



ตัวประกอบความเข้มของความเค้นของคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตร  
STRESS INTENSITY FACTORS OF H-SHAPED STEEL BEAMS WITH SYMMETRICAL FLANGE  
CRACKS

กิตติชัย กันตังาม<sup>1</sup> และอัครวัชร เล่นวาริ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>นิสิตมหาบัณฑิต, หน่วยปฏิบัติการวิจัยโครงสร้างคอมโพสิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
<sup>2</sup>รองศาสตราจารย์, หน่วยปฏิบัติการวิจัยโครงสร้างคอมโพสิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

\*Corresponding author, E-mail: Akhrawat.L@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF) สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรภายใต้แรงดึงหรือแรงคดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องดีกับผลการศึกษาก่อนหน้า จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรพบว่า อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ปีกทั้งหมดต่อพื้นที่เอว ( $\beta$ ) ของหน้าตัดส่งผลกระทบบต่อค่า SIF ที่ปลายรอยร้าวทั้งในปีกและเอวคาน ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างความลึกของคานเหล็กต่อความกว้างของปีก ( $\gamma$ ) ส่งผลกระทบบต่อค่า SIF ที่ปลายรอยร้าวในเอวคานเท่านั้น นอกจากนี้ บทความนี้ยังนำเสนอสมการทำนายค่า SIF สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรภายใต้แรงดึงหรือแรงคด โดยสมการที่นำเสนอได้พัฒนาจากการวิเคราะห์ฐานข้อมูล SIF ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมเชิงพันธุกรรม คำสำคัญ: วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์; โปรแกรมเชิงพันธุกรรม; ตัวประกอบความเข้มของความเค้น; คานเหล็กรูปตัวเอช; รอยร้าว; การแตกหัก

ABSTRACT

This paper presents the finite element analysis of stress intensity factor (SIF) values for H-shaped steel beams with symmetrical flange cracks subjected to tension or bending. A comparison with the previous study showed that the current analysis results were in good agreement with the previous one. A parametric study showed that the flange-to-web area ratio ( $\beta$ ) affected the SIF values at both flange and web crack tips, while the depth-to-width ratio ( $\gamma$ ) affected only the SIF value at the web crack tip. In addition, the SIF equations were proposed for H-shaped steel beams with symmetrical flange cracks subjected to tension or bending. The SIF equations were developed by analyzing the database of SIF values obtained from the finite element analysis using the genetic programming.

**KEYWORDS:** Finite element model method; Genetic programming; Stress Intensity Factors; H-shaped steel beams; Fracture; Crack

Kittichai Kanngam<sup>1</sup> and Akhrawat Lenwari<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Master student, Composite Structures Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

<sup>2</sup>Associate Professor, Composite Structures Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University | 9

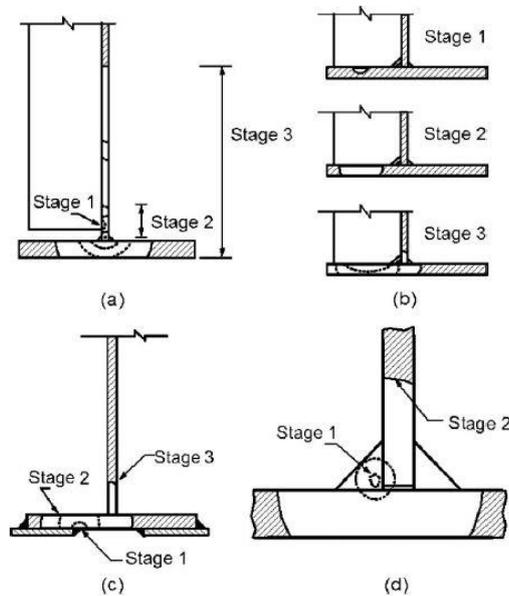
## 1. บทนำ

การวิบัติของสะพานเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น วัสดุที่ใช้ก่อสร้างมีข้อบกพร่อง ความผิดพลาดในการออกแบบ ความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ในการออกแบบสะพาน และข้อบกพร่องในขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้าง [1] ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาปรับปรุงข้อกำหนดในการออกแบบ (AASHTO LRFD design specification) [2] และคู่มือสำหรับการประเมินสภาพการใช้งานของสะพาน (AASHTO manual for bridge evaluation) [3] อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ การวิบัติเนื่องจากความล้าเป็นปัญหาสำคัญที่กำหนดอายุการใช้งานของสะพาน โดยการวิบัติขององค์อาคารเกิดจากการเติบโตของรอยร้าวภายใต้แรงกระทำซ้ำไปมา (fatigue loadings) ซึ่งนำไปสู่การวิบัติจากการแตกหักหรือการครากในที่สุด

การศึกษาในอดีตเกี่ยวกับกำลังความล้า (fatigue strength) ของรอยเชื่อมในสะพานเหล็กพบว่า รอยร้าวมีพัฒนาการมาจากข้อบกพร่องในการเชื่อม (welding defect) [4] รูปที่ 1 แสดงการเติบโตของรอยร้าว ในคานเหล็กเชื่อมประกอบหน้าตัดรูปตัวเอชรับแรงดัดในระยะต่างๆ [5] โดยรูปที่ 1a แสดงรอยร้าวเริ่มต้นในกรณีแผ่นเหล็กเสริมตั้ง (transverse steel stiffener) เชื่อมกับแผ่นเอว (web) เท่านั้น โดยในระยะแรกรอยร้าวจะเติบโตเป็นรูปครึ่งวงรี (semielliptical shape) จนกระทั่งรอยร้าวทะลุความหนาของแผ่นเอว จากนั้นระยะที่สอง รอยร้าวจะเติบโตในแผ่นเอวโดยปลายรอยร้าวด้านบนขยายขึ้นด้านบนของแผ่นเอว ในขณะที่ปลายด้านล่างขยายลงไปที่จนกระทั่งรอยร้าวทะลุแผ่นปีก (flange) และกลายเป็นรอยร้าวที่มี 3 ปลาย (three-tip crack) ในระยะที่สาม ซึ่งปลายรอยร้าวในแผ่นเอวจะเติบโตขึ้นด้านบนต่อไป ในขณะที่ทั้ง 2 ปลายของรอยร้าวที่ปีกรับแรงดัดเติบโตตามแนวความกว้างในลักษณะสมมาตร (symmetrical flange crack) รูปที่ 1b แสดงรอยร้าวเริ่มต้นในกรณีแผ่นเหล็กเสริมตั้งเชื่อมกับแผ่นเอวและปีกรับแรงดัด ในกรณีนี้การเติบโตของรอยร้าวจะแตกต่างจากรูปที่ 1a เนื่องจากการเติบโตของรอยร้าวจะมีลักษณะไม่สมมาตร รูปที่ 1c แสดงการเติบโตของรอยร้าวในกรณีแผ่นเหล็กเสริมกำลังเชื่อมกับปีกรับแรงดัด ในกรณีนี้การเติบโตของรอยร้าวคล้ายกับรูป 1b โดยมีลักษณะไม่สมมาตร ข้อแตกต่างคือ รอยร้าวเริ่มต้นในรูปที่ 1b เกิดที่ผิวบนของปีก ในขณะที่รอยร้าวเริ่มต้นในรูปที่ 1c เกิดที่ผิวล่างของปีก และรูปที่ 1d แสดงการเติบโตของรอยร้าวที่เกิดข้อบกพร่องของการเชื่อม ซึ่งการเติบโตของรอยร้าวมีลักษณะค่อนข้างสมมาตร

กลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic fracture mechanics) สามารถใช้ในการประเมินอายุ ความล้าและการวิบัติจากการแตกหัก โดยเกณฑ์การวิบัติจากการแตกหักหรืออัตราการเติบโตของรอยร้าวจะกำหนดโดยค่าของตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor, SIF) ซึ่งค่าของ SIF ขึ้นอยู่กับรูปแบบของรอยร้าว แรงกระทำ และเงื่อนไขขอบเขต อย่างไรก็ตาม การศึกษาในอดีตที่วิเคราะห์ค่า SIF สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวยังมีจำนวนจำกัด [5-7]

บทความนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์หาค่า SIF สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรภายใต้แรงดัดหรือแรงดัดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้แบบจำลอง 3 มิติแตกต่างจากการศึกษาก่อนหน้านี้ และผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อค่า SIF รวมทั้งเสนอสมการหาค่า SIF ที่พัฒนาขึ้นจากการวิเคราะห์ฐานข้อมูล SIF ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรมเชิงพันธุกรรม *HeuristicLab* [8]



