

## การเปรียบเทียบกำลังออกแบบ Cellular Beam ตามมาตรฐาน EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10

### Design Strength Comparison of Cellular Beam Based on EN1993-1-1 and ANSI/AISC 360-10 Codes

วรเทพ แซ่ล่ง ปฐเมศ ภาณิตพจมาน\*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

Worathep Sae-Long Pattamad Panedpojaman\*

Faculty of Engineering, Prince Of Songkla University, Hat-Yai, Songkhla 90110

Tel : 0-7428-7140 E-mail: ppattamad@eng.psu.ac.th

#### บทคัดย่อ

เพื่อให้ทราบข้อจำกัดและข้อแตกต่างของการออกแบบ Cellular beam ตามมาตรฐาน EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10 จึงศึกษาผลการออกแบบ Cellular beam จากมาตรฐานทั้งสอง โดยเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งใช้กรณีศึกษาจำนวน 240 แบบจำลอง ครอบคลุมตัวแปรด้านขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณตั้งต้น ความยาว อัตราส่วนขนาดช่องเปิด และ อัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด โดยจำแนกลักษณะการวิบัติออกแบบ 3 กลุ่มหลัก อันได้แก่ การวิบัติที่แผ่นเอว การวิบัติจากโมเมนต์ดัดวีเรนดีล และการวิบัติจากโมเมนต์ดัด ผลการศึกษาพบว่าลักษณะการวิบัติจากการออกแบบสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ และการออกแบบตาม ANSI/AISC 360-10 ให้กำลังโดยเฉลี่ยร้อยละ 106.6 67.7 และ 90.1 ส่วน EN1993-1-1 ให้กำลังโดยเฉลี่ยร้อยละ 95.1 76.1 และ 90.2 เมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์สำหรับกรณีการวิบัติที่แผ่นเอว การวิบัติจากโมเมนต์ดัดวีเรนดีล และการวิบัติจากโมเมนต์ดัด ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการออกแบบตาม ANSI/AISC 360-10 อาจมีความเสี่ยงความปลอดภัยภัยสำหรับกรณีการวิบัติที่แผ่นเอว แต่ในกรณีการวิบัติจากโมเมนต์ดัดวีเรนดีลให้ผลการออกแบบที่เผื่อค่ามากเกินไปเมื่อเทียบกับการออกแบบตาม EN1993-1-1

**คำหลัก** กำลังออกแบบ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ คานเหล็กที่มีช่องเปิดซึ่งมีระยะห่างสม่ำเสมอ EN1993-1-1 ANSI/AISC 360-10

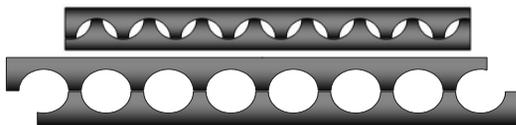
#### Abstract

To comprehend the limitation and difference of cellular beam designs, cellular beams are designed based on EN1993-1-1 and ANSI/AISC 360-10 codes and compared with analytical results of the nonlinear finite element (FE) method. A total of 240 FE models, covering cellular beam parameters such as original steel beam sections, lengths, opening ratios and spacing opening ratios, are used in this study. The cellular beam failures are grouped into 3 categories, namely the web-post failure (WPF), the Vierendeel moment failure (VMF) and the bending moment failure (BMF). The design failures conform to the FE analytical failures. Comparing with the FE strength of WPF, VMF and BMF, ANSI/AISC 360-10 code provides the design strength of 106.6%, 67.7% and 90.1%, respectively whereas EN1993-1-1 code provides the design strength of 95.1%, 76.1% and 90.2%, respectively. It describes that, comparing with the design with EN1993-1-1 code, the design with ANSI/AISC 360-10 code may not be safe for the web-post failure and may be over conservative for the Vierendeel moment failure.

**Keywords:** design strength, FE model, cellular beam, EN1993-1-1, ANSI/AISC 360-10

## 1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้งานคานเหล็กที่มีช่องเปิดซึ่งมีระยะห่างสม่ำเสมอ (cellular beam) อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ [1] และเริ่มมีการนำมาใช้งานในประเทศไทยในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยมีลักษณะเป็นคานเหล็กที่มีช่องเปิดในแผ่นเอว เรียงเป็นระยะตลอดความยาว ซึ่งผลิตโดยการตัดคานเหล็กรูปพรรณตั้งต้นตามแนวตั้งแสดงในรูปที่ 1 เมื่อนำมาเชื่อมใหม่จะเกิดเป็นช่องเปิดที่มีระยะห่างสม่ำเสมอ และทำให้ความลึกของหน้าตัดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 40-60 คานเหล็กดังกล่าวทำให้เกิดความประหยัดค่าโครงสร้างจากการลดน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้างสำหรับคานที่มีความสูงเท่ากัน อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในด้านการวางระบบต่างๆ ให้สามารถลอดผ่านช่องเปิดรูปวงกลม นอกจากนี้การใช้งานคานเหล็กที่มีช่องเปิดซึ่งมีระยะห่างสม่ำเสมอยังมีรูปทรงที่สวยงามและทันสมัย



รูปที่ 1 การตัดและประกอบเหล็กรูปพรรณเพื่อทำ Cellular beam

งานวิจัยสำหรับการออกแบบคานเหล็กลักษณะดังกล่าวได้มีการพัฒนาอย่างกว้างขวางในกลุ่มประเทศยุโรปในรูปของข้อแนะนำด้านพฤติกรรมและการคำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นใน Cellular beam อันได้แก่ SCI P100 [2] และ SCI P355 [3] ซึ่งการออกแบบ Cellular beam นั้นหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นต้องไม่เกินกำลังต้านทานหน่วยแรงซึ่งเป็นการอ้างอิงตามมาตรฐาน EN 1993-1-1 [4] โดยมีงานวิจัยจำนวนมากที่สนับสนุนและพัฒนาการออกแบบตามมาตรฐาน EN 1993-1-1 [5-7] และการวิจัยเพื่อตรวจสอบผลการออกแบบ Cellular beam ได้โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [8-13] ผลการศึกษาโดยมากแสดงถึงความปลอดภัยในการออกแบบตามมาตรฐาน EN 1993-1-1

อย่างไรก็ตามการศึกษากการออกแบบ Cellular beam บนพื้นฐานของมาตรฐาน AISC ซึ่งเป็นพื้นฐานของการออกแบบในประเทศไทยยังมีการศึกษาที่จำกัดโดยการออกแบบกำลังต้านทานหน่วยแรงตามมาตรฐาน EN 1993-1-1 จะมีความแตกต่างจากมาตรฐาน AISC

และอาจส่งผลต่อการกำหนดความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของ Cellular beam ทั้งนี้งานวิจัยการออกแบบ Cellular beam ตามมาตรฐาน AISC ได้แก่ Panedpojaman และคณะ [14] โดยศึกษาการคำนวณกำลังต้านทานการโก่งเดาะของแผ่นเอว โดยเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณกำลังต้านทานตามมาตรฐาน EN 1993-1-1 [4] และ ANSI/AISC 360-10 [15] กับผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการออกแบบตาม ANSI/AISC 360-10 [15] ให้ค่ากำลังต้านทานมากกว่าการคำนวณตามมาตรฐาน EN 1993-1-1 [4] ประมาณร้อยละ 13 โดยเฉลี่ย อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวใช้หน้าตัดเหล็กรูปพรรณที่จำหน่ายในต่างประเทศ ซึ่งมีความแตกต่างจากขนาดเหล็กรูปพรรณในประเทศไทย

