\beta$	6%	10%	-	-	-	-	(1%)*	2%	1%	(1%)*
$\gamma$	1%	(1%)*	-	-	-	-	1%	(1%)*	15%	10%
$\psi_p$	17%	10%	-	-	-	-	-	-	-	-
$\eta_p$	9%	10%	-	-	-	-	-	-	-	-
$\alpha_p$ ( $A_s$ )	-	-	24%	29%	-	-	39%	23%	32%	17%
$\alpha_p$ ( $I_s$ )	-	-	-	-	17%	22%	-	-	-	-
$\psi_a$	(1%)*	2%	-	-	-	-	-	-	-	-
$\eta_a$	4%	4%	-	-	-	-	-	-	-	-
$\alpha_a$	-	-	2%	(2%)*	9%	(2%)*	(2%)*	(1%)*	(2%)*	(2%)*
$R^2$	<u>0.971</u>	<u>0.981</u>	<u>0.974</u>	<u>0.962</u>	<u>0.945</u>	<u>0.926</u>	<u>0.968</u>	<u>0.961</u>	<u>0.975</u>	<u>0.961</u>

(-)\* ตัวแปรนั้นถูกตัดออกจากสมการด้วยโปรแกรม HeuristicLab อัตโนมัติ

ตารางที่ 6.6 ผลกระทบของตัวแปรในสมการที่เอว กรณีรับแรงดึงและแรงดัด

ตัวแปร (Variable)	ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 1 (ร้อยละ,%)		ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 2 (ร้อยละ,%)		ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 3 (ร้อยละ,%)		ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 4 (ร้อยละ,%)		ผลกระทบของตัวแปร รอบที่ 5 (ร้อยละ,%)	
	ที่เอว (แรงดึง)	ที่เอว (แรงดัด)	ที่เอว (แรงดึง)	ที่เอว (แรงดัด)	ที่เอว (แรงดึง)	ที่เอว (แรงดัด)	ที่เอว (แรงดึง)	ที่เอว (แรงดัด)	ที่เอว (แรงดึง)	ที่เอว (แรงดัด)
$\lambda_f$	39%	24%	28%	48%	61%	28%	35%	54%	44%	39%
$\lambda_w$	17%	18%	26%	17%	22%	27%	20%	12%	36%	13%
$\beta$	7%	7%	-	-	-	-	(1%)*	7%	7%	(1%)*
$\gamma$	(1%)*	9%	-	-	-	-	10%	(1%)*	1%	23%
$\psi_p$	7%	13%	-	-	-	-	-	-	-	-
$\eta_p$	11%	11%	-	-	-	-	-	-	-	-
$\alpha_p$ ( $A_s$ )	-	-	45%	29%	-	-	33%	25%	11%	22%
$\alpha_p$ ( $I_s$ )	-	-	-	-	15%	31%	-	-	-	-
$\psi_a$	9%	9%	-	-	-	-	-	-	-	-
$\eta_a$	9%	10%	-	-	-	-	-	-	-	-
$\alpha_a$	-	-	2%	6%	9%	14%	(1%)*	(1%)*	(1%)*	(2%)*
$R^2$	<u>0.975</u>	<u>0.957</u>	<u>0.959</u>	<u>0.905</u>	<u>0.909</u>	<u>0.805</u>	<u>0.968</u>	<u>0.952</u>	<u>0.952</u>	<u>0.921</u>

(\_)\* ตัวแปรนั้นถูกตัดออกจากสมการด้วยโปรแกรม HeuristicLab อัตโนมัติ

## บทที่ 7

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF) สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรภายใต้แรงดึงหรือแรงดัดทั้งกรณีที่ไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะและกรณีที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยเริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองที่ใช้สำหรับการศึกษาและตรวจสอบกับงานวิจัยก่อนหน้าและศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อค่า SIF และสุดท้ายคือการพัฒนาสมการจากการวิเคราะห์ฐานข้อมูล SIF ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมเชิงพันธุกรรม โดยจากงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองของคานเหล็กที่มีรอยร้าวแบบสมมาตรได้มีการตรวจสอบผลวิเคราะห์ SIF เทียบกับงานวิจัยของ Albrecht และคณะ (2008) [13] พบว่าค่า SIF มีแนวโน้มสูงกว่างานวิจัยข้างต้นเล็กน้อยและมีความสอดคล้องกันดี

2. การสร้างแบบจำลองของแผ่นเหล็กที่มีรอยร้าวทะลุผ่านที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นปะได้มีการตรวจสอบผลวิเคราะห์ SIF เทียบกับงานวิจัยของ Do และ Lenwari [29] พบว่าค่า  $f_{FE}$  มีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับ  $f_{Do,Lenwari}$  มากที่สุดอยู่ที่ 2% และได้นำเทคนิคการสร้างแบบจำลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นนำมาพัฒนาต่อยอดเป็นแบบจำลองของคานเหล็กที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะต่อไป

3. ผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_1$  ต่ออัตราส่วนรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) และเอว ( $\lambda_w$ ) พบว่า  $\lambda_f$  และ  $\lambda_w$  ส่งผลกระทบต่อค่า  $f_1$  สูงขึ้นทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัดเมื่อความยาวรอยร้าวที่ปีกหรือเอวมากขึ้นตามลำดับ

4. ผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_1$  หรือ  $f_2$  ต่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ปีกทั้งหมดต่อพื้นที่เอว ( $\beta$ ) และอัตราส่วนระหว่างความลึกของคานเหล็กต่อความกว้างของปีก ( $\gamma$ ) พบว่าค่า  $\beta$  ส่งผลกระทบต่อค่า  $f_1$  มากกว่าค่า  $f_2$  และในทางกลับกันค่า  $\gamma$  ส่งผลกระทบต่อค่า  $f_2$  มากกว่าค่า  $f_1$  ทั้งที่ปีกและเอวภายใต้แรงดึงหรือแรงดัด

5. ผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_2$  ต่อความหนาของแผ่นปะ ( $t_p$ ) และมอดุลัสของแผ่นปะ ( $E_p$ ) พบว่าส่งผลกระทบต่อค่า  $f_2$  ลดลงได้ดี ทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัด เมื่อ  $t_p$  และ  $E_p$  มีค่ามากขึ้นตามลำดับ และส่งผลกระทบต่อค่า  $f_2$  ลดลงได้ต่ำที่สุดทั้งกรณีรับแรงดึงหรือแรงดัดเมื่ออัตราส่วนรอยร้าวที่ปีก ( $\lambda_f$ ) มีค่าเท่ากับ 0.9

6. ผลกระทบของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_2$  ต่อความหนาของชั้นกาว ( $t_a$ ) และมอดุลัสของชั้นกาว ( $E_a$ ) พบว่าส่งผลกระทบต่อค่า  $f_2$  ลดลงเมื่อ  $t_a$  มีค่าน้อยลง และในขณะเดียวกันจะส่งผลกระทบต่อ

ค่า  $f_2$  ลดลงเมื่อ  $E_a$  มีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเปรียบเทียบค่า  $t_a$  ที่มีค่าน้อย เทียบกับค่า  $t_a$  ที่มีค่าสูง และค่า  $E_a$  ที่มีค่าน้อย เทียบกับค่า  $E_a$  ที่มีค่าสูง พบว่าส่งผลกระทบบให้ค่า  $f_2$  มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ทั้งที่ปีกและเอวตามลำดับภายใต้แรงดึงและแรงดัด

7. การพัฒนาสมการทำนายค่า SIF สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวไอที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรภายใต้แรงดึงหรือแรงดัดทั้งกรณีที่ไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ ( $f_1$ ) และกรณีที่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ ( $f_2$ ) โดยสมการที่นำเสนอได้พัฒนาจากการวิเคราะห์ฐานข้อมูล SIF ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกใช้ข้อมูลในรอบสุดท้ายจากทั้งหมด 5 รอบ มาใช้ในการพัฒนาสมการทำนายค่า SIF ในงานวิจัยนี้ด้วยโปรแกรมเชิงพันธุกรรม เมื่อตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ (6-1) และ (6-2) และ (6-3) มีขอบเขตการใช้งานตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ขอบเขตของตัวแปรสำหรับสมการค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต

Case	$\beta$ ( $2A_f / A_w$ )	$\gamma$ ( $d_j / b_f$ )	$\lambda_f$ ( $a_f / (b_f / 2)$ )	$\lambda_w$ ( $a_w / d_j$ )	$t_p$ (mm)	$E_p$ (GPa)
Tension (Flange & Web Crack)	0.83+...+2.07	1.59+...+3.16	0.1+...+0.9	0.1+...+0.6	1.2+...+4.8	210+...+460
Moment (Flange & Web Crack)	0.83+...+2.07	1.59+...+3.16	0.1+...+0.9	0.1+...+0.5	1.2+...+4.8	210+...+460

หมายเหตุ: โดยมอดุลัสของแผ่นปะ  $E_p = E_{p1}$  ซึ่งรายละเอียดของตัวแปรสามารถดูได้ ตารางที่ 4.1

เมื่อ มอดุลัสของเหล็ก  $E_s = 200$  GPa และอัตราส่วนของปีกของของเหล็ก  $\nu_s = 0.30$

มอดุลัสของแผ่นปะ  $E_{p2} = 12$  GPa และอัตราส่วนของปีกของของแผ่นปะ  $\nu_{12} = 0.30$

มอดุลัสเฉือนของแผ่นปะ  $G_{12}, G_{13}, G_{23} = 5$  GPa

อัตราส่วนของปีกของของชั้นกาว  $\nu_a = 0.35$

## 7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อเนื่อง

7.2.1 ผู้วิจัยเสนอให้มีการศึกษาค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตเพิ่มเติมในกรณีที่มีซ่อมแซมด้วยแผ่นปะทั้งสองด้านคือเพิ่มแผ่นปะที่ผิวด้านบนของปีก

7.2.2 ผู้วิจัยเสนอให้มีการศึกษาผลกระทบของ SIF ต่อระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของแผ่นปะที่เหมาะสมเพิ่มเติม เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของแผ่นปะไว้ค่อนข้างสูง ซึ่งการนำไปใช้งานจริงนั้นจะทำให้สิ้นเปลืองและไม่คุ้มค่าในการนำแผ่นปะไปซ่อมแซม

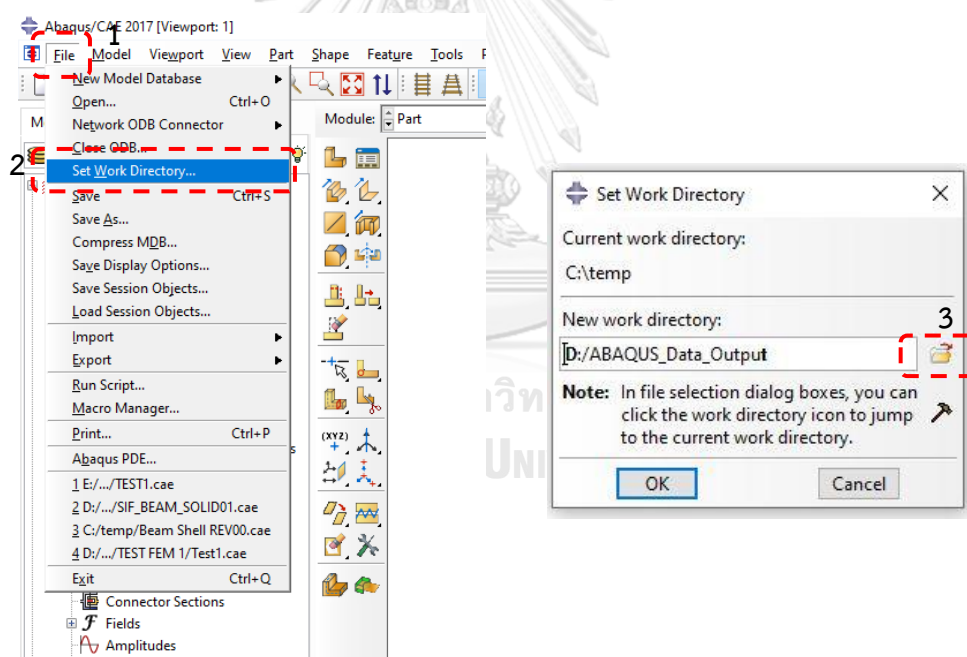


## ภาคผนวก ก ขั้นตอนการวิเคราะห์ SIF ใน ABAQUS

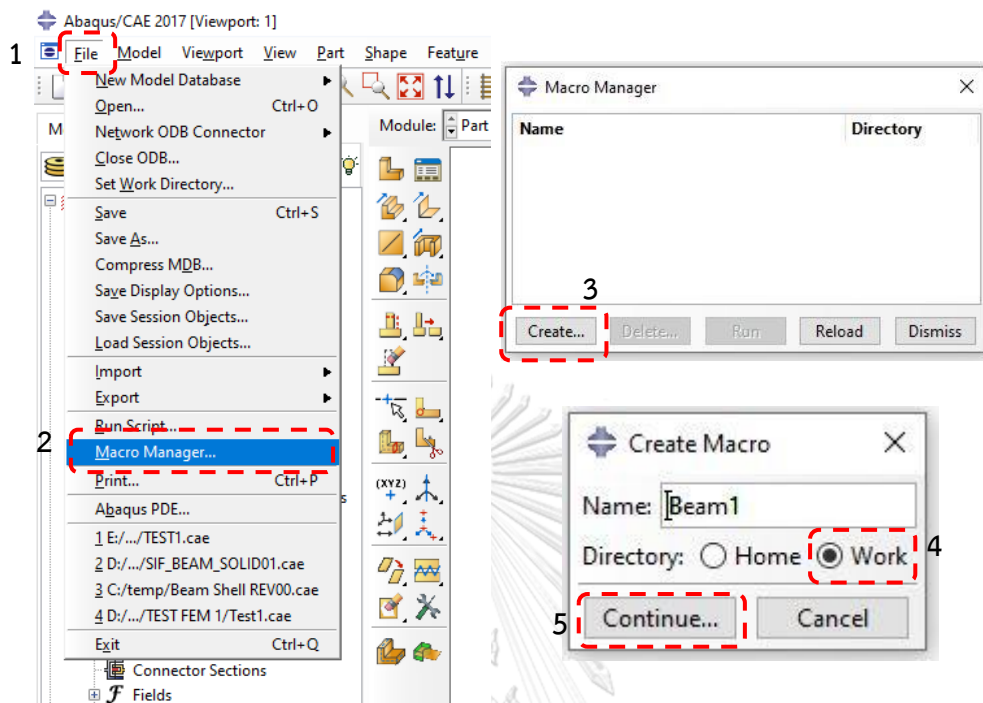
ในการขั้นตอนการวิเคราะห์ SIF ในโปรแกรม ABAQUS (version 2017) ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีสร้างแบบจำลองด้วย ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (graphical user interface, GUI) และบันทึกขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองโดยอัตโนมัติจากโปรแกรม ABAQUS เป็นภาษาไพทอน (Python programming language) ด้วยโปรแกรม JetBrains PyCharm Community Edition (version 2019.2.3) เพื่อที่จะได้เรียกใช้งานแบบจำลองได้อีกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือคุณสมบัติของวัสดุโดยไม่จำเป็นต้องย้อนกลับไปสร้างแบบจำลองด้วยวิธีแบบ GUI อีกครั้ง ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งโปรแกรมลงเครื่องคอมพิวเตอร์ทั้งสองให้เรียบร้อย
2. เลือกตำแหน่งที่จัดเก็บไฟล์ Output ของโปรแกรม ABAQUS

ไปที่แถบเมนูบาร์ด้านบนซ้าย File>Set Work Directory>เลือกตำแหน่งที่จัดเก็บไฟล์



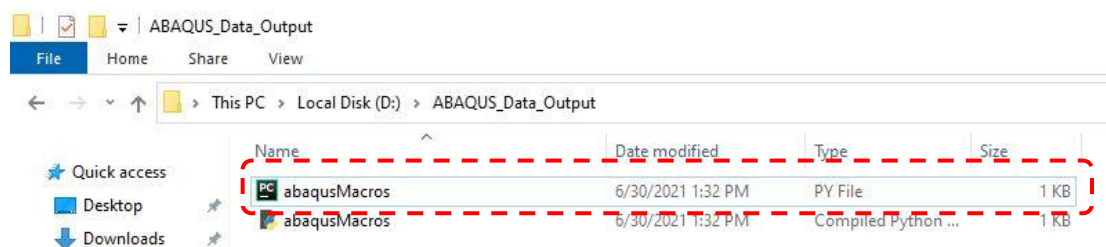
3. ตั้งค่า Macro Manager เพื่อบันทึกการสร้างแบบจำลองของ GUI ลง Work Directory ที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 2



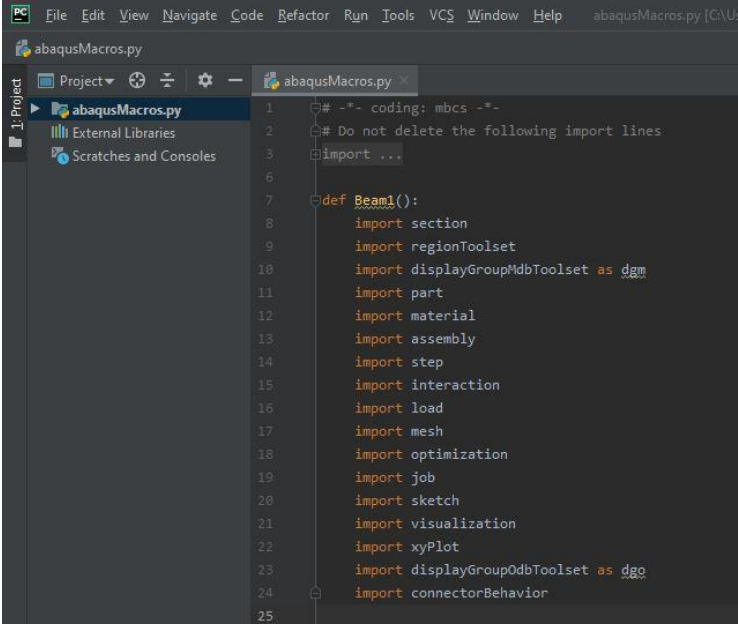
เมื่อกด Continue.. ที่หน้าต่าง Create Macro จะปรากฏหน้าต่าง Record Macro ดังภาพด้านล่างค้างไว้ตลอดเวลาเพื่อเตรียมพร้อมในการบันทึกข้อมูล และถ้ากดปุ่ม Stop Recording จะเป็นหยุดบันทึกข้อมูล



4. เปิดโปรแกรม JetBrains PyCharm Community Edition (version 2019.2.3) ไปเปิดไฟล์ abaqusMacros.py ตามตำแหน่งไฟล์ที่เก็บไว้ในหัวข้อที่ 2



5. เมื่อเปิดไฟล์ abaqusMacros.py จะปรากฏหน้าต่างตามด้านล่าง นี้จะแสดงสถานะการเก็บข้อมูลจากบันทึกเข้าใน นี้นตลอดเวลาเมื่อมีการ สร้างแบบจำลองจากโปรแกรม ABAQUS เพื่อที่จะได้สังเกตว่าผลจากขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโปรแกรม ABAQUS ได้เขียน Code ส่วนใดให้กับเราบ้าง

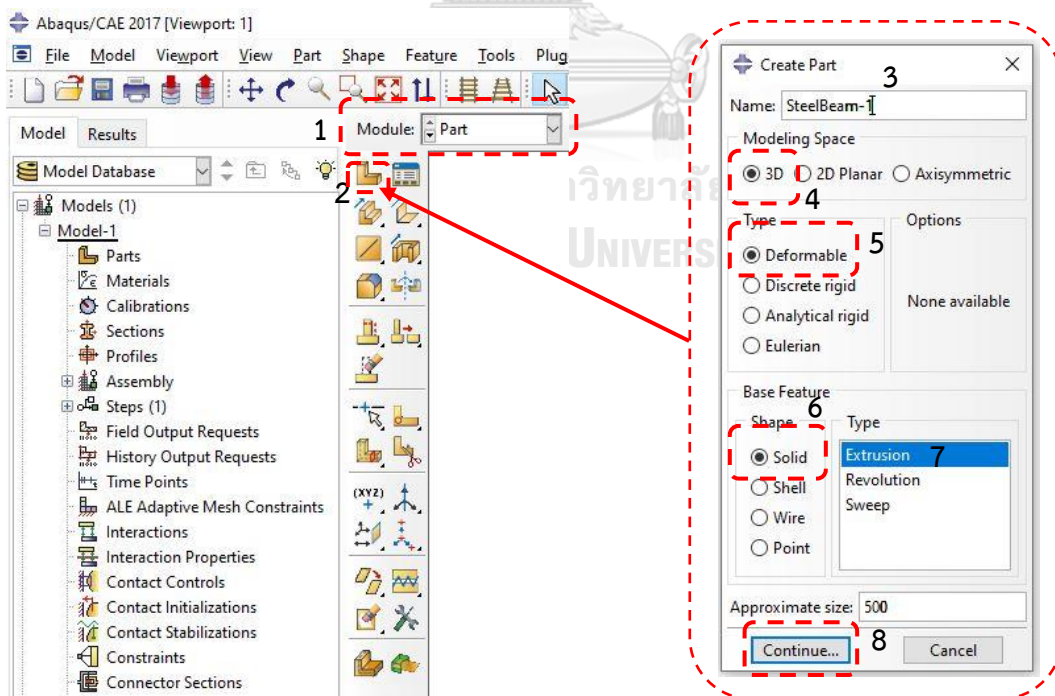


```

1  #- coding: mbc -*-
2  # Do not delete the following import lines
3  import ...
6
7  def Beam1():
8      import section
9      import regionToolset
10     import displayGroupMdbToolset as dgm
11     import part
12     import material
13     import assembly
14     import step
15     import interaction
16     import load
17     import mesh
18     import optimization
19     import job
20     import sketch
21     import visualization
22     import xyPlot
23     import displayGroupOdbToolset as dgo
24     import connectorBehavior
25

```

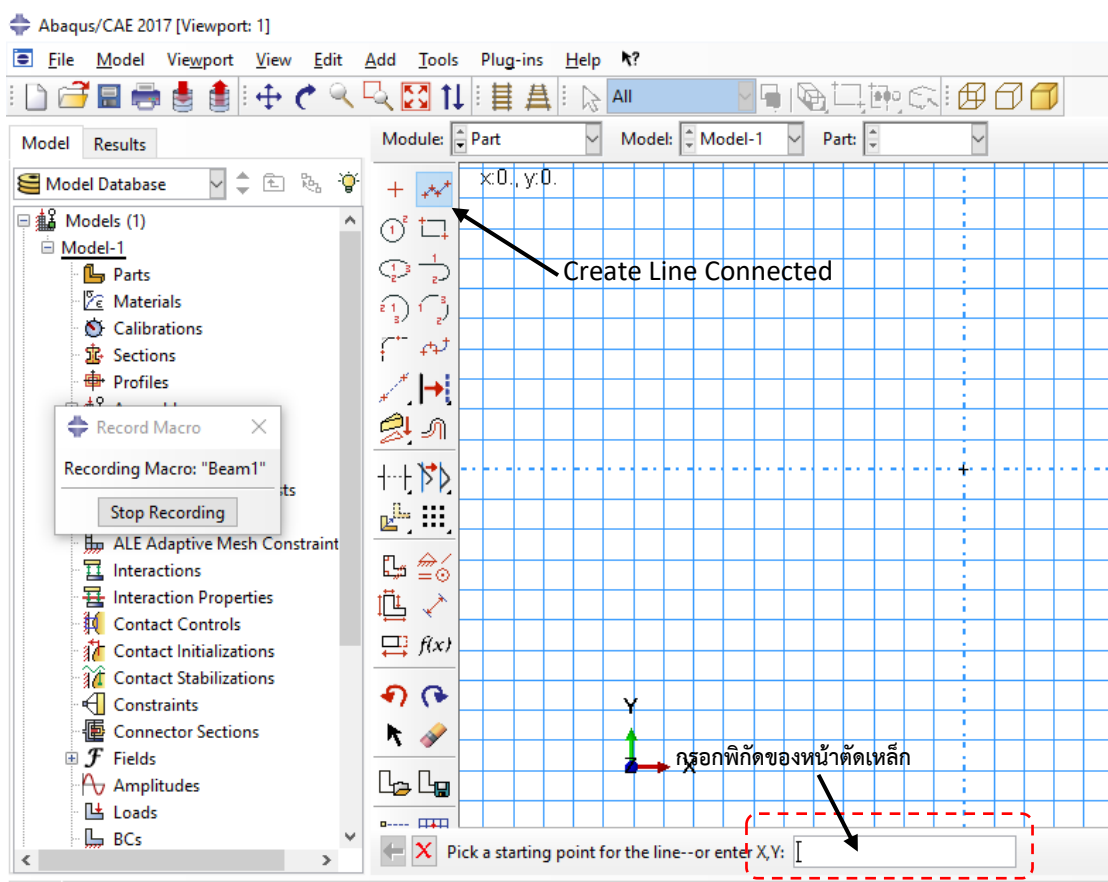
6. ให้กลับไปโปรแกรม ABAQUS เพื่อสร้างชิ้นส่วน(Create Part) ของ SteelBeam-1



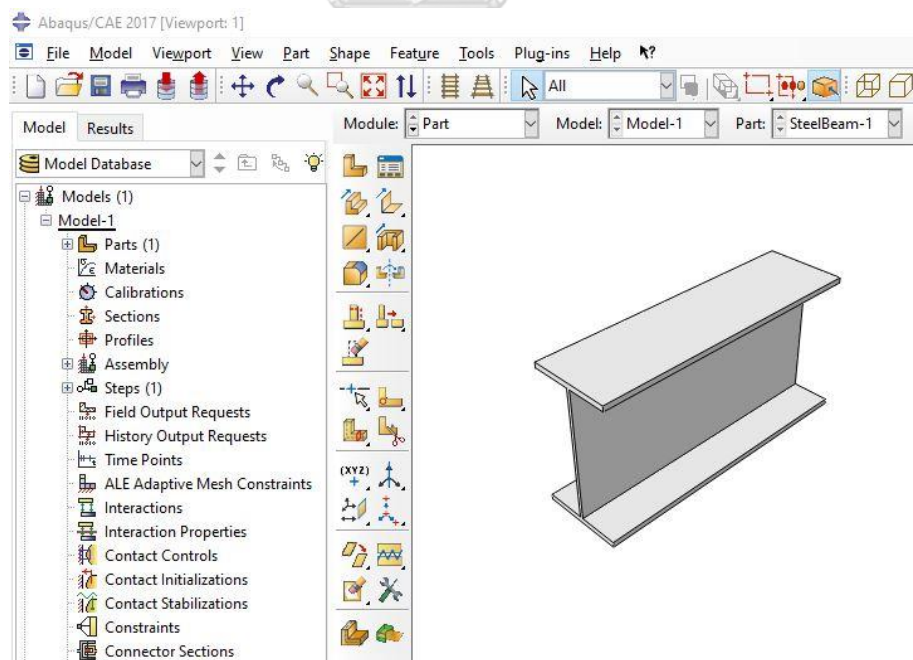
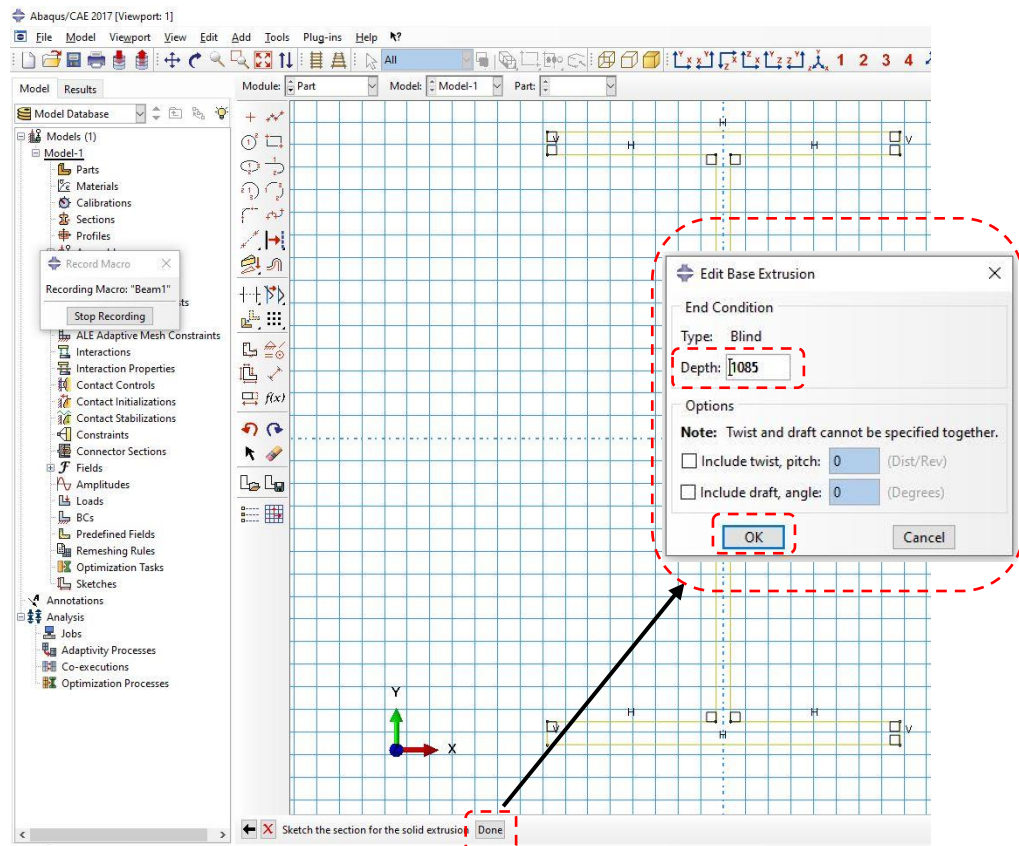
7. วาดขนาดหน้าตัดของเหล็กไอบีมที่กำหนดมา ในที่นี้เลือกใช้ W530x150

เมื่อ  $d = 542.5$  มม.  $b_f = 312.2$  มม.  $t_f = 20.30$  มม.  $t_w = 12.70$  มม.

