

การโก่งเดาะของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นสำหรับโครงสร้างผนังบาง

BUCKING OF COLD-FORMED STEEL BEAM FOR THIN-WALLED STRUCTURES

มนตรี เย็นเปี่ยม และมานิช รุจิภากร

Montri Yenpiam and Manoch Rujipakorn

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทร. 02-544990-2 โทรสาร 02-5494993

E-mail; montri.email@gmail.com, dr manoch@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Finite Strip แบบทั่วไปและแบบจำกัดขอบเขต สำหรับการวิเคราะห์ทางเสถียรภาพของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น อันเนื่องมาจากเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีความบาง ก่อให้เกิดความยุ่งยากต่อปัญหาทางด้านความไร้เสถียรภาพของชิ้นส่วน โดยเฉพาะสำหรับรูปแบบการโก่งเดาะที่มีความซับซ้อน โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ และตรวจสอบการเสถียรภาพในสถานะการใช้งานจำกัด (key limit state) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะแบบรวม การโก่งเดาะแบบผิวดู และการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยใช้โปรแกรม CUFSM คำนวณค่ากำลังรับแรงแบบ “โดยตรง” เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาที่ได้คือการเปรียบเทียบกำลังแรงดัดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี ได้แก่ ASD, LRFD และ LSD การเปรียบเทียบกำลังแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างผนังบาง (Thin – Walled Structures)

Abstract

This academic article is the study of numerical model using the ordinary type and the boundary condition type Finite Strip Analyses for stability analysis of the cold-formed structural steel. Since the thin cold-formed steel results in the

complication of stability problem of elements especially for some very complex buckling formats. The models for the cold-formed steel beam of Hat Shape section of the Grade Designation steels of G550, G360, G350, and G300 have been studied for the correlation. In addition, the deformations occurred by key limit states in all three types, which are overall buckling, distortional buckling, and local buckling are also investigated by using the CUFSM Program, in order to calculate the “Direct” Strength and compared the analytical results from the Finite Strip method with the experimental results from the laboratory. The outcomes of this study are to compare the power of direct blending of the beam which was designed as shown in the theory; ASD, LRFD and LSD. To compare the power of direct blending of cold-formed steel by FSM method and the outcome of actual test in order to perform the design of Thin-Walled Structures.

1. บทนำ

เหล็กขึ้นรูปเย็น (Cold - Formed Steel) ผลิตด้วยการรีดขึ้นรูปจากเหล็กกล้ากำลังสูงที่เคลือบกันสนิมด้วยสังกะสีหรือเหล็กกล้าประสมบางที่เป็นแผ่น หรือเส้นมีความหนา 0.4 ถึง 25 มม. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้กำลังบรรทุกทุกน้ำหนักสำหรับอาคาร เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรง คิดตั้งได้ สะดวกรวดเร็ว ประหยัดเวลา เนื่องจากเหล็กขึ้นรูปเย็นมีความบางของหน้าตัดก็เพิ่มขีดจำกัดต่อการออกแบบโครงสร้างอย่างมาก ต้องมีการควบคุมสัดส่วนและรายละเอียดต่างๆขององค์อาคารอย่างพิถีพิถันอีกทั้งการคำนวณออกแบบมีความซับซ้อน

กว่าเหล็กรูปพรรณทั่วไป แต่การออกแบบยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของผู้ออกแบบทั่วไป ประกอบกับการคำนวณเพื่อกำลักรับน้ำหนักของเหล็กชนิดนี้ มีขั้นตอนการทำงานที่ยากเมื่อต้องคำนวณด้วยมือ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงเสถียรภาพของหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยการใช้วิธี Finite Strip แบบทั่วไปและแบบถูกจำกัดขอบเขตซึ่งได้ถูกนำไปใช้อย่างประสบความสำเร็จในโปรแกรม CUFSM การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพีชคณิตผสมผสานกับการระบุรูปแบบของการโก่งเดาะอย่างถูกต้องแม่นยำนั้นถือว่าเป็นขั้นบันไดแรกสำหรับการก้าวไปสู่การประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบได้แก่ วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่ได้กับตัวอย่างทดสอบจริง เปรียบเทียบความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้

2. วัตถุประสงค์

บทความนี้เป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็นในหน้าตัดคานเหล็กขึ้นรูปเย็นแบบ Top Span และ Top Hats การออกแบบโครงสร้างผนังบาง (Thin – Walled Structures) ของเหล็กขึ้นรูปเย็น ด้วยวิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) เครื่องมือสำหรับการคำนวณใช้โปรแกรม CUFSM และเอกสารประกอบคือ ข้อกำหนดรายละเอียดสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากเหล็กขึ้นรูปเย็นของอเมริกาเหนือ (North American Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI 2004) ตรวจสอบการเสียรูปของเหล็กขึ้นรูปเย็นในสภาวะการใช้งานจำกัด (key limit state) [1]