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาผลการออกแบบกำลังต้านทานหน่วยแรงสูงสุด (nominal strength) ของ Cellular beam บนพื้นฐานของมาตรฐาน EN1993-1-1 [4] และ ANSI/AISC 360-10 [15] โดยมีการเปรียบเทียบความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งใช้ขนาดเหล็กในประเทศไทยเป็นกรณีศึกษาและครอบคลุมโมเมนต์ดัดในระนาบ แรงเฉือนแนวตั้ง โมเมนต์ดัดวีเรนดิล แรงอัดโก่งเดาะที่แผ่นเอว แรงเฉือนแนวราบในแผ่นเอว และโมเมนต์ดัดในแผ่นเอว โดยผลการศึกษาเพื่อให้ทราบข้อจำกัดและทำให้เกิดความมั่นใจในการออกแบบ Cellular beam บนพื้นฐานของ ANSI/AISC 360-10 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีการใช้งานในประเทศไทย

## 2. พฤติกรรมและการออกแบบ

การออกแบบ Cellular beam จำเป็นต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมเชิงกลที่เกิดขึ้นจากการกระจายแรงผ่านช่องเปิด โดยการกระจายหน่วยแรงดังกล่าวอาจทำให้เกิดพฤติกรรมการวิบัติในภาพรวมของโครงสร้างหรือการวิบัติเฉพาะส่วนของช่องเปิด หน่วยแรงและพฤติกรรมเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับการกระจายหน่วยแรงใน Cellular beam สามารถพิจารณาได้ใน 2 ส่วนหลัก คือ โมเมนต์ดัด และ แรงเฉือน อย่างไรก็ตามการวิบัติแท้จริงมักไม่เกิดจากผลของแรงเฉือนโดยตรง แต่เกิดจากหน่วยแรงเกี่ยวเนื่องซึ่งเป็นผลของการกระจายแรงเฉือนผ่านช่องเปิด อันได้แก่ โมเมนต์ดัดวีเรนดิล แรงอัดโก่งเดาะที่แผ่น

เอว แรงเฉือนแนวราบในแผ่นเอว และโมเมนต์ดัดในแผ่นเอว ทั้งนี้ลักษณะการวิบัติที่พบบ่อยในการทดสอบ คือ การวิบัติจากโมเมนต์ดัดวีเรนต์ และ การโก่งเดาะที่แผ่นเอว

### 2.1 ตัวแปรด้านขนาด Cellular beam

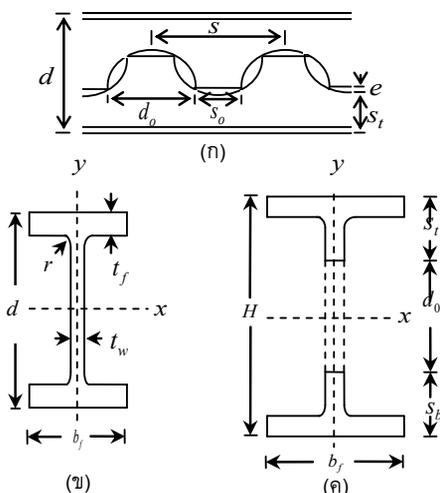
เพื่อให้สามารถคำนวณขนาดหน้าตัดที่ใช้ในการออกแบบ Cellular beam จึงจำเป็นต้องอธิบายตัวแปรพื้นฐานของการตัดประกอบ Cellular beam จากเหล็กรูปพรรณหน้าตัด H และ I ในแนวกึ่งกลางตามความยาวโดยใช้รูปแบบการตัดช่วงซ้ำครึ่งวงกลม (half circle pattern) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดย  $d$  คือ ความลึกของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณตั้งต้น  $b_f$  คือ ความกว้างของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ  $t_w$  คือ ความหนาของแผ่นเอวหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ  $t_f$  คือ ความหนาของแผ่นปีกหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ และสามารถคำนวณตัวแปรด้านขนาด Cellular beam อันได้แก่ ความลึกของ Cellular beam ( $H$ ) และความลึกของหน้าตัดรูปตัวทีตามแนวกึ่งกลางช่องเปิด ( $s_r$ ) ดังสมการที่ (1)-(3) ตามลำดับ

$$H = d + \frac{d_0}{2} - e \quad (1)$$

$$e = \frac{d_0}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{s-d_0}{2}\right)^2} \quad (2)$$

$$s_r = \frac{H-d_0}{2} \quad (3)$$

โดย  $d_0$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด และ  $s$  คือ ระยะห่างระหว่างช่องเปิดที่วัดจากกึ่งกลางช่องเปิด



รูปที่ 2 การตัดและประกอบเหล็กรูปพรรณเพื่อทำ Cellular beam: (ก) รูปแบบการตัดช่วงซ้ำครึ่งวงกลม (ข) หน้าตัดเหล็กรูปพรรณตั้งต้น และ (ค) Cellular beam

### 2.2 หน่วยแรงคงค้าง

แม้ว่าการตัดประกอบ Cellular beam มีขั้นตอนของการเชื่อม ซึ่งมีผลของหน่วยแรงคงค้าง (residual stress) แฝงอยู่ แต่การออกแบบตาม SCI P100 [2] และ SCI P355 [3] ไม่อธิบายถึงผลของหน่วยแรงคงค้างดังกล่าว อย่างไรก็ตามหน่วยแรงคงค้างไม่มีผลต่อรูปแบบของการวิบัติ [16-17] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบ Cellular beam กับกรณีวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งพิจารณาหน่วยแรงคงค้างและไม่พิจารณาหน่วยแรงคงค้าง แต่ผลของหน่วยแรงคงค้างทำให้กำลังรับหน่วยแรงแต่ละประเภทลดลง ประมาณร้อยละ 5-10 [14,17] เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีหน่วยแรงคงค้าง ทั้งนี้การกำหนดความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัด (imperfection) ที่เหมาะสมสามารถชดเชยผลกระทบดังกล่าวได้ [16]

### 2.3 โมเมนต์ดัด

โมเมนต์ดัดเป็นหน่วยแรงที่เกี่ยวข้องกับแรงอัดและแรงดึงในส่วนบนและล่างหน้าตัดคาน ดังนั้นช่องเปิดในแผ่นเอวจึงไม่กระทบความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานมากนัก พฤติกรรมการวิบัติจากโมเมนต์ดัดจึงใกล้เคียงกับคานเหล็กทั่วไป ซึ่งการวิบัติมี 2 ระดับคือ การดัดในระนาบ (in plane bending) และการโก่งเดาะด้านข้างจากการบิด (lateral torsional buckling) ซึ่งเกิดขึ้นกับคานที่มีโมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนรองมีค่าน้อยและปราศจากการยึดรั้งด้านข้างที่เพียงพอ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้จำกัดเฉพาะในส่วนของการดัดในระนาบ

การคำนวณกำลังต้านทานการดัดในระนาบ ( $M_{mn}$ ) ตามมาตรฐานขึ้นกับชั้น (class) หรือประเภทของหน้าตัดในส่วนแผ่นเอวและปีก ซึ่งการพิจารณาดังกล่าวมีความแตกต่างกันดังสมการที่ (4)-(7)

มาตรฐาน EN1993-1-1

$$M_{mn,E} = Z_x f_y \quad \text{สำหรับหน้าตัดชั้น 1 (class 1)} \quad (4)$$

$$M_{mn,E} = S_x f_y \quad \text{สำหรับหน้าตัดชั้น 2 (class 2)} \quad (5)$$

มาตรฐาน AISC 360-05

$$M_{mn,A} = M_p = Z_x f_y \quad \text{สำหรับหน้าตัดอัดแน่น} \quad (6)$$

$$M_{mn,A} = M_p - \frac{(M_p - M_r)(\lambda - \lambda_p)}{(\lambda_r - \lambda_p)} \quad \text{สำหรับหน้าตัดไม่อัดแน่น} \quad (7)$$

