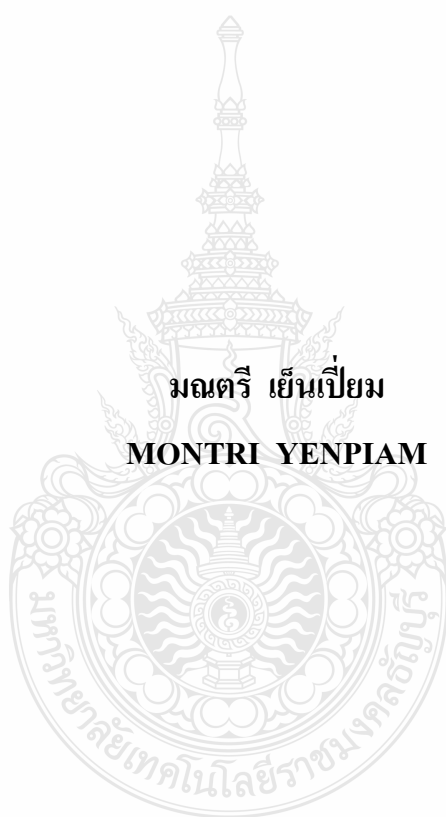


ผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการดัดของคานเหล็กรีดเย็นรูปทรงหวมก

**EMBOSSMENT EFFECTS ON THE BENDING OF HAT SHAPE
COLD-FORMED STEEL BEAMS**



มนตรี เย็นเปี่ยม

MONTRI YENPIAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

ผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการตัดของคานเหล็กรีดเย็นรูปทรงหมวก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

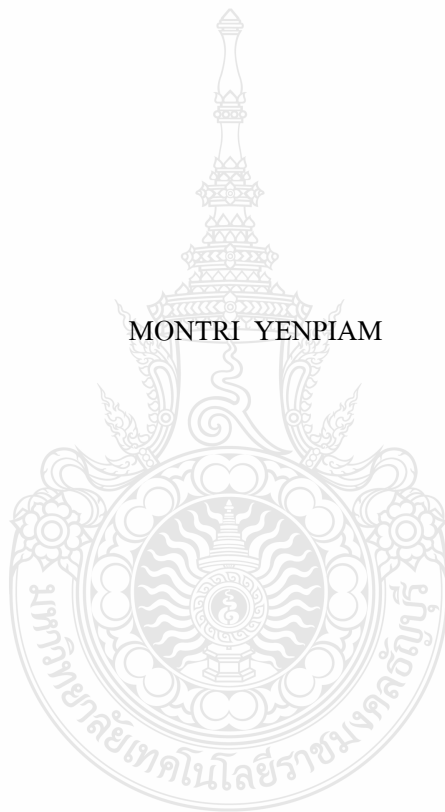
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

**EMBOSSMENT EFFECTS ON THE BENDING OF HAT SHAPE
COLD-FORMED STEEL BEAMS**

MONTRI YENPIAM

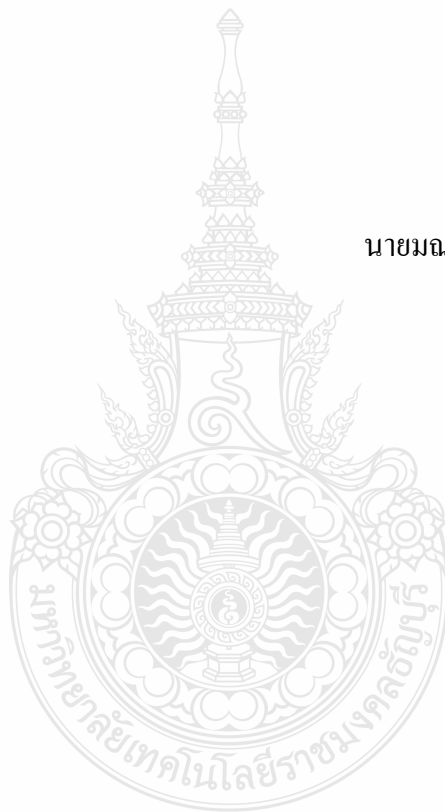


A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE
DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายมนตรี เย็นเปี่ยม





ใบรับรองวิทยานิพนธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการคดของคานเหล็กกริดเขียนรูปทรงหมวก
EMBOSSMENT EFFECTS ON THE BENDING OF HAT SHAPE
COLD-FORMED STEEL BEAMS

ชื่อนักศึกษา

นายมณตรี เข็นเปี่ยม

รหัสประจำตัว

124970401011-7

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. มาโนช รุจิภากร

วัน เดือน ปี ที่สอบ

10 ตุลาคม 2553

สถานที่สอบ

ห้อง E404 ชั้น 4 อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติสานต์ กร้ามาตร)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช)
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถาวร ชีรเวชญาณ)
..... กรรมการ
(ดร. มาโนช รุจิภากร)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการค้ำของคานเหล็กกริดเย็นรูปทรงหมวก
ชื่อนักศึกษา	นายมนตรี เย็นเปี่ยม
รหัสประจำตัว	124970401011-7
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. มาโนช รุจิภากร

บทคัดย่อ

การศึกษาใช้การสร้างแบบจำลอง (Model) ทางคณิตศาสตร์ใน โปรแกรมพื้นฐาน MATLAB เพื่อศึกษาถึงสภาวะวิกฤติของโครงสร้างเพื่อพิจารณาในการออกแบบ (Limit State Design) โดยแนวโน้มของการคำนวณออกแบบวิศวกรรมโยธาปัจจุบันเริ่มนิยมใช้ ในการทำนายพฤติกรรมของชิ้นส่วนทดสอบ และดูผลการวิเคราะห์ใช้วิธีวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลองคานหน้าตัด Hat Shape และมีการป้อนขึ้นลอนด้านข้าง 3 แบบ คือ ป้อนขึ้นลอนแนวตั้ง ป้อนขึ้นลอนแนวนอน และป้อนขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง ความยาวคาน 1.70 เมตร ทำการติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา และ ความยาวคาน 1.15 เมตร ทำการติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 0 องศา เฉพาะคานธรรมดาไม่มีการป้อนขึ้นลอน ที่มีแรงกระทำแบบจุดที่กึ่งกลางความยาวคาน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและค่าการแอ่นตัว (Load-Deflection Curve) ของรูปแบบคานธรรมดาไม่มีการป้อนขึ้นลอนเปรียบเทียบกับรูปแบบคานที่มีการทำการป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) ที่ข้างคานเหล็กกริดเย็น พฤติกรรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ พบว่าให้ค่าการแอ่นตัวที่สอดคล้องกัน และตรวจสอบการเสีรูปร่างในสภาวะการใช้งานจำกัด (key limit state) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะเฉพาะที่ การโก่งเดาะแบบผิวดรูป และการโก่งเดาะแบบรวม โดยใช้โปรแกรม CUFSM กำหนดค่ากำลังรับแรงแบบ “โดยตรง” ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300

ผลการวิจัยที่ได้คือ รูปแบบการขึ้นลอนต่อการเสริมกำลังรับน้ำหนักของคานที่เสริมความแกร่งจากมากไปหาน้อยตามลำดับ ได้แก่ การป้อนขึ้นลอนแนวตั้ง การป้อนขึ้นลอนแนวนอน และการป้อนขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง สำหรับคานเหล็กกริดเย็นรูปทรงหมวก สามารถหาผลการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมได้โดยไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริง และวิเคราะห์ทางเสถียรภาพของชิ้นส่วน เปรียบกำลังแรงค้ำโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี ได้แก่ ASD, LRFD และ LSD การเปรียบเทียบกำลังแรงค้ำโดยตรงของคานเหล็กกริดเย็นด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างผนังบาง (Thin – Walled Structures)

คำสำคัญ : การป้อนขึ้นลอน, การโก่งเดาะเฉพาะที่, การโก่งเดาะแบบผิวดรูป, การโก่งเดาะแบบรวม, กำลังรับแรงโดยตรง

Thesis Title : EMBOSSMENT EFFECTS ON THE BENDING OF HAT SHAPE
COLD-FORMED STEEL BEAMS

Student Name : Mr. Montri Yenpiam

Student ID : 124970401011-7

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Civil Engineering (Structural Engineering)

Academic Year : 2010

Thesis Advisor : Dr. Manoch Rujipakorn

ABSTRACT

The study employed the mathematical model in the MATLAB object-oriented program in order to study the failure behavior of structures for the purpose of considering a Limit State Design. Current civil engineering design trends begin by determining the behavior of test specimens, then results are analyzed by using Finite Element Method Analysis with hat shape steel and three patterns of lateral forming or embossments, i.e. vertical embossments, horizontal embossments and diagonal embossments, at a beam span length of 1.70 meters. The installation was placed on a support tilt angle of 30 degrees. At a beam span length of 1.15 meters, the installation was placed on a support tilt angle of 0 degrees with a specific unembossed normal beam that had undergone point loading at the center of the beam.

This research also explored the relationship between the loading weight and the load-deflection curve of normal beams compared with cold-formed embossed beams. The findings indicate that the behaviors derived from analysis by using the finite element method and those from the actual testing in the laboratory exhibit have the same consistency in deflections. Gross properties were checked following use for all three key limit states, i.e. local buckling, distortional buckling and global buckling, by using CUFSM to calculate the “Direct” Strength, of the steel grade designations of G550,G360,G350 and G300.

The results further show that reinforced embossment formats stiffened beams from more to less i.e. vertical embossments, horizontal embossments and diagonal embossments, respectively, for hat shape cold-formed steel beams. According to the analysis, the status of test specimens can be estimated without testing actual specimens and stability analysis of the cold-formed structural steel to compare the power of direct blending of the beams designed as shown in theory i.e. ASD, LRFD and LSD. The power of direct blending of cold-formed steel was compared by the FSM method and the outcome of actual testing in order to perform the design of thin-walled structures.

Keywords : Embossments, local buckling, distortional buckling, global buckling, Direct Strength
Method

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยในการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา แขนงวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในช่วงปี พุทธศักราช 2553 โดยทำการวิจัยเรื่อง ผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการดัดของคานเหล็กค้ำยันรูปทรงหมวก หรือ Embossment Effects on The Bending of Cold – Formed Steel Hats Shape Beams งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติสานต์ กร้ามาตร ประธานกรรมการหลักสูตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีชัย สำราญวานิช กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถาวร ชีรเวชญาณ กรรมการ ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอย่างสูงในการแนะนำสิ่งที่มีประโยชน์แก่การเขียนวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ ดร. มาโนช รุจิภากร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดต่างๆ ในการวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของการทำการวิจัยนี้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้ต้องพบอุปสรรคหลายประการ แต่ด้วยความช่วยเหลือเอื้อเฟื้ออย่างดีจากหลายๆ ฝ่าย ทำให้ผู้วิจัยฝ่าฟันอุปสรรคจนประสบความสำเร็จได้ จึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่กล่าวนามมาดังนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์บุญส่ง จงกลณี และ คุณอศพล มุงบัง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ สำหรับการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง DARTEC และเครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์ CNC Router Machine

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์ สำหรับการใช้เครื่องทำงานช่าง

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช.)หรือ NSTDA ที่ให้ความอนุเคราะห์ สำหรับการใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ และให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิคการใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์

ขอขอบพระคุณ บริษัท บลูสโคป ไลสจัท (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์บริจาค วัสดุค้ำยันเหล็กขึ้นรูปเย้นที่มีหน้าตัดรูปทรงหมวก (Hat Shape) ที่ใช้สำหรับการทดลองวิจัย

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่คอยให้กำลังใจอันยิ่งใหญ่ด้วยดีตลอดมา และที่ลืมไม่ได้คือผู้เกี่ยวข้องหลายๆท่านที่หากมิได้กล่าวนามมา ณ โอกาสนี้ด้วย

มนตรี เย็นเปี่ยม

10 ตุลาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	5
1.6 ข้อยกเว้นของการศึกษาวิจัย	8
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 คำนำ	10
2.2 มาตรฐานและข้อกำหนดรายละเอียดการออกแบบสำหรับเหล็กขึ้นรูปเย็น	10
2.3 รูปแบบหน้าตัดทั่วไป และการใช้งานสำหรับเหล็กขึ้นรูปเย็น	14
2.4 กระบวนการผลิตสำหรับเหล็กขึ้นรูปเย็น	19
2.5 ปัญหาพิเศษในการออกแบบหน้าตัด ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น	20
2.6 รูปแบบผลรวมน้ำหนักกระทำ (Load Combinations)	27
2.7 การออกแบบในภาวะขีดสุด (Limit States Design)	28
2.8 วัสดุต่างๆ และการขึ้นรูปเย็น	31
2.9 รูปแบบการโก่งคาะงของชิ้นส่วน โครงสร้างผนังบางซึ่งรับแรงดัดและแรงอัด	46
2.10 ชิ้นส่วน โครงสร้างรับแรงอัดแบบเสริมค้ำยันและแบบไม่เสริมค้ำยัน	61
2.11 การออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยการใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง	75
2.12 การวิเคราะห์ทางคานไฟไนต์เอลิเมนต์ Finite Element Analysis (FEA)	83
2.13 การวิเคราะห์การเสีรูปร่างของชิ้นส่วน โครงสร้างโดยโปรแกรม CUFSM	84
2.14 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์	85

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.15 การสร้างแม่พิมพ์โดยใช้เครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์ CNC Router Machine	86
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	90
3.1 ระเบียบการวิจัย แสดงการวางแผนการวิจัยและลำดับขั้นตอนการวิจัย	90
3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ	90
3.3 การสร้างแม่พิมพ์เหล็กเพื่อใช้ในงานวิจัย	92
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	105
3.5 การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบ	109
3.6 วิธีที่ใช้ศึกษา คั่นคว่ำและวิจัย	112
3.7 ลักษณะข้อมูล การเลือกข้อมูล และเหตุผลในการคัดเลือก	168
3.8 ขั้นตอนในการรวบรวมข้อมูล	168
3.9 วิธีวิเคราะห์ข้อมูล	169
บทที่ 4 ผลการทดลอง	174
4.1 คำนำ	174
4.2 ผลการวิเคราะห์ทดสอบแรงดึง	174
4.3 ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืน	176
4.4 ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืน	177
4.5 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดสอบจริงของคาน ตามตารางที่ 4.2	178
4.6 ผลการวิเคราะห์วัฏระยะการยึดตัวเมื่อรับแรงกดดัดของคานเหล็กกรีดยั่งยืนโดยใช้ Strain Gauges	179
4.7 ผลการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของคานเหล็กกรีดยั่งยืน โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามรูปที่ 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 และ 4.17	181
4.8 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของการบวมขึ้นลอนรูปแบบต่างๆ ต่อการรับน้ำหนักบรรทุก ตามตารางที่ 4.3	186
4.9 ผลการวิเคราะห์การโก่งเดาะของคานเหล็กกรีดยั่งยืน โดยใช้โปรแกรม CUFSM ตามรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20	187
4.10 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของคานเหล็กกรีดยั่งยืนด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM	189

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.11 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพการ โกงเดาะของแบบจำลองคาน เหล็กกรีดยึดด้วยวิธี Finite Strip (FSM) กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงใน ห้องปฏิบัติการ	192
4.12 แสดงการ โกงเดาะร่วม กราฟมาตรฐานพลังงานความเครียด และการตรวจสอบ การเสถียรภาพในสภาวะการใช้งานจำกัด (Key Limit State) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การ โกงเดาะแบบรวม การ โกงเดาะแบบผิวดรูป และการ โกงเดาะเฉพาะที่ ตามรูปที่ 4.21 ถึง 4.24	194
4.13 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเสถียรภาพของหน้าตัดคานเหล็กกรีดยึดด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM	196
4.14 ผลการวิเคราะห์การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานเหล็กกรีดยึด ที่เกิดการ เคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกััดด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM (ที่ติดตั้งบนจุกครองรับเอียงท่ามุม 0 องศา) ตามรูป 4.31 และ 4.32	198
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	199
5.1 สรุปผลงานวิจัย	199
5.2 ข้อเสนอแนะ	201
เอกสารอ้างอิง	203
ภาคผนวก	
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	208
ประวัติผู้เขียน	245

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระดับการเคลือบสำหรับสภาพการผุกร่อนแบบต่างๆ	27
2.2 ค่าต่ำสุดของหน่วยแรงคราก, กำลังรับแรงดึง และ การยึดตัว	33
2.3 ขอบเขตกำหนดสำหรับชิ้นส่วนเสา ที่ได้รับการคัดสรรคุณสมบัติแล้ว	77
2.4 ขอบเขตกำหนดสำหรับชิ้นส่วนคาน ที่ได้รับการคัดสรรคุณสมบัติแล้ว	78
2.5 ค่าFactor Ω และ ϕ ในการออกแบบโครงสร้างเสา	80
2.6 ค่าFactor Ω และ ϕ ในการออกแบบโครงสร้างคาน	82
3.1 ตัวอย่างคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัดรูปทรงหมวก (Hat Shape) ที่มีอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน	91
3.2 ขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับป้่มขึ้นลอนแนวตั้ง	93
3.3 ขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับป้่มขึ้นลอนแนวนอน	94
3.4 ขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับป้่มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียงสำหรับคานหน้าตัด Top Span	94
3.5 ขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับป้่มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียงสำหรับคานหน้าตัด Top Hats	95
3.6 ขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับป้่มขึ้นลอนแนวตั้ง	96
3.7 ขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับป้่มขึ้นลอนแนวนอน	96
3.8 ขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับป้่มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง	97
3.9 ความเสียหายที่เกิดในการลากขึ้นรูป	119
3.10 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่างๆ	147
3.11 ขนาดรูปร่างและมิติของชั้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง	149
3.12 ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ของวัสดุบางชนิด	159
4.1 ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ration) และค่าต่างๆสำหรับการใช้ในการสร้างแบบจำลอง โมเดลการทดสอบ ที่กำหนดในการออกแบบ	175
4.2 ผลนำหนักบรรทุกสูงสุดของตัวอย่างคานเหล็กกริดยื่น โดยวัดที่ค่าการ โกงตัวในช่วงใช้งาน	178
4.3 ผลเปรียบเทียบความแตกต่างของการป้่มขึ้นลอนรูปแบบต่างๆต่อการรับน้ำหนักบรรทุกของคานเหล็กกริดยื่น	186

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 Load Factor สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงคัต โดยตรงที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจำลองคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span	189
4.5 Load Factor สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงคัต โดยตรงที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจำลองคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Hats	189
4.6 กำลังรับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span	190
4.7 กำลังรับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Hats	190
4.8 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน	190
4.9 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Hats ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน	191
4.10 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span ที่ออกแบบตามทฤษฎี	192
4.11 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Hats ที่ออกแบบตามทฤษฎี	192
4.12 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span ด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง	193
4.13 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Hats ด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง	193

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัยตัวอย่างที่ทดสอบ	7
2.1 รูปแบบหน้าตัดสำหรับพื้นหลังคาและกำแพง	14
2.2 ตัวยึดแบบตะปูเกลียวธรรมดา และตะปูเกลียวซ่อน	15
2.3 หน้าตัดสำหรับโครงเหล็กสำหรับรองรับ โครงสร้างสำหรับเก็บวัสดุ	16
2.4 โครงเหล็กสำหรับเก็บวัสดุ	16
2.5 โครงถักเหล็กสองมิติ	16
2.6 การก่อสร้างระบบของโครงสร้างใช้ภายใน	17
2.7 แผ่นพื้นต่อเนื่องสำหรับพื้นโครงสร้างประกอบ	18
2.8 รูปหน้าตัดทั่วไปของเหล็กกลวง	19
2.9 ลำดับการขึ้นรูปโดยการม้วนแบบทั่วไปสำหรับหน้าตัดรูปตัว Z	20
2.10 อุปกรณ์การขึ้นรูปเย็น	20
2.11 ชิ้นส่วนรับแรงอัด	22
2.12 การเปลี่ยนรูปจากการบิด	23
2.13 รูปแบบการโก่งเคาะแบบผิดปกติ	24
2.14 คุณสมบัติทางแรงดึงในหน้าตัดกลวงขึ้นรูปเย็นรูปสี่เหลี่ยม (เกรด C350 ถึง AS 1163)	25
2.15 โล้กระจายความถี่	29
2.16 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น- ความเครียดของตัวอย่างเหล็กเกรด G300 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน AS 1397	34
2.17 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น- ความเครียดของตัวอย่างเหล็กเกรด G450 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน AS 1397	35
2.18 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น- ความเครียดของตัวอย่างเหล็กเกรด G350 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน AS 1163	35
2.20 การวัดความเหนียว	37
2.21 การยึดตัวของเหล็กเกรด G550 หนา 0.42 มม.	40
2.22 ผลกระทบของการขึ้นรูปเย็นที่มีต่อพฤติกรรมทางด้านความเค้น- ความเครียด	42
2.23 การวิเคราะห์โดยวิธี Finite Strip ของแผ่นเหล็กที่มีการเสริมค้ำยันที่ปลายขอบ	48
2.24 การแบ่งย่อยสำหรับวิธี Finite Strip ของหน้าตัดแบบรางน้ำ	49
2.25 แสดง คำนวณน้ำหนักที่ก่อให้เกิดการ โกงเคาะของหน้าตัดแบบรางน้ำแบบไม่มีขอบ กับค่าความยาวการ โกงเคาะแบบครึ่งคลื่น สำหรับการรับแรงอัดแบบผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด	49

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 แสดงน้ำหนักกระทำโค้งเดาะกับความยาวโค้งเดาะครึ่งคลื่นของหน้าตัดแบบรางน้ำแบบไม่มีขอบที่รับแรงอัดผ่านศูนย์กลางหน้าตัด	50
2.27 ลักษณะทางเรขาคณิตของหน้าตัดแบบมีขอบ	52
2.28 หน้าตัดแบบที่ 1 – กราฟแสดงค่าหน่วยแรงโค้งเดาะกับความยาวครึ่งคลื่นสำหรับหน้าตัดรับแรงอัดผ่านศูนย์กลาง	53
2.29 หน้าตัดแบบที่ 2 – กราฟแสดงค่าหน่วยแรงโค้งเดาะกับความยาวครึ่งคลื่นสำหรับหน้าตัดรับแรงอัดผ่านศูนย์กลาง	54
2.30 การโค้งเดาะแบบผิวดรูปที่ปึก ของเสาแบบหน้าตัดรางน้ำแบบมีขอบ – หน้าตัดแบบที่ 2	54
2.31 หน้าตัดแบบที่ 3 – กราฟแสดงค่าหน่วยแรงโค้งเดาะกับความยาวครึ่งคลื่นสำหรับหน้าตัดรับแรงอัดผ่านศูนย์กลาง	55
2.32 การวิเคราะห์การโค้งเดาะ โดยวิธี Finite Strip	56
2.33 แปรแบบหน้าตัดรางน้ำที่ได้รับแรงอัดรอบแกนหลัก	57
2.34 แสดงค่าหน่วยแรงโค้งเดาะกับความยาวครึ่งคลื่นสำหรับการัดรอบแกนหลักของแปรหน้าตัดรางน้ำ	58
2.35 การโค้งเดาะแบบการผิวดรูปที่ปึก ของแปรหน้าตัดรูปตัว Z	58
2.36 แปรหน้าตัดรูปตัว Z – กราฟแสดงหน่วยแรงโค้งเดาะกับค่าความยาวครึ่งคลื่นของการัดรอบแกนนอน	59
2.37 คานหน้าตัดแบบปีกกลวง – กราฟแสดงหน่วยแรงโค้งเดาะกับค่าความยาวครึ่งคลื่นของการัดรอบแกนนอน	60
2.38 ค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเดาะของแผ่นเหล็ก	63
2.39 เหล็กแผ่นที่เกิดการโค้งเดาะแบบเกิดทีหลัง	64
2.40 การกระจายหน่วยแรงประสิทธิผล	65
2.41 การทดสอบชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน	66
2.42 หน่วยแรงออกแบบประสิทธิผล (σ_{fy}) ของชิ้นส่วน โครงสร้างรับแรงอัดแบบได้รับการเสริมค้ำยัน ($f_y = 450$ MPa)	69
2.43 หน่วยแรงออกแบบประสิทธิผล (σ_{fy}) ของชิ้นส่วน โครงสร้างรับแรงอัดแบบไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน ($f_y = 450$ MPa)	69
2.44 ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับชิ้นส่วนเหล็กแผ่นภายใต้หน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่มีการเสริมค้ำยัน	72
2.46 การกระจายตัวของหน่วยแรงและเงื่อนไขในการออกแบบสำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่ ได้รับการเสริมค้ำยันที่ขอบ	73
3.1 หน้าตัดของคานเหล็กกริดเย็นที่เลือกใช้ในการทดสอบ	92
3.2 เหล็กหัวแดงสำหรับเป็นวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์	92
3.3 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับป้อนขึ้นลอนแนวตั้ง	93
3.4 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับป้อนขึ้นลอนแนวนอน	93
3.5 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับป้อนขึ้นลอนแนวเฉียงเอียงสำหรับคานหน้าตัด Top Span	94
3.6 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับป้อนขึ้นลอนแนวเฉียงเอียงสำหรับคานหน้าตัด Top Hats	95
3.7 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับป้อนขึ้นลอนแนวตั้ง	95
3.8 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับป้อนขึ้นลอนแนวนอน	96
3.9 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับป้อนขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง	97
3.10 การใช้โปรแกรม CAD ในการสร้างแบบร่างแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) ที่ทำการป้อนขึ้นลอน	97
3.11 เครื่อง CNC MAKINO ที่ใช้ในงานศึกษาวิจัย	98
3.12 เครื่อง CNC Milling SHI ZUOKA ที่ใช้ในงานศึกษาวิจัย	98
3.13 ชุดควบคุมเครื่องจักรสมองกล CNC Machine	99
3.14 หน้าจอชุดควบคุม (Monitor) เครื่องจักรสมองกล CNC Machine	99
3.15 การปรับแต่งการทำงานของเครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์	99
3.16 การปรับแต่งการทำงานของเครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์	100
3.17 ชุดหัวกัดแกะสลักสำหรับเครื่อง CNC	100
3.18 การแกะสลักแม่พิมพ์ด้วยเครื่อง CNC ที่ต้องการความละเอียดของงาน	100
3.19 แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) ที่ชุดหัวกัดแกะสลักเสร็จแล้ว	101
3.20 การเจาะเพื่อยึดหัวป้อนแม่พิมพ์ด้วยสลักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร	101
3.21 ขนาดทำการเจาะหัวป้อนแม่พิมพ์ด้วยดอกกัดส่วนต้องทำการหล่อเย็นดอกสว่านด้วยน้ำมัน	101
3.22 แม่พิมพ์ป้อนแนวนอนสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN	102
3.23 แม่พิมพ์ป้อนแนวตั้งสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN	102

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 แม่พิมพ์ปั๊มแนวเฉียงเอียงสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048	
TOP SPAN	102
3.25 แม่พิมพ์ปั๊มแนวนอนสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS	103
3.26 แม่พิมพ์ปั๊มแนวตั้งสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS	103
3.27 แม่พิมพ์ปั๊มแนวเฉียงเอียงสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS	103
3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาที่ทำการชุบแข็งในแต่ละขั้นตอน	104
3.29 Strain Gauges และชุดต่อสาย	105
3.30 เครื่อง Transducer Displacement	105
3.31 เครื่อง Transducer Displacement	106
3.32 Magnetic สำหรับติดตั้งเครื่องมือ	106
3.33 เครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger	106
3.34 จูดรองรับSupport เหล็ก โครงถักเอียงทำมุม 30 องศา	107
3.35 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ	107
3.36 อุปกรณ์ที่ใช้เป็นจูดรองรับคือ Support โครงเหล็ก	108
3.37 อุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวทำการกดน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 1 จุด	108
3.38 อุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวทำการกดน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ 2 จุด	108
3.39 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและตำแหน่งที่ทดสอบ บนจูดรองรับเอียงทำมุม 30 องศา	109
3.40 ตำแหน่งที่กดกึ่งกลางคาน	109
3.41 ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสีรูปของคานเหล็กรีดเย็น	110
3.42 ติดตั้งเครื่องมือวัดกลางคานวัดการเคลื่อนตัวขนาดรับแรงกดตัด บนจูดรองรับเอียงทำมุม 30 องศา	110
3.43 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและตำแหน่งที่ทดสอบ บนจูดรองรับเอียงทำมุม 0 องศา	111
3.44 ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสีรูปของคานเหล็กรีดเย็น	111
3.45 ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสีรูปของคานเหล็กรีดเย็น	112
3.46 ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสีรูปของคานเหล็กรีดเย็น	112

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.47 ขนาดของการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวนอนและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP SPAN	113
3.48 ขนาดของการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวนอนและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP HATS	113
3.49 การบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวนอนกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด TOP SPAN	113
3.50 การบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวนอนกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด TOP HATS	114
3.51 ขนาดของการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP SPAN	114
3.52 ขนาดของการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP HATS	115
3.53 การบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด TOP SPAN	115
3.54 การบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด TOP HATS	115
3.55 ขนาดของการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP SPAN	116
3.56 ขนาดของการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP HATS	116
3.57 การบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด TOP SPAN	117
3.58 การบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด TOP HATS	117
3.59 Cupping (a) และ ขั้นตอนการทำ Cupping (b)	118
3.60 กลไกการลากขึ้นรูป	119
3.61 ตัวอย่างที่ทำการทดสอบการลากขึ้นรูป (Deep Drawing)	125
3.62 การทดสอบการบีบขึ้นรูปกับตัวอย่างที่ศึกษาวิจัยเพื่อหาระยะของการยืดตัว (Stroke) ที่เหมาะสม	125
3.63 ขนาดหน้าตัดคานประกอบเหล็กรูปตัวไอ	126
3.64 ขนาดด้านข้างคานประกอบเหล็กรูปตัวไอ	126
3.65 ขนาดแกนเหล็กยึดหัวบีบแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch)	127
3.66 การไสปีกคานประกอบเพื่อให้ผิวเรียบ	127
3.67 การไสหลังคานประกอบเพื่อให้ผิวเรียบ	127
3.68 การเจาะหลังคานประกอบเพื่อนำร่อง	128

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.69 การทำเกลียวใน (Tapping) ด้วยเครื่องมือ	128
3.70 การติดตั้งแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die)	128
3.71 ติดตั้งดอกกัดสำหรับการกลึงด้วยเครื่อง CNC	129
3.72 การปรับเครื่อง CNC เพื่อหาระยะการกลึงของดอกกัด	129
3.73 การใช้ดอกกัดกลึงครึ่งสองที่ส่วนยึดจับแกนเหล็กกับเครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press)	129
3.74 ทดสอบประกอบหัวปั๊มแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) กับแกนเหล็กยึดหัวปั๊มแม่พิมพ์	130
3.75 ใช้ดอกสว่านเจาะแกนเหล็กเพื่อยึดสลักขนาดผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร	130
3.76 การใช้ดอกสว่านเจาะแกนเหล็กเพื่อยึดสลัก	130
3.77 เครื่อง CNC ที่ใช้เจาะแกนเหล็กเพื่อยึดสลัก	131
3.78 เครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press)	133
3.79 คานประกอบรูปตัว ไอและแกนเหล็กยึดหัวปั๊มแม่พิมพ์	134
3.80 เครื่องมือที่ใช้กับเครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press)	134
3.81 คันโยกที่ล็อกยึดล้อเพลลาข้อเหวี่ยงและลูกเบี้ยว	134
3.82 ขยับลงจนอยู่ในตำแหน่งที่แม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมียวางประกบกันได้สนิท	135
3.83 ชั้นน็อต (Nut) ยึดจับแกนเหล็กที่จับล็อกยึดแม่พิมพ์ตัวผู้	135
3.84 ชั้นน็อต (Nut) ยึดจับแกนเหล็กที่จับล็อก ยึดแม่พิมพ์ตัวผู้	135
3.85 การขันล็อกยึดคานประกอบรูปตัว ไอด้วยเหล็กประกบ	136
3.86 การขันล็อกยึดคานประกอบรูปตัว ไอด้วยเหล็กประกบ	136
3.87 ทำการขีดเส้นเพื่อบอกตำแหน่งระยะห่างของการปั๊มขึ้นลอน	136
3.88 ชั้นเหล็กแหวนล็อกยึดแกนเพลลาส่งกำลังที่ปรับระยะตั้งค่า Stroke	137
3.89 ชั้นเหล็กแกนเพลลาส่งกำลังของเครื่องปั๊มปรับระยะตั้งค่า Stroke (ขึ้น-ลง)	137
3.90 ชั้นน็อต (Nut) ล็อกยึดแกนเหล็กก้านหรือเหล็กเพลลาส่งกำลัง	137
3.91 ชั้นน็อต (Nut) ล็อกยึดแกนเหล็กก้านหรือเหล็กเพลลาส่งกำลัง	138
3.92 ชั้นน็อต (Nut) ล็อกยึดแกนเหล็กก้านหรือเหล็กเพลลาส่งกำลัง ไม่ให้เกินระยะที่ตั้ง	138
3.93 การเปิดสวิทซ์การทำงานของเครื่องปั๊มข้อเสื่อ	138
3.94 เปิดสวิทซ์รอบการทำงานของเครื่องหมุนล้อเพลลาข้อเหวี่ยงใช้ความเร็วรอบ 120 ครั้งต่อนาที	139
3.95 ทำการทดสอบการปั๊มขึ้นรูป เพื่อหาระยะค่า Stroke ที่เหมาะสม	139
3.96 ชุดสวิทซ์ควบคุมการปั๊มของเครื่องปั๊มข้อเสื่อ	139
3.97 กดสวิทซ์สีเขียวปุ่มเมื่อทำการปั๊มวัสดุ	140

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.98	กดสวิทซ์สีแดงเมื่อหยุดการทำงานและล็อกเครื่องไม่ให้ทำงาน	140
3.99	ทำการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง	140
3.100	ทำการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง	141
3.101	ทำการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน	141
3.102	ทำการป้อนขึ้นลอนด้านข้างของคานเหล็กขึ้นรูปเย้นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN ที่เสร็จแล้ว	141
3.103	ทำการป้อนขึ้นลอนด้านข้างของคานเหล็กขึ้นรูปเย้นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS ที่เสร็จแล้ว	142
3.104	ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเหนียว (Mild Steel)	144
3.105	เส้นโค้งความเค้น – ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	145
3.106	เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น – ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	146
3.107	การเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องCNC	148
3.108	เครื่องทดสอบการดึงเหล็กยี่ห้อDARTEC	148
3.109	รูปร่างและมิติของชิ้นทดสอบ	148
3.110	Switch ด้านหลังของผู้ Control	149
3.111	Switch ด้านหน้าผู้ Control	150
3.112	Switch Control แคนหัวจับขึ้นทดสอบด้านล่าง	150
3.113	Switch Control การขึ้น-ลงหัวจับขึ้นงานชุดบน	151
3.114	ตัวปรับขนาดตัวจับขึ้นทดสอบ	151
3.115	ปุ่มการเข้าโปรแกรมการทดสอบแรงดึง	152
3.116	ปุ่มแสดงคำสั่งการทดสอบแรงดึง	152
3.117	ปุ่มแสดงคำสั่งการเริ่มทดสอบแรงดึง	152
3.118	หน้าจอโปรแกรม Darter Workshop Tensile	153
3.119	ตำแหน่งทำการ Set Preset	153
3.120	ตำแหน่งการป้อนค่า Specimen Dimension	154
3.121	ชุดควบคุมการจับขึ้นทดสอบ	154
3.122	หน้าจอการสิ้นสุดคำสั่งการทดสอบแรงดึง	155
3.123	หน้าจอผลการทดสอบแรงดึง	155
3.124	กราฟแสดงผลการทดสอบ	156

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.125 การนำชิ้นทดสอบออก	156
3.126 Switch ด้านหน้าผู้ Control	157
3.127 Switch ด้านหลังของผู้ Control	157
3.128 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Deformable Bar	158
3.129 การเปลี่ยนรูปของท่อนวัสดุที่รับแรงดึง	159
3.130 ทำการตีเส้น Mesh 1 x 1 ซม.	160
3.131 ติดตั้ง Strain Gauges กลางคาน	160
3.132 รูปแบบการจำลอง Model ที่ไม่มีการป้อนขึ้นลอนด้านข้างคานเหล็กกรีดยื่น	162
3.133 รูปแบบการจำลอง Model ที่มีการป้อนขึ้นลอนแนวตั้งด้านข้างคานเหล็กกรีดยื่น	162
3.134 รูปแบบการจำลอง Model ที่มีการป้อนขึ้นลอนแนวนอนด้านข้างคานเหล็กกรีดยื่น	162
3.135 รูปแบบการจำลอง Model ที่มีการป้อนขึ้นลอนแนวเฉียงเอียงด้านข้างคานเหล็กกรีดยื่น	162
3.136 คานเหล็กกรีดยื่นที่ไม่มีการป้อนขึ้นลอนด้านข้างติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา	163
3.137 คานเหล็กกรีดยื่นที่มีการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา	163
3.138 คานเหล็กกรีดยื่นที่มีการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวนอนติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา	163
3.139 คานเหล็กกรีดยื่นที่มีการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา	163
3.140 หน้าหลักของ CUFSM V 3.12	164
3.141 การป้อนข้อมูลขึ้นส่วนทดสอบในส่วน Input ของคานหน้าตัด Top Span	164
3.142 การป้อนข้อมูลขึ้นส่วนทดสอบในส่วน Properties ของคานหน้าตัด Top Span	165
3.143 การป้อนข้อมูลขึ้นส่วนทดสอบในส่วน Input ของคานหน้าตัด Top Hats	165
3.144 การป้อนข้อมูลขึ้นส่วนทดสอบในส่วน Properties ของคานหน้าตัด Top Hats	165
3.145 โปรแกรมวิเคราะห์ห้ประมวลผลและแสดงผลคาน Top Span	166
3.146 โปรแกรมจะวิเคราะห์ห้ประมวลผลและแสดงผลคาน Top Hats	166
3.147 การป้อนข้อมูลขึ้นส่วนทดสอบในส่วน Properties ของคานหน้าตัด Top Span	167
3.148 การป้อนข้อมูลขึ้นส่วนทดสอบในส่วน Input ของคานหน้าตัด Top Hats	167
3.149 การรวบรวมข้อมูลโดยการบันทึกลงใน Notepad ของเครื่อง Computer PC	168
3.150 โปรแกรมนี้มีความเหมาะสมกับระบบปฏิบัติการ Window 98	169
3.151 จะปรากฏหน้าจอจตุรรูป สามารถดูผลขนาดบันทึกข้อมูลและอ่านค่าได้พร้อมๆกันหลายตัว	169
3.152 หน้าจอสามารถดูผลอ่านค่าข้อมูลและพิมพ์ข้อมูล	170
3.153 หน้าจอสามารถดูผลกราฟ Load กับการยึดตัว	170

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.154 หน้าจอสามารถดูผลกราฟ Stress กับ Strain	170
3.155 ไปเปิดใน Excel โดยกดปุ่ม File converter เพื่อแปลงข้อมูลเป็น File Excel	161
3.156 ค่า Stress ค่า Strain และค่า Displacement แสดงเป็นกราฟ	171
3.157 การสั่งพิมพ์ข้อมูลเป็น File Excel เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ (Edit X Y Data)	172
3.158 ค่า Load Factor ของกราฟที่การ โกงเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ	172
3.159 การคำนวณค่าการรับกำลังดัดที่ได้ในแต่ละสภาวะการใช้งานจำกัด โดย Spreadsheets	173
3.160 การคำนวณค่าการรับกำลังดัดที่ได้ในแต่ละสภาวะการใช้งานจำกัด โดย Spreadsheets	173
4.1 การทดสอบดึงชิ้นส่วนตัวอย่างด้วยเครื่องดึงเหล็ก ยี่ห้อ DARTEC	174
4.2 กราฟ Load กับการยืดตัว	175
4.3 กราฟ Stress กับ Strain	175
4.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำบรรทุกและการ โกงตัวของคานเหล็กกรีดยื่นแบบหน้าตัด รูน TOP SPAN	176
4.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำบรรทุกและการ โกงตัวของคานเหล็กกรีดยื่นแบบหน้าตัด รูน TOP HATS	176
4.6 ผลความสัมพันธ์ระหว่าง โมเมนต์ดัดและการ โกงตัวของคานเหล็กกรีดยื่น แบบหน้าตัด รูน TOP SPAN	177
4.7 ผลความสัมพันธ์ระหว่าง โมเมนต์ดัดและการ โกงตัวของคานเหล็กกรีดยื่น แบบหน้าตัด รูน TOP HATS	177
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่ส่วนบนหลังคาน TOP SPAN	179
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่ส่วนปีกกลางคาน TOP SPAN	179
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่ส่วนบนหลังคาน TOP HATS	180
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่ส่วนปีกกลางคาน TOP HATS	180
4.12 Yield Stress Max.และ Stress Max.	181
4.13 ทิศทางการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกด	182
4.14 ทิศทางของแรงดึง แรงอัด ในคาน Top Span โดยมากที่สุดแสดงเป็นสีแดง	182
4.15 ทิศทางของแรงดึง แรงอัด ในคาน Top Hats โดยมากที่สุดแสดงเป็นสีแดง	182
4.16 ก ข ค ง แสดงการกระจาย Stress เมื่อรับแรงกดคัดของการขึ้นลอนแบบต่างๆ สำหรับคาน เหล็กกรีดยื่นหน้าตัด Top Span	184
4.17 จ ฉ ช ซ แสดงการกระจาย Stress เมื่อรับแรงกดคัดของการขึ้นลอนแบบต่างๆ สำหรับคาน เหล็กกรีดยื่นหน้าตัด Top Hats	185

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ก ข แสดงโปรแกรมคำนวณค่า Stress และ Moment ที่ถึง Yield เพื่อใช้ออกแบบ สำหรับ แทนค่าในสมการวิธีกำลังรับแรงโดยตรง	187
4.19 แสดงการโค้งเดาะร่วมและกราฟมาตรฐานพลังงานความเครียด	188
4.20 การเสียรูปของคานในสภาวะการใช้งานจำกัด	188
4.21 การโค้งเดาะร่วมและมาตรฐานพลังงานความเครียดของแบบจำลอง คานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550	194
4.22 การโค้งเดาะร่วมและมาตรฐานพลังงานความเครียดของแบบจำลองคานเหล็กกริดยื่น หน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550	194
4.23 การโค้งเดาะของคานเหล็กกริดยื่นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550	195
4.24 การโค้งเดาะของคานเหล็กกริดยื่นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550	195
4.25 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โค้งเดาะเฉพาะที่ (Local Bucking) L1 ถึง L14	196
4.26 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โค้งเดาะผิดรูป (Distortional Bucking) D1 ถึง D8	196
4.27 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โค้งเดาะรวม (Global Bucking) G1 ถึง G4	197
4.28 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โค้งเดาะเฉพาะที่ (Local Bucking) L1 ถึง L8	197
4.29 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โค้งเดาะผิดรูป (Distortional Bucking) D1 ถึง D2	197
4.30 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โค้งเดาะรวม (Global Bucking) G1 ถึง G4	198
4.31 การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกด ตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โค้งเดาะรวม G1 ถึง G4	198
4.32 การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน Top Hats ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกด ตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โค้งเดาะรวม G1 ถึง G4	198

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กรีดเย็น (Cold - Formed Steel) ผลิตด้วยการรีดขึ้นรูปจากเหล็กกล้ากำลังสูงที่เคลือบกันสนิมด้วยสังกะสีหรือเหล็กผสมบางที่เป็นแผ่น หรือเส้นมีความหนา 0.4 ถึง 25 มม. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้กำลังบรรทุกน้ำหนักสำหรับอาคาร ทำจากเหล็กกล้ากำลังสูงมีค่า Minimum Yield Strength 450 MPa แล้วแต่ชนิดและประเภทของการใช้งาน เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงติดตั้งได้สะดวกรวดเร็ว ประหยัดเวลา ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กรีดเย็นมีหน้าตัดให้เลือกใช้ได้หลายรูปแบบ ความบางของหน้าตัดดังกล่าวก็เพิ่มขีดจำกัดต่อการออกแบบโครงสร้างอย่างมาก เนื่องจากต้องมีการควบคุมสัดส่วนและความละเอียดต่างๆขององค์อาคารอย่างพิถีพิถัน อีกทั้งการคำนวณออกแบบซับซ้อนกว่าเหล็กรูปพรรณทั่วไป ความแข็งของตัววัสดุที่ผลิต ซึ่งแต่ละบริษัทที่อยู่ในอุตสาหกรรมเหล็กรีดเย็นก็มีผลิตภัณฑ์และรูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ในการออกแบบจึงต้องมีการตรวจสอบพฤติกรรมของโครงสร้างที่ใช้วัสดุที่มีรูปทรงและกำลังของวัสดุที่ต่างกันได้ และเพื่อให้เกิดความประหยัดค่าใช้จ่ายของการก่อสร้างหรือจุกค้ำทุ่น เนื่องจากเหล็กมีราคาต้นทุนการก่อสร้างที่สูง ซึ่งขึ้นอยู่กับผลกระทบความแข็งของการขึ้นรูปหน้าตัดที่มีต่อการรับน้ำหนักของเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยการเสริมความแกร่ง (Stiffness) ของเหล็กขึ้นรูปเย็นเพื่อลดต้นทุนของวัสดุใช้วิธีการกลสมบัตินี้ของวัสดุ ทำการเพิ่มความแกร่งของเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) ที่คานเหล็กรีดเย็นหรือขึ้นวัสดุตัวอย่างที่ต้องการ ทำให้เหล็กขึ้นรูปเย็นเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบคานธรรมดาที่ไม่ได้ทำการป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) ที่คานเหล็กรีดเย็น ในอนาคตโครงสร้างที่ใช้จากเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นจะถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างในประเทศไทยอย่างกว้างขวางมากขึ้น แต่การออกแบบโครงสร้างที่ใช้เหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของผู้ออกแบบทั่วไป ประกอบกับการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเหล็กชนิดนี้มีขั้นตอนการทำที่ยุ่งยากเมื่อต้องคำนวณด้วยมือ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อใช้โปรแกรม คอมพิวเตอร์ ที่เกี่ยวกับวิธีวิเคราะห์แบบ Finite Element ในการสร้าง Model จำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่ได้กับตัวอย่างจริง เปรียบเทียบความสอดคล้องกันระหว่างแบบจำลอง โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษารูปแบบการกระจายความเข้มหน่วยแรงในหน้าตัดคานเหล็กกรีดยึดแบบต่างๆของการขึ้นลอนบริเวณมีการถ่ายแรงกดกระทำแบบจุด โดยการใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Finite Element ทำแบบจำลอง (Model) และเปรียบเทียบกับทดสอบจากตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ

1.2.2 ศึกษาผลกระทบหน้าตัดของคานเหล็กกรีดยึดที่มีการขึ้นรูปแบบหน้าตัด Hat Shape ที่มีในห้องตลาด เช่น หน้าตัด Top Span และ Top Hats เมื่อรับแรงกดเทียบกับการดูผลการทดสอบจากตัวอย่างจริงมีสภาวะวิบัติของโครงสร้างที่จุดไหนของชิ้นส่วน มีค่าหน่วยแรงคราก (Yield Stress) ที่จุดไหนของชิ้นส่วน แล้ว Load ที่รับได้ใกล้เคียงกับผลที่ทำการจำลองจากวิธีวิเคราะห์แบบ Finite Element

1.2.3 ศึกษาการสร้างแบบจำลองรูปทรงการขึ้นลอนของคานหน้าตัดแบบมีการทำ Embossments จากแบบจำลองที่วิธีวิเคราะห์แบบ Finite Element เทียบกับตัวอย่างจริง การทำ Embossments มีผลอย่างไรกับการขึ้นรูปเหล็กกรีดยึดและการรับน้ำหนักบรรทุก รูปแบบการขึ้นรูปของ Embossments ระยะความห่างของ Embossments มีผลอย่างไรกับการขึ้นรูปเหล็กกรีดยึด

1.2.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ จากแบบจำลองที่วิธีวิเคราะห์แบบ Finite Element และการทดสอบจากตัวอย่างจริง นำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้สร้างสมการในการออกแบบหรือตรวจสอบความแข็งแรงของการขึ้นรูปเหล็กกรีดยึด

1.2.5 เพื่อหาค่า Stress และ Displacement ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Finite Element

1.2.6 ได้ศึกษาในกระบวนการคำนวณโดยวิธี Finite Element และการประยุกต์เข้ากับปัญหาทางวิศวกรรมโยธาในด้านต่างๆ ซึ่งจะมีผลทำให้ผู้ทำวิจัยสามารถใช้โปรแกรม Finite Element สำเร็จรูปได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ โดยมีความเข้าใจและมั่นใจผลลัพธ์ที่คำนวณได้ อันจะเป็นการเพิ่มศักยภาพในการทำงานให้กับผู้ทำวิจัย

1.2.7 ศึกษาวิจัยการออกแบบโครงสร้างผนังบาง (Thin – walled Structures) ของเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) อุปกรณ์สำหรับการคำนวณได้แก่โปรแกรม CUFSM

1.2.8 ศึกษาวิจัยการเสียรูปของโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น ตรวจสอบคำนวณหาค่าแรงโก่งเดาะยืดหยุ่น (Elastic Buckling Load) เฉพาะที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงการโก่งเดาะรูปแบบของการผิดรูป และการโก่งเดาะรวม

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 การทดสอบแรงดัดเพื่อหาค่าความต้านทานต่อแรงดัดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นและหาค่าความแข็งแรงในรูปโมดูลัสของสมการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เมื่อน้ำหนักกระทำในรูปของน้ำหนักกระทำวาง ค่าโมดูลัสของสมการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ที่ได้จากการทดสอบสามารถ

นำไปคำนวณหาระยะแอ่นตัว (Deflection) ในช่วงยืดหยุ่นของคานที่ทำจากวัสดุเดียวกัน ถึงแม้จะมีขนาดรูปร่างหรือน้ำหนักบรรทุกที่ต่างไปได้ แต่ก็อาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

1.3.2 ความแกร่ง (Stiffness) ของการขึ้นรูปลอนเหล็กรีดเย็นมีผลต่อการกระจายแรงและการรับน้ำหนักบรรทุกของเหล็กรีดเย็น

1.3.3 ระนาบที่มีค่าความเค้นดึงเท่ากับค่าความเค้นอัด จะมีแรงกระทำเป็นศูนย์เรียกว่า แกนสะเทิน (Neutral Axis) สมมติฐานการทดสอบมี 2 ข้อคือ

ก. ไม่มีการบิดของคานที่แกนสะเทิน (Neutral Axis)

ข. การเคลื่อนที่ของชั้นทดสอบจะขนานกับแนวแรง

1.3.4 การขึ้นรูปหน้าตัดเหล็กเป็นคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหน้าตัดเหล็กโครงสร้างนั้นจะได้รับผลกระทบโดยการขึ้นรูปเย็นซึ่งเกิดขึ้นส่วนมากในพื้นที่รับแรงคด สำหรับหน้าตัดที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นจากเหล็กแผ่น โดยมากแล้วจะถูกจำกัดสิ้นสุดไว้กับการคดที่ขอบของปีก ที่คดไว้เพื่อทำให้หน้าตัดแข็งขึ้นหรือมีการขึ้นขอบเพื่อเสริมความแข็งของหน้าตัด

1.3.5 วิธีการหาค่าการบิดงอในช่วงอีลาสติก (Elastic Buckling Solution Methods) ปกติขึ้นส่วนย่อยของ โครงสร้างของเหล็กขึ้นรูปเย็นจะบางมาก และไม่ทนต่อแรงความเค้นของการบิดงอในช่วงอีลาสติก (Elastic Buckling Stresses) การบิดงอก็จะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมนี้ด้วยเป็นปกติ

1.3.6 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) เกิดขึ้นเมื่อชิ้นส่วนได้รับแรงตามแนวแกนมันจะเปลี่ยนแปลงขนาดไม่เพียงแต่ตามแนวแกนเท่านั้นแต่ขนาดข้างหรือทิศทางตั้งฉากกับแรงที่กระทำจะเปลี่ยนไปด้วย พฤติกรรมของวัสดุนี้แสดงให้เห็น เมื่อมีแรงดึงชิ้นส่วนจะยืดตัวตามแนวแรง แต่จะหดตัวตามด้านข้าง แต่เมื่อมีแรงอัดชิ้นส่วนจะหดตัวตามแนวแรง แต่จะขยายตัวออกตามด้านข้าง อัตราส่วนระหว่างความเครียดด้านข้าง (Lateral Strain) กับความเครียดในแนวแรง (Longitudinal Strain) เรียกว่าอัตราส่วนปัวซอง ใช้สำหรับกำหนดสมบัติของวัสดุ

1.3.7 การป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) มีผลต่อการรับกำลังคดของคานเหล็กรีดเย็นทำให้รับแรงคดได้มากขึ้นกว่าคานที่ไม่มี Embossments

1.3.8 การวิบัติที่เกิดขึ้นของ โครงสร้างรับแรงคดของเหล็กขึ้นรูปทรงหมวก (Hat Shape) ในมาตรฐานของ AISI ให้พิจารณาดังต่อไปนี้

ก. ความสามารถในการรับแรงของหน้าตัด (Nominal Section Strength [Resistance]) ซึ่งจะเป็นค่าที่บอก Section ของหน้าตัดชนิดนั้นๆ (Hat Shape) จะสามารถรับแรงคดได้สูงสุดเท่าไร ซึ่งจะเกิดจากความสัมพันธ์ของค่า Elastic Section of Effective Section ณ ค่า F_y กับค่า F_y ดังสมการ $M_n = S_e F_y$

ข. ความสามารถในการต้านทานแรงบิดและโก่งตัวไปด้านข้าง (Lateral-torsional Buckling Strength [Resistance]) บางครั้งการวิบัติของโครงสร้างเหล็กยังไม่ถึงค่า F_y ก็จะเกิดการพังขึ้นได้ก่อน ในลักษณะของการบิดและโก่งตัวไปด้านข้างเนื่องจากการค้ำยันปีกรับแรงอัดไม่เพียงพอ

ค. ความสามารถในการต้านทานต่อแรงบิดเบี้ยว (Distorsional Buckling Strength [Resistancel]) การพังชนิดบิดเบี้ยวนี้จะเกิดกับโครงสร้างเปิดเท่านั้น และจะเกิดบริเวณปีก (Flange) รับแรงอัด

1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1.4.1 เหล็กขึ้นรูปเย็นซึ่งเกิดจากการตัดหรือพับจากเหล็กแผ่นเรียบ ให้ได้รูปทรงที่สามารถรับแรงได้ตามที่ต้องการ เหล็กขึ้นรูปเย็นจึงมีรูปทรงหลายรูปทรงด้วยกัน เนื่องจากมีหน้าตัดให้เลือกหลายหน้าตัดในการศึกษาวิจัยนี้เลือกใช้รูปทรงหมวก (Hat Shape)

1.4.2 ในการสร้างแบบจำลอง (Model) จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และแรงที่กระทำเป็น Load ที่กระทำกับแบบจำลอง (Model) มีหลายแบบจึงเลือกใช้แรงกระทำแบบจุด ในที่นี้สร้างแบบจำลองเป็นคาน 2 รูปแบบดังนี้

ก. รูปแบบที่หนึ่งสร้างแบบจำลองเป็นคานที่มีแรงกระทำที่กึ่งกลางคานจุดเดียว (Center Loading Tests)

ข. รูปแบบที่สองสร้างแบบจำลองเป็นคานที่มีแรงกระทำบนคาน 2 จุดที่สมมาตรกัน (Symmetrical Two-point Loading Tests)

1.4.3 การปมขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) มีหลายรูปแบบ ที่ทำการศึกษาวิจัยนี้เลือกทำการศึกษาเพียง 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่หนึ่งการปมขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน รูปแบบที่สองการปมขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง รูปแบบที่สามการปมขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียง เพื่อศึกษารูปแบบการขึ้นรูปของ Embossments ระยะเวลาห่างของ Embossments มีผลอย่างไรกับการขึ้นรูปคานเหล็กรีดเย็น การรับน้ำหนักของคานเหล็กรีดเย็น และการออกแบบคานเหล็กกล้ากำลังสูง

1.4.4 ในการวิเคราะห์หน่วยแรง (Stress Analysis) มีหลายวิธี แต่สำหรับโครงสร้างที่ซับซ้อน มีการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัด มีการเปลี่ยนแปลงแรง และต้องการทราบค่าความเข้มของหน่วยแรงเฉพาะในส่วนที่สำคัญของโครงสร้าง จะนิยมใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Finite Element ซึ่งมีหลายโปรแกรม เช่น ANSYS, ABAQUS เป็นต้น ในที่นี้เราจะใช้โปรแกรม ABAQUS มาใช้เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ เพราะเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้าน Finite Element Analysis (FEA) สามารถวิเคราะห์ปัญหาตั้งแต่ Liner, Static, Dynamic และ Non-linear อย่างง่าย จนถึงปัญหาที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี

1.4.5 ทำการตรวจสอบการเสียรูปของโครงสร้างโดยใช้อุปกรณ์สำหรับการคำนวณได้แก่โปรแกรม CUFSM ตรวจสอบโก่งเดาะยืดหยุ่น (Elastic Buckling Load) เฉพาะที่เสียก่อน ตรวจสอบการโก่งเดาะรูปแบบของการผิดรูป และตรวจสอบการโก่งเดาะรวม

1.4.6 ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัว (Load-deflection Curve) ของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นธรรมดาเปรียบเทียบกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีการทำ Embossments

1.4.7 ศึกษารูปแบบการกระจายหน่วยแรงในคานเหล็กรีดเย็น จากบริเวณพื้นที่ถ่ายแรงกดกระจายลงไปสู่จุดรองรับคาน (Support Point of Beam)

1.4.8 เหล็กรีดเย็นกำลังสูงที่ใช้มีค่ากำลังคลาก (Yield Strength) สูงไม่เกินมีค่า 5,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (550 MPa)

1.5 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1.5.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลจากบทความ วารสาร และตำรา ที่สามารถศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการดัดของคานเหล็กรีดเย็น

1.5.2 เตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบที่มีอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน ตัวอย่างที่ใช้เป็นเหล็กขึ้นรูปเย็นที่เกิดจากการดัดหรือพับจากเหล็กแผ่นเรียบหน้าตัดรูปทรงหมวก (Hat Shape) มีทั้งหน้าตัดที่มีการป้อนขึ้นลอน (Embossments) ด้านข้างขึ้นตัวอย่างและไม่มีการป้อนขึ้นลอน (Embossments) ด้านข้างขึ้นตัวอย่าง เป็นเหล็กกล้ากำลังสูงมีค่า Yield Strength 550 MPa

1.5.3 การสร้างแม่พิมพ์เหล็กโดยใช้เครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์ CNC Router Machine ลักษณะของแม่พิมพ์ที่สร้างมี 2 แบบ ด้วยกันคือ

ก. แบบที่หนึ่ง เป็นตัวแทนป้อนเรียกว่า Punch

ข. แบบที่สอง เป็นตัวแม่พิมพ์เรียกว่า Die

ทำแม่พิมพ์เสร็จแล้วทำการชุบแข็ง โดยนำแม่พิมพ์ที่แกะสลักด้วยเครื่อง CNC Router Machine เสร็จเรียบร้อยแล้วนำไปเผาไฟจนวัสดุมีสีแดงส้มหรือสีแดงชมพูแล้วนำไปจุ่มลงในน้ำ หรือน้ำผสมเกลือ หรือน้ำมันเครื่องเก่า เพื่อไล่คาร์บอนในตัววัสดุออกและทำให้เหล็กแข็งขึ้น

หลังจากทำแม่พิมพ์เสร็จแล้วนำมาป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) ที่คานเหล็กรีดเย็น มี 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่หนึ่งการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน รูปแบบที่สองการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง รูปแบบที่สามการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง

1.5.4 ทำการเตรียมเครื่องมือทดสอบ Set อุปกรณ์ เครื่องมือชุดทดสอบและปรับแต่งเครื่องมือ

1.5.5 ทำการทดสอบหาคณะสมบัติของวัสดุในงานวิศวกรรม (Property of Materials) โดยการทำทดสอบแรงดึงของเหล็กโครงสร้าง (Tension Test of Structural Steel) อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 2201 Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials นำค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ได้มาใช้ป้อนในการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรมทางด้าน Finite Element และ Finite Strip ได้แก่ ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) E ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ν เป็นต้น

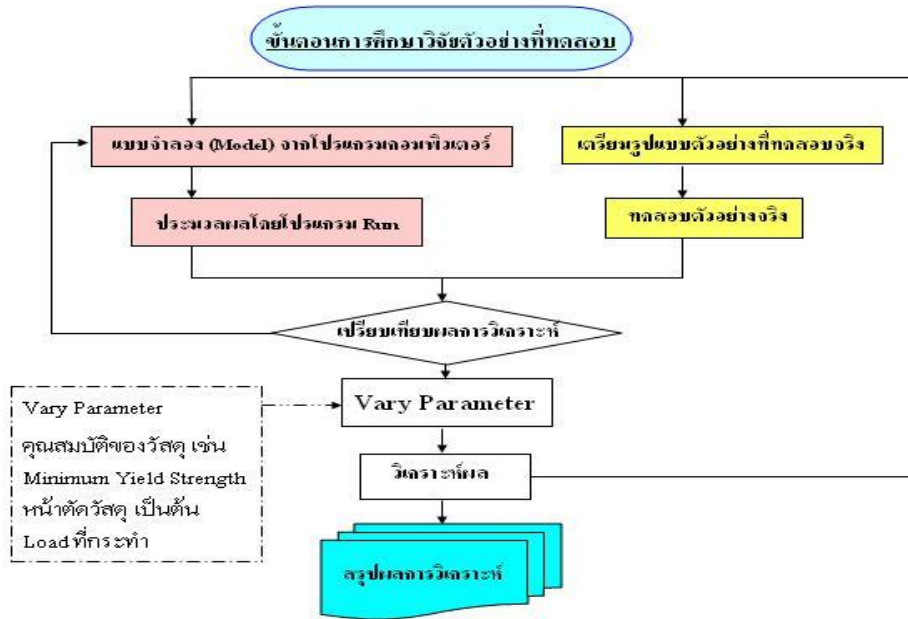
1.5.6 ทำการทดสอบกำลังดัดของเหล็ก (Flexural Test of Steel) ในลักษณะการติดตั้งบนจุดรองรับ (Support) เอียง 30 องศา อ้างอิงมาตรฐาน ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products นำผลการทดสอบของค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัว (Load-Deflection Curve) มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมทางด้าน Finite Element เพื่อดูความสอดคล้องกันระหว่างแบบจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ โดยจำลอง Load Case กระทำที่คาน 3 รูปแบบ

1.5.7 ทำการสร้างแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปเย็นในลักษณะการติดตั้งบนจุดรองรับ (Support) เอียง 30 องศา เสมือนการทดสอบจริงโดยใช้โปรแกรม ทางด้าน Finite Element ศึกษาพฤติกรรมของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นที่เสียรูปเนื่องจากมี Load Case กระทำที่คาน 3 รูปแบบ นำผลการทดสอบของค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัว (Load-deflection Curve) มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

1.5.8 นำผลการทดสอบที่ได้จากข้อ 1.5.6 และ 1.5.7 มาเปรียบเทียบผลระหว่างน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและค่าการแอ่นตัวของตัวอย่างที่ทดสอบที่มีการทำปมขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) 3 รูปแบบ คือ รูปแบบการปมขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน รูปแบบการปมขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง รูปแบบการปมขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง และตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการมีการทำปมขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) กับแบบจำลองโมเดล (Model) เสมือนตัวอย่างจริงที่มีการทำปมขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) 3 รูปแบบและไม่มีการมีการทำปมขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) สร้างตาราง Vary Parameter ของค่าที่สอดคล้องกันและเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกัน (Percent Difference)หรือกลสมบัติของตัวอย่างที่ได้กับแบบจำลองโมเดล (Model)จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างกัน

1.5.9 ศึกษาการเสียรูปของตัวอย่างจริงในลักษณะเสมือนการใช้งานกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีการทำโมเดลในลักษณะการจำลองแบบการวิเคราะห์เหมือนกัน โดยทำจุดรองรับ (Support) คานหน้าตัดรูปหมวก ในลักษณะการติดตั้งเอียง 30 องศา เสมือนการติดตั้งบนโครงหลังคาจริง เพื่อดูพฤติกรรมของการเสียรูปคานเหล็กขึ้นรูปแบบธรรมดาและรูปแบบของการปมขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) ของคานหน้าตัดรูปหมวก เมื่อรับน้ำหนักกดกระทำกับตัวอย่าง

1.5.10 แผนผัง (Flow Chart) แสดงขั้นตอนการศึกษาวิจัยทดสอบวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัยตัวอย่างที่ทดสอบ

1.5.11 ตรวจสอบการเสีรูปร่างของตัวอย่างจริงกับโปรแกรมทางด้าน Finite Element และโปรแกรม CUFSM เพื่อตรวจสอบการเสีรูปร่างในสภาวะการใช้งานจำกัด (Key Limit State) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะแบบรวม การโก่งเดาะแบบผิวดรูป และการโก่งเดาะเฉพาะที่

1.5.12 ทำการทดสอบกำลังคัดของคานเหล็กกรีดเย็นที่มีแรงกระทำบนคาน 2 จุดที่สมมาตรกัน (Symmetrical Two – Point Loading Tests) ในลักษณะการติดตั้งบนจุดรองรับ (Support) เอียง 0° โดยให้เหมือนในโปรแกรม CUFSM แรงกระทำของ Load ที่กระทำบนคานจะกระจายเป็นจุด 2 จุด แบ่งคานเป็น 3 ช่วงระยะเท่าๆกัน จากจุดรองรับถึงจุดรองรับที่ช่วงระยะละ $L/3$ เพื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม CUFSM ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ และตรวจสอบการเสีรูปร่างในสภาวะการใช้งานจำกัด (Key Limit State) ทั้งสามแบบ

1.5.13 สร้างแบบจำลองคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Hat Shape โดยโปรแกรม CUFSM ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ และตรวจสอบการเสีรูปร่างในสภาวะการใช้งานจำกัด (Key Limit State) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะแบบรวม การโก่งเดาะแบบผิวดรูป และการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยใช้โปรแกรม CUFSM กำหนดค่ากำลังรับแรงแบบ “โดยตรง” เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ

1.5.14 วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดสอบ

1.6 ข้อจำกัดของการศึกษาวิจัย

1.6.1 การสร้างแบบจำลองเมื่อใส่แรงกดหรือน้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปที่ติดตั้งบนชิ้นส่วนขององค์อาคารที่ติดตั้งแล้ว งานวิจัยนี้ไม่สามารถทำการใส่น้ำหนักบรรทุกจริงบนโครงสร้างอาคารที่มีขนาดพื้นที่กว้างมากๆได้ เนื่องจากโครงสร้างจริงมีขนาดใหญ่และด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือในการทดลอง การจำลองเครื่องมือและอุปกรณ์ให้เสมือนจริง เช่น โครงสร้างถัก (Truss Frame) และ โครงสร้างผนัง (Wall Frame) เป็นต้น