3. ทฤษฎี

การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยการใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง ของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา (AISI) [2]

การออกแบบคานเหล็กขึ้นรูปเย็น

ตารางที่ 1 ค่า Factor Ω และ ϕ ในการออกแบบ

อเมริกาและเม็กซิโก		แคนาดา
Ω_b (ASD)	ϕ_b (LRFD)	ϕ_b (LSD)
1.67	0.90	0.85

การ โกงเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง

กำลังรับแรงดัดกระทำ M_{nc} สำหรับการ โกงเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง คือ

สำหรับ $M_{cre} < 0.56M_y$

$$M_{nc} = M_{cre} \quad (1)$$

สำหรับ $2.78M_y \geq M_{cre} \geq 0.56M_y$

$$M_{nc} = \frac{10}{9} M_y \left(1 - \frac{10 M_y}{36 M_{cre}} \right) \quad (2)$$

สำหรับ $M_{cre} > 2.78M_y$

$$M_{nc} = M_y \quad (3)$$

$$M_y = S_x F_y \quad (4)$$

โดย S_x เป็นค่าโมดูลัสของหน้าตัดรวมเมื่อผิวบนสุดหรือผิวล่างสุดนั้นเกิดการครากครั้งแรก

M_{cre} = ค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการ โกงเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง ในรูปแบบการ โกงเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง ซึ่งได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CUFSM

การ โกงเดาะเฉพาะที่

กำลังรับแรงดัดกระทำ M_{nc} สำหรับการ โกงเดาะแบบเฉพาะที่ คือ

สำหรับ $\lambda_c \leq 0.776$

$$M_{nc} = M_{ne} \quad (5)$$

สำหรับ $\lambda_c > 0.776$

$$M_{nc} = \left(1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right) \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne} \quad (6)$$

$$\text{โดย } \lambda_c = \sqrt{M_{ne} / M_{crl}} \quad (7)$$

M_{crl} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการ โกงเดาะแบบเฉพาะที่บิดตัว ซึ่งได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CUFSM M_{ne} สามารถให้ค่าจำกัดความได้ตามสมการที่ 1

การ โกงเดาะแบบผิวดรูป

กำลังรับแรงดัดระบุ M_{nd} สำหรับการโก่งเคาะแบบผิวดรูป คือ
สำหรับ $\lambda_d \leq 0.673$

$$M_{nd} = M_y \quad (8)$$

สำหรับ $\lambda_d > 0.673$

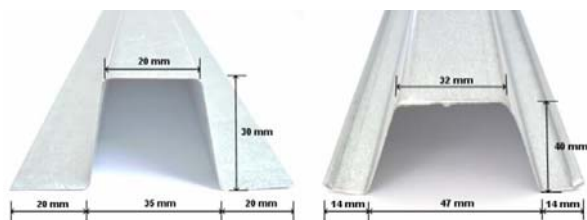
$$M_{nd} = \left(1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad (9)$$

$$\text{โดย } \lambda_d = \sqrt{M_y / M_{crd}} \quad (10)$$

M_{crd} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเคาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่น ซึ่งได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CUFSM M_y หาได้จากสมการที่ 4

4. ตัวอย่างคานเหล็กขึ้นรูปเย็นสำหรับทดสอบ

เป็นตัวอย่างคานเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน ตัวอย่างคานเหล็กขึ้นรูปเย็นที่ใช้เป็นเหล็กที่เกิดจากการตัดหรือพับจากเหล็กแผ่นเรียบหน้าตัดรูปทรงหมวก (Hat Shape) เป็นเหล็กกล้ากำลังสูงมีค่า Yield Strength 550 MPa, 360 MPa, 350 MPa และ 300 MPa ความหนาของคานตัวอย่าง 0.45 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 2



ก) หน้าตัด Top Hats ข) หน้าตัด Top Span TS4048

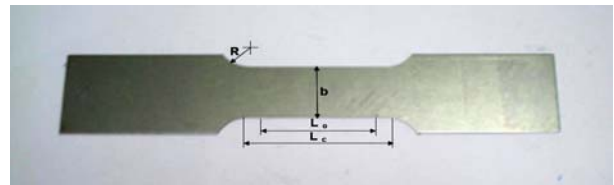
รูปที่ 2 หน้าตัดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นที่เลือกใช้ในการทดสอบ

5. การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในทางวิศวกรรม

การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในทางวิศวกรรม (Property of Materials) โดยการใช้การทดสอบแรงดึงของเหล็กโครงสร้าง (Tension Test of Structural Steel) อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 2201 Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials นำค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ผลได้แก่ ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) E ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ν เป็นต้น

ขั้นตอนการทดสอบแรงดึงของเหล็กโครงสร้าง

1. ทำการเตรียมตัวอย่าง จำนวน 3 ตัวอย่างต่อคานเหล็กขึ้นรูปเย็น หนึ่งแบบ มีหน้าตัดแบบ Top Span และ Top Hats จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ตามรูปที่ 3 และตารางที่ 2



รูปที่ 3 รูปร่างและมิติของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 2 ขนาดรูปร่างและมิติของชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง

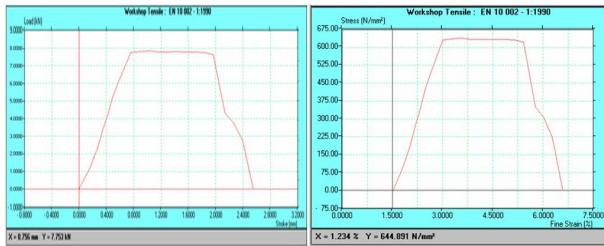
ความหนา	ความกว้างของส่วนขนาน	ความยาวของฟัก	ความยาวของส่วนขนาน	รัศมีส่วนโค้ง
	b	L_o	L_c	ของบ่า R ต่ำสุด
ไม่เกิน 6	25 ± 0.7	50 ± 5	ประมาณ 60	15
เกิน 6	40 ± 0.7	200 ± 20	ประมาณ 220	25

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

2. ชิดเส้นทำเครื่องหมายระยะห่างประมาณ 50 มิลลิเมตร ที่ชิ้นทดสอบเพื่อใช้ตรวจสอบระยะการยึดตัว ก่อนและหลังดึงขึ้นทดสอบ
3. นำชิ้นทดสอบเข้าติดตั้งในเครื่องดึง แล้วทำการดึงขึ้นทดสอบ
- บันทึกแรงดึงและการยืดตัว จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน
4. นำชิ้นตัวอย่างมาต่อชนกันให้สนิท แล้ววัดหาค่าการยืดตัว
5. นำค่าต่างๆที่บันทึกไว้ไปคำนวณและสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4 และ 5



ก) ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง ข) หัวจับทำการดึงขึ้นทดสอบ
รูปที่ 4 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงและการดึงขึ้นทดสอบ



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ การยืดตัว และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain

6. การกำหนดค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ration) และค่าต่างๆ สำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลองการทดสอบ ดังนั้นคือ ค่า Minimum Yield Stress (f_y) 550 MPa, 360 MPa, 350 MPa และ 300 MPa ค่า Modulus of elasticity (E) 203 GPa ค่า Shear Modulus (G) 78 GPa ค่า Poisson's ration (ν) 0.3

6. การทดสอบกำลังดัดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็น

การทดสอบกำลังดัดของเหล็กขึ้นรูปเย็น (Flexural Test of Cold - Formed Steel Beam) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products โดยนำผลการทดสอบที่ได้ของค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว (Load - Deflection Curve) และค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip (FSM)

ขั้นตอนการทดสอบกำลังดัดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็น

1. เตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบมีหน้าตัด 2 แบบ คือ Top Span และ Top Hats ความยาวตัวอย่าง 1.15 เมตร แล้วทำการติดชื่อตัวอย่าง ทำการติเส้น Mesh ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร และติดตั้ง Strain Gauges ที่ตำแหน่ง บนคาน ล่างคาน บริเวณกึ่งกลางคาน เพื่อผลการเสียรูปของคาน
2. เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ตามรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 เครื่องกดยี่ห้อ Testometric และเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 7 เครื่อง Transducer Displacement Sensor และ Data Logger

3. ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสียรูปของคานเหล็กขึ้นรูปเย็น ในขนาดรับแรงกดัดตามรูปที่ 8



รูปที่ 8 ติดตั้งเครื่องมือวัดกลางคานวัดการเคลื่อนตัวและตำแหน่งที่มีการเสียรูปของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นขนาดรับแรงกดัด

4. ติดตั้งตัวอย่างทดสอบบนจตุรองรับ
5. ทำการกหนดน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน อ่านค่าแรงกระทำทุกๆ 0.50 กิโลกรัม จนถึง 20 กิโลกรัม