โดยใช้เครื่องมือ Create Line Connected โดยสามารถนำไปลากเส้นด้วยมือหรือกรอกค่าพิกัด X,Y ได้จากรูปด้านล่าง ในที่นี้ เลือกใช้พิกัดดังนี้  $(-156.1,-271.25),(156.1,-271.25),(156.1,-250.95),(6.35,-250.95),(6.35,250.95),(156.1,250.95),(156.1,271.25),(-156.1,271.25),(-156.1,250.95),(-6.35,250.95),(-6.35,-250.95),(-156.1,-250.95),(-156.1,271.25)$

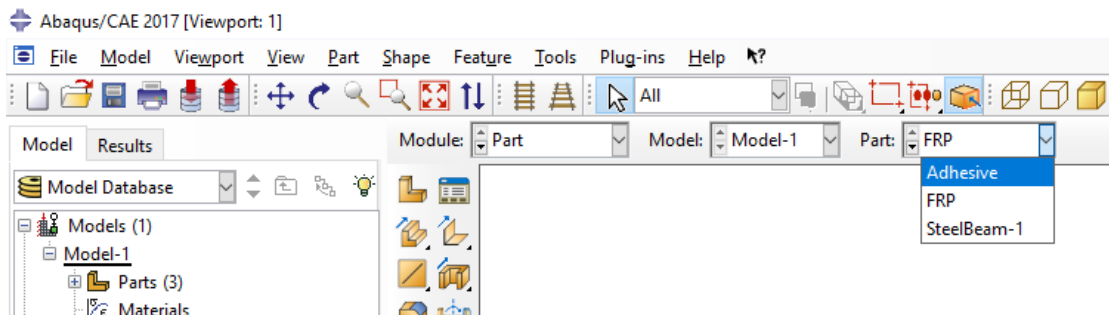


หลังจากก็จะได้น้ำตัดของคานเหล็กดังภาพด้านล่าง และกดปุ่มซ้ายล่างคำว่า Done และจะปรากฏหน้าต่างต่าง Edit Base Extrusion และกำหนดความยาวของคานเหล็ก คือ 1085 mm

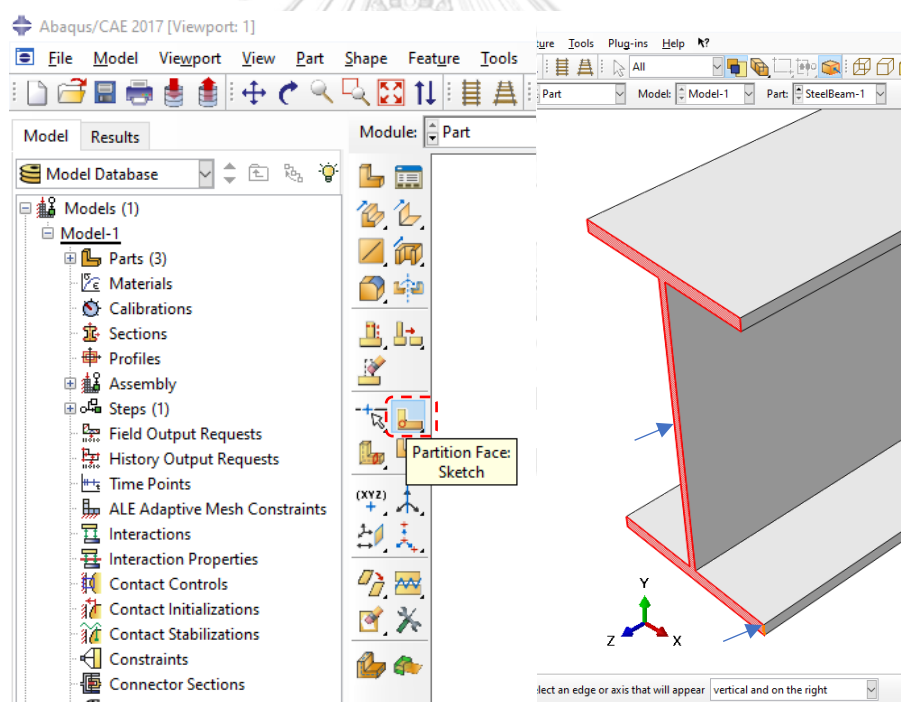


8. หลังจากขึ้นส่วนของคานเหล็กเสร็จแล้วให้กลับไปสร้างขึ้นส่วนของ ชั้นกาว (Adhesive) และวัสดุปะ FPR เมื่อในที่นี้กำหนดขนาดของชั้นกาวเท่ากับ 312.2x542.5x3.0 มม. และวัสดุปะ FPR เท่ากับ 312.2x542.5x4.8 มม. ตามขั้นตอนที่ 6 และ 7 ใหม่อีกครั้ง

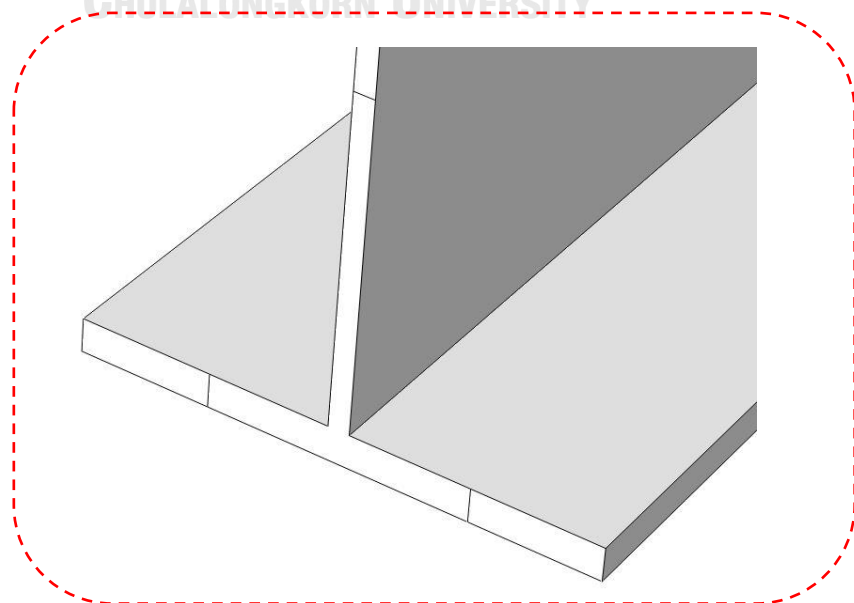
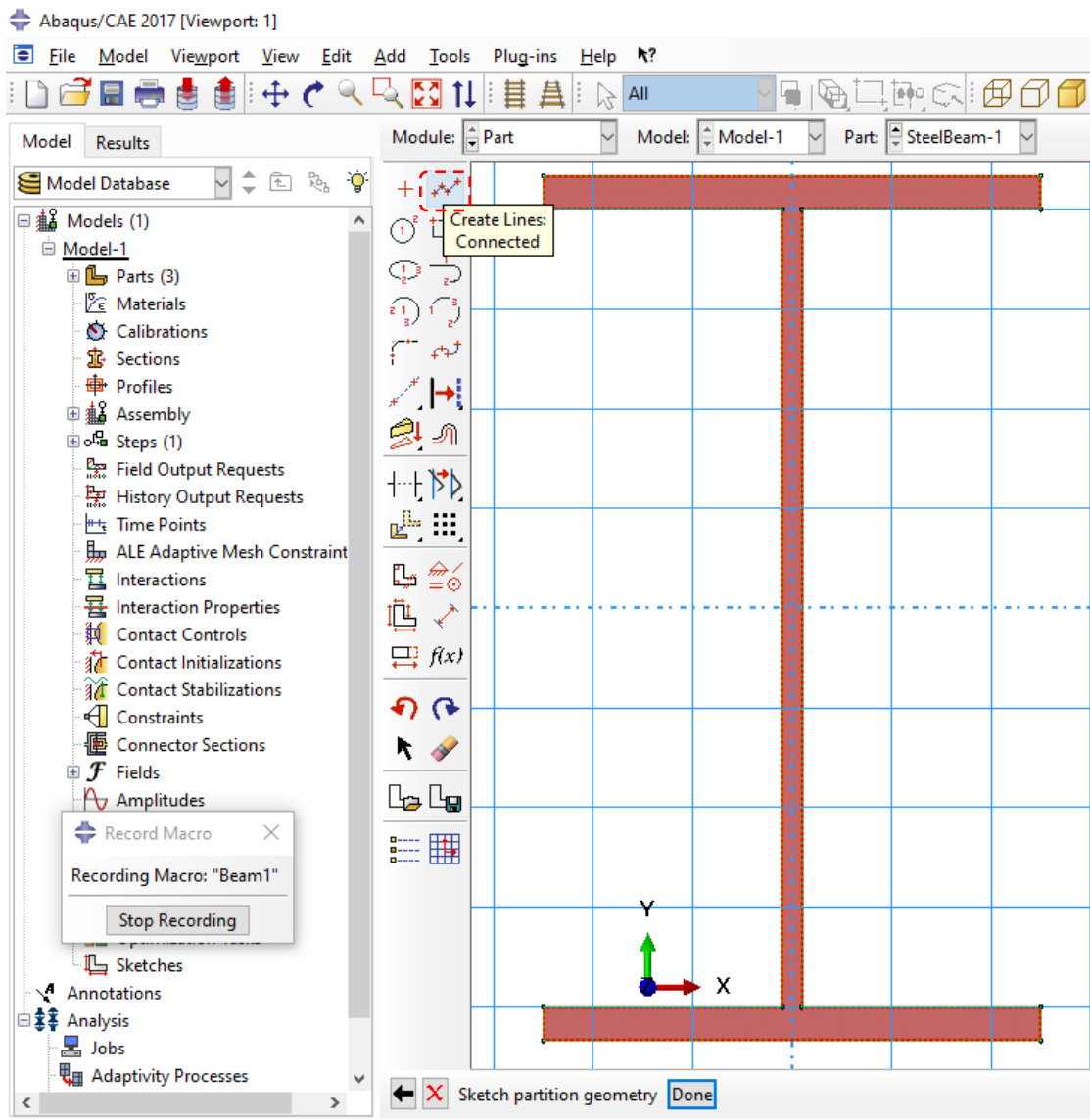
9. เมื่อทำตามข้อ 8 ครบแล้วเราจะมีส่วนประมาทั้ง 3 ชั้น คือ SteelBeam-1, Adhesive และ FRP ตามรูปด้านล่าง



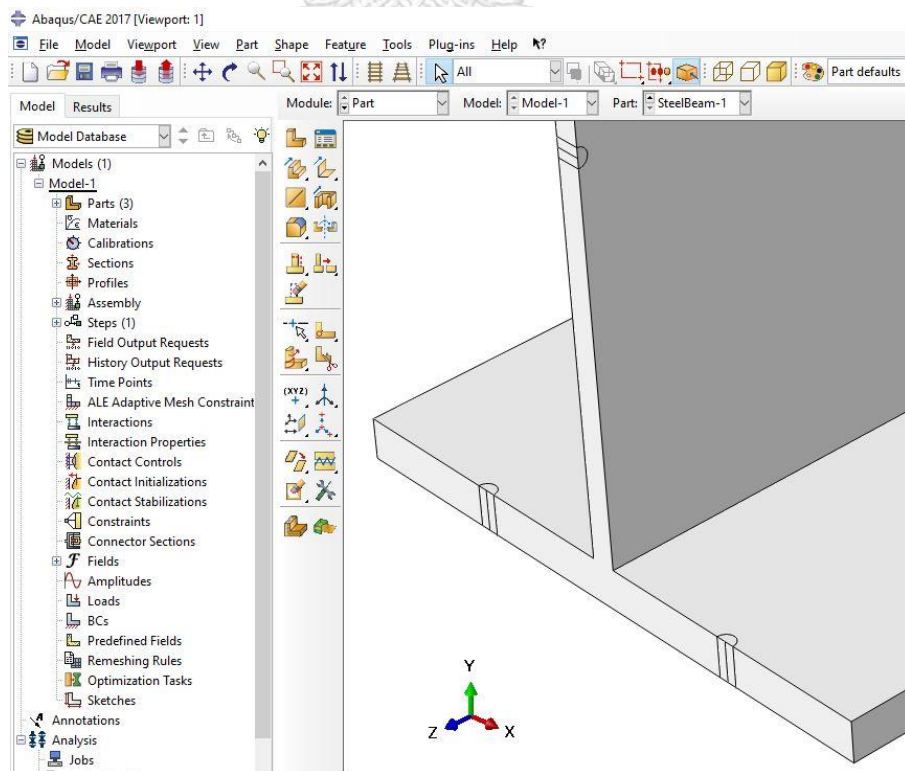
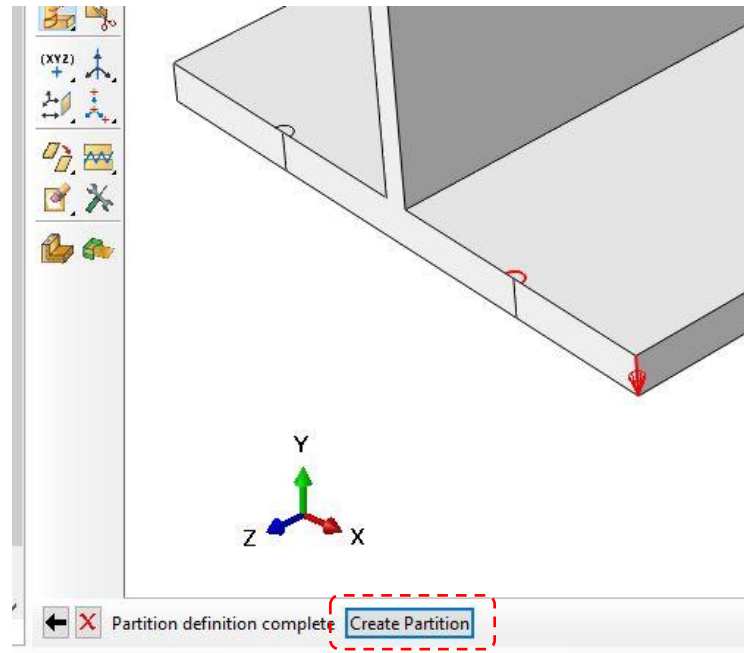
10. ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทำแนวปลายของรอยร้าวที่ปีกและเอวโดยจากรูปด้านบนบนให้เลือกกลับมาที่ชั้นส่วน SteelBeam-1 จากนั้นเลือกเครื่องมือที่ชื่อว่า Partition Face Sketch และไปคลิกที่ผิวหน้าตัดลงเหล็กหนึ่งครั้งและกดปุ่ม Done ด้านล่างจากนั้นนำมาใส่ไปที่เส้นแนวตั้งที่ขอบของปีกอีกทีแล้วคลิก



หลังจากที่คลิกที่ขอบของปีกแล้วจะปรากฏหน้าต่าง 2 มิติของคานเหล็กให้เห็นต่อมาใช้คำสั่งเดิมคือ Create Line Connected โดยกำหนด  $\lambda_f = 0.5$  และ  $\lambda_w = 0.4$  และพิกัด(X,Y) รอยร้าวที่ปีกซ้ายคือ(-78.05,-250.95),(-78.05,-271.25) ปีกขวา (78.05,-250.95),(78.05,-271.25) และรอยร้าวที่เอวเท่ากับ (6.35,-52.22),(-6.35,-52.22) เมื่อเสร็จแล้วจะได้แนวรอยร้าวที่ปีกและเอวตามภาพด้านล่าง

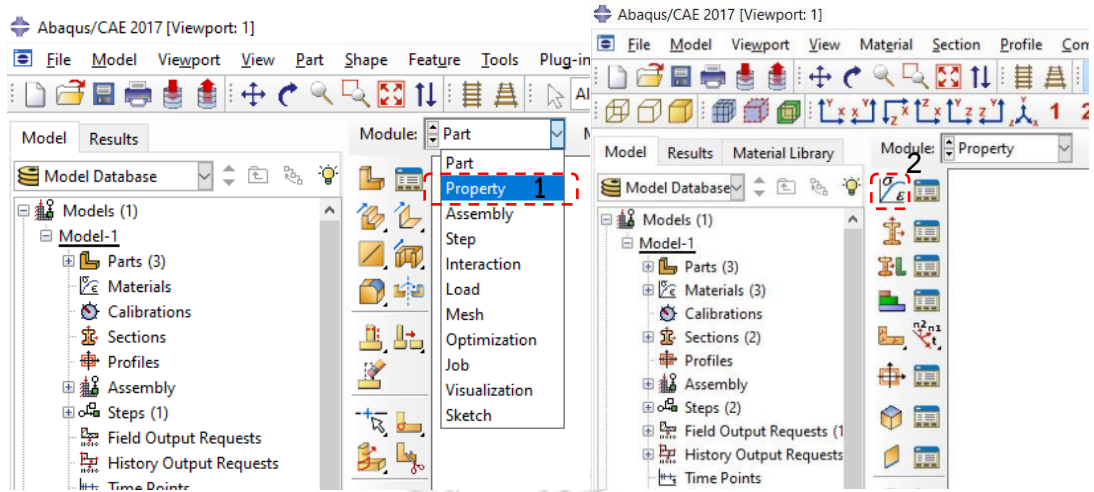


11. ในขั้นตอนนี้จะทำคล้ายกับข้อ 10 เปลี่ยนจากเลือกผิวของหน้าตัดเหล็กเป็นเลือกที่ผิวของรอยร้าวด้านบนบนแทน เพื่อสร้างเส้นโค้งครอบคลุมปลายรอบร้าวทั้งสามที่ และใช้คำสั่ง Partition Cell เพื่อเจาะทะลุความหนาของเหล็ก โดยกำหนดรัศมีความโค้ง  $R_c = 10 \text{ mm}$  ตามรูปด้านล่าง

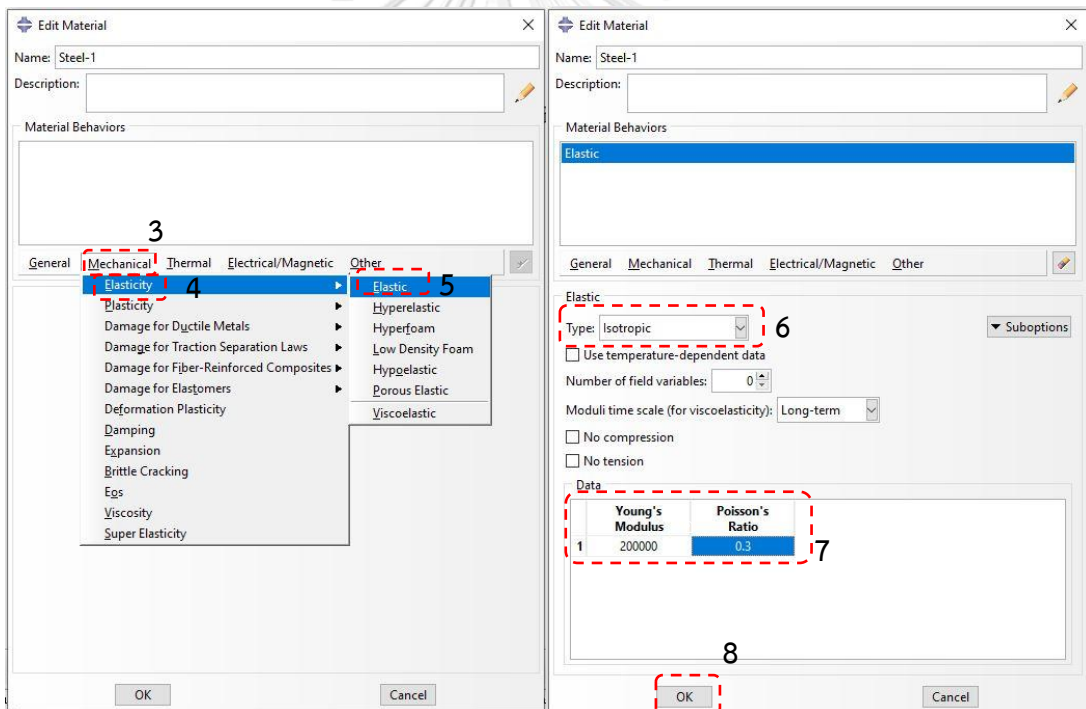




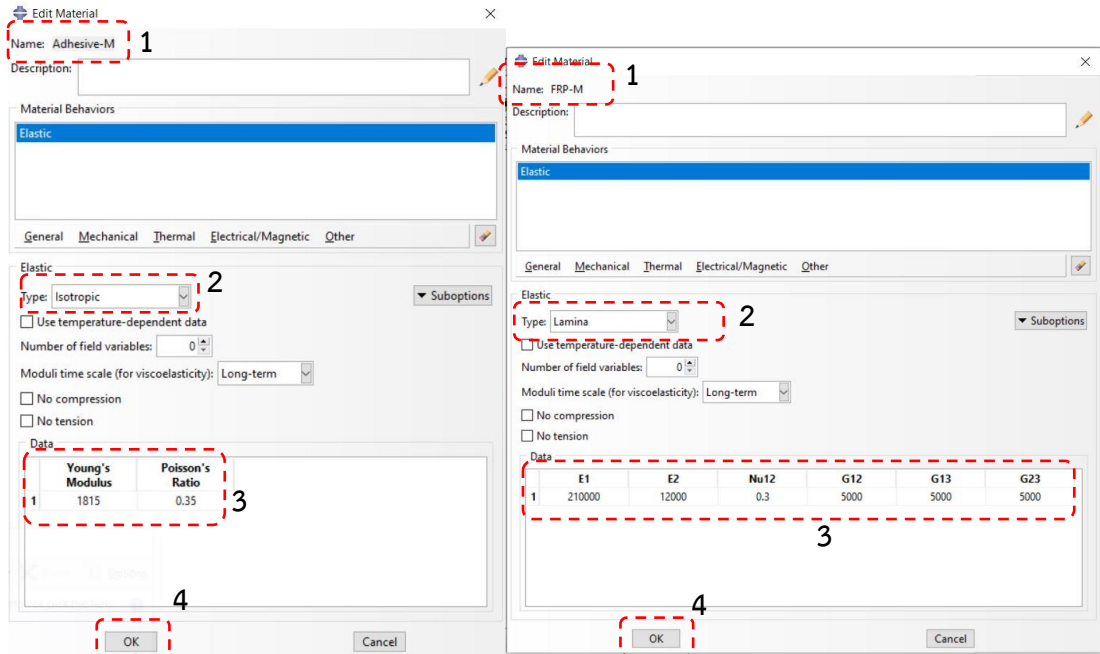
## 12. สร้างคุณสมบัติของวัสดุ (Create Material)



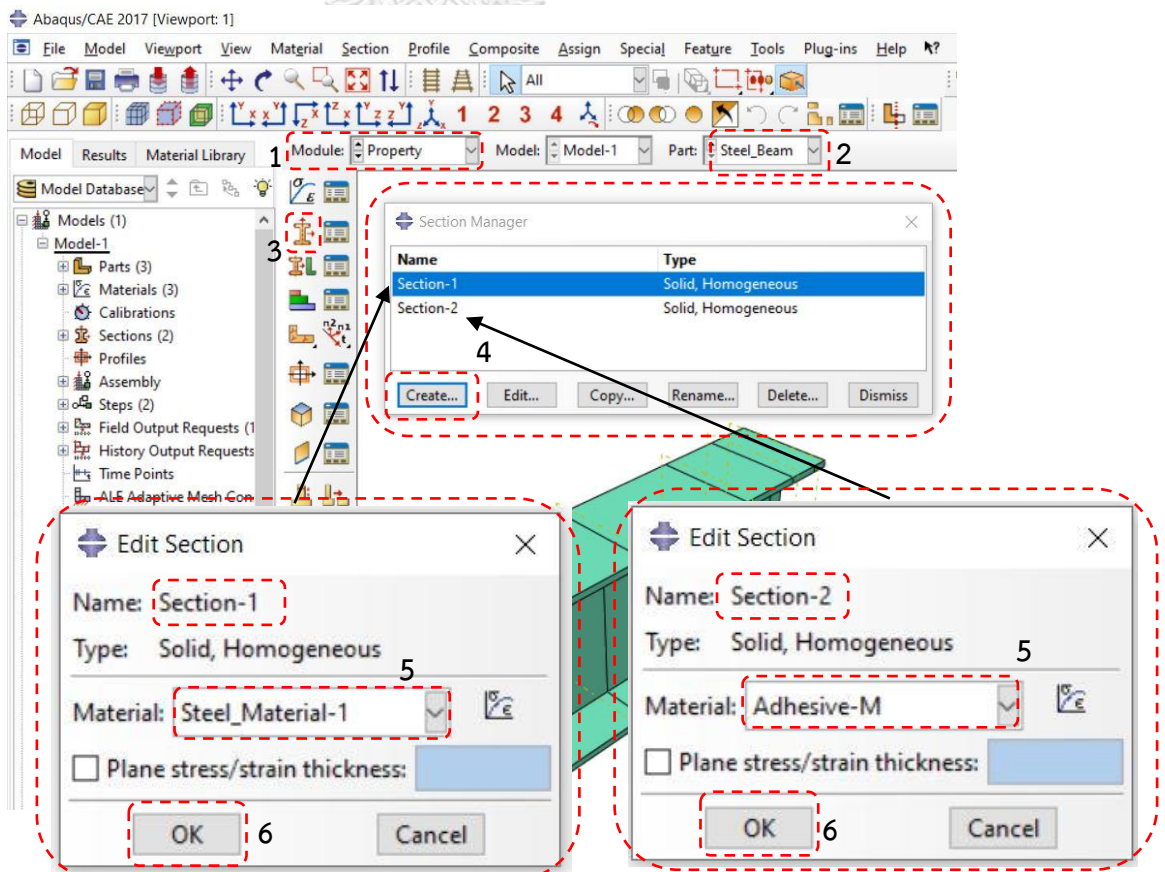
### 12.1 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ ของคานเหล็ก