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเติบโตของรอยร้าวในคานเหล็กรับแรงค้ำภายใต้แรงกระทำเป็นรอบ (1a) กรณีที่แผ่นเหล็กเสริมตั้งเชื่อมกับแผ่นเอวของคานเหล็ก (1b) กรณีที่แผ่นเหล็กเสริมตั้งเชื่อมกับแผ่นเอวและปีกรับแรงดึง (1c) กรณีที่แผ่นเหล็กเสริมกำลังเชื่อมกับแผ่นปีกรับแรงดึง (1d) กรณีที่เกิดจากข้อบกพร่องของการเชื่อม [5]

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สมการทำนายค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF)

โดยทั่วไป สมการทำนายค่า SIF อยู่ในรูปแบบ ดังนี้ [9]

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

เมื่อ  $K$  คือ ตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF);  $f$  คือ ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต (correction factor);  $\sigma$  คือ หน่วยแรงกระทำ; และ  $a$  คือ ขนาดรอยร้าว

รูปที่ 2 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่า SIF สำหรับคานเหล็กรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตร โดยอ้างอิงจากสมการที่ (1) ค่า SIF สำหรับรอยร้าวที่มี 3 พลาในคานเหล็กสามารถเขียนได้ ดังนี้

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

$$K^f = f^f(\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma)\sigma\sqrt{\pi a_f} \quad (3)$$

เมื่อ  $K^w$  และ  $K^f$  คือ ตัวประกอบความแข็งของความเค้นสำหรับปลายรอยร้าวในแอมและปีก ตามลำดับ;  $f^w$  และ  $f^f$  คือ ตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับปลายรอยร้าวในแอมและปีก ตามลำดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$b_f$  คือ ความกว้างของปีกคานเหล็ก (mm)

$t_f$  คือ ความหนาของปีกคานเหล็ก (mm)

$t_w$  คือ ความหนาของแอมคานเหล็ก (mm)

$d$  คือ ความลึกของคานเหล็ก (mm)

$d_j$  คือ ระยะจากครึ่งหนึ่งของความหนาปีกบนถึงครึ่งหนึ่งของความหนาปีกล่างของคานเหล็ก (mm)

$a_f$  คือ ความยาวรอยร้าวที่ปีกของคานเหล็ก (mm)

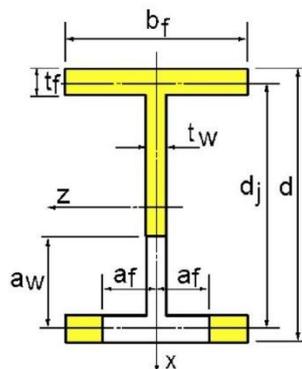
$a_w$  คือ ความยาวรอยร้าวที่แอมของคานเหล็ก (mm)

$\lambda_w = a_w / d_j$  คือ อัตราส่วนระหว่างขนาดรอยร้าวที่แอมต่อความลึกของคานเหล็ก

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

$\beta = 2A_f / A_w$  คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแอม

$\gamma = d_j / b_f$  คือ อัตราส่วนระหว่างความลึกของคานต่อความกว้างของปีก



รูปที่ 2 ตัวแปรในการวิเคราะห์ค่า SIF สำหรับคานเหล็กรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตร [5]

## 2.2 วิธี Interaction integral

การคำนวณค่า SIF ในโปรแกรม ABAQUS ได้ใช้วิธี interaction integral [10] ซึ่งกำหนดโดยค่าอัตราปลดปล่อยพลังงาน (J-integral) สำหรับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นที่มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง อธิบายได้ตามสมการที่ (4)

$$J = \frac{1}{8\pi} K^T B^{-1} K \quad (4)$$

เมื่อ  $K = [K_I \quad K_{II} \quad K_{III}]^T$  และ  $B$  คือ the pre-logarithmic energy factor matrix

ซึ่งสามารถเขียนอย่างง่ายได้ ดังสมการที่ (5)

$$J = \frac{1}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2G} K_{III}^2 \quad (5)$$

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

$$J_I = K_I^2 \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) \quad (6)$$

วิธี interaction integral สามารถใช้หาค่า SIF ในกรณีโหมดผสมได้ โดยเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณหาค่า SIF ในเทอมของ interaction integral ซึ่งใช้วิธีของ J- integral มาเป็นหลักในการหาค่า SIF ด้วยวิธี interaction integral นี้จะใช้พจน์ช่วยโดยพจน์ช่วยประกอบด้วยหน่วยแรงและความเครียด รอบปลายรอยร้าว ดังนั้น J- integral ของพจน์จริงซึ่งนิยามโดย  $J$ , J- integral ของพจน์ช่วยซึ่งนิยามโดย  $J_{aux}$  และ J- integral ของพจน์ interaction integral ซึ่งนิยามโดย  $J_{int}$  เมื่อทั้งหมดรวมเข้าด้วยกันจะได้  $J_{tot} = J + J_{aux} + J_{int}$  หากย้ายข้างสมการและกำหนดโหมดต่างๆ เป็น  $\alpha$  จะเขียนใหม่ได้ดังนี้  $J_{int}^\alpha = J_{tot}^\alpha - J_{aux}^\alpha - J$  ซึ่งสามารถใช้ในการหาค่า SIF ได้ต่อไป จากสมการที่ (4) สามารถกระจายพจน์ออกมาเป็นในแต่ละโหมดได้ตามสมการที่ (7) และ J- integral สำหรับพจน์ช่วยดังสมการที่ (8) และการรวมกันระหว่างสมการที่ (7) และ (8) จึงเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (9)

$$J = \frac{1}{8\pi} (K_I B_{11}^{-1} K_I + 2K_I B_{12}^{-1} K_{II} + 2K_I B_{13}^{-1} K_{III}) + [terms\ without\ K_I] \quad (7)$$

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

$$J_{tot}^I = \frac{1}{8\pi} ([K_I + k_I] B_{11}^{-1} [K_I + k_I] + 2[K_I + k_I] B_{12}^{-1} K_{II} + 2[K_I + k_I] B_{13}^{-1} K_{III}) + [terms\ without\ K_I\ and\ k_I] \quad (9)$$

จากนั้น อัตราปลดปล่อยพลังงานในวิธี interaction integral คำนวณได้ดังสมการที่ (10) ซึ่งอัตราปลดปล่อยพลังงานของวิธี interaction integral ของทั้ง 3 โหมดอธิบายได้ตามสมการที่ (11) และสามารถหาค่าผลเฉลยของ SIF ได้ดังสมการที่ (12)

$$J_{int}^I = J_{tot}^I - J_{aux}^I - J = \frac{k_I}{4\pi} (B_{11}^{-1}K_I + B_{12}^{-1}K_{II} + B_{13}^{-1}K_{III}) \tag{10}$$

$$J_{int}^\alpha = \frac{k_\alpha}{4\pi} B_{\alpha\beta}^{-1} K_\beta \tag{11}$$

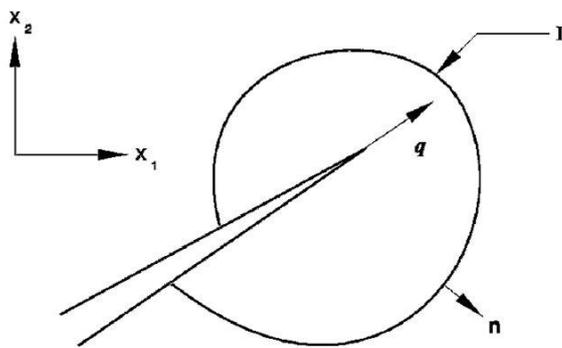
$$K = 4\pi B J_{int} \tag{12}$$

เมื่อ  $J_{int} = [J_{int}^I \quad J_{int}^{II} \quad J_{int}^{III}]^T$  ซึ่งวิธี interaction integral สามารถที่จะประเมินให้มีพฤติกรรมที่คล้ายกับ J- integral ในการหาค่าอัตราปลดปล่อยพลังงานของทั้ง 3 โหมดอธิบายได้ดังสมการที่ (13) ซึ่งขอบเขตและตัวแปรแสดงดังรูปที่ 3

$$J_{int}^\alpha = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} n M^\alpha q \, d\Gamma \tag{13}$$

$$\text{เมื่อ } M^\alpha = \sigma : \epsilon_{aux}^\alpha I - \sigma \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{aux}^\alpha - \sigma_{aux}^\alpha \frac{\partial u}{\partial x} \tag{14}$$