6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) กับ เหล็กขึ้นรูปเย็น
ระยะแอ่นตัว (Deflection) และหาค่าโมเมนต์คดสูงสุดของคาน

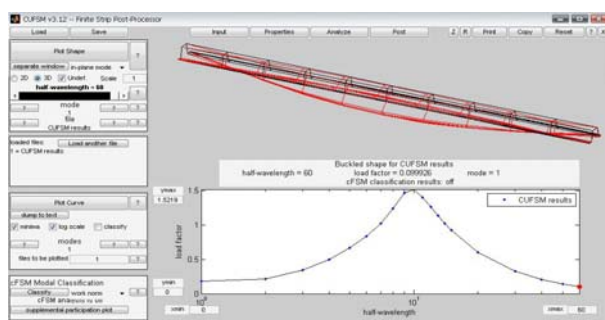
7. การวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งคดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยใช้โปรแกรม CUFSM

CUFSM หรือ Cornell University – Finite Strip Method มีขั้นตอนการวิเคราะห์การโก่งคดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นดังต่อไปนี้

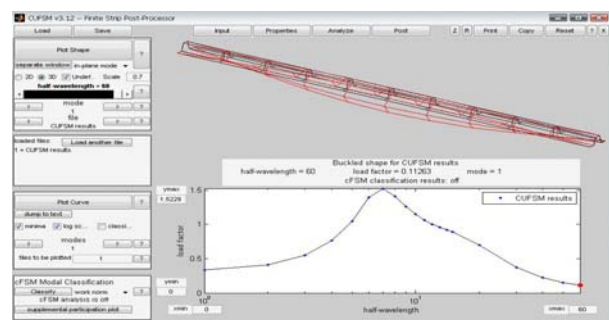
1. เริ่มวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งคดของคานหน้าตัด Top Span และ Top Hats โดยทำการ Input ข้อมูลของคานที่ทดสอบ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) พิกัดจุด (Nodes) ส่วนประกอบชิ้นส่วน (Elements) ความยาวและช่วงความละเอียดที่วิเคราะห์ (Lengths) ในส่วนของพิกัดจุด (Nodes) เกี่ยวกับ Stress ถ้าไม่มีข้อมูลให้ใส่ 1.00 ไว้ก่อน แล้วมา Input

ข้อมูลใน Menu Bar ของ Properties โปรแกรมจะคำนวณค่าให้เองทำการป้อนค่า f_y ถ้าข้อมูลหน่วยเป็น ksc ให้เปลี่ยนเป็น ksi โดยใช้ค่า 70.30814062 หาร แล้วคำนวณหาค่า P และ M ที่ทำให้โครงสร้างถึงคราก (Yield) ครั้งแรก กดที่ Menu Bar ของ Calculate P and M

2. กด Menu Bar ของ Analyze โปรแกรมจะวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผล ตามรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 โปรแกรมวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผลคาน Top Span



รูปที่ 10 โปรแกรมจะวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผลคาน Top Hats

8. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

8.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งคดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350

และ G300 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 1.50 เมตร คัดตั้งบนจุดรองรับเอียงทำมุม 0 องศา ตามตารางที่ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10

ตารางที่ 3 Load Factor สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงคดโดยตรงที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Top Span

Grade Designation	Yield Stress (ksc)	Yield Stress (ksi)	Load Factor						My (kip-in.)	My (kg-cm.)
			Local Bucking	hw	Distortional Bucking	hw	Global Bucking	hw		
G550	5,500	78.227	1.47290	9	0.60382	20	0.09993	60	4.200	4,839.06
G360	3,600	51.203	2.24720	9	0.92164	20	0.15228	60	2.749	3,167.44
G350	3,500	49.780	2.31150	9	0.94800	20	0.15663	60	2.673	3,079.41
G300	3,000	42.669	2.69670	9	1.10600	20	0.18274	60	2.291	2,639.53

ตารางที่ 4 Load Factor สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงคดโดยตรงที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Top Hats

Grade Designation	Yield Stress (ksc)	Yield Stress (ksi)	Load Factor						My (kip-in.)	My (kg-cm.)
			Local Bucking	hw	Distortional Bucking	hw	Global Bucking	hw		
G550	5,500	78.227	1.39340	6	0.6979	20	0.11263	60	2.245	2,586.42
G360	3,600	51.203	2.12870	6	1.0662	20	0.17206	60	1.469	1,692.94
G350	3,500	49.780	2.18980	6	1.0967	20	0.17699	60	1.429	1,645.93
G300	3,000	42.669	2.55480	6	1.2795	20	0.20649	60	1.225	1,410.78