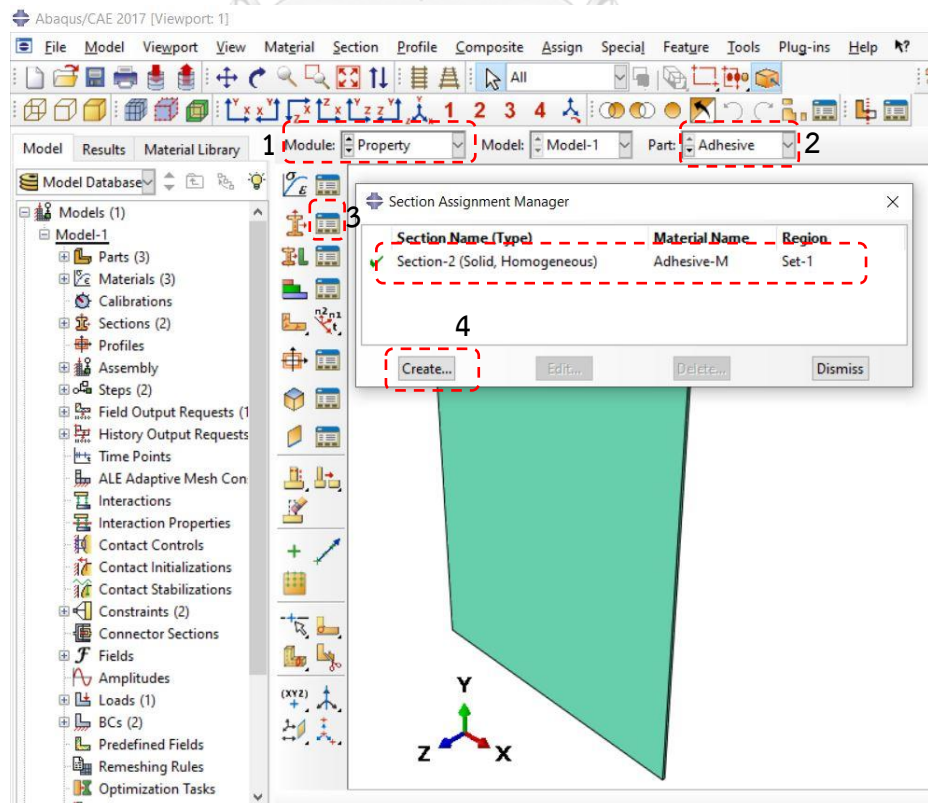
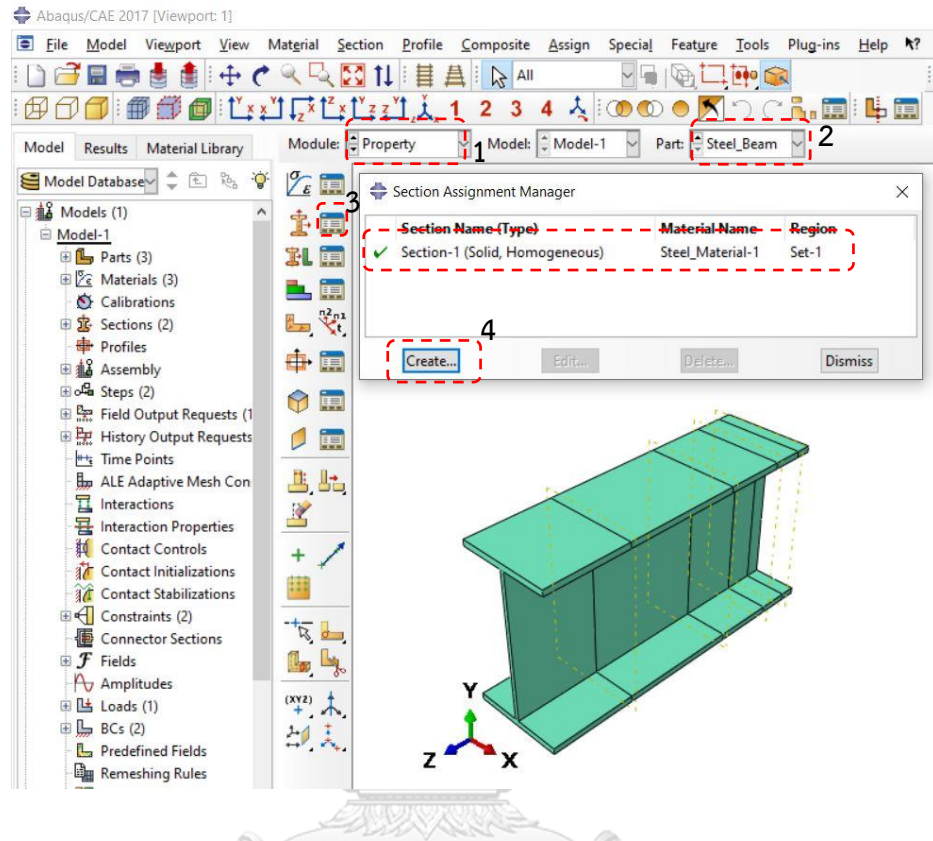
### 12.2 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุของชั้นกาวและแผ่นปะ FRP



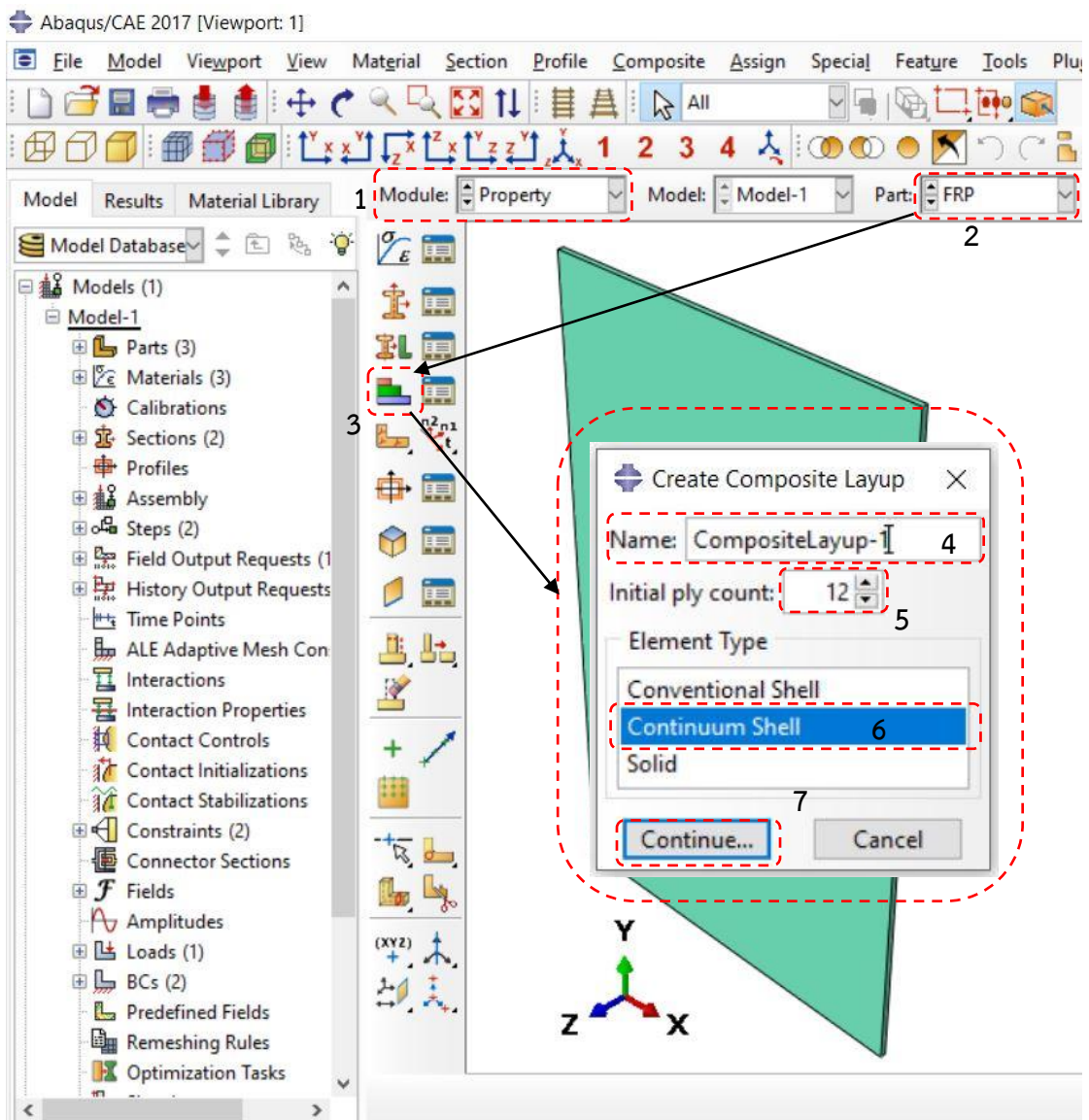
13. หลังจากที่เราสร้างคุณสมบัติทั้งสามชนิดแล้วให้ทำการเลือกใช้คุณสมบัติของวัสดุดังนี้ โดยใช้คำสั่ง Create Section กดปุ่ม Create



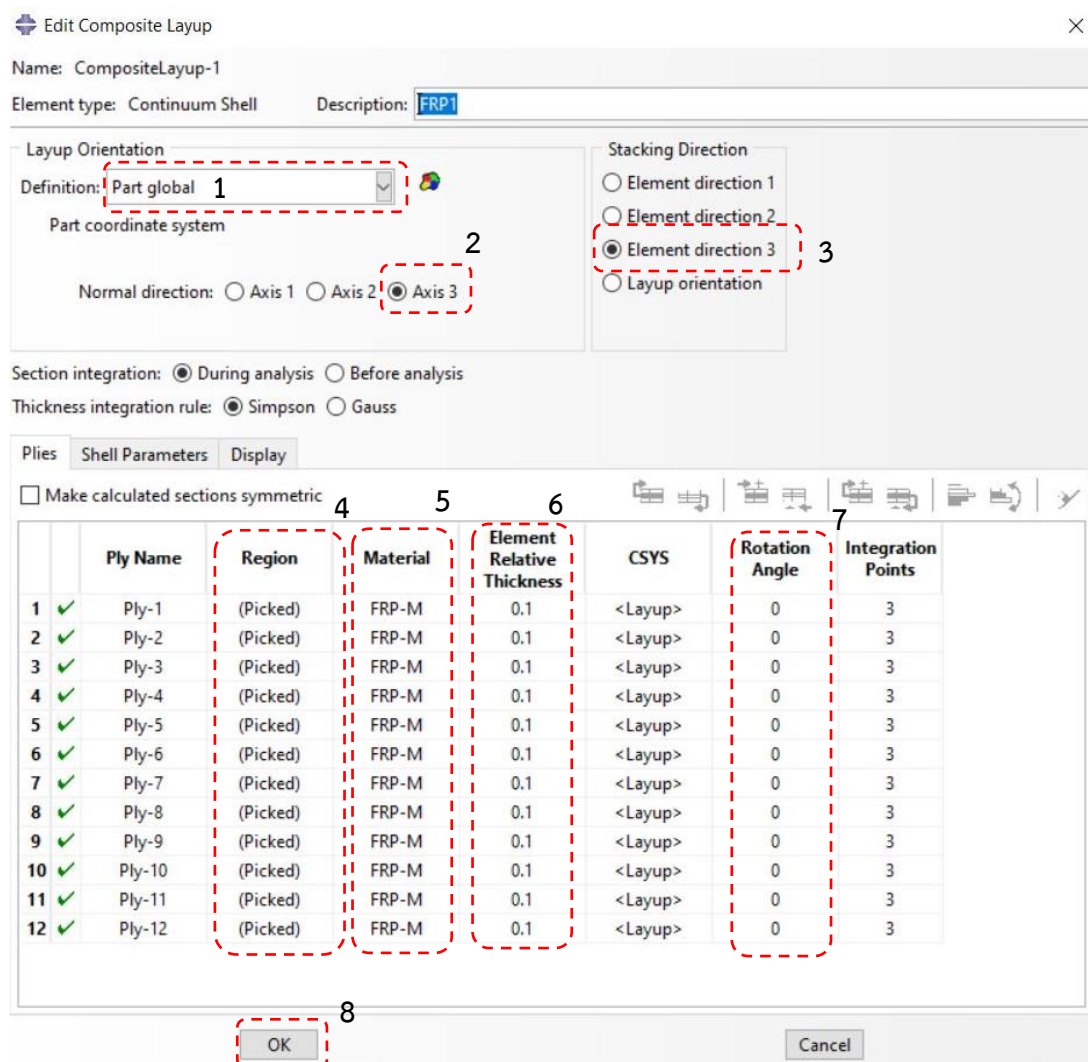
14. หลังจากทำขั้นตอนที่ 13 เสร็จแล้วจึงจะมากำหนดคุณสมบัติใส่ไปในคอนหลักและชั้นกาวยโดยใช้คำสั่ง Assignment Section ตามรูป



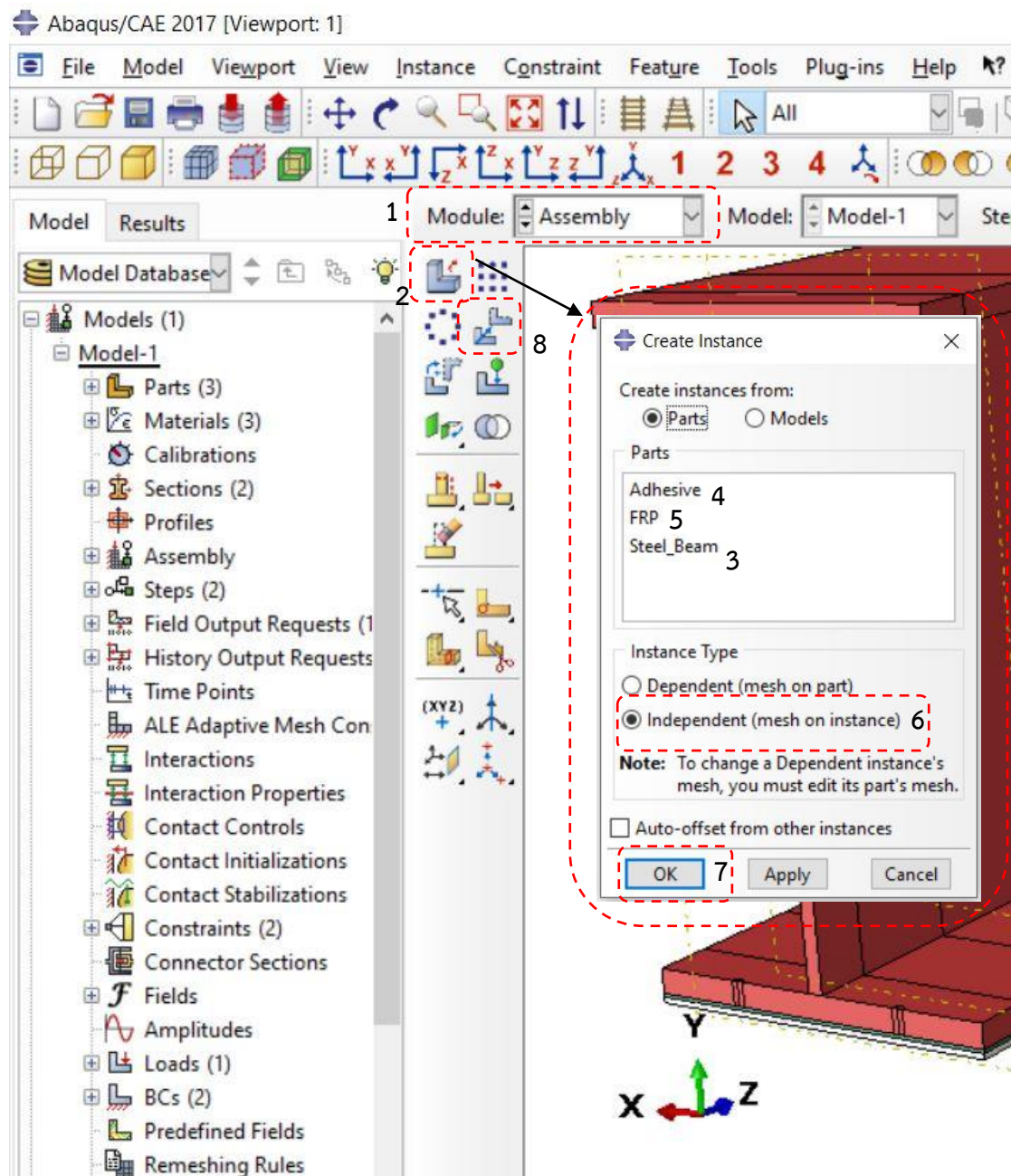
### 15. กำหนดคุณสมบัติให้กับ FRP โดยใช้ คำสั่ง Create Composite layup



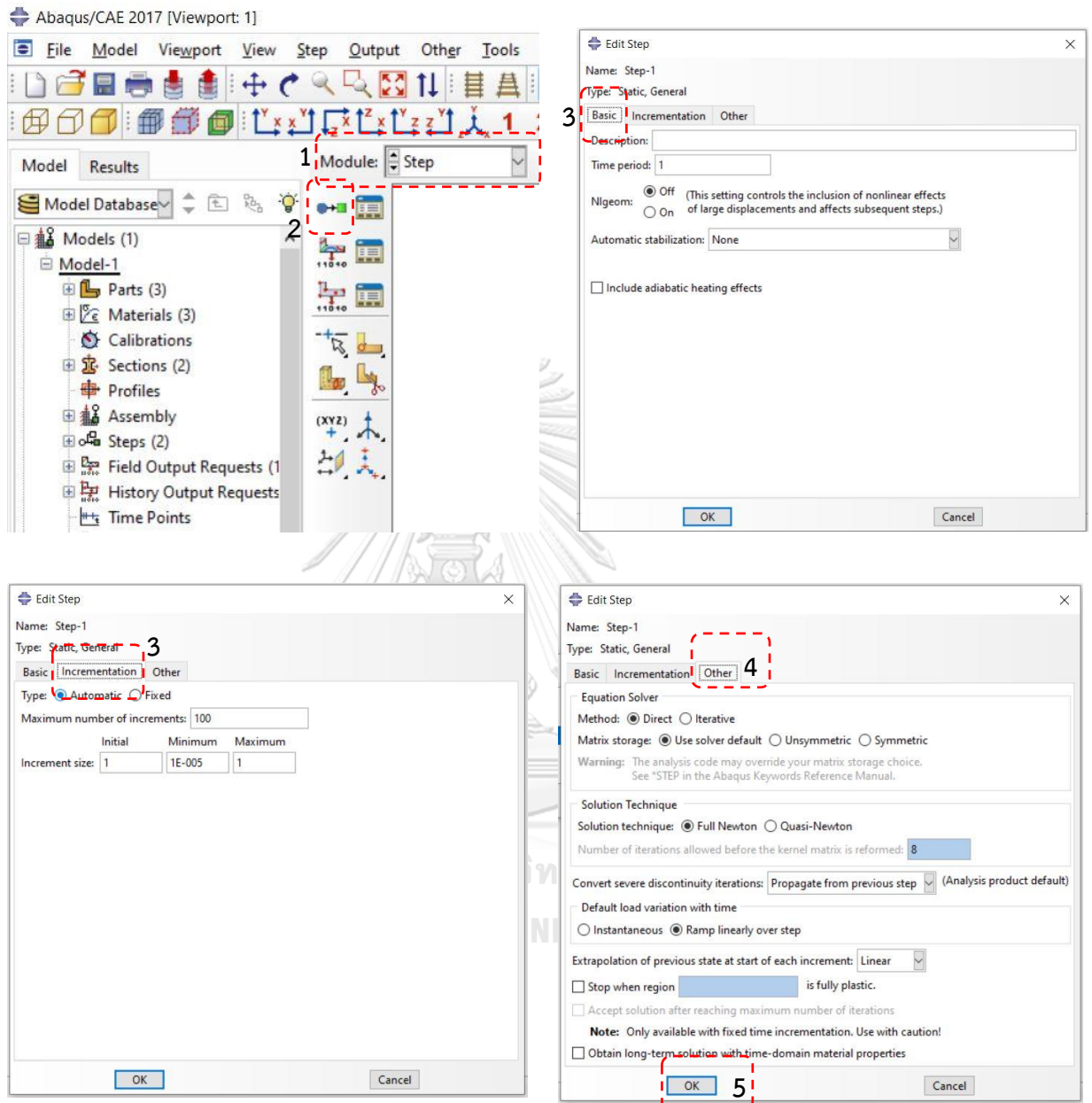
15.1 หลังจากกดปุ่ม Continue... จะมาที่หน้าต่างกำหนดคุณสมบัติของ FRP โดยขั้นแรกคลิกไปที่ Region ก่อนและนำมาเมาส์ไปเลือกแบบจำลองแผ่น FRP ที่หน้าจอ ทำจนครบ ต่อมาเลือกที่ Material เลือกคุณสมบัติ FRP ของเรา ต่อมากำหนดชั้น Element Relative Thickness =0.1 และสุดท้ายปรับ Rotation Angle = 0 ในส่วนนี้สำคัญเพราะมีผลกับค่า SIF ถ้าแนวเส้นใยหมุนผิดด้านซึ่งผู้สนใจสามารถดูการสร้างแบบจำลองโดยใช้ Composite layup เพิ่มเติมได้จาก YOUTUBE.COM



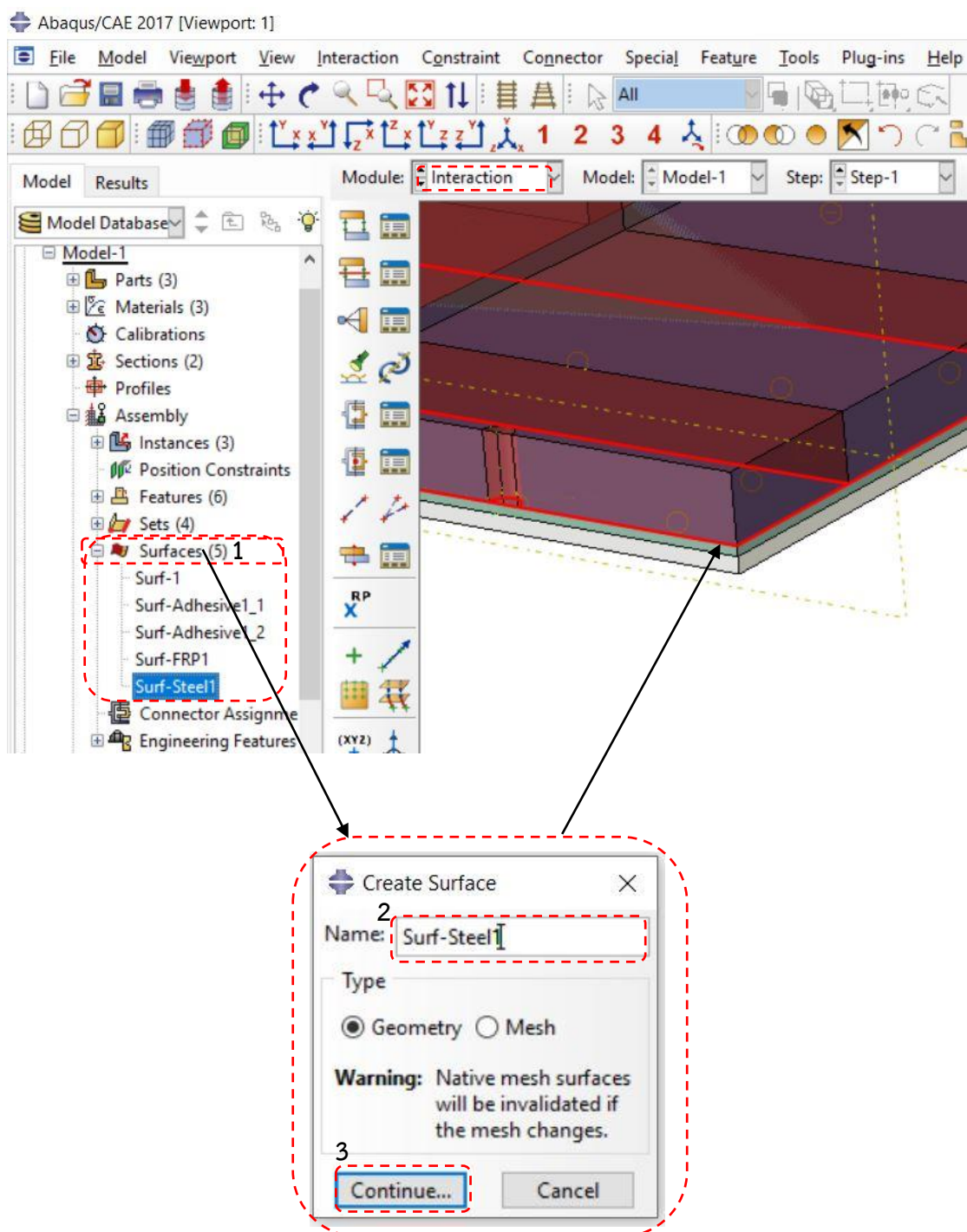
16. หลังจากสร้างคุณสมบัติของวัสดุและกำหนดใช้ตามหัวข้อ 12 ถึง 15 แล้วต่อมาให้นำชิ้นส่วนทั้งสามได้แก่ steel beam adhesive และ FRP มาประกอบกันตามรูปด้านล่าง และการนำชิ้นส่วนทั้งสามมารวมกันให้ได้ตามรูปแบบที่ต้องการนั้นมีหลายวิธีที่ขึ้นอยู่กับความถนัดในแต่ละบุคคลดังนั้นในส่วนของผู้สนใจที่ยังไม่เคยทดลองทำให้ศึกษาจาก WWW.YOUTUBE.COM ก่อนขึ้นแบบจำลองของจริง



17. สร้าง Step

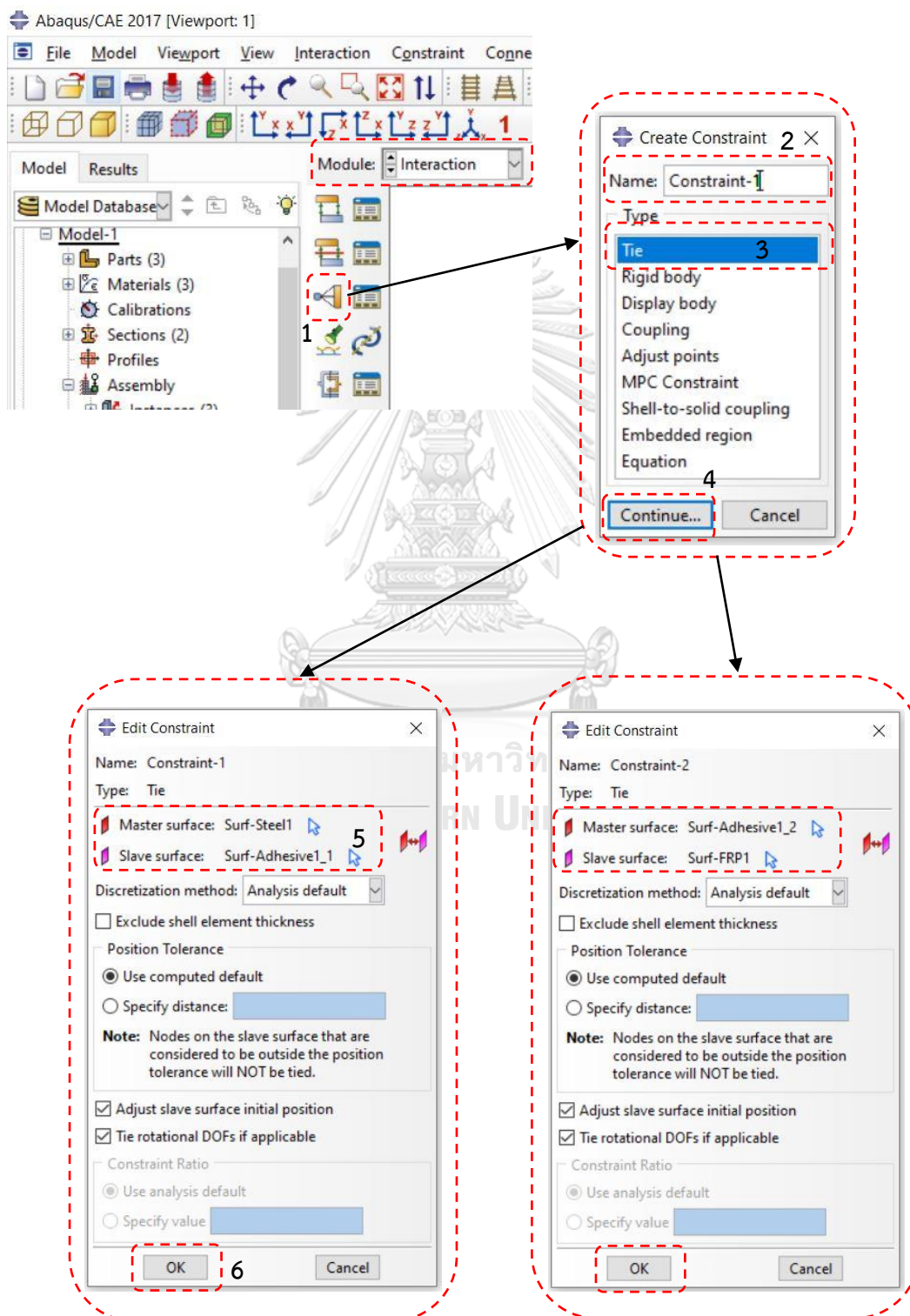


18. สร้างพื้นผิวเพื่อเตรียมทำ tie constraint โดยสร้างทั้งหมด 4 ผิวโดยคลิกขวาที่หัวข้อ Surfaces และเลือก Create กำหนดชื่อ Steel1 (พื้นผิวท้องคานเหล็ก) Adhesive1\_1 (พื้นผิวชั้นกาวด้านบน) Adhesive1\_2 (พื้นผิวชั้นกาวด้านล่าง) และ FRP1 (พื้นผิวด้านบนของแผ่นปะ) และเลือกพื้นผิวให้ถูกต้องตามรูปด้านล่าง