(สัญลักษณ์ (subscript) E หมายถึง การคำนวณตามมาตรฐาน EN1993-1-1 [4] และ สัญลักษณ์ A หมายถึง การคำนวณตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 [15])  
โดย

$$Z_x = (b_f t_f)(H - t_f) + \frac{t_w}{4}(H - 2t_f)^2 - \frac{t_w}{4}(0.9d_o)^2 \quad (8)$$

$$S_x = \frac{2I_x}{H} \quad (9)$$

$$I_x = \frac{1}{12}(b_f H^3 - (b_f - t_w)(H - 2t_f)^3 - t_w(0.9d_o)^3) \quad (10)$$

$$M_r = 0.7S_x F_y \quad (11)$$

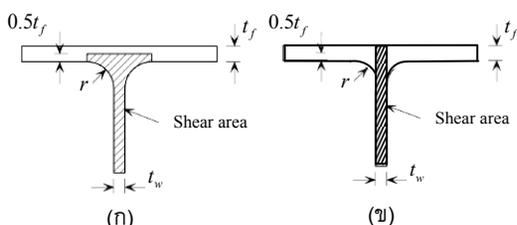
$Z_x$  คือ โมดูลัสพลัสติกของหน้าตัด  $S_x$  คือ โมดูลัสอิลาสติกของหน้าตัด  $I_x$  คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนหลัก ทั้งนี้ SCI P355 กำหนดให้คำนวณค่าโมดูลัสของหน้าตัดโดยหักลดช่องเปิดเพียงร้อยละ 90 ของเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\lambda$  คือ สัมประสิทธิ์อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาชั้นส่วนที่พิจารณา (แผ่นปีกหรือแผ่นเอว)  $\lambda_p$  คือ สัมประสิทธิ์อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาชั้นส่วน ณ จุดเปลี่ยนระหว่างช่วงพลาสติกและช่วงอินลาสติก และ  $\lambda_s$  คือ สัมประสิทธิ์อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาชั้นส่วน ณ จุดเปลี่ยนระหว่างช่วงอินลาสติกและช่วงอิลาสติก

### 2.4 แรงเฉือน

ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนได้รับผลกระทบจากช่องเปิดในแผ่นเอวทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยช่องเปิดในแผ่นเอวทำให้สูญเสียพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเอวและทำให้กำลังรับแรงเฉือน ( $V_n$ ) ลดลงอย่างมาก และอาจทำให้หน้าตัดคานเกิดการวิบัติโดยผลของแรงเฉือนได้ กำลังรับแรงเฉือน ( $V_n$ ) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (12) และ (13)

$$V_{n,E} = \frac{A_{v,E} f_y}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

$$V_{n,A} = 0.6A_{v,A} f_y C_v \quad (13)$$



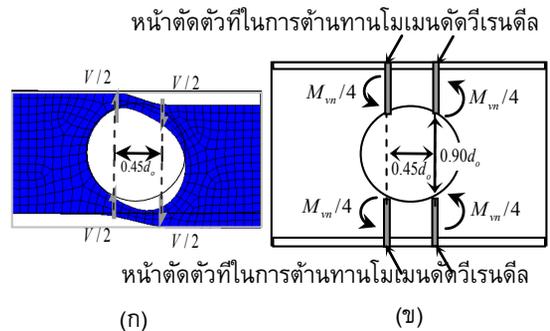
รูปที่ 3 หน้าตัดรับแรงเฉือน: (ก) ตามมาตรฐาน EN1993-1-1 และ (ข) ตามมาตรฐาน AISC 360-05

โดย  $A_v$  คือ พื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือนสำหรับหน้าตัดรูปตัวทีด้านบนและล่างของช่องเปิดซึ่งแตกต่างกันตามมาตรฐาน EN1993-1-1 และ มาตรฐาน AISC 360-05 ดังแสดงในรูปที่ 3 และ  $C_v$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเฉือนตามมาตรฐาน AISC 360-05

### 2.5 โมเมนต์ดัดวีเรนติล

โมเมนต์ดัดวีเรนติล ( $M_v$ ) เกิดจากการถ่ายเทแรงเฉือนผ่านช่องเปิดทำให้เกิดโมเมนต์ดัดเฉพาะที่บริเวณหน้าตัดรูปตัวที (T-section) ด้านบนและด้านล่างช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) โดย SCI P355 กำหนดให้โมเมนต์ดัดวีเรนติลวิฤติเป็นผลคูณของแรงเฉือน ( $V_r$ ) กับความยาวช่องเปิดประสิทธิผล (แขนโมเมนต์เทียบเท่า) ซึ่งกำหนดให้ความยาวช่องเปิดประสิทธิผล คือ  $0.45d_o$  ดังนั้นโมเมนต์ดัดวีเรนติลจึงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (14)

$$M_{vr} = 0.45V_r d_o \quad (14)$$



รูปที่ 4 การกระจายหน่วยแรงเฉือนผ่านช่องเปิดและโมเมนต์ดัดวีเรนติล: (ก) การกระจายหน่วยแรงเฉือนผ่านช่องเปิด และ (ข) การต้านทานโมเมนต์ดัดวีเรนติล

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดวีเรนติล ( $M_{vn}$ ) พิจารณาจากความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ของหน้าตัดรูปตัวทีที่ตำแหน่งวิฤติ ณ มุมทั้ง 4 ของช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) โดยคำนวณตามสมการที่ (15)-(18)

$$M_{vn,E} = 4Z_{xt} f_y \quad (15)$$

$$M_{vn,A} = 2[M_{vn,T} + M_{vn,C}] \quad (16)$$

$$M_{vn,T} = Z_{xt} f_y \leq 1.6S_{xt} f_y \quad (17)$$

$$M_{vn,C} = S_{xt} f_y \quad (18)$$

โดย  $Z_{xt}$  คือ โมดูลัสพลัสติกของหน้าตัดรูปตัวที  $S_{xt}$  คือ โมดูลัสอิลาสติกของหน้าตัดรูปตัวที  $M_{vn}$  คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดวีเรนติลระบุ  $M_{vn,T}$  คือ กำลัง

ต้านทานโมเมนต์ดัดวีเรนติลในหน้าตัดรูปตัวทีที่ต้านทานแรงดึงร่วมด้วย และ  $M_{vn,C}$  คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดวีเรนติลในหน้าตัดรูปตัวทีที่ต้านทานแรงอัดร่วมด้วย เนื่องจากโมเมนต์ดัดวีเรนติลเกิดขึ้นร่วมกับหน่วยแรงหลายรูปแบบ เช่น แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ดังนั้นการคำนวณกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดวีเรนติลสุทธิ ( $M_{vn,net}$ ) SCI P355 กำหนดให้พิจารณาพร้อมกับผลกระทบจากหน่วยแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่กระทำต่อหน้าตัด โดยในส่วนของแรงเฉือนใช้การปรับลดค่าความหนาของแผ่นเอวให้เป็นความหนาประสิทธิผล ( $t_{w,eff}$ ) โดยสามารถคำนวณความหนาประสิทธิผลได้ดังสมการที่ (19) และ (20) และการพิจารณากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดวีเรนติล ( $M_{vn,net}$ ) ร่วมกับโมเมนต์ดัดตามสมการที่ (21)

$$t_{w,eff} = t_w \quad \text{สำหรับกรณี } V_r / V_c \leq 0.5 \quad (19)$$

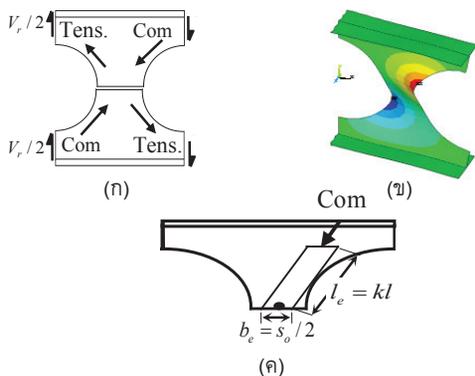
$$t_{w,eff} = t_w \left[ 1 - \left( 2 \frac{V_r}{V_n} - 1 \right)^2 \right] \quad \text{สำหรับกรณี } V_r / V_c \leq 0.5 \quad (20)$$

$$M_{vn,net} = M_{vn} \left[ 1 - \left( \frac{M_{mr}}{M_{mn}} \right)^2 \right] \quad (21)$$