1.6.2 การสร้างแบบจำลองเท่าขนาดวัสดุตัวอย่างที่ใหญ่มากๆนั้น เนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านงบประมาณทุนวิจัยและเครื่องมือในการทดสอบ จึงไม่สามารถทำตัวอย่างการทดสอบให้มีขนาดเท่ากับโครงสร้างจริงได้ จึงต้องจำกัดขนาดของตัวอย่างให้มีขนาดเฉพาะที่เกิดหน่วยแรงเนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกของการกดแรงและสมมุติฐานการจำลองจากตัวอย่างเท่านั้น ซึ่งขนาดของชิ้นส่วนตัวอย่างทดสอบนี้ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมทางด้าน Finite Element และตามรายละเอียดจากผู้ผลิตสินค้าต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนขนาดของตัวอย่างหลังคา เป็นต้น

1.6.3 ขาดการสนับสนุนทุนการวิจัยและงบประมาณของผู้วิจัยที่มีจำกัด เครื่องมือวัดในการทดสอบที่มีราคาแพงเนื่องมาจากเป็นเครื่องมือเฉพาะทาง เช่น เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว Linear Position Transducer หรือ Linear Displacement Sensor เป็นต้น

1.6.4 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Maths Model) ตัวอย่างโครงสร้างทดสอบที่มีความซับซ้อนมากๆและขนาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใหญ่ มีเงื่อนไขขอบเขต Boundary Condition ที่ใหญ่ มี Node มี Element มี Meshing ที่มากและการทำ Meshing สามเหลี่ยมทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากร (Resource) ที่ใช้ในการคำนวณของคอมพิวเตอร์มาก

1.6.5 ประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบจากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ให้ได้ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) เนื่องจากการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Element Method หรือ FEM มีสมการในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน และการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม (Post) จำเป็นต้องใช้กราฟฟิกส์ (Color Graphics) เพื่อการแสดงผลตัวเลขจำนวนมากเหล่านี้ถูกแปลงแล้วพล็อตขึ้นเป็นแถบสีบนชิ้นส่วนที่พิจารณา จึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพที่สูงเพื่อลดเวลาในการวิเคราะห์ของการหาผลลัพธ์และแสดงผลลัพธ์

1.6.6 ระยะเวลาในการทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยที่มีอยู่จำกัดเนื่องผู้ทำวิจัยติดภารกิจการทำงานที่ต้องรับผิดชอบ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทำให้ทราบถึงรูปแบบการขึ้นลอนที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงดัดของคานเหล็กกริดเย็น

1.7.2 ทำให้ทราบถึงรูปแบบการกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานเหล็กกริดรูปพรรณขึ้นรูปเขียนแบบต่างๆของรูปแบบการขึ้นลอน

1.7.3 ทำให้ทราบถึงรูปแบบของ Embossments ระยะความห่างของ Embossments มีผลอย่างไรกับการขึ้นรูปเหล็กรีดเย็น

1.7.4 เพื่อให้ทราบถึงพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพ (Effective Area) ที่ใช้สำหรับออกแบบเพื่อรับกำลังแรงดัดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็น

1.7.5 ทำให้ทราบระยะการแอ่นตัวหรือโก่งตัวเกินจากค่าที่ยอมให้ก่อนที่จะทำการออกแบบหรือไม่ ตามมาตรฐาน AISC (ASD/LRFD/LSD) กำหนดระยะโก่งตัวมากที่ยอมให้ภายใต้การบรรทุกของน้ำหนักคงที่ใช้งานและน้ำหนักจร ดังนี้

ก. L/360 สำหรับงานก่อสร้างต่างๆที่ฉาบผิว

ข. L/240 สำหรับงานพื้นที่ไม่ฉาบผิว

ค. L/180 สำหรับงานหลังคาที่ไม่ฉาบผิว

ในที่นี้ L เป็นช่วงความยาวคาน

1.7.6 ทำให้ทราบค่า Stress และ Displacement ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานตัวอย่างล่วงหน้า เกินจากที่ค่ายอมให้หรือค่าที่ออกแบบ เพื่อเป็นข้อมูลตรวจสอบการออกแบบ

1.7.7 เพื่อใช้เป็นขบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์สมัยใหม่จะทำให้สามารถลดเวลา และค่าใช้จ่ายในการพัฒนาสินค้าใหม่ออกสู่ตลาดได้มาก เป็นการประยุกต์เอาคอมพิวเตอร์ เข้ามาช่วยในการออกแบบและจำลองการทดสอบ (Simulation) เพื่อทำนายผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจากการจำลอง เช่น กระบวนการผลิตและประกอบชิ้นส่วน การขึ้นรูปจากโลหะแผ่น และมักจะพบปัญหารอยครูดที่ผิวชิ้นส่วน รอยแตก และการยับย่น ที่เกิดขึ้นในขบวนการผลิตและประกอบชิ้นส่วน เป็นต้น ซึ่งเราสามารถจำลองและวิเคราะห์ เพื่อทำนายผลการทดสอบที่เกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องทดสอบกับตัวอย่างจริง

1.7.8 เพื่อเป็นข้อเสนอใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อการออกแบบ และเป็นมาตรฐานในประเทศไทยต่อไป เช่น การออกแบบที่ต้องอาศัยการขึ้นรูปลอนของคานเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นเพื่อเสริมความแข็งแรง (Stiffness) ในการรับกำลังรับแรงดัด เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำนำ

ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น ได้ถูกนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพในการใช้งานหลายๆ ประเภท ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กแบบรีดร้อนนั้นไม่มีความเหมาะสมในแง่ของเศรษฐกิจ แต่อย่างไรก็ตามหน้าตัดที่ทำจากเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้น โดยมากแล้วจะมีความบางมากกว่าหน้าตัดที่ทำจากเหล็กรีดร้อนและมีรูปแบบของการแตกหักและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่โดยทั่วไปแล้ว เราจะไม่ค่อยพบในการออกแบบเหล็กโครงสร้างแบบทั่วไป ดังนั้นแล้ว ข้อกำหนดรายละเอียดสำหรับการออกแบบจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งจะช่วยให้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบ โครงสร้างซึ่งมีผนังบาง นอกจากนั้นแล้ว ตามปกติ กระบวนการขึ้นรูปเย็นนั้นจะก่อให้เกิดความไม่สมบูรณ์ในเชิงโครงสร้าง และหน่วยแรงค้ำ ซึ่งมีความแตกต่างไปจากชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากเหล็กรีดร้อน หรือ ชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากการเชื่อมเหล็กประกอบกัน ดังนั้น ข้อกำหนดรายละเอียดการออกแบบนั้นจึง จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับ ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือเพื่อที่จะ อธิบายถึง “โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น” ของ AS/NZS 4600 ฉบับปี 1996 และเพื่อที่จะให้การสาธิตการ นำไปใช้จริงเพื่อการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น

2.2 มาตรฐานและข้อกำหนดรายละเอียดการออกแบบสำหรับเหล็กขึ้นรูปเย็น

2.2.1 ความเป็นมาของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น

บทความนี้อาจมีความเกี่ยวข้องกับการออกแบบ ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น ได้ ถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรก จากการเตรียมเนื้อหาของ ข้อกำหนดรายละเอียดของสถาบันเหล็ก และเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา ในปี 1946 [1] โดยการใช้ผลงานวิจัยของชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้น รูปเย็น ของศาสตราจารย์ จอร์จ วินเทอร์ แห่งมหาวิทยาลัยคอร์เนล มาตรฐานโครงสร้างเหล็กแห่ง อังกฤษ ได้รับการปรับปรุงในปี 1961 เพื่อที่จะรวบรวมการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูป เย็น โดยการรวมเอาภาคผนวก No.1 [2] เข้าไว้ โดยอาศัยผลจากงานศึกษาของศาสตราจารย์ เอ.เอ็ช ซิล เวอร์ ส่วนในออสเตรเลียนั้น มาตรฐานออสเตรเลียสำหรับการออกแบบ ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้น รูปเย็น (AS 1538) [3] ได้รับการตีพิมพ์ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1974 ซึ่งส่วนมากแล้วจะเป็นไปตาม เอกสาร ข้อกำหนดรายละเอียดของอเมริกัน ฉบับแก้ไขปี 1968 [4] แต่ด้วยการปรับปรุงในส่วนของ เส้นโค้งช่วยการออกแบบสำหรับ โครงสร้างคานและเสา เพื่อคงให้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับ หลักเกณฑ์สำหรับโครงสร้างเหล็กแห่งออสเตรเลีย, ASCA1 [5] บทสรุปของหลักพื้นฐานของ

มาตรฐานออสเตรเลียฉบับแรก สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นนี้ได้แสดงไว้ใน [6] ในปี 1988 ได้มีการปรับปรุงครั้งสำคัญของ AS1538 ฉบับปี 1974 โดยการใช้ออกข้อกำหนดรายละเอียดของ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา ฉบับปี 1986 [7,8] ส่วนมาตรฐานออสเตรเลีย AS 1538 [9] นั้นจะเป็นไปในรูปแบบของหน่วยแรงที่ยอมให้ และในข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI นั้นก็จะ เป็นไปในรูปแบบของหน่วยแรงที่ยอมให้เช่นเดียวกัน (เรียกว่า ASD) มาตรฐานออสเตรเลีย AS 1538 นั้นจะใช้รูปแบบของการรวมน้ำหนักกระทำ (Load Combinations) ที่เหมือนกับมาตรฐาน โครงสร้าง เหล็ก AS 1250 [10]

ในปี 1991 สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา ได้จัดทำข้อกำหนดสำหรับการ ออกแบบในสภาวะขีดสุด (Limit State) ขึ้นมาจากข้อกำหนดรายละเอียด ปี 1986 ที่มีอยู่ ซึ่งเรียกว่า ข้อกำหนดรายละเอียดสำหรับการออกแบบด้วยการใช้ตัวประกอบกำลังต้านทานและตัวประกอบแรง กระทำ (ต่อไปนี้จะเรียกว่า LRF, Load Resistance Factor Design) [11] ปรัชญาการออกแบบใน สภาวะขีดสุดในข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI นั้นมีพื้นฐานมาจากการใช้ตัวประกอบสำหรับน้ำหนัก กระทำภายนอก และตัวประกอบสำหรับกำลังต้านทาน (กำลังรับน้ำหนัก) โดยนัยที่ว่าน้ำหนักกระทำ ภายนอกที่ได้เพิ่มค่าจากตัวประกอบนั้น จะต้องไม่มากกว่ากำลังรับแรงหรือกำลังรับน้ำหนักที่ได้ ลดค่าโดยตัวประกอบดังกล่าวเช่นกัน ข้อกำหนดรายละเอียด LRF ปี 1991 นั้นจะดำเนินควบคู่ไป กับข้อกำหนดรายละเอียด ASD ล่าสุด ในปัจจุบันนี้ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา ได้ผสมผสานข้อกำหนดรายละเอียดทั้งของ LRF และ ASD เข้าเป็นเอกสารฉบับเดียว ดังได้บรรยาย ไว้โดย Brockenborough [12] ความเป็นมาอันสมบูรณ์แบบของข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI นั้น ได้แสดงไว้โดย Yu [13] ในออสเตรเลียนั้น มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างทั้งหมดกำลังถูก เปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบของการออกแบบในสภาวะขีดสุด ในปี 1990 มาตรฐานออสเตรเลียนั้นได้ ตีพิมพ์ มาตรฐานการออกแบบในสภาวะขีดสุดสำหรับโครงสร้างเหล็ก AS 4100 [14] ซึ่งมีพื้นฐานมา จากการใช้วิธีของตัวประกอบสำหรับน้ำหนักกระทำและกำลังต้านทาน เหมือนกันกับวิธี LRF ที่ใช้ ในสหรัฐอเมริกา ส่วนในปี 1992 มาตรฐานนิวซีแลนด์ได้ให้กำเนิด มาตรฐานการออกแบบในสภาวะขีด สุด สำหรับโครงสร้างเหล็ก NZS 3404 [15] ซึ่งมีพื้นฐานหลักมาจากมาตรฐานออสเตรเลีย AS 4100 แต่จะมีส่วนเพิ่มเติมหรือข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับการออกแบบด้านแผ่นดินไหวด้วย ในปี 1993 มาตรฐานออสเตรเลีย และมาตรฐานนิวซีแลนด์ ได้เริ่มงานในส่วนของมาตรฐานการออกแบบใน สภาวะขีดสุดสำหรับ ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นเพื่อให้สามารถใช้ร่วมกันได้สำหรับทั้งสอง ประเทศนี้ มาตรฐานร่วมนี้ได้รับการเตรียมโดยคณะกรรมการ BD/82 แห่งมาตรฐานออสเตรเลีย/ มาตรฐานนิวซีแลนด์ ซึ่งเป็นตัวแทนที่มาจากทั้งสอง ประเทศ มาตรฐานใหม่ AS/NZS 4600 นี้มี พื้นฐานหลักมาจากข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI ล่าสุด [16] ดังได้อธิบายไว้โดยละเอียดใน บทความผลงานวิจัยต่อไปของผลงานวิจัยนี้

2.2.2 นโยบายของคณะกรรมการมาตรฐานร่วมออสเตรเลีย / นิวซีแลนด์

ปรัชญาการพัฒนามาตรฐานใหม่นี้ ได้รับการตกลงในการประชุมครั้งแรกของคณะกรรมการ BD/82 เมื่อเดือนธันวาคมปี 1993 ซึ่งคณะกรรมการ ได้มีมติและให้ความตกลงดังต่อไปนี้

ก. รูปแบบทั่วไปและเนื้อหาทางด้านเทคนิคของข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI นั้น จะต้องได้รับการยอมรับ ถ้า “กรณีที่เป็นที่เชื่อถือได้” นั้นไม่สามารถสร้างความเปลี่ยนแปลงที่รับประกันได้

ข. ขอบเขตของเทคโนโลยีซึ่งได้ครอบคลุมแล้วโดยหลักเกณฑ์การปฏิบัติในปัจจุบันของออสเตรเลียหรือนิวซีแลนด์ แต่ไม่ได้ครอบคลุมโดยข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI นั้นควรจะได้รับการดำเนินการต่อไป

ค. เครื่องหมาย สัญลักษณ์ ในมาตรฐานฉบับร่างนั้นควรจะต้องเป็นไปตาม ISO3898 และเป็นไปอย่างปฏิบัติได้อย่างแท้จริงมากที่สุดตามมาตรฐานปัจจุบันของออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ สำหรับการออกแบบโครงสร้างเหล็ก

ง. การแก้ไขที่ได้นำเสนอมาเมื่อเร็ว ๆ นี้ ต่อข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI ปัจจุบันนั้น ควรจะต้องได้รับการรวมเข้าไว้ด้วยกันในส่วนของการร่างมาตรฐานรวม

โดยทั่วไปแล้วเนื้อหาต่างๆจะเป็นไปเช่นเดียวกันกับรูปแบบของข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI ยกเว้นในบท A, B, C, D, E และ F ในข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI ได้ถูกเรียงชื่อใหม่เป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ใน AS/NZ 4600 การเรียบเรียงใหม่แต่เพียงเล็กน้อยของเลขเ้าที่ต่าง ๆ นั้นได้ดำเนินการไปเพื่อให้เหมาะสมกับนโยบายการแก้ไขของ มาตรฐานออสเตรเลีย และมาตรฐานนิวซีแลนด์ สัญลักษณ์ต่าง ๆ นั้นจะเป็นไปตาม ISO ซึ่งเข้ากันหรือเทียบเคียงกันกับ AS 4100 และ NZS 3404 มากที่สุด

ดังได้แสดงไว้ในหัวข้อ ก และ ข ด้านบน ส่วนที่แตกต่างไปจากข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI นั้น ได้ยอมให้มีขึ้น ในที่ซึ่งกรณีที่เชื่อถือได้นั้นสามารถระบุได้ หรือ ในอีกทางเลือก ที่ซึ่งมีขอบเขตที่ได้รับการครอบคลุมไว้แล้วโดยหลักเกณฑ์การปฏิบัติของออสเตรเลียหรือนิวซีแลนด์ ซึ่งไม่ได้รับการครอบคลุมไว้โดยข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI ขอบเขตต่างๆดังต่อไปนี้ได้รับการเพิ่มเติมเข้ามากับมาตรฐานร่วมระหว่างออสเตรเลีย / นิวซีแลนด์ แต่มีได้มีอยู่ใน ข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI

1. เหล็กกำลังสูงลดรูปแบบเย็น ผ่านการกลวไนซ์ มีกำลังตามเกรด G450, G500, G550 (มีความหนาไม่ต่ำกว่า 0.9 มม.) ถึง มาตรฐานออสเตรเลีย AS 1397 ได้ถูกรวมไว้ในรายการของข้อกำหนดรายละเอียดวัสดุในส่วนหัวข้อ 1.5.1.1

2. ดัชนีคาน้ำหนักและข้อไฟฟ้าต่างๆ นั้นได้ระบุไว้ในหัวข้อ 1.5.3 ในมาตรฐานออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ และไม่ใช้ของมาตรฐาน ASTM หรือ AWS

3. ข้อกำหนดด้านแผ่นดินไหวที่เป็นพิเศษในออสเตรเลียและนิวซีแลนด์นั้น ได้ถูกให้ไว้ในหัวข้อ 1.6.3

4. บทที่เกี่ยวข้องกับเรื่องความทนทานซึ่งรวมไปถึงเอกสารอ้างอิงกับมาตรฐานออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ที่เกี่ยวข้อง ได้ให้ไว้ในหัวข้อ 1.6.4

5. กฎเกณฑ์การออกแบบสำหรับชิ้นส่วนโค้งรับแรงอัด ซึ่งเคยได้นำมารวมไว้แล้วใน AS 1538 ได้ถูกรวมเข้าไว้กับหัวข้อ 2.6

6. การโค้งและแบบผิวดรูปนั้นถูกรวมไว้สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงดัด ในหัวข้อ 3.3.3.3 และชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดในแนวศูนย์กลางของชิ้นส่วน ในหัวข้อ 3.4.6

7. วิธีการออกแบบโดยใช้ตัวประกอบค่า R ในข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI สำหรับคานซึ่งมีปีกหนึ่งนั้นยึดติดกับแผ่นพื้นหรือแผ่นแบนใดๆนั้น ได้ถูกรวมไว้ในหัวข้อ 3.3.3.4 แต่ด้วยค่าตัวประกอบค่า R ที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับข้อมูลผลการทดสอบของออสเตรเลีย มากกว่าข้อมูลผลการทดสอบของอเมริกา

8. ข้อกำหนดสำหรับการค้ำยันทางด้านข้างสำหรับหน้าตัดรูปรางน้ำ และหน้าตัดรูปตัว Z ที่มีปีกหนึ่งเชื่อมต่อกับแผ่นแบนๆ และได้รับแรงลมดันขึ้น โดยขึ้นอยู่กับข้อมูลผลการทดสอบของออสเตรเลียและได้ถูกรวมมาไว้ดังในหัวข้อ 4.3.3.2

9. การเชื่อมแบบทาบสามเหลี่ยม (Fillet Weld) ที่ซึ่งความหนาของส่วนที่บางที่สุดนั้นมากกว่า หรือ เท่ากับ 2.5 มม. นั้นจะต้องได้รับการออกแบบตาม AS 4100 [14] ซึ่งจะขึ้นกับความหนาของโลหะเชื่อมและกำลังรับแรงดึง และไม่ขึ้นอยู่กับกำลังและความหนาของโลหะเดิม ดังระบุไว้ในข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI สำหรับรูปแบบการเชื่อมแบบอื่นๆ ข้อกำหนดนี้จะบังคับใช้สำหรับความหนาของส่วนที่บางที่สุดนั้นมากกว่า 3.0 มม. และไม่ใช้ 4.5 มม. ดังระบุไว้ในข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI

10. รอยต่อแบบหมุดยึดกัน นั้นได้ระบุไว้ในหัวข้อ 5.5 ของข้อกำหนด AISI

11. การทดสอบเพื่อประเมินหรือพิสูจน์ใดๆ ได้ให้ไว้ในบทที่ 5.2 ของข้อกำหนด AISI

12. การทดสอบมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์เชื่อมต่อแบบจุดเดียนั้นได้รับการระบุไว้ในภาคผนวก G ของมาตรฐานข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI

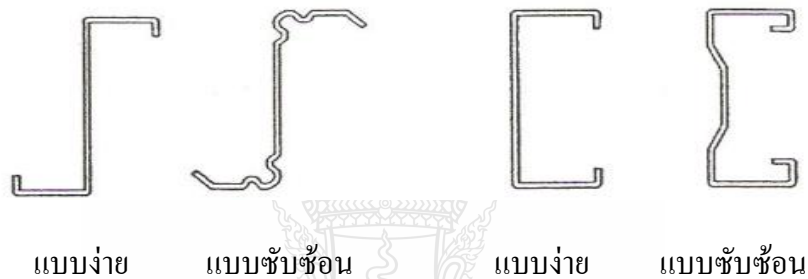
ในฐานะที่เป็นส่วนหนึ่งของงานนี้ ได้มีการจัดการประชุมเชิงปฏิบัติการสากลร่วมในโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น [17] ระหว่างอเมริกาและออสเตรเลีย ซึ่งมีขึ้นในนครซิดนีย์ เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ปี 1993 มาตรฐานสากลแบบอื่นๆ สำหรับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น ที่ได้รับการออกแบบในรูปแบบภาวะขีดสุดนั้นคือ มาตรฐานอังกฤษ [18] มาตรฐานแคนาดา [19] และหลักเกณฑ์ของยุโรป [20]

2.3 รูปแบบหน้าตัดทั่วไป และการใช้งานสำหรับเหล็กขึ้นรูปเย็น

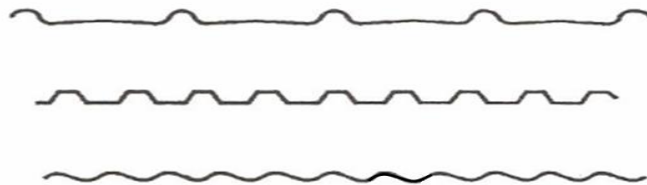
โดยปกติแล้วชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้นจะได้รับการประยุกต์ใช้ในงานดังต่อไปนี้

2.3.1 ระบบหลังคาและกำแพงของอาคารอุตสาหกรรม อาคารพาณิชย์ และอาคารที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร

หน้าตัดทั่วไปสำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับระบบหลังคาและกำแพง คือ หน้าตัดรูปตัว Z (แซ่ด) และหน้าตัดรูปตัว C (แซนแนล หรือหน้าตัดรางน้ำ) ซึ่งใช้เป็นชิ้นส่วนแป โดยมียุคหน้าตัดรางน้ำเป็นตัวค้ำยัน และมีแผ่นแบนทั้งในแบบลึกหรือตื้นปูลอดบนแปนั้น การใช้ตะปูเกลียวเพื่อเป็นตัวยึดนั้น โดยมากจะทำในส่วนที่เป็นสัน หรือยอดของหลังคาและผ่านแกนรองของกำแพง ตัวยึดแบบช่อนนั้นสามารถนำมาใช้เพื่อจัดการเจาะผ่านแผ่นพื้นหลังคา หน้าตัดทั่วไปนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ส่วนตะปูเกลียวสลักเกลียวที่เจาะกัดเกลียวได้ในตัวเอง และตัวยึดแบบช่อนนั้นได้แสดงดังในรูปที่ 2.2



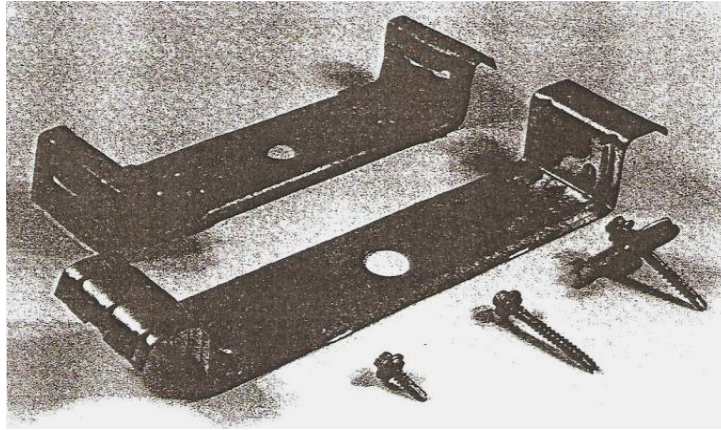
(ก) หน้าตัดทั่วไป



(ข) รูปแบบการปูพื้นแปแบบทั่วไปโดย

(ค) รูปแบบการปูพื้นแปแบบทั่วไปโดยใช้ตะปูเกลียวแบบช่อน

รูปที่ 2.1 รูปแบบหน้าตัดสำหรับพื้นหลังคาและกำแพง



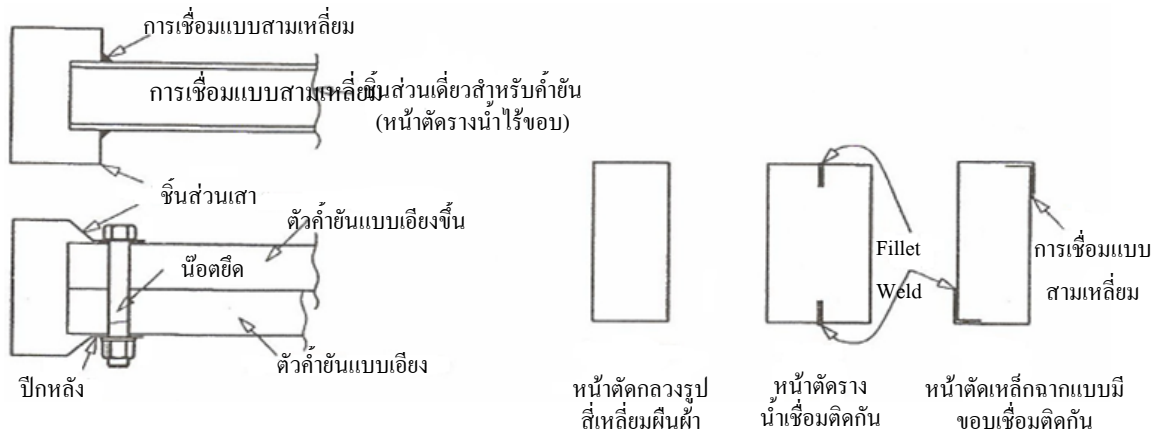
รูปที่ 2.2 ตัวยึดแบบตะปูเกลียวธรรมดา และตะปูเกลียวซ่อน

2.3.2 โครงเหล็กสำหรับรองรับโครงสร้างสำหรับเก็บวัสดุ

เสาตั้งทั่วๆ ไปนั้นจะเป็นเหล็กหน้าตัดทรงน้ำแบบมี หรือไม่มีปีกด้านหลัง หรือหน้าตัดแบบท่อกวาง โดยหน้าตัดแบบท่อกวาง หรือหน้าตัดแบบกึ่งท่อกวาง ซึ่งได้แก่ หน้าตัดทรงน้ำแบบมีขอบที่ได้รับการเชื่อมเป็นช่วงๆ ที่ปลายหนึ่งนั้น โดยมากแล้วจะนิยมใช้เป็นคานสำหรับโครงสร้างเก็บวัสดุ รูปที่ 2.3 ได้แสดงหน้าตัดทั่วไป และรูปที่ 2.4 นั้นแสดงภาพของโครงเหล็กสำหรับรองรับโครงสร้างสำหรับเก็บวัสดุ คำจำกัดความโดยละเอียดนั้น ได้ให้ไว้ในมาตรฐานออสเตรเลีย AS 4084 [21]

2.3.3 ชั้นส่วนโครงสร้างสำหรับโครงถักแบบสองมิติและแบบสามมิติ

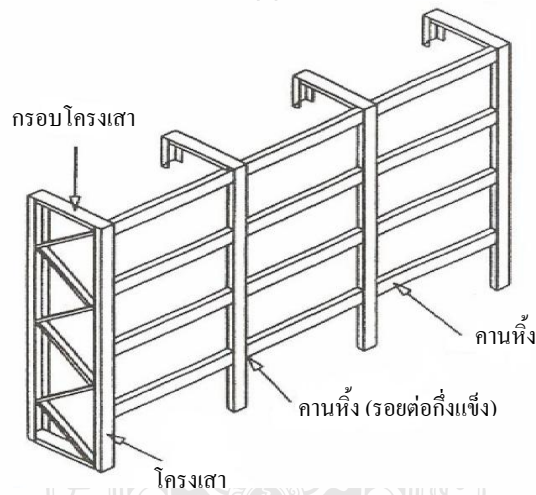
ชั้นส่วนทั่วๆ ไปนั้นจะเป็นแบบหน้าตัดคดงรูปวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ใช้แบบชั้นส่วนของแกนตั้ง หรือแกนนอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้การเชื่อมติดกันเป็นรอยต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก) ส่วนรูปแบบรอยต่อที่สร้างจากการใช้น็อตยึดนั้นสามารถทำได้โดยการใช้น็อตขันยึดเข้ากับแผ่นเหล็กทาบที่นำมาเชื่อมติดกับชั้นส่วนที่เป็นหน้าตัดกลม นั้น หน้าตัดรูปทรงน้ำที่ใช้เป็นชั้นส่วนแนวนอนนั้นก็สามารถนำมาใช้กับชั้นส่วนค้ำยันแบบท่อกวาง ซึ่งยึดเข้าด้วยน็อต หรือเชื่อมติดกับหน้าตัดเปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข) หน้าตัดรูปทรงน้ำ และตัว Z ที่ทำจากเหล็กชั้นรูปเย็นนั้นส่วนมากจะนิยมใช้เป็นชั้นส่วนในแนวนอนของโครงถักหลังคา ของอาคารโครงเหล็ก โครงถักนั้นยังสามารถสร้างขึ้นจากเหล็กฉากชั้นรูปเย็นอีกด้วย



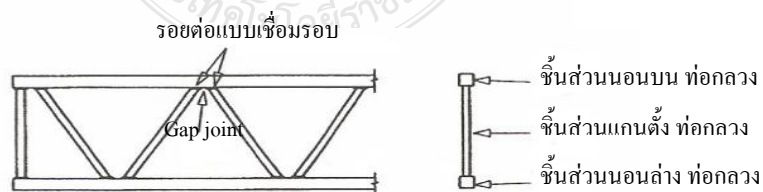
ก) รูปแปลนของเสาและค้ำยัน

ข) หน้าตัดคาน

รูปที่ 2.3 หน้าตัดสำหรับโครงเหล็กสำหรับรองรับโครงสร้างสำหรับเก็บวัสดุ

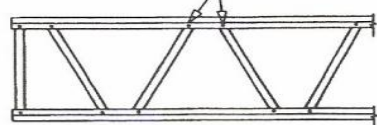


รูปที่ 2.4 โครงเหล็กสำหรับเก็บวัสดุ



ก) โครงถักเหล็กกลม

รอยต่อแบบนอตหรือแบบเชื่อม



ข) โครงถักเหล็กรางน้ำ

รูปที่ 2.5 โครงถักเหล็กสองมิติ

2.3.4 ชั้นส่วนโครงสร้างพื้นผิวอาคารแบบไร้กรอบ

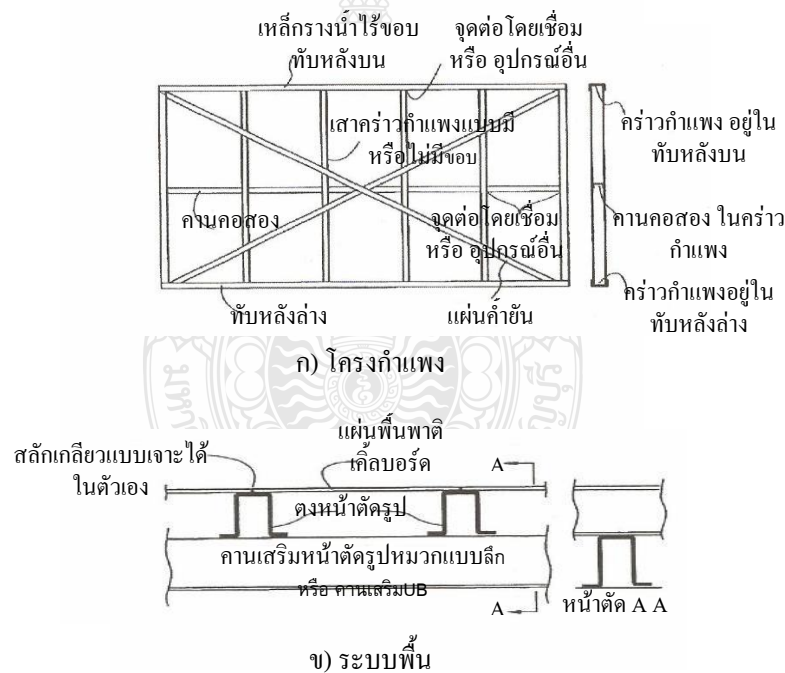
ส่วนประกอบทั่วไปจะเป็นแบบแผ่นพื้นต่อเนื่องที่มีขอบที่เสริมกำลังขึ้นมา ใช้สำหรับการขึ้นรูปโครงสร้างขนาดเล็กเช่น เฝิงหลังคาสวน

2.3.5 ชั้นส่วนโครงสร้างกรอบกำแพงภายใน

ชั้นส่วนทั่วไปจะเป็นหน้าตัดรูปรางน้ำทั้งแบบมีขอบ และแบบไม่มีขอบ เช่น คร่าวกำแพง ทับหลังตัวบนหรือล่าง คานคอสอง (Nogging) ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) แผ่นเหล็กเสริมรอยต่อชนแบบบางนั้นส่วนมากจะนิยมใช้เป็นเหล็กบาง กำจำกัดความโดยละเอียดนั้น ได้ให้ไว้ในมาตรฐานออสเตรเลีย AS 3623 [22]

2.3.6 คานเสริมรับพื้น และ ตง

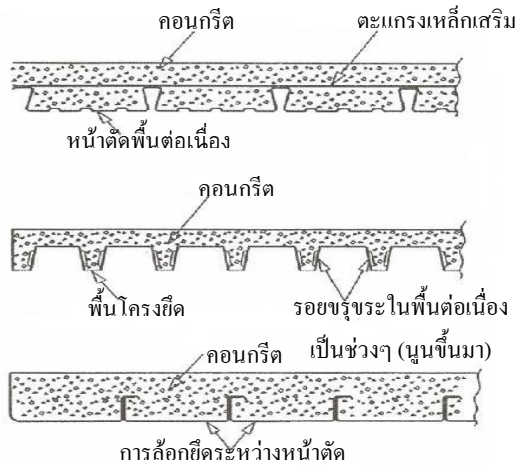
โดยมากแล้วจะนิยมใช้หน้าตัดรูปหมวก ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ข) แต่การใช้หน้าตัดรูปตัว Z ก็นิยมใช้กันเป็นอีกทางเลือก คานแบบปีกกลวงดังแสดงใน (ค) ต่อไปนั้น ก็นิยมนำมาใช้เช่นกัน สำหรับเป็นตงของพื้นและคานเสริมรับพื้น



รูปที่ 2.6 การก่อสร้างระบบของโครงสร้างใช้ภายใน

2.3.7 ระบบพื้นเหล็กสำหรับงานก่อสร้างหน้าตัดประกอบ

แผ่นพื้นต่อเนื่องแบบทั้งลึกและตื้นนั้น โดยมากแล้วจะนิยมใช้กับแบบที่มีรอยรูปแบบพื้นเลื้อยเป็นช่วงๆ เพื่อให้ผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กนั้นก่อให้เกิดเป็นผลของหน้าตัดร่วมกันขึ้นมา หน้าตัดทั่วไปนั้น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผ่นพื้นต่อเนื่องสำหรับพื้น โครงสร้างประกอบ

2.3.8 เสาสูงสำหรับไฟฟ้า

หน้าตัดทั่วไปจะเป็นชิ้นส่วนท่อกวาง ซึ่งอาจจะทำได้โดยการเชื่อม รูปร่างของหน้าตัดนั้นอาจจะเป็นกลม หรือ รูปหลายเหลี่ยมก็ได้ และโดยมากจะมีการทำเป็นรูปแบบที่มีความสอบ (Taper)

2.3.9 ชิ้นส่วนรยยนต์

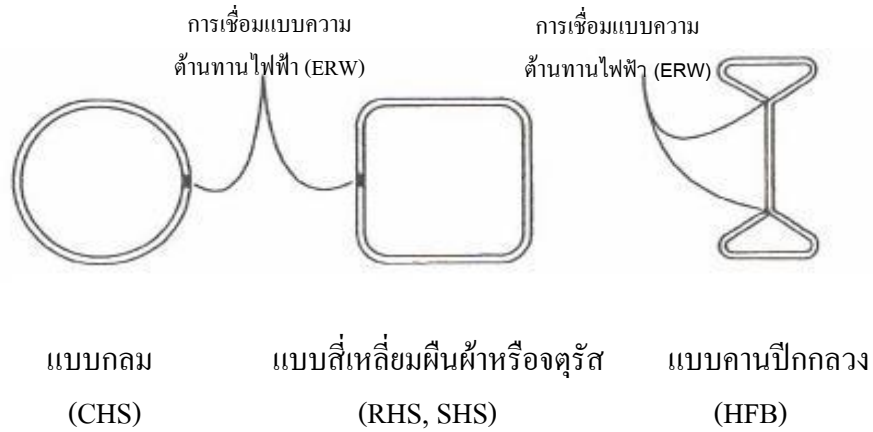
ชิ้นส่วนโครงเหล็กในรูปแบบต่างๆทั้งหมดสามารถใช้ได้ แต่โดยมากจะนิยมใช้หน้าตัดรูปหมวกหรือกล่อง เอกสารบทความวิชาการสืบค้นที่เกี่ยวกับการออกแบบยานยนต์นั้นได้แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง [17]

2.3.10 ไซโลเก็บธัญพืชในท้องถิ่น

กำแพงไซโลส่วนมากแล้วจะประกอบไปด้วยแผ่นพื้นแบบตื้นๆ ที่เสริมกำลังหรือค้ำยันด้วยหน้าตัดรูปหมวกหรือรางน้ำ

2.3.11 ชิ้นส่วนโครงสร้างท่อกวางขึ้นรูปเย็นและคานแบบปีกกวาง

หน้าตัดคานแบบวงกลม (CHS) และสี่เหลี่ยม (RHS) ทั้งหมดที่ผลิตขึ้นในออสเตรเลีย นั้นทำขึ้นมาโดยการขึ้นรูปเย็น และใช้การเชื่อมแบบความต้านทานไฟฟ้า (ERW) สำหรับการปิดทับชิ้นส่วนหน้าตัด หน้าตัดอีกประเภทนั้นเรียกว่าคานแบบปีกกวาง (HFB) นั้น ผลิตโดยการขึ้นรูปเย็นโดยใช้การเชื่อม ERW ใสสองจุดเพื่อทำปีกกวางขึ้นมา รูปของหน้าตัดทั่วไปดังกล่าวนี้นี้ แสดงได้ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปหน้าตัดทั่วไปของเหล็กกลวง

2.4 กระบวนการผลิตสำหรับเหล็กขึ้นรูปเย็น

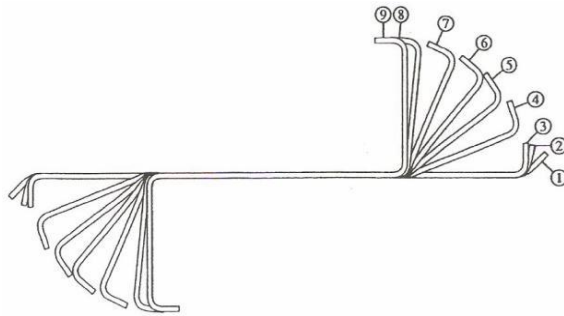
โดยปกติแล้วชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้น สามารถผลิตขึ้นได้โดยใช้หนึ่งในสองกระบวนการดังต่อไปนี้ ได้แก่

2.4.1 การรีดม้วนขึ้นรูป (Roll Forming)

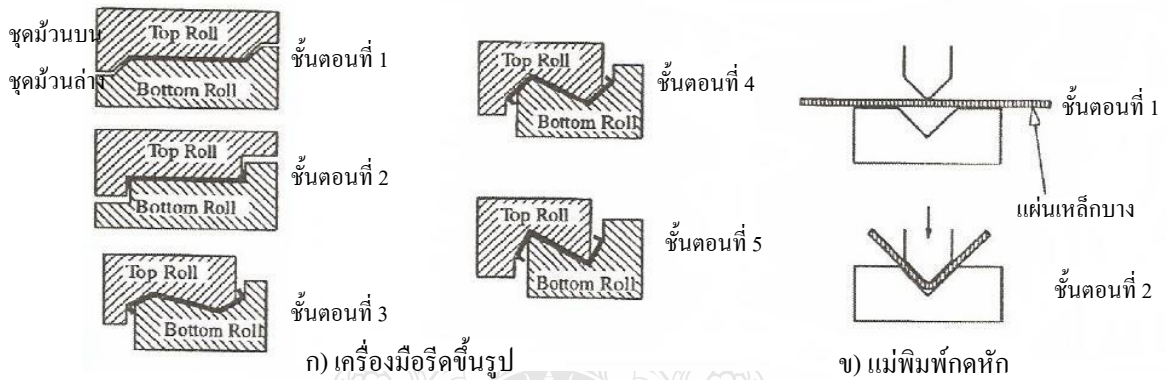
2.4.2 การกดหัก (Brake Pressing)

การรีดม้วนขึ้นรูปนั้นประกอบไปด้วยการป้อนแผ่นเหล็กบางต่อเนื่องผ่านเข้าไปในชุดของลูกกลิ้งที่อยู่ตรงกันข้ามกัน เพื่อค่อยๆเปลี่ยนรูปร่างของเหล็กแบบถาวรตามรูปร่างที่ต้องการ แต่ละคู่ของลูกกลิ้งนั้นจะก่อให้เกิดปริมาณการเปลี่ยนรูปร่างที่กำหนดไว้ ในลำดับของรูปแบบที่แสดงในรูปที่ 2.9 ในตัวอย่างนี้ หน้าตัดรูปตัว Z ได้ถูกทำขึ้นมา โดยครั้งแรกจะทำการตัดบริเวณที่จะเป็นตัวค้ำยันที่ขอบ แล้วจึงทำการตัดให้เป็นส่วนที่เป็นปีก แต่ละคู่ของลูกกลิ้งที่อยู่ตรงกันข้ามกันนั้นจะเรียกว่าเป็นขั้นตอนการม้วน ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) โดยทั่วไปแล้วนั้นรูปร่างของหน้าตัดที่ซับซ้อน ก็จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนการม้วนที่มากขึ้น ในกรณีของเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัดคดงรูปสี่เหลี่ยม ลูกกลิ้งต่าง ๆ นั้นจะต้องเริ่มขึ้นรูปหน้าตัดให้เป็นวงกลมก่อน แล้วจึงอาศัยการเชื่อมเข้าที่ขอบสองข้างที่ตรงข้ามกัน ก่อนที่การม้วนในขั้นสุดท้าย (เรียกว่าการทำขนาด) จะทำหน้าตัดให้กลายเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสหรือผืนผ้า การกดหักนั้น โดยมากแล้วจะเกี่ยวข้องกับการผลิตที่สามารถทำให้เสร็จโดยการพับเพียงครั้งเดียว ตลอดความยาวของหน้าตัดโดยใช้เครื่องมือที่แสดงในรูปที่ 2.10(ข) สำหรับหน้าตัดที่ต้องพับหลายครั้ง โดยมากแล้วจำเป็นที่จะต้องย้ายแผ่นเหล็กในเครื่องกดแล้วทำซ้ำในกระบวนการกดอีกหลายครั้ง หน้าตัดที่สำเร็จแล้วจึงถูกนำออกจากเครื่องกด และเหล็กขึ้นใหม่ก็จะถูกนำเข้ามาเพื่อเป็นการผลิตสำหรับหน้าตัดถัดไป การรีดขึ้นรูปนั้นโดยปกติแล้วจะใช้สำหรับการผลิตหน้าตัดที่มีปริมาณความต้องการสูง ราคาของเครื่องมือและอุปกรณ์ในครั้งแรกนั้นจะสูงมากแต่ด้วยค่าแรงงานที่ต่ำ ส่วนการกดหักนั้นโดยมากจะนิยมสำหรับการผลิตในปริมาณที่ไม่สูงนัก ซึ่งมีความต้องการ

รูปแบบที่มีความหลากหลายออกไป และไม่สามารถทำได้ด้วยต้นทุนที่สูงของการรีดขึ้นรูป การกดห้ก นั้นมีข้อจำกัดอีกด้านในเรื่องความยากในการผลิตหน้าตัดที่ยาวต่อเนื่องเกินกว่า 5 เมตร



รูปที่ 2.9 ลำดับการขึ้นรูปโดยการม้วนแบบทั่วไปสำหรับหน้าตัดรูปตัว Z



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์การขึ้นรูปเย็น

ข้อจำกัดที่ชัดเจนของการรีดขึ้นรูปคือ เวลาที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนขนาดลูกกลิ้งหรือชุดรีดม้วนขนาดต่างๆ ผลลัพธ์คือ ลูกกลิ้งแบบปรับได้นั้น จึงเป็นที่นิยมเพราะทำให้เปลี่ยนขนาดต่างๆกันของหน้าตัดได้เร็วมากขึ้น การรีดขึ้นรูปนั้นอาจจะสร้างชุดที่แตกต่างกันของหน่วยแรงค้ำในหน้าตัดเมื่อเทียบกับการผลิตแบบกดห้ก และดังนั้นกำลังของหน้าตัดจึงอาจจะแตกต่างกันไปในแต่ละกรณีซึ่งมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างการโค้งเคาะและการคราก

2.5 ปัญหาพิเศษในการออกแบบหน้าตัด ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น

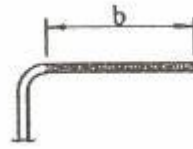
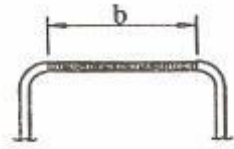
การใช้วัสดุที่มีความบางยิ่งขึ้น และกระบวนการผลิตแบบขึ้นรูปเย็นนั้น สามารถก่อให้เกิดปัญหาในการออกแบบซึ่งมีความพิเศษออกไปซึ่งโดยมากแล้วจะไม่พบในการก่อสร้างโดยเหล็กรีดร้อน ซึ่งส่วนมากจะใช้หน้าตัดที่มีความหนามากขึ้น ด้วยเหตุผลนี้เอง AS/NZS 4600 จึงได้สร้างแนวทางสำหรับการออกแบบแก่นักออกแบบบนพื้นฐานของรูปแบบการโค้งเคาะและการ

เปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกัน ที่ต้องพบใน ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น นอกจากนั้น แล้ว การเชื่อมและการใช้น็อตยึดในหน้าตัดที่มีความบางมากนี้ยังก่อให้เกิดผลลัพท์จากการออกแบบที่แตกต่างกันออกไปอีก และเช่นเดียวกัน มีความแตกต่างกันกับกรณีของเหล็กหล่อร้อน ข้อสรุปอย่างย่อต่อไปนี้จะได้แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างการออกแบบที่แตกต่างกันออกไป

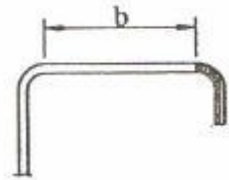
2.5.1 การโค้งเดาะแบบเฉพาะที่ และการโค้งเดาะเฉพาะที่แบบเกิดขึ้นทีหลัง ของชิ้นส่วนบาง

ตามปกติแล้ว ชิ้นส่วนบางเดี่ยวๆ ที่สร้างจากหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้นจะมีขนาดบางเมื่อเทียบกับความกว้างของมัน ดังนั้น การ โค้งเดาะแบบเฉพาะที่จึงเกิดขึ้นได้ก่อนที่หน้าตัดจะเกิดการคราก เพราะฉะนั้น จึงกล่าวได้ว่าการ โค้งเดาะนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญยิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ กำลังรับสำรองอันเกิดจากพฤติกรรมการ โค้งเดาะแบบเฉพาะที่แบบเกิดขึ้นทีหลังของชิ้นส่วนบางนั้น คือ การที่ชิ้นส่วนดังกล่าว ยังสามารถรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นได้ หลังการ โค้งเดาะแบบเฉพาะที่ได้เกิดขึ้นแล้ว ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบนั้นได้หน้าตัดที่มีความประหยัดมากยิ่งขึ้น

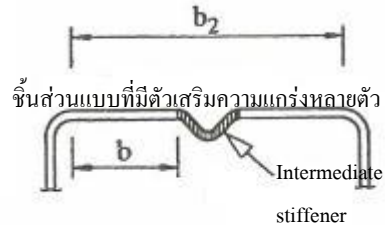
รูปแบบพื้นฐานสำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัดแบบแบนนั้นได้ถูกนิยามไว้ใน AS/NZS 4600 สิ่งเหล่านี้คือชิ้นส่วนที่ถูกรองรับโดยขอบทั้งสองข้างดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) ซึ่งเราจะเรียกว่าชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ได้รับการเพิ่มความแกร่ง และชิ้นส่วนที่ถูกรองรับบนขอบตามยาวเพียงด้านเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.11(ข) นั้นเราจะเรียกว่า ชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ไม่ได้รับการเพิ่มความแกร่ง โดยในทั้งสองกรณีนั้น AS/NZS 4600 ได้ยอมให้มีการคำนึงถึงกำลังรับสำรองอันเกิดจากพฤติกรรมการ โค้งเดาะแบบเฉพาะที่แบบเกิดขึ้นทีหลัง โดยการใช้วิธีความกว้างสำหรับการออกแบบประสิทธิภาพ ดังได้นิยามไว้ในหัวข้อ 2.2, 2.3, 2.4, และ 2.5 ของ AS/NZS 4600 สำหรับชิ้นส่วนที่ได้รับการเพิ่มความแกร่งนั้น ความกว้างประสิทธิภาพนั้นได้ถูกแยกออกเป็นสองส่วนเท่าๆกันและวางอยู่ใกล้กันกับขอบของแผ่นชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.11(จ) อย่างไรก็ตามสำหรับชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการเพิ่มความแกร่งนั้น ความยาวประสิทธิภาพแบบเต็มจะอยู่ติดกับขอบรองรับดังแสดงในรูปที่ 2.11(ค) พื้นฐานของสูตรความกว้างประสิทธิภาพนั้นได้กล่าวไว้ในบทที่ 4.3 ของหนังสือเล่มนี้ เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ไม่ได้รับการเพิ่มความแกร่ง โดยมากแล้วจะนิยมเพิ่มตัวเสริมความแกร่งที่ด้านขอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ค) เพื่อที่จะสร้างให้เป็นชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ได้รับการเพิ่มความแกร่ง สิ่งนี้ตามปกติแล้วสามารถทำได้โดยใช้ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับหน้าตัดที่รีดขึ้นรูป สำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ได้รับการเพิ่มความแกร่งที่มีขนาดกว้าง ซึ่งจะไม่ค่อยมีประสิทธิภาพนัก ดังแสดงในรูปที่ 1.11(e) เราสามารถนำตัวเสริมความแกร่งตรงกลางมาใส่ได้ดังแสดงในรูปที่ 1.11(d) เพื่อที่จะทำเป็นชิ้นส่วนแบบที่มีตัวเสริมความแกร่งหลายตัว AS/NZS 4600 ยังยอมสำหรับการเสริมความแกร่งแบบบางส่วนอีกด้วย สำหรับขอบหรือชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมความแกร่งตรงกลาง ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 ชิ้นส่วนประเภทนี้จะอยู่ระหว่างชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมความแกร่งและชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมความแกร่ง



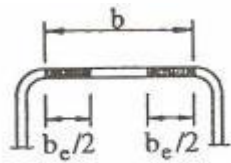
ก) ชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ได้รับการเพิ่มความแข็งแรง ข) ชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ไม่ได้รับการเพิ่มความแข็งแรง



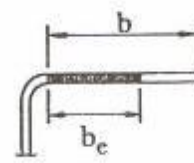
ค) ส่วนเพิ่มความแข็งแรงที่ขอบ



ง) ส่วนเพิ่มความแข็งแรงกลาง



จ) ความกว้างประสิทธิผลของชิ้นส่วน
ที่ได้รับการเพิ่มความแข็งแรง

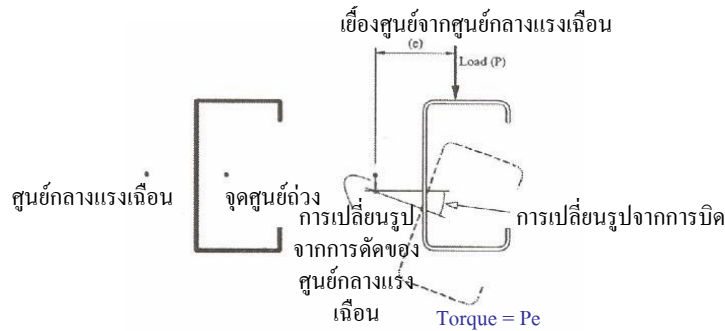


ฉ) ความกว้างประสิทธิผลของชิ้นส่วน
รับที่ไม่ได้รับการเพิ่มความแข็งแรง

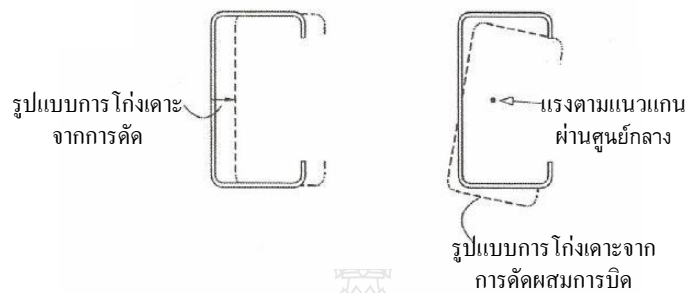
รูปที่ 2.11 ชิ้นส่วนรับแรงอัด

2.5.2 ความโน้มเอียงของการบิด

ตามปกติแล้วหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็น จะมีความบาง จึงเป็นผลให้มีค่าสติฟเนสสำหรับการบิดที่ค่อนข้างต่ำ หน้าตัดหลายๆแบบที่ผลิตโดยการขึ้นรูปเย็นนั้น จะมีความสมมาตรทางแกนเดียว พร้อมทั้งมีศูนย์กลางแรงเฉือนที่ไม่ตรงกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ก) เพราะศูนย์กลางแรงเฉือนของคานแบบเนื้อบางนั้น คือ แกนที่น้ำหนักกระทำจากภายนอกจะต้องผ่านแกนนี้ เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างจากแรงดัดโดยไม่เกิดการบิด ดังนั้นตามปกติแล้ว น้ำหนักกระทำใดๆที่ไม่ได้ผ่านจุดนี้ (เยื้องศูนย์กลาง) จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างจากการบิดเป็นอย่างมากในคานแบบเนื้อบาง ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) ผลที่ตามมาคือ คานนั้นจะต้องมีการยึดรั้งสำหรับการบิดเป็นช่วงๆ หรือต่อเนื่องเพื่อป้องกันการเสีรูปร่างการบิด วิธีสำหรับการค้ำยันสำหรับคานหน้าตัดรูปตัว Z และตัว C เพื่อป้องกันการบิดและการเปลี่ยนรูปร่างทางแนวข้างนั้นได้ให้ไว้ในหัวข้อ 4.3 ของ AS/NZS 4600



ก) คานหน้าตัดรางน้ำที่รับแรงกระทำเชิงศูนย์กลาง



ข) เสาหน้าตัดรางน้ำที่รับแรงตามแนวแกน

รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนรูปจากการบิด

นอกจากนี้ สำหรับเสาที่รับแรงตามแนวแกนผ่านแกนที่ศูนย์กลางของหน้าตัด การเชิงศูนย์กลางของแรงกระทำจากศูนย์กลางแรงเฉือนนั้นอาจจะก่อให้เกิดการโก่งเคาะในรูปแบบของการคดผสมกับการบิดได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) ที่ค่าแรงซึ่งต่ำกว่ารูปแบบการโก่งเคาะเนื่องจากการคดดังแสดงในรูปที่ 2.12(ก) เช่นกัน ดังนั้น ผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบสำหรับรูปแบบการโก่งเคาะในรูปแบบการคดผสมการบิดโดยใช้วิธีที่ระบุในหัวข้อ 3.4.3 ของ AS/NZS 4600 คานซึ่งได้แก่แปที่ทำจากหน้าตัดรูปตัว Z และตัว C อาจจะได้รับการโก่งเคาะแนวข้าง (การคดผสมการบิด) เพราะสถิติเนสการบิดที่ต่ำของมัน ดังนั้นหัวข้อการออกแบบสำหรับการโก่งเคาะแนวข้าง (การคดผสมการบิด) ของแปซึ่งมีความแตกต่างกันในสภาพของการค้ำยันนั้นจึงได้ถูกรวมไว้ใน หัวข้อ 3.3.3.2 ของ AS/NZS 4600

2.5.3 การโก่งเคาะแบบผิดรูป

หน้าตัดซึ่งได้รับการค้ำยันทางแนวข้างหรือการโก่งเคาะจากการคดร่วมกับการบิด นั้นอาจจะมีรูปแบบของการโก่งเคาะซึ่งส่วนมากจะเรียกว่าการโก่งเคาะแบบผิดรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.13 รูปแบบต่างๆสามารถเกิดขึ้นสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงทั้งแรงอัดและแรงคด หัวข้อ 3.3.3.3 นั้นได้ให้กฎของการออกแบบสำหรับการโก่งเคาะแบบผิดรูปของชิ้นส่วนที่รับแรงคด, และหัวข้อ 3.4.6 ได้ให้กฎของการออกแบบสำหรับหน้าตัดที่สมมาตรในด้านเดียว ที่รับแรงอัด การประยุกต์หลัก

ของหัวข้อ 3.4.6 นั้นคือสำหรับหน้าตัดโครงสร้างเสาซึ่งมีปีกด้านหลังเพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งค่อนข้างอ่อนไหวต่อการโก่งเคาะแบบผิดปกติ

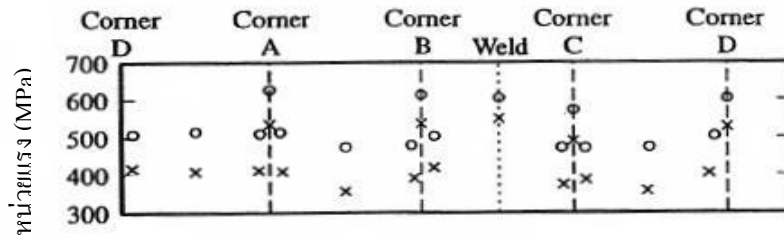
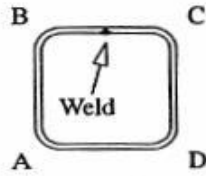
2.5.4 การขึ้นรูปเย็น

คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหน้าตัดเหล็กโครงสร้างนั้นจะได้รับผลกระทบโดยการขึ้นรูปเย็นซึ่งเกิดขึ้นส่วนมากในพื้นที่รับแรงคด สำหรับหน้าตัดที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นจากเหล็กแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 งานขึ้นรูปเย็นนั้นโดยมากแล้วจะถูกจำกัดไว้กับการตัดสี่ครั้งที่ใกล้เคียงกับขอบของแต่ละปีก ในบริเวณเหล่านี้ กำลังรับแรงดึงประลัยของวัสดุ และกำลังรับแรงดึงคราก นั้นจะได้รับการปรับปรุงโดยการลดลงแบบเท่าๆ กัน ในความเหนียวของวัสดุ กำลังรับแรงดึงครากที่ได้รับการปรับปรุงขึ้นของเหล็กนั้น อาจจะรวมอยู่ในการออกแบบด้วย โดยเป็นไปตามสูตรที่ได้ให้ไว้ในหัวข้อ 1.5.1.3 ของ AS/NZS 4600



รูปที่ 2.13 รูปแบบการ โกงเคาะแบบผิดปกติ

สำหรับหน้าตัดคดลงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการขึ้นรูปเย็น หน้าทีแบนนั้นจะต้องผ่านการขึ้นรูปเย็นเช่นกัน เนื่องจากผลของการขึ้นรูปหน้าตัดให้เป็นท่อคดลงวงกลม แล้วจึงทำให้เป็นสี่เหลี่ยมในขั้นต่อไป ในกรณีเช่นนี้ เป็นการยากมากในการคำนวณหา กำลังครากที่เพิ่มขึ้นมา ในพื้นที่ผิวแบน และดังนั้น AS/NZS 4600 จึงยอมให้ค่ากำลังรับแรงครากที่วัดได้ของเหล็กโครงสร้าง หลังจากการขึ้นรูป เพื่อใช้สำหรับการออกแบบซึ่งกำลังรับแรงครากนั้นจะหาได้โดยขั้นตอนที่ระบุไว้ใน AS 1163 ซึ่งเป็นมาตรฐานออสเตรเลียสำหรับหน้าตัดคดลงเหล็ก โครงสร้าง [23] การกระจายกำลังรับแรงดึงประลัย และกำลังรับแรงดึงครากที่วัดได้ในหน้าตัดคดลงสี่เหลี่ยมขึ้นรูปเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 การกระจายตัวดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัตินั้นเป็นที่ยอมรับได้สม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าของหน้าตัด (ยกเว้นจุดที่มีการเชื่อม) โดยค่ากำลังครากนั้นประมาณ 400 MPa สำหรับค่าหน่วยแรงครากระบุ 350 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าหน่วยแรงครากของเหล็กแผ่นก่อนการขึ้นรูปเป็นอย่างมาก ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 300 MPa การปรับปรุงหน่วยแรงครากในมุมหน้าตัดนั้นมีนัยสำคัญมาก ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยประมาณ 500 MPa



การกระจายของหน่วยแรงคราก (x) และกำลังรับแรงดึงประลัย (o)

รูปที่ 2.14 คุณสมบัติทางแรงดึงในหน้าตัดกลางชิ้นรูปเข็ญรูปสี่เหลี่ยม (เกรด C350 ถึง AS 1163)

2.5.5 ความเสียหายของแกนตั้งภายใต้แรงกดทับ

ความเสียหายของแกนตั้งภายใต้จุดที่ใต้จุดที่มีแรงรวมกระทำ และจุดรองรับนั้นอาจจะเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งใน ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเข็ญ ด้วยสาเหตุหลายประการ ได้แก่ :

1. ในการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเข็ญนั้น โดยมากแล้วจะไม่นิยามวางแท่นรองรับน้ำหนัก และตัวเสริมความแกร่งที่จุดรองรับด้านปลาย โดยกรณีเหล่านี้จะเป็นการทำเหล็กแผ่นต่อเนื่องและช่วงพื้นที่มีจุดรองรับหลายจุด

2. อัตราส่วนของความลึกต่อความหนาของแกนตั้งของ ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเข็ญนั้น โดยมากแล้วจะมากกว่า ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรีดร้อน

3. ในหลายๆกรณี แกนตั้งนั้น จะเอียงเล็กน้อย ไม่ตรงเสียทีเดียว

4. ชิ้นส่วนที่อยู่กึ่งกลางระหว่างปีก ด้านบนซึ่งเป็นจุดที่น้ำหนักกระทำ, และแกนตั้งของ ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเข็ญนั้น โดยมากแล้วจะประกอบขึ้นจากการตัดที่มีคาร์บริดจ์ ดังนั้นจึงทำให้น้ำหนักกระทำ ส่วนมากจะเอียงไปจากศูนย์กลางของแกนตั้ง

หัวข้อ 3.3.6 ของ AS/NZS 4600 นั้นได้รับการพัฒนามาเป็นพิเศษเพื่อให้เป็นแนวการออกแบบ สำหรับปัญหานี้ นอกจากนี้ AS/NZS 4600 ยังมีหัวข้อ 2.7 สำหรับแท่นรับน้ำหนักทางขวางและตัวเสริมกำลังช่วงกลางที่ติดเข้ากับแกนตั้งของคาน หัวข้อ 3.3.6 นั้นไม่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาสำหรับ หน้าตัด RHS และ HFB ในกระบวนการออกแบบใหม่ๆสำหรับหน้าตัดประเภทเหล่านี้

2.5.6 จุดเชื่อมต่อต่างๆ

การทดสอบแผ่นเหล็กที่ผ่านการเชื่อม [24] ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการวิบัติ (Mode of Failure) นั้นโดยมากแล้วจะต่างไปจากการก่อสร้างที่ทำจากวัสดุทั่วไป โดยเฉพาะแล้ว สำหรับการเชื่อมแบบทาบสามเหลี่ยมสำหรับแผ่นเหล็กที่บางกว่า 3 มม. อาจจะมีการวิบัติโดยทั่วไปเป็นแบบการ

ลักษณะของแผ่นเหล็กกล้าฯบริเวณเชื่อมมากกว่าการวัดที่รอยเชื่อม นอกจากนี้ รูปแบบการเชื่อมแบบอื่นๆยังรวมถึงการเชื่อมแบบจุด และการเชื่อมด้านทาน ก็เป็นที่นิยมสำหรับ ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นที่เป็นแผ่นอีกด้วย สิ่งก็ตามมานั้น หัวข้อการออกแบบซึ่งเฉพาะเจาะจงสำหรับสถานการณ์เช่นนี้จึงมีความจำเป็นและได้ถูกรวมไว้ใน บทที่ 5.2 ของ AS/NZS 4600 ข้อมูลพื้นฐานจากการทดสอบเหล่านั้น ก็ได้รับการบรรยายไว้ สำหรับการเชื่อมในหน้าตัดหรือแผ่นที่หนามากกว่า 3 มม. (หรือ 2.5 มม. สำหรับการเชื่อมทาบสามเหลี่ยม) การวัดของรอยเชื่อมจะต้องถูกตรวจสอบตาม AS4100 [14] หรือ NZS 3404 [15]

การต่อด้วยนอตในการก่อสร้างโดย ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น นั้นเป็นที่นิยมมาก โดยการใช้อัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอตต่อความหนาแผ่นเหล็ก ซึ่งโดยมากแล้ว จะมากกว่าการก่อสร้างโดยการใช้เหล็กกรีดร้อน ข้อกำหนดการออกแบบที่ได้รับการพัฒนามาสำหรับกรณีเช่นนี้ได้ถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อ 5.3 ของ AS/NZS 4600

การใช้สลักเกลียวหรือหมุดย้ำหัวปัดนั้นก็เป็นที่ยอมรับสำหรับการต่อ ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น หัวข้อเฉพาะนั้นได้ถูกรวมไว้ในหัวข้อ 5.4 และ 5.5 ของ AS/NZS 4600

2.5.7 การป้องกันการเกิดสนิม

ปัจจัยหลักที่กำหนดความต้านทานต่อการเกิดสนิมหรือการผุกร่อนของหน้าตัดที่ทำจาก ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น นั้น คือ ประเภทและความหนาของกระบวนการเสริมหรือป้องกันที่ทำให้กับเหล็ก และไม่เกี่ยวข้องกับความหนาของเหล็ก ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้นมีข้อได้เปรียบบางประการที่ชั้นเคลือบป้องกันนั้นสามารถทำได้กับแผ่นเหล็กก่อนทำการขึ้นรูป ในระหว่างการผลิต ดังนั้น แผ่นเหล็กที่ผ่านการกลวไนซ์แล้วนั้นจะสามารถผ่านเครื่องรีดและไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการอื่นๆ อีกเลย