เมื่อ  $aux$  นิยามให้เป็นพจน์ช่วยของโหมด 1,2 และ 3 ที่ปลายรอยร้าว

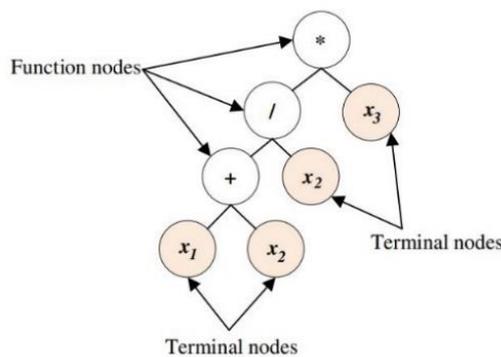


รูปที่ 3 แนววิถีในการคำนวณ J-integral

### 2.3 โปรแกรมเชิงพันธุกรรม

ในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรมเชิงพันธุกรรม (genetic programming, GP) ที่ใช้คือ *HeuristicLab* ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ซ (open source software) สำหรับวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ (symbolic regression analysis) เพื่อพัฒนาสมการทำนายค่าตัวประกอบปรับแก้ทางเรขาคณิต และ SIF สำหรับคานเหล็กที่รอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรภายใต้แรงดึงและแรงดัด ข้อดีคือ ไม่จำเป็นต้องจะต้องกำหนดรูปแบบสมการ และสมการที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลอย่างมาก โปรแกรมเชิงพันธุกรรมใช้หลักการของ

ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (genetic algorithms, GA) โดยกระบวนการของ GP จะมีลักษณะเดียวกันกับกระบวนการของ GA กล่าวคือ อาศัยกลไกการคัดเลือกโดยธรรมชาติ แต่จะแตกต่างกันโดยที่ใน GA ชุดข้อมูลแทนด้วยเลขฐานสอง แต่ใน GP ชุดข้อมูลจะแทนด้วยแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรี (expression tree) โดยแผนภาพประกอบด้วยสองส่วนหลักได้แก่ ฟังก์ชันนอล (functional) และเทอร์มินอล (terminal) ซึ่งทั้งสองส่วนสามารถกำหนดได้จากเซตของฟังก์ชันนอล ( $F$ ) และเซตของเทอร์มินอล ( $T$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4 เซตของฟังก์ชันนอล:  $F = \{+, *, /\}$  ทั้งนี้ เซตของฟังก์ชันนอลสามารถประกอบด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือตัวดำเนินการ (operators) อื่นได้ [11] และเซตของเทอร์มินอล:  $T = \{x_1, x_2, x_3\}$  ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ (independent variables) และค่าคงที่สำหรับฟังก์ชัน โดยตัวอย่างแผนภาพดังรูปที่ 3 สามารถแสดงในรูปของสมการได้เป็น  $y = x_3(x_1 + x_2) / x_2$



รูปที่ 4 ตัวอย่างแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรี [12]

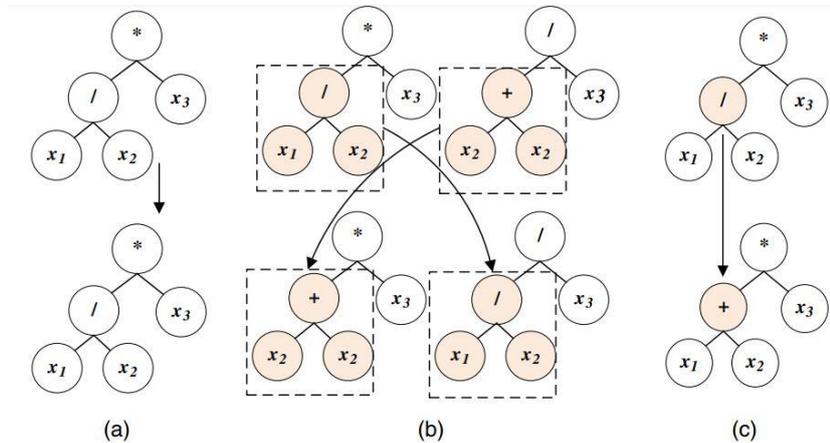
สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัมพัทธ์เพื่อพัฒนาสมการของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต สมการที่ต้องการคือสมการที่ให้ค่าที่มากที่สุด (maximum) ของค่า  $R^2$  (Pearson's  $R^2$ ) ในสมการที่ (15) โดย  $R^2$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเมื่อ  $R^2$  มีค่ามาก (เข้าใกล้ 1) จะหมายถึง สมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยมีความสอดคล้องกับข้อมูลหรือมีความแม่นยำสูง

$$R^2 = \left[ \sum_{i=1}^N (X_i - X_m)(Y_i - Y_m) \right]^2 / \left[ \sum_{i=1}^N (X_i - X_m)^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_m)^2 \right] \quad (15)$$

เมื่อ  $Y_i$  คือ ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต ( $f^w$  และ  $f^f$ ) ที่ได้มาจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์;  $Y_m$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $Y_i$ ;  $X_i$  คือ ค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตที่ได้มาจากการทำนายโดยสมการที่พัฒนาขึ้น; และ  $X_m$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $X_i$

กระบวนการเบื้องต้นของ GP สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัมพัทธ์ประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1 กำหนดชุดคำตอบชุดแรกในรูปแบบของแผนภาพเอ็กซ์เพรสชันทรีด้วยการสุ่มส่วนประกอบของแผนภาพหรือโหนด (node) สำหรับโหนดภายใน (internal points of tree) จะทำการสุ่มตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์จากเซตของฟังก์ชันนอล และสำหรับตัวแปรอิสระและค่าคงที่นั้น จะทำการสุ่มจากเซตของเทอร์มินอล ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่า  $R^2$  ของแต่ละแผนภาพในชุดคำตอบและนำชุดคำตอบเข้าสู่

กระบวนการวิวัฒนาการซึ่งประกอบด้วย การรีโพรดักชัน (reproduction) การครอสโอเวอร์ (cross over) และการมิวเทชัน (mutation) โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนคล้ายกับ GA ดังแสดงในรูปที่ 5 และขั้นตอนสุดท้าย ตรวจสอบเงื่อนไขการสิ้นสุดการทำงาน



รูปที่ 5 กระบวนการวิวัฒนาการ (a) การรีโพรดักชัน (b) การครอสโอเวอร์ และ (c) การมิวเทชัน [12]

### 3. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

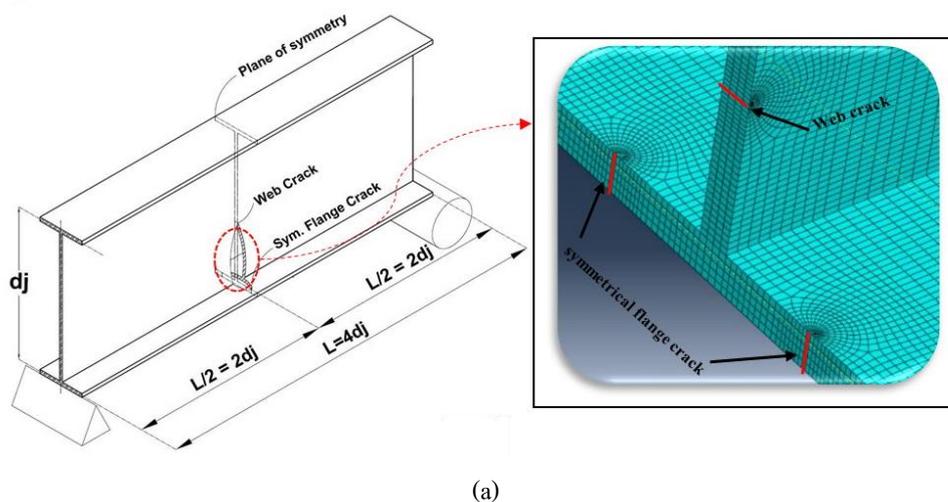
ในการศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติสำหรับวิเคราะห์ค่า SIF ของคานเหล็กกรีดร้อนหน้าตัดรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรภายใต้แรงดึงและแรงดัดด้วยซอฟต์แวร์ ABAQUS จำนวน 2,016 แบบจำลอง เพื่อสร้างฐานข้อมูลของค่า SIF และตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิตสำหรับการวิเคราะห์การรุดรอยร้าวเชิงสถิตย์ด้วยโปรแกรม *HeuristicLab* ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลหน้าตัดคานเหล็กกรีดรูปตัวเอชในการวิเคราะห์หาค่า SIF จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดง ตามที่อ้างอิง Albrecht และคณะ 2008 [5] ประกอบด้วย 16 ขนาดหน้าตัด และมีการจับคู่หน้าตัดที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของปีกกับแรงอัดทั้งหมดต่อพื้นที่ของแผ่นเอว ( $\beta$ ) ที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าอัตราส่วนระหว่างความลึกของคานเหล็กต่อความกว้างของปีก ( $\gamma$ ) แตกต่างกัน 7 คู่ เพื่อให้การวิเคราะห์ผลกระทบของ  $\beta$  และ  $\gamma$  ต่อค่า SIF เป็นไปได้โดยง่าย โดยมีเลขลำดับการจับคู่อยู่ด้านหน้าของขนาดเหล็กกรีดรูปตัวเอชที่มาจาก *AISC Manual of Steel Construction* ดังตารางที่ 1 และสมบัติเชิงกลของเหล็กในแบบจำลองประกอบด้วย โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 200 GPa และอัตราส่วนปัวซองก็เท่ากับ 0.3