โดย  $M_{mr}$  คือ โมเมนต์ที่กระทำต่อหน้าตัด

## 2.6 แรงอัดโก่งเดาะที่แผ่นเอว

การโก่งเดาะที่แผ่นเอว (web-post buckling) เป็นผลจากการส่งผ่านแรงเฉือนผ่านแผ่นเอวระหว่างช่องเปิด (web-post) ทำให้เกิดแรงอัดและแรงดึงทแยงในแผ่นเอว ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) โดยผลของแรงอัดอาจทำให้แผ่นเอวเกิดการโก่งเดาะได้ ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) SCI P355 ประมาณค่าแรงอัดที่กระทำต่อแผ่นเอว ( $P_r$ ) ดังสมการที่ (22)



รูปที่ 5 แรงอัดโก่งเดาะที่แผ่นเอว: (ก) แรงทแยงในแผ่นเอวจากผลของแรงเฉือน (ข) ลักษณะการโก่งเดาะที่แผ่นเอว และ (ค) การพิจารณาเสาเสมือน

$$P_r = \frac{V_{hr}}{2} \quad (22)$$

โดย  $V_{hr}$  คือ แรงเฉือนแนวราบออกแบบซึ่งพิจารณาตามหัวข้อที่ 2.7 การต้านทานแรงอัดพิจารณาในลักษณะเสาเสมือนที่ฝังอยู่ในแผ่นเอว ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) ทั้งนี้กำหนดพื้นที่ในการรับแรงอัด ( $A_g$ ) และความยาวช่วงที่รับแรงอัดประสิทธิผล ( $l_e$  หรือ  $kL$ ) แสดงดังสมการที่ (23) และ (24) ตามลำดับ

$$A_g = b_e t_w \quad (23)$$

$$l_e \text{ or } kL = 0.5 \sqrt{s_o^2 + d_o^2} \quad (24)$$

โดย  $b_e$  คือ ความกว้างประสิทธิผลสำหรับเสาเสมือนในแผ่นเอวแสดงดังสมการที่ (25)  $s_o$  คือ ความกว้างของแผ่นเอวระหว่างช่องเปิดตามแนวกึ่งกลางความสูง หรือความกว้างที่น้อยที่สุดของแผ่นเอวระหว่างช่องเปิด แสดงดังสมการที่ (26)

$$b_e = s_o / 2 \quad (25)$$

$$s_o = s - d_o \quad (26)$$

เนื่องจากพื้นที่ในการรับแรงอัดเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจึงสามารถคำนวณรัศมีไจเรชั่นของหน้าตัดรับแรงอัดรอบแกนรอง ( $r_g$ ) และค่าอัตราส่วนความ (slenderness,  $KL/r$ ) ได้ดังสมการที่ (27) และ (28) ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวใช้เพื่อประกอบการพิจารณากำลังต้านทานหน่วยแรงอัดของเสาเสมือน

$$r_g = t_w / \sqrt{12} \quad (27)$$

$$KL/r = \sqrt{12} l_e / t_w \quad (28)$$

กำลังต้านทานแรงอัดระบุสำหรับเสาเสมือนในแผ่นเอว ( $P_n$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) ขึ้นกับหน่วยแรงต้านทานแรงอัดวิกฤติ  $P_{cr}$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับความชะลุดของเสาเสมือน และสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (29)-(33)

$$P_{n,E} = A_g P_{cr,E} \quad (29)$$

$$P_{n,A} = A_g P_{cr,A} \quad (30)$$

$$P_{cr,E} = \kappa F_y \quad (31)$$

$$P_{cr,A} = (0.658)^{F_y/F_c} F_y \quad \text{สำหรับกรณี } F_y / F_c \leq 2.25 \quad (32)$$

$$P_{cr,A} = (0.877)^{F_y/F_c} F_c \quad \text{สำหรับกรณี } F_y / F_c > 2.25 \quad (33)$$

โดย  $\kappa$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวปรับลดกำลังต้านทานแรงอัดตั้งสมการที่ (34) และ (35)  $F_e$  คือ หน่วยแรงอัดออยเลอร์ตั้งสมการที่ (36) และ  $E$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่น

$$\kappa = \frac{1}{(\phi + (\phi^2 - F_y / F_e))} \quad (34)$$

$$\phi = 0.5 \left( 1 + 0.49 \left( \left( F_y / F_e \right)^{0.5} - 0.2 \right) + F_y / F_e \right) \quad (35)$$

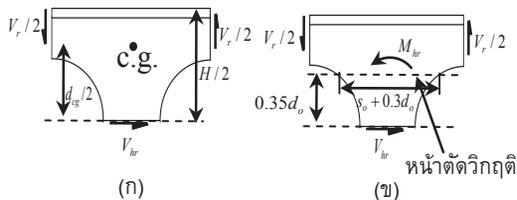
$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (36)$$

### 2.7 แรงเฉือนแนวราบในแผ่นเอว

แรงเฉือนแนวราบในแผ่นเอว (web-post horizontal shear,  $V_h$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) เป็นผลกระทบหนึ่งจากการกระจายแรงเฉือนผ่านช่องเปิด โดย SCI P355 ประมาณค่าแรงเฉือนแนวราบในแผ่นเอว ( $V_{hr}$ ) จากหลักการสมดุลของโมเมนต์รอบจุดเซนทรอยด์ของหน้าตัดรูปตัวที ดังแสดงในสมการที่ (37)

$$V_{hr} = \frac{V_r S}{d_{cg}} \quad (37)$$

โดย  $V_{hr}$  คือ แรงเฉือนแนวราบออกแบบ  $V_r$  คือ แรงเฉือนออกแบบ และ  $d_{cg}$  คือ ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางหน้าตัดรูปตัวทีด้านบนถึงหน้าตัดรูปตัวทีด้านล่าง



รูปที่ 6 หน่วยแรงต้านทานที่แผ่นเอว: (ก) แรงเฉือนแนวราบ และ (ข) โมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงเฉือนแนวราบ

กำลังต้านทานแรงเฉือนแนวราบระบุ ( $V_{hm}$ ) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (38) และ (39) ซึ่งพิจารณาที่แนวกึ่งกลางความลึก Cellular beam เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุดในการต้านทานแรงเฉือนแนวราบ ( $A_h$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (40)

$$V_{hm,E} = \frac{A_h F_y}{\sqrt{3}} \quad (38)$$

$$V_{hm,A} = 0.6 A_h F_y \quad (39)$$

$$A_h = s_0 t_w \quad (40)$$

### 2.8 โมเมนต์ดัดในแผ่นเอว

โมเมนต์ดัดในแผ่นเอว (web-post moment,  $M_{hr}$ ) เป็นผลของแรงเฉือนแนวราบที่กระทำบริเวณกึ่งกลางความสูงของแผ่นเอวทำให้เกิดโมเมนต์ดัดกระทำต่อแผ่นเอว ในส่วนที่สูงหรือต่ำกว่าแนวกึ่งกลาง ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) ทั้งนี้ SCI P355 พิจารณาตำแหน่งการเกิดโมเมนต์ดัดในแผ่นเอววิกฤติที่ตำแหน่งเซนทรอยด์ของหน้าตัดรูปตัวทีในกรณีออกแบบการรับกำลังร่วมกับแผ่นพื้นคอนกรีต อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการคำนวณโมเมนต์ดัดในแผ่นเอวโดยเฉพาะกรณี Cellular beam ซึ่งมีความสมมาตรและไม่ได้ออกแบบการรับกำลังร่วมกับแผ่นพื้นคอนกรีต Lawson และคณะ [18] เสนอให้พิจารณาตำแหน่งการเกิดโมเมนต์ดัดในแผ่นเอววิกฤติที่ความสูง  $0.35d_0$  จากจุดศูนย์กลาง และประมาณความกว้างประสิทธิภาพ ณ ตำแหน่งดังกล่าว คือ  $s_0 + 0.3d_0$  ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) โดยโมเมนต์ดัดในแผ่นเอว สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ (41)

$$M_{hr} = 0.35d_0 V_{hr} \quad (41)$$

SCI P355 กำหนดให้ใช้กำลังต้านทานโมเมนต์ที่จุดคราก (yield moment) เป็นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดในแผ่นเอว ( $M_{hm}$ ) ดังสมการที่ (42) ซึ่งเป็นการคำนวณบนพื้นฐานของโมดูลัสอิลาสติกของหน้าตัดแผ่นเอว ณ จุดวิกฤติ ( $S_{Mh}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตั้งที่ (43)