วัสดุซึ่งถูกเคลือบโดยสังกะสีหรือ โลหะผสมของอลูมิเนียม-สังกะสีนั้นจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของ AS 1397 [25] โดย AS 1397 ได้นิยามถึงระดับชั้นของการเคลือบผิว โดยขึ้นกับประเภทของการเคลือบและปริมาณที่เคลือบโดยกำหนดโดยการทดสอบสามครั้ง ระดับการเคลือบที่เป็นที่ยอมรับนั้นคือการใช้สังกะสี (ใช้สัญลักษณ์ Z) และ โลหะผสมของอลูมิเนียม-สังกะสี (ใช้สัญลักษณ์ AZ) นำหนักที่กำหนดสำหรับการเคลือบด้วยสังกะสี (Z) คือ 100, 200, 275, 350, 450, และ 600 กรัมต่อตารางเมตร ส่วนสำหรับ โลหะผสมของอลูมิเนียม-สังกะสี (AZ) นั้นจะเป็น 150 และ 200 กรัมต่อตารางเมตร การประยุกต์ทั่วไปของระดับการเคลือบที่แตกต่างกันนั้น ได้ให้ไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระดับการเคลื่อนสำหรับสภาพการสุกร่อนแบบต่างๆ

ระดับการเคลื่อน	การประยุกต์ใช้งาน
Z100	เป็นการเคลื่อนที่บางมาก, เรียบและเหนียวสำหรับการเก็บงานในด้านใน, สภาพแวดล้อมที่มีการป้องกัน, เช่น สำหรับตู้เย็น และ เครื่องอบแห้ง (ใช้ร่วมกับสี)
Z200	เป็นการเคลื่อนที่อ่อนๆ สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างใช้ภายใน (Z200N จะใช้สำหรับงาน โครง และท่อ), หรือการเคลื่อนที่เรียบสำหรับงานที่มีการป้องกันน้อยลงมา (Z200S จะใช้สำหรับเครื่องซักล้าง และรถยนต์)
Z275, Z350	เป็นการเคลื่อนที่สำหรับงานทั่วไป
Z450, AZ150	เป็นการเคลื่อนที่ที่แนะนำสำหรับงานป้องกันภายนอก ได้แก่ งานหลังคาและวัสดุประกอบ, รวมถึงวัสดุสำหรับห่อหุ้ม
Z600, AZ200	เป็นการเคลื่อนที่งานหนัก ออกแบบสำหรับแท็งก์น้ำ, ท่อระบายน้ำ และ ก่อสร้างระบายน้ำ

ภาคผนวก C ของ AS/NZS 4600 นั้นได้ให้แนวทางทั่วไปสำหรับการป้องกันการสุกร่อน และการซ่อมแซมของงานเคลื่อนที่เกิดความเสียหาย

2.5.8 การออกแบบชิ้นส่วนในช่วงพลาสติก

ดังเป็นผลของการลดลงของความเหนียวของ ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น วิธีการออกแบบในช่วงพลาสติกนั้นได้ถูกคัดแยกออกมาจาก AS/NZS 4600 (หัวข้อ 1.6.2.2(b)(ii)) ถ้าไม่มีวิธีการได้ที่สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าจุดหมุนพลาสติกนั้นมีกำลังและความเหนียวที่เพียงพอสำหรับการใช้งาน อย่างไรก็ตามหน้าตัดที่ยอมให้มีการคิดถึงกำลังรับในช่วงเลยจุดยืดหยุ่นสำหรับโครงสร้างรับแรงดัดตั้งได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.3.2.3 ของ AS/NZS 4600 ซึ่งได้ยอมให้ค่าความเครียดอัด ซึ่งมากถึงสามเท่าของค่าความเครียด ณ จุดคราก นั้น สามารถใช้ได้สำหรับหน้าตัดที่เป็นไปตามข้อกำหนดทางด้านความชะลูด ในกรณีนี้ ค่าโมเมนต์สำหรับการออกแบบนั้นจะต้องไม่เกินค่าโมเมนต์ที่จุดครากมากไปกว่า 25%

2.6 รูปแบบผลรวมน้ำหนักกระทำ (Load Combinations)

สำหรับการออกแบบแล้ว AS/NZS 4600 จะใช้รูปแบบผลรวมน้ำหนักกระทำที่ได้ระบุไว้ใน AS 1170 [26] สำหรับออสเตรเลีย หรือ NZS 4203 [30] สำหรับนิวซีแลนด์ อย่างไรก็ตามในกรณีของโครงสร้างเหล็กสำหรับโรงเก็บวัสดุนั้น AS 4084 [21] ได้รวมเอาถึงส่วนที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักกระทำและรูปแบบผลรวมน้ำหนักกระทำ ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับโครงสร้างเหล็กสำหรับโรงเก็บวัสดุ ส่วนใน

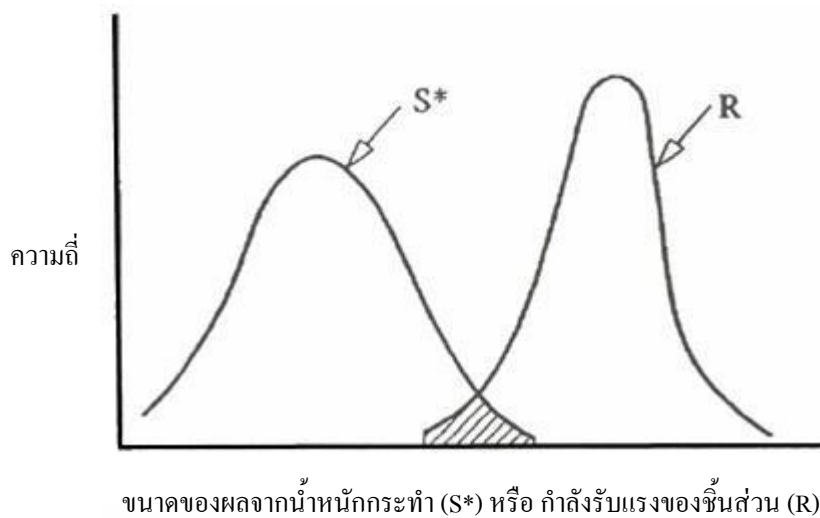
กรณีของโครงโลหะสำหรับใช้งานภายใน, แรงลมนั้นจะต้องเป็นไปตาม AS 4055 [27] ซึ่งจะให้ค่าแรงกระทำที่ตรงกับวัตถุประสงค์ของอาคารมากกว่า AS 1170.2 [28] สำหรับออสเตรเลีย แรงกระทำอันเกิดจากแผ่นดินไหว นั้นจะเป็นไปตาม AS 1170.4 [29] และสำหรับนิวซีแลนด์ แรงกระทำอันเกิดจากแผ่นดินไหว นั้นจะเป็นไปตาม NZS 4203 [30]

2.7 การออกแบบในภาวะขีดสุด (Limit States Design)

การออกแบบในภาวะขีดสุดนั้นเป็นวิธีการออกแบบซึ่งสภาพของโครงสร้างนั้นได้รับการตรวจสอบถึงเงื่อนไขหรือสภาพจำกัดต่างๆ ที่ระดับของน้ำหนักกระทำที่เหมาะสม เงื่อนไขหรือสภาพจำกัดที่จะต้องทำการตรวจสอบในการออกแบบโครงสร้างเหล็กนั้นคือ ภาวะขีดจำกัดประลัย (Ultimate Limit State) และภาวะขีดจำกัดใช้งาน (Serviceability Limit State) ภาวะขีดจำกัดประลัยคือ ภาวะต่างๆที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย, ได้แก่การบรรทุกน้ำหนักเกินกำลังรับ, การลื่นพลิก, การเลื่อนไถล และการแตกหักอันเนื่องมาจากความล้า หรือสาเหตุอื่นๆ ส่วน ภาวะขีดจำกัดใช้งานนั้นคือ ภาวะต่างๆซึ่งพฤติกรรมของโครงสร้างนั้นไม่เป็นที่ต้องการ และรวมถึงการแอ่นตัวที่มากเกินไป, การสั่นไหวที่มากเกินไป, และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวรที่มากเกินไป

โดยสาระสำคัญแล้วนั้น ผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบอย่างแน่ใจว่าค่ากำลังรับแรงสูงสุดของโครงสร้าง (หรือ ของชิ้นส่วนใดๆของโครงสร้าง) จะต้องมากกว่าน้ำหนักกระทำบนโครงสร้าง หรือ ชิ้นส่วนนั้นๆ โดยมีขอบเขตของความปลอดภัยที่ยอมรับได้ นี้คือข้อกำหนดของ “ภาวะขีดจำกัดของกำลัง” นอกจากนั้นแล้ว ผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบอย่างแน่ใจว่าโครงสร้างนั้นๆจะสามารถใช้งานได้ในแบบที่ยอมรับได้ เมื่อโครงสร้างต้องรับน้ำหนักใช้งานโดยทั่วไป นี้คือข้อกำหนดของ “ภาวะขีดจำกัดด้านการใช้งาน”

ข้อกำหนดทางด้านภาวะขีดจำกัดของกำลังนั้น สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.15 ภาพนี้ได้แสดงให้เห็นถึงสมมุติฐานในการกระจายตัวของเส้นโค้งความถี่ สำหรับผลกระทบของน้ำหนักกระทำบนชิ้นส่วนของโครงสร้าง และกำลังของชิ้นส่วนของโครงสร้าง ในที่ซึ่งเส้นโค้งทั้งสองนี้ทับกัน ซึ่งแสดงโดยแรเงา ผลกระทบของน้ำหนักกระทำจะมากกว่ากำลังรับแรงของชิ้นส่วนของโครงสร้าง และชิ้นส่วนนั้นก็จะเกิดการวิบัติขึ้นได้ ผู้ออกแบบจะต้องออกแบบให้โครงสร้างนั้นมีสัดส่วนที่การซ้อนทับของเส้นโค้งดังกล่าวนี้เล็กที่สุด และจะทำให้ความเป็นไปได้ของการเกิดการวิบัตินั้นต่ำเพียงพอที่จะยอมรับได้



รูปที่ 2.15 โคนกระจายความถี่

สมการพื้นฐานสำหรับการตรวจสอบภาวะขีดจำกัดต่าง ๆ นั้น เป็น ไปดังต่อไปนี้ ;

$$S^* \leq \phi R_u \quad (2.1)$$

จากสมการนี้

S^* = ผลแรงกระทำออกแบบ (ในนิวซีแลนด์ คือ แรงกระทำออกแบบ)

ϕ = ตัวประกอบกำลังรับแรง (ในนิวซีแลนด์ คือ ตัวประกอบลดกำลัง)

R_u = กำลังรับแรงระบุของชิ้นส่วน โครงสร้าง หรือ รอยต่อ

เมื่อดูจากด้านขวาของสมการ (2.1) ตัวประกอบกำลังรับแรง (ϕ) คือค่าตัวประกอบที่ใช้กับกำลังรับแรงระบุของชิ้นส่วน โครงสร้าง หรือ กำลังรับแรง เพื่อที่จะเป็นการคำนึงถึงความจริงที่ว่า กำลังรับแรงแท้จริงของวัสดุชิ้นส่วน โครงสร้างนั้นอาจจะน้อยกว่าที่คาดไว้ ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากความแปรปรวนของคุณสมบัติของวัสดุ, ขนาด, และคุณภาพการทำงาน ในบางวิธีการออกแบบในภาวะขีดสุดนั้น ตัวประกอบกำลังรับแรงนี้อาจจะเป็นค่าที่คำนึงถึง รูปแบบการวิบัติที่อาจเป็นไปได้สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้าง และความไม่แน่นอนในการคำนวณถึงกำลังรับแรงของชิ้นส่วน โครงสร้างนั่นเอง ใน AS/NZS 4600 อธิพลเหล่านี้ไม่ได้ถูกรวมเข้าไว้ใน ตัวประกอบกำลังรับแรง (ϕ) นี้ แต่ได้ถูกรวมไว้ในสูตรสำหรับกำลังรับแรงของโครงสร้างทางทฤษฎีไว้แทน (หรือกำลังรับแรงของชิ้นส่วน โครงสร้าง) ตัวประกอบกำลังรับแรง (ϕ) นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.6 ของ AS/NZS 4600

กำลังต้านทานระบุ (R_u) ของชิ้นส่วน โครงสร้างหรือจุดเชื่อมต่อ คือ กำลังรับแรงระบุซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ, ขนาดระบุ, และสมการที่พรรณนาถึงพฤติกรรมทางทฤษฎีของชิ้นส่วนหรือจุด

เชื่อมต่อของโครงสร้าง ดังนั้น ในความหมายของภาวะขีดสุดนั้น ค่ากำลังรับแรงที่ได้คำนึงถึงตัวประกอบกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้าง (ϕR_u) นั้นคือผลคูณของค่ากำลังรับแรง กับ ตัวประกอบกำลังรับแรง ดังแสดงในสมการ (2.1) และจะต้องเท่ากับ หรือ มากกว่าผลของแรงกระทำในการออกแบบ (ด้านซ้ายของสมการ (2.1)) ใน AS/NZS 4600 ค่ากำลังรับแรงที่ได้คำนึงถึงตัวประกอบกำลัง $R_d = \phi R_u$ นั้นเรียกได้ว่าเป็น ค่ากำลังรับแรงออกแบบ

ใน AS/NZS 4600 นั้นได้นำคำนิยามและเครื่องหมายต่อไปนี้มาใช้ด้วย;

น้ำหนักกระทำออกแบบ หรือ น้ำหนักออกแบบ (M^*) (ในนิวซีแลนด์ เรียกว่า แรงออกแบบ) เป็นผลรวมของน้ำหนักกระทำระบุ หรือน้ำหนักกระทำที่วางบนโครงสร้าง (ได้แก่น้ำหนักวางที่วางบนคาน) ซึ่งต้องคูณเข้ากับตัวประกอบเพิ่มน้ำหนักที่เหมาะสม ดังระบุไว้ใน AS 1170.1 หรือ NZS 4203 น้ำหนักกระทำ/น้ำหนัก/แรง สำหรับการออกแบบเหล่านี้ นั้นจะต้องได้รับการระบุไว้โดยเครื่องหมายดอกจัน (*) ที่ด้านหลังของ น้ำหนักกระทำ/น้ำหนัก ที่เหมาะสม

ผลแรงของน้ำหนักกระทำออกแบบ (S^*) (ในนิวซีแลนด์ เรียกว่า น้ำหนักกระทำออกแบบ) เป็นค่าน้ำหนักกระทำต่างๆ (โมเมนต์ดัด, แรงเฉือน, แรงตามแนวแกนที่ใช้ในการออกแบบ) ที่คำนวณจากน้ำหนักกระทำออกแบบ หรือน้ำหนักออกแบบ ซึ่งใช้การวิเคราะห์โครงสร้างแบบยึดหยุ่น (หัวข้อ 1.6.2.2(b)) ผลต่างๆเหล่านี้จะระบุโดยเครื่องหมายดอกจัน (*) ที่ด้านหลังของผลแรงของน้ำหนักกระทำที่เหมาะสม (ได้แก่ M^*)

ตัวประกอบผลรวมน้ำหนักกระทำ (ψ) เป็นค่าตัวประกอบที่คำนึงถึงผลของความน่าจะเป็นที่ถูกลดลงของจำนวนน้ำหนักกระทำที่มาจากแหล่งกำเนิดน้ำหนักต่างๆที่จะทำพร้อมๆกันได้ ดังเช่นก่อนข้างเป็นไปได้อย่างที่แรงจากลมทั้งหมดนั้นจะทำบนโครงสร้างหนึ่งๆในเวลาเดียวกันกับน้ำหนักจรรทั้งหมดด้วย ดังตัวอย่างเช่น (ψ_c) นั้นถูกระบุไว้ใน AS 1170.1 เท่ากับค่าคงที่ 0.4 เมื่อน้ำหนักบรรทุกจรรนั้นนำมาคิดร่วมกับน้ำหนักตายตัวและแรงลม AS 1170.1 ยังได้ให้รูปแบบผลรวมสำหรับกำลังรับแรง, เสถียรภาพ และ สภาวะการใช้งานอีกด้วย

ตัวประกอบของน้ำหนักกระทำ จะถูกคูณเข้ากับน้ำหนักกระทำระบุเพื่อให้ได้น้ำหนักกระทำ สำหรับการออกแบบ เพื่อเป็นการคำนึงถึงความเป็นไปได้ที่ น้ำหนักกระทำจะมีขนาดมากกว่าที่ได้คาดการณ์ไว้ และอาจจะทำบน โครงสร้าง, ความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณน้ำหนักกระทำ, และการประมาณของการวิเคราะห์ในผลของน้ำหนักที่กระทำบน โครงสร้าง ค่าตัวประกอบที่แตกต่างกันของน้ำหนักกระทำนั้น เป็นตัวสะท้อนถึงผลที่แตกต่างของน้ำหนักกระทำนั่นเอง ดังตัวอย่างเช่น ความไม่แน่นอนในการคำนวณน้ำหนักบรรทุกตายตัวนั้น จะมีน้อยกว่าความไม่แน่นอนในการคำนวณน้ำหนักบรรทุก เป็นต้น ใน AS 1170.1 และ AS 1170.4 (มีเฉพาะแรงแผ่นดินไหวเท่านั้น) ค่าตัวประกอบของน้ำหนักกระทำ สำหรับกำลังรับแรงในภาวะขีดสุดนั้น ได้กำหนดให้เป็นดังค่าต่อไปนี้

รูปแบบผลรวมน้ำหนักกระทำสำหรับกำลังรับแรงในภาวะขีดสุด (AS 1170.1, บทที่ 2.2; AS 1170.4, บทที่ 1.6.1)

- 1) $1.25G + 1.5Q$
- 2) $1.25G + W_u + \Psi_c Q$ น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวอยู่ในทิศทางเดียวกันกับ Q, W_u, F_{eq}
- 3) $G + F_{eq} + \Psi_c Q$
- 4) $0.8G + 1.5Q$
- 5) $0.8G + W_u$ น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวอยู่ในทิศทางตรงข้ามกับ(G-ve) ได้แก่แรงลมยกตัว
- 6) $0.8(G + \Psi_c Q) + F_{eq}$

G = น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว

Q = น้ำหนักบรรทุกจร

W_u = แรงลมสำหรับการคำนวณในภาวะขีดสุดประลัย

F_{eq} = แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว

Ψ_c = ตัวประกอบของรูปแบบผลรวมน้ำหนักกระทำต่างๆ (ดูตารางที่ 2.2 ของ AS 1170.1)

จากตารางที่ 2.2 ของ AS 1170.1 :

รูปแบบของน้ำหนักบรรทุกจร	Ψ_c
<u>พื้นที่</u>	
ภายในที่พักอาศัย, สำนักงาน, อาคารจอดรถ, ร้านค้า	0.4
คลังเก็บสินค้า และอย่างอื่น	0.6
<u>หลังคา</u>	
ใช้สำหรับการสัญจร	0.4
ไม่ใช่สำหรับการสัญจร	0.0

รูปแบบผลรวมน้ำหนักกระทำแบบอื่นๆสำหรับ น้ำหนักกระทำเนื่องจากหิมะ นั้นได้ให้ไว้ใน

AS 1170.3

2.8 วัสดุต่างๆ และการขึ้นรูปเย็น

2.8.1 มาตรฐานสำหรับเหล็กโครงสร้าง

มาตรฐาน AS/NZS 4600 ได้ยอมให้ใช้เหล็กโครงสร้างซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังใน 5 หมวดต่อไปนี้ ได้แก่ ;

AS 1397-1993	แผ่นเหล็ก (แบบใหญ่และแบบเล็ก) – เคลือบด้วยสังกะสีแบบจุ่มร้อน หรือ เคลือบอลูมิเนียม/สังกะสี
AS/NZS 1594-1997	ผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อน
AS 1595-1981	แผ่นเหล็ก (แบบใหญ่และแบบเล็ก) ที่ไม่ใช่อัลลอยด์ และผสมคาร์บอนต่ำขึ้นรูปเย็น
AS 1163-1991	หน้าตัดเหล็กโครงสร้างกลาง
AS/NZS 3678-1996	เหล็กโครงสร้าง – เหล็กแผ่นรีดร้อน, สำหรับทำงานพื้น

เหล็กต่างๆ ที่ผลิตตามมาตรฐาน AS 1397 นั้น โดยมากแล้วจะมีข้อกำหนดของรูปแบบ G450-Z200 ซึ่งสัญลักษณ์ตัวแรก (G) จะหมายถึงคุณสมบัติของวัสดุนั้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือได้รับการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงในแนวของการทำอบควบคุมด้วยความร้อน ก่อนทำการจุ่มร้อน, ตัวเลขสามตัวแรก (450) จะแสดงค่าหน่วยแรงครากต่ำสุดในหน่วยของ MPa ส่วนสัญลักษณ์ตัวที่สอง (Z) จะแสดงถึงการเคลือบด้วยสังกะสี และตัวเลขสามตัวถัดมา (200) แสดงถึงปริมาณการเคลือบบนผิวทั้งสองข้างของโลหะตั้งต้น ในหน่วย กรัมต่อตารางเมตรของแผ่นเหล็ก

เหล็กโครงสร้างที่ผลิตตามมาตรฐาน AS 1594 นั้น โดยมากแล้วจะเป็นไปในรูปแบบ Hd340 โดยสัญลักษณ์แรก (H) หมายถึงการเป็นเหล็กรีดร้อน และสัญลักษณ์ที่สอง (d) แสดงถึงการเป็นเหล็กโครงสร้างแบบมีขอบ ส่วนตัวเลขสามตัวถัดมา (340) จะแสดงค่าหน่วยแรงครากต่ำสุดในหน่วยของ MPa สัญลักษณ์ตัวที่สองนั้นอาจจะเป็น A (อลูมิเนียมต่ำ) K (ซิลิกอนต่ำ), U (ไม่ระบุการดึงออกซิเดชั่น) และ W (ทนทานต่อสภาพอากาศ)

เหล็กโครงสร้างที่ผลิตตามมาตรฐาน AS 1595 นั้น โดยมากแล้วจะไม่ใช่สำหรับงานโครงสร้าง จึงไม่ได้มีการระบุถึงกำลังรับแรงของเหล็ก

หน้าตัดกลางที่ผลิตตามมาตรฐาน AS 1163 นั้น โดยมากแล้วจะถูกระบุเป็น C250, C350, หรือ C450 ซึ่งสัญลักษณ์ตัวแรก (C) จะหมายถึงการขึ้นรูปเย็น และตัวเลขสามตัวนั้นคือหน่วยแรงครากระบุต่ำสุดของผิววัสดุในหน่วย MPa สัญลักษณ์เพิ่มเติม (L0) จะหมายถึงคุณสมบัติทางแรงกระแทกที่ได้รับการรับประกันของวัสดุที่ 0 องศา

เหล็กแผ่นรีดร้อนแบบ AS/NZS 3678 นั้นอาจจะใช้สำหรับการขึ้นรูปเย็นก็ได้ และเหล็กเหล่านี้ได้ถูกรวมไว้ในรายการของเหล็กที่ใช้งานได้เช่นกัน เหล็กเหล่านี้ได้ถูกเพิ่มเข้ามาตั้งแต่ฉบับปรับปรุงก่อนหน้าของ AS 1538-1988

หน่วยแรงครากต่ำสุดและกำลังรับแรงดึงสำหรับเหล็กพวก AS 1163, as 1397, as 1594, as 1595, และ AS/NZS 3678 ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1.5 ของ AS/NZS 4600 คุณสมบัติอื่นๆนั้นรวมถึงการยึดตัวสำหรับเหล็กที่นิยมใช้งานกัน เช่นเหล็กใน AS 1397, AS 1594, และ AS 1163 ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าต่ำสุดของหน่วยแรงคราก, กำลังรับแรงดึง และการยึดตัว

มาตรฐาน ออสเตรเลีย	การระบุเกรด คุณภาพ	หน่วยแรงคราก ต่ำสุด, f_y (MPa)	กำลังรับแรงดึง ต่ำสุด, f_u (MPa)	ค่าการยึดตัวต่ำสุด (%) ที่ความยาวเดิม 50 มม. (ความหนา ไม่เกิน 3 มม.**)
AS 1163	C250, C250L0	250	320	22 (CHS)
	C350, C350L0	350	430	18 (RHS)
	C450, C450L0	450	500	20 (CHS)
				16 (RHS)
				16 (CHS)
			14 (RHS)	
AS 1397	G250	250	320	25
	G300	300	340	20
	G350	350	420	15
	G450	450	480	10
	G500	500	520	8
	G550	550	550	***2
AS 1594*	Hd200	200	300	24
	Hd250	250	350	22
	Hd300	300	400	20
	Hd300/1	300	430	20
	Hd350	350	430	18
	HW350	340	450	-
	Hd400	380	460	16

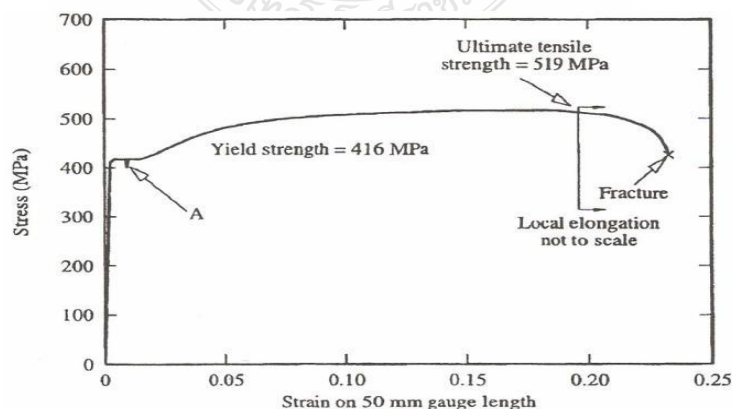
* อักษร d แสดงถึงการดัดออกซีเดชั่น ซึ่งอาจจะเป็น U, K, หรือ A ส่วน W แสดงถึงระดับความทนทานต่ออากาศ

** สำหรับเหล็กแบบ AS 1163 การยึดตัวนั้นจะเป็นอัตราส่วนกับความยาวเดิมของ $5.65\sqrt{S_0}$ โดย S_0 คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ

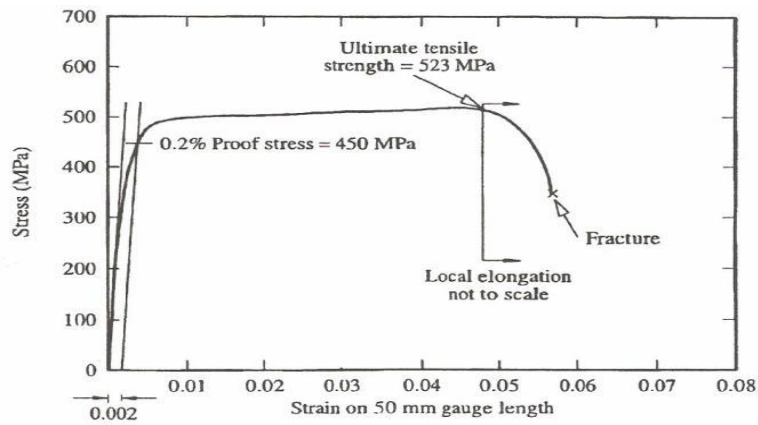
*** เฉพาะกับเหล็กที่หนาดั้งแต่ 0.6 มม. ขึ้นไป

2.8.2 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด

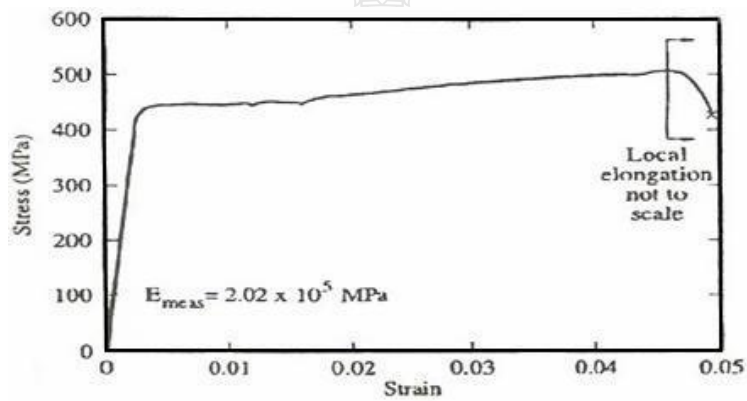
เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดสำหรับตัวอย่างเหล็กหนา 1.6 มม. เกรด G300 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน AS 1397 นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดนี้เป็นรูปแบบทั่วไปสำหรับเหล็กขึ้นรูปเย็น และเหล็กคาร์บอนต่ำที่ผ่านการอบคลายตัวแล้ว พื้นที่ที่เป็นเส้นตรงนั้นจะอยู่ก่อนถึงยอด ณ จุดในค่า 416 MPa ซึ่งเห็นการเปลี่ยนแปลงของกราฟอย่างชัดเจน หลังจากนั้นจะเกิดการแข็งตัวของความเครียด (Strain Hardening) ไปจนถึงจุดกำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กที่ 519 MPa เมื่อมีการหยุดเครื่องดึงเหล็กเป็นเวลา 1 นาทีในระหว่างยอดที่เกิดการคราก ดังแสดงด้วยจุด A ในรูปที่ 2.1 ซึ่งจะทำให้เกิดการคลายกำลังครากลงมาเหลืออยู่ที่ 398 MPa การลดลงนี้เป็นผลของการลดลงของอัตราความเครียดซึ่งเป็น 0 ที่ยอดของ 416 MPa นั้น จะเกิดการเพิ่มค่าขึ้นเพราะอัตราของความเครียด ค่าการยืดตัวที่ความยาวเกจเริ่มต้น 50 มม. ณ จุดแตกหักนั้น มีค่าประมาณ 23% คุณสมบัติทางกายภาพทั้งหมดนี้ซึ่งได้แสดงไว้ใน AS 1397 นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดทั่วไปสำหรับ เหล็กเกรด G450 หนา 1.6 มม. ที่ผลิตตามมาตรฐาน AS 1397 นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 โดยเหล็กนั้นได้ผ่านการลดเย็น (การรีดร้อน) ในระหว่างกระบวนการผลิต และดังนั้น จึงไม่ได้แสดงจุดครากที่ชัดเจนเหมือนในกรณีของ เหล็ก G300 ค่าความชันแรกของเส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดนั้นอาจทำให้ต่ำลงได้จากผลของงานแรกๆ เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดนั้นจะเริ่มแตกต่างไปจากความเป็นเส้นตรง (ขีดจำกัดสัดส่วน) ที่ค่าประมาณ 250 MPa และจุดครากนั้นจะหาได้จากค่า 0.2% ของความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) (ดังระบุไว้ใน AS 1391 [33] และเป็น 450 MPa ค่ากำลังรับแรงดึงประลัยคือ 523 MPa และค่าการยืดตัว ณ จุดแตกหักที่ค่าความยาวเกจเริ่มต้น 50 มม. นั้นเป็น 10% โดยประมาณ ค่าการยืดตัว ณ จุดแตกหักที่แสดงให้เห็นในกราฟเป็นค่าที่ต่ำ เนื่องจากข้อจำกัดทางเครื่องมือวัดการยืดหดนั่นเอง กราฟในช่วงที่เส้นโค้งตกลงนั้นถูกพล็อตในค่าความเร็วการยืดตัวที่คงที่



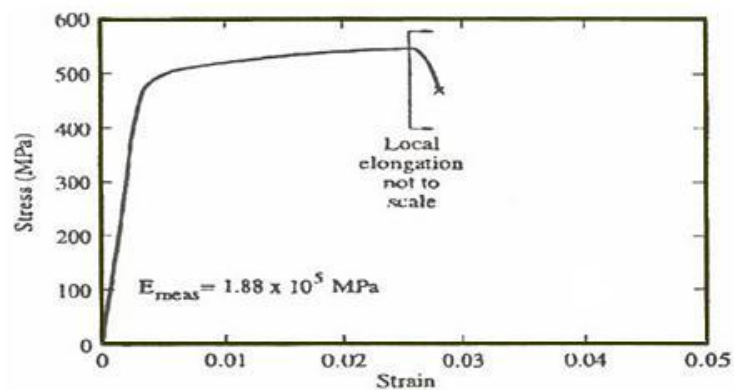
รูปที่ 2.16 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น- ความเครียดของตัวอย่างเหล็ก เกรด G300 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน AS 1397



รูปที่ 2.17 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น- ความเครียดของตัวอย่างเหล็กเกรด G450 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน AS 1397



ก) Stress-strain curve (flat)



ข) Stress-strain curve (corner)

รูปที่ 2.18 เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น- ความเครียดของตัวอย่างเหล็กเกรด G350 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน AS 1163

รูปแบบโดยทั่วไปของเส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กหนา 2 มม. ที่ผลิตตามมาตรฐาน AS 1163 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 AS 1163 นั้นถือว่าเป็นข้อกำหนดรายละเอียดสำหรับหน้าตัดเหล็กกลวง และได้กำหนดไว้ว่า ตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงดึงของเหล็กประเภทนี้ให้ใช้จากส่วนที่แบนของหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.18(ก) นั้นเป็นสำหรับตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงดึงที่นำมาจากส่วนที่แบนของหน้าตัด โดยเป็นไปตาม AS 1163 และเส้นโค้ง ที่ได้แสดงในรูปที่ 2.18(ข) นั้นสำหรับตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงดึงที่นำมาจากส่วนบริเวณมุมของหน้าตัด ซึ่งส่วนตัวอย่างแบบแบนนั้นจะแสดงยอดของจุดคราก ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจาก strain aging ตามการผลิตซึ่งที่มุมของชิ้นตัวอย่างนั้นจะแสดงให้เห็นถึงผลของการขึ้นรูปเย็นของเหล็ก (ดูรูปที่ 2.20) ค่าโมดูลัสของยังก์ (E_{meas}) ของชิ้นส่วนบริเวณมุนั้นจะต่ำกว่าชิ้นส่วนจากส่วนแบน ซึ่งเป็นเพราะผลของการเตรียมชิ้นงานที่ดีกว่า

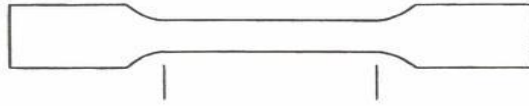
2.8.3 ความเหนียว

เหล็กส่วนมากที่ใช้สำหรับงานโครงสร้างเหล็กที่ทำจากเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้น จะเป็นประเภทที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 และ 2.18 เหล็กเหล่านี้จะมีกำลังรับแรงดึงสูง และโดยมากจะมีข้อจำกัดในด้านความเหนียว อันเป็นผลมาจากกระบวนการผลิต คำถามจึงมีขึ้นมาว่า ค่าความเหนียวที่เพียงพอเป็นเท่าใด สำหรับการใช้งานเหล็กนี้ในชิ้นส่วนของโครงสร้างโดยรวมถึงการขึ้นรูปเย็นที่มีบริเวณมุมของชิ้นส่วนเหล็ก, การเจาะรู สำหรับนอตยึด และ รอยเชื่อมต่างๆ บทความวิชาการสองฉบับของ Dhalla และ Winter [34,35] นั้นได้พยายามที่จะนิยามถึงความเหนียวที่พอเพียงในบริบทนี้

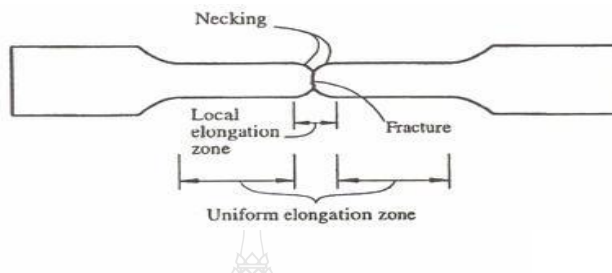
ความเหนียวนั้นคือความสามารถของวัสดุที่จะรองรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดแบบพลาสติกโดยปราศจากการวิบัติ สิ่งนี้จะลดผลซึ่งเป็นอันตรายจากความเข้มข้นของหน่วยแรงและยอมทำให้เกิดการขึ้นรูปเย็นของชิ้นส่วนโครงสร้างโดยไม่มีกรทำให้คุณสมบัติหรือพฤติกรรมของวัสดุแย่ลงไป การวัดความเหนียวแบบทั่วไปนั้นจะเป็นไปตาม AS 1391 โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวแบบถาวรหลังจากการวิบัติในความยาวเกจเริ่มต้น 50 มม. ของรูปแบบการวัดแรงดึงมาตรฐาน สำหรับเหล็กรีดร้อน และเหล็กรีดเย็นทั่วไปนั้น ค่านี้จะมีค่าประมาณ 20-30%

ชิ้นส่วนทดสอบแรงดึงก่อนและหลังการทดสอบวัดแรงดึงอย่างง่ายนั้น ได้แสดงในรูปที่ 2.20 (ก) และ 2.20 (ข) ตามลำดับ หลังการทดสอบ ความยาวทดสอบที่ประมาณ 75 มม. นั้นได้ผ่านการยืดตัวแบบสมำเสมอ ดังเป็นผลอันเนื่องมาจากการครากและ Strain Hardening การยืดตัวแบบสมำเสมอนั้นมาจากจุดครากจนถึงค่ากำลังรับแรงดึงประลัย ดังแสดงในรูปที่ 2.20(ค) หลังจากการผ่านค่ากำลังรับแรงดึงประลัยแล้ว การถอดตัวของวัสดุนั้นจะเกิดขึ้นที่ค่าความยาวที่สั้นกว่ามาก (โดยมากแล้วจะยาวประมาณ 12.5 มม.) ดังแสดงในรูปที่ 2.20(ข) และก็จะสิ้นสุดลงหลังการวิบัติตัวของชิ้นทดสอบ การยืดตัวในส่วนที่ลอดนั้นเรียกว่า การยืดตัวเฉพาะที่ การประมาณค่าอีกรูปแบบหนึ่งของความเหนียวเฉพาะที่นั้นสามารถทำได้โดยการคำนวณค่าอัตราส่วนของพื้นที่ที่ลดลงที่จุดวิบัติกับ

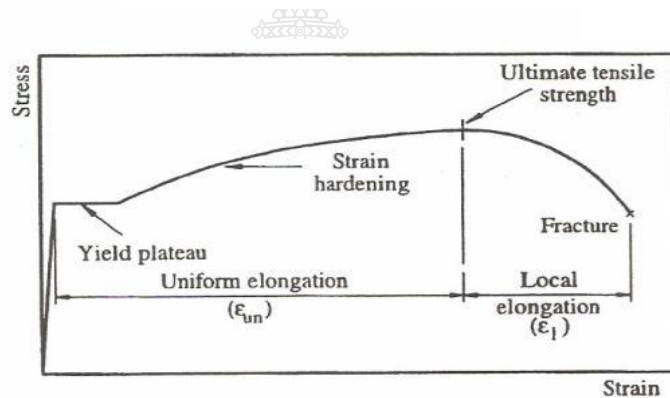
พื้นที่เดิม การวัดแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบที่มันจะไม่ขึ้นกับความยาวสำหรับการวัดเหมือนกับการยึดตัวแบบเฉพาะที่ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะยากกว่า



ก) ตัวอย่างการทดสอบแรงดึงก่อนการทดสอบ



ข) ตัวอย่างการทดสอบแรงดึงหลังการทดสอบ



ค) เส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กกรัดร้อน

รูปที่ 2.20 การวัดความเหนียว

Dhalla และ Winter ได้ทดสอบเหล็กหลายแบบซึ่งมีค่าอัตราส่วนของการยึดตัวแบบสมำเสมอต่อการยึดตัวแบบเฉพาะที่ ทั้งมากและน้อย วัตถุประสงค์ของการทดสอบดังกล่าวคือเพื่อหาว่าทั้งการยึดตัวแบบสมำเสมอ หรือ การยึดตัวแบบเฉพาะที่ นั้นมีประโยชน์ในการให้ความเหนียวที่พอเพียงหรือไม่ และเพื่อหาค่าต่ำสุดของความเหนียวแบบสมำเสมอ และความเหนียวแบบเฉพาะที่ เหล็กต่างๆ ที่ถูกทดสอบมีตั้งแต่เหล็กแบบ Cold-reduced ซึ่งมีค่าการยึดตัวแบบสมำเสมอ 0.2% และการยึดตัวรวม 5% ไปจนถึงเหล็กอบคลายตัว ซึ่งมีค่าการยึดตัวแบบสมำเสมอ 36% และการยึดตัวรวม 50% นอกจากนั้นแล้ว เหล็กซึ่งมีค่าการยึดตัวรวม 1.3% ก็ได้รับการทดสอบด้วย หลังจากนั้นการวิเคราะห์ในส่วนของอีลาสติก-พลาสติก ของเหล็กที่ประกอบไปด้วยรู และการบากก็ได้

ดำเนินการด้วยเพื่อหาค่าความเหนียวแบบสม่ำเสมอต่ำสุดที่จำเป็นเพื่อให้แน่ใจต่อการครากเต็มของหน้าตัดที่มีรู หรือรอยบาก โดยจุดที่ก่อให้เกิดค่ากำลังรับแรงดึงประลัยนั้น ไม่เกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นรู หรือรอยบากนั่นเอง

ได้มีข้อเสนอแนะสำหรับข้อกำหนดในด้านความเหนียวดังต่อไปนี้ เพื่อให้แน่ใจในพฤติกรรมที่ดีเพียงพอสำหรับ ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กแบบบางภายใต้น้ำหนักกระทำแบบอยู่กับที่ โดยได้ถูกรวบรวมไว้ในหัวข้อ 1.5.1.5(a) ของ AS/NZS 4600 ข้อกำหนดด้านความเหนียวของการยึดตัวแบบสม่ำเสมอ ภายนอกขอบเขตของการวิบัติ คือ

$$\epsilon_{un} \geq 3.0 \text{ percent} \quad (2.2)$$

ข้อกำหนดด้านความเหนียวของการยึดตัวแบบเฉพาะที่ ภายใต้ความยาวสำหรับการวัดที่ 12.5 มม. คือ

$$\epsilon_t \geq 20 \text{ percent} \quad (2.3)$$

ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกันสำหรับการใช้พื้นที่ที่ลดลง คือ พื้นที่ที่ลดลงนั้นควรจะน้อยกว่า 80% ของพื้นที่เดิม

ข้อกำหนดด้านความเหนียวสำหรับค่าอัตราส่วนของกำลังรับแรงดึง (f_u) ต่อกำลังคราก (f_y) คือ

$$f_u/f_y \geq 1.05 \quad (2.4)$$

ข้อกำหนดแรกสำหรับการยึดตัวแบบสม่ำเสมอนั้นจะขึ้นกับการวิเคราะห์แบบอิลาสติก-พลาสติก ส่วนข้อกำหนดที่สองสำหรับการยึดตัวแบบเฉพาะที่นั้นจะขึ้นกับผลการทดสอบของเหล็ก โดยค่าการยึดตัวแบบสม่ำเสมอที่ต่ำ และเหล็กทดสอบประกอบไปด้วยรูซึ่งสามารถวัดค่าการยึดตัวแบบเฉพาะที่ได้มากกว่า 20% และก่อให้เกิดสภาพพลาสติกแบบสมบูรณ์ที่หน้าตัดวิกฤต ข้อกำหนดที่สามนั้นจะขึ้นกับการสังเกตว่า มีสหสัมพันธ์ค่อนข้างสูง ระหว่างค่าการยึดตัวแบบสม่ำเสมอ และอัตราส่วนของกำลังรับแรงดึงประลัยต่อกำลังรับแรงครากของเหล็ก (f_u/f_y)

ข้อกำหนดที่แสดงโดยสมการที่ 2.2 และ 2.3 นั้นสามารถที่จะเปลี่ยนไปเป็นข้อกำหนดโดยทั่วไปดังได้แสดงไว้ใน AS 1391 สำหรับการยึดตัวรวม ณ จุดวิบัติ การใช้ความยาวเกจเริ่มต้นที่ 50 มม. และสมมติให้เกิดการคอดที่เกิดขึ้นนั้นมีความยาว 12.5 มม. แล้ว

$$\epsilon_{50 \text{ mm}} = \epsilon_{un} + 12.5 (\epsilon_t - \epsilon_{un}) / 50$$

(2.5)

โดยการแทนที่สมการที่ 2.1 และ 2.2 ลงในสมการที่ 2.4 เราจะได้

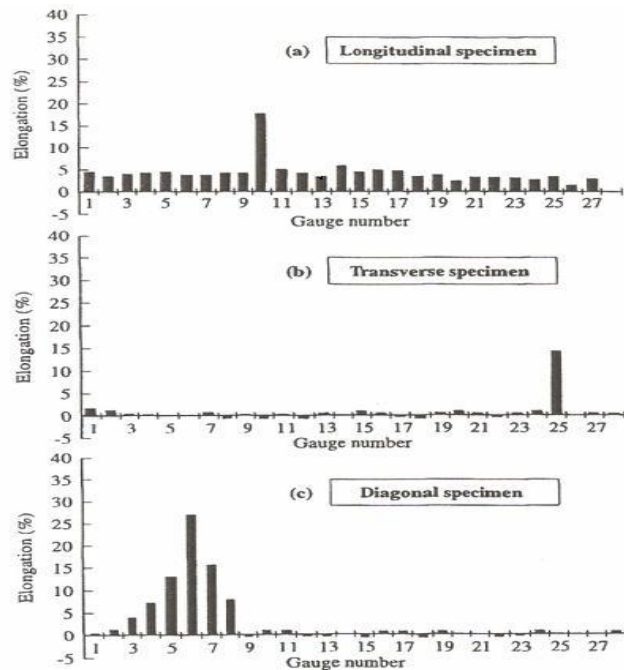
$$\epsilon_{50 \text{ mm}} = 7.25 \text{ percent}$$

(2.6)

ค่านี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับ ค่าซึ่งระบุไว้สำหรับ ค่าความยาวเกร็ดเริ่มต้น 50 มม. ใน AS 1397 ซึ่งเป็น 8% สำหรับเหล็กเกรด G500 และ 10% สำหรับเหล็กเกรด G450 ดังในตารางที่ 2.2 สำหรับเหล็กเกรด G550 ซึ่งมีความหนาเพียง 0.9 มม. นั้นจะเป็นไปตามข้อกำหนดในด้านการยึดตัวแบบเฉพาะที่ และแบบสม่ำเสมอตามข้อกำหนดในสมการที่ 2.2 และ 2.3 [36] และจึงได้ถูกรวมไว้ในรายการของเหล็กที่ใช้งานได้ ใน AS/NZS 4600 หัวข้อที่ 1.5.1.1

หัวข้อที่ 1.5.1.5(b) ของ AS/NZS 4600 นั้นได้กล่าวว่าเหล็กที่เป็นไปตาม AS 1397 เกรด G550 ที่บางกว่า 0.9 มม. และเหล็กแบบอื่นที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของ Dhalla และ Winter นั้นอาจจะใช้ได้กรณีเฉพาะซึ่งให้กำหนดให้ค่าหน่วยแรงครากสำหรับการออกแบบ และค่ากำลังรับแรงดึงสำหรับการออกแบบนั้นเป็น 75% ของ 550 MPa ซึ่งก็คือ 413 MPa

ในการศึกษาเมื่อไม่นานมานี้สำหรับเหล็กเกรด G550 ใน AS 1397 ซึ่งมีความหนา 0.42 และ 0.60 มม. ของ Roger และ Hancock [5] เพื่อที่จะยืนยันถึงความเหนียวของเหล็กเกรด G550 และเพื่อทดสอบความถูกต้องของหัวข้อ 1.5.1.5(b) ค่าการกระจายตัวของการยึดตัวซึ่งเป็นตัวแทน ในสามรูปแบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 สำหรับชิ้นส่วนเหล็กทดสอบแบบไม่มีรู ซึ่งเป็นแบบหนา 0.42 มม. ของเหล็กเกรด G550 ใน (a) ตามทิศทางตามยาวของการรีดแผ่นแถบเหล็ก (b) ตามทิศทางขวาง, และ (c) ตามทิศทางแนวทแยง แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะได้รับการทดสอบจนเกิดการวิบัติ โดยทั่วไปนั้นเหล็กทดสอบเกรด G550 ตามทางยาวซึ่งถูกเคลือบ นั้นจะมีค่าการยึดตัวแบบสม่ำเสมอที่คงที่ในช่วงความยาวทดสอบ 2.5 มม. ด้วยการเพิ่มในเปอร์เซ็นต์ของการยึดตัวที่ความยาวทดสอบ ณ การวิบัติที่เกิดขึ้นดังในรูปที่ 2.21(a) ชิ้นส่วนทดสอบเกรด G550 ตามแนวขวางนั้นแสดงให้เห็นว่าไม่มีการยึดตัวแบบสม่ำเสมอเกิดขึ้นเลย แต่มีการยึดตัวที่ถูกจำกัดไว้ ณ จุดวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.21(b) ชิ้นส่วนทดสอบที่ทดสอบในแนวทแยงนั้น ได้แสดงผลดังในรูปที่ 2.21(c) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการยึดตัวแบบสม่ำเสมอนั้นถูกจำกัดไว้ที่ภายนอกพื้นที่ 12.5 มม. รอบๆ พื้นที่วิบัติ ซึ่งการยึดตัวแบบเฉพาะที่นั้นเกิดขึ้นในความยาวที่เกิดการวิบัตินั้นเองดังเช่นในช่วงความยาวที่ต่อกัน ผลการทดสอบเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าเหล็กเกรด G550 นั้นมีความเหนียวที่ขึ้นกับทิศทางของแรงดึงที่ชิ้นส่วนทดสอบได้รับ เหล็กจะไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของ Dhalla และ Winter ซึ่งได้อธิบายด้านบน ยกเว้นสำหรับการยึดตัวแบบสม่ำเสมอในทิศทางตามแนวแกน



รูปที่ 2.21 การยืดตัวของเหล็กเกรด G550 หนา 0.42 มม.

การศึกษาที่ทำโดย Roger และ Hancock [37] ยังได้ทำการทดสอบสำหรับชิ้นส่วนทดสอบแบบมีรู เพื่อหาค่ากำลังวิกฤติของหน้าตัดสุทธิของหน้าตัดที่มีรู ชิ้นส่วนทดสอบนั้นถูกทดสอบทั้งในแนวตามความยาว, ทางขวาง, และทางทแยง ดังได้อธิบายไว้ในย่อหน้าที่แล้ว พบว่า ทั้งๆที่มีค่าการยืดตัวที่ต่ำสำหรับเหล็กแบบนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 เราสามารถคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักของเหล็กเกรด G550 ซึ่งได้ทดสอบในชิ้นทดสอบแบบมีรู โดยผ่านศูนย์ถ่วงของชิ้นทดสอบนั้น ได้อย่างน่าพอใจ โดยการใช้ขั้นตอนการออกแบบในภาวะวิกฤติที่มีอยู่ โดยอาศัยการคำนึงถึงการวิบัติบนหน้าตัดสุทธิ โดยไม่จำเป็นต้องมีการจำกัดค่ากำลังรับแรงดึงที่ 75% ของ 550 MPa ดังได้ระบุไว้ในหัวข้อ 1.5.1.5(b) ของ AS/NZS 4600

2.8.4 ผลกระทบของการขึ้นรูปเย็นต่อเหล็กโครงสร้าง

บทความวิชาการโดย Chajes, Britvec และ Winter [38] ซึ่งได้อธิบายถึงการศึกษาโดยละเอียดสำหรับผลกระทบของความเครียดในการขึ้นรูปเย็นที่มีต่อคุณสมบัติทางความเค้น-ความเครียด ของเหล็กแผ่น โครงสร้างที่มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ การศึกษานี้รวมถึงการทดสอบแรงอัดและแรงดึงของวัสดุที่ถูกยึดในภาวะเย็นทั้งในทิศทางก่อนการยืด และในทิศทางขวางด้วย วัสดุที่ได้ทำการศึกษา ประกอบด้วย;

1. เหล็กแผ่นม้วนรีดเย็นแบบเนื้อแน่น ซึ่งผ่านการอบคลายตัว (Cold-reduced Annealed

Temper-rolled Killed Sheet Coil)

2. เหล็กแผ่นม้วนรีดเย็นแบบผิวบริสุทธิ์ ซึ่งผ่านการอบคลายตัวหลังรีดเย็นแบบ (Cold-reduced Annealed Temper-rolled Rimmed Sheet Coil)

3. เหล็กแผ่นม้วนรีดร้อนแบบกึ่งเนื้อแน่น (Hot-rolled Semi-killed Sheet Coil)

4. เหล็กแผ่นม้วนรีดร้อนแบบผิวบริสุทธิ์ (Hot-rolled Rimmed Sheet Coil)

ในความหมายของคำว่า Rimmed, Killed, Semi-killed ที่ได้กล่าวด้านบนนั้นจะอธิบายถึงวิธีการกำจัดหรือลดปริมาณของออกซิเจนจากเหล็กหลอม ในเหล็กแบบ Rimmed นั้น ออกซิเจนจะรวมเข้ากับคาร์บอนในระหว่างการแข็งตัว และจะก่อให้เกิดก๊าซผ่านเหล็กหลอมเหลว ซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สที่บางส่วนนั้นมีส่วนคล้ายๆเป็นวงขึ้นมา ซึ่งค่อนข้างจะมีความบริสุทธิ์มากกว่าด้านในของแท่งเหล็ก เหล็กแบบ Killed นั้นจะถูกดีออกไซด์โดยการเติมซิลิคอนหรืออลูมิเนียมเข้าไปเพื่อไม่ให้เกิดก๊าซเข้ามา และจะมีคุณสมบัติวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันมากยิ่งขึ้น เหล็กของออสเตรเลียส่วนมากนั้นจะเป็นแบบหล่อต่อเนื่องและเป็นแบบที่มีปริมาณของซิลิคอนหรืออลูมิเนียมต่ำ (Aluminium Killed, Silicon Killed)

ชุดของข้อสรุปที่มีนัยสำคัญนั้นได้มาจากเอกสารอ้างอิง [38] และสามารถอธิบายได้โดยการอ้างอิงกับรูปที่ 2.22 ข้อสรุปสำคัญๆ นั้น ได้แก่;

1. การขึ้นรูปเย็น นั้นมีผลที่เด่นชัดต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ทั้งในทิศทางที่ทำการยืดตัวและในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางดังกล่าว

2. การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดึงครากและกำลังรับแรงดึงประลัยที่เกิดขึ้นกับการลดลงของความเหนียวนั้น ถูกพบว่าขึ้นโดยตรงกับปริมาณการขึ้นรูปเย็นที่ทำ สิ่งนี้สามารถเห็นได้จากรูปที่ 2.22 (ก) ซึ่งเส้นโค้งของการเพิ่มน้ำหนักกระทำแบบจับปล้นนั้นสามารถย้อนกลับไปสู่เส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดตั้งต้นในช่วงที่เกิด Strain-hardening แล้ว

3. การเปรียบเทียบของกำลังรับแรงดึงครากกับกำลังรับแรงอัดสำหรับขึ้นทดสอบที่รับแรงทั้งแนวขวางและแนวยาวนั้นได้แสดงให้เห็นถึงผลของ Bauschinger [7] ในรูปที่ 2.22 (ข) ขึ้นทดสอบที่รับแรงในทิศทางตามยาวนั้นได้แสดงให้เห็นว่ามีค่ากำลังรับแรงดึงครากสูงกว่ากำลังรับแรงอัดคราก ในขณะที่รูปที่ 2.22 (ค) นั้น ขึ้นทดสอบที่รับแรงในทิศทางตามขวางของเหล็กแบบเดียวกัน และมีระดับของการขึ้นรูปเย็นเท่ากันนั้น ได้แสดงให้เห็นว่ามีค่ากำลังรับแรงดึงครากต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดคราก

4. โดยทั่วไปแล้วนั้น ถ้าอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดึงประลัยต่อกำลังครากมีค่าสูง ก็จะทำให้มีผลของการเกิด Strain Hardening ในระหว่างการขึ้นรูปเย็นสูงตามไปด้วย

5. Ageing ของเหล็กจะเกิดขึ้นถ้าอยู่ในสภาพอุณหภูมิหนึ่งเป็นระยะเวลาหลายสัปดาห์หรือ ในระยะเวลาที่สั้นกว่ามากๆแต่ที่อุณหภูมิสูง ดังได้แสดงในรูปที่ 2.22(ง) ผลของ Ageing ของ

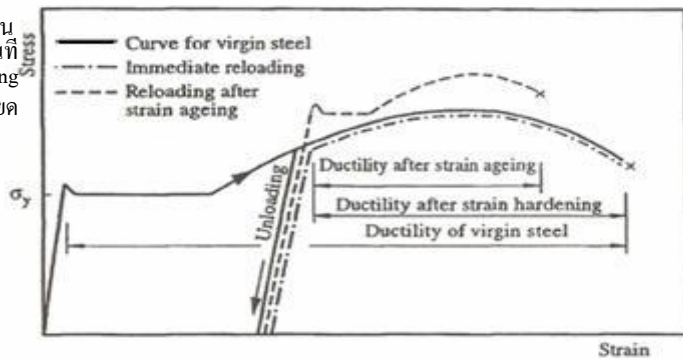
ชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้น ได้แก่

ก. เพิ่มกำลังรับแรงดึงคราก และกำลังรับแรงดึงประลัย

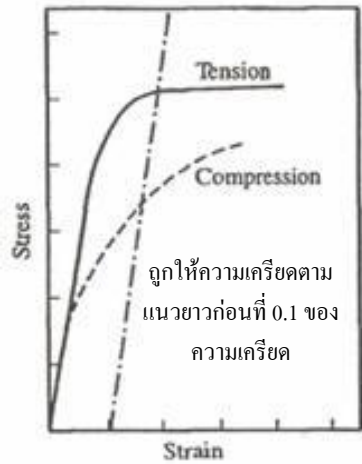
ข. ลดความเหนียวของเหล็ก

ค. พื้นคุณสมบัติทางการครากของเหล็กแบบจับปล้น ทั้งแบบสมบูรณ์หรือบางส่วน

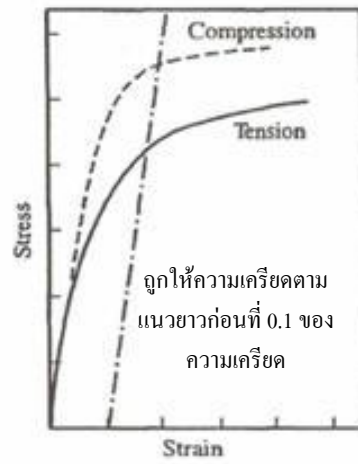
เส้นโค้งสำหรับเหล็กบริสุทธิ์ตั้งต้น ควรเพิ่มน้ำหนักในทันที การเพิ่มน้ำหนักหลังจาก ageing ของความเครียด



ก) Effect of strain hardening and strain ageing



ข) ชิ้นทดสอบในทิศทางตามยาว



ค) ชิ้นทดสอบในทิศทางตามขวาง

Compression = อัด
Tension = ดึง

รูปที่ 2.22 ผลกระทบของการขึ้นรูปเย็นที่มีต่อพฤติกรรมทางด้านความเค้น- ความเครียด

ส่วนของเหล็กโครงสร้างที่มีการขึ้นรูปสูง เช่นบริเวณมุมของท่อเหล็กขึ้นรูปเย็นนั้นจะมีคุณลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.18(ข) คือไม่มีการฟื้นคืนคุณสมบัติการครากของเหล็กแบบจับปล้น ส่วนในเหล็กบางประเภท ซึ่งได้แก่เหล็กแบบรีดเย็นแบบเนื้อแน่น ดังได้อธิบายในเอกสารอ้างอิง [38] นั้นจะไม่เห็นการ Ageing ของเหล็กนี้

2.8.5 คุณสมบัติบริเวณมุมของหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็น

ดังผลลัพธ์ของคุณสมบัติของเหล็กขึ้นรูปเย็นดังได้อธิบายในข้อที่ 2.8.4 แล้วนั้น กระบวนการขึ้นรูปสำหรับหน้าตัดขึ้นรูปเย็นจะมีผลให้เกิดการเพิ่มของกำลังรับแรงดึงครากและกำลังรับแรงดึงประลัย ในจุดที่เป็นมุม (จุดตัด) ดังได้แสดงในรูปที่ 2.14 สำหรับหน้าตัดกลวงสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับหน้าตัดที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นดังได้แสดงในรูปที่ 1.9 หัวข้อที่ 1.5.1.3 ของ AS/NZS 4600 ซึ่งให้สูตรในการคำนวณค่ากำลังรับแรงครากที่เพิ่มขึ้นที่มุม (f_{yc}) สูตรเหล่านี้หามาได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [38] ข้อสรุปย่อของสูตรเหล่านี้และหลักการทางทฤษฎีและการทดลองนั้นเป็นดังต่อไปนี้

คุณสมบัติทางความเค้นประสิทธิผล-ความเครียด ($\sigma-\epsilon$) ของเหล็กในส่วนซึ่งเป็นแบบพลาสติกของเส้นโค้งความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด นั้นได้ถูกสมมติให้แทนได้โดยฟังก์ชันยกกำลังดังแสดงในสมการที่ 2.7 นี้

$$\sigma = k \epsilon^n \quad (2.7)$$

โดยที่ k คือสัมประสิทธิ์กำลัง และ n คือตัวเลขชี้กำลังของ Strain Hardening ค่าความเค้นประสิทธิผล (σ) นี้ได้ถูกนิยามไว้โดยกฎแห่งการครากและพลังงานการผิดรูปของ Von Mises [41] และค่าความเครียดประสิทธิผล (ϵ) นี้ก็ได้รับการนิยามไว้แบบเดียวกัน ในเอกสารอ้างอิง [40] ค่า k และ n นี้จะหามาจากการทดสอบในเหล็กประเภทต่างๆ ที่ระบุไว้ในบทที่ 2.4 เป็น

$$k = 2.80 f_{yv} - 1.55 f_{uv} \quad (2.8)$$

$$n = 0.255 (f_{uv} / f_{yv}) - 0.120 \quad (2.9)$$

โดย f_{yv} นั้นคือค่ากำลังรับแรงครากตั้งต้น และ f_{uv} เป็นค่ากำลังรับแรงดึงประลัยตั้งต้น สมการดังกล่าวสำหรับโมเดลการวิเคราะห์ที่มุม นั้นได้มาจากสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ความเครียดในทิศทางตามยาวระหว่างการขึ้นรูปเย็นนั้นสามารถไม่คำนึงถึงได้ และยังคงมีสภาพของระนาบความเครียดอยู่
2. ความเครียดในทิศทางเส้นรอบรูปนั้น จะมีขนาดเท่ากับกับความเครียดในทิศทางของรัศมี แต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกัน ซึ่งเป็นไปตามหลักของปริมาตรคงที่ สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขนาดใหญ่ในแบบพลาสติก
3. เส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดประสิทธิผลดังสมการ 2.7 นั้นสามารถอินทิเกรตได้บนพื้นที่ของมุมที่เกิดความเครียดนั้น สมการผลลัพธ์สำหรับกำลังรับแรงดึงครากที่จุดมุม คือ

$$f_{yc} = \frac{B_c f_{yv}}{\left(\frac{r_i}{t}\right)^m} \quad (2.10)$$

โดยที่

$$B_c = \frac{kb}{f_{yv}} \quad (2.11)$$

$$b = 0.045 - 1.315 n \quad (2.12)$$

$$m = 0.803 n \quad (2.13)$$

และค่า r คือค่ารัศมีภายใน สมการที่ 2.12 และ 2.13 นั้น ได้มาจากผลการทดลอง ถ้าแทนที่สมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 ลงในสมการที่ 2.11 และ 2.12 และกำจัดค่า b , จะได้

$$B_c = 3.69 \left(\frac{f_{uv}}{f_{yv}} \right) - 0.819 \left(\frac{f_{uv}}{f_{yv}} \right)^2 - 1.79 \quad (2.14)$$

โดยเป็นสมการที่ 1.5.1.3(3) ใน AS/NZS 4600 และโดยการแทนสมการที่ 2.9 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้

$$m = 0.192 \left(\frac{f_{uv}}{f_{yv}} \right) - 0.068 \quad (2.15)$$

ซึ่งเป็นสมการที่ 1.5.1.3(4) ใน AS/NZS 4600 จากสมการที่ 2.10, 2.14, 2.15 เราสามารถทราบได้ว่า เหล็กที่มีอัตราส่วนของ (f_{uv} / f_{yv}) ที่สูงนั้นจะมีความสามารถในการเกิด Strain Hardening ได้มากกว่า พวกที่มีค่าดังกล่าวที่ต่ำ นอกจากนั้น ค่าอัตราส่วนของรัศมีต่อความหนา (r/t) ที่ต่ำเท่าใดนั้น ก็จะทำให้มีค่ากำลังรับแรงครากที่ดีขึ้นได้ สูตรต่างๆ ได้รับการปรับเทียบผ่านการทดลองโดยการเลือก ระหว่าง b และ m ในสมการที่ 2.12 และ 2.13 สำหรับ :

1. r_1 / t ที่น้อยกว่า 7
2. f_{uv} / f_{yv} ที่มากกว่า 1.2
3. ค่ามุมการตัดต่ำสุดที่ 60 องศา

สูตรต่างๆ เหล่านี้ถือว่าไม่สามารถนำมาใช้ได้นอกเหนือขอบเขตดังกล่าวด้านบน ค่าหน่วยแรงครากเฉลี่ยของหน้าตัดที่มีผลของการขึ้นรูปเย็นที่มุนั้นสามารถคำนวณได้โดยง่าย โดยการใช้ผลรวมของ ผลคูณระหว่างพื้นที่ของส่วนที่แบนและส่วนที่เป็นมุม กับ ค่ากำลังรับแรงครากในแต่ละส่วนนั่นเอง

โดยค่าต่างๆดังกล่าวนั้น จะเรียกว่าเป็นกำลังรับแรงครากตั้งต้น (f_{yv}) และกำลังรับแรงดึงครากที่ปรับปรุงขึ้น (f_{yc}) ตามลำดับ ดังได้กำหนดไว้ใน AS/NZS 4600

2.8.6 ความแกร่งก่อนการแตกหัก

ในบางตัวอย่างนั้น โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบและเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบสำหรับแรงคงที่อย่างเหมาะสมแล้วอาจจะเกิดการวิบัติได้โดยการแตกหักที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งๆ ที่มีการใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัย หรือ Safety Factor อย่างถูกต้อง และไม่ได้มีการใช้น้ำหนักบรรทุกมากเกินไปกว่าที่กำหนดเช่นกัน สาเหตุของการวิบัติเช่นนี้นั้นเกิดขึ้นเพราะการเกิดรอยแตกหรือ crack ซึ่งโดยมากแล้วเป็นผลจากการเชื่อมที่ไม่ดี หรือเกิดจากความล้า, สนิม, การเกิดช่องโหว่ต่างๆ เป็นต้น สาเหตุของการวิบัติอย่างรวดเร็ว นั้น เกิดจากการที่หน่วยแรงที่เกิดขึ้น และขนาดของรอย crack นั้นถึงค่าวิกฤต (เกี่ยวข้องกับ “ความแกร่งก่อนการแตกหัก” ของวัสดุ) ซึ่งเป็นค่าที่ความไร้เสถียรภาพนั้นก่อให้เกิดการขยายตัวของรอย Crack ซึ่งไปเร่งการก่อตัวของรอยดังกล่าว และเป็นผลให้เกิดคลื่นของความยืดหยุ่นในเนื้อวัสดุได้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า มีสามปัจจัยหลักที่มีผลกับสิ่งนี้ได้แก่ ; น้ำหนักกระทำ, ขนาดรอย Crack, และ ความแกร่งก่อนการแตกหักของวัสดุ ระเบียบและกฎเกณฑ์ของ “กลศาสตร์การแตกหัก” นั้น ได้ถูกสร้างขึ้นมาในเชิงวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับเงื่อนไขต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่เกิดรอย Crack การแนะนำอย่างย่อๆ สำหรับกลศาสตร์การแตกหักนี้สามารถอ้างอิงได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [42,43]