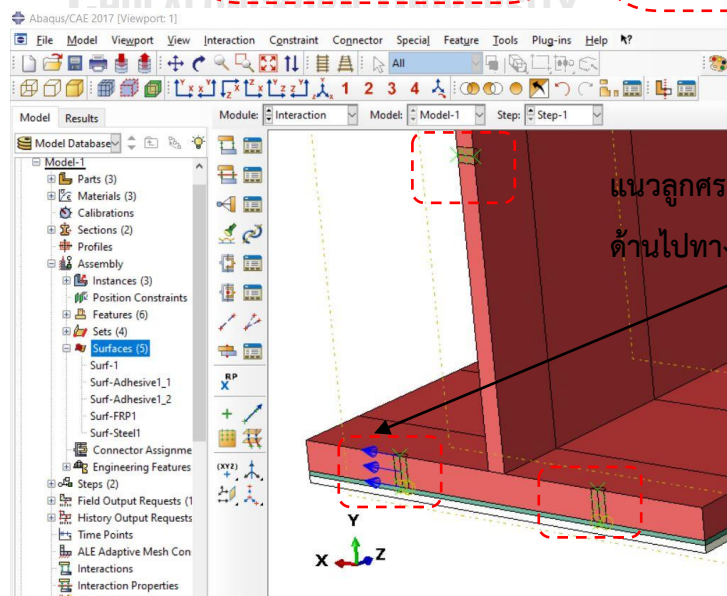
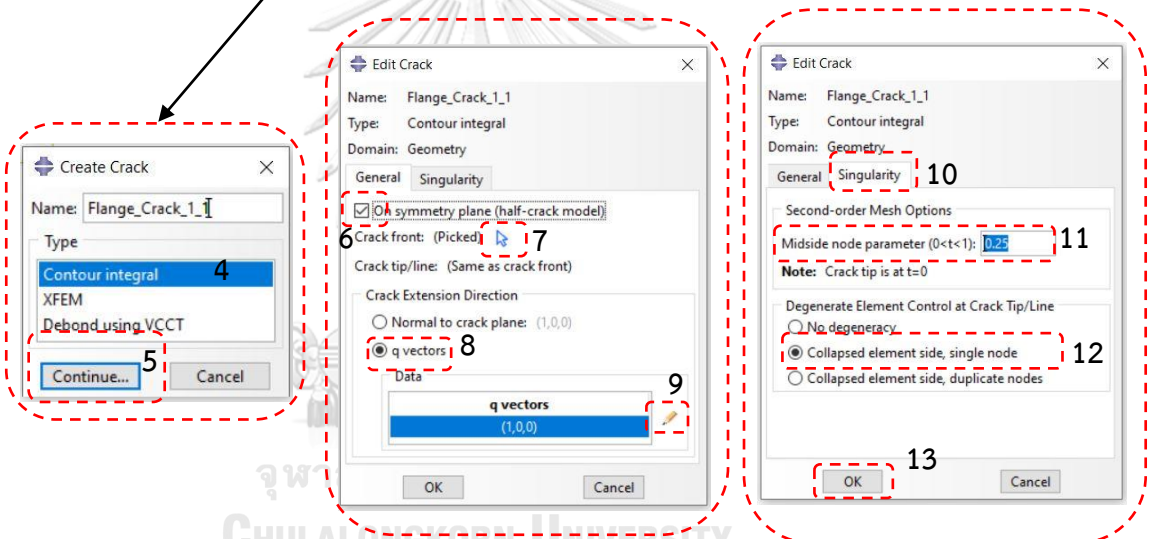
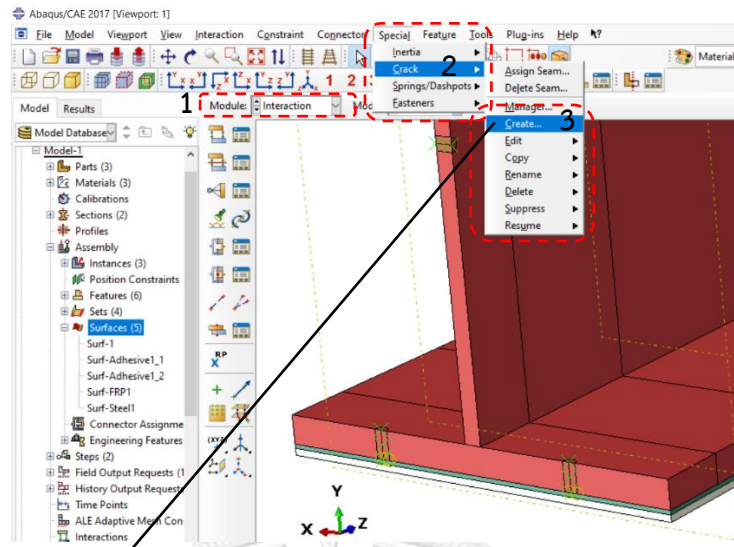




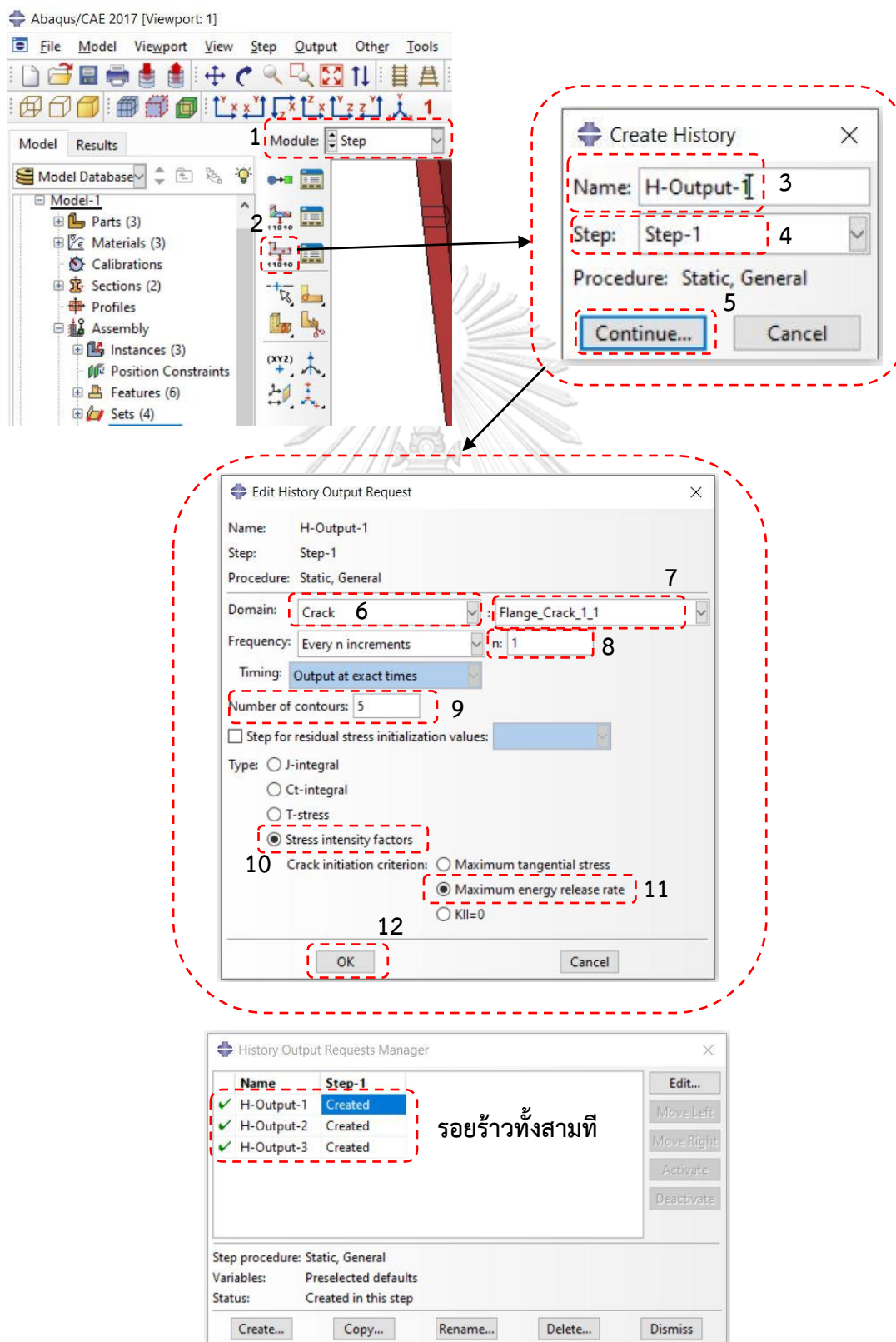
18.1 หลังจากเตรียมพื้นผิวไว้แล้วจะมาถึงขั้นตอนการใช้ tie constraint เพื่อผสานชิ้นส่วนของท้องคานเหล็กกับชั้นกาวด้านบน(constraint-1)และชั้นกาวด้านล่างกับแผ่นปะบน(constraint-2) โดยขั้นตอนตามรูปด้านล่าง



19. กำหนดแนว Crack Front ทั้ง 3 จุด



20. เมื่อกำหนดแนวรอยร้าว(Crack Front) ทั้งสามจุดเสร็จแล้ว ให้ไปกำหนดให้แสดงผลการวิเคราะห์ SIF (output) ของทั้งสามรอยร้าว เมื่อขั้นตอนตามรูปด้านล่าง



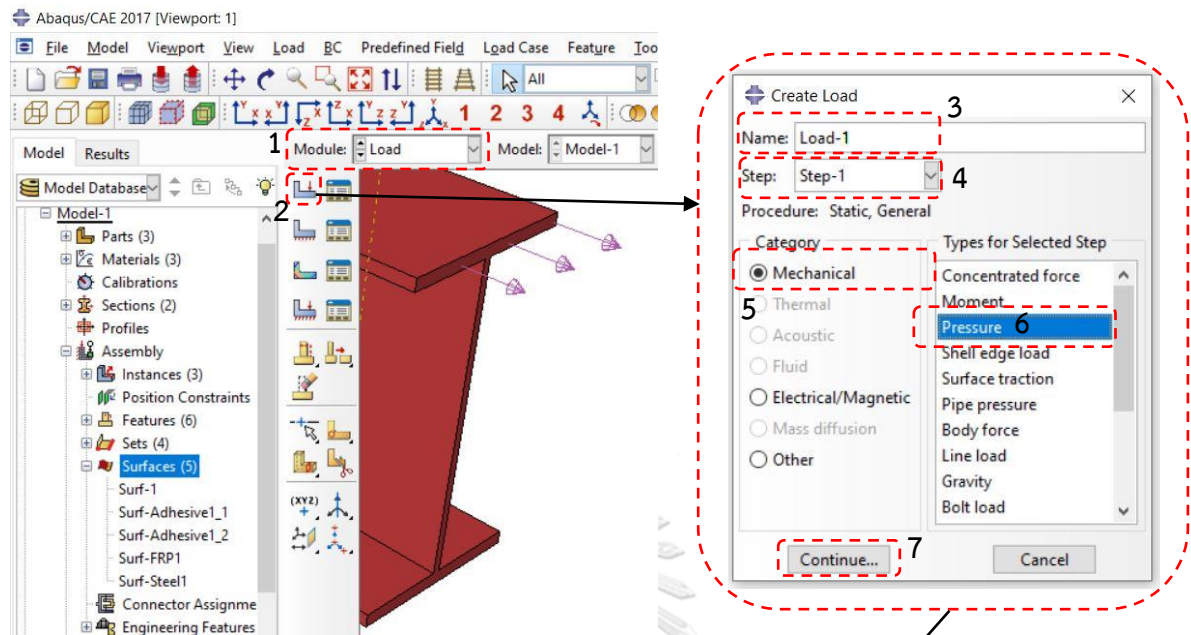
รอยร้าวทั้งสามที่

21. กำหนดจุดรองรับ (boundary conditions) กำหนดสมมาตรแกน Z ที่คานเหล็กไม่รวมบริเวณที่เป็นรอยร้าว (BC-1) และ ชั้นกาวกับแผ่นปะ (BC-2) ตามขั้นตอนด้านล่าง

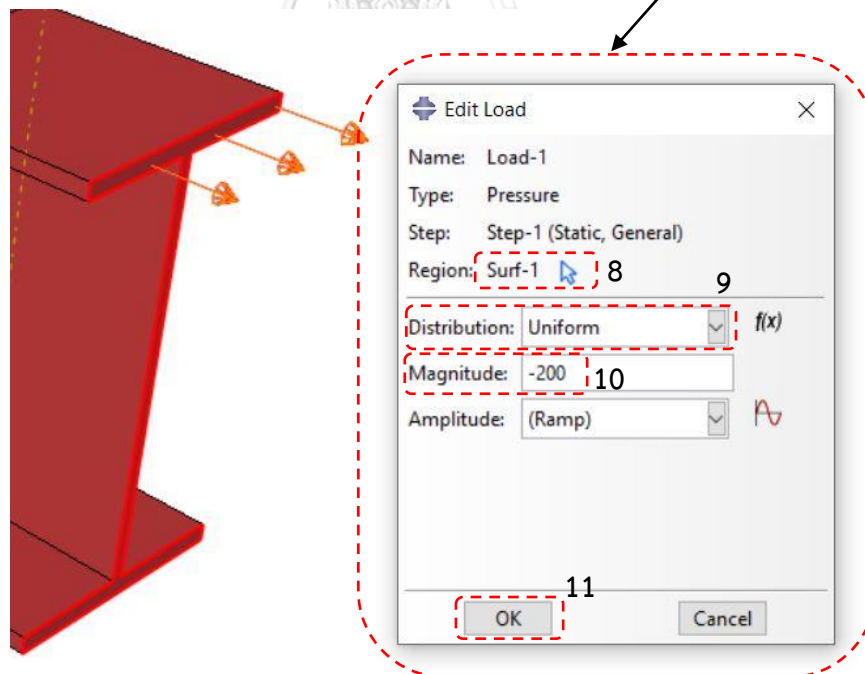
The image illustrates the process of defining boundary conditions in Abaqus/CAE 2017. It consists of three main parts:

- Initial Setup:** The top-left screenshot shows the Abaqus/CAE 2017 interface. The 'Model Database' on the left lists 'Surfaces (5)'. The 'Module' is set to 'Load'. A 3D viewport shows a model with blue supports. Red dashed boxes and callouts 1-4 indicate the initial steps.
- Create Boundary Condition:** The top-right dialog box, 'Create Boundary Condition', is shown. It is for 'Step-1' with 'Procedure: Static, General'. The 'Name' is 'BC-1' (callout 3). The 'Category' is 'Mechanical' (callout 5). Under 'Types for Selected Step', 'Symmetry/Antisymmetry/Encastre' is selected (callout 6). The 'Continue...' button is highlighted (callout 7).
- Edit Boundary Condition (BC-1):** The middle dialog box, 'Edit Boundary Condition', is for 'BC-1'. The 'Type' is 'Symmetry/Antisymmetry/Encastre'. The 'Region' is 'Set:1' (callout 8). Under 'CSYS: (S1ciba.1)', 'ZSYMM (U3 = UR1 = UR2 = 0)' is selected (callout 9). The 'OK' button is highlighted (callout 10).
- Edit Boundary Condition (BC-2):** The bottom dialog box, 'Edit Boundary Condition', is for 'BC-2'. The 'Type' is 'Symmetry/Antisymmetry/Encastre'. The 'Region' is 'Set:2' (callout 10). Under 'CSYS: (Global)', 'ZSYMM (U3 = UR1 = UR2 = 0)' is selected (callout 11). The 'OK' button is highlighted (callout 12).

22. กำหนดแรงกระทำ (create force)



22.1 กรณีกำหนดเป็นหน่วยแรงดึง = -200 MPa



22.2 กรณีกำหนดเป็นหน่วยแรงตัด = 200 MPa

1 Name: Load-1

2 Step: Step-1

3 Category: Mechanical

4 Types for Selected Step: Pressure

5 Continue...

6 Distribution: Uniform

7 f(x)

8 Magnitude: 200

9 Name: Moment\_Stress

10 Type: Expression field

11 Continue... Cancel

12 Name: Moment\_Stress

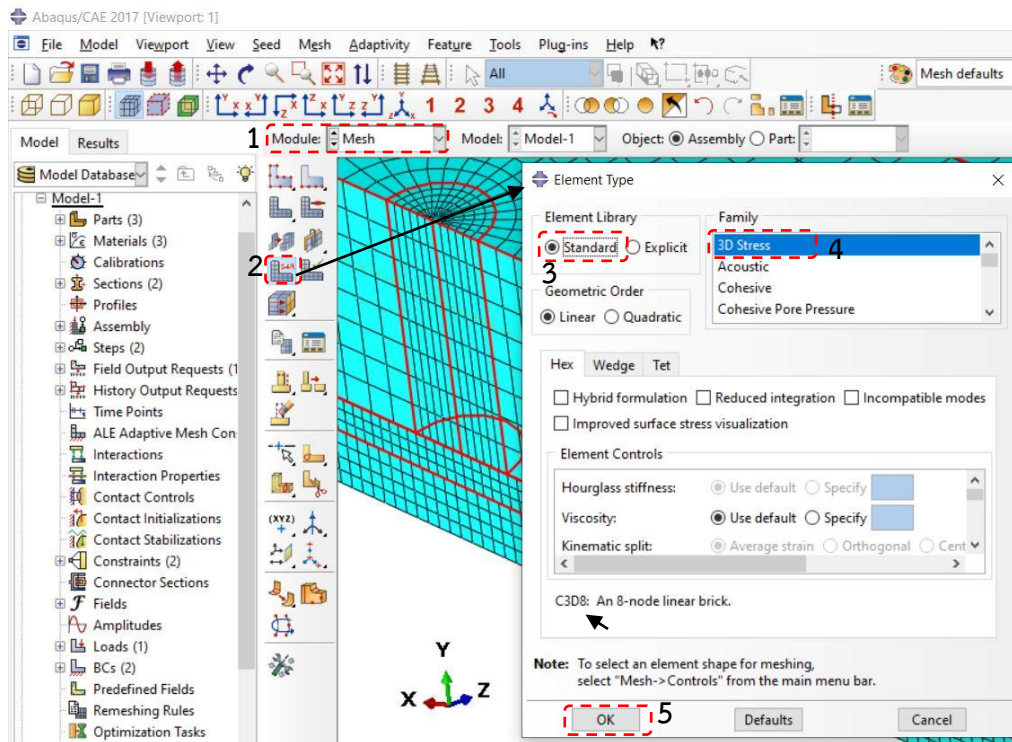
13 Y/271.25

14 OK

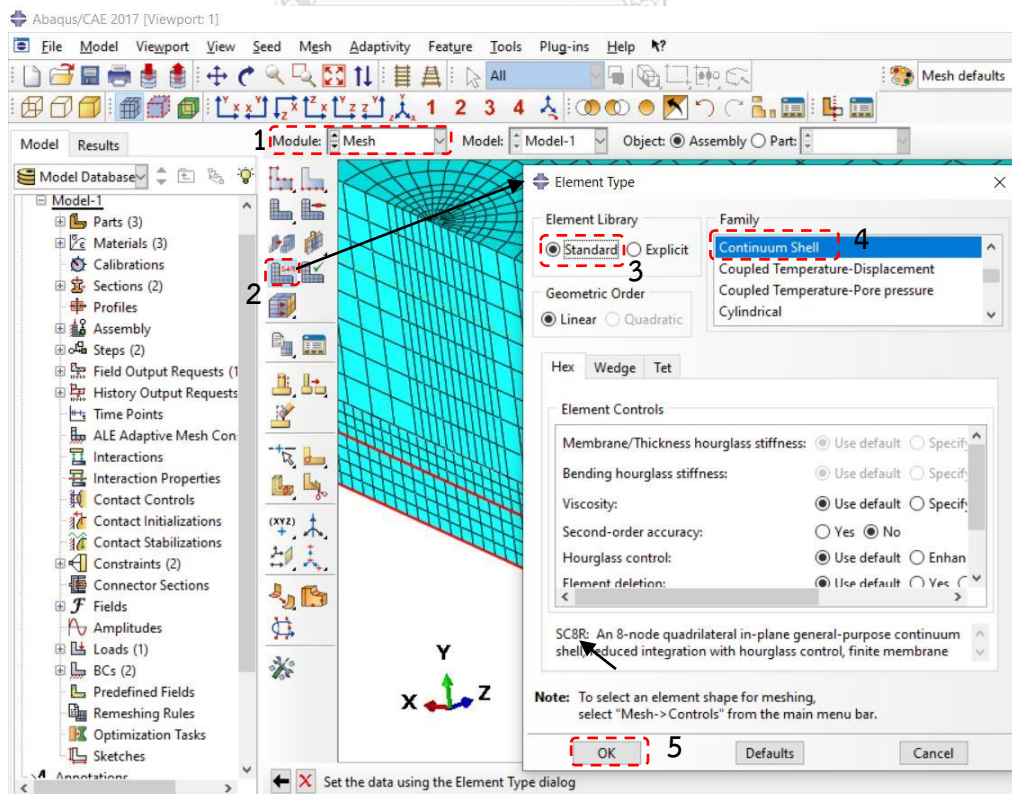
กำหนด Y/271.25  
เมื่อ Y คือ แกนอ้างอิง และ 271.25 มม. คือ ระยะครึ่งหนึ่งของความลึกคานเหล็ก