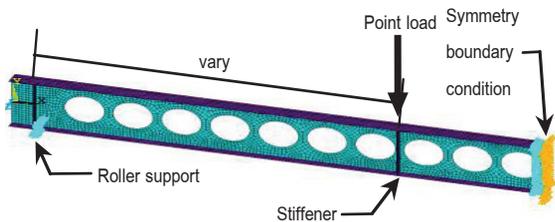
$$M_{hm,E} = M_{hm,A} = F_y S_{Mh} \quad (42)$$

$$S_{Mh} = \frac{(s_0 + 0.3d_0)^2 t_w}{6} \quad (43)$$

### 3. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และกรณีศึกษา

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ANSYS [19] โดยใช้เอลิเมนต์แบบเปลือกบาง (shell element) ซึ่งเหมาะในการจำลองโครงสร้างที่ลักษณะเป็นแผ่นที่มีความหนาไม่มาก ดังเช่นกรณีคานเหล็กรูปพรรณซึ่งรวมถึง Cellular beam เอลิเมนต์แบบเปลือกบางที่ใช้มี 4 โหนด แต่ละโหนดมี 6 ลำดับขั้นความอิสระ (DOF) อันได้แก่ การเคลื่อนตัวและการหมุนในทิศทาง x y และ z โดยเอลิเมนต์ดังกล่าวสามารถรองรับการเคลื่อนตัวหรือการหมุนของโหนดรวมถึงความเครียดในเอลิเมนต์ระดับสูง ซึ่งเกิดจากพฤติกรรมการเสียรูปอย่างมาก

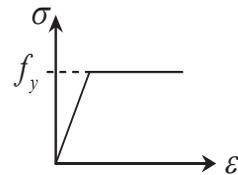
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Cellular beam มีการรองรับอย่างง่าย (simple support) และควบคุมไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้าง โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุก 2 จุดกระทำต่อคาน ในตำแหน่งที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำจะเพิ่ม Stiffener เพื่อช่วยในการกระจายแรงและป้องกันการพับของแผ่นเอว ทั้งนี้จากลักษณะความสมมาตรของช่วงความยาว จึงใช้การจำลอง Cellular beam เพียงครึ่งหนึ่งของความยาว ดังนั้นคานจึงมีค่าขอบเขตการรองรับอย่างง่ายที่ปลายข้างหนึ่ง และมีค่าขอบเขตความสมมาตร (symmetry boundary condition) ที่ปลายอีกข้างหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับ Cellular beam

ขนาดเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองมีขนาดประมาณ H/20-H/25 ซึ่งเป็นขนาดที่ได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงผลเฉลยในรูปน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและการแอ่นตัวร่วมกับการพิจารณาระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่เหมาะสม ทั้งนี้จำนวนเอลิเมนต์ในส่วนของ Web-post ในแนวกึ่งกลางความสูง ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 เอลิเมนต์ เพื่อให้สามารถเกิดพฤติกรรมการโก่งเดาะของ Web-post ได้ นอกจากนี้แบบจำลองยังพิจารณาความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัด (imperfection) ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิตหรือการตัดประกอบ อย่างไรก็ตามระดับความไม่สมบูรณ์ไม่อาจจะระบุเป็นค่าที่แน่นอนได้ การศึกษานี้จึงได้ประมาณค่าความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดโดยใช้ลักษณะการโก่งเดาะโหมดที่ 1 (first buckling mode) จากการวิเคราะห์ Eigenvalue (eigenvalue analysis) [20-21] และขยายความไม่สมบูรณ์โดยใช้ตัวคูณขยาย H/500 [18] เนื่องจากโดยทั่วไปเมื่อหน้าตัดมีขนาดใหญ่ขึ้นความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาไม่พิจารณาหน่วยแรงคงค้างที่เกิดจากการเชื่อม แต่การกำหนดความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดสามารถชดเชยผลของหน่วยแรงคงค้างได้ระดับหนึ่ง [16]

คุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ในการศึกษากำหนดให้มีความเค้นครากที่ 355 MPa โดยที่ลักษณะเป็นพลาสติกโดยสมบูรณ์ (perfectly plastic) หลังจากจุดครากดังแสดงในรูปที่ 8 การจำลองในลักษณะดังกล่าวเพื่อเป็นการพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบปลอดภัย เนื่องจากไม่พิจารณาความสามารถในการรับกำลังเพิ่มภายหลังจุดคราก



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก

การวิเคราะห์แบบจำลองเป็นการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear analysis) ร่วมกับวิธีการหาผลเฉลยโดย Newton-Raphson iterative method ในการวิเคราะห์จะให้น้ำหนักบรรทุกที่ละส่วนจนคานเกิดการวิบัติ และในแต่ละส่วนที่ให้ โปรแกรมจะแบ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อให้สามารถหาผลเฉลยได้ง่าย ทั้งนี้แบบจำลองและวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวได้รับการตรวจสอบความสามารถในการจำลองพฤติกรรมการวิบัติของ Cellular beam ในด้านลักษณะการวิบัติและความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว [14, 22]

กรณี Cellular beam ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบผลการออกแบบตามมาตรฐาน EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10 แสดงดังตารางที่ 1 โดยมีแบบจำลองทั้งสิ้น 240 แบบจำลอง ทั้งนี้ขอบเขตอัตราส่วนขนาดช่องเปิด ( $d_o/d$ ) และ อัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด ( $s/d_o$ ) อยู่ในช่วงที่กำหนดตาม SCI P355

ตารางที่ 1 รายละเอียด Cellular beam ที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดเหล็ก รูปพรรณ	คุณสมบัติพื้นฐานของหน้าตัด เหล็กรูปพรรณ					n	$d_o/d$	$s/d_o$
	d	$b_f$	$t_w$	$t_f$	r			
ตั้งต้น	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			
H 900x300x286	912	302	18	34	28	7, 10, 15, 20	0.8, 1.0, 1.2	1.1, 1.3, 1.5, 1.7
H 800x300x210	800	300	14	26	28			
H 700x300x185	700	300	13	24	28			
H 600x300x151	588	300	12	20	28			
H 400x300x107	390	300	10	16	22			

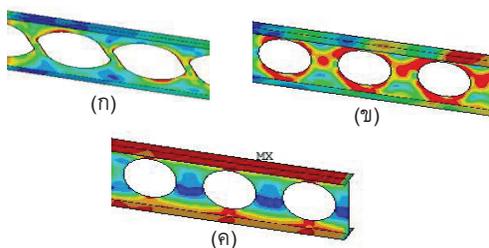
#### 4. รูปแบบการวิบัติและการเปรียบเทียบ

การเปรียบเทียบผลการออกแบบ Cellular beam พิจารณาในด้านความสามารถในการประเมินลักษณะการวิบัติและความสามารถในการคำนวณกำลังต้านทานหน่วยแรง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1 รูปแบบการวิบัติ