เป็นที่ชัดเจนว่าความแกร่งก่อนการแตกหักนั้นเกี่ยวข้องกับปริมาณของงานแบบพลาสติก ซึ่งจำเป็นต่อการขยายตัวของรอย Crack อย่างไรก็ตามนั้น การขยายตัวของรอย Crack นั้นก็ยังเกี่ยวข้องกับพลังงานยืดหยุ่นที่ปล่อยออกมาจากวัสดุที่ได้รับน้ำหนักกระทำนั้นเองเพราะปริมาตรของในพื้นที่ใกล้เคียงพื้นผิวรอย Crack นั้นถูกผ่อนคลายเป็นแบบยืดหยุ่น ค่าส่วนประกอบของพลังงานนั้นจะเป็นค่าพลังงานพลาสติกในแบบบวก เมื่อเกิดขึ้นจากการขยายตัวของรอย Crack และจะเป็นค่าพลังงานแบบลบ เมื่อเกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานแบบยืดหยุ่น และเมื่อถึงจุดที่เงื่อนไขวิกฤตขึ้นมา เทอมที่เป็นลบนั้นจะมีอิทธิพลมากกว่าและ โครงสร้างก็จะเกิดการวิบัติแบบฉับพลันอันเนื่องจากการแตกหักที่มีขึ้นอย่างรวดเร็ว

มีปัจจัยสองประการสำหรับวัสดุเหล็กขึ้นรูปเย็น ซึ่งจะไปเป็นตัวที่ลดความสามารถทางด้านทานการแตกหักแบบรวดเร็วนี้ ประการแรก คือ ความเหนียวของวัสดุที่ลดลง ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.8.3 ซึ่งลดพลังงานที่ดูดซับในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติก และการแตกหักที่ปลายของรอย Crack, และด้วยความแกร่งก่อนการแตกหักเช่นกัน ปัจจัยประการที่สองคือการเพิ่มตัวของหน่วยแรงคงค้าง (Residual Stress) ในหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็น ซึ่งเกิดจากกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งไปเพิ่มค่าพลังงานที่ปลดปล่อยออกจากการเกิดรอย Crack ได้มีการวิจัยบางส่วนซึ่งทำการศึกษาถึงความแกร่งก่อนการแตกหักนี้ของหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็น ซึ่งอาจจะเป็นเพราะความจริงที่ว่า ไม่นิยมทำการเชื่อมกับหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นนี้ แต่อย่างไรก็ตาม กรณีที่รอยต่อระหว่างหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นต้อง

มีการเชื่อมเกิดขึ้นแล้ว ผู้ออกแบบจะต้องระมัดระวังและคำนึงถึงผลอันเกิดจากการแตกหักแบบรวดเร็วนี้ ยังจะต้องมีงานวิจัยอีกมากสำหรับหัวข้อนี้ และเมื่อไม่นานมานี้เอง ก็ได้มีการศึกษาและทดสอบเหล็กท่อขึ้นรูปเย็นซึ่งมีขนาดความหนาเกินกว่า 20 มม. ในประเทศญี่ปุ่น [44 ,45]

2.9 รูปแบบการโก่งเคาะของชิ้นส่วนโครงสร้างผนังบางซึ่งรับแรงอัดและแรงอัด

2.9.1 บทนำสำหรับวิธี Finite Strip

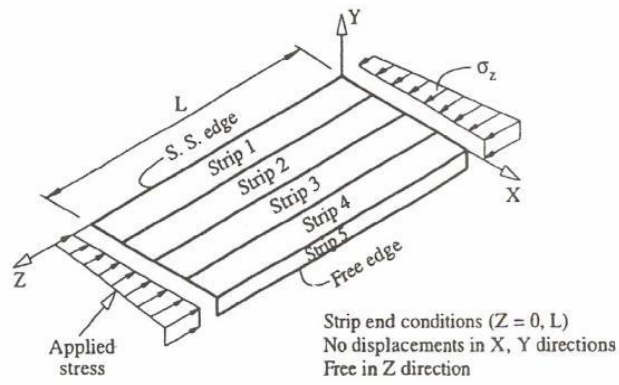
วิธี Finite Strip สำหรับการวิเคราะห์การโก่งเคาะของหน้าตัดผนังบาง (Thin-walled Section) นั้นถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก ซึ่งใช้สำหรับการตรวจหาพฤติกรรม การโก่งเคาะของชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นซึ่งรับทั้งแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน รูปแบบการโก่งเคาะซึ่งคำนวณ โดยการวิเคราะห์นั้นสามารถนำมาวาดผ่านคอมพิวเตอร์กราฟฟิก โดยวิธีนี้ก็จะ เป็นวิธีการที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการสาธิตให้เห็นถึงรูปแบบการโก่งเคาะที่แตกต่างกันของชิ้นส่วน โครงสร้างที่มีผนังบาง วัตถุประสงค์ของเนื้อหาในบทนี้คือการใช้การวิเคราะห์การโก่งเคาะโดยวิธี Finite Strip เพื่อบรรยายถึงรูปแบบที่แตกต่างกันในภาพรวมของการโก่งเคาะของชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นซึ่งรับทั้งแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน และถึงแม้ว่าการอธิบายดังกล่าวนี้จะไม่เป็นศูนย์กลางของการประยุกต์ใช้ในวิธีการออกแบบอื่นๆที่มีในหนังสือเล่มนี้ในบทถัดๆมา แต่ก็กล่าวได้ว่าเนื้อหาในบทนี้จะสร้างความเข้าใจให้กับวิธีดังกล่าวนี้ได้เช่นกัน นอกจากนี้ การวิเคราะห์โดยวิธี Finite Strip นั้นจะให้ค่าหน่วยแรงเนื่องจากการโก่งเคาะแบบเฉพาะที่และการโก่งเคาะแบบผิวดรูปได้อย่างแม่นยำมากขึ้น กว่าวิธีการคำนวณอย่างง่ายด้วยมือ และมันยังยอมให้เราใช้ค่าของหน่วยแรงการโก่งเคาะแบบเฉพาะที่ที่แม่นยำขึ้นสำหรับการออกแบบที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อ 2.2.1.2 ของ AS/NZS 4600 และในบางกรณีนั้น เราสามารถออกแบบโครงสร้างที่มีความประหยัดได้มากขึ้น โดยเฉพาะกับหน้าตัดที่รับทั้งแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน นอกจากนี้ ก็ยังยอมให้เราใช้ค่าต่างๆของการโก่งเคาะแบบผิวดรูปในการออกแบบที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อ 3.3.3.3 และหัวข้อ 3.4.6 ของ AS/NZS 4600

การวิเคราะห์แบบกึ่งโดยวิธี Finite Strip ซึ่งใช้ในหนังสือเล่มนี้ จะเหมือนกับที่ได้อธิบายไว้โดยCheung [46] สำหรับการวิเคราะห์หาหน่วยแรงของระบบแผ่นเหล็กที่ผ่านการพับ และได้รับการพัฒนาต่อมาโดย Przemieniecki [47] สำหรับการวิเคราะห์การโก่งเคาะเฉพาะที่ ของหน้าตัดผนังบาง Plank และ Wittrick [48] ได้ผสมผสานการเคลื่อนที่อันเกิดจากการโก่งเคาะของผนัง โครงสร้างบางนอกเหนือไปจากการเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากแรงดัดของแผ่นเหล็ก เพื่อศึกษาขอบเขตกว้างๆของรูปแบบการโก่งเคาะตั้งแต่แบบเฉพาะที่ตลอดจนแบบผิวดรูป ไปจนถึง การโก่งเคาะซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดัดและแรงดัดร่วมกับแรงบิด วิธีทางเลือกอีกแบบหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า วิธี Spline Finite Strip นั้นเป็นการพัฒนาขั้นต่อมาของ การวิเคราะห์แบบกึ่งโดยวิธี Finite Strip เราสามารถใช้วิธีดังกล่าวในการวิเคราะห์ในรูปแบบที่มีเงื่อนไขขอบเขต ณ บริเวณจุดปลายโครงสร้าง ซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้น และวิธีนี้ก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับ การวิเคราะห์หาการโก่งเคาะของโครงสร้างแบบผนังแบนและบาง

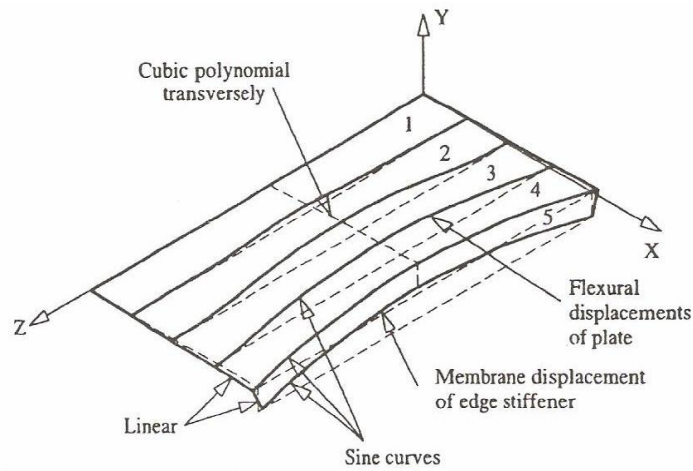
โดย Lau และ Hancock [49] และในหัวข้อ ค. ก็จะได้แสดงถึงการเปรียบเทียบโดยย่อของสองวิธีดังกล่าว เมื่อนำมาใช้กับหน้าตัดรูปร่างน้ำซึ่งมีความยาวที่ตายตัว

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ THIN-WALL นั้นได้รับการพัฒนาจากมหาวิทยาลัย Sydney เพื่อทำการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Strip สำหรับการวิเคราะห์การโก่งเคาะของหน้าตัดผนังบางภายใต้แรงอัดและแรงคด รายละเอียดของการทำงานของโปรแกรมนี้จะได้รับการอธิบายไว้ในเอกสารอ้างอิง [31]

การวิเคราะห์แบบกึ่งโดยวิธี Finite Strip นั้นจะเกี่ยวข้องกับการแบ่งแยกย่อยโครงสร้างหน้าตัดผนังบาง ได้แก่ แผ่นเหล็กเสริมค้ำยันที่ขอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1(a) ให้เป็นแถบแผ่นยาวๆ ตามแนวแกนชิ้นส่วน แต่ละแผ่นยาว (Strip) นั้นจะถูกสมมติให้มีการเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระทั้งในระนาบของมันเอง (การเคลื่อนที่แบบผนังบาง) และนอกระนาบของมันเอง (การเคลื่อนที่ภายใต้การคด) ในรูปแบบของคลื่นรูปไซน์เดี่ยว ในความยาวของหน้าตัดที่ทำการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1(b) ด้านปลายทั้งสองของหน้าตัดที่ศึกษาจะเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระตามแนวยาว แต่จะถูกป้องกันการเปลี่ยนรูปร่างในทางระนาบของหน้าตัดของมัน รูปแบบการโก่งเคาะที่คำนวณออกมาได้ จะเป็นของการโก่งเคาะในหน่วยของความยาวครึ่งคลื่นเดี่ยว (Single Buckle Half-wavelength) รายละเอียดของการวิเคราะห์และการประยุกต์สำหรับกรณีซึ่งมีหลายความยาวครึ่งคลื่นนั้นจะเกิดขึ้นในความยาวของหน้าตัดที่แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง [50] แต่ละแถบยาวในหน้าตัดนั้นจะได้รับการสมมติให้รับหน่วยแรงอัดตามแนวแกน (σ_x) ซึ่งมีขนาดคงที่ตลอดความยาวของแถบยาวนั้น แต่ค่าจะเปลี่ยนแปลงจากเส้นของ node หนึ่งไปยังอีกเส้นของ node หนึ่งโดยการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.23(ก) สิ่งนี้จะช่วยให้หน้าตัดที่เราศึกษานั้นสามารถรับการกระจายตัวของหน่วยแรงตามยาวในหลายขอบเขต ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปได้ตั้งแต่แรงอัดล้วนจนถึงแรงคดล้วน โปรแกรม THIN-WALL นั้นเริ่มแรกจะทำการวิเคราะห์หน่วยแรงสำหรับหน้าตัดที่รับแรงอัด, แรงคด, และแรงบิด เพื่อทำการคำนวณหน่วยแรงตามยาว สำหรับเป็นข้อมูลป้อนให้กับการวิเคราะห์แบบกึ่งโดยวิธี Finite Strip



ก) การแบ่งย่อยแถบยาว (strip)



ข) การเคลื่อนตัวแบบแผ่นบาง (membrane) และแบบการโก่งเดาะภายใต้การตัด (flexural)

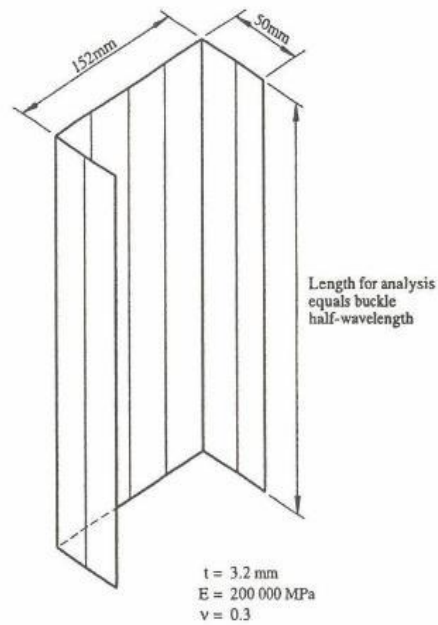
รูปที่ 2.23 การวิเคราะห์โดยวิธี Finite Strip ของแผ่นเหล็กที่มีการเสริมค้ำยันที่ปลายขอบ

2.9.2 การศึกษาโครงสร้างเสาน้ำตัดสมมาตรแกนเดียว

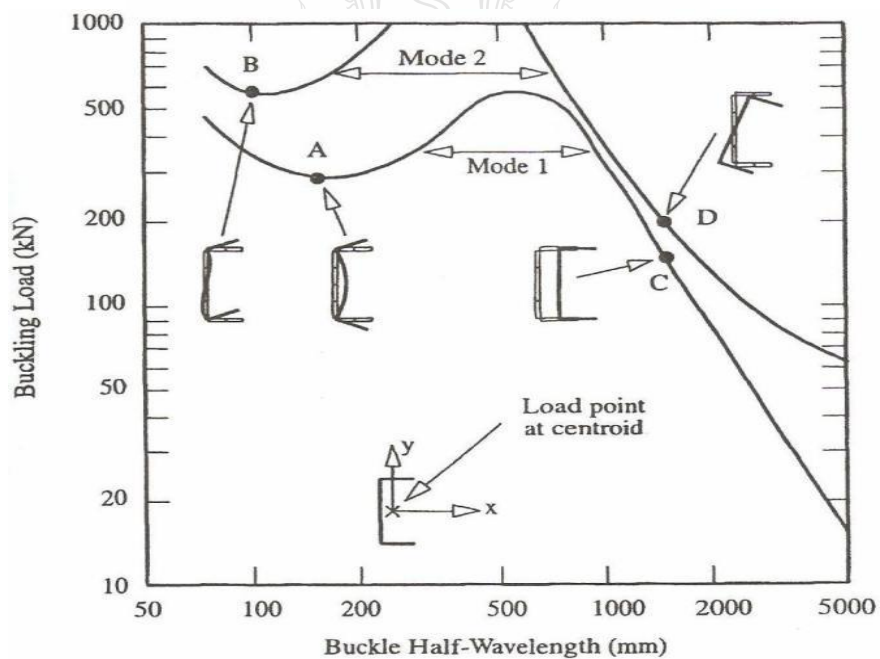
ก. หน้าตัดรูปร่างน้ำแบบไม่มีขอบ

เพื่อสาธิตถึงรูปแบบที่แตกต่างกันซึ่งโครงสร้างเสาน้ำตัดสมมาตรแกนเดียวนั้น อาจเกิดการโก่งเดาะภายใต้ทั้งแรงกระทำแบบตรงกับจุดศูนย์กลาง หรือเอียงศูนย์กลางหน้าตัดแล้ว เนื้อหาในส่วนนี้จึงได้อธิบายและบรรยายถึงผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แบบกึ่งโดยวิธี Finite Strip สำหรับการโก่งเดาะของหน้าตัดรูปร่างน้ำแบบไม่มีขอบซึ่งมีขนาดลึก 152 มม. ความกว้างของปีก 50 มม. และหนา 3.2 มม. การวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของหน้าตัดรูปร่างน้ำซึ่งรับหน่วยแรงอัดแบบคงที่ นั้น ได้แสดงดังรูปที่ 2.24 โดยผลลัพธ์ได้แสดงอยู่ในกราฟสองรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.25 กราฟดังกล่าวนี้จะแสดงถึงค่าน้ำหนักที่ก่อให้เกิดการโก่งเดาะ (ผลคูณของหน่วยแรงอัดแบบคงที่กับพื้นที่หน้าตัดรวมของหน้าตัด) กับค่าความยาวครึ่งคลื่นของการโก่งเดาะ สำหรับสองรูปแบบ (โหมด) แรกของการโก่ง

เดาะ จุดต่ำสุด (จุด A) ของเส้นโค้งที่อยู่ต่ำกว่า จะเกิดขึ้นที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นเท่ากับ 160 มม. และ
 เป็นไปตามการโก่งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบของการโก่งเดาะแบบสมมาตรดังแสดงในรูป



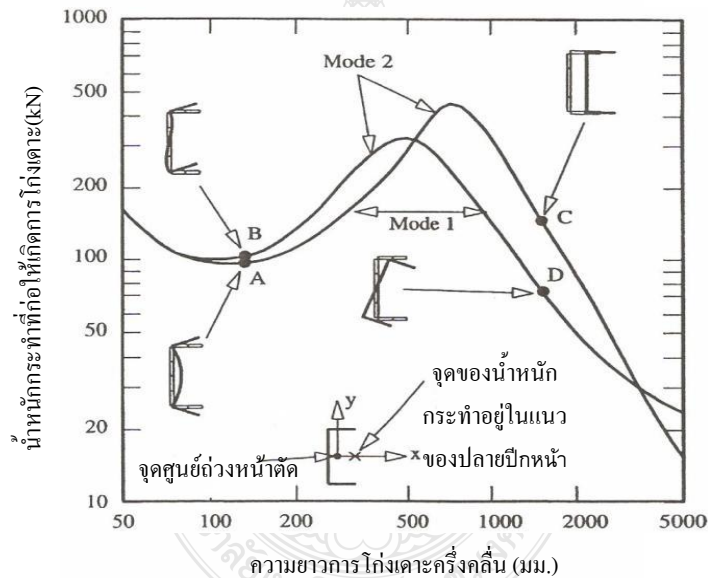
รูปที่ 2.24 การแบ่งย่อยสำหรับวิธี Finite Strip ของหน้าตัดแบบรางน้ำ



รูปที่ 2.25 แสดงค่านำหนักที่ก่อให้เกิดการโก่งเดาะของหน้าตัดแบบรางน้ำแบบไม่มีขอบ กับค่า
 ความยาวการโก่งเดาะแบบครึ่งคลื่น สำหรับการรับแรงอัดแบบผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด

และเช่นเดียวกัน จุด B ในเส้นโค้งเส้นบนนั้น ค่าต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นเท่ากับ 100 มม. และเป็นไปตามโหมดที่สองของการโก่งเคาะเฉพาะที่ในรูปแบบของการโก่งเคาะแบบไม่สมมาตรดังแสดงในรูป

ที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นเท่ากับ 1500 มม. โหมดแรกและโหมดที่สองของการโก่งเคาะ (จุด C และ D ตามลำดับ) จะแสดงถึงรูปแบบการโก่งเคาะในรูปที่ 2.25 ที่จุด C นั้น มีค่าน้ำหนักกระทำวิกฤตเท่ากับ 149 kN (189 MPa) ซึ่งตรงกับการโก่งเคาะแบบดัดรอบแกน y ส่วนที่จุด D มีค่าน้ำหนักกระทำวิกฤตเท่ากับ 191 kN (242 MPa) ซึ่งตรงกับการโก่งเคาะแบบดัดผสมกับแรงบิดรอบแกน x ซึ่งเป็นแกนสมมาตรนั่นเอง ดังนั้นเมื่อโครงสร้างหน้าตัดเสกขนาดนี้ซึ่งรองรับด้วยจอร์รองรับอย่างง่าย (simple support) ที่วางห่างกัน 1500 มม. ซึ่งมีการป้องกันการหมุนรอบแกนตามยาวของมัน และได้รับน้ำหนักกระทำผ่านศูนย์กลางหน้าตัดแล้ว มันจะเกิดการโก่งเคาะในรูปแบบของการดัด และไม่ใช้รูปแบบของการดัดผสมกับการบิด



รูปที่ 2.26 แสดงน้ำหนักกระทำโก่งเคาะกับความยาวโก่งเคาะครึ่งคลื่นของหน้าตัดแบบรางน้ำแบบไม่มีขอบที่รับแรงอัดผ่านศูนย์กลางหน้าตัด

จากการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของหน้าตัดรางน้ำดังในรูปที่ 2.24 ซึ่งได้รับแรงกระทำแบบเอียงศูนย์กลางซึ่งอยู่ในระนาบของแกนสมมาตรแกนเดียวเพื่อให้ น้ำหนักกระทำดังกล่าวอยู่ในแนวเดียวกับปลายของปีกทั้งสองของหน้าตัดและอยู่กึ่งกลางระหว่างปีก ได้ให้กราฟสองรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.26 กราฟเหล่านี้จะแสดงถึงค่าน้ำหนักกระทำที่ก่อให้เกิดการโก่งเคาะ กับ ค่าความยาวโก่งเคาะครึ่งคลื่น ของหน้าตัดภายใต้แรงอัดแบบเอียงศูนย์กลางสำหรับสองรูปแบบแรก เส้นโค้งนี้จะเหมือนกันกับที่ได้แสดงในรูปที่ 2.25 ยกเว้นในสองประเด็นซึ่งมีความสำคัญต่อไปนี้

ประการแรกเส้นโค้งการโก่งเคาะอันเนื่องจากการคดผสมการบิด ซึ่งเป็นเส้นโค้งบนในรูปที่ 2.25 แต่เดิมนั้น จะกลายเป็นเส้นโค้งเส้นล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ภายในช่วงระหว่าง 540 มม. – 3300 มม. ซึ่งมีความหมายว่าสำหรับหน้าตัดเสาที่รับแรงเยื้องศูนย์กลางที่วางอยู่บน Simple Support ช่วงยาว 1500 มม. โดยน้ำหนักกระทำที่กึ่งกลางระหว่างปลายของปีกทั้งสองแล้วนั้น, เสาจะเกิดการโก่งเคาะในรูปแบบของการคดผสมกับการบิดในค่าน้ำหนักที่ต่ำกว่าในรูปแบบของการคดแต่เพียงอย่างเดียว (จุด C) สำหรับค่าความยาวครึ่งคลื่นที่มากกว่า 1000 มม. เส้นโค้งรูปแบบการคดซึ่งผ่านจุด C นั้นจะเหมือนกับในรูปที่ 2.25 และ 2.26 และจะมีเพียงตำแหน่งของเส้นโค้งของการคดผสมกับการบิดเท่านั้นที่จะมีการเปลี่ยนแปลง

ประการที่สอง ค่าน้ำหนักการโก่งเคาะแบบเฉพาะที่ (จุด A) ซึ่งต่ำกว่า 280 kN (หน่วยแรงเฉื่อย 355 MPa) สำหรับการรับแรงอัดแบบผ่านศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.25 เป็น 96 kN (หน่วยแรงเฉื่อย 122 MPa) สำหรับการรับแรงอัดแบบเยื้องศูนย์กลางหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.26 สองรูปแบบแรกของการโก่งเคาะแบบเฉพาะที่ (จุด A และจุด B) จะเกิดขึ้นที่เกือบจะเป็นค่าน้ำหนักเดียวกันสำหรับกรณีของการรับแรงอัดแบบเยื้องศูนย์กลางหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.26

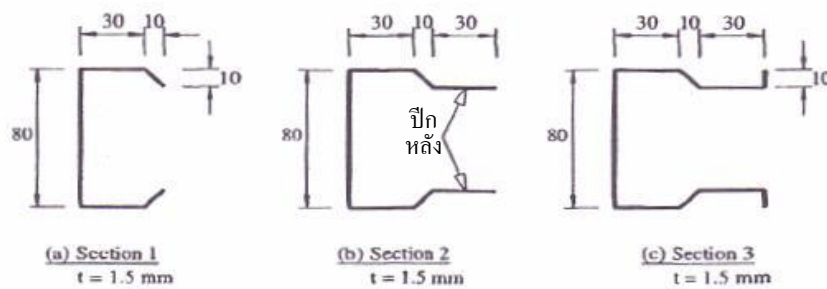
ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงรูปแบบการโก่งเคาะของโครงสร้างเสายาวทั้งแบบที่รับแต่แรงคด และแบบที่รับทั้งแรงคดและแรงบิดร่วมกัน พร้อมๆกันกับของในรูปแบบการโก่งเคาะแบบเฉพาะที่ด้วย นอกจากนี้ ปฏิสัมพันธ์กันระหว่างความยาวคลื่นแบบสั้นในการโก่งเคาะเฉพาะที่ และความยาวคลื่นแบบยาวของการโก่งเคาะของเสา จะต้องได้รับการออกแบบไว้ด้วย ผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบของการครากในรูปแบบทั้งสามของการโก่งเคาะด้วย

ในกรณีของการโก่งเคาะแบบการคดรวมกับการบิดนั้น เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธี Finite Strip นั้นจะเหมือนกับการวิเคราะห์ที่ใช้โดย Timoshenko และ Gere [51] สำหรับเสาที่รองรับโดย Simple Support และมีความอิสระต่อการบิดงอที่ด้านปลายของมัน และสามารถโก่งเคาะในรูปแบบครึ่งความยาวคลื่นเดียวในความยาวของเสา โครงสร้างเสาที่แท้จริงในโครงสร้างแบบปกติ นั้นจะได้แก่เสาเหล็กของคลังเก็บของ นั้นจะไม่ถูกยึดรั้งโดยจุดรองรับแบบง่าย (Simple Support) ดังกล่าว และโดยมากแล้วจะมีค่าความยาวประสิทธิผลสำหรับการคดและการบิดที่แตกต่างกันเกิดขึ้นเสมอ

ข. หน้าตัดรูปร่างน้ำแบบมีขอบ

หน้าตัดรูปร่างน้ำแบบมีขอบ สามขนาดได้ถูกเลือกเพื่อนำมาศึกษา เพื่อทำการสาธิตถึงรูปแบบที่แตกต่างกันของการโก่งเคาะของหน้าตัดประเภทนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 หน้าตัดทั้งสามประเภทที่ได้ถูกเลือกนั้นเป็นแบบที่ใช้สำหรับทำเป็นเสาเหล็กของโรงเก็บวัสดุ ซึ่งมีการเพิ่มปีก (เรียกว่าปีกหลัง) เข้าไปเพื่อเพิ่มพื้นที่สำหรับน็อคยึดชิ้นส่วนค้ำยันกับหน้าตัดฐานน้ำนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) หน้าตัดแบบพื้นฐาน (จะเรียกว่าหน้าตัดแบบที่ 1) นั้นจะเป็นแบบหน้าตัดฐานน้ำมีขอบที่มีส่วนเสริมค้ำยันเป็นขอบเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.27(ก) ส่วนเสริมค้ำยันที่ขอบแบบนี้ได้ถูกเลือก

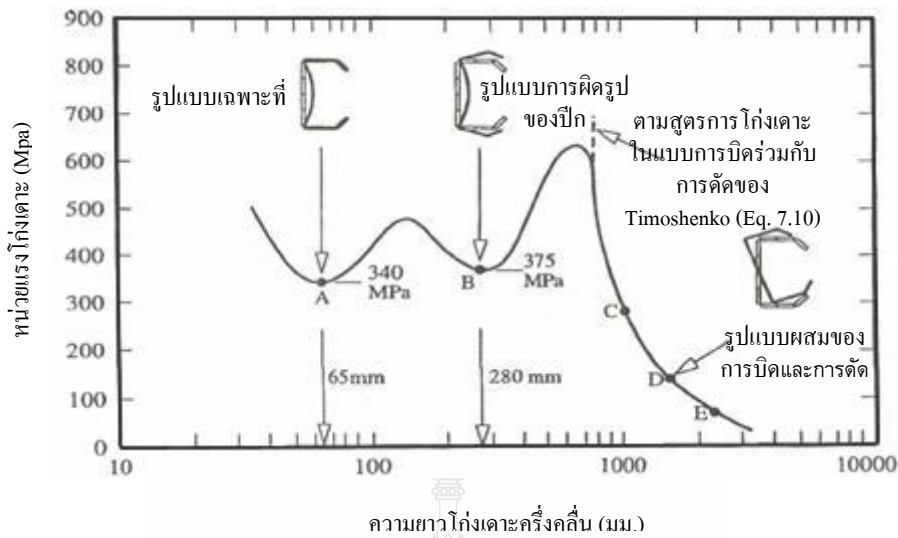
เข้าให้เป็นหน้าตัดแบบที่ 2 (ดังแสดงในรูปที่ 2.27(ข)) ซึ่งเป็นแบบเดียวกับหน้าตัดแบบที่ 1 เพียงแต่ว่าจะมีส่วนที่ยื่นออกมาเป็นปีกด้านหลังด้วย ลักษณะทางเรขาคณิตของหน้าตัดแบบที่ 2 นั้นถูกเลือกเพื่อเป็นตัวแทนของหน้าตัดรางน้ำแบบทั่วไปซึ่งมีปีกหลังนี้ ส่วนหน้าตัดแบบที่ 3 (ดังแสดงในรูปที่ 2.27(ค)) นั้นจะเหมือนกับหน้าตัดแบบที่ 2 ยกเว้นว่ามีการเพิ่มส่วนค้ำยันที่เป็นขอบให้กับทางปีกหลังอีกส่วน หน้าตัดทั้งสามประเภทซึ่งถูกเลือกเพื่อการศึกษาี้ จะมีความลึกเท่ากันที่ 80 มม. และมีความหนาของเนื้อเหล็ก 1.5 มม. หน้าตัดทั้งหมดนี้ได้ถูกทำการวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์การโก่งเดาะแบบกึ่ง โดยวิธี Finite Strip



รูปที่ 2.27 ลักษณะทางเรขาคณิตของหน้าตัดแบบมีขอบ

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพของหน้าตัดแบบที่ 1 ซึ่งรับแรงอัดแบบสม่ำเสมอ นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.28 โดยแสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโก่งเดาะกับความยาวโก่งเดาะครึ่งคลื่น ที่ค่าต่ำสุด (จุด A) เกิดขึ้นที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นที่ 65 มม. และแสดงถึงการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ตามรูปแบบที่ได้แสดงไว้ โดยรูปแบบเฉพาะที่นั้นจะประกอบไปด้วยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของชิ้นส่วนแกนตั้งโดยปราศจากการเคลื่อนตัวของเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนปีกและส่วนเสริมกำลังที่ขอบ ที่จุด B จะเป็นอีกจุดที่เกิดส่วนที่เป็นค่าต่ำสุดเช่นกัน ที่ค่าความยาวครึ่งคลื่น 280 มม. ตามรูปแบบที่แสดง รูปแบบนี้คือการโก่งเดาะแบบผิวดรูปที่ปีก เพราะมีการเคลื่อนตัวที่เส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนปีกและส่วนเสริมกำลังที่ขอบเกิดขึ้นโดยปราศจากการหมุนของส่วนหน้าตัด หรือการเคลื่อนที่ของหน้าตัด ในบางบทความนั้น รูปแบบนี้จะเรียกว่าเป็นแบบระหว่างแบบเฉพาะที่กับแบบการบิด ค่าหน่วยแรงโก่งเดาะแบบผิวดรูปที่จุด B นั้นจะมากกว่าค่าหน่วยแรงโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ที่จุด A เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อน้ำตัดที่มีความยาวมากและได้รับการค้ำยันอย่างสมบูรณ์นั้นต้องรับแรงอัด ชิ้นส่วนนี้จะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ที่จะค่อนข้างไปในทางของการโก่งเดาะแบบผิวดรูป ดังเช่นหน้าตัดรางน้ำแบบไม่มีขอบซึ่งได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้อแล้ว หน้าตัดจะเกิดการโก่งเดาะในแบบการค้ำยันหรือการค้ำยันร่วมกับการบิด ที่ค่าความยาวคลื่นสูงๆ ดังเช่นในจุด C, D, และจุด E ดังแสดงในรูปที่ 2.28 สำหรับหน้าตัดรูปแบบเฉพาะนี้ การโก่งเดาะในแบบการค้ำยันร่วมกับการ

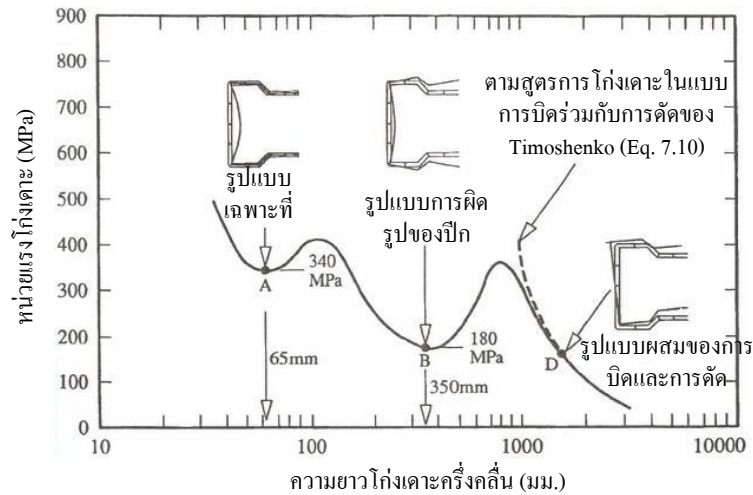
บิตจะเกิดขึ้นที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นจนถึงที่ประมาณ 1800 มม. ซึ่งเลขจุดที่เกิดการโค้งเดาะแบบการคดไป



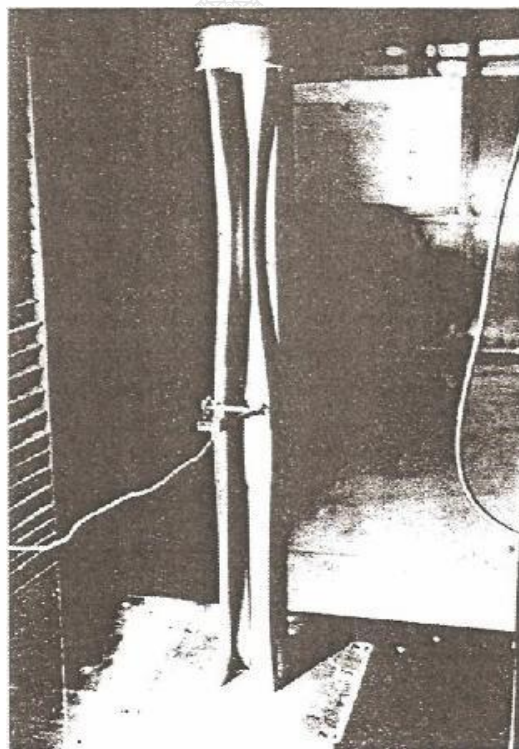
รูปที่ 2.28 หน้าตัดแบบที่ 1 - กราฟแสดงค่าหน่วยแรงโก่งเดาะกับความยาวครึ่งคลื่น สำหรับหน้าตัดรับแรงอัดผ่านศูนย์กลาง

ผลของการวิเคราะห์เสถียรภาพของหน้าตัดในแบบที่ 2 (รูปที่ 2.27(ข)) ซึ่งได้รับแรงอัดแบบสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 นั้นจะเหมือนกับที่ได้แสดงในรูปที่ 2.28 สำหรับหน้าตัดแบบที่ 1 (รูปที่ 2.27(ก)) อย่างไรก็ตาม สิ่งที่มีผลที่ก่อให้เกิดการเสถียรภาพของส่วนปีกด้านหลังที่เพิ่มขึ้นมานั้น ได้ลดค่าหน่วยแรงโก่งเดาะแบบคดรูปลงมาจาก 375 MPa ในหน้าตัดแบบที่ 1 ไปเป็นเพียง 180 MPa ในหน้าตัดแบบที่ 2 ซึ่งค่าหน่วยแรงโก่งเดาะแบบคดรูปของหน้าตัดแบบที่ 2 นี้ มีค่าต่ำพอที่การโก่งเดาะแบบคดรูปนั้นจะเกิดขึ้นก่อนการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ และก่อนการโก่งเดาะแบบผสมระหว่างการคดและการบิด เมื่อโครงสร้างเสานั้นคงจำกัดของค่าความยาวโก่งเดาะครึ่งคลื่นของการโก่งเดาะแบบการคดร่วมกับการบิดไว้ที่น้อยกว่า 1400 มม. ดังนั้น รูปแบบการโก่งเดาะแบบคดรูปนั้นจะกลายเป็นปัญหาที่ค่อนข้างจะหนักสำหรับการออกแบบโครงสร้างเสาประเภทนี้ รูปภาพของโครงสร้างเสาเหล็กขึ้นรูปเย็นซึ่งใช้หน้าตัดแบบที่ 2 นั้น และเกิดการโก่งเดาะแบบคดรูป ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.30

ค่าของหน่วยแรงโก่งเดาะแบบการคดร่วมกับการบิด ซึ่งคำนวณจากหน้าตัดแบบที่ 2 ที่ความยาวครึ่งคลื่น 1500 มม. (จุด D ดังแสดงในรูปที่ 3.7) ซึ่งมากกว่าค่าของหน้าตัดแบบที่ 1 ถึง 13% ที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นเดียวกัน (จุด D ในรูปที่ 2.28) เพราะหน้าตัดที่มีปีกด้านหลังจะมีประสิทธิภาพในการต้านทานการโก่งเดาะแบบการคดร่วมกับการบิดมากกว่า ดังเป็นผลจากการพับสี่จุดได้ไปเพิ่มค่าคงที่ของการบิดของหน้าตัดขึ้น



รูปที่ 2.29 หน้าตัดแบบที่ 2 - กราฟแสดงค่าหน่วยแรงโก่งเดาะกับความยาวครั้งคลี่น สำหรับหน้าตัดรับแรงอัดผ่านศูนย์กลาง

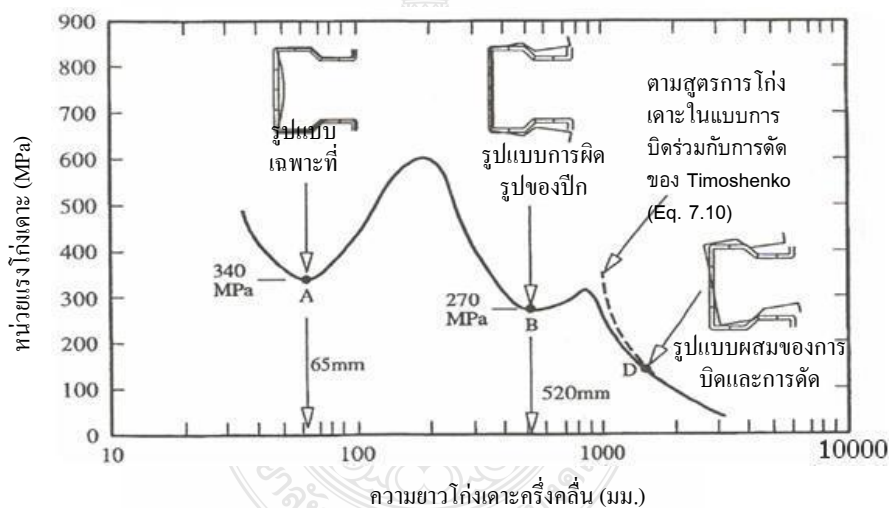


รูปที่ 2.30 การโก่งเดาะแบบค้ดรูปที่ปีก ของเสาแบบหน้าตัดรางน้ำแบบมีขอบ - หน้าตัดแบบที่ 2

ผลของการวิเคราะห์เสถียรภาพของหน้าตัดแบบที่ 3 (รูปที่ 2.27(ค)) ซึ่งได้รับแรงอัดแบบสม่ำเสมอ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 กราฟนี้มีรูปแบบเหมือนกันกับกราฟในรูปที่ 2.28 และ 2.29 อย่างไรก็ตามผลกระทบจากการเสถียรภาพของปีกด้านหลังสำหรับการโก่งเดาะในรูปแบบค้ดรูป

นั้นก็ลดลงไปอย่างมากเนื่องจากการเพิ่มขอบเสริมค้ำยันที่ปีกด้านหลังนี้ หน่วยแรงโค้งเดาะแบบผิดรูปที่จุด B นั้นเพิ่มขึ้นจาก 180 MPa สำหรับหน้าตัดแบบที่ 2 ไปเป็น 270 MPa สำหรับหน้าตัดแบบที่ 3 ดังนั้นในกรณีของหน้าตัดเสาแบบที่มีการเพิ่มขอบเสริมค้ำยันที่ปีกด้านหลังนั้น จะไม่จำเป็นต้องให้ความระมัดระวังสำหรับเรื่องของการโก่งเดาะแบบผิดรูป มากเท่ากับกรณีของหน้าตัดแบบที่ไม่มีการเพิ่มขอบเสริมค้ำยันที่ปีกด้านหลัง

แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขอบค้ำยันในหน้าตัดแบบที่ 3 จะยังผลให้เกิดการลดลงของหน่วยแรงโค้งเดาะในรูปแบบการค้ำยันกับการบิดลงไปที่ต่ำกว่าของหน้าตัดแบบที่ 2 ถึง 15% อันเป็นผลมาจาก การเพิ่มขึ้นของระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางแรงเฉือนกับจุดศูนย์กลางของหน้าตัด ในหน้าตัดแบบที่ 3 นั่นเอง ดังนั้น การเพิ่มส่วนค้ำยันหรือส่วนเสริมกำลังที่ขอบนั้นจะให้ผลเสียกับกำลังของหน้าตัดได้ เมื่อการออกแบบนั้นถูกควบคุมด้วยการโก่งเดาะแบบการค้ำยันกับการบิด ข้อมูลเพิ่มเติมในรูปแบบการโก่งเดาะแบบผิดรูป ซึ่งรวมถึงสูตรต่างๆสำหรับการออกแบบนั้น ได้แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิงที่ 2.29, 2.30 และ 2.31



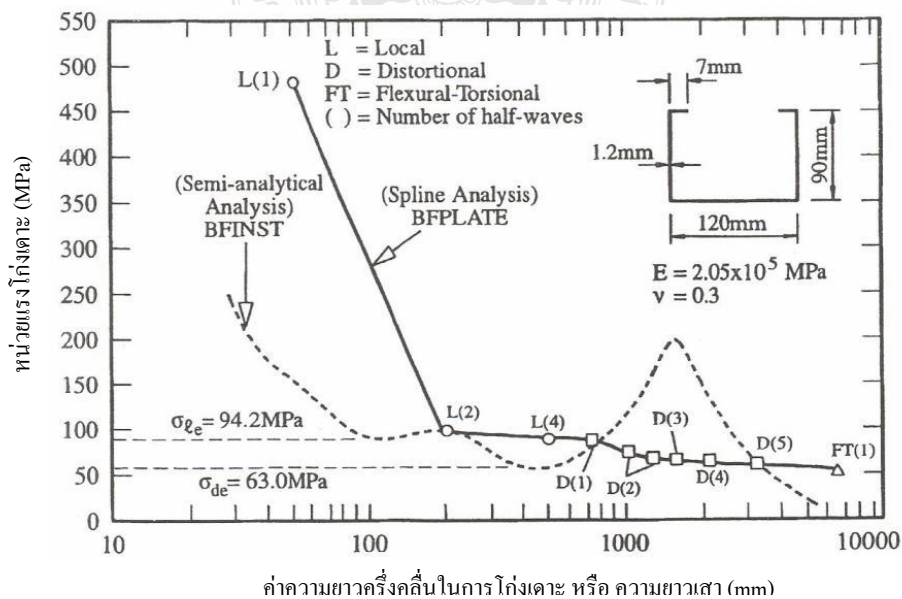
รูปที่ 2.31 หน้าตัดแบบที่ 3 - กราฟแสดงค่าหน่วยแรงโค้งเดาะกับความยาวครึ่งคลื่น สำหรับหน้าตัดรับแรงอัดผ่านศูนย์กลาง

ค. หน้าตัดรางน้ำแบบมีขอบ (ปลายยึด)

การวิเคราะห์การโก่งเดาะโดยการใช้ Spline Finite Strip [49] นั้นจะใช้ฟังก์ชัน Spline ในทิศทางตามยาวในทีละครั้งเดียวของคลื่นรูปไซน์บนความยาวของหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 2.23 (ข) ข้อได้เปรียบของการวิเคราะห์โดย Spline Finite Strip นั้นคือเราสามารถตรวจสอบในส่วนของข้อกำหนดที่ขอบเขตหรือ Boundary Condition ที่นอกเหนือไปจากจุดรองรับอย่างง่าย (Simple Supports) ได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์โดย Spline Finite Strip นั้นจะใช้ค่าดีกรีความอิสระ (Degree

of Freedom) ในจำนวนที่มากกว่ามาก และใช้เวลาในการแก้ปัญหาที่มีมากกว่าการใช้ การวิเคราะห์แบบกึ่ง (Semi-Analytical method) โดย Spline Finite Strip

เพื่อที่จะตรวจสอบถึงผลของการใช้ Boundary Condition แบบยึดแน่นที่ปลาย ในรูปแบบการโก่งเดาะแบบผิวดรูป ของหน้าตัดขวางน้ำแบบมีขอบทวิทุกไปนั้น ได้มีการใช้การวิเคราะห์โดย Spline Finite Strip แบบทั้งสองวิธี เพื่อทำการเปรียบเทียบกันสำหรับหน้าตัดแบบรางน้ำซึ่งได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.41 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์หาค่าการโก่งเดาะของหน้าตัดแบบรางน้ำนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.41 เช่นเดียวกัน โดย BFINST นั้นแสดงถึงการวิเคราะห์แบบกึ่งโดย Spline Finite Strip และ BFPLATE นั้นแสดงถึงการวิเคราะห์โดย Spline Finite Strip การวิเคราะห์แบบ BFINST นั้นจะให้ค่าหน่วยแรงอันเนื่องจากการโก่งเดาะแบบยึดหยุ่นเฉพาะที่ (σ_{le}) และหน่วยแรงอันเนื่องจากการโก่งเดาะยึดหยุ่นแบบผิวดรูป (σ_{de}) ที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นใดๆ ในขณะที่แบบ BPLATE นั้นจะให้ค่าหน่วยแรงโก่งเดาะแท้จริงของหน้าตัด ณ ความยาวที่มี ระหว่างปลายทั้งสองข้างที่ถูกยึดแน่น ค่าระยะตั้งฉากที่วัดถึงแกนตั้งในรูปที่ 2.41 ในการวิเคราะห์โดย BFINST นั้นจะแสดงถึงค่าความยาวครึ่งคลื่น ในขณะที่สำหรับการวิเคราะห์โดย BPLATE นั้นค่าดังกล่าวจะแสดงถึงความยาวแท้จริงของหน้าตัด เครื่องหมายที่แตกต่างกันนั้น แสดงถึงรูปแบบการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ (L), รูปแบบการโก่งเดาะแบบผิวดรูป (D), และรูปแบบการโก่งเดาะแบบรวม (FT), ตามลำดับ สังเกตได้ว่า จากรูปที่ 2.32 นั้น ที่ซึ่งหน้าตัดนั้นมีการโก่งเดาะแบบผิวดรูปในหลายความยาวครึ่งคลื่น การเปลี่ยนแปลงในหน่วยแรงโก่งเดาะในรูปแบบแบบผิวดรูปกับ ความยาวของหน้าตัดที่เพิ่มขึ้นนั้น จะลดลงไปเมื่อผลอันเนื่องมาจากเงื่อนไขที่ปลายลดลง และในที่สุดจะเข้าสู่ค่าที่หามาได้จากการวิเคราะห์แบบกึ่ง (Semi-analytical Method) โดย Spline Finite Strip



รูปที่ 2.32 การวิเคราะห์การโก่งเดาะโดยวิธี Finite Strip

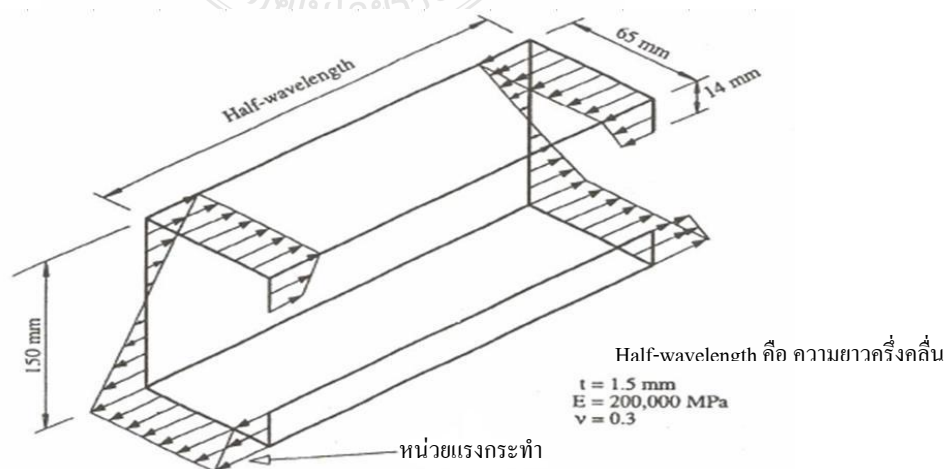
2.9.3 การศึกษาหน้าตัดแป

ก. หน้าตัดรางน้ำ

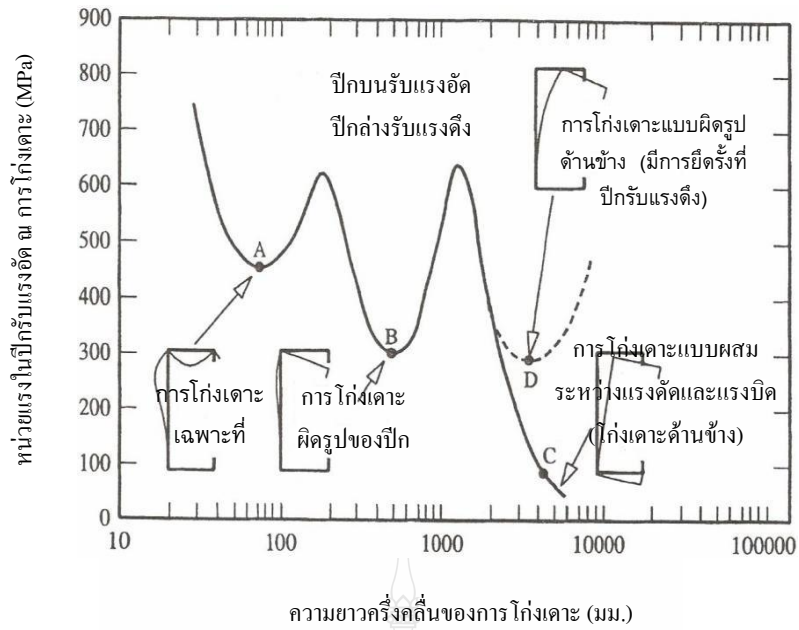
เพื่อสาธิตถึงรูปแบบที่ต่าง ๆ กันซึ่งแปแบบหน้าตัดรางน้ำนั้นอาจเกิดการโก่งเคาะขึ้นได้ เมื่อได้รับแรงดัดรอบแกนหลักดังแสดงในรูปที่ 2.42 จึงได้มีการวิเคราะห์การโก่งเคาะโดยวิธี Spline Finite Strip ของแปแบบหน้าตัดรางน้ำ ซึ่งมีความลึก 150 มม., ปีกกว้าง 63 มม., ขนาดขอบ 14 มม. และมีความหนา 1.5 มม. และผลการวิเคราะห์นั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.43 กราฟนี้จะเหมือนผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หน้าตัดแบบรางน้ำซึ่งมีการค้ำยันที่ขอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ยกเว้นเพียงรูปร่างของรูปแบบการโก่งเคาะ และระบอบอื่นๆ ของมัน

จุดต่ำสุดจุดแรก (A) นั้นยังคงเป็นจุดที่แสดงถึงการโก่งเคาะแบบเฉพาะที่เช่นเดิม ซึ่งในที่นี้จะเกี่ยวข้องกับแต่เพียงแกนตั้ง, ปีกรับแรงอัด และตัวค้ำยันที่ขอบของมัน จุดต่ำสุดจุดที่สอง (B) จะมีความเกี่ยวเนื่องกับรูปแบบการโก่งเคาะที่ซึ่งปีกรับแรงอัดและขอบของหน้าตัดนั้นหมุนรอบจุดเชื่อมต่อระหว่างปีกและแกนตั้ง โดยมีการเหนี่ยวรั้งแบบยืดหยุ่นเกิดขึ้นกับการหมุนดังกล่าวโดยแกนตั้ง รูปแบบการโก่งเคาะนี้จะเรียกว่า รูปแบบการโก่งเคาะแบบ “การผิดรูปของปีก” และได้แสดงให้เห็นจากภาพของชิ้นงานหน้าตัดรูปตัว Z ที่ผ่านการทดสอบ ในรูปที่ 2.44 ค่าของหน่วยแรงการโก่งเคาะที่เกิดขึ้นในตัวค้ำยันนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวค้ำยันที่ขอบเป็นอย่างมาก

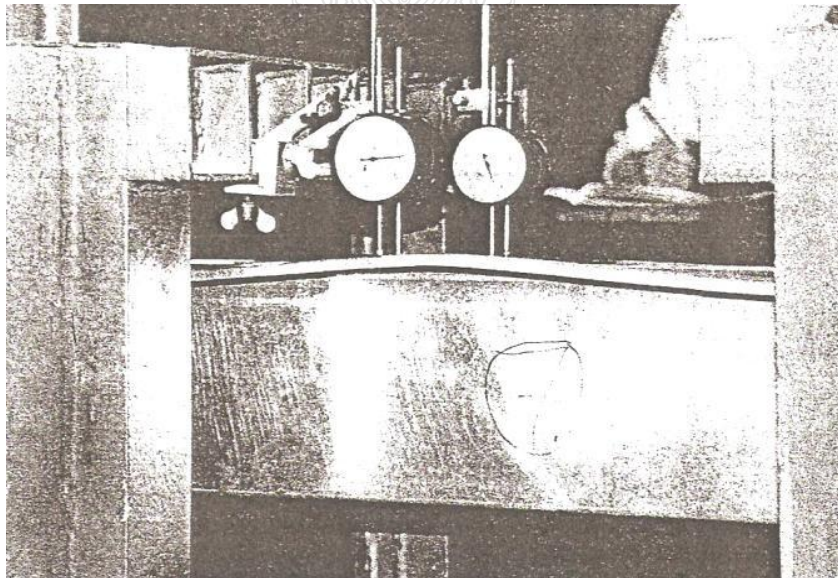
ที่ค่าความยาวคลื่นสูงๆ (จุด C) ซึ่งเป็นจุดที่แปนั้นไม่ได้รับการยึดรั้งไว้ รูปแบบการโก่งเคาะแบบผสมระหว่างแรงดัดและแรงบิดนั้นจะเกิดขึ้น ซึ่งนิยมเรียกกันว่าเป็นการโก่งเคาะแบบ “ด้านข้าง” อย่างไรก็ตามถ้าปีกรับแรงดัดนั้นถูกยึดรั้งจากการบิด ดังตัวอย่างเช่น อาจจะถูกยึดโดยน็อตที่ปีกรับแรงดัดนั่นเอง ก็จะทำให้เกิดการโก่งเคาะในรูปแบบที่เรียกว่า “แบบผิดรูปในด้านข้าง” ขึ้นได้ ที่ค่าความยาวคลื่นที่ต่ำที่สุดประมาณ 4000 มม. ดังแสดงด้วยจุด D ในรูปที่ 2.43 ค่าหน่วยแรงการโก่งเคาะต่ำสุด และ ค่าความยาวคลื่นของมันนั้นจะขึ้นอยู่กับระดับของการยึดรั้งสำหรับการบิดที่ได้ทำไว้ต่อปีกรับแรงดัด



รูปที่ 2.33 แปแบบหน้าตัดรางน้ำที่ได้รับแรงดัดรอบแกนหลัก



รูปที่ 2.34 กราฟแสดงค่าหน่วยแรง โกงเคาะกับความยาวครึ่งคลื่นสำหรับการตัดรอบแกนหลักของแปหน้าตัดรางน้ำ



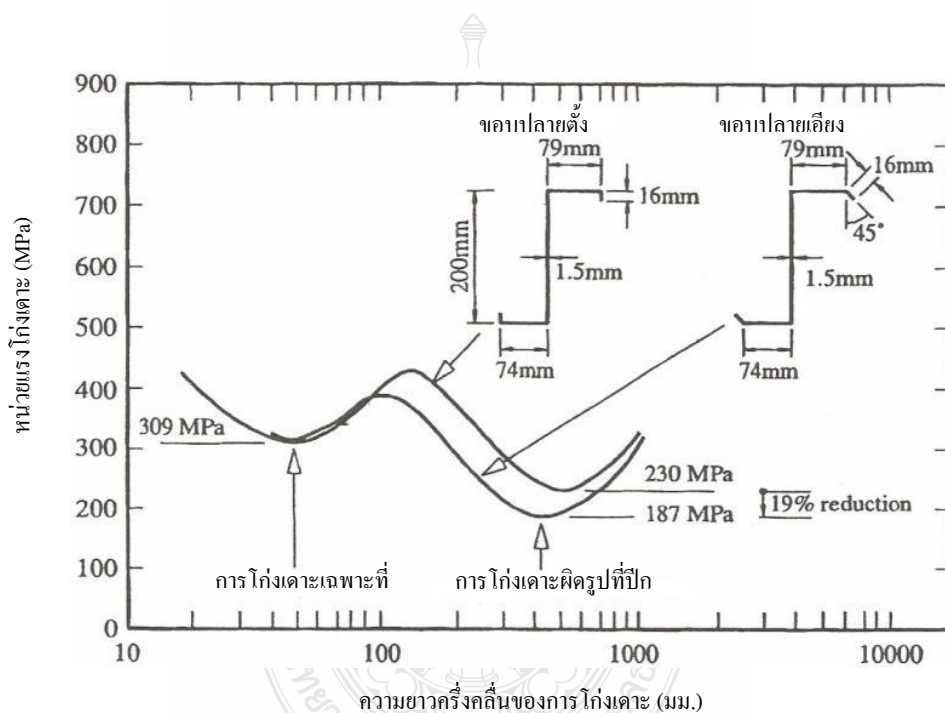
รูปที่ 2.35 การ โกงเคาะแบบการผิดปกติที่ปีก ของแปหน้าตัดรูปตัว Z

ข. หน้าตัดรูปตัว Z

ได้มีการทำการศึกษาแบบเดียวกันกับหน้าตัดรูปรางน้ำในเรื่องของการรับแรงดัด สำหรับหน้าตัดรูปตัว Z สองประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.45 หน้าตัดแบบแรกนั้นจะประกอบไปด้วยตัวค้ำยันที่ขอบปลายซึ่งจะตั้งฉากกับปีก และหน้าตัดแบบที่สองจะมีตัวค้ำยันที่ขอบปลายเป็นแบบ

เอียงทำมุม 45 องศาต่อกัน ในรูปที่ 2.45 นั้น ค่าหน่วยแรงโก่งเคาะได้ถูกคำนวณขึ้นมาสำหรับค่าความยาวครึ่งคลื่นของการโก่งเคาะ ถึง 1000 มม. เพื่อที่จะให้แน่ใจว่าการโก่งเคาะที่ได้ศึกษานั้นเป็นแบบเฉพาะที่ และเกิดขึ้นในตัวค้ำยันเท่านั้น

เช่นเดียวกันกับการศึกษาของหน้าตัดรูปรางน้ำด้านบน หน่วยแรงโก่งเคาะแบบผิวดรูปนี้มีค่าที่ต่ำกว่าค่าหน่วยแรงโก่งเคาะแบบเฉพาะที่อย่างเห็นได้ชัดเจน สำหรับทั้งหน้าตัดรูปตัว Z ทั้งสองแบบ สำหรับตัวค้ำยันที่ขอบปลายที่เอียงทำมุม 45 องศาต่อกันนั้น ค่าหน่วยแรงโก่งเคาะของตัวค้ำยันนี้ลดลงไป 19% เมื่อเทียบกับค่าของค่าหน่วยแรงโก่งเคาะของตัวค้ำยันที่ขอบปลายแบบตั้งฉากกับปีก ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของรูปแบบการแตกหักของแปที่มีตัวค้ำยันที่ขอบปลายเป็นแบบเอียงนี้

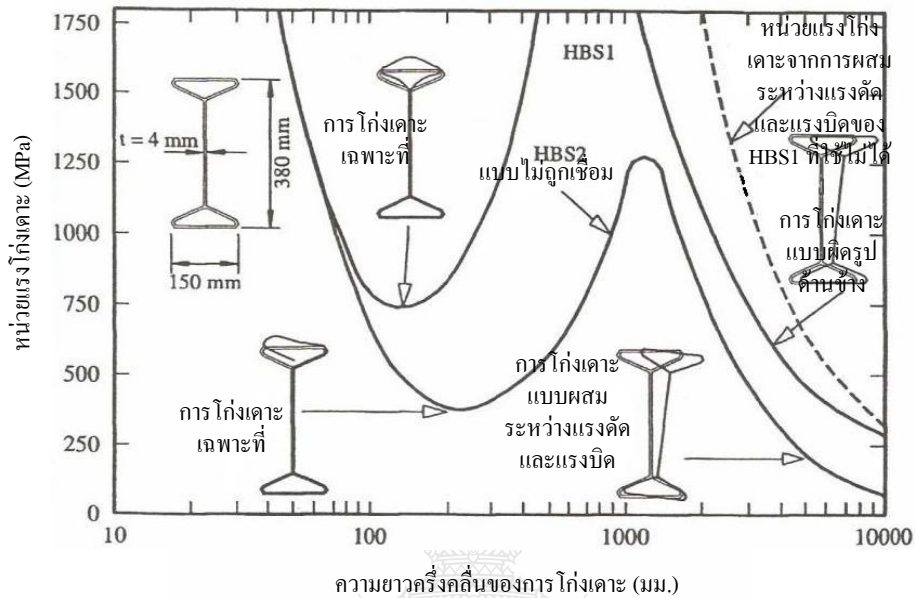


รูปที่ 2.36 แปหน้าตัดรูปตัว Z – กราฟแสดงหน่วยแรงโก่งเคาะกับค่าความยาวครึ่งคลื่นของการตัดรอบแกนนอน

2.9.4 คานหน้าตัดแบบปีกกลวงรับแรงดัด

หน้าตัดของคานแบบปีกกลวง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 นั้นได้รับการศึกษาโดยใช้การวิเคราะห์การโก่งเคาะโดยใช้วิธีแบบกึ่ง (Semi-analytical Method) โดย Spline Finite Strip โดยมี การวิเคราะห์หน้าตัดสองแบบเพื่อสาธิตถึงผลของการเชื่อมแบบ ERW ที่มีต่อพฤติกรรมของการโก่งเคาะของหน้าตัด หน้าตัดเหล่านี้ เป็นหน้าตัดที่มีปีกปิดในรูปแบบที่เรียกว่า “HBS1” และหน้าตัดแบบที่มีปีกเปิดในรูปแบบที่เรียกว่า “HBS2” รูปที่ 2.46 ได้แสดงให้เห็นถึงกราฟของหน่วยแรงโก่งเคาะกับค่าความยาวครึ่งคลื่นของการโก่งเคาะสำหรับหน้าตัดทั้งสองแบบเมื่อรับแรงดัดเพียงอย่างเดียวรอบแกน

หลัก เพื่อให้ปีกด้านบนของหน้าตัดนั้นรับแรงอัด และปีกด้านล่างรับแรงดึง ดังเช่นรูปแบบเดียวกันกับคานทั่วไป ค่าหน่วยแรงโก่งเดาะเป็นค่าของหน่วยแรงในปีกรับแรงอัดที่อยู่ห่างจากแกนค้มมากที่สุด เมื่อหน้าตัดเหล่านั้นเกิดการโก่งเดาะยืดหยุ่น



รูปที่ 2.37 คานหน้าตัดแบบปีกกลวง – กราฟแสดงหน่วยแรงโก่งเดาะ กับค่าความยาวครึ่งคลื่นของการค้ำรอบแกนนอน

ที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นขนาดสั้น (50 mm – 500 mm ดังในรูปที่ 2.37) ผลของการเชื่อมที่ส่วนปีกที่มีต่อส่วนของแกนค้ำที่ติดกันนั้นสามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจน ถึงรูปแบบการโก่งเดาะที่เปลี่ยนแปลงไปจากการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ในส่วนของปีกที่ไม่ถูกติดตั้ง สำหรับ HBS2 ไปเป็นการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ที่ปีกบน เมื่อมีค่าหน่วยแรงที่สูงขึ้นสำหรับ HBS1

ที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นที่สูงขึ้น (2000 มม. – 10000 มม. ดังในรูปที่ 2.37) ด้วยระดับของการยึดติดในด้านการบิดที่เพิ่มขึ้นของปีกนั้น ได้เพิ่มค่าหน่วยแรงโก่งเดาะ มากขึ้นไปกว่า 100% สำหรับค่าความยาวครึ่งคลื่นที่มากกว่า 5000 มม. รูปแบบการโก่งเดาะที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นที่ 5000 มม. สำหรับหน้าตัดแบบเปิด (HSB2) เป็นรูปแบบทั่วไปของการโก่งเดาะแบบผสมระหว่างแรงค้ำและแรงบิด ดังในรูปแบบที่ได้อธิบายไว้ในเอกสารอ้างอิง [51] รูปแบบการโก่งเดาะแบบผสมระหว่างแรงค้ำและแรงบิด ของหน้าตัดแบบเปิด (HSB2) นี้มีความเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวตามยาวของหน้าตัด (เรียกว่าการเคลื่อนตัวแบบบิดงอ หรือ Warping) ดังตัวอย่างได้แก่การเคลื่อนตัวตามแนวยาวที่ด้านปลายอิสระแถบยาวนั้น แตกต่างไปจากการเคลื่อนตัวตามแนวยาวของแกนค้ำ ณ จุดที่ซึ่งปลายอิสระทั้งหลายมาบรรจบกับแกนค้ำ