หมายเหตุ

Yield Stress คือ หน่วยแรงดึงที่จุดคราก

Global Bucking คือ การ โกงเคาะแบบรวม

Load Factor คือ ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกทุกของกราฟที่การ โกงเคาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ

hw หรือ half-wavelength คือ ครึ่งความยาวคลื่นของการ โกงเคาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ

Local Bucking คือ การ โกงเคาะเฉพาะที่

My คือ ค่าโมเมนต์คดที่ถึงถึงจุดครากครั้งแรก (Yield Moment)

Distortional Bucking คือ การ โกงเคาะแบบผิดรูป

ตารางที่ 5 กำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Top Span

Grade Designation	M _{ne} (kip-in.)	M _{ne} (kip-in.)	M _{na} (kip-in.)	M _n (kip-in.)	Direct Strength Method (US Unit)			Direct Strength Method (Metric Unit)		
					ASD (kip-in.)	LRFD (kip-in.)	LSD (kip-in.)	ASD (kg-cm.)	LRFD (kg-cm.)	LSD (kg-cm.)
G550	0.41970	0.41970	2.70578	0.41970	0.25132	0.37773	0.35674	289.55	435.19	411.02
G360	0.41865	0.41865	2.08186	0.41865	0.25069	0.37678	0.35585	288.82	434.10	409.99
G350	0.41864	0.41864	2.04494	0.41864	0.25068	0.37678	0.35584	288.82	434.10	409.98
G300	0.41866	0.41866	1.85192	0.41866	0.25069	0.37679	0.35586	288.83	434.11	410.00

ตารางที่ 6 กำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Top Hats

Grade Designation	M _{ne} (kip-in.)	M _{ne} (kip-in.)	M _{na} (kip-in.)	M _n (kip-in.)	Direct Strength Method (US Unit)			Direct Strength Method (Metric Unit)		
					ASD (kip-in.)	LRFD (kip-in.)	LSD (kip-in.)	ASD (kg-cm.)	LRFD (kg-cm.)	LSD (kg-cm.)
G550	0.25284	0.25284	1.53072	0.25284	0.15140	0.22756	0.21492	174.44	262.18	247.61
G360	0.25282	0.25282	1.17259	0.25282	0.15139	0.22754	0.21490	174.42	262.16	247.59
G350	0.25285	0.25285	1.15140	0.25285	0.15141	0.22756	0.21492	174.44	262.18	247.62
G300	0.25285	0.25285	1.04041	0.25285	0.15141	0.22756	0.21492	174.44	262.18	247.62

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Top Span ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน

Grade Designation	M _{na} (kg-cm.)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคาน (เท่า)			
		M _{na}	ASD	LRFD	LSD
G550	3117.41	1.46	1.0024886	1.0024886	1.0024886
G360	2398.57	1.12	0.9999781	0.9999781	0.9999781
G350	2356.04	1.10	0.9999602	0.9999602	0.9999602
G300	2133.65	1.00	1.0000000	1.0000000	1.0000000

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Top Hats ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน

Grade Designation	M _{na} (kg-cm.)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคาน (เท่า)			
		M _{na}	ASD	LRFD	LSD
G550	1763.59	1.47	0.9999845	0.9999845	0.9999845
G360	1350.98	1.13	0.9999128	0.9999128	0.9999128
G350	1326.56	1.11	1.0000036	1.0000036	1.0000036
G300	1198.69	1.00	1.0000000	1.0000000	1.0000000

หมายเหตุ

ASD คือ การออกแบบโดยวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design)

LRFD คือ การออกแบบโดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design)

LSD คือ การออกแบบในภาวะขีดสุด (Limit States Design)

ตารางที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสำหรับการโค้งเคาะแบบผิวดรูป M_{nd} ของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Span ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การโค้งเคาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.46 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆมีค่าโมเมนต์การโค้งเคาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นจะมีค่าใกล้เคียงกัน และตารางที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสำหรับการโค้งเคาะแบบผิวดรูป M_{nd} ของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Hats ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การโค้งเคาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.47 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆมีค่าโมเมนต์การโค้งเคาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กขึ้นรูป

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Span ที่ออกแบบตามทฤษฎี

Grade Designation	Yield Stress (ksc)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี (เท่า)		
		ASD	LRFD	LSD
G550	5,500	1.00	1.50	1.42
G360	3,600	1.00	1.50	1.42
G350	3,500	1.00	1.50	1.42
G300	3,000	1.00	1.50	1.42