แม้ว่าในการออกแบบจะพิจารณาลักษณะการวิบัติในหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงลักษณะการวิบัติได้ใน 3 รูปแบบหลัก อันได้แก่ การวิบัติที่แผ่นเอว การวิบัติจากโมเมนต์ดัดวีเรนดีล และการวิบัติจากโมเมนต์ดัด

การวิบัติที่แผ่นเอวแสดงลักษณะการเสียรูปและระดับความเค้นที่ชัดเจนในแผ่นเอว (ระดับความเค้นที่พิจารณาเป็นลักษณะ Von Mises stress) โดยการเสียรูปดังกล่าวเป็นลักษณะที่เกิดร่วมกันระหว่างการโก่งเดาะหรือการพับของแผ่นเอวในบางกรณี ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) โดยการวิบัติดังกล่าวมักเกิดกับกรณี Cellular beam ที่มีระยะห่างระหว่างช่องเปิด (web-post) น้อย สำหรับการศึกษานี้พิจารณาลักษณะการวิบัติแบบแรงอัดโก่งเดาะที่แผ่นเอว แรงเฉือนแนวราบในแผ่นเอว และโมเมนต์ดัดในแผ่นเอว อยู่ในกลุ่มการวิบัติที่แผ่นเอว



รูปที่ 9 ลักษณะการวิบัติและ Von Mises Stress ของ Cellular beam: (ก) การวิบัติที่แผ่นเอว (ข) การวิบัติจากโมเมนต์ดัดวีเรนดีล และ (ค) การวิบัติจากโมเมนต์ดัด

การวิบัติจากโมเมนต์ดัดวีเรนดีลจะมีลักษณะการเสียรูปและระดับความเค้นที่ชัดเจนบริเวณส่วนบนและล่างของช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) การวิบัติดังกล่าวจะเกิดกับช่องเปิดส่วนที่รับแรงเฉือนมาก โดยเฉพาะบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งการให้น้ำหนักบรรทุก เนื่องจากได้รับผลกระทบทั้งจากการกระจายแรงเฉือนผ่านช่องเปิดและโมเมนต์ที่มีค่าสูงบริเวณใกล้จุดการให้น้ำหนักบรรทุก

การวิบัติดังกล่าวมักเกิดกับกรณี Cellular beam ที่มีพื้นที่หน้าตัดรูปตัวทีด้านบนและล่างช่องเปิดขนาดเล็ก กล่าวคือ Cellular beam ที่มีอัตราส่วนขนาดช่องเปิด ( $d_o/d$ ) มาก เมื่อหน้าตัดรูปตัวทีมีขนาดเล็กจึงมีความสามารถในการต้านทานการส่งผ่านแรงเฉือนซึ่งเกิดร่วมกับการส่งผ่านโมเมนต์ได้น้อย

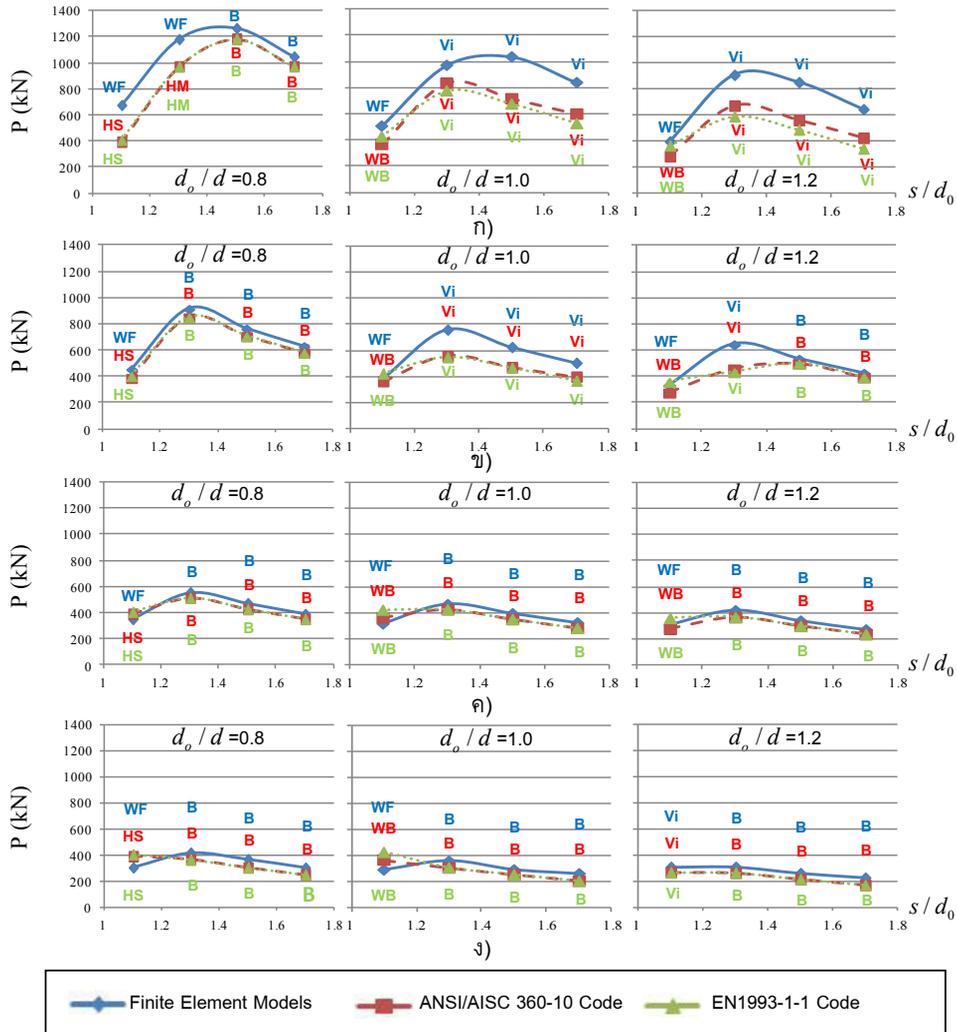
การวิบัติจากโมเมนต์ดัดมีลักษณะที่ชัดเจนคือความเค้นจะมีค่าสูงที่หน้าตัดรูปตัวทีส่วนบนและล่าง ดังแสดงในรูปที่ 9 (ค) โดยความเค้นจะมีค่าสูงที่กึ่งกลางคาน ซึ่งลักษณะการวิบัติดังกล่าวจะเกิดกับคานช่วงยาว

ทั้งนี้ผลการวิบัติในหลายกรณีพบลักษณะการวิบัติร่วมกัน อันได้แก่ การวิบัติที่แผ่นเอวร่วมกับโมเมนต์ดัดวีเรนดีล และการวิบัติจากโมเมนต์ดัดวีเรนดีลร่วมกับโมเมนต์ดัด

##### 4.2 การเปรียบเทียบผลการออกแบบ

เพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกระหว่างการออกแบบตามมาตรฐานและผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ การออกแบบตามมาตรฐานจะใช้การแปลงค่ากำลังต้านทานหน่วยแรงต่างๆ ให้เป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่สามารถต้านทานได้ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองที่ใช้ในการเปรียบเทียบ กล่าวคือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานในแบบจำลอง (ครึ่งช่วงความยาว)

เนื่องจากลักษณะการวิบัติของ Cellular beam สำหรับกรณีหน้าตัดตั้งต้นต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกัน โดยขึ้นกับความสัมพันธ์กับจำนวนช่องเปิด อัตราส่วนขนาดช่องเปิด ( $d_o/d$ ) และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างช่องเปิด ( $s/d_o$ ) ดังนั้นจึงแสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกสูงสุด เฉพาะกรณีคานตั้งต้น H 900x300x286 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยสัญลักษณ์ WF คือ การวิบัติที่แผ่นเอว (โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์) WB คือ การวิบัติจากแรงอัดโก่งเดาะที่แผ่นเอว HS คือ การวิบัติจากแรงเฉือนแนวราบในแผ่นเอว HM คือ การวิบัติจากโมเมนต์ดัดในแผ่นเอว Vi คือ การวิบัติจากโมเมนต์ดัดวีเรนดีล และ B คือ การวิบัติจากโมเมนต์ดัด