## 23. กำหนดประเภทของเอลิเมนต์ (assign element type)

## 23.1 ประเภทของเอลิเมนต์คานเหล็กและชั้นกาวเป็น C3D8

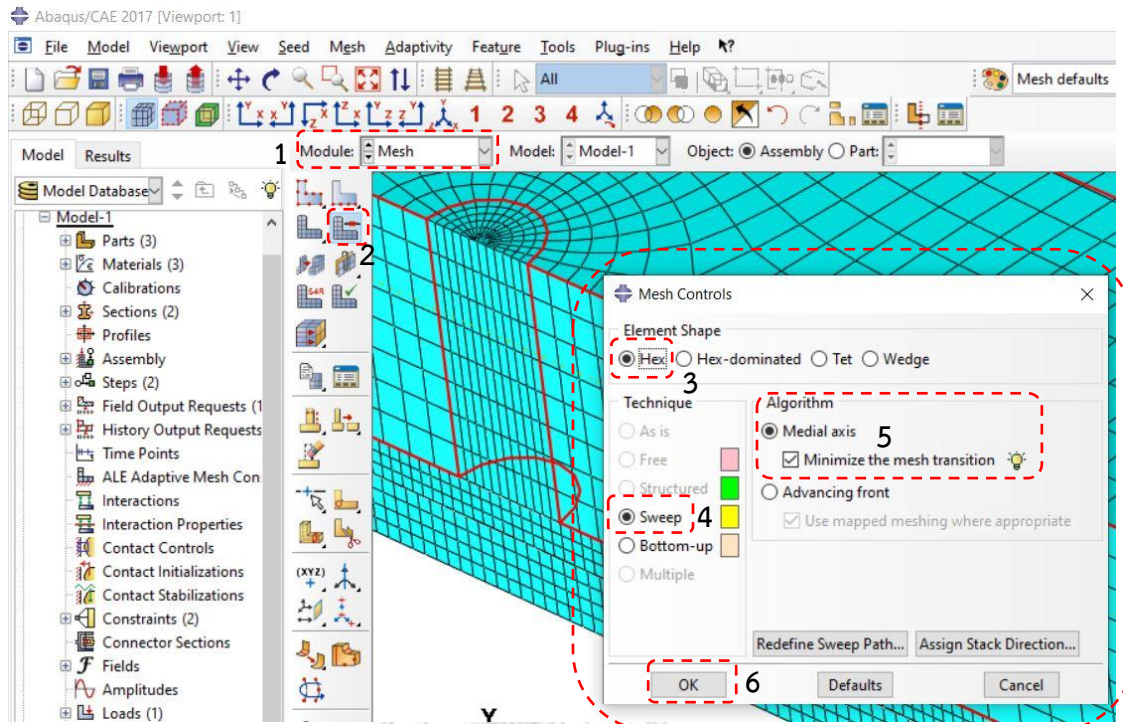


## 23.1 ประเภทของเอลิเมนต์แผ่นปะเป็น SC8R

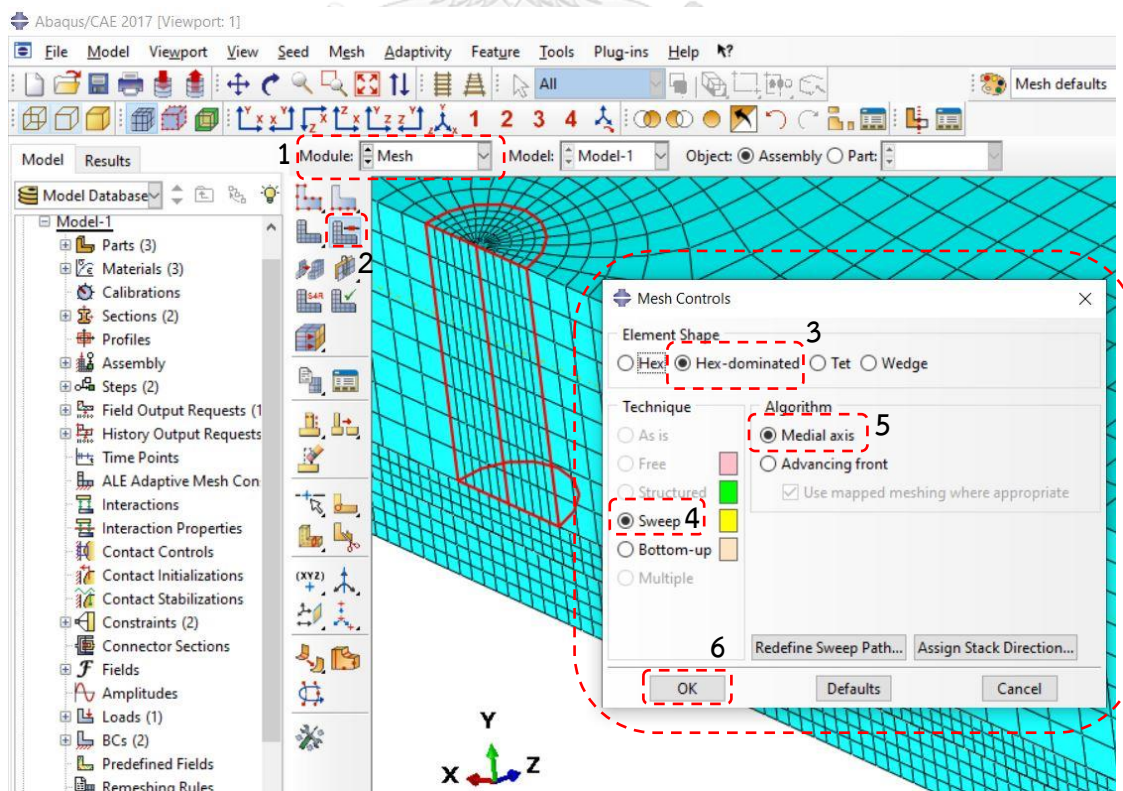


## 24. กำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ (element shape)

### 24.1 คานเหล็กไม่รวมวงด้านในรอยร้าวเป็น Hex(sweep)

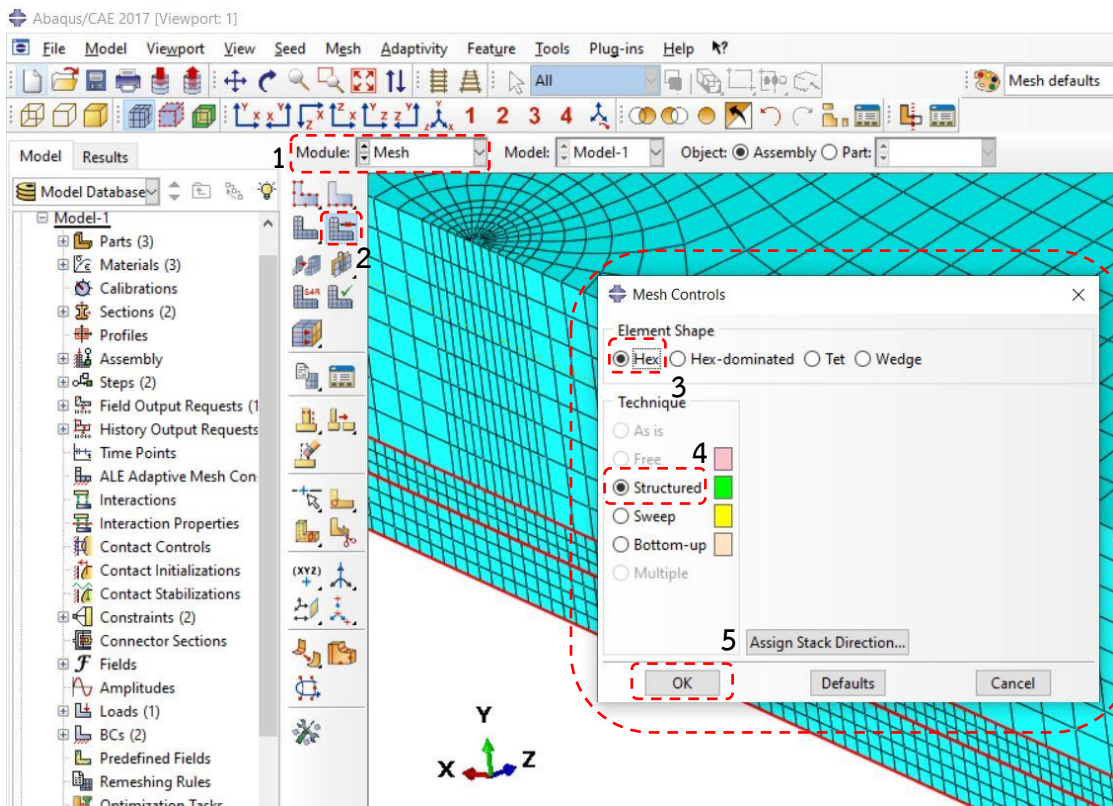


### 24.2 วงรอยร้าวเป็น Hex-dominated(sweep)



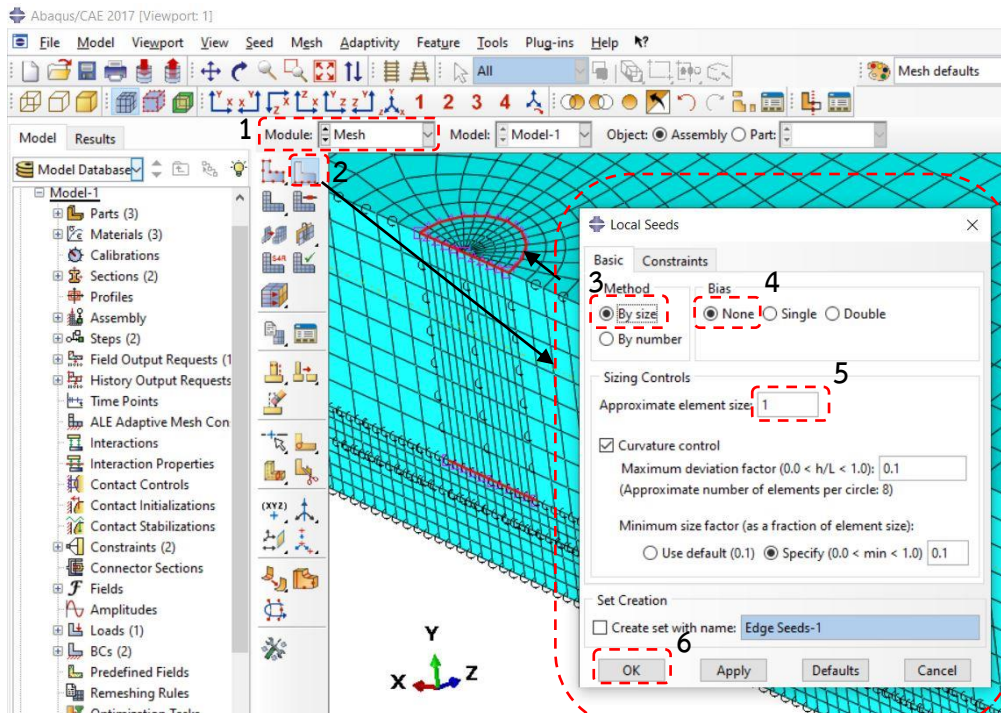


### 24.3 ชั้นกาวและแผ่นปะเป็น Hex(structured)

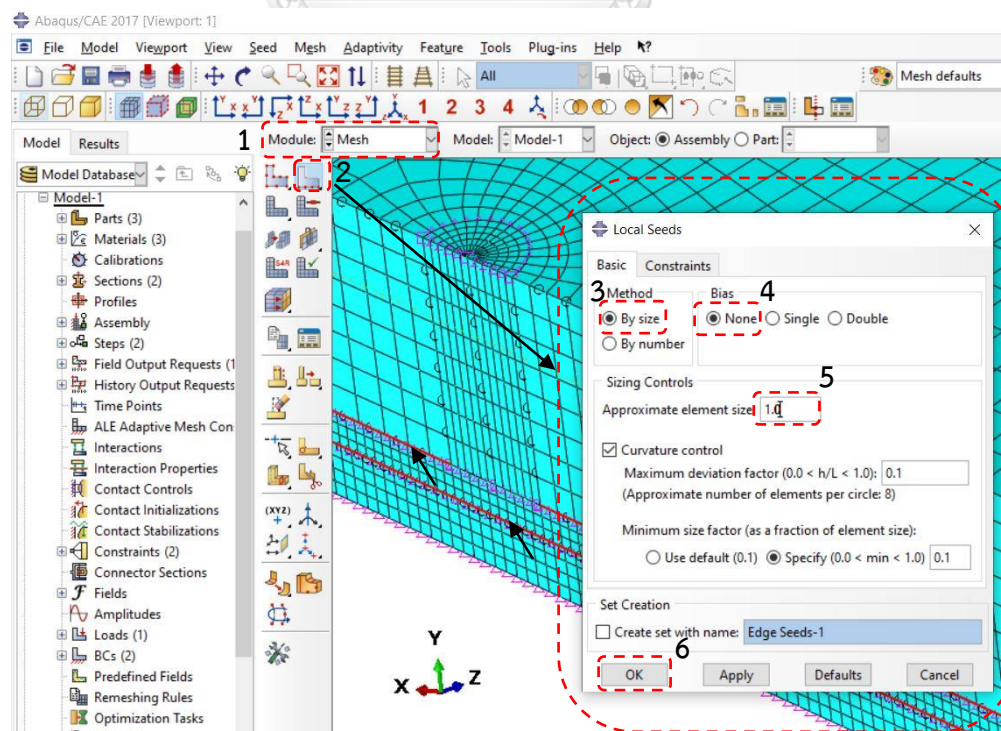


## 25 กำหนดขนาดเอลิเมนต์ (Element size)

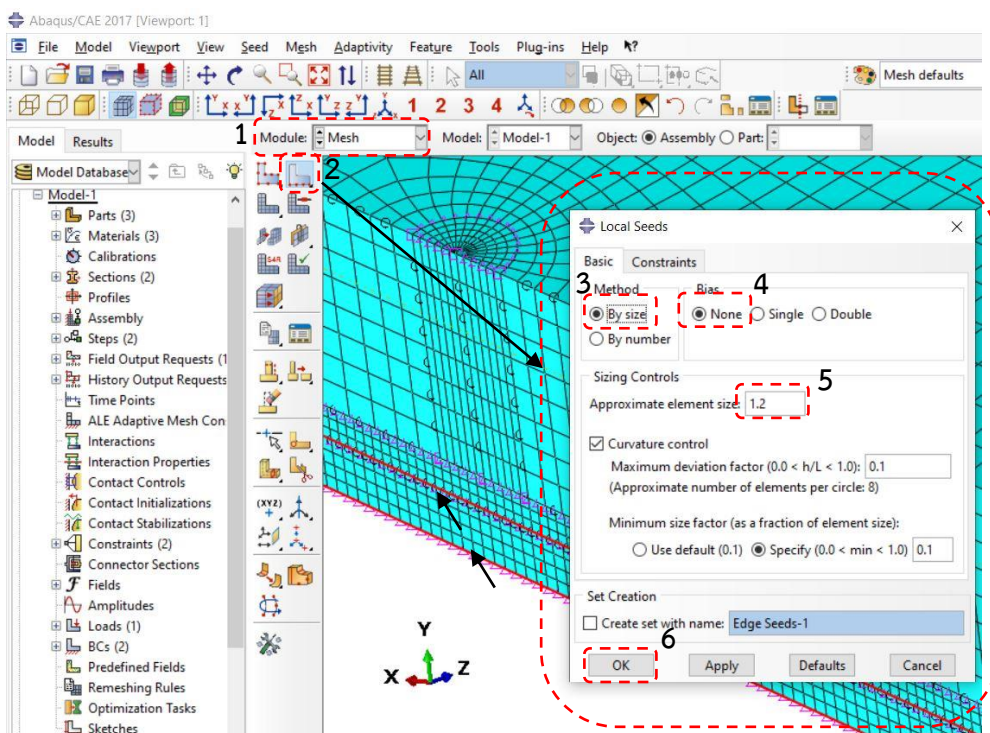
### 25.1 ขนาดเอลิเมนต์วงรอบรอยร้าว = 1 มม.



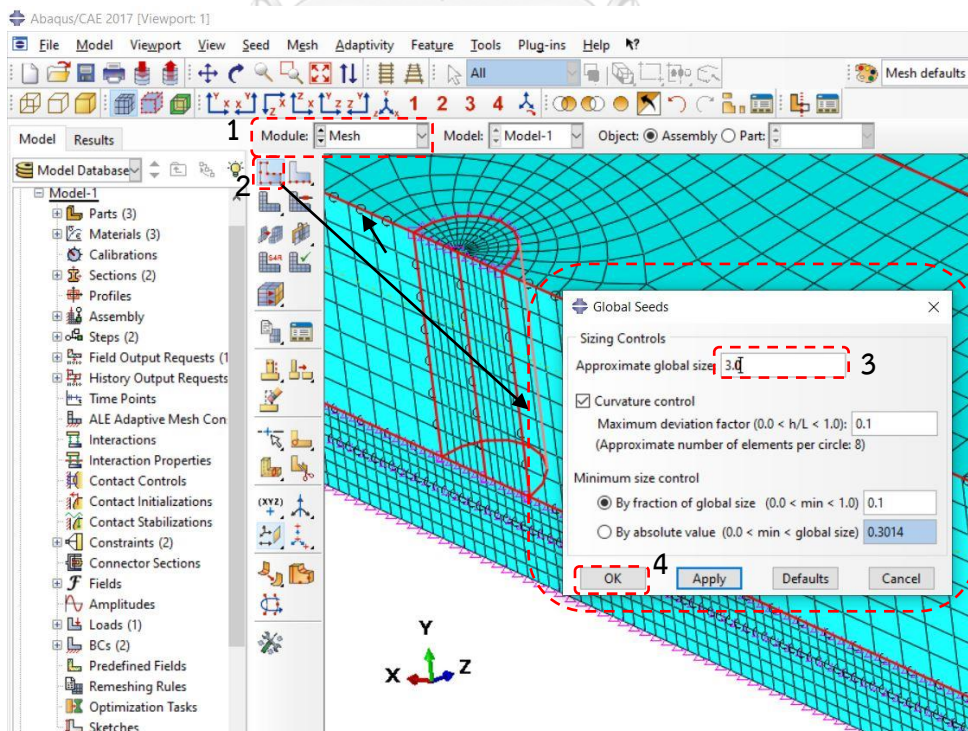
### 25.2 ขนาดเอลิเมนต์ของชั้นกาว = 1 มม.



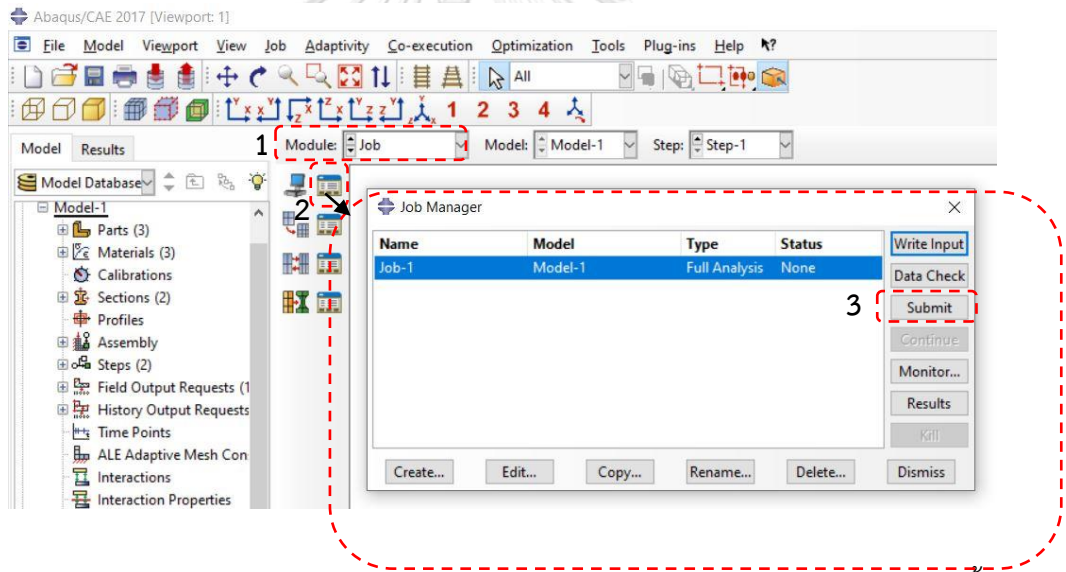
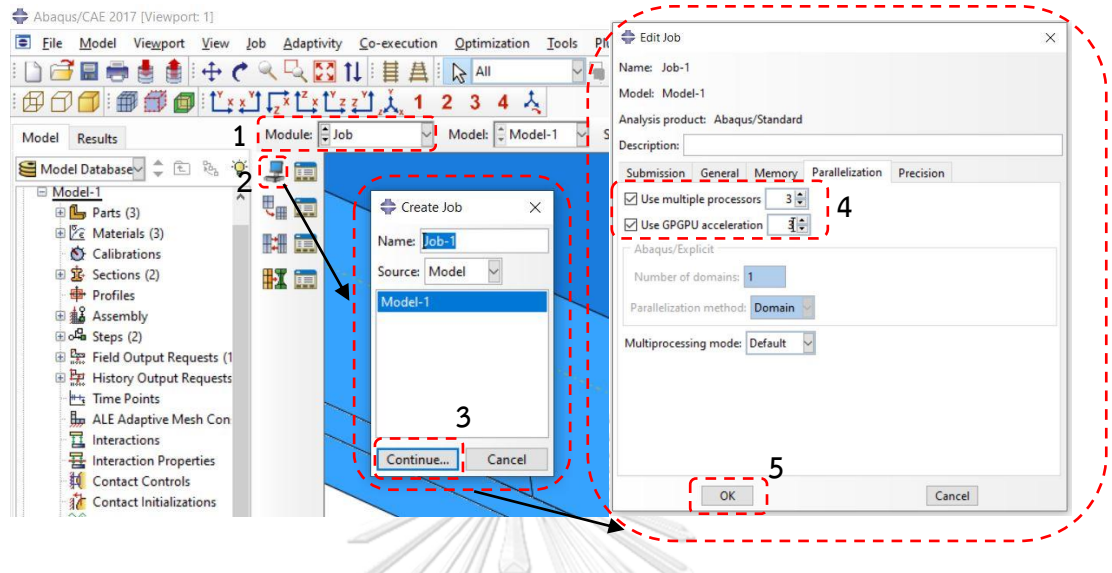
25.3 ขนาดเอลิเมนต์ของแผ่นปะ = 1.2 มม.



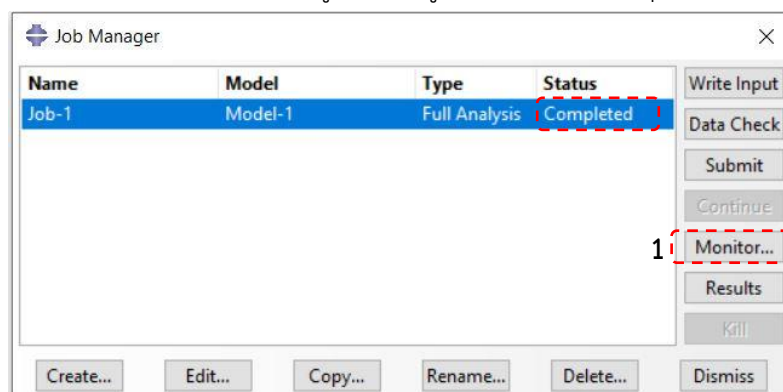
25.3 ขนาดเอลิเมนต์ของคานเหล็กส่วนอื่นๆ = 3.0 มม.



26. สร้าง job และกดเริ่มวิเคราะห์แบบจำลอง



เมื่อกดปุ่ม Submit ให้รอโปรแกรมวิเคราะห์จนกว่าช่องสถานะ(Status) จากคำว่า None ให้ขึ้นคำว่า Completed แสดงว่าผลวิเคราะห์เสร็จสมบูรณ์ ตามรูปด้านล่าง และกดปุ่ม Monitor ดูผลวิเคราะห์



## 27. ผลวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นด้วยโปรแกรม ABAQUS

### 27.1 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่เอว

Job-1 Monitor

Job: Job-1 Status: Completed

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	0	1	1	1	1	1

Log Errors ! Warnings Output **Data File** Message File Status File

H-OUTPUT-3\_WEB\_CRACK\_1\_1

SIF at outer edge

-15- K1: 3301. 3586. 3614 3618 3618  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 49.57 58.51 59.43 59.57 59.57

SIF at middle thickness web

-16- K1: 3388. 3672. 3700. 3708. 3711  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 52.23 61.35 62.30 62.55 62.67

SIF at outer edge

-17- K1: 3470. 3763. 3789. 3792. 3791  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 54.78 64.44 65.32 65.41 65.39

-18- K1: 3388. 3672. 3700. 3708. 3711  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 52.23 61.35 62.30 62.54 62.67

-19- K1: 3301. 3586. 3614 3618 3618  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 49.57 58.51 59.43 59.57 59.57

Search Text  
 Text to find:   Match case

### 27.2 ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ปีก

Job-1 Monitor

Job: Job-1 Status: Completed

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	0	1	1	1	1	1

Log Errors ! Warnings Output **Data File** Message File Status File

H-OUTPUT-2\_FLANGE\_CRACK\_1\_2

SIF at top layer flange

-47- K1: 2963. 3219. 3244 3247 3247  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 39.94 47.16 47.88 47.97 47.96

SIF at middle thickness flange

-48- K1: 2995. 3246. 3271. 3277. 3281  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 40.81 47.93 48.68 48.87 48.97

-49- K1: 2988. 3240. 3263. 3267. 3268  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 40.63 47.78 48.45 48.55 48.58

-50- K1: 2905. 3151. 3175. 3180. 3181  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 38.39 45.17 45.87 46.01 46.04

-51- K1: 2823. 3061. 3084. 3089. 3090  
 K2: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 K3: 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 MERR DIRECTION (DEG): 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000  
 J from Ks: 36.26 42.64 43.28 43.41 43.45

-52- K1: 2728. 2959. 2982. 2986. 2987

Search Text  
 Text to find:   Match case

## 28. การโหลดข้อมูลแบบจำลองเข้าโปรแกรม ABAQUS

หลังจากที่เราสร้างแบบจำลองด้วยวิธี GUI เสร็จโค้ดต่างๆจะถูกเขียนเข้าไปใน โปรแกรม JetBrains PyCharm Community Edition ที่เปิดค้างไว้ตั้งแต่ขั้นตอนแรกเป็นภาษาไพทอนโดยอัตโนมัติ ในนั้นจะมีรายละเอียดต่างๆตามขั้นตอนที่เราทำมาตั้งแต่ต้นจนท้ายสุด ซึ่งเราสามารถที่จะปรับแก้หรือประกาศตัวแปรไว้สำหรับแก้ไขในอนาคตได้ดังรูปด้านล่าง และดาวน์โหลดได้ตามลิงค์ [https://www.mediafire.com/file/63go14u6quhjgoh/ABAQUS\\_CODE.rar/file](https://www.mediafire.com/file/63go14u6quhjgoh/ABAQUS_CODE.rar/file)

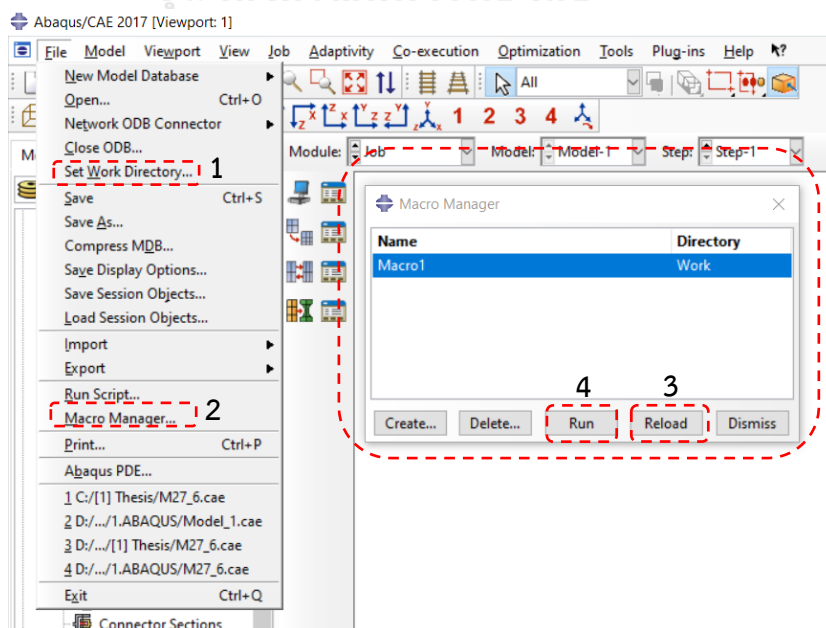
```

#####Defining variables#####
#####
do1,bfo1,tfo1,two1,ars1,rw1,rf1,rp1,ra1,r11,rep1,rup1,real,paal = \
[042.5,312.2,20.3,12.7,6337.66,0.4,0.5,0.236453201970443,0.147783251231527,0.5,1.05,12000,0.3,0.009075,0.35]

#####Geometry of beam W-Shape Section#####
# [1]Total Depth of W-shape [mm]
do = do1
# [2] Width of Flange [mm]
bfo = bfo1
# [3] Thickness of Flange [mm]
tfo = tfo1
# [4] Thickness of Web
two = two1
# [5] Area As [mm^2]
ars = ars1
# [6] Crack Length of Flange to Width of Flange Ratio
rf = rf1
# [7] Crack Length of Web to Depth of Web Ratio
rw = rw1
# [8] Area of FRP to Area Steel Ratio
rp = rp1
# [9] Area of Adhesive to Area Steel Ratio
ra = ra1
# [10] Length of FRP and Adhesive to Length of Beam Ratio
r1 = r11
# [11] Modulus of Elasticity of FRP to Modulus of Elasticity of Steel Beam Ratio
rep = rep1
epp = epp1

```

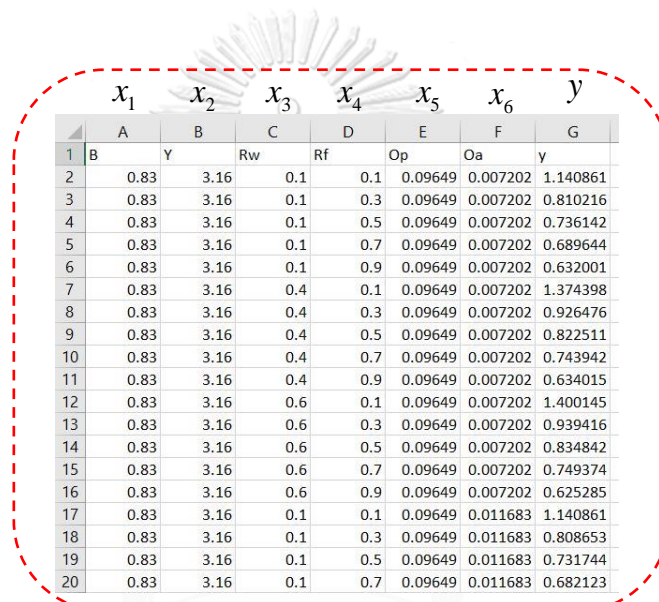
ซึ่งในการนำโค้ดไพทอนไปใช้ในโปรแกรม ABAQUS โดยเลือกที่จัดเก็บไฟล์ และ ไปที่ Macro Manager จากนั้นกดปุ่ม Reload และกด Run โปรแกรมจะเรียกแบบจำลองกลับมาอีกครั้ง



## ภาคผนวก ข การใช้งาน *HeuristicLab*

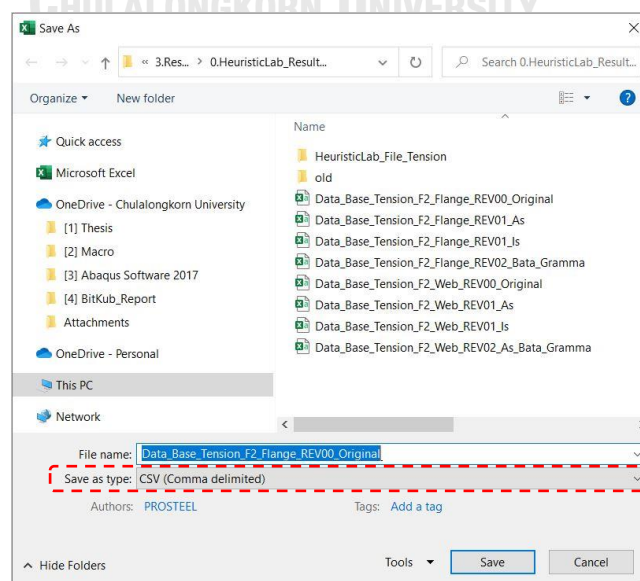
1. ขั้นตอนในการใช้โปรแกรม *HeuristicLab* เพื่อพัฒนาสมการทำนายต่างๆที่สนใจนั้นเริ่มต้นด้วยการเตรียมข้อมูลในโปรแกรม Excel โดยกำหนดผลของตัวแปร  $x_n$  เป็นตัวแปรรองต่างๆที่จะมีผลกระทบต่อตัวแปร  $y$  เมื่อเขียนอยู่ในรูปสมการ  $y = f(x_1, x_2, x_3, x_n)$  เมื่อ  $y$  เป็นสิ่งที่เราจะให้โปรแกรม *HeuristicLab* ทำนายสมการที่เหมาะสมขึ้นนั่นเอง ซึ่งข้อมูลตามรูปด้านล่างเป็นตัวอย่งที่จะใช้ในการอธิบายขั้นตอนการใช้โปรแกรมซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้ตามลิงด้านล่าง