ตารางที่ 9 และตารางที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นที่ออกแบบตามทฤษฎี ASD, LRFD และ LSD ของเหล็ก Grade Designation ปรากฏว่าการออกแบบโดยวิธี LRFD จะรับกำลังแรงดัดโดยตรงได้มากที่สุด

8.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการโค้งเคาะของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปยื่นด้วยวิธี Finite Strip (FSM) กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ

ผลเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพการโค้งเคาะของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปยื่นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงใน

ห้องปฏิบัติการของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation G550 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 0.90 เมตร ตามตารางที่ 11 และ 12

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Hats ที่ออกแบบตามทฤษฎี

Grade Designation	Yield Stress (ksc)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี (เท่า)		
		ASD	LRFD	LSD
G550	5,500	1.00	1.50	1.42
G360	3,600	1.00	1.50	1.42
G350	3,500	1.00	1.50	1.42
G300	3,000	1.00	1.50	1.42

คือ 1.50 เท่า รองลงมาเป็นค่ารับกำลังแรงดัดโดยตรงที่ออกแบบโดยวิธี LSD คือ 1.42 เท่า และค่ากำลังแรงดัดโดยตรงน้อยที่สุด ที่ออกแบบโดยวิธี ASD คือ 1.00 เท่า ตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

ห้องปฏิบัติการของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation G550 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 0.90 เมตร ตามตารางที่ 11 และ 12

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัด โดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปแผ่นหน้าตัด Top Span ด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง

Grade Designation	Flexure Test (kg-cm.)	Finite Strip Method (FSM)		
		ASD (kg-cm.)	LRFD (kg-cm.)	LSD (kg-cm.)
G550	446.63	707.40	1,063.22	1,004.16
เปรียบเทียบการรับกำลังแรงดัด(เท่า)	1.00	1.58	2.38	2.25

ตารางที่ 11 และตารางที่ 12 พบว่าการทดสอบจริงมีค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปแผ่นหน้าตัด Top Span และหน้าตัด Top Hats ที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip และเมื่อเหล็ก Grade Designation ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุเท่ากันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip ให้ค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงในการออกแบบที่มากกว่าการทดสอบจริง ความแตกต่างเหล่านี้อธิบายได้ว่า วัสดุจริงจะมีความสามารถในการยืดหยุ่น คุณสมบัติความเหนียว (Ductility) [3] ลดลงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกเท่ากัน ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite

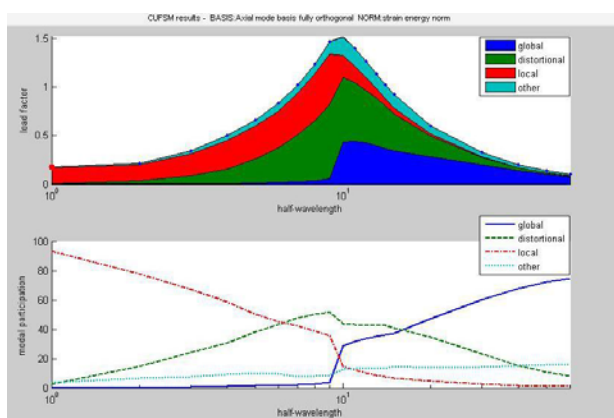
ตารางที่ 12 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัด โดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปแผ่นหน้าตัด Top Hats ด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง

Grade Designation	Flexure Test (kg-cm.)	Finite Strip Method (FSM)		
		ASD (kg-cm.)	LRFD (kg-cm.)	LSD (kg-cm.)
G550	281.84	420.66	632.25	597.12
เปรียบเทียบการรับกำลังแรงดัด(เท่า)	1.00	1.49	2.24	2.12

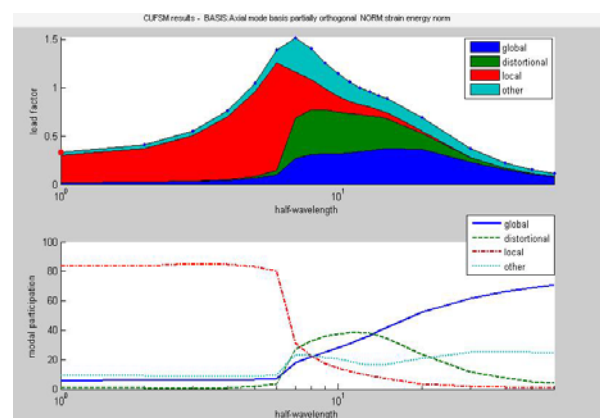
Strip จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เนื่องจากวัสดุจริงที่ทดสอบถึงจุดครากก่อน ในการออกแบบการประยุกต์ใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ด้วยการวิเคราะห์วิธี Finite Strip สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปแผ่นควรมีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลตัวอย่างทดสอบจริง เพื่อหาค่าผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้