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดสำหรับกรณีคานตั้งต้น H 900x300x286: (ก)  $n = 7$  (ข)  $n = 10$  (ค)  $n = 15$  และ (ง)  $n = 20$

สำหรับ Cellular beam ที่ความกว้างของแผ่นเอวระหว่างช่องเปิดมาก ( $s/d_o \geq 1.3$ ) ความสามารถในการต้านทานการวิบัติที่ผ่านเอวจะมีค่าสูงขึ้น การวิบัติจึงเกิดขึ้นในลักษณะอื่น เช่น การวิบัติแบบโมเมนต์ดัดวีเรนดิล และการวิบัติแบบโมเมนต์ดัด ซึ่งขึ้นกับสภาพหน่วยแรงที่กระทำและกำลังต้านทานของหน้าตัด โดยคานที่อยู่ภายใต้สภาวะโมเมนต์ดัดมีค่ามาก เช่นคานช่วงยาว คานจะวิบัติแบบโมเมนต์ดัดเป็นหลักดังรูปที่ 10 (ค) และ (ง) แต่หากคานอยู่ภายใต้สภาวะแรงเฉือนสูงดังเช่นในกรณีคานช่วงสั้น คานจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการวิบัติแบบโมเมนต์ดัดวีเรนดิล ดังรูปที่ 10 (ก) และ (ข) อย่างไรก็ตามสำหรับคานช่วงสั้นซึ่งมีหน้าตัดรูปตัวทีทั้งด้านบนและล่างของช่องเปิดมีความลึกมากพอที่จะ

ต้านทานโมเมนต์ดัดวีเรนดิล เช่นกรณีคานที่มี  $d_o/d = 0.8$  การวิบัติจะเกิดในในรูปแบบโมเมนต์ดัดแทน

จากผลการคำนวณความสามารถในการน้ำหนักบรรทุกวิกฤติตามมาตรฐาน พบว่าในภาพรวมลักษณะการวิบัติสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ อย่างไรก็ตามลักษณะการวิบัติจากการคำนวณอาจมีความแตกต่างกันระหว่างมาตรฐาน EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10 เนื่องจากการคำนวณกำลังต้านทานที่แตกต่างกัน หากเปรียบเทียบผลการคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกวิกฤติตามมาตรฐาน ( $P_{code}$ ) กับผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ( $P_{FEM}$ ) โดยแบ่งกลุ่มตามรูปแบบการวิบัติของแบบจำลอง สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกได้ดังแสดงในรูปที่ 11-13

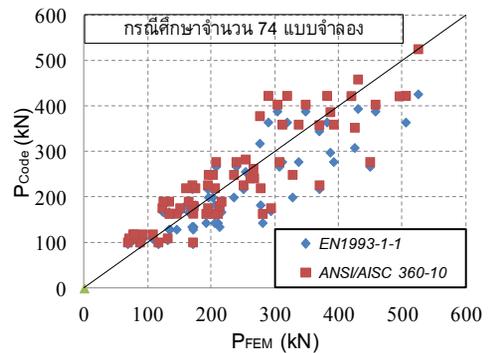
โดยมากผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่ามากกว่าการคำนวณตามมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยในการออกแบบโดยรวม แต่หากพิจารณากลุ่มการวิบัติที่แผ่นเอวในรูปที่ 11 พบว่ามีหลายกรณีที่ผลการคำนวณมีค่ามากกว่าผลการวิเคราะห์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงในการใช้งาน โดยผลการออกแบบมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์สูงสุดประมาณร้อยละ 40 ซึ่งกรณีดังกล่าวโดยมากเกิดกับแบบจำลองที่มี  $s/d_o = 1.1$  อย่างไรก็ตามการออกแบบในทางปฏิบัติจะมีการคูณค่าความปลอดภัยซึ่งแฝงในรูปตัวคูณน้ำหนักเพิ่มสำหรับการออกแบบ EN1993-1-1 (LRFD) หรือตัวคูณลดค่ากำลังต้านทานหน่วยแรงสำหรับการออกแบบแบบ ANSI/AISC 360-10 ซึ่งตัวคูณดังกล่าวทำให้กำลังออกแบบในทางปฏิบัติลดลงประมาณร้อยละ 30-40

ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนผลการคำนวณตามมาตรฐานต่อผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในแต่ละรูปแบบการวิบัติสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะพบว่าผลการออกแบบทั้ง 2 วิธีให้ค่าใกล้เคียงกัน

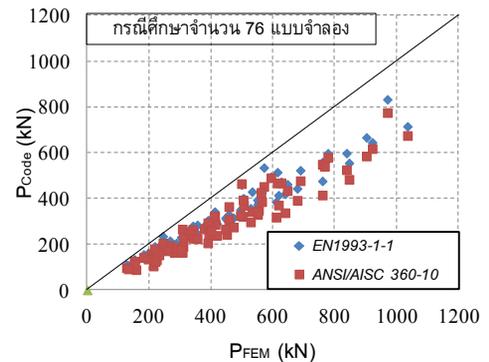
- สำหรับการวิบัติที่แผ่นเอว ผลการคำนวณกำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 มีค่ามากกว่า EN1993-1-1 ประมาณร้อยละ 11 โดยเฉลี่ย ซึ่งมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 และ EN1993-1-1 ให้ค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง แต่มีส่วนเบี่ยงเบนค่อนข้างสูง แสดงให้เห็นถึงความไม่แม่นยำในการทำนายกำลัง

- สำหรับการวิบัติจากโมเมนต์ตัดตัวรีเนตล มาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 ให้ผลการคำนวณน้อยกว่า EN1993-1-1 ประมาณร้อยละ 9 โดยเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 12 เนื่องจากกำลังต้านทานโมเมนต์ตัดตัวรีเนตลตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 มีค่าน้อยกว่า EN1993-1-1 อย่างมีนัยสำคัญ ผลการคำนวณของทั้ง 2 มาตรฐานให้ค่าน้อยกว่าผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20-30 ซึ่งแสดงถึงค่าเผื่อความปลอดภัยที่ค่อนข้างมาก ซึ่งอาจเกิดจากรูปแบบการประเมินหน่วยแรงโมเมนต์ตัดตัวรีเนตลตามข้อกำหนด SCI P355 สูงเกินไป หรือวิธีกำหนดหน้าตัดต้านทานโมเมนต์ตัดตัวรีเนตลที่มุมของช่องเปิดอาจไม่สะท้อนพฤติกรรมเชิงกลที่แท้จริง ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาที่มีการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ [13]

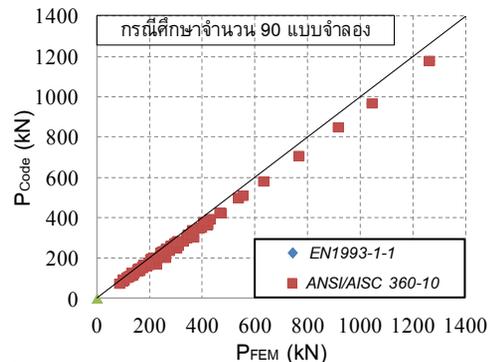
- สำหรับการวิบัติจากโมเมนต์ดัด ผลการคำนวณตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 และ EN1993-1-1 ให้ค่าน้อยกว่าผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประมาณร้อยละ 10 โดยเฉลี่ย โดยแบบจำลองมีส่วนเบี่ยงเบนค่อนข้างต่ำซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการออกแบบ



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกวิกฤติตามมาตรฐานกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิบัติที่แผ่นเอว



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกวิกฤติตามมาตรฐานกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการวิบัติจากโมเมนต์ตัดตัวรีเนตล



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกวิกฤติตามมาตรฐานกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิบัติจากโมเมนต์ดัด