รูปแบบการโก่งเดาะที่ 5000 มม.ของหน้าตัดแบบปีกปิด (HSB1) นั้นได้แสดงให้เห็นรูปแบบการโก่งเดาะแบบใหม่ซึ่งยังไม่ได้รับการอธิบายสำหรับหน้าตัดในประเภทนี้ มันจะเกี่ยวข้องกับ การตัดแนวด้านข้างของปีกทั้งสอง โดยที่ปีกหนึ่ง ได้รับผลมากกว่าอีกปีกหนึ่ง พร้อมกับปีกที่ไม่เกิดการบิดเลี้ยวอันเป็นผลจากระดับของการยึดติดในด้านการบิดที่เพิ่มขึ้นของมันนั่นเอง แกนดัดที่ผิดรูปไปนั้น เป็นผลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวที่สัมพันธ์กันของปีกทั้งสอง รูปแบบนี้จะเรียกว่าเป็นการโก่งเดาะแบบผิรูปด้านข้าง และได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกสำหรับหน้าตัดประเภทนี้ในเอกสารอ้างอิงที่ [55] มันจะมีค่าหน่วยแรงโก่งเดาะที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งจะมากกว่าค่าดังกล่าวของการโก่งเดาะแบบผสมระหว่างแรงดัดและแรงบิด ของหน้าตัดเปิดแบบ HBS2 เป็นการไม่ถูกต้องที่จะคำนวณค่ากำลังรับการโก่งเดาะแบบผสมระหว่างแรงดัดและแรงบิดสำหรับ HBS1 โดยการใช้อีกเอกสารอ้างอิง [51] เพราะสิ่งเหล่านี้จะก่อให้เกิดผลที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งได้แสดงไว้โดยเส้นประในรูปที่ 2.46 การเคลื่อนตัวอันเนื่องมาจากการบิดงอที่มีความแตกต่างกันในที่ตั้งปลายขอบอิสระของปีกนั้น ชนกับแกนดัดในหน้าตัด HBS2 แบบเปิดกลวงนั้นจะถูกกำจัดไปโดยการเชื่อมในหน้าตัด HBS1 แบบปิด ดังนั้นค่าหน่วยแรงการโก่งเดาะแบบผิรูปด้านข้างที่ได้รับการปรับปรุงขึ้นนั้นของหน้าตัด HBS1 นั้นจะได้รับมาทั้งหมดอันเป็นผลของการเชื่อม สูตรสำหรับการวิเคราะห์เพื่อคำนวณการโก่งเดาะแบบผิรูปด้านข้างนั้นได้ให้ไว้ในเอกสารอ้างอิง [56]

2.10 ชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดแบบเสริมค้ำยันและแบบไม่เสริมค้ำยัน

2.10.1 การโก่งเดาะแบบเฉพาะที่

การโก่งเดาะแบบเฉพาะที่นั้นจะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่อันเนื่องจากการดัดของชิ้นส่วนแผ่นเหล็ก ซึ่งเส้นที่เชื่อมต่อกันระหว่างชิ้นส่วนแผ่นเหล็กนั้นจะยังคงเป็นเส้นตรงอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.28, 2.29, 2.40 และ 2.34 ได้มีการค้นคว้าและสรุปผลของการคำนวณค่าหน่วยแรงวิกฤตแบบยืดหยุ่น (Elastic Critical Stress) สำหรับการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ กันอย่างมากมาย ดังในผลการศึกษาของ Timoshenko และ Gere [51], Bleich [57], Bulson [58], และ Allen และ Bulson [59] ค่าหน่วยแรงวิกฤตแบบยืดหยุ่นสำหรับการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ของชิ้นส่วนแผ่นเหล็กซึ่งรับแรงอัด, แรงดัด, หรือแรงเฉือนนั้น แสดงได้ดังนี้

$$f_{oi} = -\frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} (t/b)^2 \quad (2.16)$$

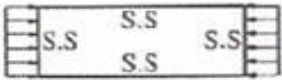
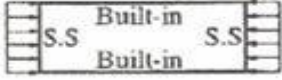
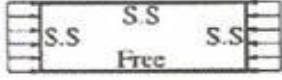
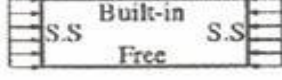
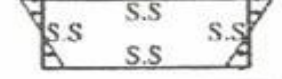
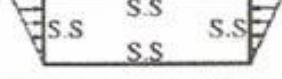
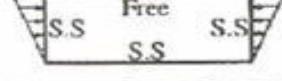
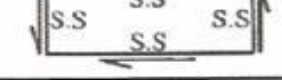
โดยที่ k เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะเฉพาะที่ของแผ่นเหล็ก และจะขึ้นกับเงื่อนไขที่จุดรองรับ, และ (b/t) เรียกว่าค่าความชะลูดของแผ่นเหล็ก ซึ่งคือ ค่าความกว้างของแผ่น (b) หารด้วยความหนาของแผ่น (t)

รายการสรุปสำหรับ ค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเดาะเฉพาะที่ของแผ่นเหล็ก (k) ตามค่าความยาวครึ่งคลื่นของการโค้งเดาะเฉพาะที่นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.38 ตัวอย่างเช่น แผ่นเหล็กที่มีการรองรับด้วย Simple Support ที่ขอบทั้งสี่ด้านและต้องรับแรงอัดแบบสม่ำเสมอจะโค้งเดาะที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นที่เท่ากับความกว้างของแผ่น (b) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเดาะของแผ่นเหล็ก (k) เท่ากับ 4.0 แผ่นเหล็กที่มีปลายตามยาวอิสระที่ขอบด้านหนึ่ง และอีกสามด้านเป็นแบบ Simple Support นั้นจะโค้งเดาะที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นเท่ากับความยาวของแผ่น (L) และถ้าค่านี้ยาวมากพอ ค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเดาะของแผ่นเหล็กจะเท่ากับ 0.425 แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าความยาวครึ่งคลื่นของการโค้งเดาะนั้นถูกจำกัดที่ความยาวเท่ากับสองเท่าของความกว้าง ($L = 2b$) แล้วค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเดาะจะมีค่าประมาณ 0.675 และเป็นไปตามรูปที่ 2.38

สำหรับหน้าตัดรูปร่างแบบไม่มีขอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และรับแรงอัดแบบสม่ำเสมอ ถ้ามีการวิเคราะห์แบบแยกส่วนสำหรับปีกและแกนตั้ง โดยไม่คำนึงถึงการจำกัดการหมุนที่เกิดขึ้นจากชิ้นส่วนที่ติดกันแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเดาะ คือ $k = 0.425$ สำหรับชิ้นส่วนปีก และ $k = 4.0$ สำหรับชิ้นส่วนแกนตั้ง สิ่งต่างๆเหล่านี้จะทำให้ค่าหน่วยแรงโค้งเดาะเป็น 336 MPa สำหรับชิ้นส่วนของปีกและมีค่าความยาวครึ่งคลื่นแบบยาวมากๆ และเป็น 334 MPa สำหรับชิ้นส่วนของแกนตั้งที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นเป็น 149 MPa การวิเคราะห์โดยวิธี Finite Strip สำหรับการหาการโค้งเดาะนั้น ได้แสดงให้เห็นว่า ชิ้นส่วนทั้งสามนั้นเกิดการโค้งเดาะแบบพร้อมกันทันทีที่ค่าความยาวครึ่งคลื่นประมาณ 160 มม. ที่ค่าหน่วยแรงอัดเป็น 350 MPa ค่าหน่วยแรงนี้จะสูงกว่าหน่วยแรงของชิ้นส่วนแบบที่คิดแยกส่วน เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อทำให้เกิดค่าความยาวครึ่งคลื่นที่สอดคล้องกัน

สำหรับแปหน้าตัดรูปร่างแบบมีขอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 นั้น ค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเดาะของชิ้นส่วนแกนตั้งในการตัด, ชิ้นส่วนปีกในแรงอัดแบบสม่ำเสมอ, และส่วนขอบที่อยู่ใกล้แรงอัดแบบสม่ำเสมอนั้นคือ 23.9, 4.0, และ 0.425 ตามลำดับ ค่าหน่วยแรงการโค้งเดาะที่ตรงกันคือ 440 MPa, 404 MPa, และ 985 MPa ตามลำดับ ในกรณีนี้ การวิเคราะห์การโค้งเดาะด้วยวิธี Finite Strip นั้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นส่วนทั้งสามนั้นเกิดการโค้งเดาะที่ค่าหน่วยแรงและความยาวครึ่งคลื่นเท่ากับ 450 MPa และ 90 มม. ตามลำดับ

สำหรับกรณีทั้งสองที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นนั้น ตามปกติผู้ออกแบบจะไม่ต้องประเมินถึงปฏิสัมพันธ์ของการวิเคราะห์การโค้งเดาะ และจะใช้ค่าต่ำสุดของค่าหน่วยแรงโค้งเดาะในหน้าตัดโดยพิจารณาถึงชิ้นส่วนแต่ละชิ้นแยกๆกัน หัวข้อ 2.2.1.2 ของ AS/NZS 4600 นั้นได้ยอมให้ ค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเดาะแบบเฉพาะที่ (k) นั้นขึ้นอยู่กับกรณีการวิเคราะห์ที่มีเหตุผลและเชื่อถือได้สำหรับการโค้งเดาะแบบยึดหยุ่นเพื่อใช้ในการออกแบบ

กรณี	เงื่อนไขขอบเขต	รูปแบบแรงกระทำ	ค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะ (k)	ความยาวครึ่งคลื่น
1		แรงอัดสม่ำเสมอ	4.0	b
2		แรงอัดสม่ำเสมอ	6.97	0.66b
3		แรงอัดสม่ำเสมอ	0.425 0.675	$L = \infty$ $L = 2b$
4		แรงอัดสม่ำเสมอ	1.247	1.636b
5		แรงคดโค้ง	23.9	0.7b
6		แรงคดและแรงอัด	7.81	b
7		แรงคดและแรงอัด	0.57	$L = \infty$
8		แรงเฉือนล้วน	5.35 9.35	$L = \infty$ $L = b$

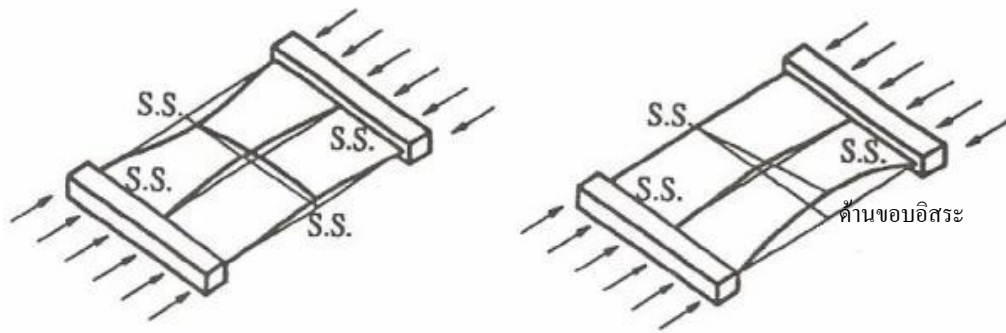
L = ความยาวแผ่นเหล็ก, b = ความกว้างแผ่นเหล็ก

รูปที่ 2.38 ค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะของแผ่นเหล็ก

2.10.2 การโก่งเดาะแบบเกิดขึ้นที่หลังของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กแผ่นรับแรงอัด

การโก่งเดาะแบบเฉพาะที่นั้นตามปกติแล้วจะไม่ยังผลให้โครงสร้างเกิดการวิบัติตั้งกรณีของการโก่งเดาะอันเนื่องมาจากแรงคด (การโก่งเดาะออยเลอร์) ที่เกิดขึ้นในเสา เมื่อแผ่นเหล็กรับความเค้นอัดอันเนื่องมาจากแรงอัดแบบสม่ำเสมอและอยู่ระหว่างจุดแทนกคไร้แรงเสียดทานที่มั่นคง ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากที่เกิดการโก่งเดาะ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) และก็จะกระจายค่าหน่วยแรงของแผ่นบางตามแนวยาว จากหน่วยแรงอัดแบบสม่ำเสมอไปเป็น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) สิ่งนี้จะเกิดขึ้นโดยไม่ขึ้นอยู่กับว่าแผ่นเหล็กนั้นจะได้รับการเสริมค้ำยันหรือไม่ ชิ้นส่วนแผ่นเหล็กจะสามารถรับน้ำหนักกระทำต่อไปได้ถึงแม้ว่าค่าสตีเฟนสของมันนั้นจะลดลงไปถึง 40.8% ของค่าสตีเฟนสยึดหยุ่นแบบเชิงเส้นเดิมสำหรับชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และเป็น 44.4% สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยันแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [58] แต่อย่างไรก็ตามนั้น เส้นของแรง

กระทำของแรงอัดในชั้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยันนั้นจะเคลื่อนตัวไปทางขอบที่ได้รับการเสริมค้ำยันซึ่งเรียกว่าอยู่ในช่วงของการ โกงเดาะแบบเกิดขึ้นทีหลัง

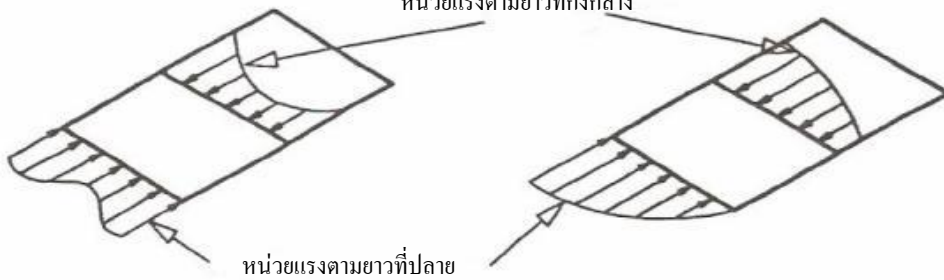


(1) ชั้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยัน

(2) ชั้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน

ก) การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

หน่วยแรงตามยาวที่กึ่งกลาง



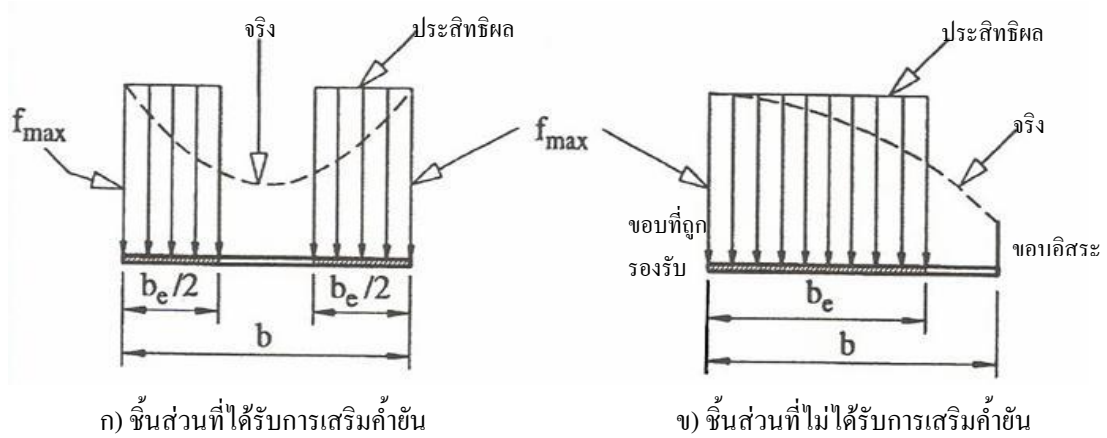
(1) ชั้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยัน

(2) ชั้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน

ข) หน่วยแรงต่างๆ

รูปที่ 2.39 เหล็กแผ่นที่เกิดการ โกงเดาะแบบเกิดขึ้นทีหลัง

การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับการ โกงเดาะแบบเกิดขึ้นทีหลังและการวิบัติของแผ่นเหล็ก นั้นมีความยากเป็นอย่างมาก และโดยมากแล้วจะต้องอาศัยการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อการ ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำ เพื่อหลีกเลี่ยงการวิเคราะห์ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการออกแบบนั้น Von Karman [60] จึงได้ให้ข้อเสนอแนะว่าการกระจายของหน่วยแรงที่ศูนย์กลางหน้าตัดของแผ่นเหล็กที่ ได้รับการเสริมค้ำยันนั้นสามารถถูกแทนที่ได้โดยค่าครึ่งของความกว้าง ($b_e/2$) บนแต่ละด้านของแผ่น ซึ่งรับหน่วยแรงแบบสม่ำเสมอ (f_{max}) ดังแสดงในรูปที่ 2.40(ก) เพื่อให้ค่าของ $f_{max} b_e$ นั้นเท่ากับค่าน้ำหนักกระทำแท้จริงบนแผ่นเหล็ก Von Karman นั้นได้เรียกค่าความกว้างนี้ (b_e) ว่าเป็นความกว้าง ประสิทธิภาพ (Effective Width)



รูปที่ 2.40 การกระจายหน่วยแรงประสิทธิภาพ

Von Karman ยังได้แนะนำว่าสองแถบเล็กๆนั้นควรจะพิจารณาให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง (b_e) และเมื่อใดก็ตามที่หน่วยแรงวิกฤตแบบยืดหยุ่นของแผ่นเหล็กนี้เท่ากับกำลังคราก (f_y) ของวัสดุแล้ว การบิดของแผ่นเหล็กก็จะเกิดขึ้น จากสมการที่ 2.16

$$f_y = -\frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b_e}\right)^2 \quad (2.17)$$

เมื่อหารสมการที่ 2.16 ด้วยสมการที่ 2.17 จะได้

$$\frac{b_e}{b} = -\sqrt{\frac{f_{ol}}{f_y}} \quad (2.18)$$

สมการที่ 2.18 นั้นคือสูตรของ Von Karman สำหรับความกว้างประสิทธิภาพ และสามารถใช้ในการออกแบบได้ ถึงแม้ว่า Von Karman จะแนะนำเพียงแต่สูตรของความกว้างประสิทธิภาพสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยัน และพบว่ามันสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีสำหรับความกว้างประสิทธิภาพสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน ที่แสดงในรูปที่ 2.40(ข) ในกรณีนี้ความกว้างประสิทธิภาพแบบเต็ม (b_e) จะถูกวางตำแหน่งไว้ที่ใกล้จุดรองรับ

2.10.3 สูตรของความกว้างประสิทธิภาพสำหรับชิ้นส่วนที่ไม่สมบูรณ์แบบในการรับแรงอัดเพียงอย่างเดียว

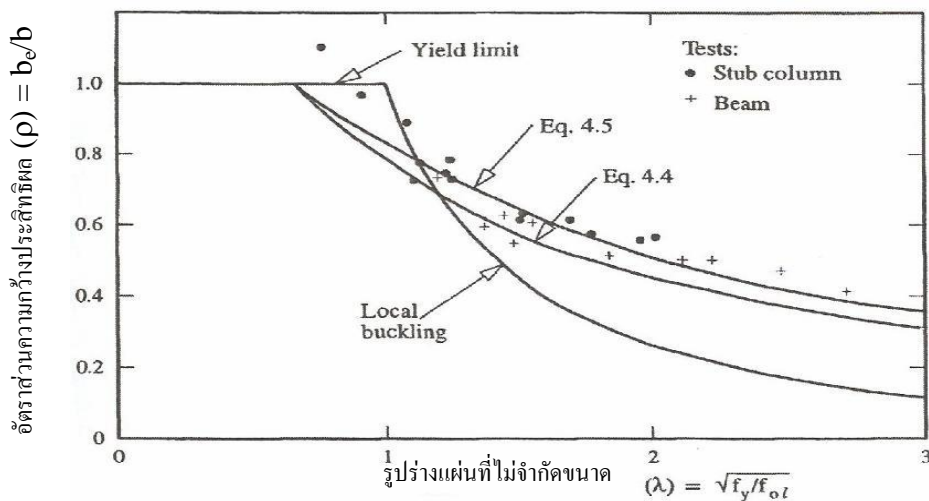
ชิ้นส่วนที่รับแรงอัดของชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น ที่ประกอบไปด้วยลักษณะทางเรขาคณิตที่ไม่ค่อยสมบูรณ์และมีหน่วยแรงคงค้าง (Residual Stress) จากขั้นตอนการขึ้นรูปเย็น ดังนั้นสูตรของ Von Karman สำหรับความกว้างประสิทธิภาพ นั้นจำเป็นที่จะต้องได้รับการแปลงรูป

เพื่อคิดถึงการลดลงของกำลังรับแรง อันเป็นผลเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์นี้ Winter ได้นำเสนอและพิสูจน์โดยอาศัยผลการทดลอง [61,62] สำหรับสูตรของความกว้างประสิทธิภาพต่อไปนี้ สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างจำพวกเสาที่ได้รับการเสริมค้ำยัน (สมการที่ 2.19) และชิ้นส่วนโครงสร้างจำพวกเสาที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน (สมการที่ 2.20)

$$\frac{b_e}{b} = \sqrt{\frac{f_{ol}}{f_y}} \left(1 - 0.22 \sqrt{\frac{f_{ol}}{f_y}} \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{b_e}{b} = 1.19 \sqrt{\frac{f_{ol}}{f_y}} \left(1 - 0.298 \sqrt{\frac{f_{ol}}{f_y}} \right) \quad (2.20)$$

ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองของหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นซึ่งมีชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน [63] กับสมการที่ 2.19 และ 2.20 นั้นได้แสดงในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 การทดสอบชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน

สำหรับชิ้นเหล็กแผ่นที่มีความชะลูด ($\sqrt{f_y/f_{ol}} > 2.0$), สมการที่ 2.20 สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยันนั้นจะให้ค่าประมาณผลการทดลองที่ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามสำหรับแผ่นเหล็กที่ดูแกร่งมากกว่าแล้ว สมการที่ 2.19 จะให้การประมาณค่าสำหรับกำลังรับแรงของเหล็กแผ่นที่ดีกว่า ดังนั้น ใน AS/NZS 4600 สมการที่ 2.19 จะถูกใช้สำหรับทั้งชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดทั้งแบบที่ได้รับการเสริมค้ำยัน และแบบที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน สิ่งนี้ยังมีข้อได้เปรียบในเรื่องของความง่าย เพราะสมการเพียงสมการเดียวนั้นสามารถใช้กับชิ้นส่วนทั้งสองแบบ สมการสุดท้ายสำหรับความกว้างประสิทธิภาพที่ได้จากการแทนที่สมการที่ 2.16 ในสมการที่ 2.19 คือ

$$\frac{b_c}{t} = 428 \sqrt{\frac{k}{f_y}} \left(1 - \frac{93.5}{\frac{b}{t}} \right) \sqrt{\frac{k}{f_y}} \quad (2.21)$$

ได้มีการพิสูจน์แล้วว่าสมการที่ 2.21 นั้นใช้ได้กับค่าหน่วยแรงที่ต่ำกว่าหน่วยแรงคราก ดังนั้น f_y จึงสามารถแทนที่ด้วย f^* ได้ จึงได้

$$\frac{b_c}{t} = 428 \sqrt{\frac{k}{f^*}} \left(1 - \frac{93.5}{\frac{b}{t}} \sqrt{\frac{k}{f^*}} \right) \quad (2.22)$$

โดยที่ f^* คือ หน่วยแรงสำหรับการออกแบบในชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัด ที่คำนวณโดยความกว้างประสิทธิภาพออกแบบ

สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดแบบที่ได้รับการเสริมค้ำยัน, k จะเป็น 4.0 และสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงอัดแบบที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน, k จะเป็น 0.425

ใน AS/NZS 4600 สัญลักษณ์ λ จะถูกใช้เพื่อแสดงถึงความชะลูดของเหล็กแผ่นแบบไร้หน่วย ที่ค่าหน่วยแรง (f^*) ดังนั้น

$$\lambda = \sqrt{\frac{f^*}{f_{ol}}} = \frac{1.052}{\sqrt{k}} \left(\frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{f^*}{E}} \quad (2.23)$$

ดังนั้น เราจะสามารถจัดเรียงสมการที่ 2.22 เสียใหม่ ดังที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 2.2.1.2 ของมาตรฐานดังต่อไปนี้

$$\rho = \frac{b_e}{b} = \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda} \right)}{\lambda} \quad (2.24)$$

โดย ρ นั้นเรียกว่าตัวประกอบความกว้างประสิทธิภาพ ค่าความกว้างประสิทธิภาพ (b_e) เท่ากับ b เมื่อ $\lambda = 0.673$ ดังนั้นสมการที่ 2.24 นั้นจะใช้ได้สำหรับ $\lambda > 0.673$ สำหรับค่า $\lambda \leq 0.673$ นั้นถือว่าเหล็กแผ่นนั้นจะมีประสิทธิภาพสูงสุด

สำหรับการออกแบบในภาวะกำลังรับขีดสุด ในที่ซึ่งการวิบัติเกิดขึ้นจากการคราก, ความกว้างประสิทธิภาพนั้นจะคำนวณจากการที่ f^* เท่ากับหน่วยแรงคราก f_y สำหรับการออกแบบในภาวะกำลังรับขีดสุด ในที่ซึ่งการวิบัติเกิดขึ้นจากการโก่งเดาะในภาพรวม มากกว่าการเกิดการคราก ความกว้างประสิทธิภาพนั้นจะถูกคำนวณโดย f^* เท่ากับกำลังการโก่งเดาะแบบรวม

สำหรับการคำนวณในส่วนของการแอ่นตัว, ค่าความกว้างประสิทธิผลนั้นจะคำนวณโดยใช้สูตรของค่าความกว้างประสิทธิผลโดยมีค่า f^* เท่ากับหน่วยแรง (f_d^*) ในปีกรับแรงอัด ณ ค่าน้ำหนักกระทำที่กำลังหาค่าการแอ่นตัว สมการผลลัพธ์ที่ได้นั้นได้แสดงไว้ในหัวข้อ 2.2.1.3 ของ AS/NZS 4600 ในหัวข้อ 2.2.1.3 ได้แสดงถึงขั้นตอนสองประการ โดยขั้นตอนแรก เพียงแทนที่ f_d^* ไปแทนค่า f^* ในสมการที่ 2.24 และจะให้ค่าประเมินที่ค่อนข้างต่ำสำหรับ ค่าความกว้างประสิทธิผลและจึงเป็นผลให้ได้ค่าการแอ่นตัวที่มากขึ้น ส่วนในขั้นตอนที่สองนั้น จะขึ้นกับการศึกษาที่ทำโดย Weng และ Pekoz [64] ซึ่งได้เสนอสมการสำหรับ ค่าความกว้างประสิทธิผลที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นสำหรับการคำนวณค่าการแอ่นตัว ซึ่งสมการเหล่านี้ ได้แก่

สำหรับ $0.673 < \lambda < \lambda_c$

$$\rho = \frac{b_{ed}}{b} = \frac{1.358 - \frac{0.461}{\lambda}}{\lambda} \quad (2.25)$$

และ สำหรับ $\lambda \geq \lambda_c$

$$\rho = \frac{b_{ed}}{b} = \frac{\left(0.41 + 0.59 \sqrt{\frac{f_y}{f_d^*} - \frac{0.22}{\lambda}}\right)}{\lambda} \quad (2.26)$$

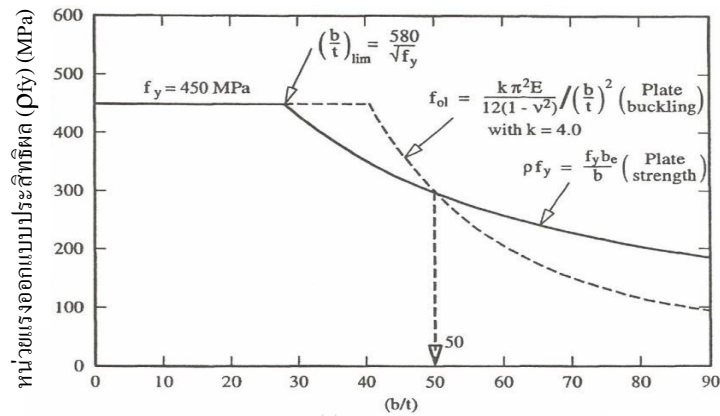
โดย

$$\lambda_c = 0.256 + 0.328 \left(\frac{b}{t}\right) \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (2.27)$$

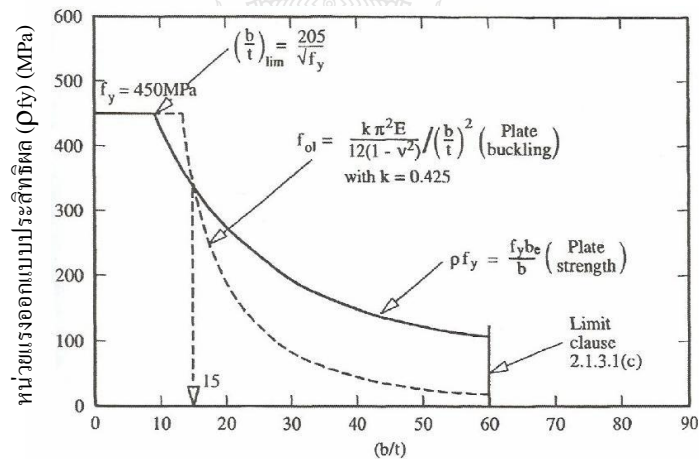
f_d^* นั้นถูกแทนที่สำหรับ f^* ในการคำนวณค่า λ

เส้นโค้งสำหรับการออกแบบสำหรับหน่วยแรงออกแบบประสิทธิผล (ρf_y) ในชิ้นส่วนรับแรงอัดนั้นขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดประลัยของเหล็กแผ่น ($f_y b_e t$) โดย b_e นั้นเป็นไปตามสมการที่ 2.22 เส้นโค้งเหล่านี้ได้แสดงในรูปที่ 2.42 สำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ได้รับการเสริมค้ำยัน ซึ่งมี $k = 4.0$ และในรูปที่ 2.43 สำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน ซึ่งมี $k = 0.43$ ค่าหน่วยแรงออกแบบ (f^*) ซึ่งเท่ากับหน่วยแรงคราก (f_y) ที่ 450 MPa นั้นได้ถูกใช้ทั้งในรูปที่ 2.42 และ 2.43 ถึงแม้ว่าใน AS/NZS 4600 นั้นค่า ค่าความกว้างประสิทธิผลจะค่อนข้างถูกนำมาใช้มากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผล รูปภาพเหล่านี้ก็ยังมีประโยชน์อยู่เพราะมันให้ค่าหน่วยแรงเฉลี่ยที่กระทำบนชิ้นส่วนแผ่นเหล็กที่จุดวิบัติ เป็นที่น่าสนใจว่าค่าความชะลูดของแผ่นเหล็ก ซึ่งเป็นจุดที่ค่าของหน่วยแรงโค้งเดาะแบบเฉพาะที่นั้นจะมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงของเหล็กแผ่น จะมีค่าโดยประมาณ 50 และ 15

สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างรับแรงอัดแบบได้รับการเสริมค้ำยัน และ แบบไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน, ตามลำดับ



รูปที่ 2.42 หน่วยแรงออกแบบประสิทธิภาพ (ρf_y) ของชิ้นส่วน โครงสร้างรับแรงอัดแบบได้รับการเสริมค้ำยัน ($f_y = 450 \text{ MPa}$)



รูปที่ 2.43 หน่วยแรงออกแบบประสิทธิภาพ (ρf_y) ของชิ้นส่วน โครงสร้างรับแรงอัดแบบไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน ($f_y = 450 \text{ MPa}$)

สำหรับชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันและมีรูซึ่งได้รับแรงอัดแบบสม่ำเสมอ นั้นสามารถแปลงรูปดังได้ระบุไว้ในหัวข้อ 2.2.2.2 ใน AS/NZS 4600 สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่ไม่ชะลูดซึ่งมีค่า $\lambda \leq 0.673$ อาจจะถือว่าไม่พิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_h) โดยนำออกไปจากแผ่นเหล็กกว้าง (b) ไปเสียโดยง่ายก็ได้ อย่างไรก็ตามสำหรับโครงสร้างที่ชะลูดซึ่งมี ค่า $\lambda > 0.673$ แล้ว ค่า b_c นั้นจะหาได้จากสมการที่ 2.28 ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ $b - d_h$

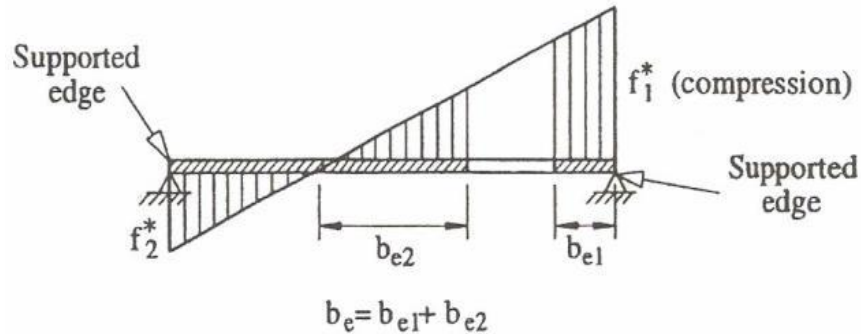
$$b_c = b \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda} - \frac{0.8d_h}{b}\right)}{\lambda} \quad (2.28)$$

สมการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับการวิจัยของ Ortiz-Colberg และ Pekoz [65] และจะใช้กับกรณีเมื่อ $b/t \leq 70$ และ ระยะระหว่างรูแต่ละรูนั้นมากกว่า $0.5b$ และ $3d_h$ เท่านั้น สมการเหล่านี้จะไม่ใช้กับรูในรูปร่างอื่นๆดังเช่นรูสี่เหลี่ยมที่ซึ่งเหล็กแผ่นที่อยู่ใกล้ๆกับขอบตามแนวยาวนั้นอาจจะถูกมองให้เป็นชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยันและอาจจะออกแบบให้เป็นรูปแบบดังกล่าวได้

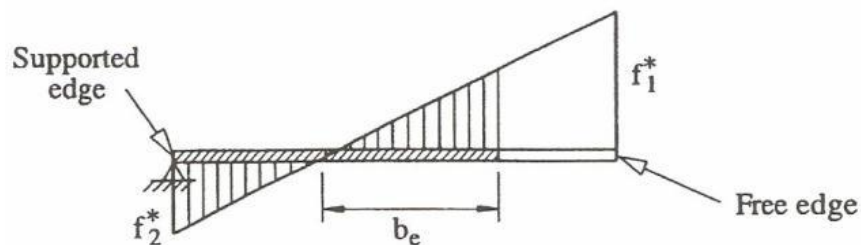
2.10.4 สูตรของความกว้างประสิทธิผลสำหรับชิ้นส่วนที่ไม่สมบูรณ์แบบในการรับหน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง

ก. ชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยัน

ชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันภายในหน่วยแรงกระทำที่เปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง ซึ่งได้แก่แกนตั้งของคาน ซึ่งได้รับการออกแบบไปก่อนหน้านี้ตาม AS 1538-1988 โดยการสมมติให้แกนตั้งประสิทธิผลทั้งหมดและค่าหน่วยแรงจำกัด (F_{bw}) ในแกนตั้ง ใน AS/NZS 4600 ชิ้นส่วนประเภทนี้ได้รับการออกแบบโดยใช้วิธีแบบความกว้างประสิทธิผล ดังแสดงในรูปที่ 2.53(ก) สำหรับกรณีของชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันที่ได้รับแรงอัดแบบสม่ำเสมอ



ก) ชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยัน



ข) ชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน

รูปที่ 2.44 ค่าความกว้างประสิทธิผลสำหรับชิ้นส่วนเหล็กแผ่นภายใต้หน่วยแรงที่เปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง

ค่าความกว้างประสิทธิภาพนั้นจะถูกแยกออกเป็นสองส่วนและนำไปตั้งไว้ที่ขอบของ ส่วนที่รับแรงอัด ดังแสดงในรูปที่ 2.53(ก) อย่างไรก็ตามความกว้าง b_{e1} และ b_{e2} นั้นไม่เท่ากันสำหรับ กรณีของชิ้นส่วนรับแรงอัดสม่ำเสมอแบบได้รับการค้ำยัน สมการสำหรับ ค่าความกว้างประสิทธิภาพ แบบแปลงรูปนั้นได้ให้ไว้ในหัวข้อที่ 2.2.3 ใน AS/NZS 4600 ค่าความกว้างประสิทธิภาพจะขึ้นกับการ เปลี่ยนแปลงเชิงเส้นของหน่วยแรงตามตัวแปร $\Psi = f_2^* / f_1^*$ นอกจากนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะ (k) จะเปลี่ยนไประหว่าง 4.0 สำหรับการรับแรงอัดแต่อย่างเดียว และ 23.9 สำหรับการรับแรงดัดแต่ เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.38 ค่าเฉพาะของ k เพื่อใช้สำหรับหน่วยแรงแบบเปลี่ยนแปลงเชิง เส้น นั้นจะกำหนดโดย Ψ และนิยามโดยสมการที่ 2.2..3.2(4) ใน AS/NZS 4600 นอกจากนั้นแล้วการ อธิบายและการประยุกต์ใช้งานก็ได้แสดงไว้ใน “ชิ้นส่วนแกนดัดรับแรงดัด” ในการเปรียบเทียบของค่า ใดๆในกระบวนการนี้ได้แสดงไว้โดย Pekoz [57]

ข. ชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน

ชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยันภายในหน่วยแรงกระทำที่เปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง ซึ่งได้แก่ส่วนที่เป็นปีกของหน้าตัดรางน้ำซึ่งได้รับการดัดรอบแกนรอง นั้นสามารถถูกออกแบบได้ โดยง่ายโดยสมมติให้ปีกดังกล่าว ได้รับหน่วยแรงอัดแบบสม่ำเสมอด้วยหน่วยแรงออกแบบ (f^*) ที่ เท่ากับค่าหน่วยแรงสูงสุดในชิ้นส่วน โครงสร้างดังกล่าว วิธีการนี้เป็นวิธีพื้นฐานที่ให้ไว้ในหัวข้อ 2.3.2 ของ AS/NZS 4600 และเป็นวิธีถูกระบุไว้ในข้อกำหนดรายละเอียดของ AISI [16] โดยจะสมมติ ค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะ (k) สำหรับการอัดแบบสม่ำเสมอให้เป็น 0.43 อย่างไรก็ตาม ยังมีวิธีที่ ดีกว่าซึ่งได้ให้ไว้ในภาคผนวก F ของ AS/NZS 4600 วิธีนี้จะใช้ ค่าความกว้างประสิทธิภาพของรูปแบบ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.53(ข) ซึ่งมีการยอมให้สำหรับชิ้นส่วนซึ่งรับแรงดัด นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ การโก่งเดาะ (k) ยังจะขึ้นอยู่กั อัตราส่วนของหน่วยแรง (Ψ) และตามปกติ จะเป็น 0.43 ในการ ประยุกต์ใช้ในภาคผนวก F อัตราส่วนของหน่วยแรงจะถูกสมมติให้เป็นหน่วยแรงบนหน้าตัดรวม ทั้งหมด และจะไม่ต้องอาศัยการคำนวณแบบซ้ำไปซ้ำมา ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการทำให้กระบวนการ ทั้งหมดง่ายขึ้นบ้าง สูตรต่างๆในภาคผนวก F นั้นจะอาศัยพื้นฐานตาม Eurocode 3 ส่วนที่ 1.3 [20]

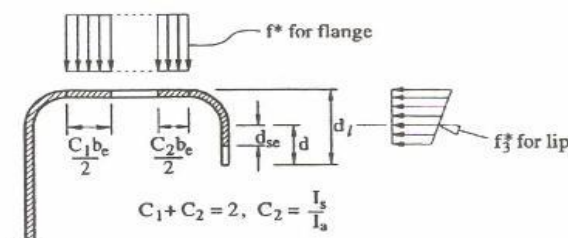
2.10.5 สูตรของความกว้างประสิทธิภาพสำหรับชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยัน

ก. ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันที่ขอบ

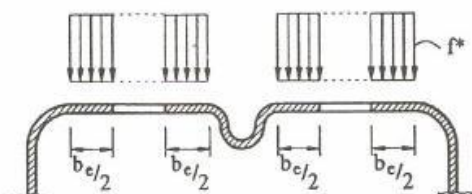
ชิ้นส่วนสำหรับเสริมการค้ำยันบริเวณขอบนั้นจะอยู่ที่ขอบอิสระของเหล็กแผ่นที่ยัง ไม่ได้รับการเสริมค้ำยันเพื่อที่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11(จ) จึงเป็นผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะนั้นเพิ่มขึ้นจาก 0.43 ไปเป็นถึง 4.0 พร้อมๆกับการ เพิ่มกำลังรับแรงของเหล็กแผ่น ค่าความกว้างประสิทธิภาพของชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันอย่าง เพียงพอนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11(จ) อย่างไรก็ตาม ชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันแบบบางส่วนนั้น อาจจะมีพื้นที่ประสิทธิภาพที่กระจายตัวไป ดังแสดงในรูปที่ 2.54 (ก) ซึ่งค่าของ C_1 และ C_2 นั้นจะขึ้นอยู่กับความพอเพียงของชิ้นส่วนเสริมเพื่อค้ำยันที่อยู่บริเวณขอบ นอกจากนี้แล้ว ชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่

ขอบนี้โดยตัวมันเองนั้นอาจจะมีประสิทธิภาพอย่างเต็มที่ดังแสดงได้จาก ค่าความกว้างประสิทธิภาพ (d_{se}) ในรูปที่ 2.54 (ก)

สูตรของ ค่าความกว้างประสิทธิภาพของ ชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันนั้นจะเป็นไปตามสมการที่ 2.24 อย่างไรก็ตามความพอเพียงของชิ้นส่วนเสริมเพื่อค้ำยันนั้นจะเป็นตัวที่กำหนด ค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเคาะ (k) เพื่อใช้ในสมการที่ 2.23 งานวิจัยจำนวนมากในด้านที่เกี่ยวกับ ชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันบริเวณขอบซึ่งดำเนินการโดย Desmond, Pekoz, และ Winter (เอกสารอ้างอิง 4.11) เพื่อหาสมการที่จำเป็นสำหรับการออกแบบ สมการเหล่านี้ได้ให้ไว้ในหัวข้อที่ 2.4.3 ของ AS/NZS 4600 และมีกรณีศึกษาสามกรณีได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 2.55 กรณีที่ 1 นั้นจะใช้กับหน้าตัดซึ่งถือว่าเป็นแบบประสิทธิภาพเต็มที่โดยไม่มีการใช้ ชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน ส่วนกรณีที่ 2 จะใช้กับหน้าตัดที่เป็นแบบประสิทธิภาพเต็มที่เช่นกันถ้ามีชิ้นส่วนเสริมเพื่อค้ำยันบริเวณขอบพอเพียง และในกรณีที่ 3 นั้นจะใช้กับหน้าตัดซึ่งมีปีกที่ไม่เป็นแบบประสิทธิภาพเต็มที่ เป็นที่สังเกตได้ว่าการกระจายตัวของหน่วยแรงนั้นขึ้นกับไม่เพียงแต่ลักษณะในแต่ละกรณีเท่านั้น แต่จะขึ้นกับความเพียงพอของตัวเสริมค้ำยัน และความยาวของขอบ (d) เทียบกับความกว้างของปีก (b) อีกด้วย ความเพียงพอของชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน นั้นจะถูกนิยามโดยอัตราส่วนของโมเมนต์ที่สองของพื้นที่ของชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน (I_s) ต่อค่าที่เพียงพอ (I_e) ซึ่งได้ระบุไว้ในหัวข้อ 2.4.3 ใน AS/NZS 4600 โมเมนต์ที่สองของพื้นที่ของชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน นั้นจะใช้สำหรับส่วนที่แบนบาง (χ) ของชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน ดังแสดงในรูปที่ 2.54(ก) สิ่งนี้จะแตกต่างไปจาก AS 1538-1988 ซึ่งโมเมนต์ที่สองของพื้นที่ของชิ้นส่วนเสริมค้ำยันนั้นจะถูกรวมไว้แล้วในการตัด



ก) ชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันที่บริเวณขอบ



ข) ชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันที่บริเวณส่วนกลาง

รูปที่ 2.45 ค่าความกว้างประสิทธิภาพสำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่มีการเสริมค้ำยัน

No stiffener	Stiffener not too long $\frac{d_f}{b} \leq 0.25$	Stiffener too long $\frac{d_f}{b} > 0.25$	
CASE I $\frac{b}{t} \leq \frac{S}{\lambda}$ Flange fully effective without stiffener			
 $I_s = 0$	Stress Section $S = 1.28 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$		
CASE II $\frac{S}{\lambda} \leq \frac{b}{t} \leq S$ Flange fully effective with $I_s \geq I_a$ and $\frac{d_f}{b} \leq 0.25$			
 $I_s = 0$	 $I_s < I_a$	 $I_s \geq I_a$	 $I_s > I_a$
CASE III $\frac{b}{t} \geq S$ Flange not fully effective			
 $I_s = 0$	 $I_s < I_a$	 $I_s \geq I_a$	 $I_s > I_a$

รูปที่ 2.46 การกระจายตัวของหน่วยแรงและเงื่อนไขในการออกแบบสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันที่ขอบ

ถ้าชิ้นส่วนเสริมค้ำยันนั้นไม่เพียงพอ ($I_s / I_a < 1.0$) พื้นที่ประสิทธิผลของชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน (A_{se}) จึงถูกลดรูปเป็น A_s ดังแสดงด้วยสมการที่ 2.29 เมื่อคำนวณคุณสมบัติรวมของหน้าตัด ประสิทธิภาพทั้งหมด กระบวนการต่าง ๆ นั้นจะซับซ้อนมากกว่าใน AS 1538-1988 แต่จะมีการยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไปจากชิ้นส่วนแบบที่มีการเสริมค้ำยันไปเป็นชิ้นส่วนแบบที่ไม่มีการเสริมค้ำยัน โดยปราศจากการลดลงของกำลังรับแรงแบบทันทีทันใด ถ้าชิ้นส่วนค้ำยันนั้นไม่เพียงพอ

$$A_s = \left(\frac{I_s}{I_a} \right) A_{se} \quad (2.29)$$

ข. ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันที่ตรงกลางโดยชิ้นส่วนเสริมค้ำยันชิ้นเดียว
 ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันที่ตรงกลางโดยชิ้นส่วนเสริมค้ำยันชิ้นเดียว ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.54(ข) นั้นจะมีข้อปฏิบัติที่เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับ AS/NZS 4600 ในเรื่องของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันบริเวณขอบ ซึ่งจะใช้การคำนวณที่เกี่ยวกับความกว้างประสิทธิผล ซึ่งขึ้นอยู่กับความพอเพียงของชิ้นส่วนเสริมค้ำยันนั่นเอง อย่างไรก็ตามส่วนที่เป็น

ส่วนประสิทธิผลของชิ้นส่วนที่อยู่ติดกับชิ้นส่วนเสริมค้ำยันนั้นจะถูกลดให้กระจายเท่าๆกันบนแต่ละข้างของแต่ละชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.54(ข) และเพราะว่าการที่ชิ้นส่วนที่ได้รับการเสริมค้ำยันที่บริเวณขอบนั้น จะมีค่าสัมประสิทธิ์การโก่งคาะ (k) ซึ่งขึ้นอยู่กับความพองเพียงของชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน ดังนั้นโดย I_s/I_a เช่นเดียวกัน พื้นที่ประสิทธิผลของชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน (A_{se}) จึงได้ถูกลดลงให้เป็น A_s ดังสมการที่ 2.29 ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบในรายละเอียดนั้น ได้ให้ไว้ในหัวข้อ 2.4.2 ของ AS/NZS 4600 ข้อกำหนดการออกแบบนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของงานวิจัยของ Desmond, Pekoz และ Winter [68]

ค. ชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลางสำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันที่ขอบ โดยชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลาง, และชิ้นส่วน โครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันด้วยชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลางมากกว่าหนึ่งตัว

งานวิจัยของ Desmond, Pekoz และ Winter [67,68] นั้นไม่ได้รวมส่วนกรณีดังต่อไปนี้ ด้วย และจึงเป็นผลให้การออกแบบนั้นไม่สามารถทำตามในแบบเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4.5.1 และ 4.5.2 ในด้านบน วิธีที่ใช้ใน AS/NZS 4600 นั้นจะเหมือนกับที่ได้ใช้มาก่อนใน AS 1538-1988 ซึ่งไม่คำนึงถึงผลกระทบของชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน ถ้าชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลางนั้นมีค่าโมเมนต์อันดับสองของพื้นที่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่กำหนดให้

AS/NZS 4600 ยังได้รวมเอาวิธีการออกแบบสำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างซึ่งได้รับการเสริมค้ำยันที่ขอบซึ่งมีชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลางเพียงหนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัว หรือ สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างซึ่งได้รับการเสริมค้ำยันซึ่งมีชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลางมากกว่าหนึ่งตัว ดังแสดงในหัวข้อ 2.5 เพราะว่าชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลางใด ๆ นั้นอาจจะมองได้เป็นเหล็กแผ่นรองรับที่อยู่ทั้งสองด้านของชิ้นส่วน โครงสร้าง ดังนั้นค่าต่ำสุดของโมเมนต์อันดับสองของพื้นที่ของชิ้นส่วนเสริมค้ำยัน ($I_{s,min}$) นั้นจะต้องมีให้เพียงพอเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสำหรับขอบของชิ้นส่วนที่อยู่ติดกับเหล็กแผ่น สมการที่ 2.30 จะกำหนดค่าต่ำสุดนี้

$$I_{s,min} = 3.66^4 \sqrt{\left(\frac{b}{t}\right)^2} - \frac{0.136E}{fy} \quad (2.30)$$

นอกจากนั้นแล้ว หัวข้อที่ 2.15(a) ยังได้กำหนดให้ระยะระหว่างชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลางระหว่างแกนตั้งนั้นทำให้ ชิ้นส่วน โครงสร้างที่อยู่ระหว่างชิ้นส่วนเสริมค้ำยันนั้นมีความกว้างมากกว่าค่าความชะลูดที่ถูกกำหนดไว้ในหัวข้อ 2.2.1.2 ซึ่งจะทำให้มันไม่เกิดความเป็นประสิทธิผลแบบสมบูรณ์ แล้วให้คิดเฉพาะ ชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลางเพียงสองตัว (ซึ่งอยู่ใกล้แกนตั้งมากที่สุด) เท่านั้นสำหรับการคิดที่เกี่ยวข้องกับความกว้างประสิทธิผล สิ่งนี้คือผลลัพธ์ของการลดลงของการถ่ายเทแรงเฉือนในชิ้นส่วน โครงสร้างที่ไม่ได้รับการเสริมค้ำยัน ซึ่งจะเกิดการโก่งคาะแบบเฉพาะที่

ผลกระทบดังกล่าวนี้ขึ้นเหมือนกับผลจากการหน่วงแรงเฉือน (Shear lag Effect) ซึ่งปกติจะเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่มีความกว้างสูง ยกเว้นว่าเป็นผลจากการเกิดการโก่งเคาะแบบเฉพาะที่มากกว่าการเกิดการเปลี่ยนรูปเพราะความเครียดอันเนื่องจากแรงเฉือนแบบง่าย ๆ

สำหรับวัตถุประสงค์ของการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันหลายที่ซึ่งมีชิ้นส่วนแบนที่เป็นประสิทธิผลแบบสมบูรณ์แล้ว ชิ้นส่วนดังกล่าวทั้งหมดนั้นสามารถที่จะแทนที่ได้โดยชิ้นส่วนแบนเพียงชิ้นเดียวซึ่งเทียบเท่ากัน โดยมีความกว้างเท่ากับความกว้างทั้งหมดระหว่าง ชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่บริเวณขอบ (b_2) ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ง) และมีความหนาเทียบเท่า (t_s) ที่หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$t_s = \sqrt[3]{\frac{12I_{sf}}{b_2}} \quad (2.31)$$

โดย I_{sf} คือ โมเมนต์อันดับที่สองของพื้นที่เต็มของ ชิ้นส่วน โครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันหลายที่ (รวมถึงชิ้นส่วนเสริมค้ำยันที่กึ่งกลาง) รอบแกนที่ผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด อัตราส่วนของ b_2 / t_s นั้นจึงสามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตจำกัด (b/t) ซึ่งจะช่วยให้เห็นว่าชิ้นส่วนเทียบเท่านี้เป็นแบบประสิทธิผลโดยสมบูรณ์หรือไม่ โดยถ้าอัตราส่วน b_2 / t_s นั้นมีค่าไม่เกินไปกว่าค่าขอบเขตจำกัด (b/t) ที่ระบุไว้ในหัวข้อ 2.2.1.2 แล้ว เราสามารถที่จะคิดให้ชิ้นส่วน โครงสร้างที่ได้รับการเสริมค้ำยันหลายที่ทั้งหมดนั้นเป็นแบบประสิทธิผลโดยสมบูรณ์ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าอัตราส่วน b_2 / t_s นั้นมีค่ามากกว่าค่าขอบเขตจำกัด (b/t) ค่าคุณสมบัติต่างๆของหน้าตัดแบบประสิทธิผลนั้นสามารถที่จะคิดอยู่บนพื้นฐานของค่าความหนาที่แท้จริง (t) แต่โดยใช้ความกว้างที่ถูกลดทอนลงของแต่ละชิ้นส่วนรับแรงอัดที่ได้รับการเสริมค้ำยัน และพื้นที่ของแต่ละชิ้นส่วนเสริมค้ำยันแต่ละชิ้นส่วนได้ ดังได้ระบุไว้ในหัวข้อที่ 2.5(c)

2.11 การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยการใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง

ข้อกำหนดรายละเอียดสำหรับ การออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น รูปแบบ CS02-190B คณะกรรมการย่อยที่ 10 พฤติกรรมของชิ้นส่วน ฉบับแก้ไขปี 2004 [69]

ภาคผนวกนี้ ได้จัดทำขั้นตอนกระบวนการการออกแบบในอีกแนวทางเลือกหนึ่ง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ ข้อกำหนดรายละเอียดสำหรับการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่มาจากเหล็กขึ้นรูปเย็นของอเมริกาเหนือ บท A ถึงบท G และในภาคผนวก A ถึงภาคผนวก C (ในที่นี้จะขอเรียกเป็น ข้อกำหนดคุณสมบัติรายละเอียดหลัก) วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ที่ได้ให้รายละเอียดไว้ในภาคผนวกนี้ จำเป็นต้องอาศัยการระบุถึงพฤติกรรมการโก่งเคาะแบบยืดหยุ่นของชิ้นส่วน โครงสร้าง และก็ได้ให้วิธีการสร้างเป็นชุดของเส้นโค้งแสดงกำลังรับแรงระบุ (กำลังต้านทาน) สำหรับการทำนาย

หรือหาค่ากำลังรับแรงของชิ้นส่วน โดยขึ้นกับพฤติกรรมการ โกงเดาะแบบยืดหยุ่น ขั้นตอนดังกล่าว นั้นจะไม่จำเป็นต้องอาศัยการคำนวณค่าความกว้างประสิทธิผล หรือการคำนวณแบบซ้ำไปซ้ำมา แต่ ทว่า ใช้เพียงแค่ค่าคุณสมบัติรวม และพฤติกรรมการ โกงเดาะแบบยืดหยุ่นของหน้าตัด เพื่อที่จะทำนาย หรือหาค่ากำลังรับแรง การประยุกต์ใช้เงื่อนไขดังกล่าวนี้ ได้ให้รายละเอียดไว้ใน เงื่อนไขทั่วไป ของ ภาคผนวกฉบับนี้

2.11.1 ข้อกำหนดทั่วไป

ก. การประยุกต์ใช้งาน

เงื่อนไขต่างๆที่มีในภาคผนวกนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้สำหรับการคำนวณหาค่า กำลังรับแรงระบุ สำหรับแรงในแนวแกน (P_n) และกำลังรับแรงระบุสำหรับแรงคด (M_n) ของชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยในข้อ 2.11.2(ก) และ 2.11.2(ข) นั้นได้นำเสนอถึงวิธีการที่สามารถ ใช้ได้กับโครงสร้างคานและเสาทุกรูปแบบของเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยโครงสร้างดังกล่าวนี้ซึ่งล้วนแต่ เป็นไปตามข้อจำกัดทางด้านวัสดุและขนาดทางเรขาคณิตในข้อ 2.11.1(ข) สำหรับโครงสร้างเสา หรือ เป็นไปตามข้อ 2.11.1(ค) สำหรับโครงสร้างคาน แล้วนั้น ถือได้ว่าเป็นโครงสร้างที่ได้รับการคัดสรร แล้วสำหรับการนำไปใช้ และยังสามารถใช้ได้ด้วยตัวประกอบความปลอดภัย Ω ซึ่งได้รับการเปรียบเทียบแล้ว และค่าตัวประกอบด้านทาน ϕ ซึ่งได้แสดงไว้ในข้อ 2.11.2(ก) และ 2.11.2(ข) อีกด้วย โครงสร้างคาน และเสาแบบอื่น ๆ นั้นสามารถที่จะใช้เงื่อนไขข้อกำหนดของข้อ 2.11.2(ก) และ 2.11.2(ข) แต่ต้องใช้ค่า มาตรฐานสำหรับ Ω และ ϕ สำหรับการวิเคราะห์ห้อย่างมีเหตุผล (บทที่ A1.1(b) ของข้อกำหนด คุณสมบัติรายละเอียดหลัก*)

ในปัจจุบัน วิธีกำลังรับแรงโดยตรงนั้น ไม่มีเงื่อนไขหรือข้อกำหนดที่ชัดเจน สำหรับ ชิ้นส่วน โครงสร้างรับแรงดึง, แรงเฉือน, แรงคดกระทำร่วมกับแรงเฉือน, การ โกงเดาะของแกนตั้งของ ชิ้นส่วน, แรงคดกระทำร่วมกับการ โกงเดาะของแกนตั้งของชิ้นส่วน, หรือแรงคดกระทำร่วมกับแรง ตามแนวแกน (พฤติกรรมแบบเสา-คาน) นอกจากนั้นแล้ว ไม่มีข้อกำหนดสำหรับ โครงสร้างที่ ประกอบขึ้นกัน, หรือ โครงสร้างที่เป็นจุดยึด จุดต่อต่างๆ ดังรายละเอียดซึ่งได้ระบุไว้ใน ข้อกำหนด คุณสมบัติรายละเอียดหลัก บทที่ A1.1 เมื่อมีการนำเงื่อนไขในข้อกำหนดหลักมาใช้ จะสามารถใช้ได้ กับทุกกรณีที่ระบุไว้ด้านบนนั้น

สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้าง หรือสถานการณ์ซึ่งไม่สามารถนำเอาข้อกำหนดคุณสมบัติ รายละเอียดหลัก มาประยุกต์ได้นั้น การขยายขอบเขตที่ชัดเจนหรือตรงตัวลงไปของ วิธีกำลังรับแรง โดยตรง ในภาคผนวกนี้ก็เป็นสิ่งจำเป็นต้องมี ผู้ใช้ซึ่งเลือกที่จะใช้การขยายขอบเขตของ วิธีกำลัง รับแรงโดยตรงดังกล่าวนี้จะต้องพบกับเงื่อนไขหรือข้อกำหนดที่เหมือนกับกระบวนการวิเคราะห์ ที่ ตามหลักเหตุผลแบบอื่นๆเช่นกัน ดังได้ระบุไว้โดยละเอียดในบท A1.1(b) สำหรับข้อกำหนด คุณสมบัติรายละเอียดหลัก: (1) เมื่อใดก็ตามที่ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขข้อกำหนดซึ่งนำมาใช้ได้ของ ข้อกำหนดคุณสมบัติรายละเอียดหลักแล้ว จะต้องปฏิบัติตามอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้, และ (2) ค่าตัว

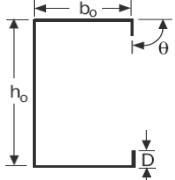
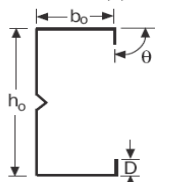
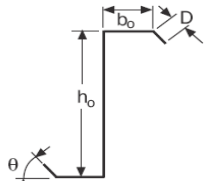
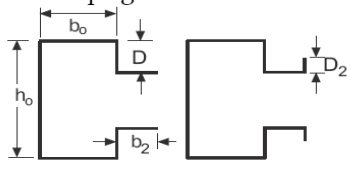
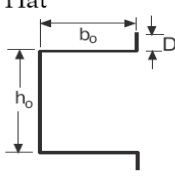
ประกอบ Ω ที่เพิ่มขึ้น และ ค่าตัวประกอบ ϕ ที่ลดลงนั้น จะต้องใช้สำหรับกำลังรับแรง เมื่อมีการวิเคราะห์อย่างละเอียด

หมายเหตุ ; *ข้อกำหนดรายละเอียดสำหรับการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากเหล็กขึ้นรูปเย็นของอเมริกาเหนือ, บท A ถึงบท G และในภาคผนวก A ถึงภาคผนวก C จะขอเรียกเป็นข้อกำหนดคุณสมบัติรายละเอียดหลักในที่นี้

ข. ชิ้นส่วนเสา ที่ได้รับการคัดสรรคุณสมบัติแล้ว

ชิ้นส่วน โครงสร้างเสาที่ไม่ได้มีการทำให้เป็นรู นั้นถือว่าอยู่ในขอบเขตกำหนดทางด้านวัสดุและทางเรขาคณิตที่ได้ไว้ในตารางที่ 2.3 ซึ่งจะสามารถออกแบบโดยการใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัย Ω , และตัวประกอบกำลังต้านทาน ϕ ซึ่งได้ระบุไว้ในข้อ 2.11.2(ก) ได้

ตารางที่ 2.3 ขอบเขตกำหนดสำหรับชิ้นส่วนเสา ที่ได้รับการคัดสรรคุณสมบัติแล้ว¹

 <p>Lipped C-Section</p>	$h_o/t < 472$ $b_o/t < 159$ $4 < D/t < 33$ $0.7 < h_o/b_o < 5.0$ $0.05 < D/b_o < 0.41$ $\theta = 90 \text{ deg}$ $E/F_y > 340 [F_y < 86 \text{ ksi (593 MPa or 6050 kg/cm}^2\text{)}]$
 <p>Lipped C-Section with Web Stiffener(s)</p>	$h_o/t < 489$ $b_o/t < 160$ $6 < D/t < 33$ $1.3 < h_o/b_o < 2.7$ $0.05 < D/b_o < 0.41$ one or two intermediate stiffeners $E/F_y > 340 [F_y < 86 \text{ ksi (593 MPa or 6050 kg/cm}^2\text{)}]$
 <p>Z-Section</p>	$h_o/t < 137$ $b_o/t < 56$ $0 < D/t < 36$ $1.5 < h_o/b_o < 2.7$ $0.00 < D/b_o < 0.73$ $\theta = 50 \text{ deg}$ $E/F_y > 590 [F_y < 50 \text{ ksi (345 MPa or 3520 kg/cm}^2\text{)}]$
 <p>Rack Upright</p>	$h_o/t < 51$ $b_o/t < 22$ $5 < D/t < 8$ $2.1 < h_o/b_o < 2.9$ $1.6 < b_2/D < 2.0$ ($b_2 = \text{stiffener parallel to } b_o$) $D_2/D = 0.3$ ($D_2 = \text{second lip parallel to } D$) $E/F_y = 340 [F_y < 86 \text{ ksi (593 MPa or 6050 kg/cm}^2\text{)}]$
 <p>Hat</p>	$h_o/t < 50$ $b_o/t < 20$ $4 < D/t < 6$ $1.0 < h_o/b_o < 1.2$ $D/b_o = 0.13$ $E/F_y > 428 [F_y < 69 \text{ ksi (476 MPa or 4850 kg/cm}^2\text{)}]$

(1) $r/t < 10$, เมื่อ ค่า r เป็นรัศมีการคดที่กึ่งกลาง

b_o = ความกว้างรวม

D = ความลึกกรวมของขอบ

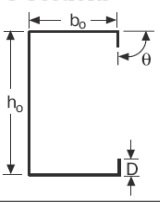
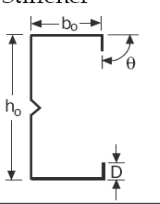
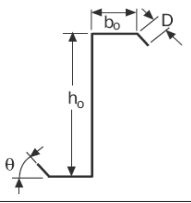
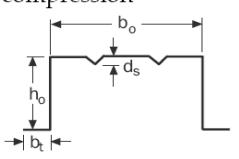
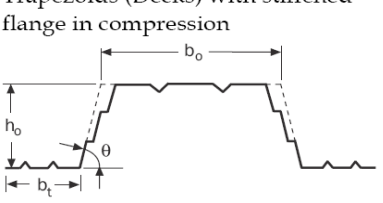
t = ความหนาของโลหะที่ฐาน

h_o = ความลึกกรวม

ค. ชิ้นส่วนคาน ที่ได้รับการคัดสรรคุณสมบัติแล้ว

ชิ้นส่วนโครงสร้างคานที่ไม่ได้มีการทำให้เป็นรู นั้นถือว่าอยู่ในขอบเขตกำหนดทางด้านวัสดุและทางเรขาคณิตที่ได้ไว้ในตารางที่ 2.4 ซึ่งจะสามารถออกแบบโดยใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัย Ω , และตัวประกอบกำลังต้านทาน ϕ ซึ่งได้ระบุไว้ในข้อ 2.11.2(ข) ได้

ตารางที่ 2.4 ขอบเขตกำหนดสำหรับชิ้นส่วนคาน ที่ได้รับการคัดสรรคุณสมบัติแล้ว¹

 <p>C-Sections</p>	$h_o/t < 321$ $b_o/t < 75$ $0 < D/t < 34$ $1.5 < h_o/b_o < 17.0$ $0 < D/b_o < 0.70$ $44 \text{ deg} < \theta < 90 \text{ deg}$ $E/F_y > 421 [F_y < 70 \text{ ksi (483 MPa or 4920 kg/cm}^2\text{)}]$
 <p>Lipped C-Sections with Web Stiffener</p>	$h_o/t < 358$ $b_o/t < 58$ $14 < D/t < 17$ $5.5 < h_o/b_o < 11.7$ $0.27 < D/b_o < 0.56$ $\theta = 90 \text{ deg}$ $E/F_y > 578 [F_y < 51 \text{ ksi (352 MPa or 3590 kg/cm}^2\text{)}]$
 <p>Z-Sections</p>	$h_o/t < 183$ $b_o/t < 71$ $10 < D/t < 16$ $2.5 < h_o/b_o < 4.1$ $0.15 < D/b_o < 0.34$ $36 \text{ deg} < \theta < 90 \text{ deg}$ $E/F_y > 440 [F_y < 67 \text{ ksi (462 MPa or 4710 kg/cm}^2\text{)}]$
 <p>Hats (Decks) with stiffened flange in compression</p>	$h_o/t < 97$ $b_o/t < 467$ $0 < d_s/t < 26$ (depth of stiffener) $0.14 < h_o/b_o < 0.87$ $0.88 < b_o/b_t < 5.4$ $0 < n \leq 4$ (number of compression flange stiffeners) $E/F_y > 492 [F_y < 60 \text{ ksi (414 MPa or 4220 kg/cm}^2\text{)}]$
 <p>Trapezoids (Decks) with stiffened flange in compression</p>	$h_o/t < 203$ $b_o/t < 231$ $0.42 < (h_o/\sin\theta)/b_o < 1.91$ $1.10 < b_o/b_t < 3.38$ $0 < n_c \leq 2$ (number of compression flange stiffeners) $0 < n_w \leq 2$ (number of web stiffener/folds) $0 < n_t \leq 2$ (number of tension flange stiffeners) $52 \text{ deg} < \theta < 84 \text{ deg}$ (angle between web and horizontal plane) $E/F_y > 310 [F_y < 95 \text{ ksi (655 MPa or 6680 kg/cm}^2\text{)}]$

(1) $r/t < 10$, เมื่อ ค่า r เป็นรัศมีการค้ำที่กึ่งกลาง

ดูข้อ 2.11.1(ข) ประกอบ สำหรับคำจำกัดความของตัวแปรอื่นที่ให้ไว้ในตารางที่ 2.4

ง. การโก่งเดาะยึดหย่อน

ในการคำนวณหาค่าแรงหรือแรงค้ำซึ่งใช้ในภาคผนวกนี้ โดยค่าแรงดังกล่าวนี้ ก่อให้เกิดการโก่งเดาะยึดหย่อนนั้นจำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์แรงนั้น สำหรับโครงสร้างเสา จะรวมถึงค่าแรงที่ก่อให้เกิดการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่, แบบพิดรูป, และแบบรวม ซึ่งได้แก่ P_{cri} , P_{crd} , และ P_{cre} ในข้อ 2.11.2(ก) สำหรับโครงสร้างคานนั้น จะรวมถึงค่าแรงค้ำที่ก่อให้เกิดการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่, แบบพิดรูป, และแบบรวม ซึ่งได้แก่ M_{cri} , M_{crd} , และ M_{cre} ในข้อ 2.11.2(ข) สำหรับโครงสร้างเสาหรือคาน ที่มีนั้น รูปแบบการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นจะเป็นเพียงรูปแบบเดียวเท่านั้นจากในสามรูปแบบที่กล่าวมาแล้ว ในกรณีดังกล่าวนี้ เราไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงรูปแบบที่ไม่ใช่แบบที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปได้ สำหรับการคำนวณตามข้อ 2.11.2(ก) และ 2.11.2(ข) ข้อสังเกตและข้อคิดเห็นสำหรับในภาคผนวกนี้ จะช่วยทำให้เกิดแนวทางสำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ที่เหมาะสม สำหรับการคำนวณหาค่าการโก่งเดาะยึดหย่อน