8.3 กราฟการโก่งเดาะร่วม กราฟมาตรฐานพลังงานความเครียด และการตรวจสอบการเสียรูปในสถานะการใช้งานจำกัด (key limit state) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะแบบ

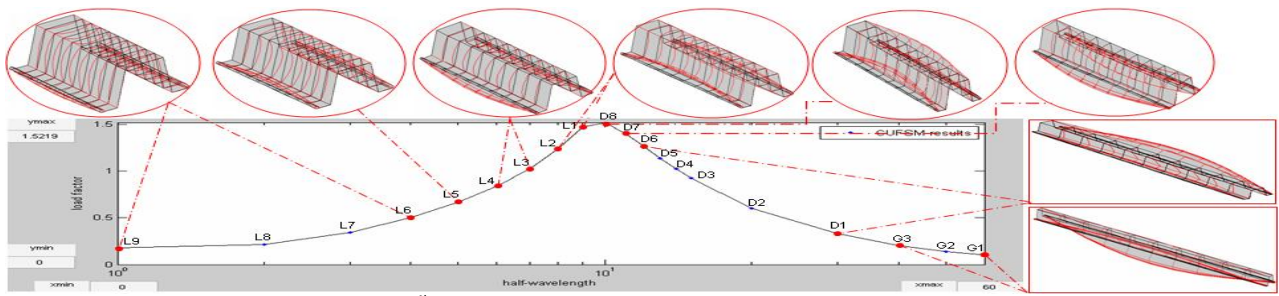
รวม การโก่งเดาะแบบผิวดรูป และการโก่งเดาะเฉพาะที่ ตามรูปที่ 11, 12, 13 และ 14



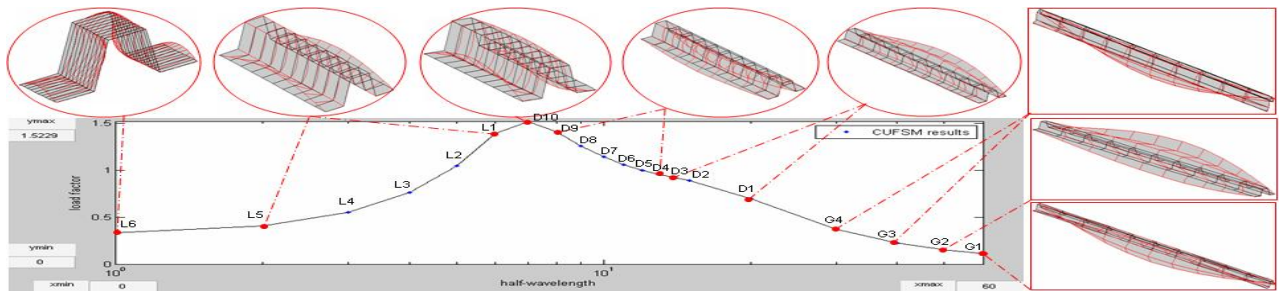
รูปที่ 11 กราฟการโก่งเดาะร่วมและกราฟมาตรฐานพลังงานความเครียดของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปแผ่นหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550



รูปที่ 12 กราฟการโก่งเดาะร่วมและกราฟมาตรฐานพลังงานความเครียดของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปแผ่นหน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550



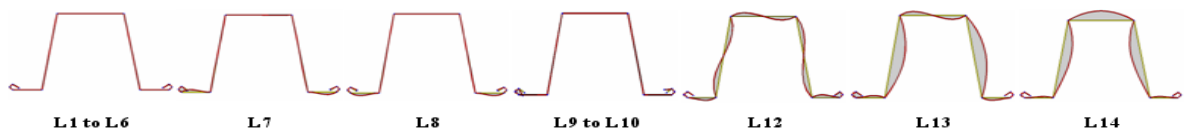
รูปที่ 13 กราฟการโก่งเดาะของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550



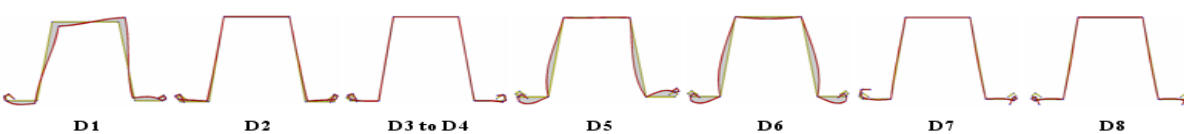
รูปที่ 14 กราฟการโก่งเดาะของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550