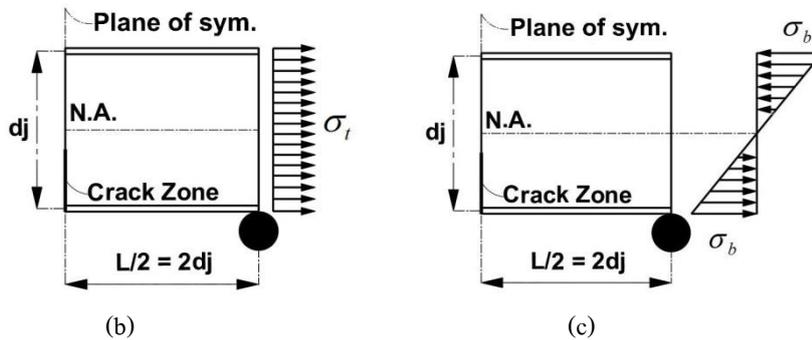
รูปที่ 6-a แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ประเภทของเอลิเมนต์เป็น 8-node brick element (linear), C3D8 และจำลองเพียงครึ่งหนึ่งเนื่องจากคุณสมบัติความสมมาตรของคาน และกำหนดแรงกระทำต่อคานเหล็กกรีดรูปตัวเอชออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีรับแรงดึงตามรูปที่ 6-b และกรณีรับแรงดัดตามรูปที่ 6-c เมื่อ  $\sigma_b = Md / 2I$

รูปที่ 7 แสดงการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์บริเวณปลายรอยร้าว โดยการกำหนดความละเอียดของเอลิเมนต์รอบปลายรอยร้าวในแผ่นเอวและปีกที่มีรูปแบบครึ่งวงกลมโดยกำหนดให้  $R_c$  เท่ากับ 5 มม. กรณี  $\lambda_f = 0.1$  และ  $0.9$ ,  $R_c$  เท่ากับ 10 mm กรณี  $\lambda_f$  ตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.8 และ  $R_c = 10$  mm กรณี  $\lambda_w$  ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.9 และกำหนดให้  $L_e$  เท่ากับ  $a_{f,w} / 100$  ซึ่งค่า  $L_e$  ตัวนี้ได้มีการตรวจสอบเพื่อหาค่า  $L_e$  ที่เหมาะสมที่สุดจาก Do และ Lenwari (2020) [12]

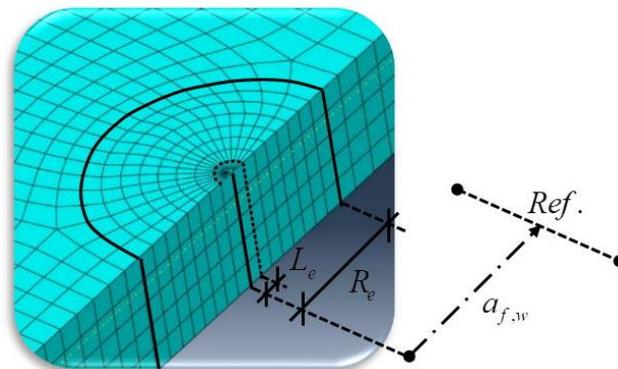
ตารางที่ 1 ขนาดหน้าตัดคานเหล็กรูปตัวเอชในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

W-shape (SI)	$\beta$	$\gamma$	$d$ (mm)	$d_j$ (mm)	$t_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_f$ (mm)
1.W1000 × 222	0.83	3.16	970.3	949.2	16.0	300.0	21.1
1.W610 × 92	0.84	3.29	603.0	588.0	10.9	178.8	15.0
2.W760 × 161	1.01	2.77	757.7	738.4	13.8	266.1	19.3
2.W1000 × 249	0.99	3.18	980.2	954.2	16.5	300.0	26.0
3.W1000 × 286	1.11	2.11	970.3	949.2	18.0	449.8	21.1
3.W920 × 253	1.11	2.91	918.7	890.8	17.3	305.6	27.9
4.W530 × 92	1.24	2.47	533.1	517.5	10.2	209.3	15.6
4.W690 × 170	1.24	2.62	693.1	669.5	14.5	255.8	23.6
5.W1000 × 296	1.38	2.39	982.3	955.2	16.5	400.1	27.1
5.W610 × 153	1.36	2.62	623.1	598.2	14.0	228.6	24.9
6.W760 × 284	1.71	1.96	779.3	749.2	18.0	382.0	30.1
6.W920 × 417	1.68	2.11	927.6	887.7	22.5	421.5	39.9
7.W530 × 150	1.91	1.67	542.5	522.2	12.7	312.2	20.3
7.W530 × 219	1.91	1.67	560.3	531.1	18.3	317.8	29.2
W840 × 299	1.55	2.07	855.5	826.3	18.2	399.9	29.2
W460 × 144	2.04	1.59	472.2	450.1	13.6	283.1	22.1





รูปที่ 6 (a) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานเหล็กรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่ปักแบบสมมาตร (b) แรงกระทำกรณีรับแรงดึง (c) แรงกระทำกรณีรับแรงดัด



รูปที่ 7 การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์บริเวณปลายรอยร้าว

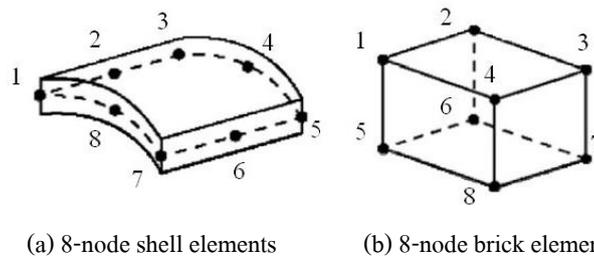
#### 4. การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

##### 4.1 ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Albrecht และคณะ [5]

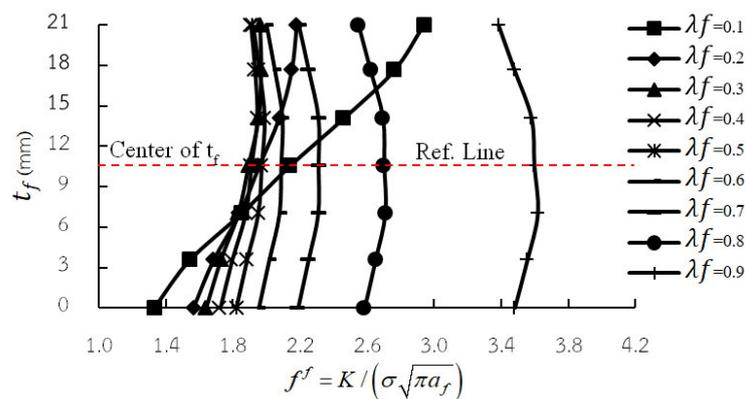
ในการศึกษาความเหมาะสมของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้เปรียบเทียบค่า SIF (แสดงด้วยค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต,  $f^{w,f}$ ) กับผลการวิเคราะห์ของ Albrecht และคณะ 2008 [5] สำหรับคานเหล็กขนาด W1000×222 ที่มีรอยร้าวขนาด  $\lambda_w = 0.1, 0.2, \dots, 0.7$  และ  $\lambda_f = 0.1, 0.2, \dots, 0.9$  ภายใต้แรงดึงและแรงดัด

ในการศึกษาของ Albrecht และคณะ 2008 [5] ได้ใช้ประเภทเอลิเมนต์เป็นผนังบาง (shell element, S8R5) ดังรูปที่ 8-a ซึ่งมีข้อจำกัดคือไม่ทราบการกระจายของค่า  $f^{f,w}$  ที่ปลายรอยร้าวในแนวความหนาของแผ่นปีกและเอว แตกต่างจากการศึกษานี้ที่ใช้ 8-node brick element (linear), C3D8 ดังรูปที่ 8-b ซึ่งจะทราบการกระจายค่า  $f^{f,w}$  ในแนวความหนาของแผ่นได้ซึ่งพบว่ากระจายของค่า  $f^{f,w}$  ตามแนวความหนาของแผ่นจะไม่สม่ำเสมอโดยมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของแผ่น รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างการกระจายของค่า  $f^f$  ตามแนวความหนาของแผ่นปีกภายใต้แรงดึงเมื่อ  $\lambda_w = 0.4$  (คานมีหน้าตัด W1000×222) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า  $f^{f,w}$  สูงสุดที่กึ่งกลางความหนาของแผ่นเทียบกับผลของ Albrecht และคณะ 2008 [5] พบว่ามีแนวโน้มที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 10 ถึง 13 โดยในกรณีรับแรงดึง ค่า  $f^f$  และ  $f^w$  ในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าผลของ Albrecht และคณะ 2008