จ. การคำนวณในสภาวะใช้งาน

ค่าการโก่งตัวโดยแรงค้ำ δ ค่าแรงบิด (M) ใดๆอันเนื่องมาจากค่าแรงระบุ นั้น จะยอมให้หาได้โดยการลดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดรวม, I_g ให้เห็นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลสำหรับการหาค่าการโก่งตัว ดังแสดงในสมการที่ 2.32:

$$I_{eff} = I_g (M_d/M) \leq I_g \quad (2.32)$$

โดย

M_d = กำลังรับแรงระบุ M_u ซึ่งได้นิยามไว้ในข้อ 2.11.2(ข), แต่โดยการแทนที่ค่า M_y ด้วยค่า M ในทุกสูตรของข้อ 2.11.2(ข)

M = ค่าแรงบิดอันเนื่องมาจากแรงกระทำระบุ (จากแรงค้ำที่ได้ระบุมา) บนชิ้นส่วนโครงสร้างที่กำลังพิจารณา ($M \leq M_y$)

2.11.2 ชิ้นส่วนโครงสร้าง

ก. การออกแบบโครงสร้างเสา

ค่ากำลังรับแรงระบุ, P_u นั้นคือค่าต่ำสุดของ P_{ne} , P_{nl} และ P_{nd} ดังได้แสดงไว้ด้านล่าง สำหรับโครงสร้างเสาที่เป็นไปตามกฎเกณฑ์ทางด้านวัสดุและคุณสมบัติเชิงเรขาคณิตในข้อ 2.11.1(ข) แล้ว Ω_c และ ϕ_c นั้นจะเป็นไปตามต่อไปนี้;

ตารางที่ 2.5 ค่า Factor Ω และ ϕ ในการออกแบบโครงสร้างเสา

อเมริกาและเม็กซิโก		แคนาดา
Ω_c (ASD)	ϕ_c (LRFD)	ϕ_c (LSD)
1.80	0.85	0.80

สำหรับโครงสร้างเสาประเภทอื่น ๆ นั้นจะใช้ ค่า Ω และ ϕ ตามบทที่ A1.1(b)

1. การโก่งเดาะแบบดัด, การโก่งเดาะแบบบิด, หรือ การโก่งเดาะแบบการดัดและการบิด

ร่วมกัน

กำลังรับแรงตามแนวแกนระบุ, P_{ne} สำหรับการโก่งเดาะแบบดัด, การโก่งเดาะแบบบิด, หรือ การโก่งเดาะแบบการดัดและการบิดร่วมกัน คือ

สำหรับ $\lambda_c \leq 1.5$

$$P_{ne} = (0.658^{\lambda_c^2}) P_y \quad (2.33)$$

สำหรับ $\lambda_c > 1.5$

$$P_{ne} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) P_y \quad (2.34)$$

$$\lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cre}} \quad (2.35)$$

โดย

$$P_y = A_g F_y \quad (2.36)$$

P_{cre} = ค่าต่ำสุดของแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะของเสาแบบยึดหยุนในรูปแบบ การโก่งเดาะแบบดัด, การโก่งเดาะแบบบิด, หรือ การโก่งเดาะแบบการดัดและการ บิดร่วมกัน ซึ่งได้คำนวณตามข้อ 2.11.2(ข)

2. การโก่งเดาะแบบเฉพาะที่

กำลังรับแรงตามแนวแกนระบุ, P_{nl} สำหรับการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ คือ

สำหรับ $\lambda_1 \leq 0.776$

$$P_{nl} = P_{ne} \quad (2.37)$$

สำหรับ $\lambda_1 > 0.776$

$$P_{nl} = \left(1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right) \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne} \quad (2.38)$$

โดย
$$\lambda_1 = \sqrt{P_{ne} / P_{cr1}} \quad (2.39)$$

P_{cr1} = ค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ยึดหยุ่นของเสา ซึ่งได้คำนวณตามข้อ 2.11.1(ง)

P_{ne} นั้นสามารถหาค่าจำกัดความได้ตามข้อ 2.11.2(ก(1))

3. การโก่งเดาะแบบผิดปกติ

กำลังรับแรงตามแนวแกนระบุ, P_{nd} สำหรับการโก่งเดาะแบบผิดปกติ คือ

สำหรับ $\lambda_d \leq 0.561$

$$P_{nd} = P_y \quad (2.40)$$

for $\lambda_d > 0.561$

$$P_{nd} = \left(1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y \quad (2.41)$$

โดย
$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} \quad (2.42)$$

P_{crd} = ค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแบบผิดปกติที่ยึดหยุ่นของเสา ซึ่งได้คำนวณตามข้อ 2.11.1(ง)

P_y หาได้จากสมการ 2.36

ข. การออกแบบโครงสร้างคาน

กำลังรับแรงดัดระบุ, M_n คือค่าต่ำสุดของ M_{nc} , M_{nl} และ M_{nd} ดังได้แสดงในด้านล่าง สำหรับโครงสร้างคานที่เป็นไปตามกฎเกณฑ์ทางด้านวัสดุและคุณสมบัติเชิงเรขาคณิตในข้อ 2.11.1(ค) แล้ว Ω_b และ ϕ_b นั้นจะเป็นไปตามต่อไปนี้;

ตารางที่ 2.6 ค่า Factor Ω และ ϕ ในการออกแบบโครงสร้างคาน

อเมริกาและเม็กซิโก		แคนาดา
Ω_c (ASD)	ϕ_c (LRFD)	ϕ_c (LSD)
1.67	0.90	0.85

สำหรับโครงสร้างคานประเภทอื่น ๆ นั้นจะใช้ ค่า Ω และ ϕ ตามบทที่ A1.1(b)

1. การโก่งเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง

กำลังรับแรงดัดครั้น M_{ne} สำหรับ การโก่งเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง คือ
สำหรับ $M_{cre} < 0.56M_y$

$$M_{ne} = M_{cre} \quad (2.43)$$

สำหรับ $2.78M_y > M_{cre} > 0.56M_y$

$$M_{ne} = \frac{10}{9} M_y \left(1 - \frac{10M_y}{36M_{cre}} \right) \quad (2.44)$$

สำหรับ $M_{cre} > 2.78M_y$

$$M_{ne} = M_y \quad (2.45)$$

โดย

$$M_y = S_x F_y \quad (2.46)$$

โดย S_x เป็นค่าโมเมนต์ของหน้าตัดรวมเมื่อผิวบนสุดหรือผิวล่างสุดนั้นเกิดการครากครั้งแรก

M_{cre} = ค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแบบบิดตัวด้านข้างในรูปแบบการโก่งเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง ซึ่งได้คำนวณตามข้อ 2.11.1(ง)

2. การโก่งเดาะเฉพาะที่

กำลังรับแรงดัดครั้น M_{nl} สำหรับการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ คือ

สำหรับ $\lambda_1 \leq 0.776$

$$M_{nl} = M_{ne} \quad (2.47)$$

สำหรับ $\lambda_1 > 0.776$

$$M_{nl} = \left(1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right) \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne} \quad (2.48)$$

โดย

$$\lambda_1 = \sqrt{M_{ne} / M_{crl}} \quad (2.49)$$

M_{crd} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการ โกงเดาะแบบเฉพาะที่ยืดหยุ่น ซึ่งได้คำนวณตามข้อ 2.11.1(ง)

M_{nc} สามารถให้ค่าจำกัดความได้ตามข้อ 2.11.2(ข(1))

3. การโกงเดาะแบบผิวดรูป

กำลังรับแรงดัดระบุ, M_{nd} สำหรับการ โกงเดาะแบบผิวดรูป คือ
สำหรับ $\lambda_d \leq 0.673$

$$M_{nd} = M_y \quad (2.50)$$

สำหรับ $\lambda_d > 0.673$

$$M_{nd} = \left(1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad (2.51)$$

โดย
$$\lambda_d = \sqrt{M_y / M_{crd}} \quad (2.52)$$

M_{crd} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการ โกงเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่น ซึ่งได้คำนวณตามบทที่ 1.1.2

M_y หาได้จากสมการ 2.36

2.12 การวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ Finite Element Analysis (FEA)

2.12.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ที่ต้องมีสมการควบคุมระบบและใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อจะแก้สมการ ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะการมีแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) และเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดต่อ (Node) แล้วจึงนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์บน โดเมนจากนั้นจึงแก้ระบบสมการดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยโดยประมาณที่จุดต่อบนโดเมน

ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. แบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย
2. สร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์จากสมการควบคุม
3. นำสมการจากทุกเอลิเมนต์มารวมเป็นระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นระบบสมการเชิงเส้น
4. ให้เงื่อนไขขอบเขต
5. แก้ระบบสมการ ซึ่งจะได้ผลเฉลยที่จุดต่อบนโดเมน

2.12.2 การวิเคราะห์ทางด้าน Finite element โดยโปรแกรม ABAQUS

ABAQUS เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้าน FEA สามารถวิเคราะห์ปัญหาตั้งแต่ linear static, dynamic และ non-linear อย่างง่าย จนถึงปัญหาที่มีความซับซ้อน ซึ่งผลที่ได้มีความแม่นยำสูง สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้หลากหลาย เช่น ปัญหาทางโครงสร้าง, ปัญหาด้านอุณหภูมิ สามารถวิเคราะห์รายละเอียดของผลิตภัณฑ์ เช่น ผิวสัมผัส, ผลกระทบจากเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ABAQUS เป็นซอฟต์แวร์ที่รู้จักกันดีในเรื่องประสิทธิภาพ, คุณภาพ และความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหารูปแบบต่างๆ ได้มากกว่า ซอฟต์แวร์ CAE อื่นๆ ABAQUS แบ่งออกเป็นสามส่วนหลักๆ คือ ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit และ ABAQUS/CAE ซึ่งแต่ละส่วนเหมาะสำหรับงานแต่ละประเภท

ABAQUS/Standard .เหมาะสำหรับวิเคราะห์ปัญหาทั่วไป เช่น ปัญหา Static, Dynamics, Thermal, Contact และ Nonlinear ABAQUS/Standard

ABAQUS/Explicit เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปัญหา Transient Dynamics และ Quasi-static เช่น ปัญหา Drop Test, Crushing

ABAQUS/CAE .ใช้สำหรับสร้างโมเดล และดูผลการวิเคราะห์

2.13 การวิเคราะห์การเสถียรภาพของชิ้นส่วนโครงสร้างโดยโปรแกรม CUFSM

วัตถุประสงค์ของบทความวิชาการนี้คือเพื่อต้องการให้มีพื้นฐานทางเทคโนโลยีและมียกตัวอย่างบรรยายสำหรับการวิเคราะห์ทางเสถียรภาพของชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยการใช้วิธี Finite Strip แบบทั่วไปและแบบถูกจำกัดขอบเขตซึ่งได้ถูกนำไปใช้อย่างประสบความสำเร็จในโปรแกรม CUFSM [70] ซึ่งเปิดให้ใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายใดๆ การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพีชคณิตผสมผสานกับการระบุรูปแบบของการ โกงเดาะอย่างถูกต้องแม่นยำนั้นถือว่าเป็นขั้นบันไดแรกสำหรับการก้าวไปสู่การประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบใหม่ๆ อันได้แก่ วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ในบทความฉบับนี้ การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip แบบทั่วไป (Conventional Finite Strip) นั้น จะเป็นแบบเดียวกับที่ใช้ใน CUFSM ซึ่งถูกพัฒนามาจากหลักการแรกระเบียบวิธีการดังกล่าวนี้ เป็นสิ่งที่สะท้อนมาอย่างใกล้ชิดเคียงกันกับวิธีการทางแมทริกซ์แบบมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากโดยวิศวกรทั่วไปและสามารถจะโปรแกรมได้โดยผู้อ่านทั่วไปที่สนใจ ตัวอย่างของปัญหาทางด้านเสถียรภาพสำหรับเหล็กทรงน้ำแบบมีขอบตามแบบมาตรฐานอุตสาหกรรม และเมื่อไม่นานมานี้ CUFSM นั้นก็ได้ถูกต่อขยายให้ร่วมส่วนของการประยุกต์ใช้งานโดยวิธี Finite Strip แบบจำกัดขอบเขต (Constrained Finite Strip) ด้วยการใช้คำจำกัดความเชิงกลศาสตร์ที่เป็นรูปแบบสำหรับระดับของการ โกงเดาะซึ่งได้แก่: แบบทั่วไป, แบบผิกรูป, แบบเฉพาะที่, และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอื่นๆ นั้น วิธี Finite Strip แบบจำกัดขอบเขตนี้สามารถที่จะให้ผลลัพธ์ในทั้งการแยกย่อยรูปแบบ (Modal Decomposition) และการระบุรูปแบบ (Modal

Identification) ต่อการแก้ปัญหาโดยวิธี Finite Strip แบบทั่วไปได้ การแยกย่อยรูปแบบนั้นจะทำให้ การแก้ปัญหาโดยวิธี Finite Strip แบบทั่วไปนั้นถูกโฟกัสไปยังระดับของการโค้งเคาะอย่างใดอย่าง หนึ่งได้ (เช่น แบบรวม, แบบผิครูป, หรือแบบเฉพาะที่เท่านั้น) ซึ่งมีผลในการลดขนาดของปัญหา พร้อมทั้งกำหนดจำนวนผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ให้แคบลงได้ในรูปแบบของการโค้งเคาะในแบบที่แยก ออกมาได้ตั้งได้สาธิตให้ดูในส่วนของตัวอย่าง การระบุรูปแบบนั้นจะทำให้ผลลัพธ์ของวิธี Finite Strip แบบทั่วไป นั้นถูกพิจารณาโดยคำนึงถึงการมีส่วนร่วมของระดับการโค้งเคาะ และแล้วจะทำให้ เกิดการประเมินในส่วนของความสัมพันธ์ของรูปแบบการโค้งเคาะ โดยวิธี Finite Strip แบบทั่วไปซึ่ง ผสมผสานกับ วิธี Finite Strip แบบจำกัดขอบเขตเพื่อการสร้างเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับ การศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงเสถียรภาพของหน้าตัดของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็น

2.14 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์

เกรดเหล็กไทยเทียบกับมาตรฐานเกรดเหล็กของสากล อ้างอิงข้อมูลหน่วยบริการทางเทคนิค สำหรับอุตสาหกรรมโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติมีดังต่อไปนี้

1. เกรดเหล็กไทยชื่อเหล็กหัวแดง คือ กลุ่มเหล็ก Medium C Steel เทียบมาตรฐานเกรดเหล็ก สากล JIS S45C, AISI 1045, DIN 1.1191 (CK45), ความแข็ง (HB) อยู่ที่ 190-210 ความต้านทานแรง ดึง 63.78 kg/mm^2 คุณลักษณะเป็นเหล็กกล้าสำหรับงาน โครงสร้างทั่วไป การใช้งานทำเป็นสลักเกลียว น็อต และเฟือง เป็นต้น

2. เกรดเหล็กไทยชื่อเหล็กหัวน้ำเงิน คือ กลุ่มเหล็ก Medium – High C Steel เทียบมาตรฐานเกรด เหล็กสากล JIS S55C, AISI 1055, DIN 1.1203 (CK55), ความแข็ง (HB) อยู่ที่ 200-230 ความต้านทาน แรงดึง $73 - 77 \text{ kg/mm}^2$ คุณลักษณะเป็นเหล็กกล้าสำหรับงานผลิตชิ้นส่วน การใช้งานทำเป็นเฟือง เพลา สปริง และน็อต เป็นต้น

3. เกรดเหล็กไทยชื่อเหล็กหัวฟ้า คือ กลุ่มเหล็ก Chrome Moly Steel เทียบมาตรฐานเกรดเหล็ก สากล JIS SCM440, AISI 4140, DIN 1.7225 (C42CrMo4), ความแข็ง (HB) อยู่ที่ 275(R), 255(F) ความต้านทานแรงดึง 75.110 kg/mm^2 คุณลักษณะเป็นเหล็กกล้าผสม สำหรับงานทนต่อแรงกระแทก การใช้งานทำเป็นเฟืองขนาดเล็ก สลักเกลียว เพลา และชิ้นส่วนเครื่องจักร เป็นต้น

4. เกรดเหล็กไทยชื่อเหล็กหัวเหลือง คือ กลุ่มเหล็ก Nickle Chrome Moly Steel เทียบมาตรฐาน เกรดเหล็กสากล JIS SNCM439, AISI 4340, DIN 1.6582 (34CrNiMo6), ความแข็ง (HB) อยู่ที่ 255 – 275 ความต้านทานแรงดึง $80-120 \text{ kg/mm}^2$ คุณลักษณะเป็นเหล็กกล้าผสม ทนอุณหภูมิสูง มีสมบัติทาง กลดดีมาก การใช้งานทำเป็นเพลา ลูกสูบ เพลาขับ และเพลาข้อเหวี่ยง (นิยมทำ Carburizing) เป็นต้น

5. เกรดเหล็กไทยชื่อเหล็กเพลลาขาว คือ กลุ่มเหล็ก Low C Steel เทียบมาตรฐานเกรดเหล็กสากล JIS S10C, S22C, AISI 1010, 1022, DIN 1.0301 (C10), 1.0402 (C20) ความแข็ง (HB) อยู่ที่ 170 ความ

ด้านทานแรงดึง 60.16 kg/mm² คุณลักษณะเป็นเหล็กกล้าสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป การใช้งานทำเป็นสลักเกลียว งาน โครงสร้าง เป็นต้น

2.15 การสร้างแม่พิมพ์โดยใช้เครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์ CNC Router Machine

ด้วยความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการพัฒนาระบบการผลิตแบบอัตโนมัติก็มีความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะกระบวนการผลิตที่ต้องการความละเอียด ความถูกต้อง ความเที่ยงตรงของชิ้นงาน ความน่าเชื่อถือ และความยืดหยุ่นในกระบวนการสูง เทคโนโลยีที่เข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งในกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตได้แก่ CAD/CAM/CAE/และ CNC

2.15.1 CAD คืออะไร

CAD เป็นคำย่อของ Computer Aided Design ซึ่งแปลเป็นภาษาไทยว่าคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ เป็นการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการสร้างชิ้นส่วน (Part) ด้วยแบบจำลองทางเรขาคณิต วิศวกรเครื่องกลหรือวิศวกรออกแบบใช้ CAD Software ในการสร้างชิ้นส่วน หรือเรียกว่าแบบจำลอง (Model) และแบบจำลองนี้สามารถแสดงเป็นแบบ (Drawing) หรือไฟล์ข้อมูล CAD สำหรับวิศวกรการผลิตใช้ CAD Software เพื่อ

- พัฒนาแบบจำลองชิ้นส่วนจากแบบที่ได้รับ
- ประเมินและแก้ไขข้อมูล CAD ของชิ้นส่วนที่ออกแบบบนระบบ CAD เพื่อให้ยอมรับได้ในการผลิต
- เปลี่ยนแปลงชิ้นส่วนที่ออกแบบเพื่อให้สามารถผลิตได้ สิ่งนี้อาจรวมถึงการเพิ่มมุมสอบ (Draft Angle) หรือพัฒนาแบบจำลองของชิ้นส่วนที่แตกต่างกันออกไป สำหรับขั้นตอนที่แตกต่างกันในกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน
- ออกแบบอุปกรณ์จับยึด โพรงแบบ (Model Cavity) ฐานแม่พิมพ์ (Mold Base) หรือเครื่องมืออื่น ๆ

การใช้ CAD ในการสร้างรูปร่างชิ้นส่วนสามารถทำได้ 3 ลักษณะ คือ ปริมาตรตัน (Solid) พื้นผิว (Surface) และโครงลวด (Wire Frame) ซึ่งแต่ละแบบจะเหมาะกับงานเฉพาะอย่าง นอกจากการใช้ CAD ในการสร้างชิ้นส่วนแล้วปัจจุบัน CAD Software บางตัวยังสามารถใช้ในงานวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse Engineering) ได้ คุณภาพของพื้นผิวที่สร้างขึ้นมาจากซอฟต์แวร์วิศวกรรมย้อนกลับส่วนมากขึ้นอยู่กับ 2 องค์ประกอบ คือ คุณภาพของแบบจำลองหรือส่วนประกอบที่นำมาสแกน และคุณภาพของข้อมูลเชิงตัวเลข บางครั้งในการทำงานจริงเราไม่สามารถได้แบบจำลองที่สมบูรณ์ หรือคุณภาพของข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้ไม่ดี เนื่องจากชิ้นส่วนชำรุดหรือถูกทำลาย CAD software บางตัวสามารถแก้ไขปัญหพื้นผิวของแบบจำลองในบริเวณที่ชำรุดได้ หรืออาจแต่งเติมคัดแปลงให้ดีกว่าของเดิมที่สแกนมาได้

2.15.2 CAM คืออะไร

CAM คือคำย่อของ Computer Aided Manufacturing แปลเป็นภาษาไทยว่าคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต เป็นการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการสร้างรหัสจี (G-code) เพื่อควบคุมเครื่องจักรซีเอ็นซีในการกัดชิ้นรูปชิ้นส่วน โดยใช้ข้อมูลทางรูปร่างจาก CAD

CAM เริ่มต้นในปี 1950 ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นที่ MIT ด้วยภาษา Automatic Program Tool (APT) ผู้เขียนโปรแกรมทำงานจากพิมพ์เขียว และใช้ APT สร้างโปรแกรมรหัสจี หรือเขียนโปรแกรมรหัสจีด้วยมือ CAD ยังไม่สามารถใช้ร่วมกับ CAM ได้จนกระทั่งปี 1970 ในบางจุดเราใช้ CAM เพื่อแก้ไขรูปเรขาคณิตของชิ้นส่วนซึ่งได้มาจาก CAD เรียบร้อยแล้วเพื่อให้เครื่องซีเอ็นซีสามารถทำการกัดชิ้นรูปได้ซึ่งนำไปสู่การใช้งานร่วมกันของ CAD และ CAM

จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยี IT CAM สามารถใช้ข้อมูลจาก CAD ในการกำหนดว่าจะใช้เครื่องจักรใดในการผลิต วัสดุชิ้นงานมีขนาดเท่าใด วางตำแหน่งอ้างอิงอย่างไร ใช้เครื่องมืออะไรในการตัดเฉือน จะใช้วิธีตัดเฉือนแบบไหนกี่ขั้นตอน รวมไปถึงการจำลองขั้นตอนการทำงานเพื่อดูเส้นทางการตัดเฉือนของเครื่องมือตัดเฉือน และตรวจสอบความผิดพลาดในการผลิต ด้วยการพัฒนา CAM Software อย่างต่อเนื่อง ปัจจุบัน CAM Software ได้รับการพัฒนาให้ช่วยส่งเสริมการกัดขยายได้รวดเร็วขึ้น และสามารถกัดละเอียดด้วยความเร็วสูง รวมถึงการกัด 5 แกน

2.15.3 CAE คืออะไร

CAE เป็นคำย่อของ Computer Aided Engineering แปลเป็นไทยว่าคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม โดยพื้นฐานแล้วเป็นการใช้คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ในการแก้ปัญหา CAE เป็นสาขาหนึ่งของวิศวกรรม ซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนซึ่งยากเกินไป หรือเป็นไปได้ที่จะแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปัญหาแบบเดิม CAE เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการทำนายพฤติกรรมของชิ้นส่วน ชิ้นส่วนที่สร้างขึ้นมาจะประกบกันได้หรือไม่ ถ้าอยากทราบว่าผลจากการให้ภาระ (Load) กับชิ้นส่วนเป็นระยะเวลา 6 เดือนหรือ 1 ปี ที่สภาวะอุณหภูมิแวดล้อมที่เปลี่ยนไปจะทำให้รูปร่างของชิ้นส่วนบิดเบี้ยว หรือสมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงอย่างไร เราสามารถใช้ CAE หากคำตอบได้ โดยทั่วไปการใช้ CAE มีจุดประสงค์เพื่อ

- ประเมินความสำเร็จของการออกแบบชิ้นส่วนที่กำหนด
- ค้นหาจุดอ่อนก่อนที่จะลงมือทำต้นแบบ
- ทำให้ชิ้นส่วนหรือเครื่องมือมีราคาต่ำสุด
- หาสาเหตุและทำการแก้ไขชิ้นส่วนที่ล้มเหลว

การใช้ CAE จำลองชิ้นส่วนในสภาวะแวดล้อมใช้งานเมื่อรับภาระหรือภาระทดสอบ ปฏิกริยาของชิ้นส่วนต่อภาระสามารถทำนายได้ แล้วเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

2.15.4 CNC คืออะไร

CNC เป็นคำย่อของ Computer Numerical Control แปลว่าการควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นการนำคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น เครื่องกัดซีเอ็นซี เครื่องกลึงซีเอ็นซี เครื่องเจียรไน เครื่องEDM ฯลฯ ซึ่งสามารถทำให้ผลิตชิ้นส่วนได้รวดเร็วถูกต้อง และเที่ยงตรง เครื่องจักรซีเอ็นซีแต่ละแบบแต่ละรุ่นจะมีลักษณะเฉพาะ และการประยุกต์ใช้งานที่ต่างกันออกไป แต่เครื่องจักรกลซีเอ็นซีทั้งหมดมีข้อดีเหมือน ๆ กันคือ

ข้อแรกเครื่องจักรกลซีเอ็นซีทุกเครื่องได้รับการปรับปรุงให้มีการทำงานอัตโนมัติทำให้ลดความวุ่นวายของผู้ควบคุมเครื่องจักรในการผลิตชิ้นงาน เครื่องจักรซีเอ็นซีหลายเครื่องสามารถทำงานโดยที่ผู้ควบคุมไม่ต้องคอยนั่งเฝ้าในระหว่างวัฏจักรการทำงานของเครื่อง (Machining Cycle) และผู้ควบคุมสามารถไปทำงานอย่างอื่นได้ สิ่งนี้ทำให้ผู้ใช้เครื่องจักรซีเอ็นซีได้ประโยชน์หลายอย่าง รวมทั้งลดความเหนื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากคนมีน้อยมากมีความคงเส้นคงวาในการผลิตและสามารถทำนายเวลาในการผลิตแต่ละชิ้นได้

ข้อดีข้อที่สองของเทคโนโลยีซีเอ็นซีคือความคงเส้นคงวาและความถูกต้องแม่นยำของชิ้นงาน ซึ่งหมายความว่าเมื่อโปรแกรมที่เขียนทำงานอย่างถูกต้องแล้ว การผลิตชิ้นส่วน 2 ชิ้น 10 ชิ้น หรือ 1000 ชิ้นให้เหมือนกันทุกประการสามารถทำได้ง่ายด้วยความสม่ำเสมอ

ข้อดีข้อที่สามคือความยืดหยุ่นในการทำงาน เนื่องจากเครื่องจักรกลเหล่านี้ทำงานตามโปรแกรมการทำงานที่ต่างกันได้ง่ายเหมือนกับการโหลดโปรแกรมที่ต่างกัน เมื่อโปรแกรมประมวลผลและทำการผลิตชิ้นงานแล้ว เราสามารถเรียกโปรแกรมนั้นกลับมาใช้ใหม่ในครั้งต่อไปเมื่อต้องทำงานชิ้นนั้นอีก

ในตอนเริ่มแรกการควบคุมเครื่องจักรกลซีเอ็นซีใช้โปรแกรมรหัสจีเป็นชุดคำสั่งควบคุมขับเคลื่อน (Tool) จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง หรือเปิด-ปิดสารหล่อเย็นหรือเปลี่ยนเครื่องมือตัดเฉือน เราไม่สามารถแยกเครื่องจักรซีเอ็นซีและรหัสจีออกจากกันได้ ถ้าเราต้องการให้เครื่องจักรซีเอ็นซีทำงานเราต้องเรียนรู้รหัสจีเพื่อที่เราจะได้พูดภาษาเดียวกับตัวควบคุมซีเอ็นซีได้ ภายหลังโปรแกรม CAD/CAM ได้รับการพัฒนาขึ้นมา การนำ CAD/CAM มาใช้งานร่วมกับ CNC ก็เริ่มขึ้น ความเข้าใจเรื่องการรวม CNC กับ CAD/CAM จะช่วยให้เข้าใจวิธีการโปรแกรมรหัสจีเพื่อให้เครื่องจักรซีเอ็นซีทำงาน หลักการของรหัสจีในช่วง 50 ปีที่ผ่านมาทุกอย่างยังเหมือนเดิม คนส่วนใหญ่ใช้ระบบ CAM สำหรับสร้างรหัสจี แต่ก็ยังคงมีคนอีกจำนวนไม่น้อยยังคงสร้างรหัสจีไปยังตัวควบคุม CNC เพื่อให้คนควบคุมเครื่องแก้ไข รหัสจีไม่เพียงแต่มีความยุ่งยากในการใช้งานเท่านั้นมันยังไม่สามารถรวมกับระบบ CAD/CAM ได้ หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงรหัสจีโดยตัวควบคุมที่เครื่องจักรซีเอ็นซีไม่สามารถส่งกลับไปให้ระบบ CAM ได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เมื่อผู้ควบคุมเครื่องจักรซีเอ็นซีต้องเปลี่ยนแปลงรหัสจีที่ได้รับจากระบบ CAM เพื่อปรับเงื่อนไขการกัดขึ้นรูปให้ถูกต้อง หลังจากนั้นก็ไปใช้โปรแกรมอื่นแล้วกลับมาใช้โปรแกรมเดิม ผู้ควบคุมเครื่องก็

ต้องแก้ไขโปรแกรมรหัสอีก จะเกิดอะไรขึ้นถ้าผู้ควบคุมเครื่องล้มแก้ไขเงื่อนไขการกัด สิ่งนี้ทำให้เสียเวลาและเงินทองเป็นจำนวนมาก

2.15.5 การใช้ CAD/CAM/CAE/CNC ร่วมกันในการผลิต

การผลิตโดยทั่วไปจะเริ่มต้นจากการใช้ CAD ในออกแบบชิ้นส่วนหรือแก้ไขข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากการสแกนชิ้นงาน หลังจากนั้นจะใช้ CAE ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนที่ออกแบบว่าสามารถรับภาระหรือมีสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการหรือไม่ ถ้ามีปัญหาที่ใช้ CAD แก้ไขจุดบกพร่องแล้วใช้ CAE วิเคราะห์อีกจนกว่าจะได้ชิ้นส่วนที่มีสมบัติตามที่ต้องการ จากนั้นจะส่งข้อมูล CAD ไปยัง CAM software เพื่อจำลองเส้นทางเดินของเครื่องมือกัดขึ้นรูป หรือแก้ไขแบบเพื่อให้เครื่องซีเอ็นซีสามารถกัดขึ้นรูปได้ ในขั้นนี้สำหรับงานบางอย่างเราสามารถให้ CAE วิเคราะห์ได้ด้วย หลังจากการใช้ CAE วิเคราะห์และใช้ CAM แก้ไขเส้นทางเดินของเครื่องมือกัดขึ้นรูปแล้วจากนั้นก็ใช้ CAM สร้างรหัสจีเพื่อส่งไปให้เครื่องจักรซีเอ็นซี ทำการกัดขึ้นรูปชิ้นงานหรือกัดแม่พิมพ์ เมื่อ CNC กัดชิ้นงานเสร็จแล้ว เรายังสามารถใช้ CAE ในการตรวจสอบชิ้นงานที่สร้างขึ้นว่ามีขนาดตรงตามแบบหรือไม่ ในกรณีที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง

2.15.6 จะเลือกใช้ CAD/CAM/CAE/CNC ระบบไหนดี

ไม่จำเป็นเสมอไปที่จะต้องเลือกใช้ CAD/CAM/CAE /CNC ที่ดีที่สุดที่มีขายอยู่ในท้องตลาด สิ่งที่สำคัญกว่าคือการเลือกใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับความต้องการของโรงงาน/บริษัท ความต้องการที่สำคัญมากที่สุดของระบบคือการที่ระบบมีฟังก์ชันที่มีความน่าเชื่อถือ ตรงตามความต้องการของโรงงาน/บริษัท และคนที่อยู่ในโรงงาน/บริษัทสามารถใช้งานได้ ระบบควรใช้งานได้กับเทคโนโลยีซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ใหม่ๆ ถ้าระบบล้าสมัยผู้ใช้ก็คาดหวังว่าผู้จำหน่ายจะทำการเปลี่ยนแปลงให้ในอนาคต สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือผู้ใช้มีความรู้สึกสบายใจเมื่อทำงานกับระบบนี้ นั่นคือระบบควรง่ายต่อการเรียนรู้ ง่ายต่อความเข้าใจและง่ายต่อการใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ระเบียบการวิจัย แสดงการวางแผนการวิจัยและลำดับขั้นตอนการวิจัย

สำหรับการวิจัยนี้ แบ่งการดำเนินการออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1.1 ขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นการเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ

3.1.2 ขั้นตอนที่สอง เป็นการสร้างแม่พิมพ์เหล็ก

3.1.5 ขั้นตอนที่สาม เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

3.1.6 ขั้นตอนที่สี่ การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบ

3.1.3 ขั้นตอนที่ห้า เป็นวิธีที่ใช้ศึกษา คั้นคว่ำและวิจัย

3.1.4 ขั้นตอนที่หก เป็นลักษณะข้อมูล การเลือกข้อมูล และเหตุผลในการคัดเลือก


3.1.7 ขั้นตอนที่เจ็ด เป็นขั้นตอนในการรวบรวมข้อมูล

3.1.8 ขั้นตอนที่แปด เป็นวิธีวิเคราะห์ข้อมูล

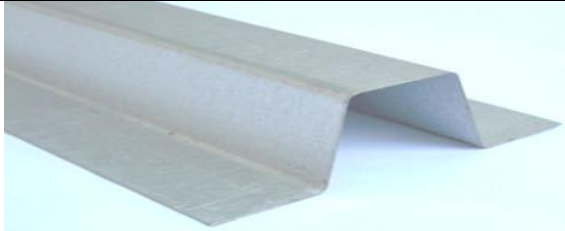

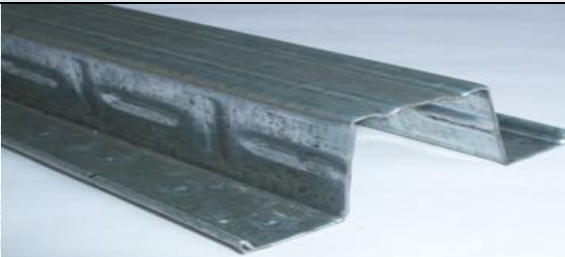
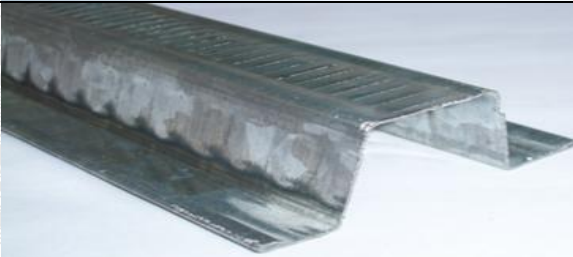

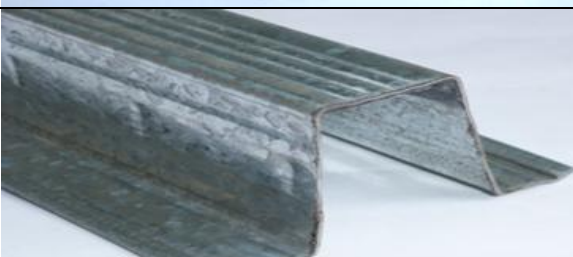
3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบที่มีอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน ตัวอย่างที่ใช้เป็นเหล็กขึ้นรูปเย็นที่เกิดจากการคัดหรือพับจากเหล็กแผ่นเรียบหน้าตัดรูปทรงหมวก (Hat Shape) มีทั้งหน้าตัดที่มีการปั๊มขึ้นลอน (Embossments) ด้านข้างขึ้นตัวอย่างและไม่มีการปั๊มขึ้นลอน (Embossments) ด้านข้างขึ้นตัวอย่าง เป็นเหล็กกล้ากำลังสูงมีค่า Yield Strength 550 MPa ความหนาของคานตัวอย่าง 0.45 มิลลิเมตร และตัวอย่างรูปแบบอื่นๆ ดังแสดงตามตารางที่ 3.1

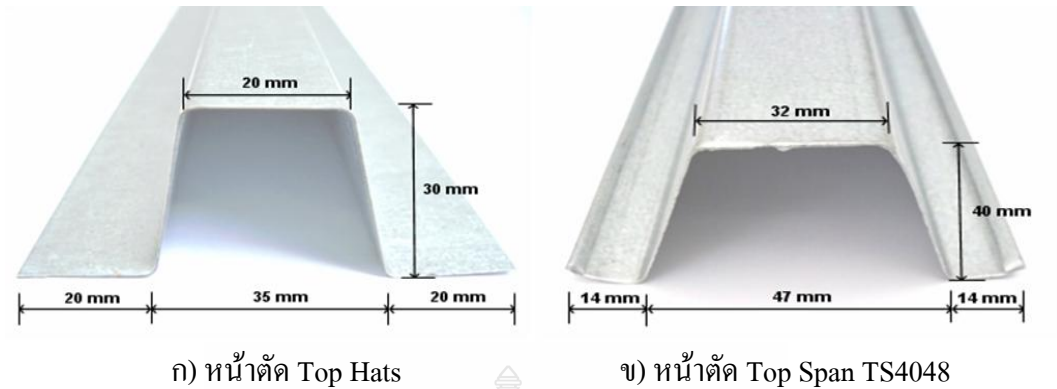
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างคานเหล็กกริดเย็นหน้าตัดรูปทรงหมวก (Hat Shape) ที่มีอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน

ชื่อตัวอย่าง	Yield Strength (MPa)	Thickness (mm)	Member Section
Top Span TS4048	550	0.45	

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัดรูปทรงหมวก (Hat Shape) ที่มีอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	Yield Strength (MPa)	Thickness (mm)	Member Section
Top Hat	550	0.45	
V-CON AUSTRALIA	300	0.55	
CPAC Monier BATTEN	550	0.55	
V-CON	300	0.55	
CM	550	0.42	
E-CO	300	0.55	

ตัวอย่างคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัดรูปทรงหมวก (Hat Shape) ที่เลือกใช้มีหน้าตัดแบบ Top Span และ Top Hats ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หน้าตัดของคานเหล็กรีดเย็นที่เลือกใช้ในการทดสอบ

3.3 การสร้างแม่พิมพ์เหล็กเพื่อใช้ในการงานวิจัย

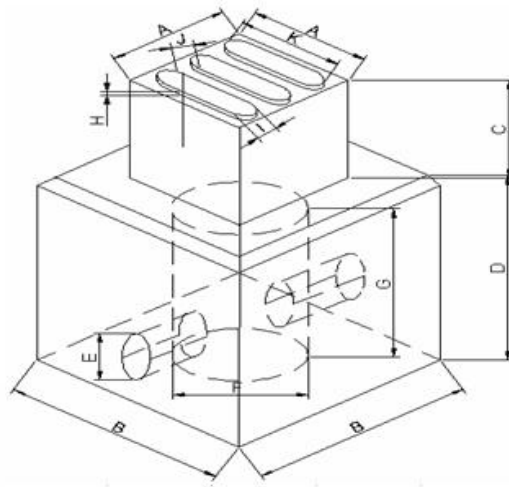
งานวิจัยนี้เลือกใช้ เกรดเหล็กไทยชนิดเหล็กหัวแดงเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับสร้างแม่พิมพ์เนื่องจาก มีขายในท้องตลาดและมีคุณสมบัติ คือ เป็นเหล็กเกรด S45C นั้นเองจัดเป็นพวกคาร์บอนปานกลาง สามารถนำมาชุบแข็งได้ เป็นเหล็กที่ชุบแข็งได้ง่าย ทนทานการเสียดสีได้ดี มีความแข็งแรงสูง เหมาะสำหรับการทำ ชิ้นส่วนพื้นฐาน และการใช้งาน หรือ โครงสร้างของแม่พิมพ์ชิ้นงานต่างๆ ไป ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เหล็กหัวแดงสำหรับเป็นวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์

3.3.1 แบบขนาดแม่พิมพ์สำหรับปั๊มขึ้นลอนด้านข้างคานรีดเย็นหน้าตัด Top Span และหน้าตัด Top Hats ที่ทำการแกะสลักด้วยเครื่อง CNC Router Machine มีดังนี้

1. แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง ตามรูปที่ 3.3 และ ตารางที่ 3.2

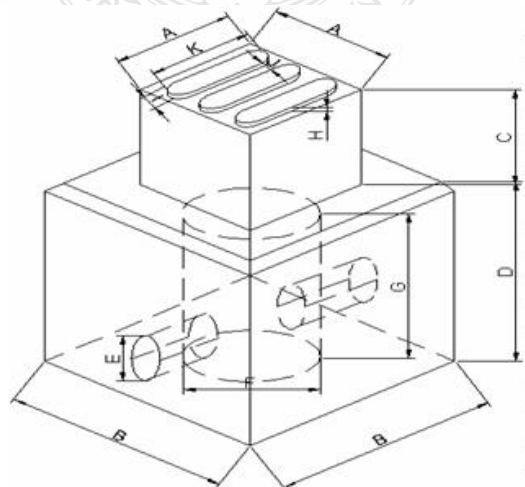


รูปที่ 3.3 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับบีบขึ้นลอนแนวตั้ง

ตารางที่ 3.2 ขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับการบีบขึ้นลอนแนวตั้ง

แม่พิมพ์สำหรับการบีบขึ้นลอนแนวตั้ง แทนปั๊มตัวผู้ (Punch)	ขนาดแทนปั๊มตัวผู้ (mm.)											
	A1	A2	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
คานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top span TS4048	28	28	50	28	53	12	30	42	1.2	5	5	26
คานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hat	28	28	50	28	53	12	30	42	1.2	4	4	20

2. แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน ตามรูปที่ 3.4 และ ตารางที่ 3.3

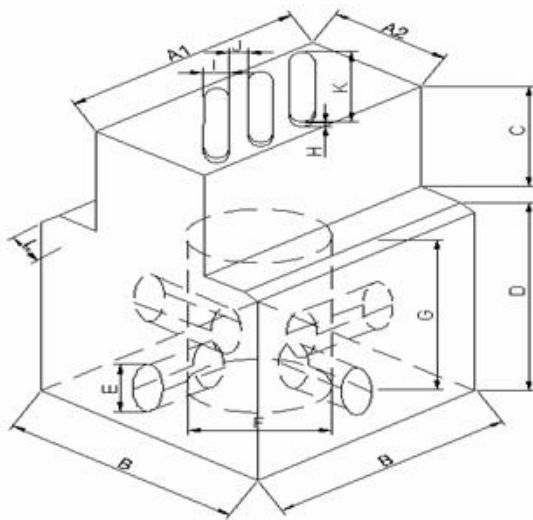


รูปที่ 3.4 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับบีบขึ้นลอนแนวนอน

ตารางที่ 3.3 ขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวนอน

แม่พิมพ์สำหรับการปั๊มขึ้นลอนแนวนอน แทนปั๊มตัวผู้ (Punch)	ขนาดแทนปั๊มตัวผู้ (mm.)											
	A1	A2	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
คานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top span TS4048	28	28	50	28	53	12	30	42	1.2	5	5	26
คานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top Hat	27	27	50	28	53	12	30	42	1.2	4	4	20

3. แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงสำหรับคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top Span TS4048 ตามรูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.4

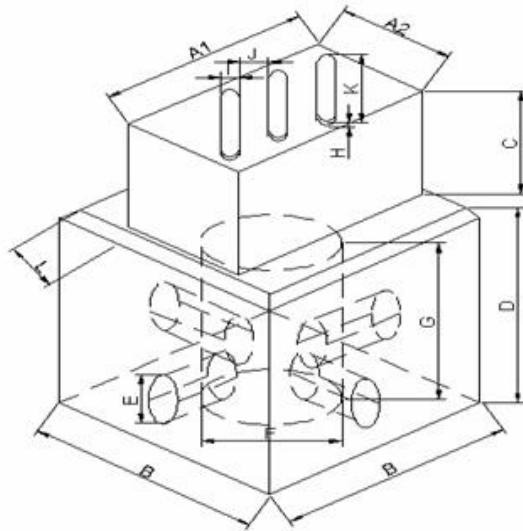


รูปที่ 3.5 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียงสำหรับคานหน้าตัด Top Span

ตารางที่ 3.4 ขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียงสำหรับคานหน้าตัด Top Span

แม่พิมพ์สำหรับการปั๊มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง แทนปั๊มตัวผู้ (Punch)	ขนาดแทนปั๊มตัวผู้ (mm.)												
	A1	A2	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
คานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top Span TS4048	50	25	50	28	53	12	30	42	1.2	5	5	26	12

4. แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงสำหรับคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top Hats ตามรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.5

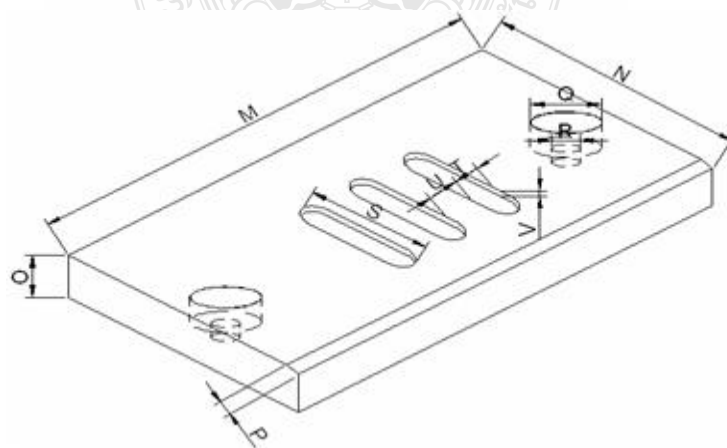


รูปที่ 3.6 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียงสำหรับคานหน้าตัด Top Hats

ตารางที่ 3.5 ขนาดแม่พิมพ์ตัวผู้สำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียงสำหรับคานหน้าตัด Top Hats

แม่พิมพ์สำหรับการปั๊มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง แทนปั๊มตัวผู้ (Punch)	ขนาดแทนปั๊มตัวผู้ (mm.)												
	A1	A2	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
คานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hat	42	25	50	28	53	12	30	42	1.2	4	4	20	12

5. แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง ตามรูปที่ 3.7 และ ตารางที่ 3.6

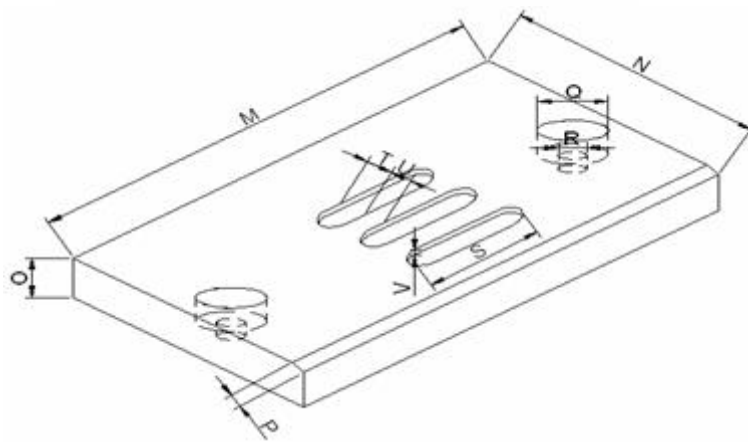


รูปที่ 3.7 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวตั้ง

ตารางที่ 3.6 ขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวตั้ง

แม่พิมพ์สำหรับการปั๊มขึ้นลอนแนวตั้ง แทนปั๊มตัวเมีย (Die)	ขนาดแทนปั๊มตัวเมีย (mm.)									
	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
คานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top span TS4048	88	50	8	2.8	9	4.8	27	6	3.5	2
คานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hat	88	50	8	2.8	9	4.8	21	5	2.5	2

6. แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน ตามรูปที่ 3.8 และ ตารางที่ 3.7

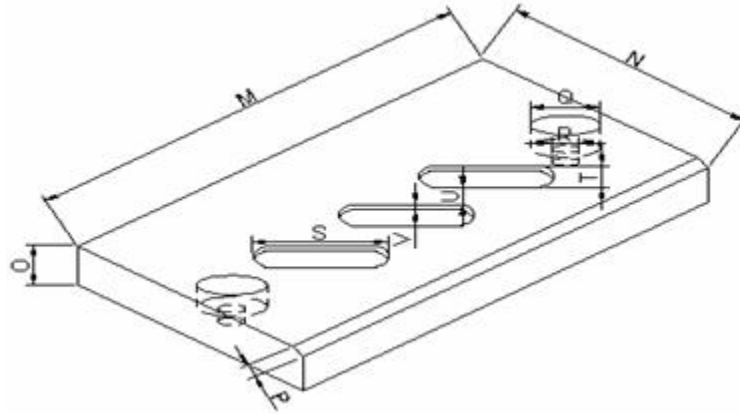


รูปที่ 3.8 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวนอน

ตารางที่ 3.7 ขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวนอน

แม่พิมพ์สำหรับการปั๊มขึ้นลอนแนวนอน แทนปั๊มตัวเมีย (Die)	ขนาดแทนปั๊มตัวเมีย (mm.)									
	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
คานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top span TS4048	88	50	8	2.8	9	4.8	27	6	3.5	2
คานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hat	88	45	8	2.8	9	4.8	21	5	2.5	2

6. แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง ตามรูปที่ 3.9 และตารางที่ 3.8



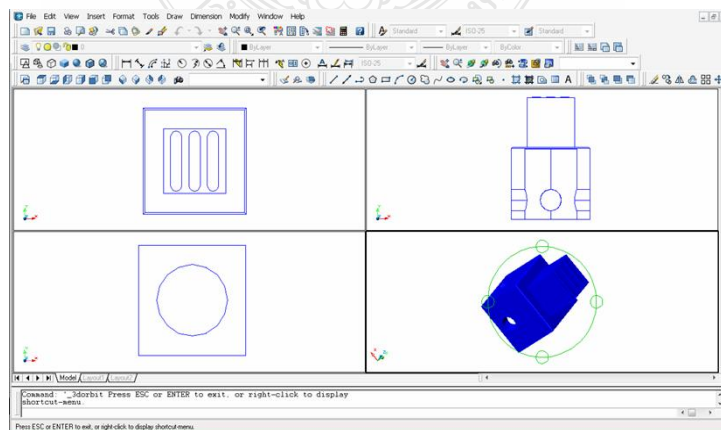
รูปที่ 3.9 แบบขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง

ตารางที่ 3.8 ขนาดแม่พิมพ์ตัวเมียสำหรับปั๊มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง

แม่พิมพ์สำหรับการปั๊มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง แทนปั๊มตัวเมีย (Die)	ขนาดแทนปั๊มตัวเมีย (mm.)									
	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
คานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top span TS4048	88	50	8	2.8	9	4.8	27	6	3.5	2
คานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hat	88	45	8	2.8	9	4.8	21	5	2.5	2

3.3.2 แสดงลำดับขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์โดยใช้เครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์ CNC Router Machine

1. เริ่มต้นจากการใช้โปรแกรม CAD ในการออกแบบชิ้นส่วน เพื่อทำแบบร่างและแบบจำลองต้นแบบ



รูปที่ 3.10 การใช้โปรแกรม CAD ในการสร้างแบบร่างแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) ที่ทำการปั๊มขึ้นลอน

2. ทำการปรับตั้งเครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์ CNC Router Machine โดยการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต ซึ่งจะใช้ซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมเครื่องจักร ให้สามารถสร้างชิ้นงานได้ตามที่ได้ออกแบบไว้แล้ว มีองค์ประกอบหลักๆ คือ เครื่องจักร CNC และ ซอฟต์แวร์สำหรับงาน CAM



รูปที่ 3.11 เครื่อง CNC MAKINO ที่ใช้ในงานศึกษาวิจัย



รูปที่ 3.12 เครื่อง CNC Milling SHI ZUOKA ที่ใช้ในงานศึกษาวิจัย



รูปที่ 3.13 ชุดควบคุมเครื่องจักรสมองกล CNC Machine



รูปที่ 3.14 หน้าจอชุดควบคุม (Monitor) เครื่องจักรสมองกล CNC Machine



รูปที่ 3.15 การปรับแต่งการทำงานของเครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์



รูปที่ 3.16 การปรับแต่งการทำงานของเครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์

3. แสดงการทำงานของ เครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์ CNC Router Machine ซึ่งต้องใช้ เครื่องจักรสมองกล ในการผลิตแม่พิมพ์ที่ต้องการละเอียดและสำหรับงานผลิตที่มีความซับซ้อน



รูปที่ 3.17 ชุดหัวกัดแกะสลักสำหรับเครื่อง CNC



รูปที่ 3.18 การแกะสลักแม่พิมพ์ด้วยเครื่อง CNC ที่ต้องการความละเอียดของงาน



รูปที่ 3.19 แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) ที่ชุดหัวกัดแกะสลักเสร็จแล้ว

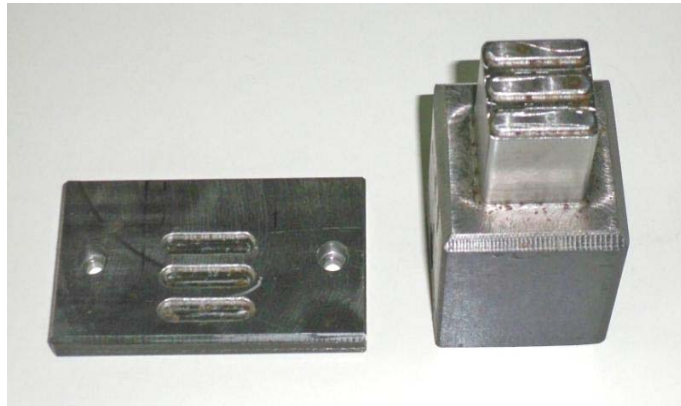


รูปที่ 3.20 การเจาะเพื่อยึดหัวป้อนแม่พิมพ์ด้วยสลักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร

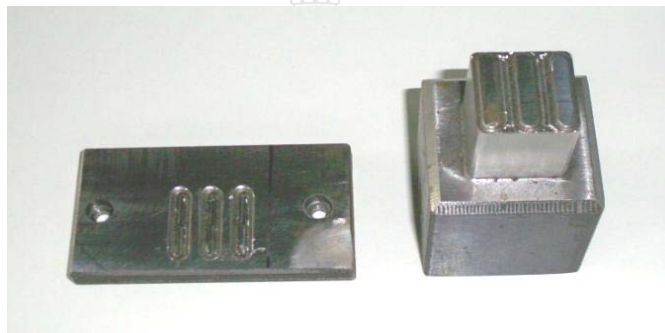


รูปที่ 3.21 ขนาดทำการเจาะหัวป้อนแม่พิมพ์ด้วยดอกกัดส่วนต้องทำการหล่อเย็นดอกสว่านด้วยน้ำมัน

4. แสดงแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) และ แม่พิมพ์ตัวเมีย (Lip of Die) ที่ใช้เครื่องแกะสลัก CNC Router Machine ทำการแกะสลักสร้างแม่พิมพ์เสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.22 แม่พิมพ์ปั๊มแนวนอนสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปแผ่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN



รูปที่ 3.23 แม่พิมพ์ปั๊มแนวตั้งสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปแผ่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN



รูปที่ 3.24 แม่พิมพ์ปั๊มแนวเฉียงเอียงสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปแผ่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN



รูปที่ 3.25 แม่พิมพ์ปั๊มแนวอนสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS



รูปที่ 3.26 แม่พิมพ์ปั๊มแนวตั้งสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS



รูปที่ 3.27 แม่พิมพ์ปั๊มแนวเฉียงเอียงสำหรับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS

3.3.3 กรรมวิธีการชุบแข็งแม่พิมพ์

การชุบแข็งเหล็ก คือ การใช้ขบวนการทางความร้อนเพื่อเปลี่ยน โครงสร้างเหล็ก ซึ่งจะทำได้ให้เหล็กหรือเครื่องมือมีคุณสมบัติการใช้งานตามต้องการ

ขั้นตอนการชุบแข็ง การชุบแข็งเหล็กมีขั้นตอนดังนี้

1. การอบคลายความเครียดเพื่อลดความเครียดของชิ้นงาน ซึ่งเกิดในระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงาน เช่น การกลึง การไส การEDM ซึ่งความเครียดที่ตกค้างนี้อาจทำให้เกิดการแตก หรือบิดงอของชิ้นงานในขั้นตอนการชุบได้ อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับเกรดเหล็ก

2. การชุบแข็ง (Hardening) เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็กโดยวิธีการใช้ความร้อน การแบ่งความร้อนเป็นช่วง (Preheating) เพื่อให้ความร้อนที่ผิวและแกนกลางของชิ้นงานไม่ต่างกันมาก

- กรณีที่อุณหภูมิชุบแข็งในช่วง 800-950 °C จะPreheat 1 ครั้งคือ 650°C

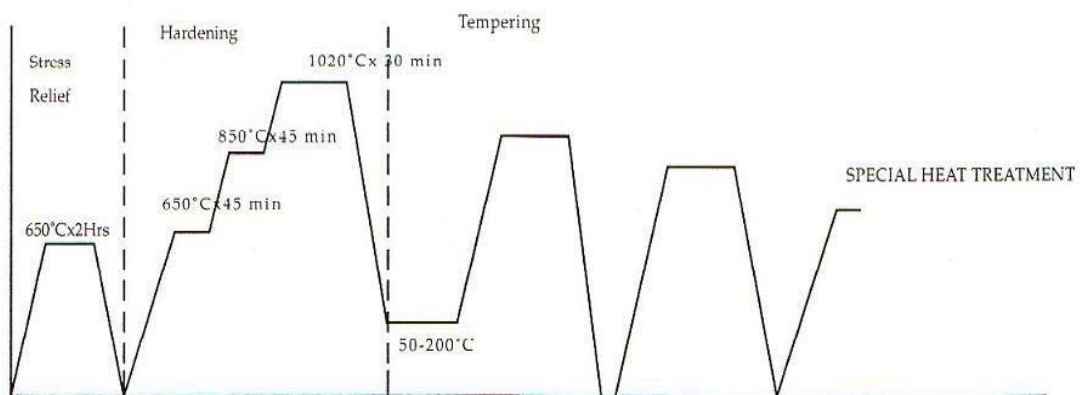
- กรณีที่อุณหภูมิชุบแข็งในช่วง 1020-1100 °C จะPreheat 2 ครั้งคือ 850°C

3. เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานสูงถึงอุณหภูมิชุบแข็ง (Austenitizing Temperature) แล้วให้รักษาอุณหภูมิไว้ ~ 30 นาที หรือ 60-90 วินาทีต่อความหนาชิ้นงาน 1 มม. แล้วจุ่มชุบในวัสดุ เช่น น้ำ น้ำมัน ลมหรือเตาเกลือ

4. หลังจากจุ่มชุบแล้วทิ้งไว้จนอุณหภูมิลดลงถึง 50 – 200°C ให้รักษาอุณหภูมินี้ไว้~1 ชั่วโมงแล้วจึงนำไปคืบไฟ (Tempering) ในเตา เพื่อลดความเครียดที่จะตกค้างในชิ้นงาน ส่วนอุณหภูมิคืบไฟจะสูงเพียงใดขึ้นอยู่กับขึ้นอยู่กับความแข็งที่ต้องการและคุณสมบัติอื่นๆ ที่ต้องการซึ่งเกรดเหล็กแต่ละเกรดก็จะมีอุณหภูมิต่างกันและจำนวนครั้งของเหล็กเครื่องมือธรรมดาจะทำ 2 ครั้ง แต่เหล็กไฮสปีดควรทำถึง 3 ครั้ง

5. การอบชุบกรรมวิธีพิเศษ เป็นการเพิ่มคุณสมบัติแก่ชิ้นงาน เช่น ความแข็งที่ผิว ซึ่งมีหลายวิธี เช่น ไนไตรด์ (Nitriding), Tufftriding, PVD Coating.