<https://dev.heuristiclab.com>

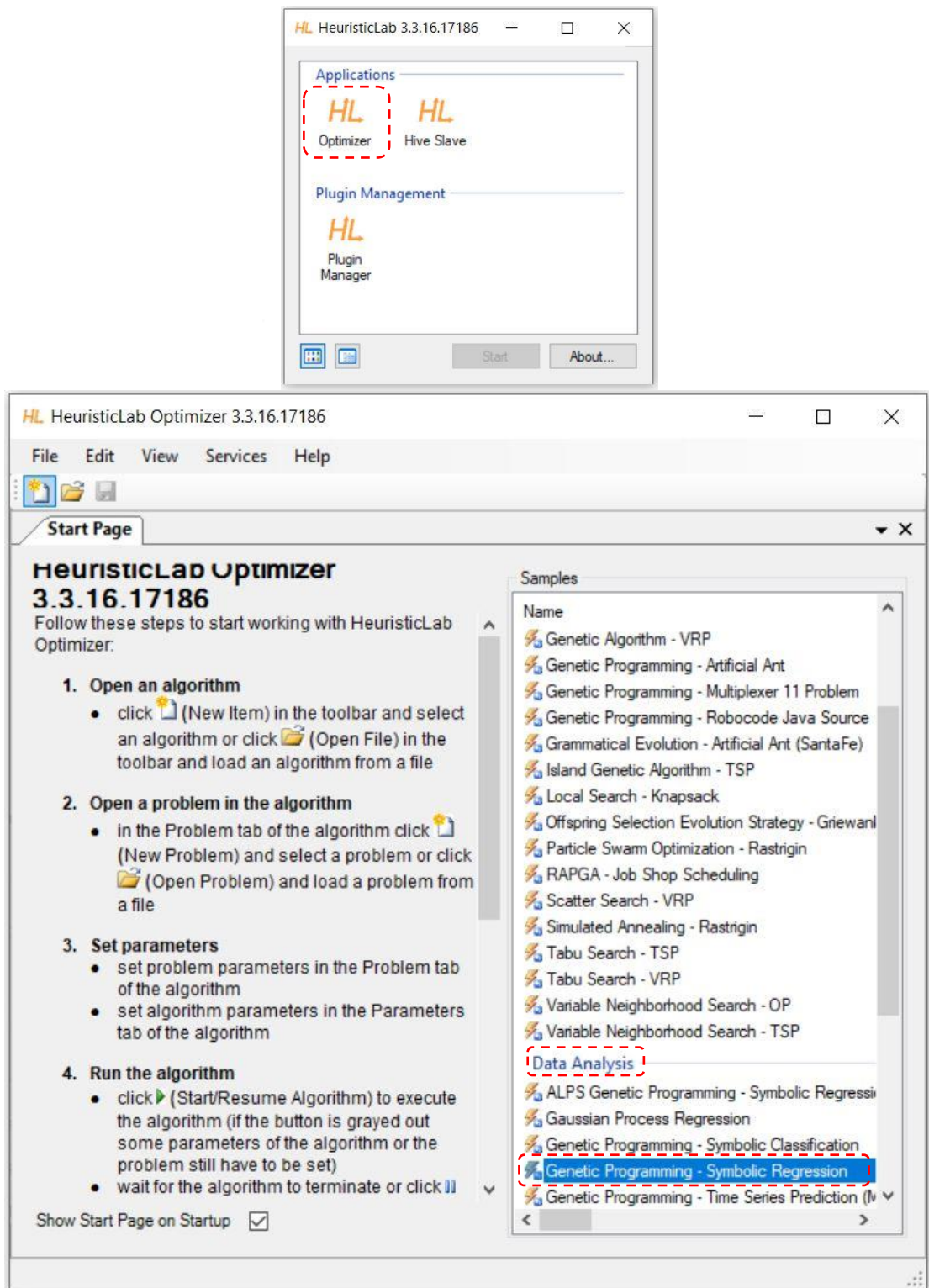


	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$y$
	A	B	C	D	E	F	G
1	B	Y	Rw	Rf	Op	Oa	y
2	0.83	3.16	0.1	0.1	0.09649	0.007202	1.140861
3	0.83	3.16	0.1	0.3	0.09649	0.007202	0.810216
4	0.83	3.16	0.1	0.5	0.09649	0.007202	0.736142
5	0.83	3.16	0.1	0.7	0.09649	0.007202	0.689644
6	0.83	3.16	0.1	0.9	0.09649	0.007202	0.632001
7	0.83	3.16	0.4	0.1	0.09649	0.007202	1.374398
8	0.83	3.16	0.4	0.3	0.09649	0.007202	0.926476
9	0.83	3.16	0.4	0.5	0.09649	0.007202	0.822511
10	0.83	3.16	0.4	0.7	0.09649	0.007202	0.743942
11	0.83	3.16	0.4	0.9	0.09649	0.007202	0.634015
12	0.83	3.16	0.6	0.1	0.09649	0.007202	1.400145
13	0.83	3.16	0.6	0.3	0.09649	0.007202	0.939416
14	0.83	3.16	0.6	0.5	0.09649	0.007202	0.834842
15	0.83	3.16	0.6	0.7	0.09649	0.007202	0.749374
16	0.83	3.16	0.6	0.9	0.09649	0.007202	0.625285
17	0.83	3.16	0.1	0.1	0.09649	0.011683	1.140861
18	0.83	3.16	0.1	0.3	0.09649	0.011683	0.808653
19	0.83	3.16	0.1	0.5	0.09649	0.011683	0.731744
20	0.83	3.16	0.1	0.7	0.09649	0.011683	0.682123

2. หลังจากจัดเรียงข้อมูลเสร็จแล้วทำการบันทึกข้อมูลเป็นสกุลไฟล์ CSV ตามรูปด้านล่าง

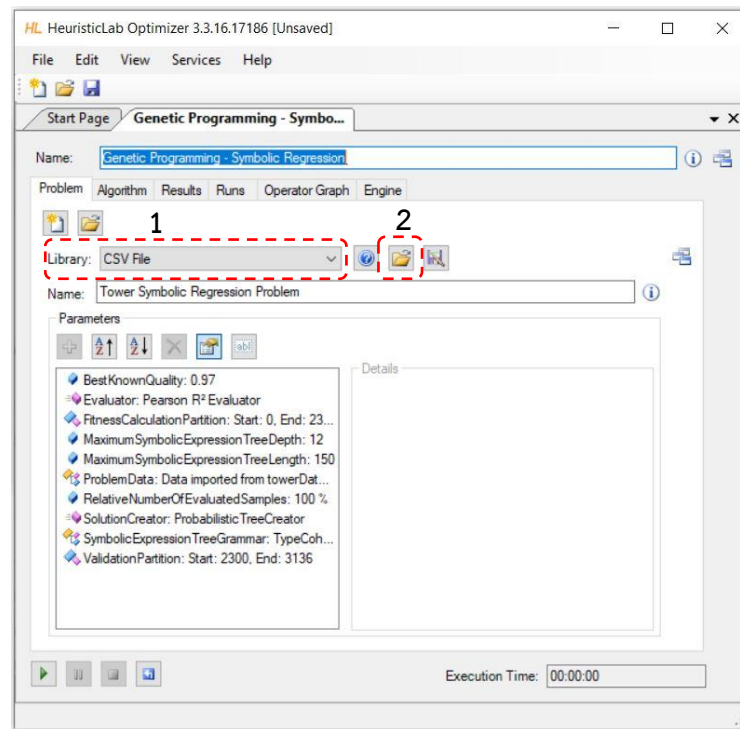


3. เปิดโปรแกรม HeuristicLab เลือกแบบ Optimizer และในหัวข้อ Data Analysis เลือก เป็น Genetic Programming – Symbolic Regression ขั้นตอนตามรูปด้านล่าง

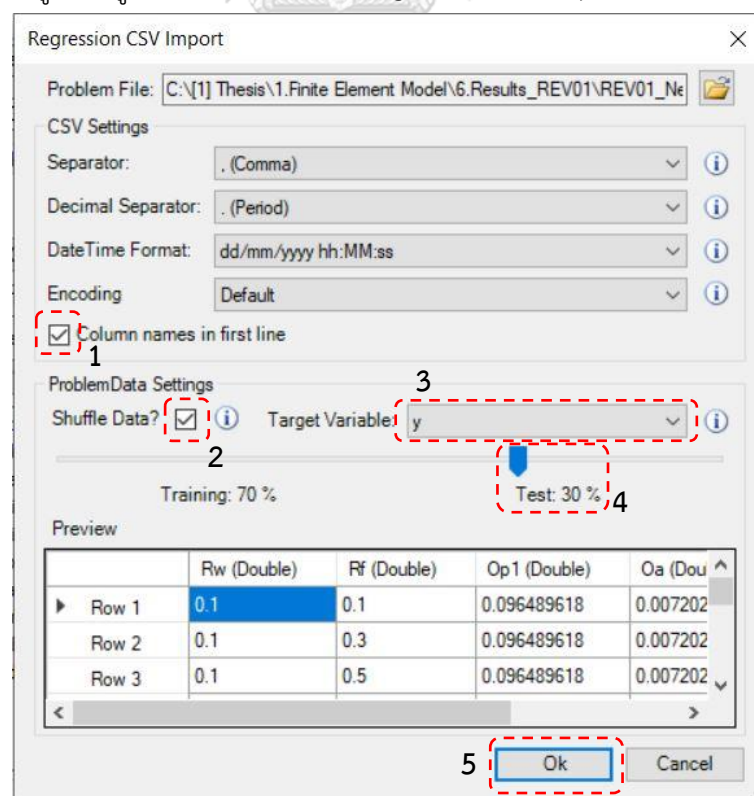




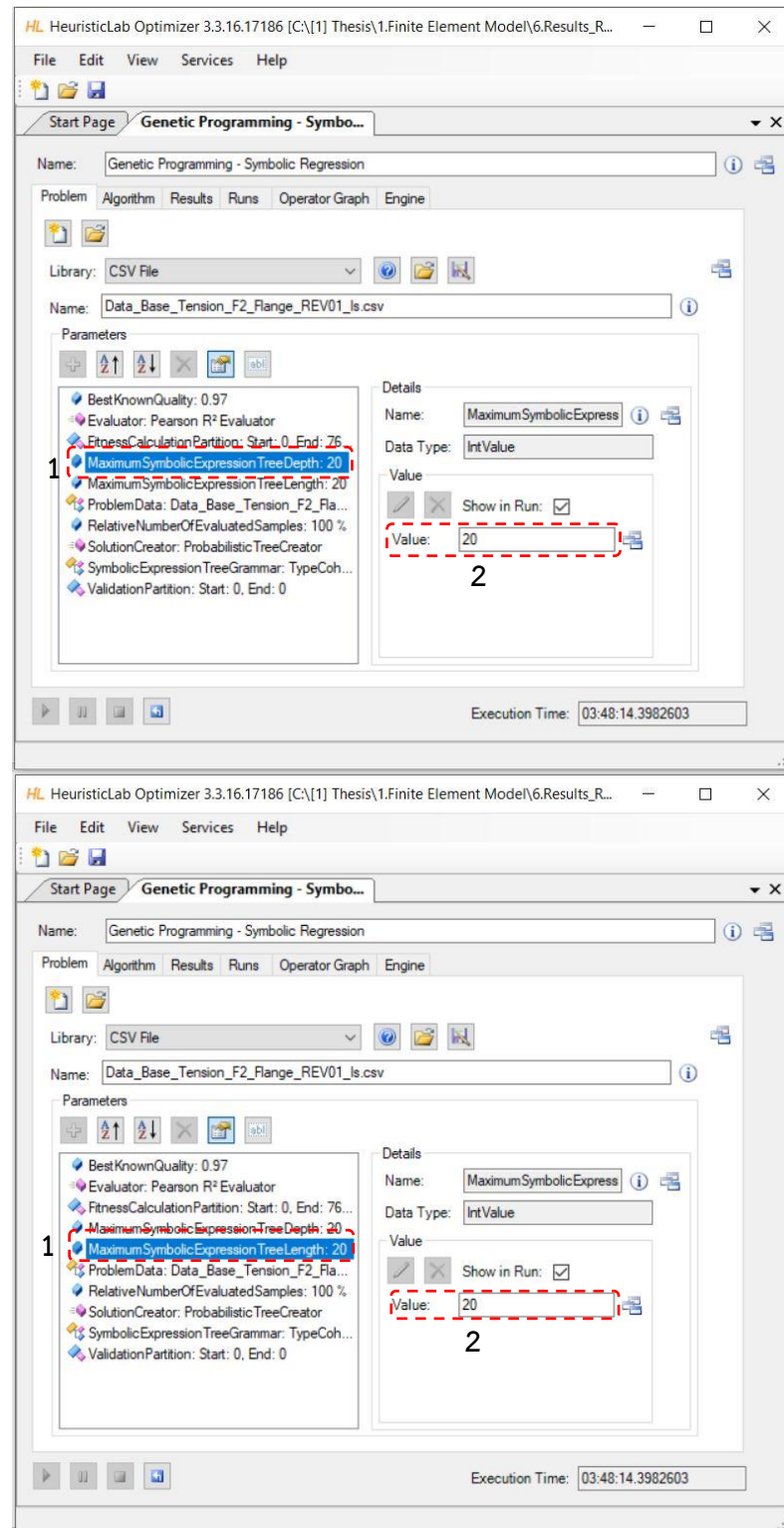
4. ทำการโหลดไฟล์ข้อมูล (.CSV) ที่ได้จัดทำไว้



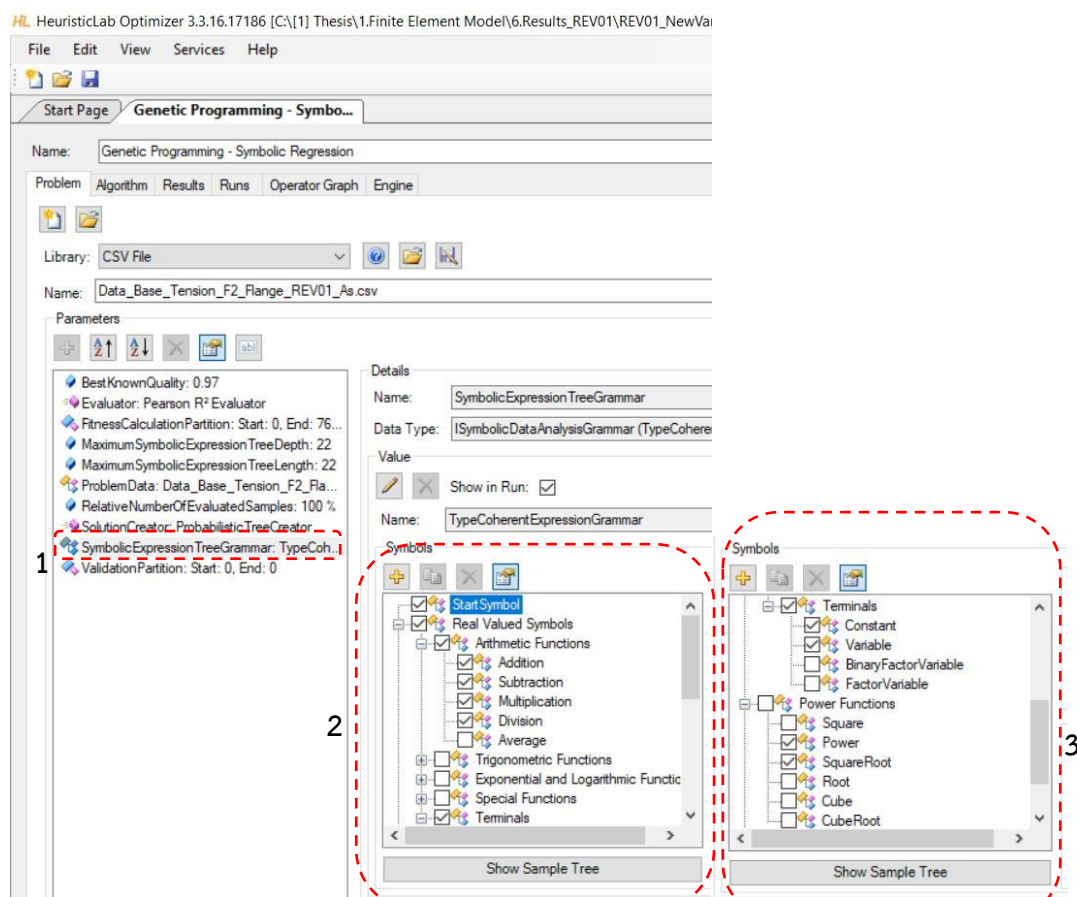
5. ดึงเครื่องหมายถูกตามรูปด้านล่างและเลือก Target Variable = y และ Test = 30%



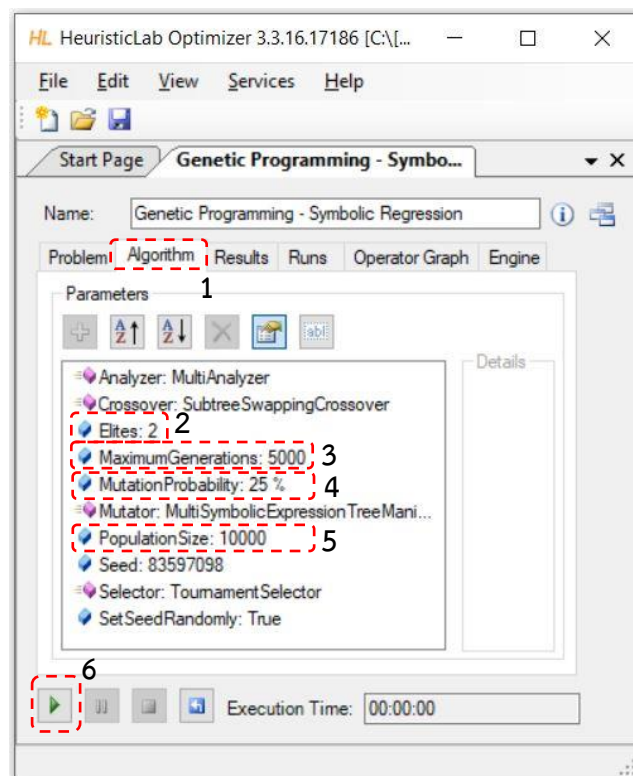
6. กำหนด ความความลึกของ Tree Depth และความยาวของ Tree Length เท่ากับ 20 ซึ่งการปรับค่าทั้งสองนี้มากเกินไปจะทำให้สมการที่ได้ซับซ้อนมากและยากต่อการนำสมการไปใช้ ดังนั้นควรทดลองใช้ค่าที่เหมาะสมกับข้อมูลและสังเกตค่า  $R^2$  เปรียบเทียบกันก่อนนำไปใช้จริง



7. กำหนดตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (operators) ซึ่งผู้ที่สนใจสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการ แต่ในตัวอย่างครั้งนี้เลือกใช้  $+$ ,  $-$ ,  $*$ ,  $/$ , *Square Root*, *power* ตามรูปด้านล่าง



8. ไปที่ Algorithm ปรับ Elites เท่ากับ 2 จำนวนการวิวัฒนาการ Maximum Generations เท่ากับ 5000 และการกลายพันธุ์ = Mutation Probability เท่ากับ 25% และ Population Size เท่ากับ 10000 และกดปุ่มเริ่มวิเคราะห์ข้อมูลตามรูปด้านล่าง ทั้งนี้ทางผู้วิจัยได้สืบค้นข้อมูลการตั้งค่าต่างๆที่ได้กล่าวมาพบว่าจะยังไม่มีข้อมูลการตั้งค่าที่แน่ชัดว่าควรจะเป็นค่าเท่าใดถึงจะดีที่สุด ดังนั้นให้ผู้วิจัยจึงแนะนำให้ทดลองปรับค่าต่างๆดังกล่าวและเปรียบเทียบกับค่า  $R^2$  ที่ดีที่สุดและเลือกใช้การตั้งค่านั้นเป็นเกณฑ์



## 9. การตรวจสอบผลการวิเคราะห์และสมการ

### 9.1 ผลของ $R^2$ (Pearson's) และผลกระทบของตัวแปร Variable impacts

HeuristicLab Optimizer 3.3.16.17186 [C:\1] Thesis\HL HeuristicLab Optimizer 3.3.16.17186 [C:\1] Thesis\1.Finite Element Model\6.Results\_REV01\REV01\_

Name: Genetic Programming - Symbolic Regression

Problem Algorithm Results Runs Operator Graph Engine

Results

- AbsoluteDifferenceBestKnownToBest: 0.00...
- Best training solution generation: 9560
- Best training solution quality: 0.9744050668...
- Best training solution: SymbolicRegressionS...
- BestKnownQuality: 0.97
- BestQuality: 0.97440506688873374**
- CurrentAverageQuality: 0.66942841047872...
- CurrentBestQuality: 0.97440506688873374
- CurrentWorstQuality: 0
- EvaluatedSolutions: 99990000
- Generations: 10000
- Qualities: Qualities
- RelativeDifferenceBestKnownToBest: 0.45...
- Symbol frequencies: Symbol frequencies
- Symbolic expression tree length: Values
- Symbolic expression tree lengths: Tree Len...
- Variable frequencies: Variable frequencies
- Variable impacts: [[0.446][0.287][0.243][0.024]]

Details

Rows: 4  
Columns: 1

Relative variable relevance	
Rf	0.446
Rw	0.287
Op2	0.243
Oa	0.024

Variable frequencies: Variable frequencies

Variable impacts: [[0.446][0.287][0.243][0.024]]

### 9.2 กราฟ Scatter plot

HeuristicLab Optimizer 3.3.16.17186 [C:\1] Thesis\1.Finite Element Model\6.Results\_REV01\REV01\_NewVariable\3.Results\_Tension\_F2 (FRP\_Patch)\0.HeuristicLab\_Res

Name: Genetic Programming - Symbolic Regression

Problem Algorithm Results Runs Operator Graph Engine

Results

- AbsoluteDifferenceBestKnownToBest: 0.00...
- Best training solution generation: 9560
- Best training solution quality: 0.9744050668...
- Best training solution: SymbolicRegressionS...
- BestKnownQuality: 0.97
- BestQuality: 0.97440506688873374
- CurrentAverageQuality: 0.66942841047872...
- CurrentBestQuality: 0.97440506688873374
- CurrentWorstQuality: 0
- EvaluatedSolutions: 99990000
- Generations: 10000
- Qualities: Qualities
- RelativeDifferenceBestKnownToBest: 0.45...
- Symbol frequencies: Symbol frequencies
- Symbolic expression tree length: Values
- Symbolic expression tree lengths: Tree Len...
- Variable frequencies: Variable frequencies
- Variable impacts: [[0.446][0.287][0.243][0.024]]

Details

Name: SymbolicRegressionSolution

Regression Solution

- Average relative error (training): 4.30786...
- Estimation Limits Results: ResultCollection
- Mean absolute error (best): 0.031131317...
- Mean absolute error (training): 0.031543...
- Mean squared error (best): 0.051547546...
- Mean squared error (training): 0.001555...
- Model Depth: 10
- Model Length: 25
- Model: Symbolic Regression Model
- Normalized mean squared error (best): 0...
- Normalized mean squared error (training): 0...
- Pearson's R^2 (best): 0.9743442622317...
- Pearson's R^2 (training): 0.97440506688873374...
- Problem Data: Data\_Base\_Tension\_F2\_...
- Root mean squared error (best): 0.03933...
- Root mean squared error (training): 0.03...

Partial Dependence Plots

Residuals Line Chart

Residual Analysis

Variable Impacts

Estimated Values

Line Chart

Best Quality

Estimated Values

Execution Time: 07:51:04.3714274

### 9.3 แผนภาพเอ็กเพรสชันทรี

The screenshot displays the HeuristicLab Optimizer interface for Symbolic Regression. The 'Results' panel on the left shows the following key metrics:

- Absolute Difference Best Known To Best: 0.00...
- Best training solution generation: 5560
- Best training solution quality: 0.9744050668873374
- Best Known Quality: 0.97
- Current Quality: 0.9744050668873374
- Current Average Quality: 0.66342841047872
- Current Best Quality: 0.9744050668873374
- Current Worst Quality: 0
- Evaluated Solutions: 3999000
- Generations: 10000
- Qualities: Qualities
- Relative Difference Best Known To Best: 0.45...
- Symbol frequencies: Symbol frequencies
- Symbolic expression tree length: Values
- Symbolic expression tree lengths: Tree Len...
- Variable frequencies: Variable frequencies
- Variable impacts: Variable impacts

The 'Details' panel on the right shows the 'Regression Solution' with the following parameters:

- Average relative error (training): 4.30786...
- Estimation Limits Results: ResultCollection
- Mean absolute error (best): 0.031131317...
- Mean squared error (best): 0.001547546...
- Mean squared error (training): 0.001555...
- Model Depth: 10
- Pearson's R<sup>2</sup> (best): 0.97434482622317...
- Pearson's R<sup>2</sup> (training): 0.974405066888...
- Problem Data: Data\_Base\_Tension\_F2\_...
- Root mean squared error (best): 0.03933...
- Root mean squared error (training): 0.03...

The 'Expression Tree' diagram shows a hierarchical structure of mathematical operations. The root node is 'StartSymbol', which leads to 'Addition'. This 'Addition' node branches into 'Multiplication' (value 7.1061E-001) and 'Subtraction' (value -4.0187E-001). The 'Multiplication' node further branches into 'Multiplication' (value 5.2981E-001) and 'Addition' (value 4.3917E-001). The 'Subtraction' node branches into 'SquareRoot' (value 2.1059E+000) and 'Division' (value 2.1175E+000). The 'Division' node branches into 'SquareRoot' (value 1.2246E+000) and 'SquareRoot' (value 1.3248E+000). The 'SquareRoot' nodes lead to 'Op2' and 'Op3' respectively.

### 9.4 สมการและค่าสัมประสิทธิ์

The screenshot displays the HeuristicLab Optimizer interface showing the final regression equation and coefficient values. The 'Results' panel on the left shows the same key metrics as in the previous screenshot.

The 'Details' panel on the right shows the 'Regression Solution' with the following parameters:

- Average relative error (training): 4.30786...
- Estimation Limits Results: ResultCollection
- Mean absolute error (best): 0.031131317...
- Mean squared error (best): 0.001547546...
- Mean squared error (training): 0.001555...
- Model Depth: 10
- Pearson's R<sup>2</sup> (best): 0.97434482622317...
- Pearson's R<sup>2</sup> (training): 0.974405066888...
- Problem Data: Data\_Base\_Tension\_F2\_...
- Root mean squared error (best): 0.03933...
- Root mean squared error (training): 0.03...

The 'Equation' panel shows the final regression equation:

$$y = \left( c_0 \cdot Rf \cdot c_1 \cdot Rf \cdot c_2 \cdot Rf + \left( (c_3 \cdot Oa + \sqrt{c_4 \cdot Op2}) + \sqrt{c_5 \cdot Op2} - \sqrt{\frac{c_6 \cdot Rf}{c_7 \cdot Rf}} \right) \cdot c_8 + c_9 \right)$$

The 'Coefficients' panel shows the following values:

- c<sub>0</sub> = 0.99892
- c<sub>1</sub> = 2.1683
- c<sub>2</sub> = 0.52981
- c<sub>3</sub> = 0.48935
- c<sub>4</sub> = 2.1066
- c<sub>5</sub> = 2.1059
- c<sub>6</sub> = 1.2246
- c<sub>7</sub> = 2.1757
- c<sub>8</sub> = -0.40187
- c<sub>9</sub> = 0.71061

Annotations in the image include:

- 1: Points to the 'Results' panel.
- 2: Points to the 'Best training solution quality' metric.
- 3: Points to the 'Model Length: 10' parameter.
- 4: Points to the 'Export to Excel' button.
- 5: Points to the 'Mathematical Representation' checkbox in the 'NamedItem View'.