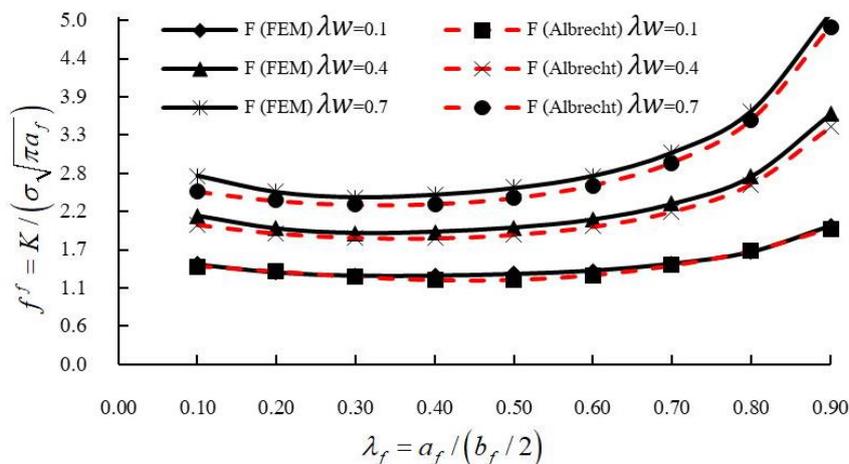
[5] โดยเฉลี่ยที่ 3 - 6 % ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อ  $\lambda_w = 0.7$  และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ  $\lambda_w$  มีค่าต่ำกว่า 0.7 ดังรูปที่ 10 และ 11 และในกรณีรับแรงคดค่า  $f^f$  และ  $f^w$  ในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าผลของ Albrecht และคณะ 2008 [5] โดยเฉลี่ยที่ 2 - 3 % ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อ  $\lambda_w = 0.7$  และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ  $\lambda_w$  มีค่าต่ำกว่า 0.7 ดังรูปที่ 12 และ 13 เช่นเดียวกัน



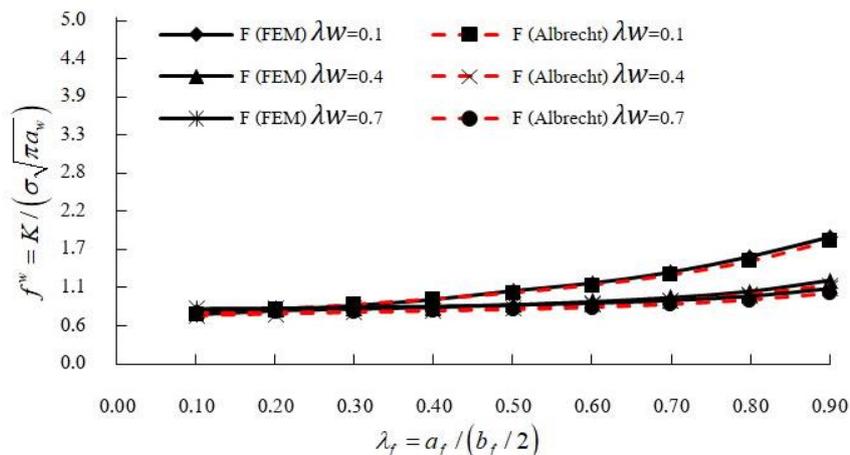
รูปที่ 8 แสดงประเภทเอลิเมนต์ (a) 8-node shell elements (b) 8-node brick element



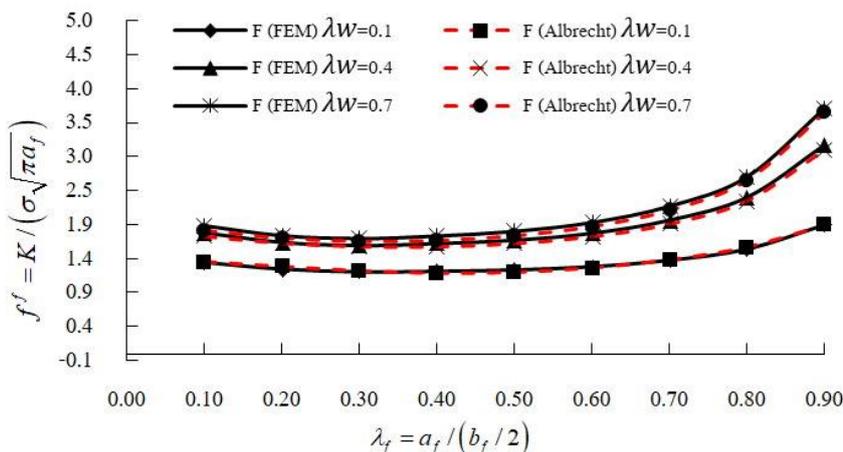
รูปที่ 9 การกระจายของค่า  $f^f$  ตามแนวความหนาของปีกภายใต้แรงดึงสำหรับรอยร้าวขนาด  $\lambda_w$  เท่ากับ 0.4 (W1000×222)



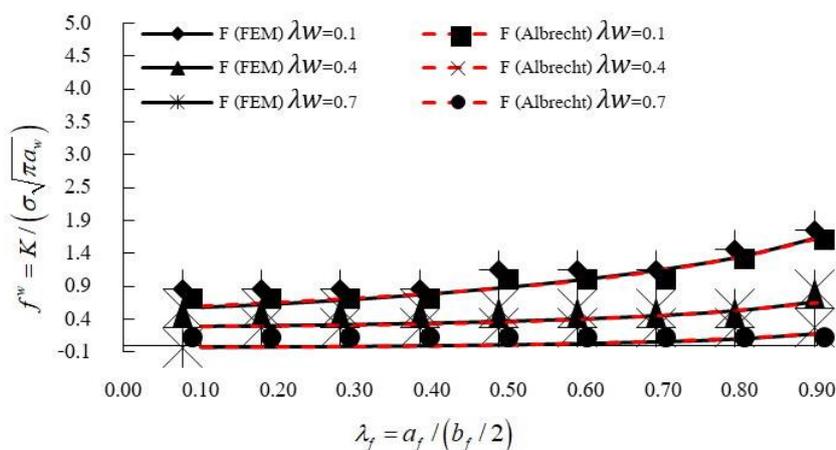
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Ref}^f$  ที่ปีกรับแรงอัดของเหล็กรูปตัวเอชขนาด W1000×222 ภายใต้แรงดึง



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^w$  กับ  $f_{Ref.}^w$  ที่เอวของเหล็กรูปตัวเอชขนาด W1000×222 ภายใต้แรงดึง



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^f$  กับ  $f_{Ref.}^f$  ที่ปีกรับแรงอัดของเหล็กรูปตัวเอชขนาด W1000×222 ภายใต้แรงดัด

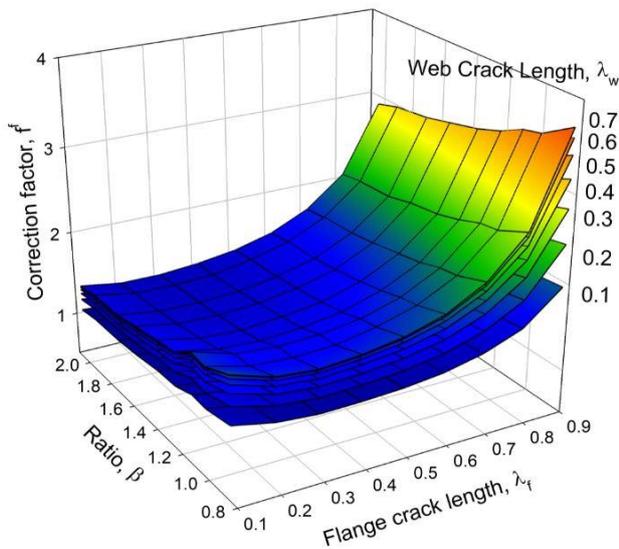


รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่า  $f_{FEM}^w$  กับ  $f_{Ref.}^w$  ที่เอวของเหล็กรูปตัวเอชขนาด W1000×222 ภายใต้แรงดัด