ในขั้นตอนการชุบแข็งเหล็กจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนการชุบแข็งกับระยะเวลาที่ทำการชุบแข็งดังภาพกราฟที่แสดงต่อไปนี้



รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาที่ทำการชุบแข็งในแต่ละขั้นตอน

กรรมวิธีการชุบแข็งแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับงานศึกษาวิจัยนี้ โดยนำแม่พิมพ์ที่แกะสลักด้วยเครื่อง CNC Router Machine เสร็จเรียบร้อยแล้ว นำมาทำความสะอาดโดยขัดผิวชิ้นงานให้เรียบร้อย เพื่อให้ได้ผิวตามต้องการก่อนหลังจากนั้นทำการชุบแข็ง โดยนำแม่พิมพ์ที่สร้างนำไปเผาไฟจนวัสดุชิ้นงานมีสีแดงส้มหรือสีแดงชมพู (อุณหภูมิสำหรับการเผาเพื่อชุบแข็งด้วยน้ำ 820-850°C ส่วนอุณหภูมิสำหรับการเผาเพื่อชุบแข็งด้วยน้ำมัน 830-860°C) แล้วนำไปจุ่มชุบลงในวัสดุ น้ำ หรือ น้ำมันผสมเกลือ หรือน้ำมันเครื่องเก่าเพื่อไล่คาร์บอนในตัววัสดุออกและทำให้เหล็กแข็งขึ้น

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. Strain Gauges และชุดต่อสาย ตามรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 Strain Gauges และชุดต่อสาย

2. เครื่อง Transducer Displacement ตามรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 เครื่อง Transducer Displacement

3. เครื่อง Transducer Displacement ตามรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 เครื่อง Transducer Displacement

4. Magnetic สำหรับติดตั้งเครื่องมือ ตามรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 Magnetic สำหรับติดตั้งเครื่องมือ

5. เครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger ตามรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 เครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger

6. จุจรงรับเป็นSupport เหล็ก โครงถัก สามารถติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบบนจุจรงรับเอียงทำมุม 30 องศาได้ ตามรูปที่ 3.34



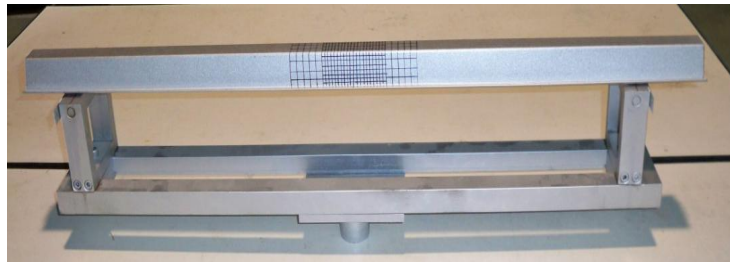
รูปที่ 3.34 จุจรงรับSupport เหล็ก โครงถักเอียงทำมุม 30 องศา

7. เครื่องกดยี่ห้อ Testometric และคอมพิวเตอร์พร้อมอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ตามรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

8. อุปกรณ์ที่ใช้เป็นจุดรองรับคือ Support โครงเหล็ก สามารถติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบบนจุดรองรับเอียงทำมุม 0 องศาได้ ตามรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 อุปกรณ์ที่ใช้เป็นจุดรองรับคือ Support โครงเหล็ก

9. อุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวทำการกดน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคานแบบกระทำเป็นจุด 1 จุด ที่กลางคาน ระยะ $\frac{L}{2}$ เท่าๆกัน ตามรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 อุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวทำการกดน้ำหนักบรรทุกแบบ 1 จุด

10. อุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวทำการกดน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคานแบบกระทำเป็นจุด 2 จุด ที่กลางคาน ระยะ $\frac{L}{3}$ เท่าๆกัน ตามรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 อุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวทำการกดน้ำหนักบรรทุกแบบ 2 จุด

3.5 การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบ

การเตรียมและติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดสอบมีดังนี้

1. การเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดสอบกำลังดัดของเหล็ก (Flexural Test of Steel) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products ติดตั้งบนจตุรกรับเอียงทำมุม 30 องศา ตามรูปที่ 3.39 3.40 3.41 และ 3.42



รูปที่ 3.39 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและตำแหน่งที่กวดคาน บนจตุรกรับเอียงทำมุม 30 องศา



รูปที่ 3.40 ตำแหน่งที่กวดกึ่งกลางคาน



รูปที่ 3.41 ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสียรูปของคานเหล็กรีดเย็น



รูปที่ 3.42 ติดตั้งเครื่องมือวัดกลางคานวัดการเคลื่อนตัวขนาดรับแรงกดตัด บนจุดรองรับเอียงทำมุม 30 องศา

2. การเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดสอบกำลังดัดของเหล็ก (Flexural Test of Steel) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products ติดตั้งบนจุดรองรับเอียงทำมุม 0 องศา ตามรูปที่ 3.43 3.44 3.45 และ 3.46



รูปที่ 3.43 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและตำแหน่งที่กวดคาน บนจตุรรองรับเอียงทำมุม 0 องศา



รูปที่ 3.44 ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสียรูปของคานเหล็กรีดเย็น



รูปที่ 3.45 ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสียรูปของคานเหล็กรีดเย็น



รูปที่ 3.46 ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสียรูปของคานเหล็กรีดเย็น

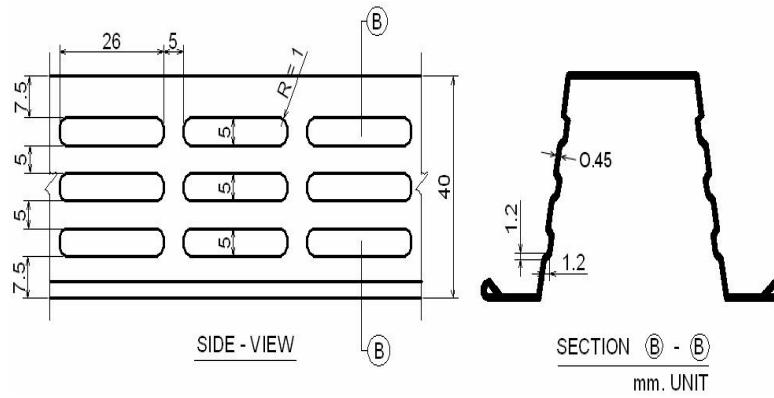
3.6 วิธีที่ใช้ศึกษา คั่นคว่ำและวิจัย

3.6.1 การป้อนขึ้นลอนตัวอย่าง

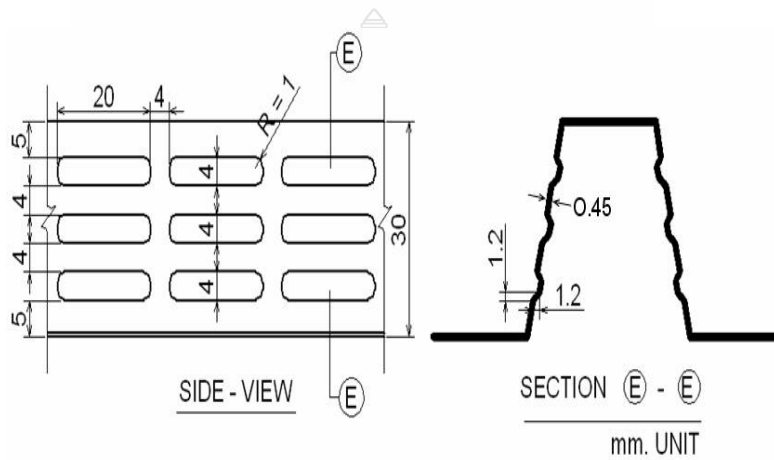
ก. รูปการป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) มีหลายรูปแบบ ที่ทำการศึกษาวิจัยนี้เลือกทำการศึกษาเพียง 3 รูปแบบดังนี้คือ

1. รูปแบบที่หนึ่ง การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน กับตัวอย่างทดสอบดังนี้

1.1 ขนาดของการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวนอนและรูปแบบการจำลอง ตามรูปที่ 3.47 และ 3.48



รูปที่ 3.47 ขนาดของการป้อนลอนด้านข้างแนวอนและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP SPAN



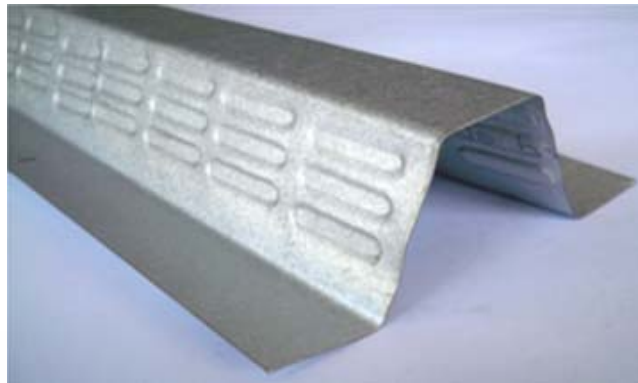
รูปที่ 3.48 ขนาดของการป้อนลอนด้านข้างแนวอนและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP HATS

1.2 การป้อนลอนด้านข้างแนวอนกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นที่ทดสอบจริงหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN ลักษณะเป็นคานหน้าตัดรูปหมวกมีปีกพับขึ้นรูปเป็นขอบสันเพิ่มความแข็งแรง



รูปที่ 3.49 การป้อนลอนด้านข้างแนวอนกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด TOP SPAN

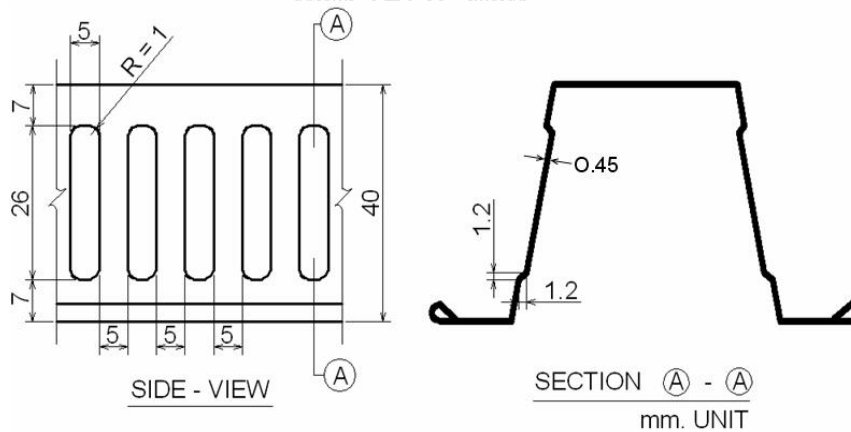
1.3 การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวนอนกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นที่ทดสอบจริงหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS ลักษณะเป็นคานหน้าตัดรูปหมวกมีปีกไม่พับขึ้นรูปเป็นขอบสัน ปีกตรง



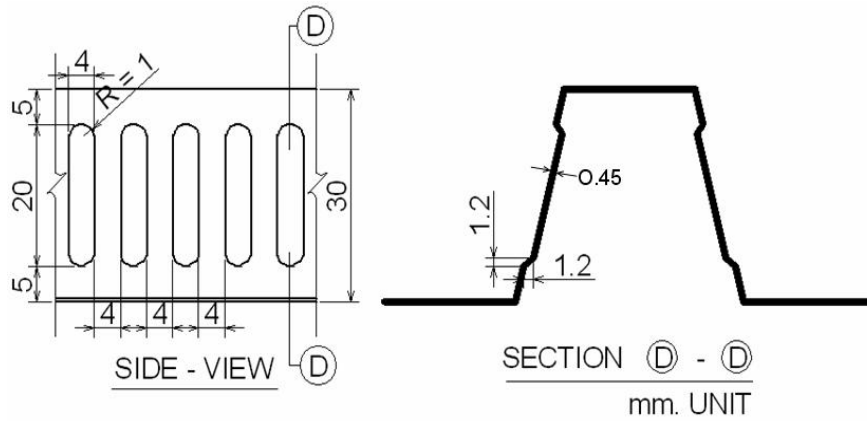
รูปที่ 3.50 การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวนอนกับคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด TOP HATS

2. รูปแบบที่สอง การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง กับตัวอย่างทดสอบดังนี้

2.1 ขนาดของการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งและรูปแบบการจำลอง ตามรูปที่ 3.51 และ 3.52

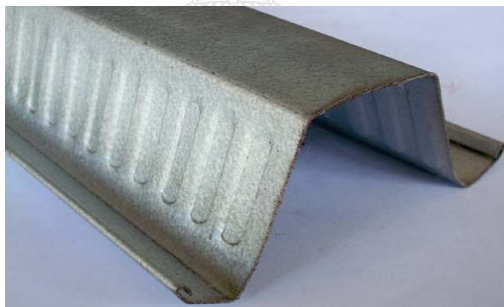


รูปที่ 3.51 ขนาดของการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP SPAN



รูปที่ 3.52 ขนาดของการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP HATS

2.2 การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง กับคานเหล็กขึ้นรูปเยื่อที่ทดสอบจริงหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN ลักษณะเป็นคานหน้าตัดรูปหมวกมีปีกพับขึ้นรูปเป็นขอบสันเพิ่มความแข็งแรง



รูปที่ 3.53 การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งกับคานเหล็กขึ้นรูปเยื่อหน้าตัด TOP SPAN

2.3 การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งกับคานเหล็กขึ้นรูปเยื่อหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS ลักษณะเป็นคานหน้าตัดรูปหมวกมีปีกไม่พับขึ้นรูปเป็นขอบสัน ปีกตรง

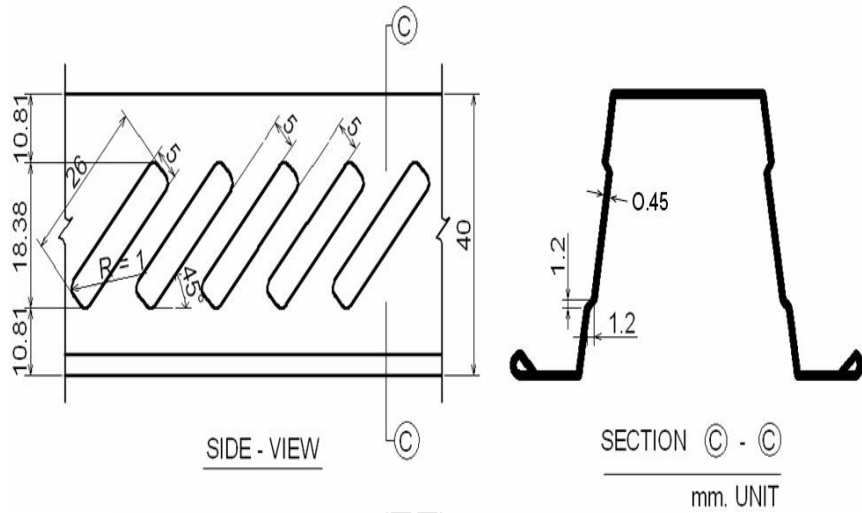


รูปที่ 3.54 การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งกับคานเหล็กขึ้นรูปเยื่อหน้าตัด TOP HATS

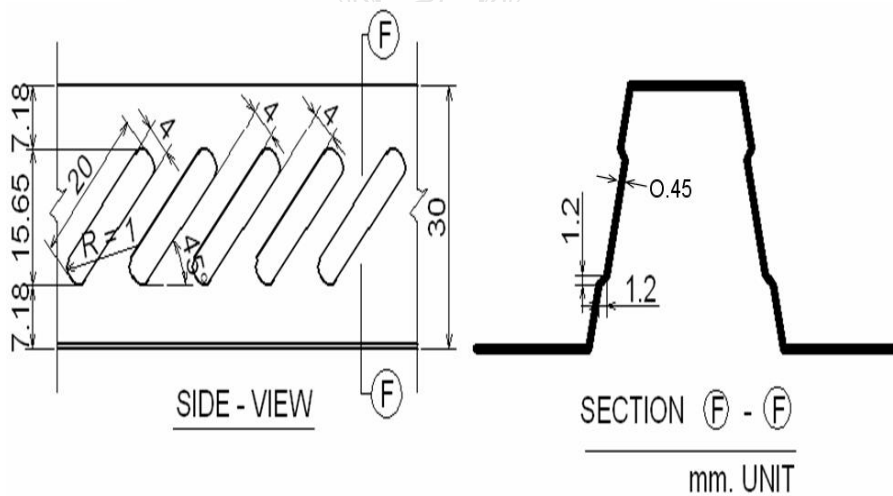
3. รูปแบบที่สาม การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง กับตัวอย่างทดสอบดังนี้

3.1 ขนาดของการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงและรูปแบบการจำลอง ตามรูปที่

3.55 และ 3.56

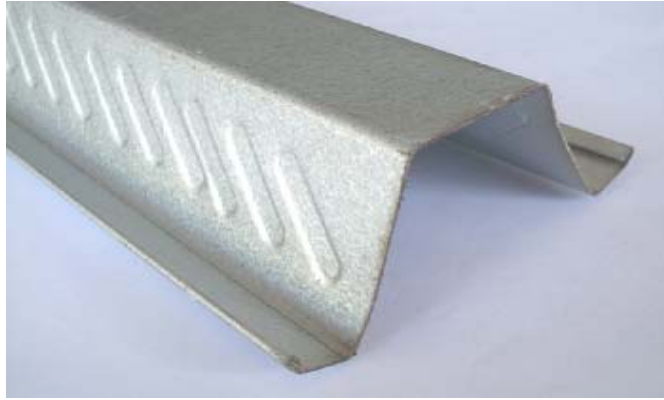


รูปที่ 3.55 ขนาดของการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP SPAN



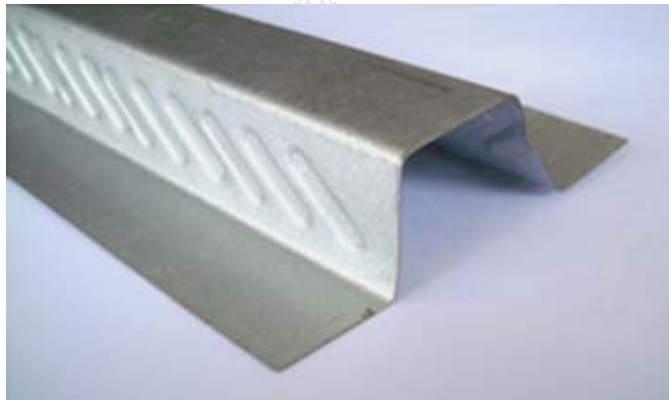
รูปที่ 3.56 ขนาดของการป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงและระยะห่างของลอนบนคานหน้าตัด TOP HATS

3.2 การป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงกับคานเหล็กขึ้นรูปเส้นที่ทดสอบจริงหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN ลักษณะเป็นคานหน้าตัดรูปหมวกมีปีกพับขึ้นรูปเป็นขอบสันเพิ่มความแข็งแรง



รูปที่ 3.57 การปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงกับคานเหล็กขึ้นรูปเย้นหน้าตัด TOP SPAN

3.3 การปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงกับคานเหล็กขึ้นรูปเย้นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS ลักษณะเป็นคานหน้าตัดรูปหมวกมีปีกไม่พับขึ้นรูปเป็นขอบสัน ปีกตรง



รูปที่ 3.58 การปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงกับคานเหล็กขึ้นรูปเย้นหน้าตัด TOP HATS

ข. การทดสอบการลากขึ้นรูป (Deep Drawing)

วัตถุประสงค์ของการทดสอบการลากขึ้นรูปมีดังนี้

1. เพื่อศึกษากลไกในการลากขึ้นรูป (Deep Drawing)
2. เพื่อศึกษาวิธีการทดลองการลากขึ้นรูปในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการลากขึ้นรูปโดยในการทดลองนี้ ศึกษาอิทธิพลของรัศมีของแม่พิมพ์ตัวผู้ (PUNCH RADIUS), รัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย (DIE RADIUS) และแรงกดของ BLANK HOLDER ที่มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป
3. สามารถนำอิทธิพลของตัวแปรในการลากขึ้นรูปไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ ลากขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

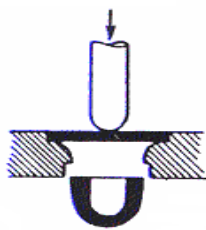
บทนำ เป็นที่ทราบกันดีว่า การนำเหล็กแผ่นมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงาน ในกระบวนการลากขึ้นรูป (Deep Drawing) มีปัจจัย หรือตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการขึ้นรูป เราสามารถจัดกลุ่มตัวแปรได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. Process Variables
2. Material Variables

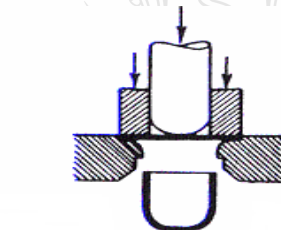
ทฤษฎี กระบวนการลากขึ้นรูป (Deep Drawing) เป็นการลากขึ้นรูปจากโลหะแผ่นโดยการกดแผ่นเปล่า (Blank) ด้วยแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) ผ่านปากแม่พิมพ์ตัวเมีย (Lip of Die) ซึ่งจะทำให้มีรูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามแม่พิมพ์ ส่วนลักษณะการลากขึ้นรูปมี 2 ลักษณะคือ

1. Single Action เป็นการลากขึ้นรูปโดยไม่ใช้แผ่นกด

2. Double Action เป็นการลากขึ้นรูปโดยใช้แผ่นกดในการสร้างแรงกดโดยการใส่แผ่นกดเพื่อลดการย่น (Wrinkle) ที่เกิดที่ปีกถ้วย

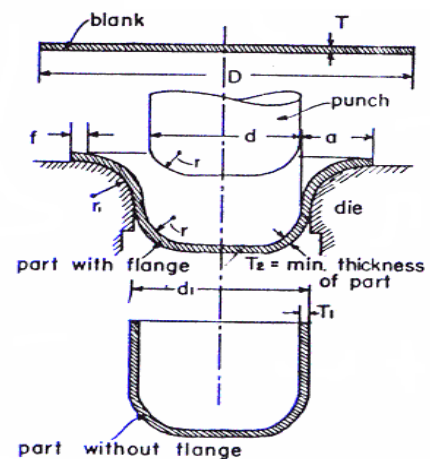


1. Single Action



2. Double Action

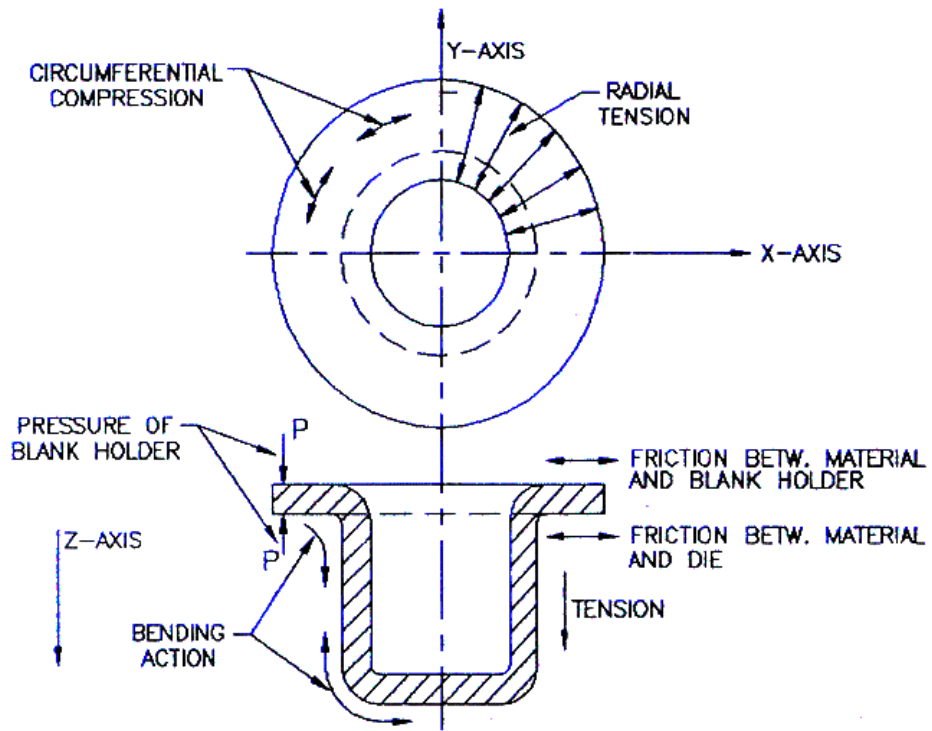
(ก)



(จ)

รูปที่ 3.59 Cupping (ก) และ ขั้นตอนการทำ Cupping (จ)

ระหว่างการลากขึ้นรูป แม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) กดแผ่นเปล่า (Blank) ผ่านปากแม่พิมพ์ตัวเมียทำให้แม่พิมพ์เกิดการดัด (Bending) และดัดกลับ (Unbending) เนื้อโลหะที่อยู่ระหว่างแผ่นกดจะมีความเค้นดึงตามแนวการกดของแม่พิมพ์ตัวผู้ และความเค้นอัดตามแนวเส้นรอบวง (Hoop compression stress) เนื้อโลหะที่ผนังถ้วยได้รับความเค้นดึง แนวแกน (Axial tension) ส่วนที่ก้นถ้วยเนื้อโลหะเกิดสภาวะความเค้นดึงทั้งสองแนวแกน สภาวะความเค้นที่กล่าวมาจะมีผลต่อแรงในการขึ้นรูปและความหมายของถ้วยกลมอย่างมาก






รูปที่ 3.60 กลไกการลากขึ้นรูป

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในงานลากขึ้นรูป เช่นการเกิดการย่น การฉีกขาด (Tear) ซึ่งทำให้ชิ้นงานได้รับความเสียหายจนใช้การไม่ได้ แสดงในตารางที่ 3.9 ส่วนตัวแปรในการลากขึ้นรูปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ตัวแปรที่เกิดจากขบวนการขึ้นรูป และ ตัวแปรที่เกิดจากแผ่นขึ้นงาน

ตารางที่ 3.9 ความเสียหายที่เกิดในการลากขึ้นรูป

ลักษณะรูปร่างที่ปรากฏบนชิ้นงาน	ความเสียหายที่เกิดขึ้น	สาเหตุที่เกิดความเสียหาย	แนวทางการแก้ไขความเสียหาย
	การแตกขาดที่บริเวณใกล้กันถ้วย	มี Drawing ratio สูงเกินไปต่อวัสดุชิ้นงานและรูปร่างแม่พิมพ์	ลด Drawing ratio ลง
	การฉีกขาดออกบริเวณกันถ้วย	1. รัศมี Die น้อยเกินไป 2. Die clearance น้อยเกินไป 3. ความเร็วของ Punch สูงเกินไป 4. Blank Holder Pressure สูงเกินไป	แก้ไข 1. รัศมี Die และ Punch 2. Die clearance 3. ความเร็วของ Punch 4. Blank Holder Pressure ให้เหมาะสม

ตารางที่ 3.9 ความเสียหายที่เกิดในการลากขึ้นรูป (ต่อ)

ลักษณะรูปร่างที่ปรากฏบนชิ้นงาน	ความเสียหายที่เกิดขึ้น	สาเหตุที่เกิดความเสียหาย	แนวทางการแก้ไขความเสียหาย
	การเกิดรอยขุ่นบริเวณขอบชิ้นงาน (Wrinkles in the flange)	1. Blank Holder Pressure น้อยเกินไป 2. Die clearance น้อยเกินไป 3. Die Radius มากเกินไป	1. เพิ่ม Blank Holder Pressure 2. เพิ่ม Die clearance 3. ลด Die Radius
	การเกิดรอยขุ่นบริเวณผนังชิ้นงาน (Wrinkles in the wall)	1. Die clearance กว้างเกินไป 2. Die Radius มากเกินไป 3. Blank Holder Pressure น้อยเกินไป	แก้ไข 1. Die clearance 2. Die Radius 3. Blank Holder Pressure ให้เหมาะสม
	การเกิดคลื่นที่ขอบชิ้นงาน (Earing)	คุณสมบัติทางกลในแต่ละทิศทางการรีดมีค่าไม่เท่ากัน	ใช้โลหะแผ่นที่มี Planer Anisotropy ต่ำ

ตัวแปรที่เกิดจากขบวนการขึ้นรูป

ตัวแปรในการลากขึ้นรูปที่เหมาะสมต้องได้จากการทดลองที่เป็นที่ยอมรับ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีทดสอบของ Swift Sachs และ Panknin ตัวแปรที่มีผลต่อการลากขึ้นรูปอย่างมากได้แก่

1. **Die radius** คือ รัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย ซึ่งขนาดของรัศมีแม่พิมพ์ตัวเมีย มีผลต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป Kurt Lang ได้กล่าวถึงแรงดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากรัศมีขดแม่พิมพ์ตัวเมีย ไว้ดังนี้

$$F_b = \frac{\pi \cdot \sigma_f \cdot d_m \cdot S^2}{2r_D} \quad (3.1)$$

เมื่อ

- σ_f = Flow Stress
- d_m = ความโตเฉลี่ยของถ้วย
- S = ความหนา
- r_D = รัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมีย
- F_b = Bending Force

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่ารัศมีของแม่พิมพ์ตัวเมียมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป

Chung และ Wsift ได้ศึกษาถึงผลจากขนาดของรัศมีแม่พิมพ์ตัวเมียบ้างกับขนาดของ Blank พบว่า รัศมีของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การลากขึ้นรูปได้ดีขึ้น แต่ถ้ารัศมีแม่พิมพ์ใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดรอยย่นได้ จาก Chung และ Swift อาจสรุปได้ว่า

- $r_D \approx 4-8$ เท่าของความหนา จะไม่ส่งผลกระทบต่อแรงในการลากขึ้นรูป
- $r_D < 10$ เท่าของความหนา จะทำให้อัตราส่วนในการลากขึ้นรูปมีแนวโน้มลดลง
- $r_D \geq 10$ เท่าของความหนา จะมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป (Drawing Force)
- $r_D \gg 10$ เท่าของความหนา จะทำให้เกิดรอยย่น (Wrinkles)
- r_D เล็กมาก ๆ จะทำให้เกิด Necking ที่รัศมีแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch Radius)

นอกจากนี้รูปร่างของ Die มีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปและขีดจำกัดอัตราส่วนการขึ้นรูปอีกด้วย เช่น รูปร่างของ Die แบบ Tractrix Shape เป็นรูปร่างของแม่พิมพ์ตัวเมียที่ทำให้แรงกดของ Punch ลดลง เมื่อเทียบกับแรงที่เกิดจากแม่พิมพ์ตัวเมียในรูปร่างปกติ

2. Punch radius คือรัศมีของแม่พิมพ์ตัวผู้ ซึ่งไม่มีผลต่อแรงของแรงในการลากขึ้นรูปแต่รัศมีของแม่พิมพ์ตัวผู้จะทำให้ความหนาของชิ้นงานบริเวณรัศมีกันด้วยและผนังด้วยมีความหนาลดลง

3. Blank Holder Force คือ แรงกดของแผ่น Blank Holder ที่กระทำกับชิ้นงาน Blank holder จะกดบนชิ้นงานเพื่อช่วยป้องกันการไหลตัวของชิ้นงานที่ผ่านระหว่าง Blank holder กับปากแม่พิมพ์ที่มีความเร็วมากเกินไป แรงกดของ Blank Holder สามารถหาได้จาก

$$\text{B.H.F.} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \frac{\sigma_y + \sigma_u}{200} \quad (3.2)$$

เมื่อ

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของ Blank

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของ Cup

σ_y, σ_u = yield and ultimate of material

4. Die clearance ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ต้องมีความใหญ่เพียงพอ ที่จะรองรับความหนาที่เพิ่มขึ้น โดยได้ประมาณช่องว่างแม่พิมพ์ไว้ดังนี้

$$t = t_0 \left(\frac{D}{d} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

เมื่อ

t_0 เป็นความหนาเดิมของโลหะแผ่น

D เป็นความโตของแผ่นเปล่า

d เป็นความโตของแผ่นแม่พิมพ์ตัวผู้

Oehler และ Kaiser ได้ทำการศึกษา Die clearance ไว้ดังนี้

$$U_D = S_o + 0.07 + \sqrt{10 S_o} \text{ สำหรับ Steel Sheet}$$

$$U_D = S_o + 0.02 + \sqrt{10 S_o} \text{ สำหรับ Aluminum Sheet}$$

$$U_D = S_o + 0.04 + \sqrt{10 S_o} \text{ สำหรับ Nonferrous Sheet}$$

$$U_D = S_o + 0.02 + \sqrt{10 S_o} \text{ สำหรับ High-temperature Alloys}$$

เมื่อ

U_D = Die Clearance

S_o = Sheet Thickness

5. Friction ความเสียดทานของโลหะแผ่นกับแผ่นกด จะมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูปแต่ถ้ามีการใช้สารหล่อลื่นที่ดีและมีการเตรียมผิวแม่พิมพ์ตัวเมียที่ดีด้วยแล้ว จะช่วยลดแรงในการลากขึ้นรูปได้ แต่ความเสียดทานที่รัศมีของแม่พิมพ์ตัวผู้จะมีประโยชน์ในด้านช่วยรับแรงกระทำจากผนังถ้วยกลม โดยปกติแล้วที่รัศมีแม่พิมพ์ตัวผู้จะไม่ทำการขัดผิวและไม่ใช้สารหล่อลื่น

6. Blank diameter แรงในการลากขึ้นรูปจะเพิ่มตามขนาดของแผ่นเปล่าและทำให้ความหนาของโลหะที่ใกล้กันด้วยบางลงด้วย

7. Blank thickness ความหนาที่น้อยๆ ของโลหะแผ่นจะทำให้แรงเสียดทานมีผลต่อแรงในการลากขึ้นรูป ทำให้โอกาสที่ถ้วยกลมแตกขาดได้ง่ายขึ้น

ตัวแปรที่เกิดจากแผ่นชิ้นงาน

คุณสมบัติของวัสดุก็มีความสำคัญ โดยเฉพาะคุณสมบัติทางกลจะมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปในระดับหนึ่ง โดยโลหะแผ่นจะมีคุณสมบัติในการลากขึ้นรูปที่ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับ

1. ความสามารถในการไหลตัวภายใต้สภาวะความเค้นที่ปึกกล้วย ซึ่งความสามารถในการไหลตัวทำให้เกิดขีดจำกัดในการลากขึ้นรูป เป็นค่าของการดึงขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุและขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Punch โดยสามารถหาขีดจำกัดในการลากขึ้นรูปครั้งแรกได้จาก

$$\beta_{\max} = \left(\frac{d_o}{d_1} \right)_{\max} \quad (3.4)$$

- เมื่อ β_{\max} = Limit Drawing Ratio
 d_o = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนการขึ้นรูป
 d_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Punch

2. ความสามารถของโลหะในการต้านทานการเพิ่มความหนาบริเวณผนังถ้วย หรือเรียกว่า Plastic Anisotropy (r) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของโลหะแผ่น ซึ่งมักจะเกิดความไม่เท่ากันในทุกทิศทาง การรีดเหล็กแผ่น โดยเป็นอัตราส่วนของ True Strain ในทิศทางความกว้าง (w) กับ True Strain ในทิศทางความหนา (t) ดังสมการ

$$r = \frac{\ln \left(\frac{w}{w_o} \right)}{\ln \left(\frac{t}{t_o} \right)} = \frac{\ln \left(\frac{w}{w_o} \right)}{-\ln \left(\frac{w}{w_o} \right) + \ln \left(\frac{1}{1_o} \right)} \quad (3.5)$$

$$r_m = \frac{(r_o - 2r_{45} + r_{90})}{4} \quad (3.6)$$

$$\Delta r = \frac{r_o - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (3.7)$$

- เมื่อ
- r = Plastic Strain Ratio
 - W = Width at parallel part of test piece after tensile
 - W_o = Width at parallel part of test piece before tensile
 - t_o = Thickness of test piece before tension
 - t = Thickness of test piece after tension
 - r_m = Average Value (r) หรือค่าเฉลี่ยของ Anisotropy Factor
 - r_o = ค่า r ในทิศทางตามแนวรีด
 - r₄₅ = ค่า r ในทิศทาง 45° ตามแนวรีด

$$r_{90} = \text{ค่า } r \text{ ในทิศทาง } 90^\circ \text{ ตามแนวรีด}$$

$$\Delta r = \text{Variation in strain ratio}$$

นอกจากนี้ปริมาณของ r-value ยังบอกค่าได้โดยตรงดังนี้ ถ้าวัสดุเป็นประเภท isotropic และ Homogeneous จะมีค่า $r = 1$ และ $\Delta = 0$ โลหะที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะมี Plastic Strain Ratio หรือค่า r-value แตกต่างกันไปเช่น

- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดร้อน $r = 0.8 - 1.0$
- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำรีดเย็น $r = 1.0 - 1.4$
- อลูมิเนียมบริสุทธิ์ $r = 0.8 - 1.0$
- อลูมิเนียมผสม $r = 0.6 - 0.8$

$r > 1$ แสดงว่ามีความสามารถในการลากขึ้นรูปสูง

$r < 1$ แสดงว่ามีความสามารถในการลากขึ้นรูปต่ำ

$\Delta r > 0$ จะเกิดการยืดตัวแบบไม่สมมูล (Earring) ที่ 0° และ 90° ของทิศทางการรีด

$\Delta r < 0$ จะเกิดการยืดตัวแบบไม่สมมูล (Earring) ที่ 45° ของทิศทางการรีด

Δr เข้าใกล้ 0 แสดงว่ามีความสามารถในการลากขึ้นรูปสูง

นอกจากนี้ความสามารถในการลากขึ้นรูป ยังสามารถบอกด้วยค่า Limit Drawing Ratio ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่า r-value กล่าวคือ เมื่อ r-value มีค่าสูงขึ้นจะทำให้ LDR เพิ่มขึ้นด้วยทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการลากขึ้นรูป และนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ ของวัสดุอีก เช่น

Ductility of Sheet Metal คือ ความเหนียวของแผ่นโลหะเป็นพฤติกรรมการแสดงความสามารถในการยืดตัวของวัสดุขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในของวัสดุแต่ละประเภท วัสดุที่มีความเหนียวสูงสามารถลากขึ้นรูปได้ดีกว่าวัสดุที่มีความเหนียวต่ำ

Yield Strength คือค่าความแข็งแรงที่จุดครากตัวของวัสดุ ถ้ามีค่าสูงต้องใช้แรงลากขึ้นรูปสูง เนื่องจากวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรก็ต่อเมื่อแรงที่ใช้มากกว่าแรงที่จุดครากตัว

Strain Hardening Exponent, n คือค่าความชันช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียด ถ้าค่า n สูงหมายความว่าระหว่างการขึ้นรูปโลหะจะมีความแข็งมาก

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการลากขึ้นรูป

ได้เลือกตัวแปรในการศึกษาการลากขึ้นรูป คือ

- Die Radius
- Punch Radius
- Blank Holder Force
- Drawing Force



รูปที่ 3.61 ตัวอย่างที่ทำการทดสอบการลากขึ้นรูป (Deep Drawing)

การทดสอบการปั๊มลากขึ้นรูป ในการดำเนินการวิจัยนี้ใช้วิธีการทดสอบปั๊มขึ้นรูปตามแม่พิมพ์จริง คุณผลจริงของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) กับ แม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) โดยทำการปั๊มขึ้นรูปกับตัวอย่างที่ศึกษาวิจัยเพื่อหาระยะของการยืดตัว (Stroke) ที่เหมาะสม ถ้าระยะของการยืดตัว (Stroke) ที่ใช้ปั๊มลงลึกมากไปจะทำให้ตัวอย่างเกิดการย่น การฉีกขาด การเสียรูป โลหะหย่อน ผิวเกิดเสียหาย เป็นต้น ถ้าระยะของ Stroke ที่ใช้ปั๊มลงลึกน้อยไปจะทำให้ตัวอย่างที่ปั๊มขึ้นรูปไม่มีลอนที่เกิดจากการลากขึ้นรูปให้เห็น และไม่ได้ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุตัวอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแม่พิมพ์ที่ทำการปั๊มลากขึ้นรูปต้องทำการลบคมและลบมุมต่างๆเพื่อป้องกันการที่มุมหรือคมจะกลายเป็นเหมือนกับลักษณะของกรรไกร ทำให้เกิดการคบกัดตัดชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการปั๊มลากขึ้นรูปลอนอยู่ในขณะนั้น ทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหาย ความลึกของการปั๊มขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างที่เหมาะสมไม่ควรลึกเกิน 2 มิลลิเมตรที่ความหนาของชิ้นงานตัวอย่าง 0.45 มิลลิเมตร หรือสำหรับตัวอย่างที่ทำการศึกษาวิจัยนี้



การทดสอบการปั๊มขึ้นรูป ก) ตัวอย่างที่ 1



การทดสอบการปั๊มขึ้นรูป ข) ตัวอย่างที่ 2

รูปที่ 3.62 การทดสอบการปั๊มขึ้นรูปกับตัวอย่างที่ศึกษาวิจัยเพื่อหาระยะของการยืดตัว (Stroke) ที่เหมาะสม

ค. การสร้างแกนเหล็กยึดหัวปั๊มและแทนปั๊มแม่พิมพ์สำหรับเครื่องปั๊ม มีขั้นตอนดังนี้

1. การสร้างประกอบคานเหล็กรูปตัวโอ ขนาดปีกคานกว้าง 10 เซนติเมตร ความสูงคาน 8 เซนติเมตร มีความยาว 30 เซนติเมตร ความหนาชิ้นงาน 12 มิลลิเมตร โดยประกอบจากเหล็ก

แผ่น (Plate Steel) ความหนา 12 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นแท่นสำหรับติดตั้งแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) และรองรับตัวอย่างที่ทำการปั๊มขึ้นรูป ตามรูปแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.63 ขนาดหน้าตัดคานประกอบเหล็กรูปตัวไอ



รูปที่ 3.64 ขนาดด้านข้างคานประกอบเหล็กรูปตัวไอ

2. การกลึงแกนเหล็กยึดหัวปั๊มแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร เพื่อใช้ยึดจับตัวหัวปั๊มด้วยสลักขนาดผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร เป็นอุปกรณ์เสริมในการปั๊มขึ้นรูปตัวอย่างที่ติดตั้งบนเครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press) โดยใช้เครื่องแกะสลักสมองกล CNC Router Machine ทำการกลึง



รูปที่ 3.65 ขนาดแกนเหล็กยึดหัวปั๊มแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch)

ต่อไปนี้เป็น

3. แสดงการสร้างแกนเหล็กยึดหัวปั๊มและแท่นปั๊มแม่พิมพ์สำหรับเครื่องปั๊มดังรูป



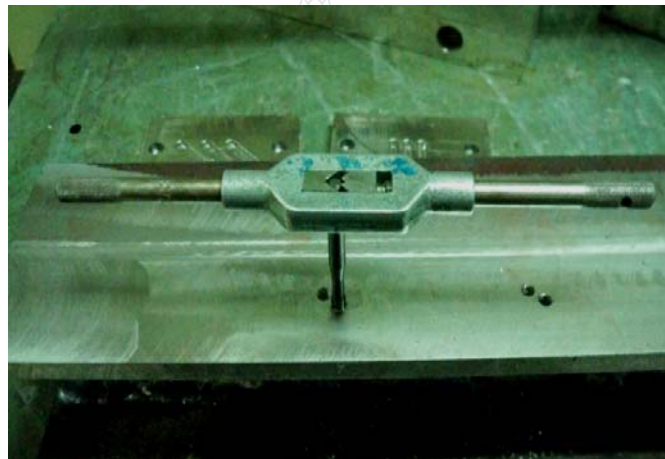
รูปที่ 3.66 การไสปีกคานประกอบเพื่อให้ผิวเรียบ



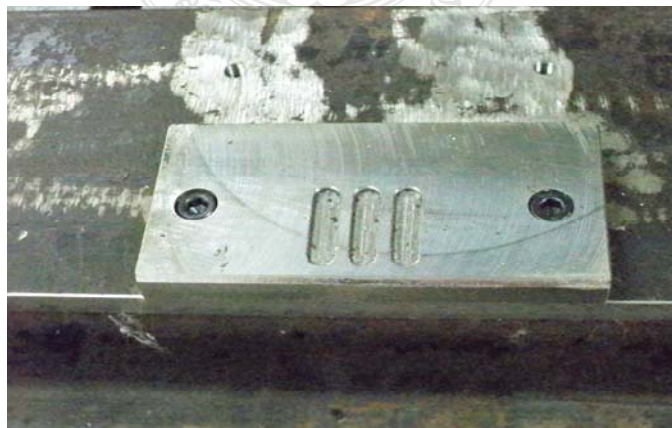
รูปที่ 3.67 การไสหลังคานประกอบเพื่อให้ผิวเรียบ



รูปที่ 3.68 การเจาะหลังคานประกอบเพื่อนำร่อง



รูปที่ 3.69 การทำเกลียวใน (Tapping) ด้วยเครื่องมือ



รูปที่ 3.70 การติดตั้งแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die)



รูปที่ 3.71 ติดตั้งดอกกัดสำหรับการกลึงด้วยเครื่อง CNC



รูปที่ 3.72 การปรับเครื่อง CNC เพื่อหาระยะการกลึงของดอกกัด



รูปที่ 3.73 การใช้ดอกกัดกลึงครึ่งสองที่ส่วนยึดจับแกนเหล็กกับเครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press)



รูปที่ 3.74 ทดสอบประกอบหัวปั๊มแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) กับแกนเหล็กยึดหัวปั๊มแม่พิมพ์



รูปที่ 3.75 ใช้ดอกสว่านเจาะแกนเหล็กเพื่อยึดสลักขนาดผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.76 การใช้ดอกสว่านเจาะแกนเหล็กเพื่อยึดสลัก



รูปที่ 3.77 เครื่อง CNC ที่ใช้เจาะแกนเหล็กเพื่อยึดสลัก

ง. การใช้งานเครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press) และขั้นตอนการปั๊มขึ้นรูปตัวอย่าง

1. ติดตั้งแม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) กับคานเหล็กแผ่นความหนา 12 มิลลิเมตร ที่ประกอบเป็นรูปตัวไอ โดยยึดด้วยสกรูเกลียวปล่อยชนิดหัวจม (Socket Bolt)
2. ติดตั้งคานประกอบรูปตัวไอในตำแหน่งชั่วคราวก่อนที่แท่นรองรับของเครื่องปั๊มข้อเสื่อ
3. ทำการหมุนล้อเพลลาข้อเหวี่ยงและลูกเบี้ยวด้วยมือไปทิศทางด้านหน้าของเครื่องปั๊มข้อเสื่อให้ครบจำนวน 1 รอบของวงล้อเพลลาข้อเหวี่ยงก่อน แล้วจึงดึงคันโยกที่ล็อกยึดล้อเพลลาข้อเหวี่ยงและลูกเบี้ยวไปทิศทางด้านหลังเครื่องปั๊มข้อเสื่อที่ติดตั้งอยู่ตำแหน่งข้างตัวเครื่อง
4. ทำการหมุนล้อเพลลาข้อเหวี่ยงและลูกเบี้ยวด้วยมือไปทิศทางด้านหน้าของเครื่องปั๊มข้อเสื่อเพื่อให้ตัวเหล็กหัวจับที่จับล็อกยึดแกนเหล็กหัวปั๊มแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) ขยับลงจนอยู่ในตำแหน่งที่แม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมียวางประกบกันได้สนิทและไม่อยู่ในตำแหน่งที่เมื่อทำการปั๊มแล้วแม่พิมพ์คบชิดกันจนชิ้นงานตัวอย่างเกิดความเสียหาย
5. ทำการขันน็อต (Nut) ยึดตัวเหล็กหัวจับที่จับล็อกยึดแกนเหล็กหัวปั๊มแม่พิมพ์ตัวผู้และขันน็อตยึดแกนปั๊ม พร้อมกับขันเหล็กแหวนปรับระยะของการตั้งค่า Stroke ให้แม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมียวางประกบกันให้สนิทก่อน
6. ทำการขันเหล็กแหวนปรับระยะตั้งค่า Stroke เพื่อให้หัวปั๊มแม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมียได้ระยะการปั๊มลากขึ้นรูปที่ไม่ทำให้ตัวอย่างที่ใช้งานเกิดความเสียหาย โดยใช้ระยะตั้งค่า Stroke ครั้งแรกที่ใช้ในการปรับประมาณ $\frac{1}{2}$ ของความยาวเตี้ยแม่พิมพ์ตัวผู้ที่ใช้ปั๊มหรือประมาณ 1.2 มิลลิเมตร และทำการขันน็อต (Nut) ล็อกยึดแกนเหล็กก้านหรือเหล็กเพลลาส่งกำลังของเครื่องปั๊มแม่พิมพ์ที่ใช้ปรับระยะตั้งค่า Stroke (ขึ้น-ลง) ที่อยู่ตำแหน่ง 2 ตัว บนสุดของเครื่องปั๊มข้อเสื่อ

7. ทำการลื้อคียัดคานประกอบรูปตัวไอ ด้วยเหล็กประกบ ติดกับแท่นปั๊มให้แน่นไม่ไหวขยับ เพื่อให้ได้ตำแหน่งของการลื้อคียัดตรงกันระหว่างแม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมีย
8. ทำการเปิดสวิทซ์การทำงานของเครื่องปั๊มข้อเสื่อก่อน โดยที่หัวปั๊มแม่พิมพ์ตัวผู้จะทำการขยับขึ้นเองโดยอัตโนมัติ ไปอยู่ที่ตำแหน่งบนสุดของเครื่องปั๊มข้อเสื่อ
9. ทำการเปิดสวิทซ์รอบการทำงานของเครื่องหมุนล้อเพลาช้อเหวี่ยง โดยเลือกใช้ความเร็วรอบ 120 ครั้งต่อนาที ซึ่งเครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press) ขนาด 16 ตัน มีความเร็วของการหมุนล้อเพลาช้อเหวี่ยงอยู่ 2 ระดับคือ ความเร็วรอบ 120 ครั้งต่อนาที และความเร็วรอบ 190 ครั้งต่อนาที
10. ทำการทดสอบการปั๊มขึ้นรูปเพื่อหาระยะค่า Stroke ที่เหมาะสมในการใช้งานกับตัวอย่างทดสอบ โดยกดปุ่มเปิดสวิทซ์การทำงานสี่เหลี่ยม 2 สวิทซ์ ทั้งคู่พร้อมกัน
11. ตรวจสอบชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการปั๊มขึ้นรูป ว่าในการปั๊มขึ้นรูปนั้นระยะการปั๊มลากขึ้นรูปทำให้ตัวอย่างที่ใช้ในงานทดสอบเกิดความเสียหายหรือไม่ ถ้าเกิดความเสียหายแสดงว่าการปรับระยะตั้งค่า Stroke ที่ใช้ทำการปั๊มนั้นลงอีกมากไปจะทำให้ตัวอย่างเกิดการย่น การฉีกขาด การเสียรูป โลหะหยุ่น และผิวเสียหาย เป็นต้น แต่ถ้าตัวอย่างที่ปั๊มขึ้นรูปไม่มีลอนที่เกิดจากการลากขึ้นรูปแสดงว่าระยะของ Stroke ที่ใช้ปั๊มลงอีกน้อยไป จะทำให้ไม่เกิดรอยปั๊ม ให้ทำการปรับตั้งค่าระยะ Stroke ใหม่ โดยทำการคลายล็อกน็อต (Nut) ที่ลื้อคียัดแกนเหล็กก้านหรือเหล็กเพลาส่งกำลัง แล้วทำการใช้ประแจปากตายปรับแกนเหล็กก้านหรือเหล็กเพลาส่งกำลัง (ขึ้น-ลง) และทำการขันน็อต (Nut) ลื้อคียัดแกนเหล็กก้านส่งกำลัง ทำตามลำดับขั้นตอนที่ 8 ถึง ขั้นตอนที่ 11 ไปจนกระทั่งได้ระยะของ Stroke ที่ใช้ในการปั๊มลากขึ้นรูปที่ไม่ทำให้ตัวอย่างที่ใช้ในการปั๊มเกิดความเสียหายเกิดขึ้นอีก และความลึกในการปั๊มลอนได้ตามแบบของตัวอย่างที่ต้องการ (ความลึกที่ใช้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความลึกของการปั๊มขึ้นรูปที่ไม่ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดความเสียหายที่ได้จากการทดสอบปั๊มลากขึ้นรูป)
12. ทำการขีดเส้นเพื่อบอกตำแหน่งระยะห่างของการปั๊มขึ้นลอน ที่แม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) ติดตั้งอยู่บนคานประกอบรูปตัวไอ โดยระยะห่างของการปั๊มขึ้นลอนมี 2 ระยะดังนี้
 - คานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN ระยะห่างของการปั๊มขึ้นลอนระหว่างริมลอนถึงริมลอน เท่ากับ 5 มิลลิเมตร
 - คานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS ระยะห่างของการปั๊มขึ้นลอนระหว่างริมลอนถึงริมลอน เท่ากับ 4 มิลลิเมตร
13. ทำการขันน็อต (Nut) และเหล็กประกบยึดคานประกอบรูปตัวไอ ที่ติดตั้งทุกตัวที่ปรับแต่งได้ที่แล้วให้แน่นอีกครั้ง
14. ทำการปั๊มขึ้นลอนชิ้นงานตัวอย่างตามรูปแบบที่กำหนดจะทำการศึกษาวิจัยและจำนวนของตัวอย่างที่จะทำการปั๊มขึ้นลอนดังนี้

14.1 คานเหล็กขึ้นรูปเป็นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN ทำการปั๊มขึ้นลอน 6 รูปแบบ และจำนวนดังต่อไปนี้

- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน ความยาว1.15 เมตร จำนวน 9 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง ความยาว1.15 เมตร จำนวน 9 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง ความยาว1.15 เมตร จำนวน 9 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน ความยาว1.70 เมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง ความยาว1.70 เมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง ความยาว1.70 เมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง

14.2 คานเหล็กขึ้นรูปเป็นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS ทำการปั๊มขึ้นลอน 6 รูปแบบ และจำนวนดังต่อไปนี้

- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน ความยาว1.15 เมตร จำนวน 9 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง ความยาว1.15 เมตร จำนวน 9 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง ความยาว1.15 เมตร จำนวน 9 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน ความยาว1.70 เมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง ความยาว1.70 เมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง
- ทำการปั๊มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง ความยาว1.70 เมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง

15. เมื่อได้ตัวอย่างที่จะทำการปั๊มขึ้นลอนตามที่ต้องการแล้ว ให้ดำเนินการในขั้นตอนอื่นๆต่อไป

จ. แสดงการใช้งานเครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press) ทำการปั๊มขึ้นรูปตัวอย่าง



รูปที่ 3.78 เครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press)



รูปที่ 3.79 คานประกอบรูปตัวไอและแกนเหล็กยึดหัวปั๊มแม่พิมพ์



รูปที่ 3.80 เครื่องมือที่ใช้กับเครื่องปั๊มข้อเสื่อ (Mechanical Press)



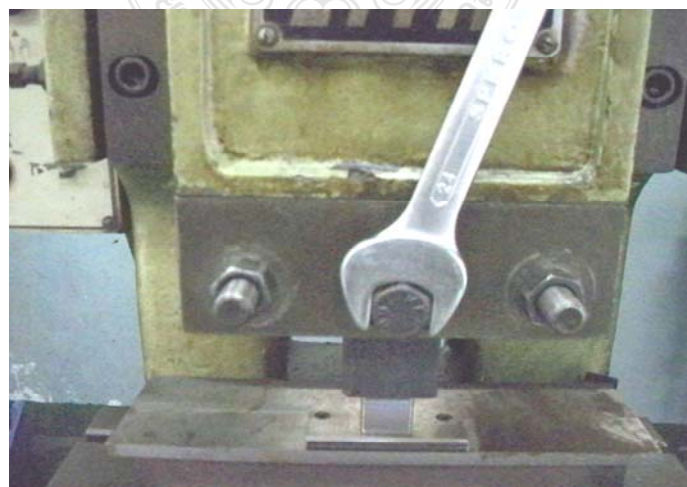
รูปที่ 3.81 คันโยกที่ล็อกยึดล้อเพลาช่อเหวี่ยงและลูกเบี้ยว



รูปที่ 3.82 ขยับลงจนอยู่ในตำแหน่งที่แม่พิมพ์ตัวผู้และแม่พิมพ์ตัวเมียวางประกบกันได้สนิท



รูปที่ 3.83 ขันน็อต (Nut) ยึดจับแกนเหล็กที่จับล็อกยึดแม่พิมพ์ตัวผู้



รูปที่ 3.84 ขันน็อต (Nut) ยึดจับแกนเหล็กที่จับล็อก ยึดแม่พิมพ์ตัวผู้



รูปที่ 3.85 การขันลึอกยึดคานประกอบรูปตัวไอด้วยเหล็กประกบ



รูปที่ 3.86 การขันลึอกยึดคานประกอบรูปตัวไอด้วยเหล็กประกบ



รูปที่ 3.87 ทำการขีดเส้นเพื่อบอกตำแหน่งระยะห่างของการปั้มขึ้นลอน



รูปที่ 3.88 ชั้นเหล็กแหวนลึอกยึดแกนเพลาส่งกำลังที่ปรับระยะตั้งค่า Stroke



รูปที่ 3.89 ชั้นเหล็กแกนเพลาส่งกำลังของเครื่องปั๊มปรับระยะตั้งค่า Stroke (ขึ้น-ลง)



รูปที่ 3.90 ชั้นน็อต (Nut) ลึอกยึดแกนเหล็กก้านหรือเหล็กเพลาส่งกำลัง



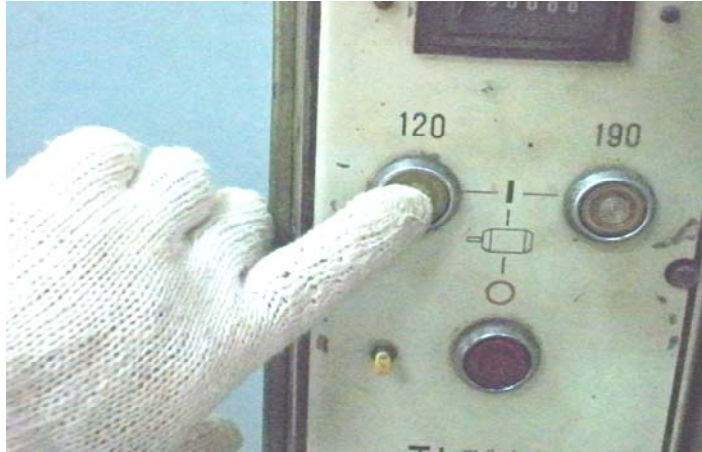
รูปที่ 3.91 ขันน็อต (Nut) ล็อคยึดแกนเหล็กก้านหรือเหล็กเพลาส่งกำลัง



รูปที่ 3.92 ขันน็อต (Nut) ล็อคยึดแกนเหล็กก้านหรือเหล็กเพลาส่งกำลัง ไม่ให้เกินระยะที่ตั้ง



รูปที่ 3.93 การเปิดสวิตซ์การทำงานของเครื่องปั๊มข้อเสือ



รูปที่ 3.94 เปิดสวิตช์รอบการทำงานของเครื่องหมุนล้อเพลาค้อเหวี่ยงใช้ความเร็วรอบ 120 ครั้งต่อนาที



รูปที่ 3.95 ทำการทดสอบการป้อนขึ้นรูป เพื่อหาค่า Stroke ที่เหมาะสม



รูปที่ 3.96 ชุดสวิตช์ควบคุมการป้อนของเครื่องป้อนข้อเสื่อ



รูปที่ 3.97 กดสวิทซ์สีเขียวขณะทำการป้อนวัสดุ



รูปที่ 3.98 กดสวิทซ์สีแดงเมื่อหยุดการทำงานและล็อคเครื่องไม่ให้ทำงาน



รูปที่ 3.99 ทำการป้อนชิ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง



รูปที่ 3.100 ทำการป้อนชิ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง



รูปที่ 3.101 ทำการป้อนชิ้นลอนด้านข้างแนวนอน



รูปที่ 3.102 ทำการป้อนชิ้นลอนด้านข้างของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TS 4048 TOP SPAN ที่เสร็จแล้ว



รูปที่ 3.103 ทำการป้อนขึ้นลอนด้านข้างของคานเหล็กขึ้นรูปเป็นหน้าตัด Hat Shape ชนิด TOP HATS ที่เสร็จแล้ว

3.6.2 ลำดับขั้นตอนวิธีที่ใช้ศึกษา คำนวณและวิจัย มีดังต่อไปนี้

ก. ทำการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในงานวิศวกรรม (Property of Materials) โดยใช้วิธีทดสอบดังนี้

1. การทดสอบแรงดึงของเหล็กโครงสร้าง (Tension Test of Structural Steel)
2. การทดสอบหาค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) E
3. การทดสอบหาค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ν

ข. ทำการทดสอบหาค่าการรับกำลังของคุณสมบัติวัสดุ โดยใช้วิธีทดสอบดังนี้

1. การทดสอบกำลังดัดของคานเหล็กกรีดเย็นที่มีแรงกระทำที่กึ่งกลางคานจุดเดียว (Center Loading Tests) ในลักษณะการติดตั้งบนจตุรรองรับ (Support) เอียงทำมุม 30 องศา ทำการทดสอบคานเหล็กขึ้นรูปเป็นเหมือนการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง ที่ทำการติดตั้งบนโครงหลังคาจริง โดยทำจตุรรองรับ (Support) คานหน้าตัดรูปหมวก มีลักษณะการติดตั้งเอียงทำมุม 30 องศา เพื่อดูพฤติกรรมของการเสีรูปคานเหล็กกรีดเย็นรูปแบบธรรมดาและรูปแบบของการป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) เมื่อรับน้ำหนักกดกระทำกับตัวอย่าง

2. การทดสอบกำลังดัดของคานเหล็กกรีดเย็นที่มีแรงกระทำบนคาน 2 จุดที่สมมาตรกัน (Symmetrical Two – Point Loading Tests) ในลักษณะการติดตั้งบนจตุรรองรับ (Support) เอียง 0° โดยให้เหมือนในโปรแกรม CUFSM แรงกระทำของ Load ที่กระทำบนคานจะกระจายเป็นจุด 2 จุด แบ่งคานเป็น 3 ช่วงระยะเท่าๆกัน จากจตุรรองรับถึงจตุรรองรับที่ช่วงระยะละ $L/3$

ค. ทำการสร้างแบบจำลองทดสอบคานเหล็กขึ้นรูปเป็นเหมือนการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง ศึกษาการเสีรูปของตัวอย่างจริงในลักษณะเหมือนการใช้งานกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีการทำโมเดลในลักษณะการจำลองแบบการวิเคราะห์เหมือนกัน โดยทำจตุรรองรับ (Support) คานหน้าตัดรูปหมวก ในลักษณะการติดตั้งเอียง 30° องศา และ 0° องศา เพื่อดูพฤติกรรมของการเสีรูป

คานเหล็กรีดเย็นรูปแบบธรรมดาและรูปแบบของการปัดขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) เมื่อรับน้ำหนักกดกระทำกับตัวอย่าง

ง. ทำการวิเคราะห์การเสีรูปร่างและทำนายพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างโดยใช้โปรแกรมทางด้าน Finite Element Analysis

จ. ทำการวิเคราะห์การเสีรูปร่างและตรวจสอบการเสีรูปร่างในภาวะใช้งานจำกัดของชิ้นส่วนโครงสร้างโดยโปรแกรม CUFSM

ฉ. เปรียบเทียบผลการทดสอบของคานเหล็กรีดเย็นรูปแบบธรรมดาและรูปแบบของการปัดขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) จากข้อ ข. ถึงข้อ จ.

ช. บันทึกผลการทดลอง ถ่ายรูปความเสียหายของตัวอย่างและสรุปผลการทดสอบ

ซ. สร้างแบบจำลองคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Hat Shape โดยโปรแกรม CUFSM ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์และตรวจสอบการเสีรูปร่างในสภาวะการใช้งานจำกัด (key limit state) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะแบบรวม การโก่งเดาะแบบผิวดรูป และการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยใช้โปรแกรม CUFSM คำนวณหาค่ากำลังรับแรงแบบ “โดยตรง” เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ

3.6.3 การทดลอง

ก. การทดสอบแรงดึงของเหล็กรีดเย็น (Tension Test of Cold-Formed Steel)

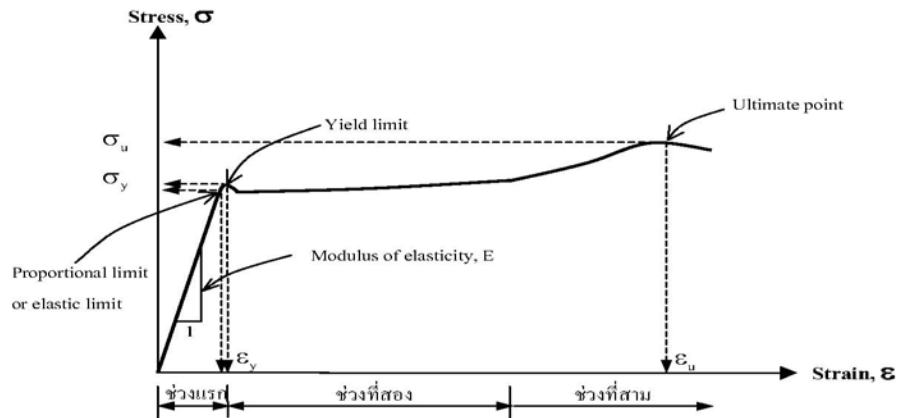
จุดประสงค์ (Objectives) เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติเหล็กเสริมภายใต้แรงดึง ณ ช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ช่วงพลาสติก (Inelastic) จุดประลัย (Ultimate) และจุดวิบัติ (Failure)

มาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard) JIS Z 2201 Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials

เนื้อหาที่เกี่ยวข้อง (Relevant content) ในการทดสอบโดยการดึงเหล็กขึ้นรูปเย็น ในขณะที่เกิดความเค้นดึง (Tensile stress) ตัวอย่างทดสอบ จะยืดออกไปเรื่อยๆ ตามขนาดของความเค้นที่เพิ่มขึ้น ระยะที่ยืดออกต่อหน่วยความยาวเดิมของตัวอย่าง เราเรียกว่า ความเครียดดึง (Tensile strain)

$$\text{ความเค้น (Stress, } \sigma \text{)} = \text{แรงดึง} / \text{พื้นที่หน้าตัด} = P/A \quad (3.8)$$

$$\text{ความเครียด (Strain, } \epsilon \text{)} = \text{ระยะยืด} / \text{ความยาวตั้งต้น} = \Delta L/L \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.104 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กเหนียว (Mild Steel)

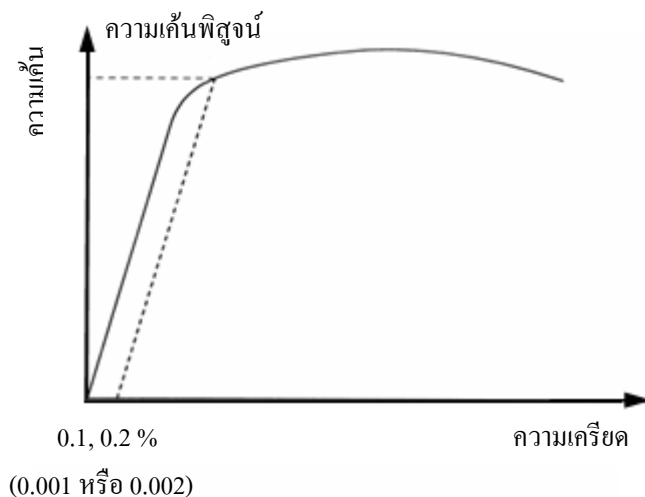
ในการทดสอบโดยการดึงในขณะที่เกิดความเค้นดึง ตัวอย่างทดสอบจะยืดออกไปเรื่อยๆ ตามขนาดของความเค้นที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด แสดงได้ในกราฟความเค้น(แกนตั้ง) กับความเครียด (แกนนอน) ข้างต้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ช่วงแรก ความสัมพันธ์จะเป็นสัดส่วนโดยตรง ขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในช่วงที่เป็นเส้นตรงอยู่เรียกว่า พิกัดเส้นตรง (Proportional limit) และในช่วงนี้เหล็กมีคุณสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Elastic) ซึ่งหมายถึงไม่มีการเสียรูปถาวรเกิดขึ้น ค่าความเค้นสูงสุดของช่วงยืดหยุ่นนี้เกิดขึ้นที่พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) และค่าความชันของกราฟในช่วงนี้คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)

ช่วงที่สอง เมื่อความเค้นสูงกว่าพิกัดเส้นตรง เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะไม่เป็นเส้นตรง โดยความเครียดจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่าเดิม และที่จุดๆ หนึ่งความเครียดเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเค้นไม่เพิ่มขึ้นเลย ตำแหน่งดังกล่าวเรียกว่า จุดคราก (Yield point) และความเค้นดังกล่าวเรียกว่า ความเค้นคราก (Yield stress)

ช่วงที่สาม เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นถึงจุดครากและแรงดึงยังคงกระทำต่อไปความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และถึงระดับค่าหนึ่งความเค้นจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งเรียกพฤติกรรมนี้ว่า แกร่งขึ้นด้วย ความเครียด (Strain hardening) ให้แรงกระทำต่อไปความเค้นจะเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดเรียกว่า กำลังประลัย (Ultimate strength) ในการตัวอย่างจะเกิดคอคอดและขาดออกจากกัน ในตำแหน่งดัง กล่าว

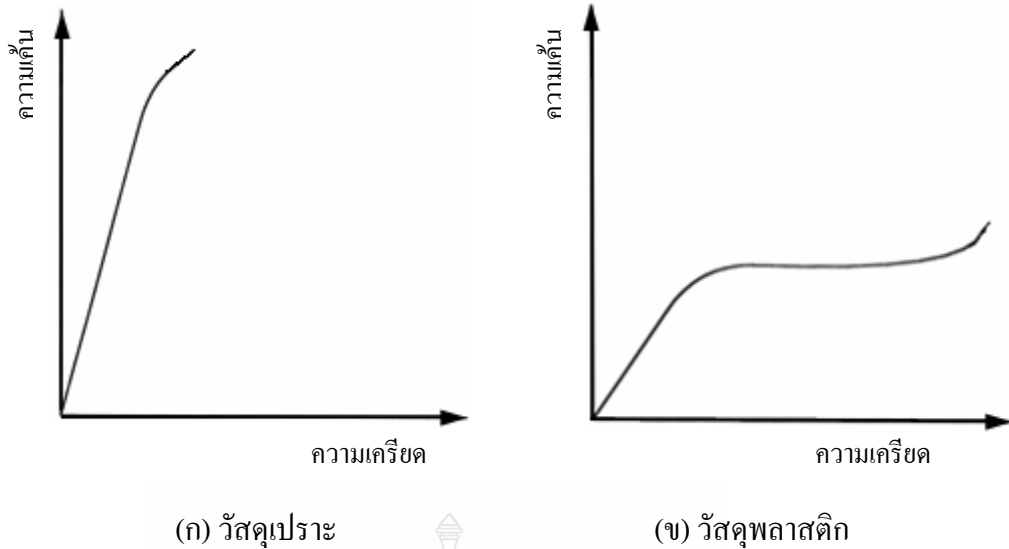
วัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 3.105 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% Offset ดังแสดงในรูปที่ 3.105



รูปที่ 3.105 เส้นโค้งความเค้น - ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มากๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้อาจใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วย ว่าค่าว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง

ที่จุดสุดท้ายของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด Ultimate Strength ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูป 3.106(ก) ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มี การเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 3.106(ข)



รูปที่ 3.106 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น - ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

เส้นโค้งความเค้น- ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่างๆ ได้อีกดังนี้ คือ

1. ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) โดยที่

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%E)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\% \quad (3.10)$$

เมื่อ L_f = ความยาวของเกจวัดหลังจากดึงจนขาด

L_o = ความยาวของเกจวัดเริ่มต้น

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% \quad (3.11)$$

เมื่อ A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %E มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%E สูง) ก็สามารถนำไป

ขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ , Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

2. Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้อิทธิพลของแรงที่กระทำซึ่งวัสดุมีพฤติกรรม เป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{PL}{A\Delta L}$$
 มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น)

ถ้าแรงที่กระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Ph}{Aa} \quad (3.12)$$

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่างๆ ตารางที่ 2.1 จะแสดงตัวอย่างค่า E และ G ของวัสดุ

ตารางที่ 3.10 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	Modulus of elasticity 10 ⁶ psi	Shear Modulus 10 ⁶ psi
Aluminium alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (plain carbon and low alloys)	29.0	11.0
Stainless Steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5
Tungsten	58.0	22.8

เครื่องมือและอุปกรณ์ (Equipment) ที่ใช้ในการทดสอบและเตรียมชิ้นทดสอบมีดัง
รูปที่ 3.107 และรูปที่ 3.109

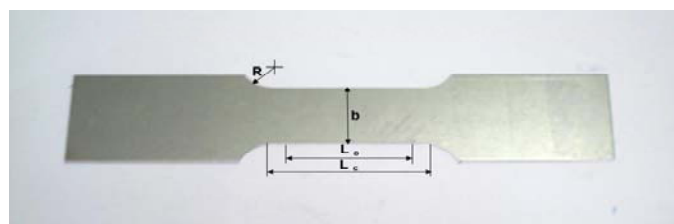


รูปที่ 3.107 การเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องCNC



รูปที่ 3.108 เครื่องทดสอบการดึงเหล็กยี่ห้อDARTEC

ตัวอย่างทดสอบ (Specimens) รูปร่างและมิติของชิ้นทดสอบตามตารางที่ 3.11



รูปที่ 3.109 รูปร่างและมิติของชิ้นทดสอบ

ทำการเตรียมตัวอย่าง จำนวน 3 ตัวอย่างต่อคานเหล็กกริดเย็น หนึ่งแบบ มีหน้าตัดแบบ Top Span และ Top Hats จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ตามขนาดรูปร่างและมิติของชั้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ขนาดรูปร่างและมิติของชั้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง

ความหนา	ความกว้างของส่วน ขนาน b	ความยาวของพิคค L _o	ความยาวของส่วนขนาน L _c	รัศมีส่วนโค้ง ของบ่า R ต่ำสุด
ไม่เกิน 6	25 ± 0.7	50 ± 5	ประมาณ 60	15
เกิน 6	40 ± 0.7	200 ± 20	ประมาณ 220	25

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

วิธีการทดสอบ (Testing procedure)

การใช้เครื่องทดสอบแรงดึง มีขั้นตอนการใช้เครื่องทดสอบการดึงเหล็กยี่ห้อ DARTEC อยู่ 2 ขั้นตอนใหญ่ คือ

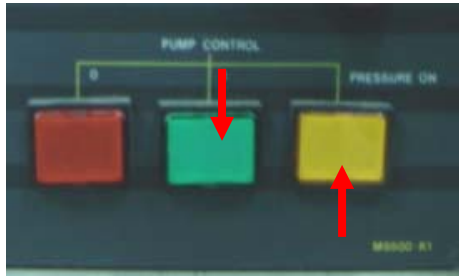
ขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนการเปิดเครื่อง

1. ขั้นตอนการเปิดเครื่อง
 - 1.1 เปิด ON-Beaker เครื่อง Cooling
 - 1.2 เปิด ON-Power Beaker
 - 1.3 เปิด Computer
 - 1.4 ON-Switch ด้านหลังของตู้ Control



รูปที่ 3.110 Switch ด้านหลังของตู้ Control

2. กด Switch สีเขียวด้านหน้าตู้ Control เพื่อเปิด Hydraulic Pump (เปิดไว้ประมาณ 30 นาที)



รูปที่ 3.111 Switch ด้านหน้าตู้ Control

3. กด Switch สีเหลืองด้านหน้าตู้ Control (Pressure ON)

4. กด Switch Control แกนหัวจับขึ้นทดสอบด้านล่าง



รูปที่ 3.112 Switch Control แกนหัวจับขึ้นทดสอบด้านล่าง

4.1 ปุ่มสีแดง Switch Control (=) หัวจับขึ้นงานขึ้นเร็ว

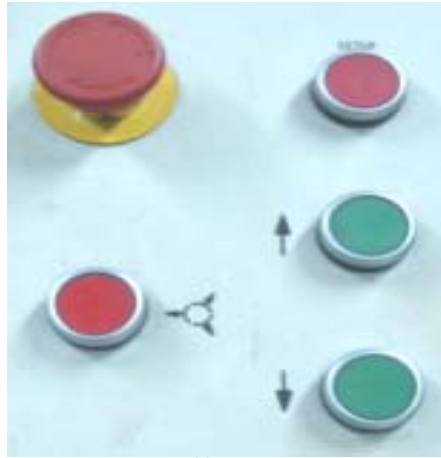
4.2 ปุ่มสีเขียว Switch Control (-) หัวจับขึ้นงานขึ้นช้า

4.3 ปุ่มสีเขียว Switch Control (+) หัวจับขึ้นงานลงช้า

4.4 ปุ่มสีแดง Switch Control (++) หัวจับขึ้นงานลงเร็ว

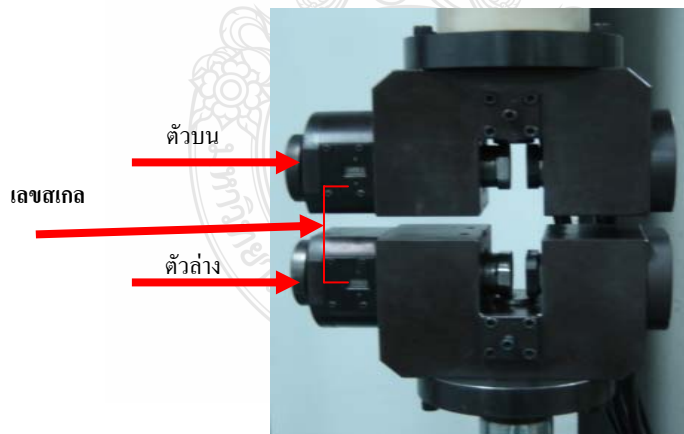
(หมายเหตุ ความสูงของหัวจับขึ้นงานประมาณ 15 cm.)