Text annotations in Thai include:

- นำผลวิเคราะห์ออกเป็นไฟล์ Excel (Export analysis results to Excel file)
- คลิกขวา (Right-click)

### ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ HeuristicLab กรณีไม่มีแผ่นปะ

สมการและค่าสัมประสิทธิ์กรณีไม่มีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะอ้างอิงมาจาก Kittichai และ Lenwari [48] แสดงในสมการที่ ค.1 และ ค.2

#### ค.1 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดึง

$$K^f = f_t^f (\lambda_w, \lambda_f, \beta) \sigma_t \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}) \quad (\text{ค.1})$$

$$K^w = f_t^w (\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) \sigma_t \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}) \quad (\text{ค.2})$$

$$f_t^f = \left( \left( \frac{c_0}{c_1 \beta} + (c_2 \lambda_f)^{c_3} \right) (c_4 \lambda_f + c_5 c_6 \lambda_w) + \frac{\sqrt{c_7 \lambda_w}}{c_8 \lambda_f} \right) c_9 + c_{10} \quad (R^2=0.992) (\text{สำหรับที่ปีก})$$

$$f_t^w = \frac{c_0 \lambda_f}{c_1 \gamma} \left( \left( (c_2 \lambda_f)^{c_3} + c_4 \lambda_w (c_5 \gamma - c_6 \beta) \right) + \frac{c_7 \lambda_f}{c_8 \lambda_w} \right) c_9 + c_{10} \quad (R^2=0.995) (\text{สำหรับที่เอว})$$

#### ค.2 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดัด

$$K^f = f_b^f (\lambda_w, \lambda_f, \beta) \sigma_b \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})$$

$$K^w = f_b^w (\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) \sigma_b \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}})$$

$$f_b^f = \left( \sqrt{c_0 \lambda_w} + (c_1 + c_2 \lambda_w) \right) \left( \frac{(c_3 + (c_4 \lambda_f)^{c_5})}{c_6 \beta} + (c_7 \lambda_f)^{c_8} \right) c_9 + c_{10} \quad (R^2=0.991) (\text{สำหรับที่ปีก})$$

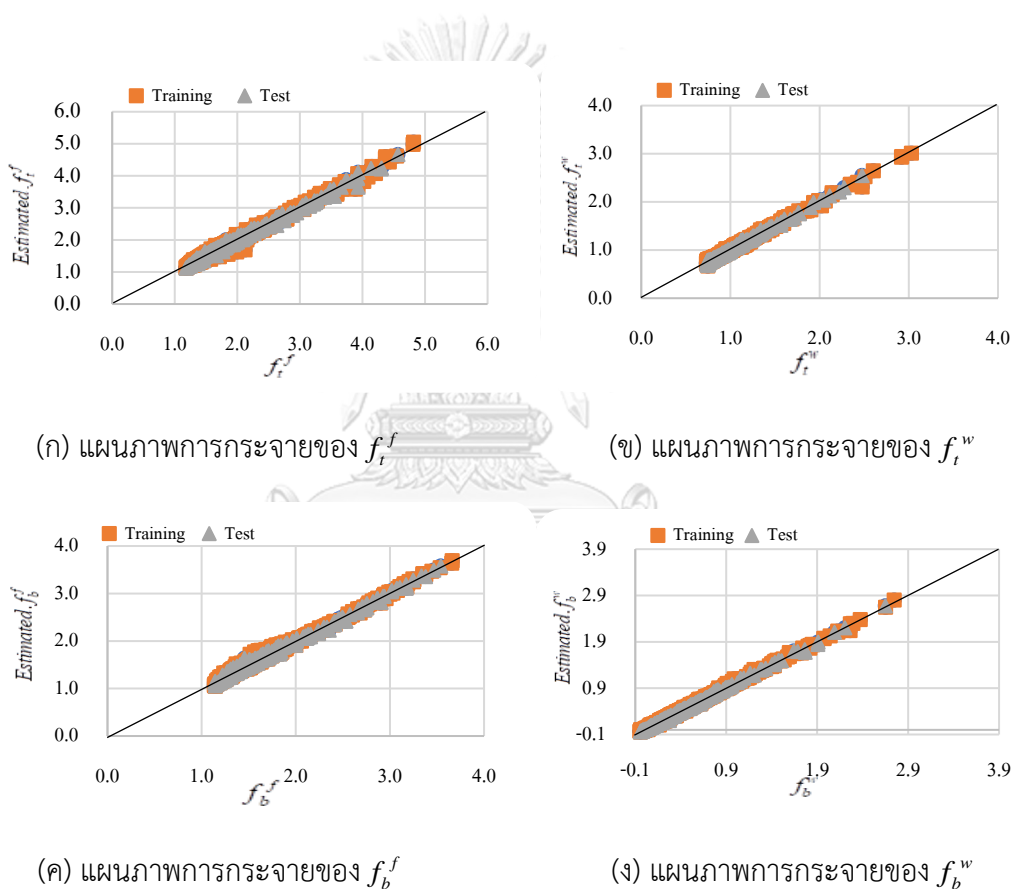
$$f_b^w = (c_0 \lambda_f + (c_1 \lambda_w)^{c_2} (c_3 \lambda_w + c_4 \lambda_f c_5 \beta)) ((c_6 \lambda_w - c_7 \lambda_f) + c_8 \gamma) c_9 + c_{10} \quad (R^2=0.993) (\text{สำหรับที่เอว})$$

ตารางที่ ค.1 ค่าสัมประสิทธิ์  $c_0$  ถึง  $c_{10}$  กรณีรับแรงดึงและรับแรงดัด

	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
$f_t^f$	24.773	1.8975	1.8567	6.000	1.8968	12.774	0.8754	2.0794	0.44354	0.01053	1.0292
$f_t^w$	1.3173	0.37607	1.3148	10.000	1.7353	1.7105	1.6398	2.1049	0.39695	0.021882	0.73199
$f_b^f$	1.0689	-0.1337	-0.4485	19.240	1.6370	6.000	3.4531	1.6692	6.000	0.29138	1.0179
$f_b^w$	0.64487	1.3038	-1.000	1.9842	0.62382	0.86454	1.8988	1.0105	0.088216	-0.34575	0.80652

ตารางที่ ค.2 แสดงผลของการพัฒนาสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์[48]

จำนวนการ วิวัฒนาการ (Generation)	ชุดข้อมูลที่ 1. $f_t^f$		ชุดข้อมูลที่ 2. $f_t^w$		ชุดข้อมูลที่ 3. $f_b^f$		ชุดข้อมูลที่ 4. $f_b^w$	
	Training $R^2$	Testing $R^2$	Training $R^2$	Testing $R^2$	Training $R^2$	Testing $R^2$	Training $R^2$	Testing $R^2$
500	0.864	0.855	0.881	0.889	0.852	0.847	0.889	0.906
1000	0.931	0.931	0.921	0.926	0.916	0.918	0.937	0.941
1500	0.981	0.983	0.984	0.986	0.976	0.978	0.989	0.989
2000	0.991	0.992	0.995	0.995	0.991	0.990	0.993	0.991



รูปที่ ค.1 แผนภาพการกระจายของ  $f_t^{f,w}$  ที่จำนวนการวิวัฒนาการเท่ากับ 2,000 ครั้ง [48]



## ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ *HeuristicLab* กรณีมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นปะ

ง1. พัฒนาสมการด้วย *HeuristicLab* รอบที่ 1

เมื่อกำหนด  $Operators = \{+, -, *, /, power, square\ root\}$

$$K^f = f_{1,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta) f_{2,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma, \psi_p, \psi_a, \eta_p, \eta_a) \sigma \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{กรณีปีก})$$

$$K^w = f_{1,(t,b)}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) f_{2,(t,b)}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma, \psi_p, \psi_a, \eta_p, \eta_a) \sigma \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{กรณีทีเอว})$$

เมื่อ  $\lambda_w = a_w / d_j$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่แผ่นเอวต่อความลึกของคานเหล็ก

$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่ปีกต่อความกว้างปีก

$\beta = 2A_f / A_w$  คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอว

$\gamma = d_j / b_f$  คือ อัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก

$\psi_p = A_p / A_{bf}$  คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของ FRP ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก

$\eta_p = E_{p1} / E_s$  คือ อัตราส่วนระหว่างมอดุลัสของ FRP ต่อ มอดุลัสของเหล็ก

$\psi_a = A_a / A_{bf}$  คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของ Adhesive ทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของปีกกลาง

$\eta_a = E_a / E_s$  คือ อัตราส่วนระหว่างมอดุลัสของ Adhesive ต่อ มอดุลัสของเหล็ก

ง1.1 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดึง ที่ปีกและทีเอว

$$f_{2,f}^f = \left( \sqrt{\sqrt{E_0 W_p} + \left( \sqrt{\sqrt{E_2 \eta_a} + \left( \left( \sqrt{E_2 \lambda_f} - \sqrt{E_3 \lambda_w} \right) \sqrt{c_1 \gamma} + (c_5 \lambda_f - c_6 \lambda_f) c_7 \beta + c_8 \beta \right) - c_9 \left( \left( \sqrt{\sqrt{E_{10} \lambda_f} - c_{11} \lambda_w} + \sqrt{E_{12} \psi_p} c_{13} \eta_p \right) - c_{14} \lambda_w \right) + (c_{15} \lambda_f + c_{16} \lambda_w) c_{17} \lambda_w \right)} \right) \left( E_{18} + c_{19} \right)$$

$$f_{2,w}^w = \left( \left( c_0 \lambda_f c_1 \lambda_f - \left( c_2 \lambda_w - \sqrt{E_3 \eta_p} \right) - \left( c_4 \lambda_f - c_5 \psi_p \right) - \left( \sqrt{E_6 \lambda_w} - \sqrt{E_7 \beta} \right) c_8 \eta_a \right) \left( c_9 \lambda_f (c_{10} \lambda_f - c_{11} \psi_a) - \left( c_{12} \lambda_w - \sqrt{E_{13} \psi_p} \sqrt{\left( c_{14} \beta - c_{15} \lambda_f \right) c_{16} + \sqrt{c_{17} \lambda_f} \sqrt{E_{18} + (c_{19} \lambda_w)^{20}} \right)} \right) \right) c_{21} + c_{22}$$

ง1.2 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดัด

$$f_{2,b}^f = \left( \left( \left( \left( \left( \sqrt{c_0 + \left( c_1 \lambda_f \right)^2} c_3 \beta - c_4 \lambda_f \right) c_5 \beta \right) - \left( c_6 \lambda_f \right)^2 \right) + \left( c_7 \lambda_f - \sqrt{E_9 \psi_a} \right) c_{10} \lambda_f + c_{11} \eta_a + \sqrt{c_{12} \left( c_{13} \lambda_f \right)^{24} - c_{15} \lambda_f} \right) c_{16} \eta_p c_{17} \psi_p + \left( c_{18} \lambda_f c_{19} \lambda_f - \left( c_{20} \lambda_f \right)^{25} \right) c_{22} \lambda_w \right) c_{23} + c_{24}$$

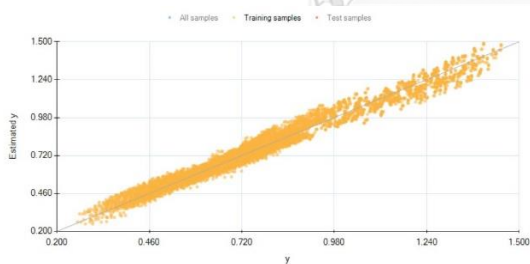
$$f_{2,b}^w = \left( \sqrt{E_0 W_p} c_1 c_2 \eta_p + \left( \sqrt{\left( c_2 \lambda_f \right)^2 + c_5 \lambda_w \left( \left( c_4 \lambda_f \right)^2 - c_8 \eta_a \right) - \left( \sqrt{c_6} \beta + \left( c_{10} \lambda_f \right)^{21} + \left( c_{12} \lambda_f \right)^{23} \right)} c_{11} \beta c_{15} \beta \right) + \left( \left( \sqrt{\left( c_{16} \lambda_f \right)^{27} + c_{18} \lambda_w} + c_{19} \psi_a \right) + \sqrt{E_{20} \eta_a} - c_{21} \gamma \right) \right) c_{22} + c_{23}$$

ตาราง ง.1.1 แสดงผลของการพัฒนาสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

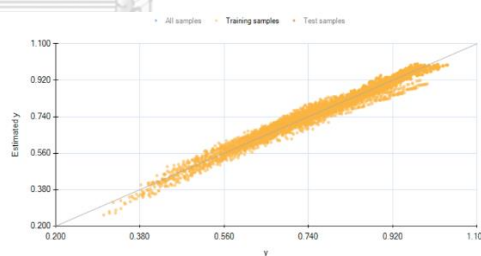
จำนวนการ วิวัฒนาการ (Generation)	ชุดข้อมูลที่ 1. $f_{2t}^f$		ชุดข้อมูลที่ 2. $f_{2t}^w$		ชุดข้อมูลที่ 3. $f_{2b}^f$		ชุดข้อมูลที่ 4. $f_{2b}^w$	
	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
5000	0.971	0.969	0.975	0.973	0.981	0.980	0.957	0.950

ตารางที่ ง.1.2 ผลกระทบของตัวแปร

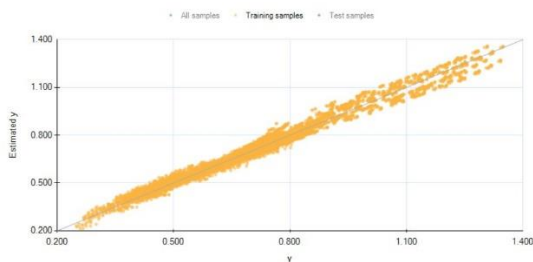
Tension Flange Variable $R^2=0.971$	Relative variable relevance	Tension Web Variable $R^2=0.975$	Relative variable relevance	Bending Flange Variable $R^2=0.981$	Relative variable relevance	Bending Web Variable $R^2=0.957$	Relative variable relevance
$\lambda_w = a_w / d_j$	0.355	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.394	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.539	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.237
$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.264	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.168	$\psi_p = A_p / A_{bf}$	0.101	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.181
$\psi_p = A_p / A_{bf}$	0.170	$\eta_p = E_{p1} / E_s$	0.111	$\beta = 2A_f / A_w$	0.096	$\psi_p = A_p / A_{bf}$	0.132
$\eta_p = E_{p1} / E_s$	0.086	$\psi_a = A_a / A_{bf}$	0.094	$\eta_p = E_{p1} / E_s$	0.096	$\eta_p = E_{p1} / E_s$	0.113
$\beta = 2A_f / A_w$	0.060	$\eta_a = E_a / E_s$	0.088	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.093	$\eta_a = E_a / E_s$	0.100
$\eta_a = E_a / E_s$	0.046	$\psi_p = A_p / A_{bf}$	0.070	$\eta_a = E_a / E_s$	0.040	$\psi_a = A_a / A_{bf}$	0.087
$\psi_a = A_a / A_{bf}$	0.010 (ไม่มี)	$\beta = 2A_f / A_w$	0.066	$\psi_a = A_a / A_{bf}$	0.024	$\gamma = d_j / b_f$	0.086
$\gamma = d_j / b_f$	0.009	$\gamma = d_j / b_f$	0.009 (ไม่มี)	$\gamma = d_j / b_f$	0.010 (ไม่มี)	$\beta = 2A_f / A_w$	0.065
Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000



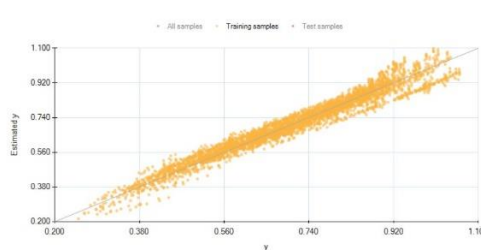
(ก) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^f$



(ข) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^w$



(ค) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^f$



(ง) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^w$

รูปที่ ง.1.1 แผนภาพการกระจายของ  $f_{2(t,b)}^{f,w}$  ที่จำนวนการวิวัฒนาการเท่ากับ 5,000 ครั้ง

ง2. ผลการพัฒนาสมการด้วย *HeuristicLab* รอบที่ 2

เมื่อกำหนด  $Operators = \{+, -, *, /, power, square\ root\}$

$$K^f = f_{1,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta) f_{2,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \alpha_p, \alpha_a) \sigma \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{กรณีที่ปีก})$$

$$K^w = f_{1,(t,b)}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) f_{2,(t,b)}^w(\lambda_w, \lambda_f, \alpha_p, \alpha_a) \sigma \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{กรณีที่เอว})$$

เมื่อ  $\lambda_w = a_w / d_j$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่แผ่นเอวต่อความลึกของคานเหล็ก

$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่ปีกต่อความกว้างปีก

$$\left. \begin{array}{l} \psi_p = A_p / A_{bf} \\ \eta_p = E_{p1} / E_s \end{array} \right\} \alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s} \quad \text{คืออัตราส่วนสติฟเนสของแผ่นปะต่อสติฟเนสของคานเหล็ก}$$

$$\left. \begin{array}{l} \psi_a = A_a / A_{bf} \\ \eta_a = E_a / E_s \end{array} \right\} \alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p} \quad \text{คืออัตราส่วนสติฟเนสของชั้นกาวต่อสติฟเนสของแผ่นปะ}$$

ง2.1 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดึง ที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,t}^f = \left( c_0 \lambda_f c_1 \lambda_f c_2 \lambda_w + \left( (c_3 \alpha_a + \sqrt{c_4 \alpha_p}) + \sqrt{c_5 \alpha_p} - \sqrt{\frac{c_6 \lambda_w}{c_7 \lambda_f}} \right) \right) c_8 + c_9$$

$$f_{2,t}^w = \left( \left( \sqrt{\frac{c_0 \alpha_p}{c_1 \lambda_w}} + (c_2 \lambda_f + c_3 \alpha_p) (c_4 \lambda_f - \sqrt{c_5 \lambda_w}) \right) + c_6 \alpha_a \right) c_7 + c_8$$

ง2.2 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดัด ที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,b}^f = \left( \frac{c_0}{((c_1 \alpha_p + c_2 \lambda_w) + \sqrt{c_3 \lambda_f})} \frac{c_5 \lambda_w}{c_4 \lambda_f} + (c_6 \lambda_w + (\sqrt{c_7 \alpha_p} + c_8 \lambda_f)) \right) c_9 + c_{10}$$

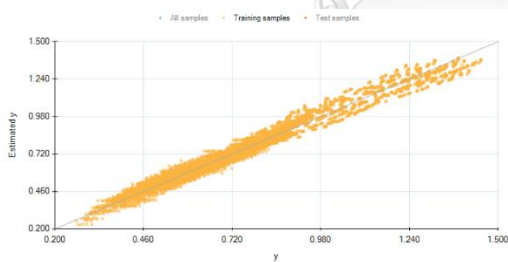
$$f_{2,b}^w = \left( (c_0 \lambda_f c_1 \lambda_w - c_2 \lambda_f c_3 \alpha_a) + (c_4 \lambda_w + (c_5 \lambda_w (\sqrt{c_6 \alpha_p} - c_7 \lambda_f) c_9)) \right) c_{10} + c_{11}$$

ตาราง ง.2.1 แสดงผลของการพัฒนาสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

จำนวนการ วิวัฒนาการ (Generation)	ชุดข้อมูลที่ 1. $f_{2t}^f$		ชุดข้อมูลที่ 2. $f_{2t}^w$		ชุดข้อมูลที่ 3. $f_{2b}^f$		ชุดข้อมูลที่ 4. $f_{2b}^w$	
	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
5000	0.974	0.970	0.959	0.956	0.962	0.960	0.905	0.902

ตารางที่ ง.2.2 ผลกระทบของตัวแปร

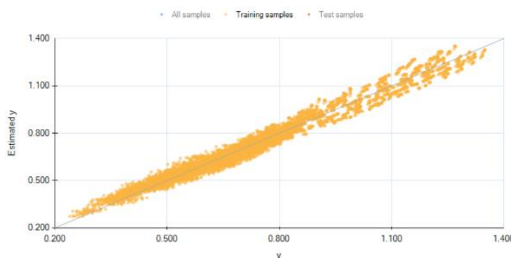
Tension Flange Variable $R^2=0.974$	Relative variable relevance	Tension Web Variable $R^2=0.959$	Relative variable relevance	Bending Flange Variable $R^2=0.962$	Relative variable relevance	Bending Web Variable $R^2=0.905$	Relative variable relevance
$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.446	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.437	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.412	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.482
$\lambda_w = a_w / d_j$	0.287	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.280	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.288	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.290
$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.243	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.260	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.278	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.167
$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.024	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.023	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.022 (ไม่มี)	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.062
Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000



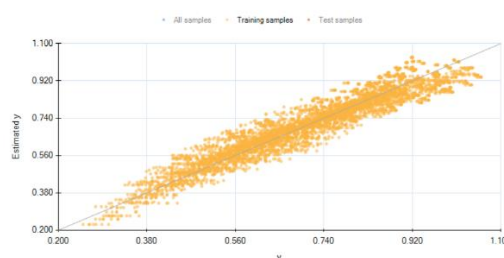
(ก) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^f$



(ข) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^w$



(ค) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^f$



(ง) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^w$

รูปที่ ง.2.1 แผนภาพการกระจายของ  $f_{2(t,b)}^{f,w}$  ที่จำนวนการวิวัฒนาการเท่ากับ 5,000 ครั้ง

ง3. ผลการพัฒนาสมการด้วย *HeuristicLab* รอบที่ 3

เมื่อกำหนด  $Operators = \{+, -, *, /, power, square\}$  root}

$$K^f = f_{1,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta) f_{2,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \alpha_p, \alpha_a) \sigma \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{กรณีที่ปีก})$$

$$K^w = f_{1,(t,b)}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) f_{2,(t,b)}^w(\lambda_w, \lambda_f, \alpha_p, \alpha_a) \sigma \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{กรณีที่เอว})$$

เมื่อ  $\lambda_w = a_w / d_j$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่แผ่นเอวต่อความลึกของคานเหล็ก

$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่ปีกต่อความกว้างปีก

$$\left. \begin{array}{l} \psi_p = A_p / A_{bf} \\ \eta_p = E_{p1} / E_s \end{array} \right\} \alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s I_s} \quad \text{คืออัตราส่วนสติฟเนสของแผ่นปะต่อสติฟเนสของต่อคานเหล็ก}$$

เมื่อ  $I_s$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของคานเหล็ก

$$\left. \begin{array}{l} \psi_a = A_a / A_{bf} \\ \eta_a = E_a / E_s \end{array} \right\} \alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p} \quad \text{คืออัตราส่วนสติฟเนสของชั้นกาวต่อสติฟเนสของแผ่นปะ}$$

ง3.1 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดึง ที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,t}^f = \left( c_0 \lambda_f + \left( \left( \left( \sqrt{c_1 \lambda_w} (c_2 \lambda_f)^{c_3} - c_4 \alpha_a \right) - \frac{\sqrt{c_5 \lambda_w}}{c_6 \lambda_f} \right) + \sqrt{c_7 \alpha_p} \right) \right) c_8 + c_9$$

$$f_{2,t}^w = \left( c_0 \lambda_w - (c_1 \lambda_f c_2 \lambda_f + \sqrt{c_3 \alpha_p}) \right) \left( \sqrt{c_4 \alpha_a} + (c_5 \lambda_w - (c_6 \lambda_f c_7 \lambda_f + \sqrt{c_8})) \right) c_9 + c_{10}$$

ง3.2 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดัด ที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,b}^f = \left( c_0 \alpha_p - \left( \sqrt{\frac{c_1 \lambda_w}{c_2 \lambda_f}} \frac{1}{c_3 \alpha_p} + \left( \frac{\sqrt{c_4 \lambda_w}}{c_5 \lambda_f} - c_6 \lambda_f (c_7 \lambda_f + c_8 \lambda_w) \right) \right) \right) c_9 + c_{10}$$

$$f_{2,b}^w = \left( \sqrt{\left( \sqrt{\left( \frac{c_0 \lambda_w}{c_1 \alpha_a} + \frac{\sqrt{c_2 \alpha_p}}{c_3 \lambda_f} \right) c_4 \lambda_w + (c_5 \lambda_f)^{c_6}} \right) + \sqrt{c_7 \alpha_p}} \right) c_8 + c_9$$

ตาราง ง.3.1 แสดงผลของการพัฒนาสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

จำนวนการ วิวัฒนาการ (Generation)	ชุดข้อมูลที่ 1. $f_{2t}^f$		ชุดข้อมูลที่ 2. $f_{2t}^w$		ชุดข้อมูลที่ 3. $f_{2b}^f$		ชุดข้อมูลที่ 4. $f_{2b}^w$	
	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
5000	0.945	0.940	0.909	0.900	0.926	0.920	0.805	0.800

ตารางที่ ง.3.2 ผลกระทบของตัวแปร

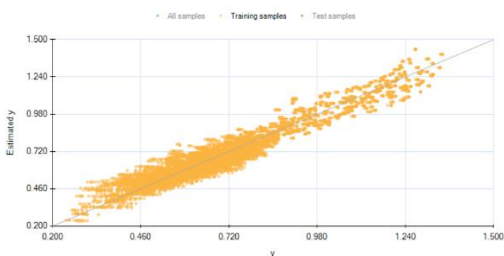
Tension Flange Variable $R^2=0.945$	Relative variable relevance	Tension Web Variable $R^2=0.909$	Relative variable relevance	Bending Flange Variable $R^2=0.926$	Relative variable relevance	Bending Web Variable $R^2=0.805$	Relative variable relevance
$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.429	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.614	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.406	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.313
$\lambda_w = a_w / d_j$	0.303	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.219	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.353	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.282
$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.174	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.146	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.221	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.267
$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.094	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.021	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.020 (ไม่มี)	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.138
Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000



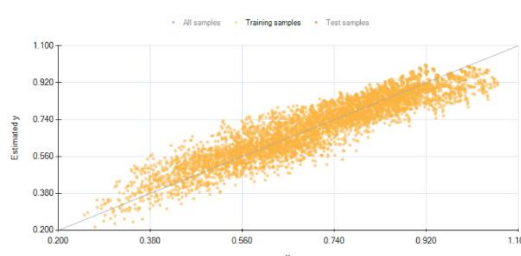
(ก) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^f$



(ข) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^w$



(ค) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^f$



(ง) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^w$

รูปที่ ง.3.1 แผนภาพการกระจายของ  $f_{2(t,b)}^{f,w}$  ที่จำนวนการวิวัฒนาการเท่ากับ 5,000 ครั้ง

ง4. ผลการพัฒนารูปแบบการด้วย *HeuristicLab* รอบที่ 4

เมื่อกำหนด  $Operators = \{+, -, *, /, power, square\ root\}$

$$K^f = f_{1,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta) f_{2,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma, \alpha_p, \alpha_a) \sigma \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{กรณีี่ปีก})$$

$$K^w = f_{1,(t,b)}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) f_{2,(t,b)}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma, \alpha_p, \alpha_a) \sigma \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{กรณีี่เอว})$$

เมื่อ  $\lambda_w = a_w / d_j$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่แผ่นเอวต่อความลึกของคานเหล็ก

$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่ปีกต่อความกว้างปีก

$\beta = 2A_f / A_w$  คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอว

$\gamma = d_j / b_f$  คือ อัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก

$$\left. \begin{array}{l} \psi_p = A_p / A_{bf} \\ \eta_p = E_{p1} / E_s \end{array} \right\} \alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s} \quad \text{คืออัตราส่วนสติฟเนสของแผ่นปะต่อสติฟเนสของ}$$

$$\left. \begin{array}{l} \psi_a = A_a / A_{bf} \\ \eta_a = E_a / E_s \end{array} \right\} \alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p} \quad \text{คืออัตราส่วนสติฟเนสของชั้นกาวต่อสติฟเนสของแผ่นปะ}$$

ง4.1 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดึง ที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,t}^f = \left( \left( \frac{c_0 \lambda_w}{c_1 \lambda_f} + \sqrt{c_2 \alpha_p} \right) + \left( c_3 \lambda_w + \left( \sqrt{c_4 \alpha_p + \sqrt{c_5 \lambda_f + c_6 \gamma}} \right) + (c_7 \lambda_f + \sqrt{c_8 \alpha_p}) \right) \right) c_9 + c_{10}$$

$$f_{2,t}^w = \left( \sqrt{c_0 \alpha_p} - (c_1 \lambda_f + \sqrt{c_2 \alpha_p}) \right) \left( (\sqrt{c_3 \lambda_w} - c_4 \alpha_a) - c_4 \lambda_f \right) \left( \left( c_6 + \frac{\sqrt{c_7 \gamma}}{c_8 \lambda_f} \right) - c_9 \gamma \right) c_{10} + c_{11}$$

ง4.2 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดัด ที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,b}^f = \sqrt{\left( \sqrt{c_0 \alpha_p} c_1 \lambda_w (c_2 \lambda_f) \right)^{c_3} + \left( c_4 (\sqrt{c_5 \lambda_f} + \sqrt{c_6 \alpha_p}) + \left( c_7 \lambda_w - \frac{c_8 \lambda_w}{c_9 \lambda_f} \right) \right) c_{10} + c_{11}}$$

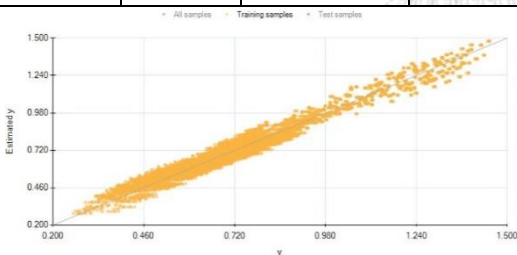
$$f_{2,b}^w = \left( (c_0 \lambda_f - \sqrt{c_1 \lambda_f}) + \left( \sqrt{c_2 \alpha_p} - (c_3 \alpha_p - (c_4 \lambda_f - \sqrt{c_5 \lambda_f})) (c_6 \beta + (c_7 \lambda_f - \sqrt{c_8})) \right) c_9 \lambda_w \right) c_{10} + c_{11}$$

ตาราง ง.4.1 แสดงผลของการพัฒนาสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