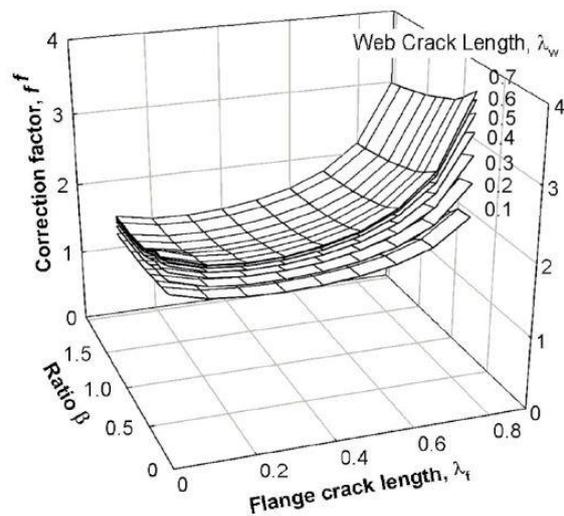
5. ผลกระทบของหน้าตัด (ตัวแปร  $\beta$  และ  $\gamma$ ) ต่อค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต

รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของตัวแปร  $\beta$  ของคานเหล็กในตารางที่ 1 และขนาดรอยร้าวในปีกและเอว ( $\lambda_f$  และ  $\lambda_w$ ) ต่อค่า  $f^f$  และ  $f^w$  ภายใต้แรงคดซึ่งพบว่า ตัวแปร  $\beta$  ส่งผลกระทบต่อค่า SIF ที่ปลายรอยร้าวในปีกมากกว่าปลายรอยร้าวในเอวของคาน และผลจากการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลของ Albrecht และคณะ 2008 [5]

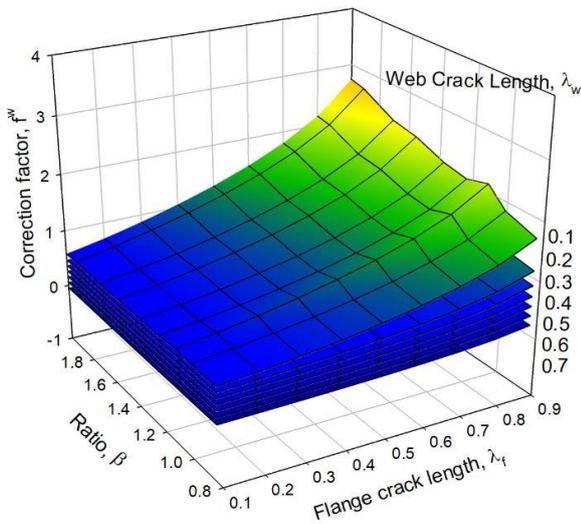
ในการศึกษา Albrecht และคณะ 2008 [5] พบว่า ค่า  $\gamma$  มีผลกระทบต่อค่า  $f^f$  และ  $f^w$  น้อยกว่า 1% จึงทำให้สมการที่ (2) ไม่มีตัวแปร  $\gamma$  แต่เนื่องจากการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองที่มีความละเอียดสูงขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันว่าตัวแปร  $\gamma$  มีผลกระทบกับค่า  $f^{w,f}$  มากน้อยเพียงใดจึงได้เลือกหน้าตัดที่มีตัวแปร  $\beta$  ที่ใกล้เคียงกัน และตัวแปร  $\gamma$  ที่แตกต่างกันมากที่สุด 1 คู่ จากตารางที่ 1 คือ ขนาด W1000  $\times$  286 (มีค่า  $\beta = 1.111$  และ  $\gamma = 2.110$ ) และ W920  $\times$  253 (มีค่า  $\beta = 1.107$  และ  $\gamma = 2.915$ ) รูปที่ 15 ถึง 18 แสดงผลกระทบของตัวแปร  $\gamma$  ต่อความแตกต่างของค่า  $f^f$  และ  $f^w$  ภายใต้แรงคดและแรงคด ตามลำดับ พบว่า ตัวแปร  $\gamma$  มีผลต่อความแตกต่างของค่า  $f^f$  โดยเฉลี่ยที่ 3.6% ในกรณีรับแรงคดและแรงคด และมีผลต่อความแตกต่างของค่า  $f^w$  โดยเฉลี่ยที่ 10% ในกรณีรับแรงคดและ 15% ในกรณีรับแรงคด ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า  $\gamma$  ส่งผลกระทบต่อค่า SIF ที่ปลายรอยร้าวในแผ่นเอวแต่ไม่มีผลต่อค่า SIF ที่ปลายรอยร้าวในแผ่นปีก ทั้งในกรณีรับแรงคดและแรงคด



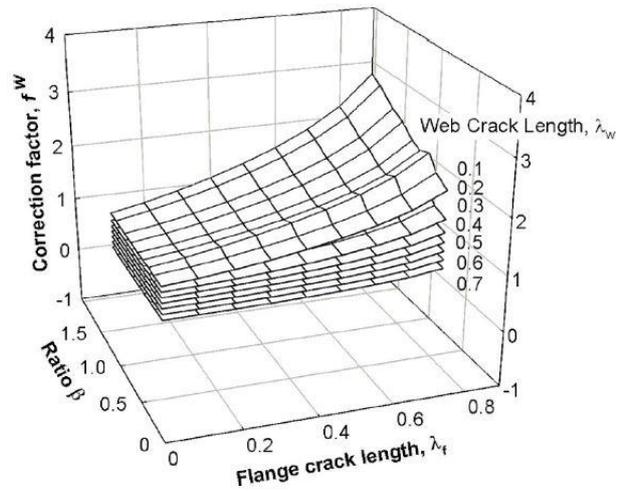
(a)  $f^f$  FEM



(b)  $f^f$  Albrecht และคณะ 2008 [5]

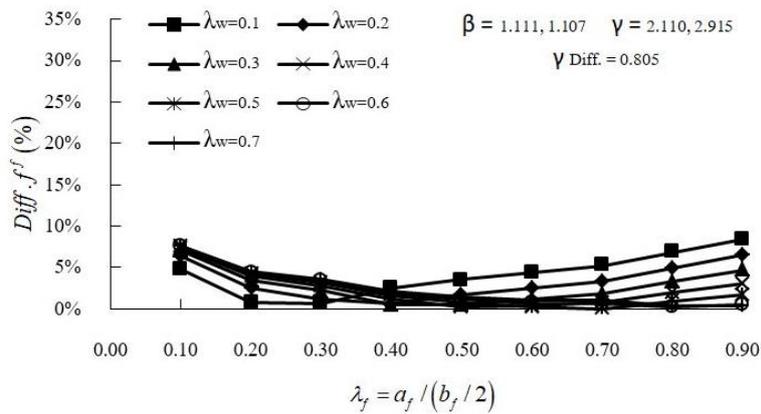


(c)  $f^w$  FEM

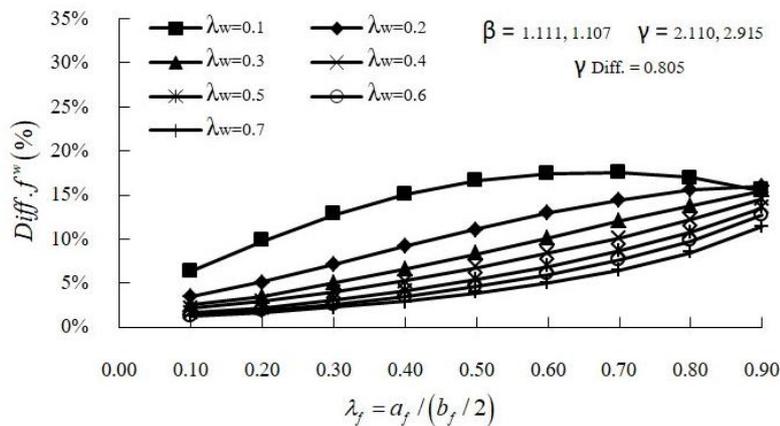


(d)  $f^w$  Albrecht และคณะ 2008 [5]

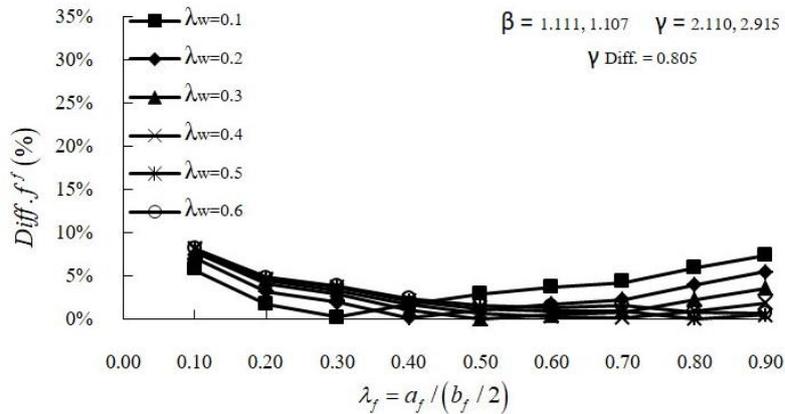
รูปที่ 14 ผลกระทบของ  $\beta$ ,  $\lambda_f$  และ  $\lambda_w$  ต่อ  $f^{w,f}$  ภายใต้แรงคัดในการศึกษานี้เทียบกับ Albrecht และคณะ 2008 [5]