รูปที่ 13 และรูปที่ 14 แสดงการเสียรูปของคานในสภาวะการใช้งานจำกัดและค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ เพื่อผลนำไปคำนวณหาตัวแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแต่ละสภาวะ L1 ถึง L9

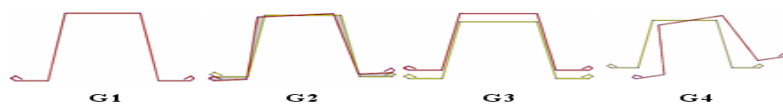
แสดงการเสียรูปของคานที่โก่งเดาะแบบเฉพาะที่ D1 ถึง D10
แสดงการเสียรูปของคานที่โก่งเดาะแบบผิดรูป G1 ถึง G4
แสดงการเสียรูปของคานที่โก่งเดาะแบบรวม



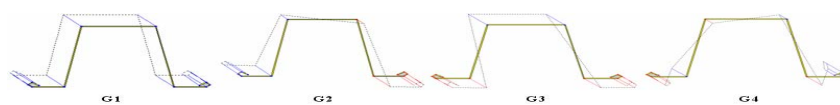
รูปที่ 15 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดดัดและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling)



รูปที่ 16 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดดัดและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะผิดรูป (Distortional Buckling)



รูปที่ 17 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดดัดและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะรวม (Global Buckling)



รูปที่ 18 การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดดัดและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะรวม

9. บทสรุป

จากผลการศึกษาการโก่งเดาะของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นในสภาวะการใช้งานจำกัด พบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 1.50 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสำหรับการโก่งเดาะแบบผิวดรูป M_{nd} ของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.46 ถึง 1.47 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆมีค่าโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ พบว่าการทดสอบจริงมีค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip ความแตกต่างเหล่านี้อธิบายได้ว่า วัสดุจริงจะมีความสามารถในการยืดหยุ่นมากกว่าและคุณสมบัติความเหนียว (Ductility) ลดลงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าเนื่องมาจากวัสดุจริงที่ทดสอบถึงจุดครากก่อน ในส่วนการตรวจสอบการเสถียรภาพในสภาวะการใช้งานจำกัดจะได้ค่า Stress และ Moment ที่ทำให้คานเหล็กขึ้นรูปเย็นถึงจุดครากครั้งแรก และค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ เป็นจำนวนที่เท่าที่แรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะของ M_y นำค่าที่ได้ไปใช้ในชุดสมการวิธีกำลังรับแรงโดยตรง โดยค่าการรับกำลังดัดที่ได้ตามทฤษฎี $M_n \geq \text{Min}((M_{nc}, M_{ni}, M_{nd}))$ เมื่อกำหนดกับค่า Factor สำหรับการออกแบบแล้วได้ค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงที่ไม่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเกินสภาวะการใช้งานจำกัดในการออกแบบ การประยุกต์ใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ด้วยการวิเคราะห์วิธี Finite Strip สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้าง

เหล็กขึ้นรูปเย็นควรมีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบกับผลตัวอย่างทดสอบจริง เพื่อหาค่าผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้สำหรับการทำนายหรือหาค่ากำลังรับแรงของชิ้นส่วน โดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการโก่งเดาะแบบยืดหยุ่น ขั้นตอนดังกล่าวนั้นจะไม่จำเป็นต้องอาศัย การคำนวณค่าความกว้างประสิทธิภาพ หรือการคำนวณแบบซ้ำไปซ้ำมา แต่ทว่าใช้เพียงแค่ค่าคุณสมบัติรวม และ พฤติกรรมการโก่งเดาะ แบบยืดหยุ่นของหน้าตัด เพื่อที่จะทำนายหรือหาค่ากำลังรับแรง ในการประยุกต์ใช้การออกแบบโครงสร้างผนังบาง (Thin – Walled Structures)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Schafer, B.W., Adany, S., 2006. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM : conventional and constrained finite strip methods. 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Orlando, Florida
- [2] American Iron and Steel Institute, 2004. Design of Cold-Formed Steel Structural Members Using the Direct Strength Method. 2004 Edition.
- [3] Gregory J. Hancock, 1996. Design of Cold-Formed Steel Structures. University of Sydney : BHP Steel Professor of Steel Structures.