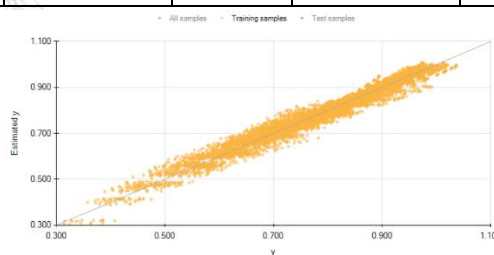
จำนวนการ วิวัฒนาการ (Generation)	ชุดข้อมูลที่ 1. $f_{2t}^f$		ชุดข้อมูลที่ 2. $f_{2t}^w$		ชุดข้อมูลที่ 3. $f_{2b}^f$		ชุดข้อมูลที่ 4. $f_{2b}^w$	
	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
5000	0.968	0.967	0.968	0.966	0.961	0.960	0.952	0.950

ตารางที่ ง.4.2 ผลกระทบของตัวแปร

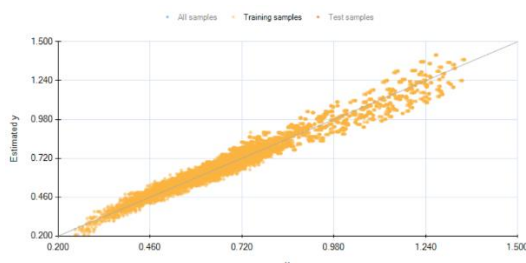
Tension Flange Variable $R^2=0.968$	Relative variable relevance	Tension Web Variable $R^2=0.968$	Relative variable relevance	Bending Flange Variable $R^2=0.961$	Relative variable relevance	Bending Web Variable $R^2=0.952$	Relative variable relevance
$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.388	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.347	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.480	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.538
$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.333	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.330	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.245	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.247
$\lambda_w = a_w / d_j$	0.240	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.196	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.228	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.119
$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.014 (ไม่มี)	$\gamma = d_j / b_f$	0.095	$\gamma = d_j / b_f$	0.016	$\beta = 2A_f / A_w$	0.068
$\gamma = d_j / b_f$	0.013	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.017 (ไม่มี)	$\beta = 2A_f / A_w$	0.016 (ไม่มี)	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.015 (ไม่มี)
$\beta = 2A_f / A_w$	0.012 (ไม่มี)	$\beta = 2A_f / A_w$	0.015 (ไม่มี)	$\gamma = d_j / b_f$	0.014 (ไม่มี)	$\gamma = d_j / b_f$	0.013 (ไม่มี)
Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000



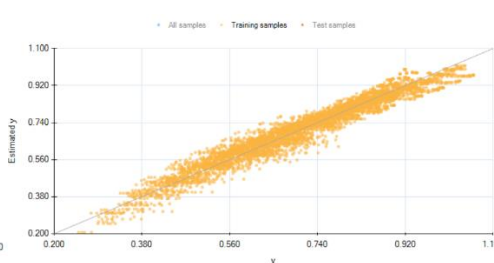
(ก) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^f$



(ข) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^w$



(ค) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^f$



(ง) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^w$

รูปที่ ง.4.1 แผนภาพการกระจายของ  $f_{2(t,b)}^{f,w}$  ที่จำนวนการวิวัฒนาการเท่ากับ 5,000 ครั้ง



ง5. ผลการพัฒนาสมการด้วย *HeuristicLab* รอบที่ 5

เมื่อกำหนด  $Operators = \{+, -, *, power\}$

$$K^f = f_{1,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta) f_{2,(t,b)}^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma, \alpha_p, \alpha_a) \sigma_{t,b} \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{กรณีที่เป็นปีก})$$

$$K^w = f_{1,t}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) f_{2,t}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma, \alpha_p, \alpha_a) \sigma_t \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{กรณีที่เป็นเอว})$$

$$K^w = f_{1,b}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) f_{2,b}^w(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma, \alpha_p, \alpha_a) \sigma_b \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{กรณีที่เป็นเอว})$$

เมื่อ  $\lambda_w = a_w / d_j$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่แผ่นเอวต่อความลึกของคานเหล็ก

$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่ปีกต่อความกว้างปีก

$\beta = 2A_f / A_w$  คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอว

$\gamma = d_j / b_f$  คือ อัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก

$$\left. \begin{array}{l} \psi_p = A_p / A_{bf} \\ \eta_p = E_{p1} / E_s \end{array} \right\} \alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s} \quad \text{คืออัตราส่วนสติเฟนของแผ่นปะต่อสติเฟนของ}$$

$$\left. \begin{array}{l} \psi_a = A_a / A_{bf} \\ \eta_a = E_a / E_s \end{array} \right\} \alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p} \quad \text{คืออัตราส่วนสติเฟนของชั้นกาวต่อสติเฟนของแผ่นปะ}$$

ง5.1 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดึง ที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,t}^f = \left( \left( \left( (c_0 \lambda_w + c_1 \gamma) (c_2 \lambda_f)^{c_3} - \left( (c_4 \lambda_f + c_5 \alpha_p) + c_6 \alpha_p \right) c_7 + c_8 \beta \right) - (c_9 \lambda_f)^{c_{10}} c_{11} \lambda_w \right) c_{12} + c_{13} \right)$$

$$f_{2,t}^w = \left( \left( (c_0 \lambda_w + c_1 \lambda_f c_2 \lambda_f (c_3 \lambda_w - c_4 \lambda_f)) - \left( (c_6 \beta (c_6 \lambda_w - c_7 \lambda_f) + c_8 \gamma c_9 \lambda_w) - c_{10} \right) c_{11} \alpha_p \right) c_{12} + c_{13} \right)$$

ง5.2 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดัด ที่ปีกและที่เอว

$$f_{2,b}^f = \left( \left( c_0 \gamma \left( (c_1 \lambda_f)^{c_2} - c_3 \lambda_f \right) + (c_4 \alpha_p)^{c_5} \right) c_6 \lambda_w + \left( c_7 c_8 \alpha_p + \left( (c_9 \lambda_f)^{c_{10}} - c_{11} \lambda_f \right) \right) \right) c_{12} + c_{13}$$

$$f_{2,b}^w = \left( \left( (c_0 \lambda_w - c_1 \gamma) - \left( (c_2 \alpha_p - c_3 \lambda_w) + \left( (c_4 - c_5 \gamma) + (c_6 \lambda_w c_7 \lambda_f + c_8 \alpha_p) \right) \right) \right) (c_9 \alpha_p + c_{10} \lambda_f c_{11} \lambda_f) \right) c_{12} + c_{13}$$

ตาราง ง.5.1 แสดงผลของการพัฒนาสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

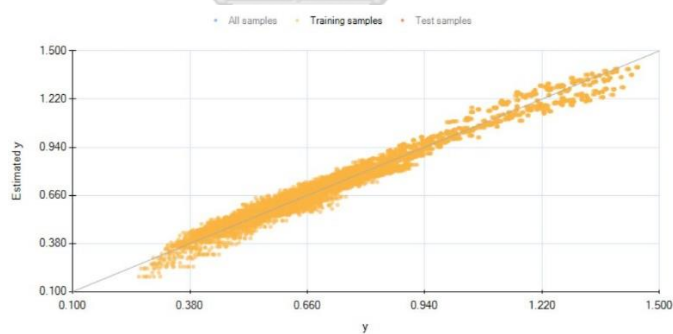
จำนวนการ วิวัฒนาการ (Generation)	ชุดข้อมูลที่ 1. $f_{2t}^f$		ชุดข้อมูลที่ 2. $f_{2t}^w$		ชุดข้อมูลที่ 3. $f_{2b}^f$		ชุดข้อมูลที่ 4. $f_{2b}^w$	
	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing	Training	Testing
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
1000	0.921	0.921	0.911	0.916	0.906	0.908	0.887	0.881
3000	0.971	0.973	0.951	0.951	0.956	0.958	0.920	0.919
<u>5000</u>	<u>0.975</u>	<u>0.974</u>	<u>0.952</u>	<u>0.951</u>	<u>0.961</u>	<u>0.959</u>	<u>0.921</u>	<u>0.920</u>

ตารางที่ ง.5.2 ผลกระทบของตัวแปร

Tension Flange Variable $R^2=0.975$	Relative variable relevance	Tension Web Variable $R^2=0.952$	Relative variable relevance	Bending Flange Variable $R^2=0.961$	Relative variable relevance	Bending Web Variable $R^2=0.921$	Relative variable relevance
$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.340	$\lambda_w = a_w / (b_f / 2)$	0.442	$\lambda_f = a_f / (b_f / 2)$	0.565	$\lambda_w = a_w / (b_f / 2)$	0.388
$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.322	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.359	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.171	$\gamma = d_j / b_f$	0.226
$\lambda_w = a_w / d_j$	0.158	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.106	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.133	$\alpha_p = \frac{E_p A_p}{E_s A_s}$	0.220
$\gamma = d_j / b_f$	0.146	$\beta = 2A_f / A_w$	0.067	$\gamma = d_j / b_f$	0.104	$\lambda_w = a_w / d_j$	0.133
$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.017 (ไม่มี)	$\gamma = d_j / b_f$	0.014	$\beta = 2A_f / A_w$	0.014 (ไม่มี)	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.019 (ไม่มี)
$\beta = 2A_f / A_w$	0.016	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.013 (ไม่มี)	$\alpha_a = \frac{E_a A_a}{E_p A_p}$	0.014 (ไม่มี)	$\beta = 2A_f / A_w$	0.015 (ไม่มี)
Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000	Sum=	1.000

ตาราง ง.5.3 ค่าสัมประสิทธิ์  $c_0$  ถึง  $c_{13}$  กรณีรับแรงดึงและรับแรงดัด

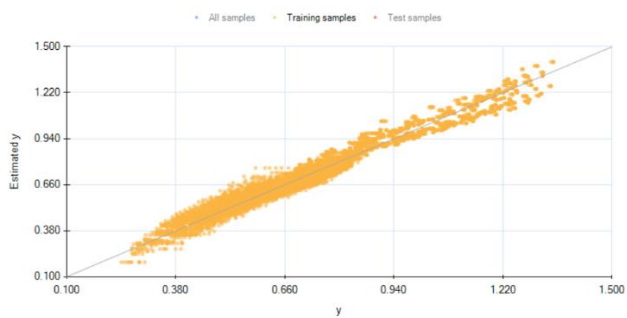
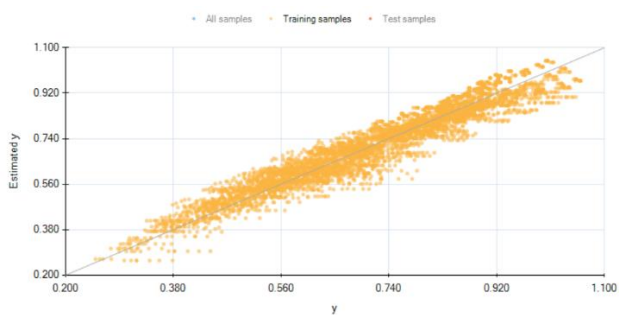
	$f_{2t}^f$	$f_{2t}^w$	$f_{2b}^f$	$f_{2b}^w$
$c_0$	1.89820	0.95342	2.54470	2.32810
$c_1$	0.25819	1.05180	2.58490	0.60991
$c_2$	0.84866	1.04940	-1.0000	3.14410
$c_3$	-1.0000	1.01020	3.59010	2.4390
$c_4$	0.63033	2.09630	4.08330	-7.0069
$c_5$	2.95480	1.51950	-1.0000	0.83084
$c_6$	2.98460	1.75020	0.25675	2.65260
$c_7$	13.6440	2.12030	-22.9510	2.04270
$c_8$	1.00890	0.96563	1.32870	3.13440
$c_9$	1.19270	1.75020	2.76300	3.15420
$c_{10}$	16.0000	9.39190	-1.0000	0.23950
$c_{11}$	2.21320	-0.96136	2.16780	2.09130
$c_{12}$	0.026124	0.160880	0.059116	-0.10110
$c_{13}$	0.824260	0.90690	0.787220	0.918610



(ก) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^f$

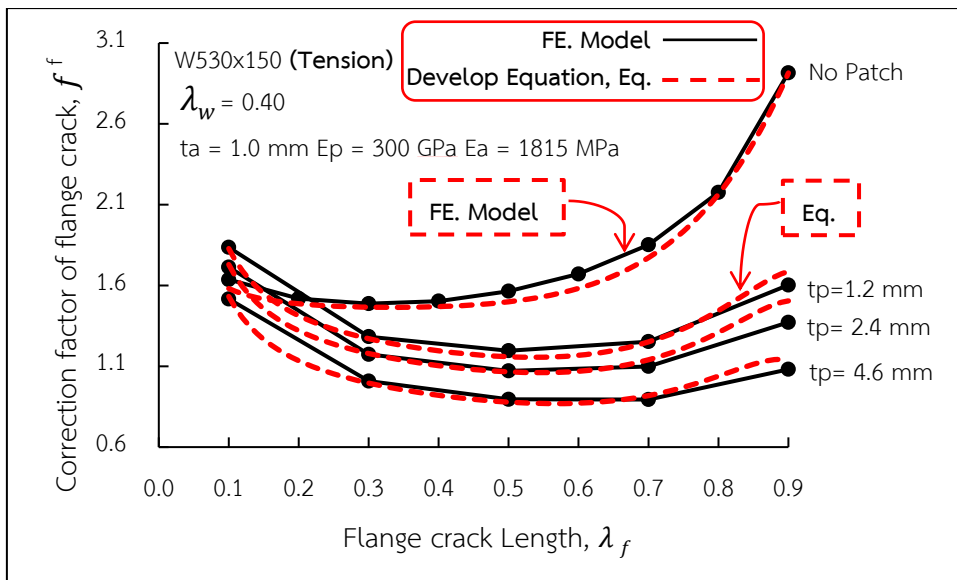


(ข) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2t}^w$

(ค) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2b}^f$ (ง) แผนภาพการกระจายของ  $f_{2b}^w$ 

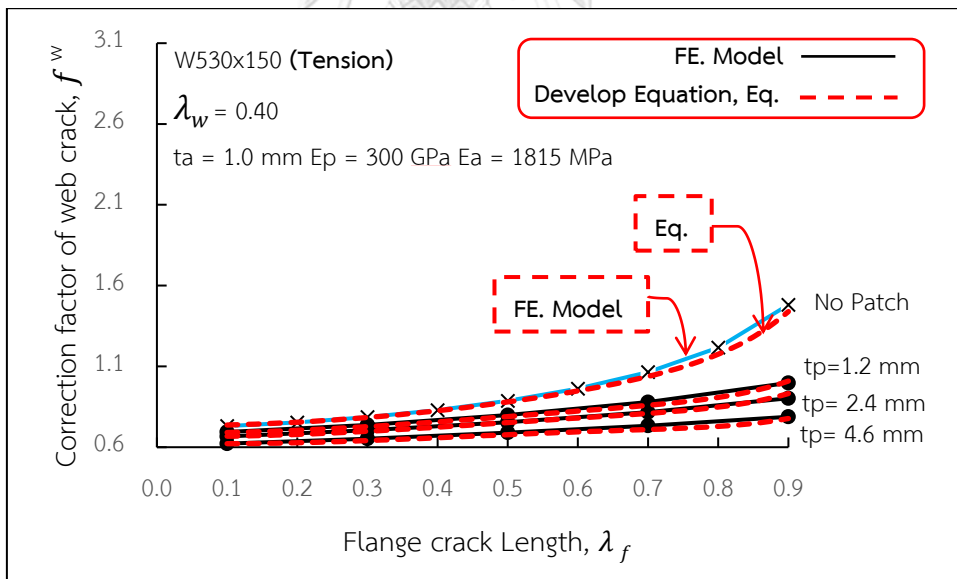
รูปที่ 5.1 แผนภาพการกระจายของ  $f_{2(t,b)}^{f,w}$  ที่จำนวนการวิวัฒนาการเท่ากับ 5,000 ครั้ง





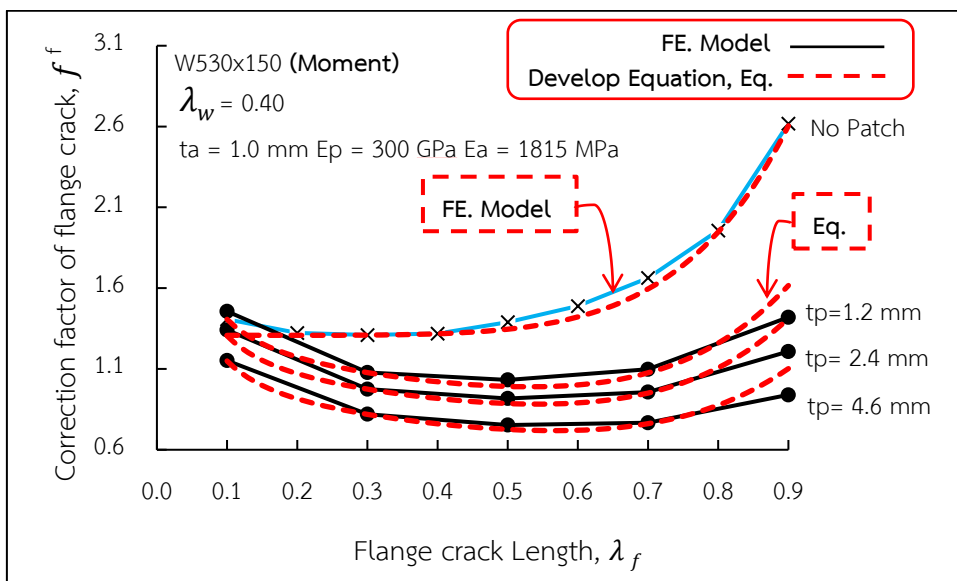
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบระหว่างสมการที่เสนอของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{Eq}^f$  กับ  $f_{FE}^f$

ที่ปีก ภายใต้แรงดึง

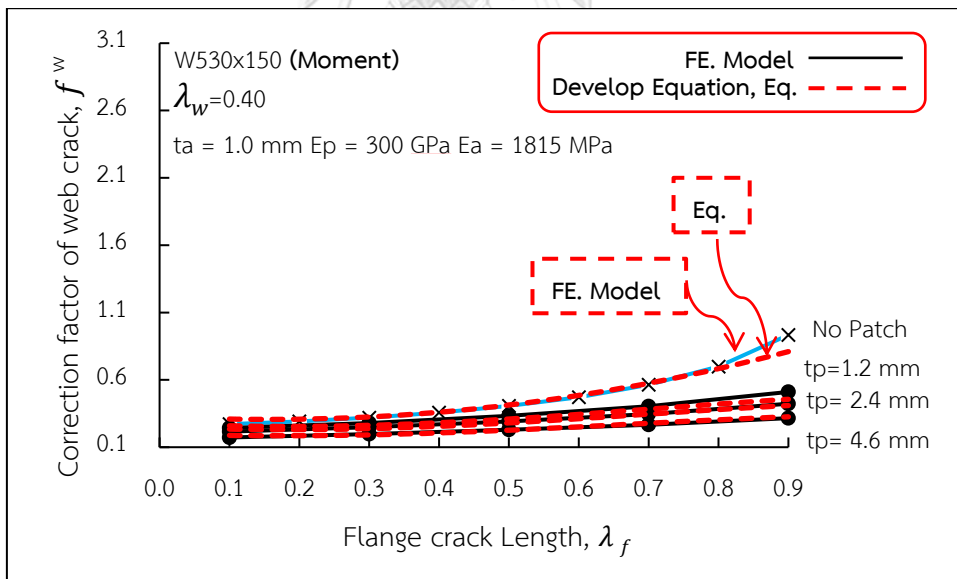


รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบระหว่างสมการที่เสนอของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{Eq}^w$  กับ  $f_{FE}^w$

ที่เอว ภายใต้แรงดึง



รูปที่ ๕.๔ การเปรียบเทียบระหว่างสมการที่เสนอของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{Eq}^f$  กับ  $f_{FE}^f$  ที่ปีก ภายใต้แรงดัด



รูปที่ ๕.๕ การเปรียบเทียบระหว่างสมการที่เสนอของค่าตัวประกอบปรับแก้  $f_{Eq}^w$  กับ  $f_{FE}^w$  ที่เอว ภายใต้แรงดัด

## บรรณานุกรม

1. D.Roylance, *Introduction to fracture mechanics*. 2001, Cambridge: MA.
2. AASHTO, L., *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. 2008, Washington, D.C ,American: American Association of State Highway and Transportation Officials.
3. AASHTO, *The Manual For Bridge Evaluation (2nd ed.)*. 2011, Washinton DC,American: Association of State Highway and Transportation Officials.
4. ODOT, *Ohio Department of Transportation*. 2008, Preventive Maintenance Repair Guidelines for Bridges and Culverts.
5. Grandt, A., *Fundamentals of Structural Integrity*. 2004: p. 1-2.
6. XL, Z., *FRP-strengthening metallic structures*. 2014, London: CRP Press.
7. G, W., et al., *Experimental Study on the Fatigue Behavior of Steel Beams Strengthened with Different Fiber-Reinforced Composite Plates* Composites for Construction, 2012. **16(2)**: p. 127-137.
8. Yu, Q.-Q. and Y.-F. Wu, *Fatigue Strengthening of Cracked Steel Beams with Different Configurations and Materials*. Journal of Composites for Construction, 2017.
9. Construction, A.I.o.S., *Manual of steel construction*. AISC, American Institute of Steel Construction Manual of steel construction, ed. AISC. 2016, American.
10. Fisher, W.J., et al., *Effects of weldments on fatigue strength of steel beams*, ed. N.-R. 102. 1970, Highway Research Board, National Research Council: Washington, D.C.
11. Haddad, M.E., T. Topper, and K. Smith, *Prediction of Non Propagating Cracks*. Engineering Fracture Mechanics, 1979: p. 573-584.
12. Dunn, M.L., W. Suwito, and B. Hunter, *Stress Intensity for Cracked I-beams*. Engineering Fracture Mechanics (57), 1997: p. 609-615.
13. Albrecht, P., A. Lenwari, and D. Feng, *Stress Intensity Factors for Structural Steel I-beams*. Journal of Structural Engineering., 2008.
14. Ma, H.C. and A. Lenwari, *Stress intensity factor for wide-flange steel member with crack surface interference*. Constructional Steel Research, 2018. **153**: p.

- 310-319.
15. Korachar, S. and Eshwari, *A Numerical Based Determination of Stress Intensity Factors for Partially Cracked Flexural I-shaped Cross-sections*. Fracture Mechanics, 2019: p. 77-86.
  16. Erdogan, F. and K. Arin, *A sandwich plate with a part-through and a debonding crack*. Engineering Fracture Mechanics, 1972: p. 449-458.
  17. M.Ratwani, *adhesively bonded laminated structures*. AIAA journal, 1979. **17(9)**: p. 988-994.
  18. Rose, L.R.F., *A cracked plate repaired by bonded reinforcements*. International Journal of Fracture, 1982. **18(2)**: p. 135-144.
  19. Rose, L.R.F., *An application of the inclusion analogy for bonded reinforcements*. International Journal of Solids and Structures, 1981. **17(8)**: p. 827-838.
  20. C. T. Sun, J. Klug, and C. Arendt, *Analysis of cracked aluminum plates repaired with Bonded Composite Patches*. AIAA Journal 34(2), 1998: p. 369-374.
  21. S.Naboulsi and S.Mall, *Modeling of a cracked metallic structure with bonded composite patch repair using three-layer technique*. Composite Structures, 1996. **35(3)**: p. 295-308.
  22. Ayatollahi, M.R. and R.Hashemi, *Computation of stress intensity factors (KI, KII) and Tstress*. Composite Structures, 2007. **78(4)**: p. 602-609.
  23. Lam, A.C.C., et al., *Study of stress intensity factor of a cracked steel plate with a single-side CFRP composite patching*. Journal of Composites for Construction, 2010. **14(6)**: p. 791-803.
  24. Linxia, G., et al., *Finite element analysis of cracks in aging aircraft structures with bonded composite-patch repairs*. Composites Part B: Engineering, 2011. **42(3)**: p. 505-510.
  25. Wang, H.-T., et al., *Effect of FRP Configurations on the Fatigue Repair Effectiveness of Cracked Steel Plates*. Journal of Composites for Construction, 2013: p. 125-130.
  26. Hmidan, A., Y.J. Kim, and S. Yazdani, *CFRP Repair of Steel Beams with Various Initial Crack Configurations*. Composites for Construction © ASCE, 2011. **15(6)**.
  27. Hmidan, A., Y.J. Kim, and S. Yazdani, *Correction factors for stress intensity of*



- CFRP-strengthened wide-flange steel beams with various crack configurations*. Construction and Building Materials, 2014. **70**: p. 522-530.
28. Hmidan, A., Y.J. Kim, and S. Yazdani, *Stress Intensity Factors for Cracked Steel Girders Strengthened with CFRP Sheets*. Composites for Construction © ASCE, 2015. **19**(5).
  29. Do, B. and A. Lenwari, *Optimum Patch Design For Repairing Crack Steel Plates Using Genetic Algorithm*, in *Faculty of Engineering*. 2017, Chulalongkorn University. p. 37-41.
  30. Kumar, A.M. and S.A. Hakeem, *Optimum design of symmetric composite patch repair to centre cracked metallic sheet*. Composite Structures, 2000. **49**(3): p. 285-292.
  31. Tada, H., P.C. Paris, and G.R. Irwin, *Two-dimensional stress solutions for various configurations with cracks*. The Stress Analysis of Cracks Handbook, Third Edition, ASME, 2000.
  32. A.Baker, *Crack patching: experimental studies, practical applications*. 1988: Springer, Dordrecht. 107-173.
  33. Mahajan, R.V. and K.R. Chandar, *Experimental determination of stress-intensity factors using caustics and photoelasticity*. Experimental mechanics, 1989. **29**(1): p. 6-11.
  34. Taudou, C. and K.R. Chandar, *Experimental determination of the dynamic stress intensity factor using caustics and photoelasticity*. Experimental mechanics, 1992. **32**(3): p. 203-210.
  35. Marloff, R.H., et al., *Photoelastic determination of stress intensity*. Experimental Mechanics, 1971. **11**(12): p. 529-539.
  36. G.Smith, D. and C.W.Smith, *Photoelastic determination of mixed mode stress intensity Factors*. Engineering Fracture Mechanics, 1972. **4**(2): p. 357-366.
  37. Diaz, F., et al., *Measuring stress intensity factors during fatigue crack growth using thermoelasticity*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2004. **27**(7): p. 571-583.
  38. Fujimoto, Y., et al., *Piezoelectric sensor for stress intensity factor measurement of two dimensional cracks*. Engineering Fracture Mechanics, 2003. **70**(9): p.

- 1203-1218.
39. Horsangchai, V., *Strength evaluation of composite columns using experimental database*, in *Faculty of Engineering*. 2018, Chulalongkorn University: Bangkok.
  40. Kasivitamnuay, J., *Fracture Mechanics*. Fracture Mechanics. 2010, Bangkok: Chulalongkorn University. 15-44.
  41. Irwin, G.R., *Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate*. Applied Mechanics, 1957. **24**(24): p. 351-369.
  42. Suresh, S., *Fatigue of materials*. Cambridge University Press. 1991.
  43. C.Shih, B.Moran, and T.Nakamura, *Energy release rate along a three-dimensional crack front in a thermally stressed body*. International Journal of Fracture, 1986. **30**: p. 79-102.
  44. FEA, A., *ABAQUS Analysis User's Manual*. (2006). 2006, Dassault Systèmes Americas Corp.
  45. Software, H., *Genetic Programming Regression And Classification*. 2009, Heuristic Optimization Software Systems - Modeling of Heuristic Optimization Algorithms in the HeuristicLab Software Environment.
  46. Bajpai, P. and M. Kumar, *Genetic algorithm—an approach to solve global optimization problems*. Indian Journal of Computer Science and Engineering, 2010. **1**(3): p. 199-206.
  47. JohnMcCall, *Genetic algorithms for modelling and optimisation*. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2005. **184**(1): p. 205-222.
  48. Kanngam, K. and A. Lenwari, *Stress Intensity Factors Of H-Shaped Steel Beams With Symmetrical Flange Cracks*. Engineering Journal of Research and Development, 2021. **4**.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายกิตติชัย กันต์งาม
วัน เดือน ปี เกิด	20 พฤศจิกายน 2534
สถานที่เกิด	โรงพยาบาล อ.ท่าตะโก จ.นครสวรรค์
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	80/1 อาคาร A ชั้น 3 คอนโด ลุมพินี วิลล์ อ่อนนุช – ลาดกระบัง 2 ซ.อ่อน นุช 88/3 แขวง ประเวศ เขต ประเวศ กรุงเทพมหานคร 10250
ผลงานตีพิมพ์	K. Kanngam, And A.Lenwari, Stress intensity factors of H-shaped steel beams with symmetrical flange cracks. Engineering Journal of Research and Development, 2021 32(4)