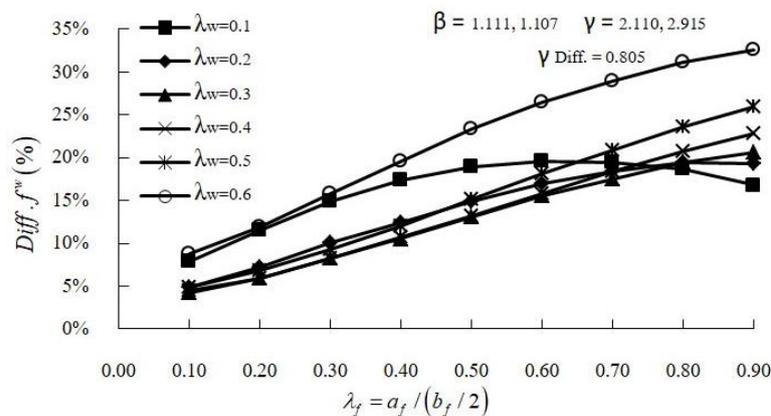
รูปที่ 15 ผลกระทบของตัวแปร  $\gamma$  ต่อความแตกต่างของค่า  $f^f$  (ปีก) ภายใต้แรงคัด



รูปที่ 16 ผลกระทบของตัวแปร  $\gamma$  ต่อความแตกต่างของค่า  $f^w$  (เอว) ภายใต้แรงคัด



รูปที่ 17 ผลกระทบของตัวแปร  $\gamma$  ต่อความแตกต่างของค่า  $f^f$  (ปีก) ภายใต้แรงดัด



รูปที่ 18 ผลกระทบของตัวแปร  $\gamma$  ต่อความแตกต่างของค่า  $f^w$  (เอว) ภายใต้แรงดัด

## 6. สมการทำนายค่า SIF สำหรับคานหลักหน้าตัดรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่เอวและปีกแบบสมมาตร

จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของ 2,016 แบบจำลอง ได้ทำการสร้างฐานข้อมูลของค่าตัวประกอบปรับแก้เรขาคณิต  $f_{t,b}^{w,f}$  ของคานหลักรูปตัวเอชในกรณีภายใต้แรงดึงและแรงดัด จำนวน 4,032 ข้อมูล ซึ่งแบ่งได้สองกลุ่มใหญ่ คือ ค่า  $f_t^{w,f}$  และ  $f_b^{f,w}$  ภายใต้แรงดึงและแรงดัดอย่างละ 2,016 ข้อมูล และสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย คือ  $f_t^f$  และ  $f_b^f$  (ปีก) อย่างละ 1,008 ข้อมูล และ  $f_t^w$  และ  $f_b^w$  (เอว) อย่างละ 1,008 ข้อมูล ซึ่งใน 1,008 ข้อมูลนี้จัดเป็น 63 ข้อมูลต่อหนึ่งขนาดหน้าตัดคานหลักรูปตัวเอชจากทั้งหมด 16 หน้าตัด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2 แสดงการแบ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่เชิงสัญลักษณ์ โดยแบ่งข้อมูลเป็น 4 ชุด แต่ละชุดใช้ข้อมูล 1008 ประกอบด้วย 756 ข้อมูล (คิดเป็น 75% ของข้อมูลทั้งหมด) ซึ่งนำไปใช้ในการพัฒนาสมการและ 252 ข้อมูล (คิดเป็น 25% ของข้อมูลทั้งหมด) ที่ใช้ในการทดสอบสมการ ทั้งนี้ในการพัฒนาสมการโดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ได้กำหนดเซตของฟังก์ชัน นอล  $F = \{+, -, *, /, \text{square root}, \text{power}\}$  ใช้สำหรับชุดข้อมูลที่ 1 และ 3 ตามตารางที่ 2 และ  $F = \{+, -, *, /, \text{power}\}$  ใช้สำหรับชุดข้อมูลที่ 2 ตามตารางที่ 2 และ  $F = \{+, -, *, \text{power}\}$  ใช้สำหรับชุดข้อมูลที่ 4 ในตาราง

ที่ 2 โดยกำหนดเซตของเทอร์มินอลของทุกชุดข้อมูล  $T = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$  โดยมีค่าพารามิเตอร์ควบคุมในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ดังระบุในตารางที่ 3 ในการพัฒนาสมการโดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์สำหรับแต่ละชุดข้อมูล จำเป็นจะต้องปรับเปลี่ยนค่าจำนวนการวิวัฒนาการ (Generation) เพิ่มขึ้นไปได้แก่ 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ครั้ง เพื่อหาค่า Pearson's  $R^2$  ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุดและนำเสนอสมการที่มีค่า Pearson's  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากที่สุดมาเป็นผลเฉลยของสมการ แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 19 แสดงแผนภาพกระจายของสมการที่พัฒนาเทียบกับชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบของจำนวนการวิวัฒนาการเท่ากับ 2,000 ครั้ง

ตารางที่ 2 การแบ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ถดถอยเชิงสัญลักษณ์

ชุดข้อมูล (Model)	ข้อมูลสำหรับพัฒนาสมการ (Training set)		ข้อมูลที่ใช้ทดสอบสมการ (Testing set)		รวมข้อมูล (Total of Data)
	กลุ่มข้อมูล (Data group)	จำนวนข้อมูล (Number of data)	กลุ่มข้อมูล (Data group)	จำนวนข้อมูล (Number of data)	
1. $f_t^f$	1 ถึง 16 (ตารางที่ 1)	756	1 ถึง 16 (ตารางที่ 1)	252	1008
2. $f_t^w$	1 ถึง 16 (ตารางที่ 1)	756	1 ถึง 16 (ตารางที่ 1)	252	1008
3. $f_b^f$	1 ถึง 16 (ตารางที่ 1)	756	1 ถึง 16 (ตารางที่ 1)	252	1008
4. $f_b^w$	1 ถึง 16 (ตารางที่ 1)	756	1 ถึง 16 (ตารางที่ 1)	252	1008

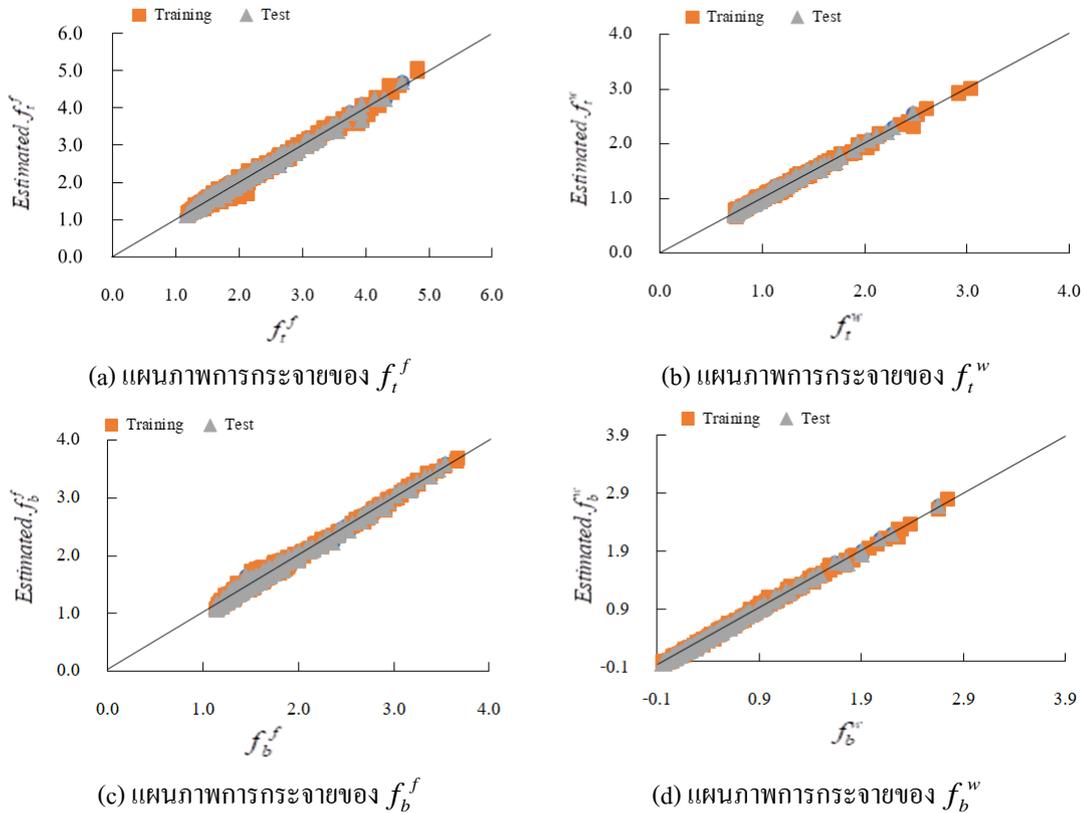
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ควบคุมในการวิเคราะห์ถดถอยเชิงสัญลักษณ์