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนผลการคำนวณตามมาตรฐานต่อผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในแต่ละรูปแบบการวิบัติ

	การวิบัติ					
	แผ่นเอว		โมเมนต์ตัด วีเรนตีล		โมเมนต์ตัด	
	$P_{AI}/P_{FM}$	$P_{EN}/P_{FM}$	$P_{AI}/P_{FM}$	$P_{EN}/P_{FM}$	$P_{AI}/P_{FM}$	$P_{EN}/P_{FM}$
ME	1.066	0.951	0.677	0.761	0.901	0.902
SD	0.257	0.243	0.094	0.072	0.038	0.038
CV	0.241	0.255	0.140	0.095	0.042	0.042

หมายเหตุ:  $P_{AI}$  คือ นำหนักบรรทุกทุกออกแบบตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10  $P_{EN}$  คือ นำหนักบรรทุกทุกออกแบบตามมาตรฐาน EN1993-1-1  $P_{FM}$  คือ นำหนักบรรทุกวิกฤตจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ME คือ ค่าเฉลี่ย SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ CV คือ สัมประสิทธิ์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## 5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาผลการออกแบบ Cellular Beam ตามข้อกำหนด SCI P355 ร่วมกับมาตรฐาน EN1993-1-1 และ ANSI/AISC 360-10 โดยเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งกำหนดความไม่สมบูรณ์ของหน้าตัดสามารถชดเชยผลของหน่วยแรงค้ำงและความไม่สมบูรณ์ของการตัดประกอบ ผลการศึกษาพบว่า การออกแบบตามมาตรฐานสามารถทำนายพฤติกรรมการวิบัติที่สอดคล้องกับแบบจำลอง ซึ่งจำแนกลักษณะการวิบัติออกเป็น 3 กลุ่มหลักอันได้แก่ การวิบัติที่แผ่นเอว การวิบัติจากโมเมนต์ตัดวีเรนตีล และการวิบัติจากโมเมนต์ตัด โดยกำลังต้านทานหน่วยแรงที่คำนวณได้จากมาตรฐานการออกแบบทั้ง 2 โดยรวมมีค่าน้อยกว่าผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง ยกเว้นกรณีการวิบัติที่แผ่นเอว ซึ่งแม้ว่าจะมีค่าเฉลี่ยของกำลังต้านทานการวิบัติที่แผ่นเอวใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง แต่มาตรฐานให้ค่ากำลังออกแบบที่มีการเบี่ยงเบนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะการออกแบบตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-10 นอกจากนี้ ANSI/AISC 360-10 ยังให้ผลการออกแบบกำลังต้านทานการวิบัติที่แผ่นเอวมักกว่า EN1993-1-1 ประมาณร้อยละ 11 โดยเฉลี่ย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อระวังในการออกแบบซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่ปลอดภัย อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีการวิบัติจากโมเมนต์ตัดวีเรนตีล และการวิบัติจากโมเมนต์ตัด ผลการออกแบบของทั้ง 2 มาตรฐานให้ผลการออกแบบที่น้อยกว่าผลการวิเคราะห์ทั้งหมดและมี

ส่วนเบี่ยงเบนจากการวิเคราะห์ค่อนข้างต่ำ โดยกำลังต้านทานการวิบัติจากโมเมนต์ตัดวีเรนตีลที่ออกแบบตามมาตรฐานน้อยกว่าผลการวิเคราะห์ประมาณร้อยละ 20-30 โดยเฉลี่ย ซึ่ง ANSI/AISC 360-10 ให้ผลการคำนวณกำลังน้อยกว่า EN1993-1-1 ประมาณร้อยละ 9 โดยเฉลี่ย ซึ่งแสดงถึงค่าเผื่อความปลอดภัยที่ค่อนข้างมากและส่งผลให้การออกแบบไม่เกิดความประหยัด ส่วนผลการคำนวณกำลังต้านทานสำหรับกรณีการวิบัติจากโมเมนต์ตัดให้ค่าน้อยกว่าผลการวิเคราะห์โดยแบบจำลองประมาณร้อยละ 10 โดยเฉลี่ย ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์และมีความปลอดภัยในการใช้งาน

## กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด ผ่านโครงการจัดทำโปรแกรมการออกแบบ Cellular beam และตรวจสอบผลการออกแบบ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Macsteel Service Centres SA (Pty) Ltd. 2008. Design of cellular beams. Johannesburg (South Africa).
- [2] Ward, J.K. 1990. Design of composite and non-composite cellular beams. The Steel Construction Institute Publication 100.
- [3] Lawson, R.M. and Hicks, S.J. 2009. Design of composite beams with large openings. The Steel Construction Institute Publication 355.
- [4] Eurocode 3. 2005. Design of steel structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, London, UK: British Standards Institution, EN 1993-1-1.
- [5] Erdal, F., Doğan, E. and Saka, M.P. 2011. Optimum design of cellular beams using harmony search and particle swarm optimizers. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 67, No. 2: 237–247.
- [6] Saka, M.P. 2007. Optimum design of steel frames using stochastic search techniques based on natural phenomena: a review. In: Topping BHV, editor. Civil engineering computations: tools and techniques. Saxe-

- Coburgh Publications: 105–47.
- [7] Chung, K.F. and Lawson, R.M. 2001. Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode 4. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 57, No. 2: 135–164.
- [8] Liu, T.C.H. and Chung, K.F. 2003. Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: finite element investigation. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 59, No. 9: 1159–1176.
- [9] Hagen, N.C., Larsen P.K. and Aalberg, A. 2009. Shear capacity of steel plate girders with large web openings, Part I: Modeling and simulations. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 65, No. 1: 142–150.
- [10] Amr, M.I. Sweedan. 2011. Elastic lateral stability of I-shaped cellular steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol.67, No. 2: 151–163.
- [11] Amr, M.I. Sweedan and Khaled, M. El-Sawy. 2011. Elastic local buckling of perforated webs of steel cellular beam–column elements. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 67, No. 7: 1115–1127.
- [12] Chung, K.F., Liu, T.C.H. and Ko, A.C.H. 2001. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 57, No. 5: 467–490.
- [13] Panedpojaman, P. and Rongram, T. 2014. Design equations for Vierendeel bending of steel beams with circular web openings. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering 2014, WCE 2014, London, U.K., Jul. 2-4, 2014: 1493-1498*.
- [14] Panedpojaman, P., Thepchatri, T. and Limkatanyu, S. 2014. Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams, *Thin-walled Structures*. Vol. 76, No. 1: 92-104.
- [15] ANSI/AISC 360-10. 2010. Specification for structural steel buildings. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.
- [16] Nseir, J., Lo, M., Sonck, D., Somja, H., Vassart, O. and Boissonnade, N. 2012. Lateral torsional buckling of cellular steel beams. *Proceedings of the structural stability research council annual stability conference (SSRC2012) Grapevine, Texas, April 18-21, 2012*.
- [17] Ellobody, E. 2012. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes. *Thin-Walled Structures*. Vol. 52: 66–79.
- [18] Lawson, R.M., Oshatogbe, D., Newman, G.M. 2006. Design of FABSEC cellular beams in non-composite and composite applications for both normal temperature and fire engineering conditions. *Cellular Beam Software: FBeam 2006 design guide*. Fabsec Limited publication.
- [19] ANSYS 2007. Release 11.0 documentation, Ansys Inc.
- [20] ECSC. 2003. Large web openings for service integration in composite floors. *Final Report for ECSC Research Contract 7210-PR-315; 2003*.
- [21] Bake, S. 2010. Cellular beams at ambient and elevated temperatures [Ph.D. thesis]. Manchester, U.K.: School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, MACE, The University of Manchester.
- [22] Panedpojaman, P. and Thepchatri, T. 2013. Finite element investigation on deflection of cellular beams with various configurations. *International Journal of Steel Structures*. Vol.13, No. 3: 487-494.