Parameter	Value
Number of tree structures	10,000
Probability of mutation	25%
Elite count (reproduction option)	2
Maximum number of tree depth	15
Maximum number of tree length	20

ตารางที่ 4 ผลของการพัฒนาสมการด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์

จำนวนการวิวัฒนาการ (Generation)	ชุดข้อมูลที่ 1. $f_t^f$		ชุดข้อมูลที่ 2. $f_t^w$		ชุดข้อมูลที่ 3. $f_b^f$		ชุดข้อมูลที่ 4. $f_b^w$	
	Training Pearson's $R^2$	Testing Pearson's $R^2$						
	500	0.864	0.855	0.881	0.889	0.852	0.847	0.889
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

จากตารางที่ 2 พบว่า Pearson's,  $R^2$  อยู่ใกล้ 1.0 เมื่อจำนวนการวิวัฒนาการสูงขึ้น ในงานศึกษานี้จึงนำเสนอสมการทำนายค่า SIF สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่เอวและปีกแบบสมมาตรและค่าสัมประสิทธิ์  $c_0$  ถึง  $c_{10}$  สำหรับสมการที่ (17), (18), (20) และ (21) แสดงดังตารางที่ 5 ที่จำนวนการวิวัฒนาการเท่ากับ 2,000 ครั้ง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้



รูปที่ 19 แผนภาพการกระจายของ  $f_{t,b}^{f,w}$  ที่จำนวนการวิวัฒนาการเท่ากับ 2,000 ครั้ง

### 6.1 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดึง

$$K^f = f_t^f (\lambda_w, \lambda_f, \beta) \sigma_t \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}) \quad (16a)$$

$$K^w = f_t^w (\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) \sigma_t \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}) \quad (16b)$$

$$\text{เมื่อ } f_t^f = \left( \left( \frac{c_0}{c_1 \beta} + (c_2 \lambda_f)^{c_3} \right) (c_4 \lambda_f + c_5 c_6 \lambda_w) + \frac{\sqrt{c_7 \lambda_w}}{c_8 \lambda_f} \right) c_9 + c_{10} \quad (\text{สำหรับปลายรอยร้าวในปีก}) \quad (17)$$

$$\text{และ } f_t^w = \frac{c_0 \lambda_f}{c_1 \gamma} \left( \left( (c_2 \lambda_f)^{c_3} + c_4 \lambda_w (c_5 \gamma - c_6 \beta) \right) + \frac{c_7 \lambda_f}{c_8 \lambda_w} \right) c_9 + c_{10} \quad (\text{สำหรับปลายรอยร้าวในเอว}) \quad (18)$$

เมื่อ  $\sigma_f$  คือ หน่วยแรงดึงกระทำบนหน้าตัดของคานเหล็กรูปตัวเอช ดังรูปที่ 6-b (MPa)

6.2 สมการทำนายค่า SIF กรณีรับแรงดัด

$$K^f = f_b^f (\lambda_w, \lambda_f, \beta) \sigma_b \sqrt{\pi a_f} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}) \quad (19a)$$

$$K^w = f_b^w (\lambda_w, \lambda_f, \beta, \gamma) \sigma_b \sqrt{\pi a_w} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}) \quad (19b)$$

เมื่อ  $f_b^f = (\sqrt{c_0 \lambda_w} + (c_1 + c_2 \lambda_w)) \left( \frac{(c_3 + (c_4 \lambda_f)^{c_5})}{c_6 \beta} + (c_7 \lambda_f)^{c_8} \right) c_9 + c_{10}$  (สำหรับปลายรอยร้าวในปีก) (20)

และ  $f_b^w = (c_0 \lambda_f + (c_1 \lambda_w)^{c_2} (c_3 \lambda_w + c_4 \lambda_f c_5 \beta)) ((c_6 \lambda_w - c_7 \lambda_f) + c_8 \gamma) c_9 + c_{10}$  (สำหรับปลายรอยร้าวในเอว) (21)

เมื่อ  $\sigma_b = Md / 2I$  คือ หน่วยแรงดัดกระทำสูงสุดที่ท้องคานเหล็กรูปตัวเอช ดังรูปที่ 6-c (MPa),  $M$  คือ แรงดัดกระทำ (N-m) และ  $I$  คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดคานเหล็กที่ไม่คิดผลส่วนโค้งของหน้าตัด ( $\text{m}^4$ )

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์  $c_0$  ถึง  $c_{10}$  สำหรับสมการที่ (17), (18), (20) และ (21)

	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
$f_t^f$	24.773	1.8975	1.8567	6.0000	1.8968	12.774	0.8754	2.0794	0.44354	0.01053	1.0292
$f_t^w$	1.3173	0.37607	1.3148	10.0000	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	6.0000	0.29138	1.0179
$f_b^w$	0.64487	1.3038	-1.0000	1.9842	0.62382	0.86454	1.8988	1.0105	0.088216	-0.34575	0.80652

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (SIF) สำหรับรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรในคานเหล็ก รีดร้อนหน้าตัดรูปตัวเอชด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยหน้าตัดคานเหล็กรูปตัวเอชในการวิเคราะห์ได้เลือกมาจาก *AISC Manual of Steel Construction* ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ตัวแปรของหน้าตัดคานที่ส่งผลต่อค่า SIF คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของแผ่นปีกทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอว ( $\beta$ ) และอัตราส่วนระหว่างความลึกของคานเหล็กต่อความกว้างของปีก ( $\gamma$ ) โดย  $\beta$  ส่งผลกระทบบต่อค่า SIF ในปีกและเอว ในขณะที่  $\gamma$  ส่งผลกระทบบต่อค่า SIF ในเอวของคานเหล็กเท่านั้น จากการวิเคราะห์ฐานข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ด้วยโปรแกรมเชิง

พันธุกรรม บทความนี้ได้นำเสนอสมการทำนายค่า SIF สำหรับคานเหล็กหน้าตัดรูปตัวเอชที่มีรอยร้าวที่ปีกแบบสมมาตรในคานเหล็กที่รับแรงดึงหรือแรงดัดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์อายุความล้าและประเมินการวิบัติจากรอยร้าว

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Roylance, D. *Introduction to fracture mechanics*, Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA02139, 2001.
- [2] AASHTO (LRFD), *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Washington, D.C ,American: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [3] AASHTO, *The Manual For Bridge Evaluation* (2nd ed.), Washinton DC,American: Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [4] Fisher, J. W., Frank, K. H., Hirt, M. A. and McNamee, B. M, *Effects of weldments on fatigue strength of steel beams*, Washington: NCHRP-Report 102, Highway Research Board, National Research Council, 1970, p. No. 102.
- [5] Albrecht, P. Lenwari, A. and Feng, D, Stress Intensity Factors for Structural Steel I-beams, *Journal of Structural Engineering,ASCE*, 2008, 134, pp. 421-429.
- [6] Jirapong, K. *Fracture Mechanics*, Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2010.
- [7] Dunn, M. L., Suwito, W., Hunter, B, Stress Intensity for Cracked I-beams, *Engineering Fracture Mechanics*, 1997, 57(6), pp. 609-615, 1997.
- [8] Heuristiclab, Genetic Programming Regression And Classification, *Heuristic Optimization Software Systems - Modeling of Heuristic Optimization Algorithms in the HeuristicLab Software Environment*, 2009.
- [9] Tada, H., Paris, P. C., and Irwin, G. R, *The stress analysis of cracks handbook*, Hellertown: Del Research Corporation, 1973.
- [10] Shih, C. Moran, B. and Nakamura, T, Energy release rate along a three-dimensional crack front in a thermally stressed body, *International Journal of Fracture*, 1986, 30, pp. 79-102.
- [11] Sette, S; Boullart, L, Genetic programming: principles and applications, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2001, 14(6), pp. 727-736.
- [12] Do, B. and Lenwari, A. Optimization of Fiber-Reinforced Polymer Patches for Repairing Fatigue Cracks in Steel Plates Using a Genetic Algorithm, *Journal of Composites for Construction,ASCE*, 2020, 24(2), pp. 1-15.