5. กด Switch Control หัวจับชิ้นงานชุดบนเพื่อปรับระยะตามความสูงของชิ้นงาน



รูปที่ 3.113 Switch Control การขึ้น-ลงหัวจับชิ้นงานชุดบน
(หมายเหตุ กดปุ่มสีแดง+กดปุ่มทิศทางขึ้น – ลง)

6. หมุนปรับขนาดตัวจับชิ้นงานตามความหนาของชิ้นทดสอบทั้งตัวบนและตัวล่างโดยดูที่เลขสเกล



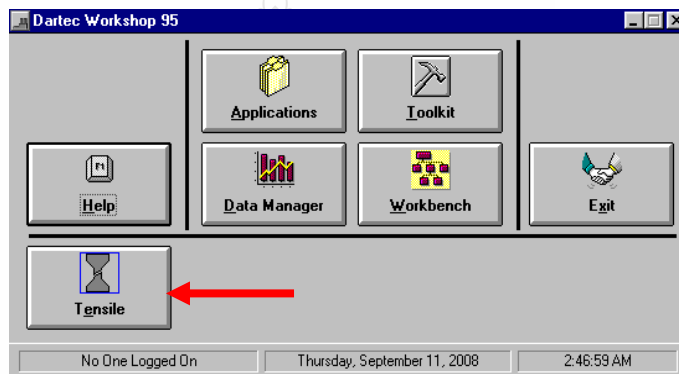
รูปที่ 3.114 ตัวปรับขนาดตัวจับชิ้นทดสอบ

7. เข้าโปรแกรม Dartac Workshop 95



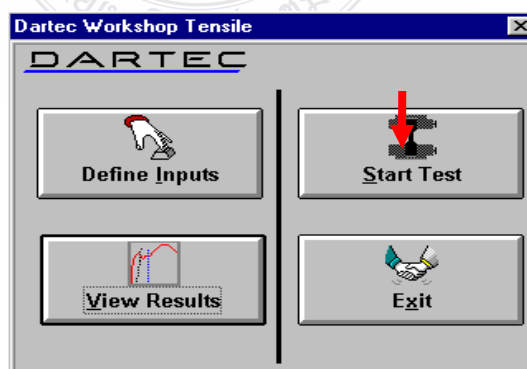
รูปที่ 3.115 ปุ่มการเข้าโปรแกรมการทดสอบแรงดึง

8. เมื่อเข้าโปรแกรม Dartac Workshop 95 จะปรากฏหน้าจอตั้งภาพ และเลือกปุ่ม Tensile



รูปที่ 3.116 ปุ่มแสดงคำสั่งการทดสอบแรงดึง

9. เมื่อเลือกปุ่ม Tensile จะปรากฏหน้าจอตั้งภาพ และเลือกคลิก Start Test



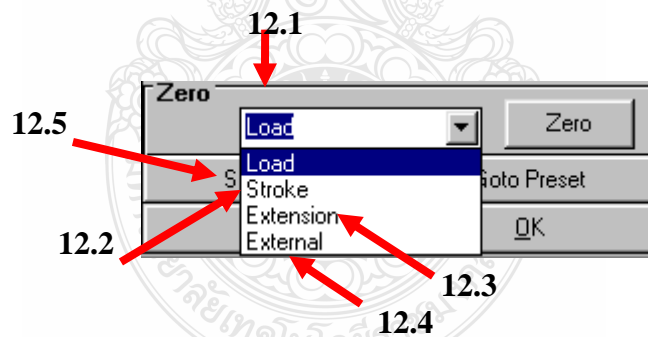
รูปที่ 3.117 ปุ่มแสดงคำสั่งการเริ่มทดสอบแรงดึง

10. เข้าสู่โปรแกรม Darter Workshop Tensile

Specimen Dimensions		User Inputs	
Type :	Rectangular	Operator	MC
Thickness	5 mm	Material	FE
Width	24.7 mm	Spec. Code	-
Parallel Length	50 mm	Test No.	-
Area	116 mm ²	Batch No.	-
Weight	0 g	Auto Extensometer	
Length	0 mm	Status	mm
Density	0 g/cm ³	Clamp	Unclamp
Inside Diameter	0 mm	Set GaugeLength	GaugeLength
Diameter	6 mm		mm
Pull Clear Gap	15 mm	Zero	
		Stroke	Zero
		Set Preset	Goto Preset
		Cancel	OK

รูปที่ 3.118 หน้าจอ โปรแกรม Darter Workshop Tensile

11. ทำการ Set Preset



รูปที่ 3.119 ตำแหน่งทำการ Set Preset

12. ขั้นตอนการ Set Preset

- 12.1 คลิกเลือก Load แล้วคลิก Zero
- 12.2 คลิกเลือก Stroke แล้วคลิก Zero
- 12.3 คลิกเลือก Extension แล้วคลิก Zero
- 12.4 คลิกเลือก External แล้วคลิก Zero
- 12.5 คลิก Set Preset

13. ป้อนค่า Specimen Dimension

Specimen Dimensions	
13.1	Type : Rectangular
13.2	Thickness 5 mm
13.3	Width 24.7 mm
	Parallel Length 50 mm
	Area 116 mm ²
	Weight 0 g
	Length 0 mm
	Density 0 g/cm ³
	Inside Diameter 0 mm
	Diameter 6 mm
	Pull Clear Gap 15 mm

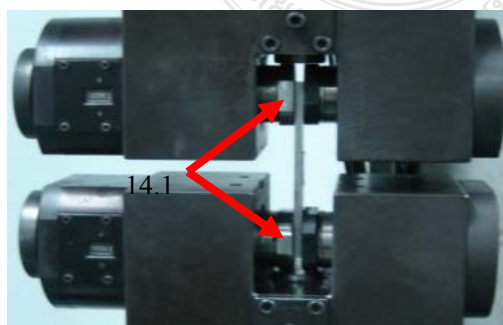
รูปที่ 3.120 ตำแหน่งการป้อนค่า Specimen Dimension

13.1 Type = คลิกเพื่อเลือกชนิดของชิ้นงานทดสอบแบบ Round หรือชิ้นงานทดสอบแบบ Rectangular

13.2 Thickness = ค่าความหนาของชิ้นงานทดสอบ

13.3 Width = ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ

14. ขั้นตอนการจับยึดชิ้นทดสอบที่หัวจับเพื่อทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.121 ชุดควบคุมการจับชิ้นทดสอบ

14.1 นำชิ้นทดสอบใส่ที่หัวจับขึ้นทดสอบ

14.2 เปิดวาล์วหัวจับขึ้นทดสอบทั้งบนและล่างเพื่อให้หัวจับๆ ขึ้นทดสอบ

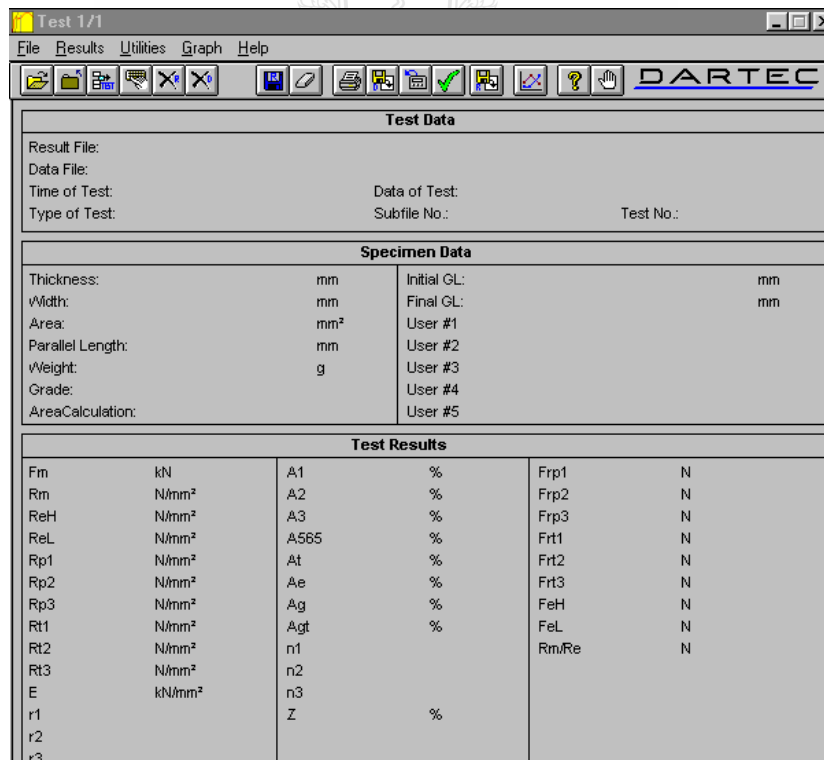
14.3 หมุนวาล์วเปิดเพื่อปรับเพิ่มแรงดันในการจับขึ้นทดสอบประมาณ 2500 kg/cm

15. คลิก ปุ่ม OK



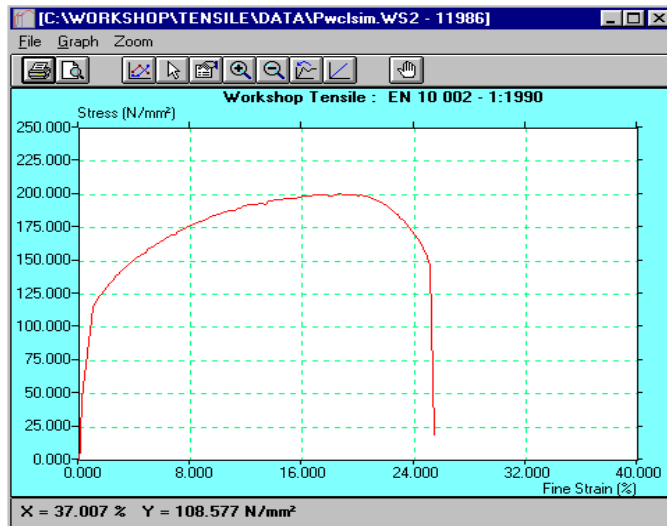
รูปที่ 3.122 หน้าจอการสิ้นสุดคำสั่งการทดสอบแรงดึง

โปรแกรมจะเริ่มทำการทดสอบเมื่อสิ้นสุดการทดสอบโปรแกรมจะแสดงผลข้อมูลการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูป



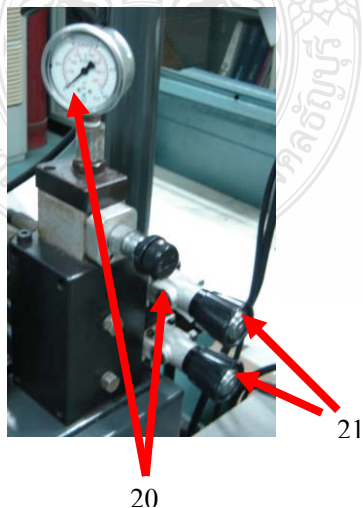
รูปที่ 3.123 หน้าจอผลการทดสอบแรงดึง

16. คลิกเลือก  เพื่อสั่ง Print
17. คลิกเลือก  เพื่อดูข้อมูลแบบกราฟ
18. คลิกเลือก  เพื่อสั่ง Print หน้ากราฟ



รูปที่ 3.124 กราฟแสดงผลการทดสอบ

19. ขั้นตอนการนำชิ้นทดสอบออกจากหัวจับเครื่องทดสอบหลังจากที่ชิ้นทดสอบขาด



รูปที่ 3.125 การนำชิ้นทดสอบออก

20. หมุนปิดวาล์วเพื่อปรับลดแรงดันให้อยู่ที่ศูนย์ (ก)
21. หมุนปิดวาล์วทั้งบนหัวจับชิ้นงานขึ้นบนและล่าง (ข)

ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการปิดเครื่อง

1. กด Switch สีแดงด้านหน้าตู้ Control เพื่อปิด Hydraulic Pump



รูปที่ 3.126 Switch ด้านหน้าตู้ Control

2. กด Switch สีเหลืองด้านหน้าตู้ Control (Pressure OFF)
3. ปิดเครื่องพิมพ์
4. ปิดคอมพิวเตอร์
5. OFF-Switch ด้านหลังของตู้ Control



รูปที่ 3.127 Switch ด้านหลังของตู้ Control

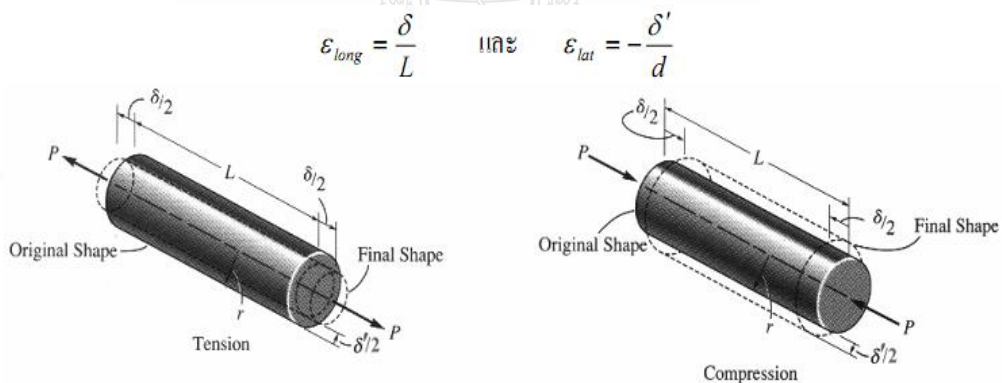
6. เปิด OFF-Power Beaker
7. เปิด OFF-Beaker เครื่อง Cooling

ข. การหาอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

จุดประสงค์ (Objectives) เพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุในงานวิศวกรรม (Property of Materials) ของเหล็กยืดหยุ่นหรือเหล็กขึ้นรูปเย็น ซึ่งประกอบด้วย Poisson's Ratio ความสัมพันธ์ของ Stress และ Strain และ Modulus of Elasticity

มาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard) JIS Z 2201 Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials

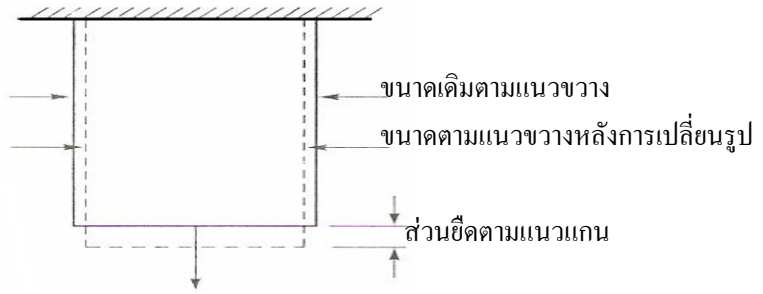
เนื้อหาที่เกี่ยวข้อง (Relevant content) เมื่อแท่งวัตถุ ซึ่งมีความยาวเริ่มต้น L และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น d ถูกกระทำโดยแรงดึงในแนวแกน (axial tensile force) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.128 แล้ว แท่งวัตถุดังกล่าวจะเกิดการยืดตัว (Elongation) δ ในแนวแกน (Longitudinal Direction) และจะเกิดการหดตัว (Contraction) δ' ในแนวขวาง (Lateral Direction) ของแท่งวัตถุ ในทางตรงกันข้าม เมื่อแท่งวัตถุดังกล่าวถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกน (Axial Compression force) แล้ว แท่งวัตถุจะเกิดการหดตัว δ ในแนวแกนและจะเกิดการยืดตัว δ' ในแนวขวาง ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.128 ดังนั้น จากนิยามของความเครียดตั้งฉาก สมการของ Strain ในแนวแกน ϵ_{long} และ ในแนวขวาง ϵ_{lat} เนื่องจากแรงดึงจะอยู่ในรูป



รูปที่ 3.128 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Deformable Bar

ในช่วงต้นคริสต์ศักราช 1800 S.D. Poisson พบว่า ในช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมแบบ Elastic อัตราส่วน ของ ϵ_{lat} ต่อ ϵ_{long} มีค่าที่คงที่และเป็นค่าเฉพาะของวัสดุแบบเนื้อเดียว (Homogenous) และมีพฤติกรรมไม่ขึ้นกับทิศทางที่แรงกระทำ (Isotropic) ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้ได้ถูกเรียกว่า Poisson's Ratio และเขียนได้ในรูป

$$\nu = -\frac{\text{lateral strain}}{\text{longitudinal strain}} = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (3.13)$$



รูปที่ 3.129 การเปลี่ยนรูปของท่อนวัสดุที่รับแรงดึง

ค่า Poisson's Ratio จะไม่มีหน่วย และโดยปกติแล้ว วัสดุในทางวิศวกรรมมักจะมีค่า Poisson's Ratio อยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.33 ในทางทฤษฎีแล้ว ค่า Poisson's Ratio จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.5

ตารางที่ 3.12 ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของวัสดุบางชนิด

วัสดุ	ν
อลูมิเนียมผสม	0.330
ทองเหลือง	0.340
บรอนซ์	0.350
เหล็กหล่อ (Cast Iron)	0.355
คอนกรีต	0.270
แก้ว	0.244
เหล็กกล้า (Steel)	0.288

ค. การทดสอบการดัดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็น (Flexure test of Cold - Formed Steel (Hat Section))

จุดประสงค์ (Objectives)

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเหล็กรีดเย็นหรือเหล็กขึ้นรูปเย็นภายใต้การรับแรงดัด
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติในการรับแรงดัดของเหล็กขึ้นรูปเย็น
3. เพื่อหาค่าความต้านทานต่อแรงดัดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นและหาค่าความแข็งแรงในรูปแบบโมดูลัสของสมการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เมื่อนำหน้ากระทำในรูปของหน้าหน้ากระทำ ขวาง ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปคำนวณหาระยะแอ่นตัว (Deflection) ในช่วงยืดหยุ่นของคานที่ทำจากวัสดุเดียวกัน

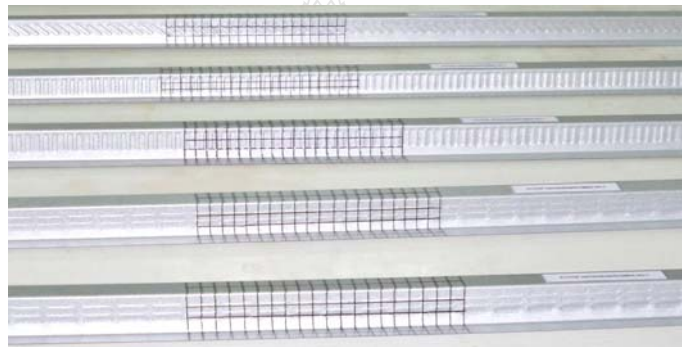
4. เปรียบเทียบความแข็งแรงของตัวอย่างชนิดเดียวกันแต่มีรูปแบบการขึ้นลอนที่ต่างกัน

5. โดยนำผลการทดสอบที่ได้ของค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว (Load - Deflection Curve) มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

มาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard) ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

ขั้นตอนการทดสอบกำลังตัดของคานเหล็กรีดเย็น

1. เตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบมีหน้าตัด 2 แบบ คือ Top Span และ Top Hats แบ่งเป็น 4 รูปแบบ คือ ธรรมดาไม่มีปมลอนด้านข้าง ปมขึ้นลอนด้านข้างแนวอน ปมขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง ปมขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง ความยาวตัวอย่าง 1.70 เมตร แล้วทำการติดชื่อตัวอย่าง ทำการตีเส้น Mesh ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร และติดตั้ง Strain Gauges ที่ตำแหน่ง บนคาน ล่างคาน บริเวณกึ่งกลางคานเพื่อดูผลการเสียรูปและความเครียดของคาน รูปที่ 3.130 และรูปที่ 3.131



รูปที่ 3.130 ทำการตีเส้น Mesh 1 x 1 ซม.



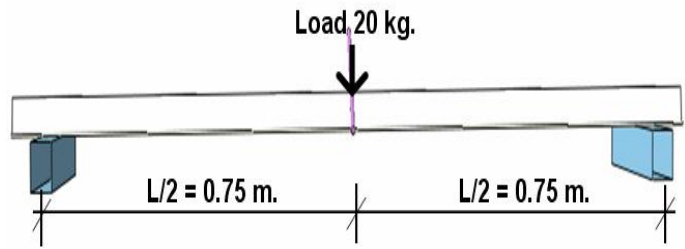
รูปที่ 3.131 ติดตั้ง Strain Gauges กลางคาน

2. เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ตามรูปที่ 3.39 และรูปที่ 3.43

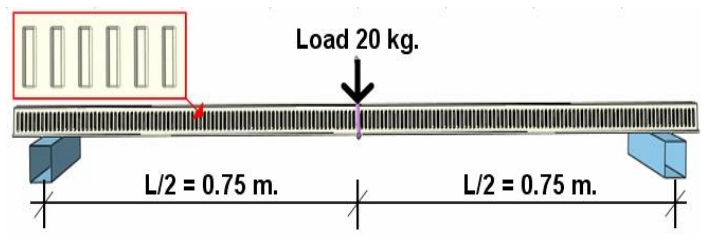
3. ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการผลการเสีรูปร่างของคานเหล็กกรีดเย็น ในขนาดรับแรงกดตัดตามหัวข้อที่ 3.5
 4. ติดตั้งตัวอย่างทดสอบบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา หรือบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 0 องศา
 5. ทำการกดน้ำหนักบรรทุกทุกที่กึ่งกลางคาน อ่านค่าแรงกระทำทุกๆ 0.50 กิโลกรัม จนถึง 20 กิโลกรัม ทำการบันทึกการอ่านทุกๆครั้งด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger แล้วเชื่อมต่อข้อมูลลงเก็บในเครื่อง Computer PC โดยใช้โปรแกรมจกเก็บบันทึกข้อมูลในการอ่าน Visual Data Logger
 6. นำข้อมูลที่ี้ได้จากการทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) กับระยะแอ่นตัว (Deflection)
 7. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงน้ำหนักบรรทุกและความเครียด (Strain)
 8. นำผลการทดสอบของค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัว (Load-Deflection Curve) มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมทางด้าน Finite Element เพื่อดูความสอดคล้องกันระหว่างแบบจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ
- ง. วิธีวิเคราะห์การเสีรูปร่างของตัวอย่างคานเหล็กกรีดเย็นด้วย Finite Element Analysis (FEA)

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (Model) เพื่อทำนายพฤติกรรม

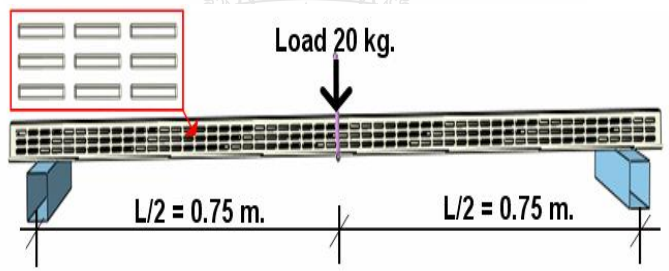
1. การสร้างชิ้นส่วน (Create Part)
2. การสร้างคุณสมบัติวัสดุ (Create Material Properties)
3. กำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Assign Material Properties)
4. การสร้างตาข่ายเพื่อถ่ายแรงการวิเคราะห์ (Create Mesh)
5. การสร้างแรงที่กระทำหรือน้ำหนักบรรทุกและเงื่อนไขข้อกำหนดขอบเขต (Create Load & Boundary Condition)
6. การสร้างไฟล์งานกำหนดการประมวลผลและส่งมอบประมวลผลงาน (Create Job & Submit Job)
7. การดูผลลัพธ์ (View Results)
8. รูปแบบการจำลอง Model มีดังต่อไปนี้ตามรูปที่ 3.132 ถึงรูปที่ 3.139



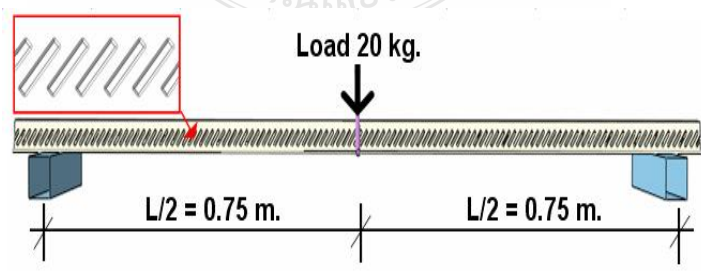
รูปที่ 3.132 รูปแบบการจำลอง Model ที่ไม่มีการป้อนขึ้นลอนด้านข้างคานเหล็กรีดเย็น



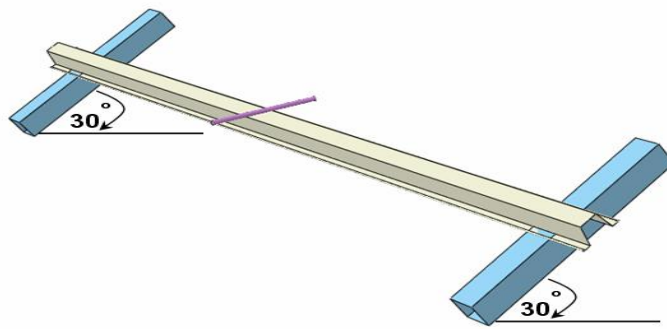
รูปที่ 3.133 รูปแบบการจำลอง Model ที่มีการป้อนขึ้นลอนแนวตั้งด้านข้างคานเหล็กรีดเย็น



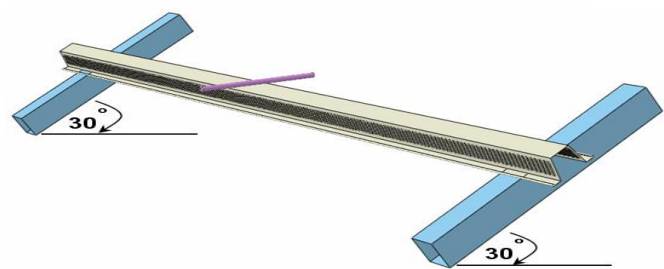
รูปที่ 3.134 รูปแบบการจำลอง Model ที่มีการป้อนขึ้นลอนแนวอนด้านข้างคานเหล็กรีดเย็น



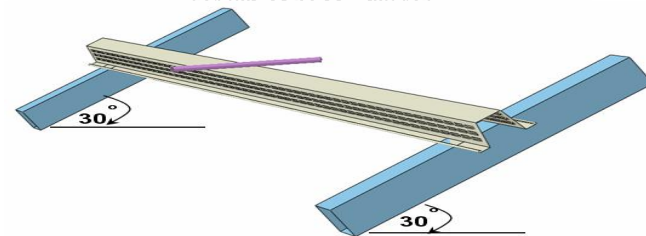
รูปที่ 3.135 รูปแบบการจำลอง Model ที่มีการป้อนขึ้นลอนแนวเฉียงด้านข้างคานเหล็กรีดเย็น



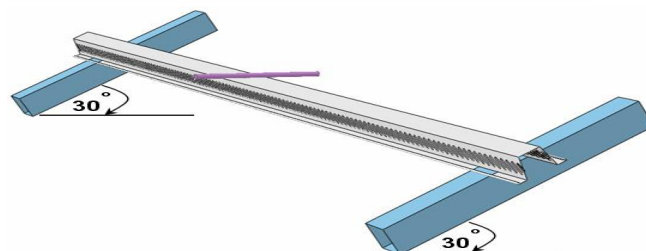
รูปที่ 3.136 คานเหล็กกรีดเอ็นที่ไม่มีการปัดขึ้นลอนด้านข้างติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา



รูปที่ 3.137 คานเหล็กกรีดเอ็นที่มีการปัดขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา



รูปที่ 3.138 คานเหล็กกรีดเอ็นที่มีการปัดขึ้นลอนด้านข้างแนวอนตติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา



รูปที่ 3.139 คานเหล็กกรีดเอ็นที่มีการปัดขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา

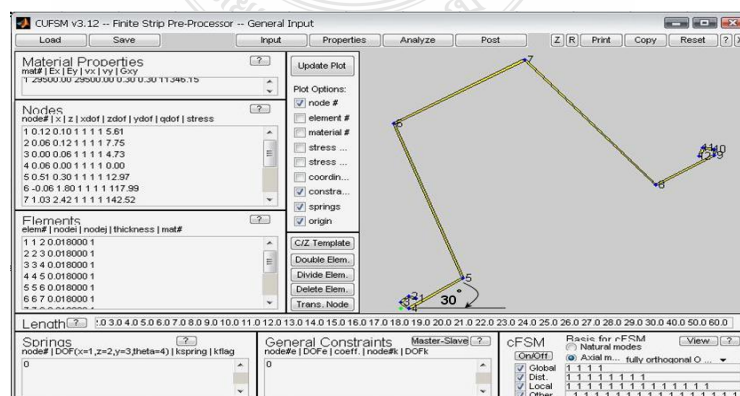
จ. การวิเคราะห์การโก่งคาะของคานเหล็กกริดเย็น โดยใช้โปรแกรม CUFSM

CUFSM หรือ Cornell University – Finite Strip Method มีขั้นตอนการวิเคราะห์การโก่งคาะของคานเหล็กกริดเย็นดังต่อไปนี้

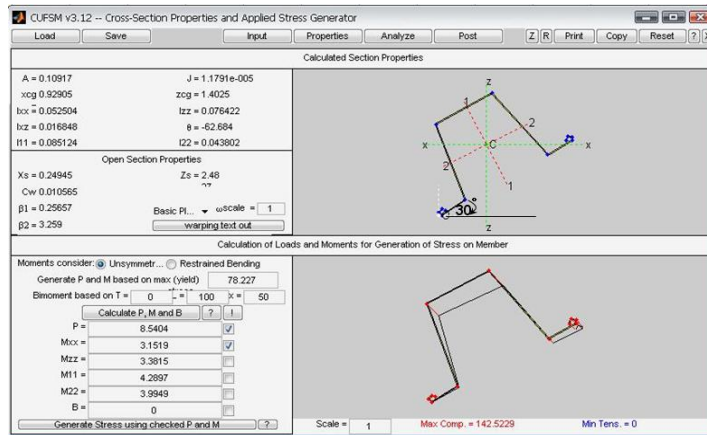
1. เริ่มวิเคราะห์การโก่งคาะของคานหน้าตัด Top Span และ Top Hats โดยทำการ Input ข้อมูลของคานที่ทดสอบ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) พิกัดจุด (Nodes) ส่วนประกอบชิ้นส่วน (Elements) ความยาวและช่วงความละเอียดที่วิเคราะห์ (Lengths) ในส่วนของพิกัดจุด (Nodes) เกี่ยวกับ Stress ถ้าไม่มีข้อมูลให้ใส่ 1.00 ไว้ก่อน แล้วมา Input ข้อมูลใน Menu Bar ของ Properties โปรแกรมจะคำนวณค่าให้เอง ทำการป้อนค่า 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 จะเห็นว่าหน่วยวัดที่ใช้ในโปรแกรมเป็นระบบอังกฤษ (US Unit) ตามรูปที่ 3.140 ถึงรูปที่ 3.144



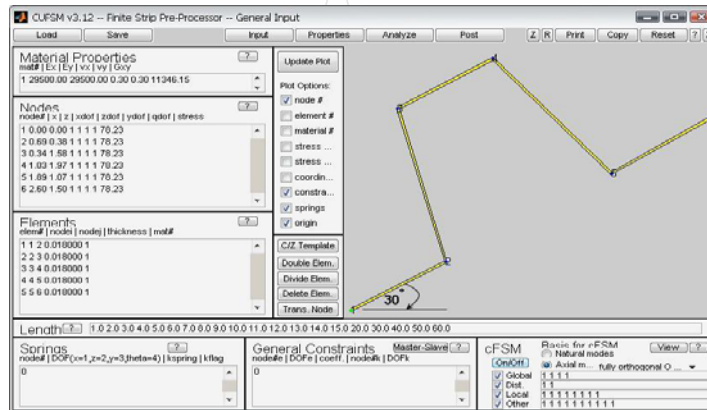
รูปที่ 3.140 หน้าหลักของ CUFSM V 3.12



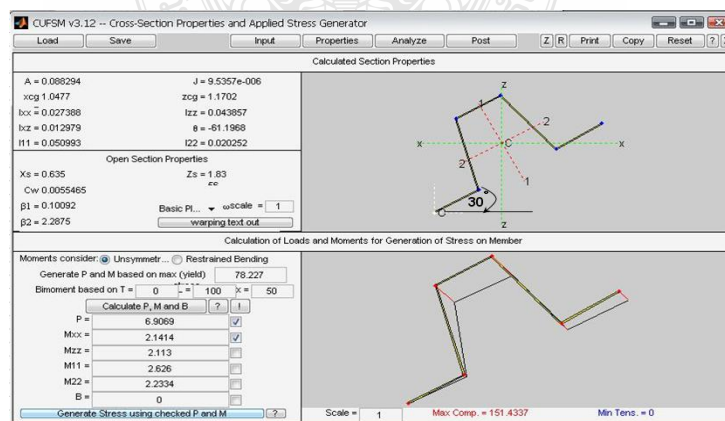
รูปที่ 3.141 การป้อนข้อมูลชิ้นส่วนทดสอบในส่วน Input ของคานหน้าตัด Top Span



รูปที่ 3.142 การป้อนข้อมูลชิ้นส่วนทดสอบในส่วน Properties ของคานหน้าตัด Top Span

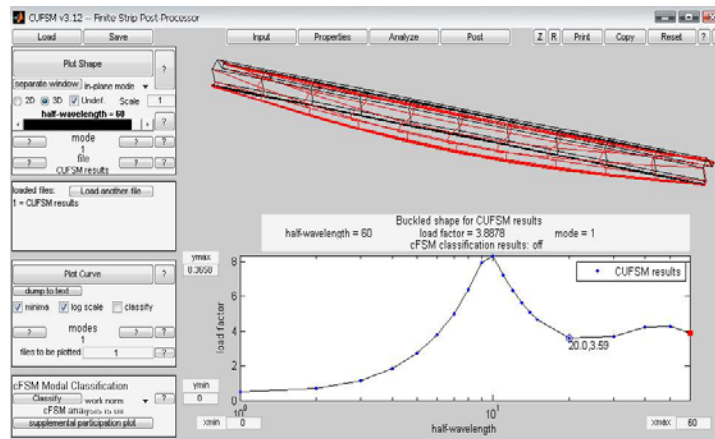


รูปที่ 3.143 การป้อนข้อมูลชิ้นส่วนทดสอบในส่วน Input ของคานหน้าตัด Top Hats

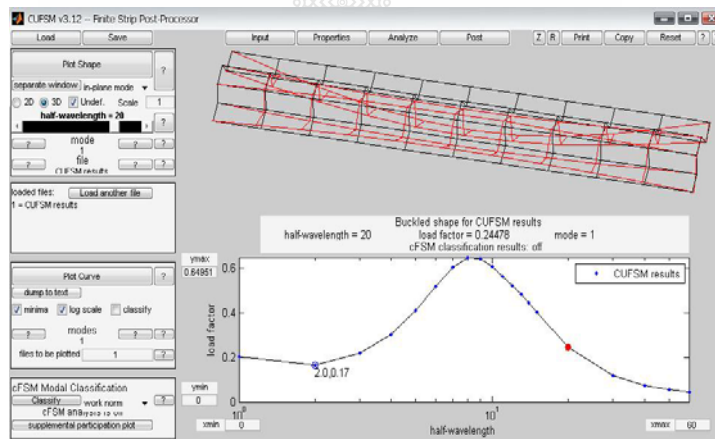


รูปที่ 3.144 การป้อนข้อมูลชิ้นส่วนทดสอบในส่วน Properties ของคานหน้าตัด Top Hats

2. กด Menu Bar ของ Analyze โปรแกรมจะวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผล ตามรูปที่ 3.145 ถึงรูปที่ 3.146



รูปที่ 3.145 โปรแกรมวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผลคาน Top Span

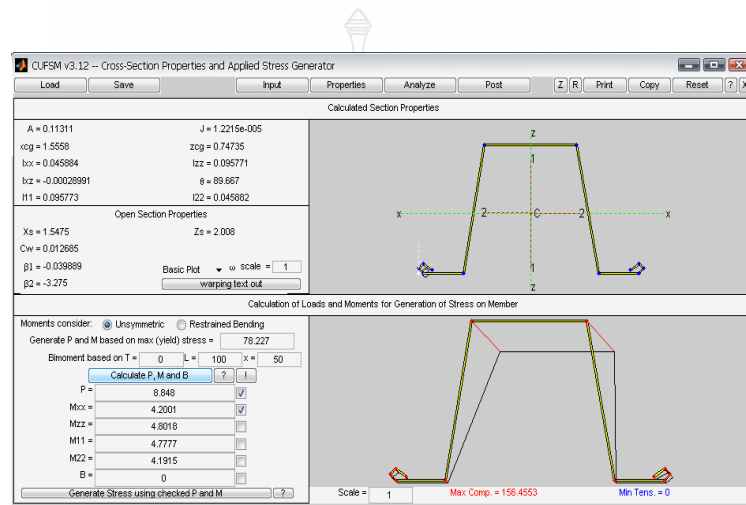


รูปที่ 3.146 โปรแกรมจะวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผลคาน Top Hats

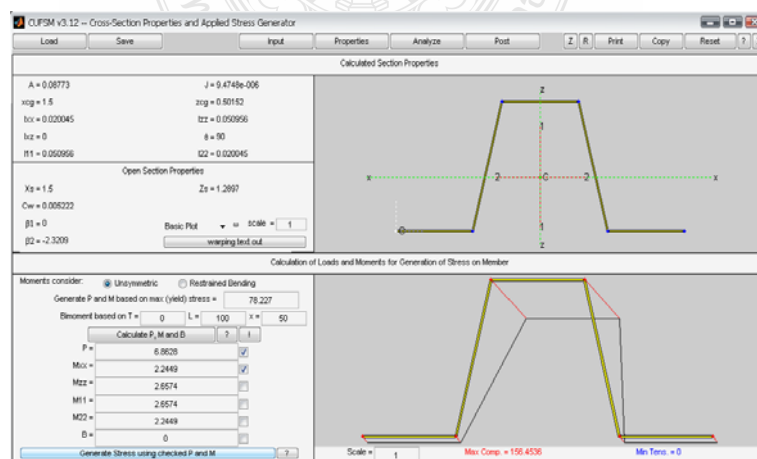
3. ในโปรแกรม Load ที่กระทำบนคานจะกระจายเป็นจุด 2 จุดโดยแบ่งคานเป็น 3 ช่วงระยะเท่าๆกัน จากจุดรองรับถึงจุดรองรับที่ช่วงระยะละ $L/3$ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำลังวัสดุเป็นหลัก Yield Stress (F_y) โดยไม่ต้องใส่ Load โปรแกรมจะใส่ให้เองและคานตัวอย่างมีเฉพาะที่ไม่มีการบีบขึ้นลอนด้านข้างคานเหล็กกริดเย็นเท่านั้น

4. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Finite Strip แบบทั่วไปและแบบจำกัดขอบเขต สำหรับการวิเคราะห์ทางเสถียรภาพของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยเฉพาะสำหรับรูปแบบการโค้งคานที่มีความซับซ้อน โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กกริดเย็นหน้าตัด Hat Shape ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ศึกษาเปรียบเทียบ

ความสัมพันธ์ และตรวจสอบการเสีรูปร่างในสภาวะการใช้งานจำกัด (key limit state) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะแบบรวม การโก่งเดาะแบบผิวดรูป และการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยใช้โปรแกรม CUFSM คำนวณค่ากำลังรับแรงแบบ “โดยตรง” เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาที่ได้คือการเปรียบเทียบกำลังแรงคัตโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี ได้แก่ ASD, LRFD และLSD การเปรียบเทียบกำลังแรงคัตโดยตรงของคานเหล็กรีดเย็นด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างผนังบาง (Thin – Walled Structures) โดยใช้ตัวอย่างตัวอย่างที่จะทดสอบมีหน้าตัด 2 แบบ คือ Top Span และ Top Hats ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 1.50 เมตร ติดตั้งบนจุดรองรับเอียงทำมุม 0 องศา ตามรูปที่ 3.147 ถึงรูปที่ 3.148



รูปที่ 3.147 การป้อนข้อมูลชิ้นส่วนทดสอบในส่วน Properties ของคานหน้าตัด Top Span



รูปที่ 3.148 การป้อนข้อมูลชิ้นส่วนทดสอบในส่วน Input ของคานหน้าตัด Top Hats

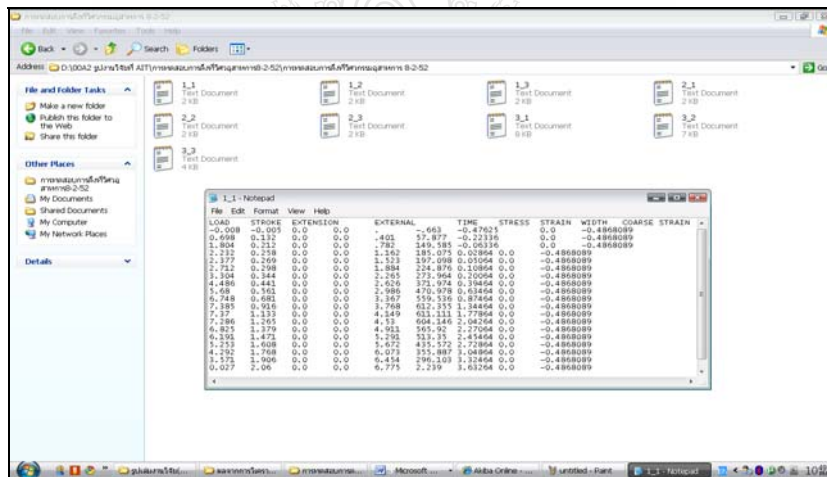
3.7 ลักษณะข้อมูล การเลือกข้อมูล และเหตุผลในการคัดเลือก

ลักษณะข้อมูล การเลือกอ่านข้อมูล โดยคุณผลข้อมูลจากที่ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสียรูปของคานเหล็กกริดเย็น ในขนาดรับแรงกดตัด แล้วทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) กับระยะแอ่นตัว (Deflection) และหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานเหล็กกริดเย็น เปรียบเทียบผลกระทบบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการดัดของคานเหล็กกริดเย็น รูปทรงหมวก รูปแบบต่างๆและไม่มีการปัมขึ้นลอน คุณผลการยึดตัวเมื่อรับแรงกดตัด คุณผลความเครียด (Strain) เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกค้ำ

3.8 ขั้นตอนในการรวบรวมข้อมูล

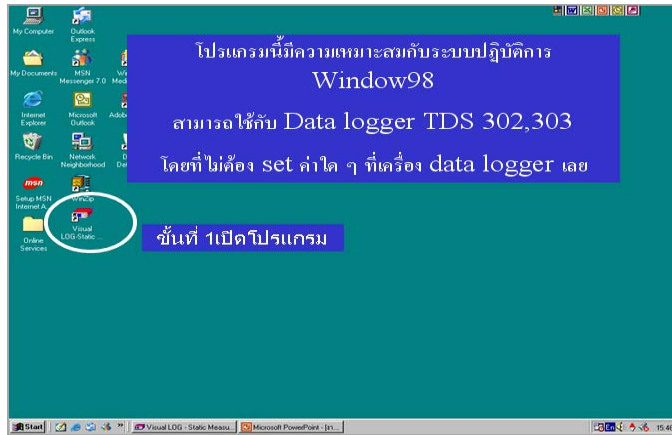
การรวบรวมข้อมูลจากการดำเนินการวิจัย ตามขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

3.8.1 การรวบรวมข้อมูลจากการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในงานวิศวกรรม (Property of Materials) ได้แก่ผลทดสอบการดึงวัสดุ นำค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ผล เช่น ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) E ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ν และค่าต่างๆสำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลองการทดสอบ เป็นต้น การรวบรวมข้อมูลโดยการบันทึกลงใน Notepad ของเครื่อง Computer PC สำหรับทุกๆตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

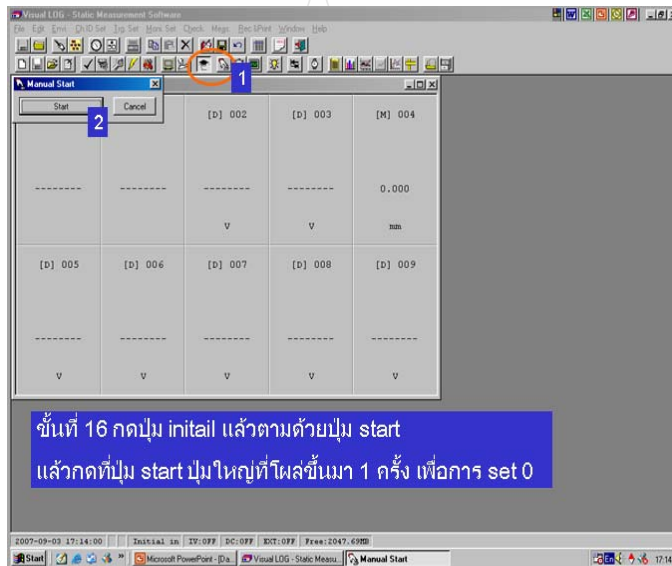


รูปที่ 3.149 การรวบรวมข้อมูลโดยการบันทึกลงในNotepad ของเครื่อง Computer PC

3.8.2 การรวบรวมข้อมูลจากการทดสอบกำลังดัดของคานเหล็กกริดเย็น (Flexural Test of Cold - Formed Steel Beam) โดยทำการบันทึกการอ่านสำหรับการเคลื่อนตัวของตัวอย่างเมื่อรับแรงกดตัดทุกครั้งด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger แล้วเชื่อมต่อข้อมูลลงเก็บในเครื่อง Computer PC โดยใช้โปรแกรมจกเก็บบันทึกข้อมูลในการอ่าน Visual LOG-Static Measurement Software



รูปที่ 3.150 โปรแกรมนี้มีความเหมาะสมกับระบบปฏิบัติการ Window 98

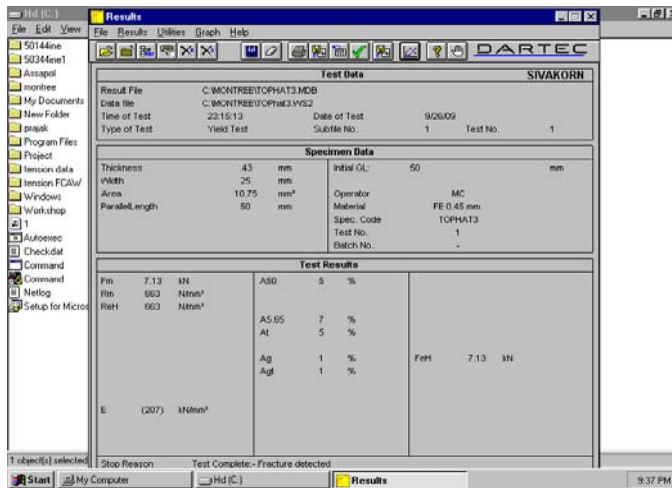


รูปที่ 3.151 จะปรากฏหน้าจอดังรูป สามารถดูผลขนาดบันทึกข้อมูลและอ่านค่าได้พร้อมๆกันหลายตัว

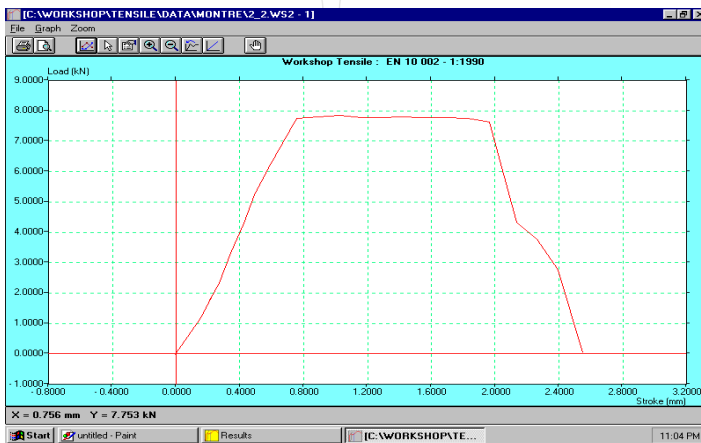
3.9 วิธีวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีการดำเนินการดังนี้

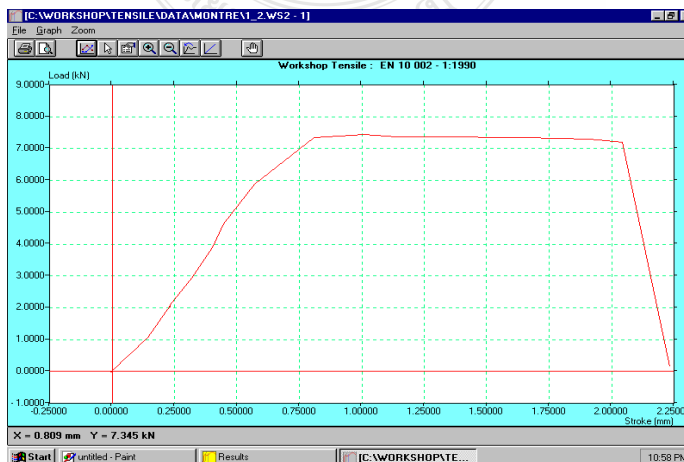
3.9.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในงานวิศวกรรม (Property of Materials) ใช้การวิเคราะห์ด้วย Computer PC สำหรับเครื่องดึงเหล็กที่ชื่อ DARTEC ซึ่งจะแสดงผลบนหน้าจอ Monitor และกราฟ สามารถพิมพ์ข้อมูลเพื่อดูผลได้



รูปที่ 3.152 หน้าจอสามารถดูผลอ่านค่าข้อมูลและพิมพ์ข้อมูล

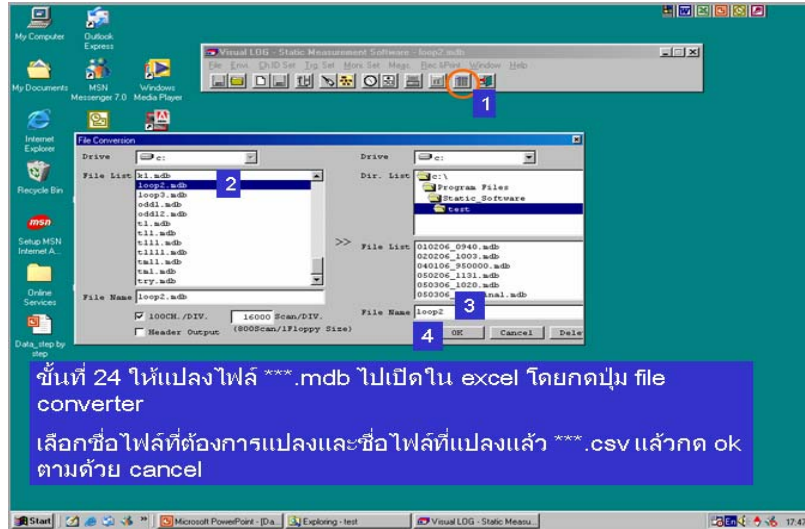


รูปที่ 3.153 หน้าจอสามารถดูผลกราฟ Load กับการยืดตัว



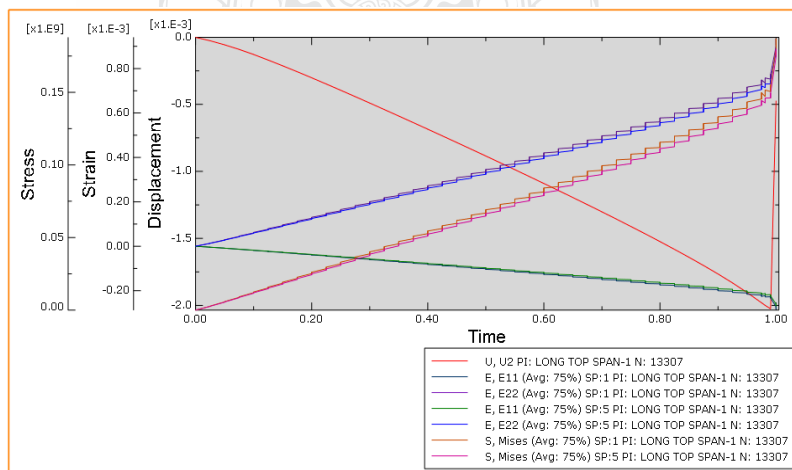
รูปที่ 3.154 หน้าจอสามารถดูผลกราฟ Stress กับ Strain

3.9.2 ข้อมูลที่อ่านด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger แล้วเชื่อมต่อข้อมูลลงเก็บในเครื่อง Computer PC โดยใช้โปรแกรมจกเก็บบันทึกข้อมูลในการอ่าน Visual LOG-Static Measurement Software จะทำการบันทึกแล้วแปลงมาเป็นข้อมูลทางด้านโปรแกรม Excel

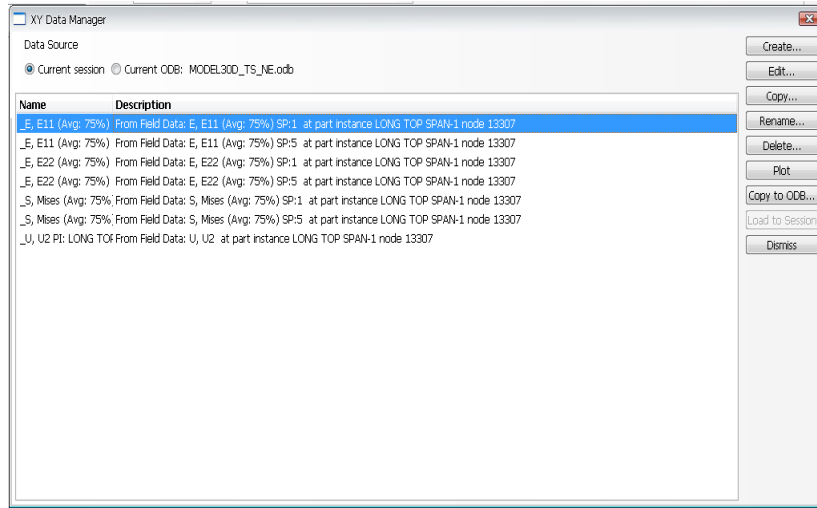


รูปที่ 3.155 ไปเปิดใน Excel โดยกดปุ่ม File converter เพื่อแปลงข้อมูลเป็น File Excel

3.9.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการเสียรูปของตัวอย่างคานเหล็กกริดยื่นด้วย Finite Element Analysis (FEA) จะแสดงผลเป็นกราฟโดยใช้โปรแกรมทางด้าน Finite Element Analysis

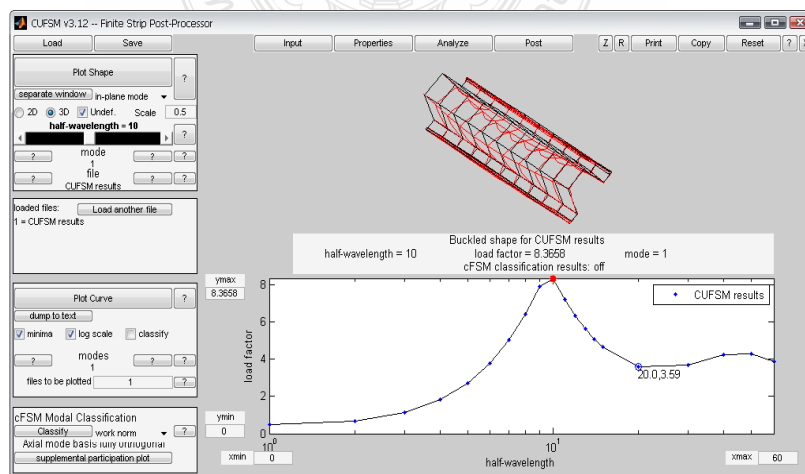


รูปที่ 3.156 ค่า Stress ค่า Strain และค่า Displacement แสดงเป็นกราฟ



รูปที่ 3.157 การสั่งพิมพ์ข้อมูลเป็น File Excel เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ (Edit X Y Data)

3.9.4 การวิเคราะห์ข้อมูลการโก่งเดาะโดยใช้โปรแกรม CUFSM จะได้ค่า Stress และ Moment ที่ทำให้คานเหล็กครีดยื่นถึงจุดครากครั้งแรก และค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสถานะ เป็นจำนวนที่เท่าที่แรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะของ M_y นำค่าที่ได้ไปใช้ในชุดสมการวิธีกำลังรับแรงโดยตรง โดยค่าการรับกำลังดัดที่ได้ในแต่ละสถานะการใช้งานจำกัด ได้แก่ การโก่งเดาะเฉพาะที่ การโก่งเดาะแบบผิวดรูป และการโก่งเดาะแบบรวม เป็นค่าโมเมนต์ที่เลือกใช้ในการออกแบบ $M_n \geq \text{Min}((M_{nc}, M_{ni}, M_{nd}))$ เมื่อคำนวณกับค่า Factor สำหรับการออกแบบแล้วได้ค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานที่ไม่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเกินสถานะการใช้งานจำกัดในการออกแบบ



รูปที่ 3.158 ค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสถานะ

	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	Date:	July 19th 2006				Name:	BWS		
2	Beam strength calculations using the Direct Strength Method of Appendix 1								
3	Given:	Notes: XXXXZXXX	Example DSM Beam Calculation (job1.mat)						
4									
5		$M_y =$	2.2449	kip-in					
6		$M_{crf}/M_y =$	1.3934		$M_{crf} =$	3.128044	kip-in	การโค้งตามแนวแกน (L)	
7		$M_{ord}/M_y =$	0.6979		$M_{ord} =$	1.566716	kip-in	การโค้งตามแนวตั้ง (D)	
8		$M_{cre}/M_y =$	0.27161		$M_{cre} =$	0.609737	kip-in	การโค้งตามแนวราบ (G)	
9									
10	Lateral-torsional buckling nominal flexural strength per DSM 1.2.2.1								
11		for $M_{cre} < 0.56M_y$							
12		$M_{nt} = M_{cre}$						(Eq. 1.2.2-1)	
13		for $2.78M_y > M_{cre} > 0.56M_y$							
14		$M_{nt} = \frac{10}{9} M_y \left(1 - \frac{10M_y}{36M_{cre}}\right)$						(Eq. 1.2.2-2)	
15		for $M_{cre} > 2.78M_y$							
16		$M_{nt} = M_y$						(Eq. 1.2.2-3)	
17									
18		$M_{nt} =$	0.610	kip-in					
19	Local buckling nominal flexural strength per DSM 1.2.2.2								
20		for $\lambda_e \leq 0.776$							
21		$M_{nt} = M_{nt}$						(Eq. 1.2.2-5)	
22		for $\lambda_e > 0.776$							
23		$M_{nt} = \left(1 - 0.15 \left(\frac{M_{crf}}{M_{nt}}\right)^{0.4}\right) \left(\frac{M_{crf}}{M_{nt}}\right)^{0.4} M_{nt}$						(Eq. 1.2.2-6)	
24		where $\lambda_e = \sqrt{M_{nt}/M_{crf}}$						(Eq. 1.2.2-7)	
25		$\lambda_e =$	0.44					(local-global slenderness)	
26		$M_{nt} =$	0.6	kip-in				(fully effective section for local buckling)	
27									

รูปที่ 3.159 การคำนวณค่าการรับกำลังดัดที่ได้อันแต่ละสภาวะการใช้งานจำกัดโดย Spreadsheets

20	Local buckling nominal flexural strength per DSM 1.2.2.2							
21		for $\lambda_e \leq 0.776$						
22		$M_{nt} = M_{nt}$						(Eq. 1.2.2-5)
23		for $\lambda_e > 0.776$						
24		$M_{nt} = \left(1 - 0.15 \left(\frac{M_{crf}}{M_{nt}}\right)^{0.4}\right) \left(\frac{M_{crf}}{M_{nt}}\right)^{0.4} M_{nt}$						(Eq. 1.2.2-6)
25		where $\lambda_e = \sqrt{M_{nt}/M_{crf}}$						(Eq. 1.2.2-7)
26		$\lambda_e =$	0.44					(local-global slenderness)
27		$M_{nt} =$	0.6	kip-in				(fully effective section for local buckling)
28	Distortional buckling nominal flexural strength per DSM 1.2.2.3							
29		for $\lambda_d \leq 0.673$						
30		$M_{nd} = M_y$						(Eq. 1.2.2-8)
31		for $\lambda_d > 0.673$						
32		$M_{nd} = \left(1 - 0.22 \left(\frac{M_{ord}}{M_y}\right)^{0.5}\right) \left(\frac{M_{ord}}{M_y}\right)^{0.5} M_y$						(Eq. 1.2.2-9)
33		where $\lambda_d = \sqrt{M_y/M_{ord}}$						(Eq. 1.2.2-10)
34		$\lambda_d =$	1.20					(distortional slenderness)
35		$M_{nd} =$	1.5	kip-in				(distortional reduction)
36	Nominal flexural strength of the beam per DSM 1.2.2							
37		$M_n =$	0.61	kip-in				(global controls)
38								
39	Does this section meet the prequalified limits of DSM Section 1.1.1.2? (Y/N) Y							
40		$\phi =$	0.9					design strength $\phi M_n =$ 0.55 kip-in
41		$\Omega =$	1.67					allowable design strength $M_n/\Omega =$ 0.37 kip-in
42								

รูปที่ 3.160 การคำนวณค่าการรับกำลังดัดที่ได้อันแต่ละสภาวะการใช้งานจำกัดโดย Spreadsheets

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 คำนำ

ในอนาคตโครงสร้างที่ใช้จากเหล็กกรรมพันธ์ขึ้นรูปเย็นจะถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างในประเทศไทยอย่างกว้างขวางมากขึ้น แต่การออกแบบยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของผู้ออกแบบทุกๆ ไป ประกอบกับการคำนวณเพื่อหาค่ารับน้ำหนักของเหล็กชนิดนี้ มีขั้นตอนการทำที่ยุ่งยากเมื่อต้องคำนวณด้วยมือ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และ Finite Strip Method ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่ได้กับตัวอย่างทดสอบจริง เปรียบเทียบความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้ ซึ่งมีการสรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

4.2 ผลการวิเคราะห์ทดสอบแรงดึง

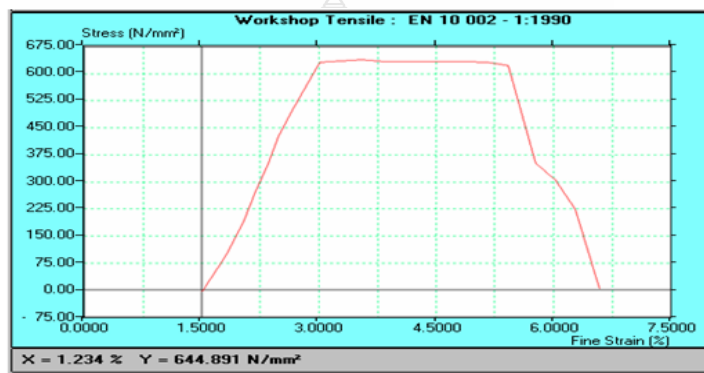
ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงจะถูกแสดงออกมาในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบ และสามารถนำผลที่ได้มาหาค่าความเค้นและความเครียดดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาค่าสมบัติทางกลต่างๆ ของชิ้นส่วนที่ทดสอบ ค่าสมบัติทางกลเหล่านี้ ได้แก่ ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) (E), ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) (ν), ค่า Minimum Yield Stress (f_y), ค่า Minimum Tensile Strength (f_u), ค่า Shear Modulus (G), ค่าความเหนียวของแผ่นโลหะ (Ductility of Sheet Metal) เป็นต้น ตามรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การทดสอบดึงชิ้นส่วนตัวอย่างด้วยเครื่องดึงเหล็ก ยี่ห้อ DARTEC



รูปที่ 4.2 แสดง Load กับการยืดตัว



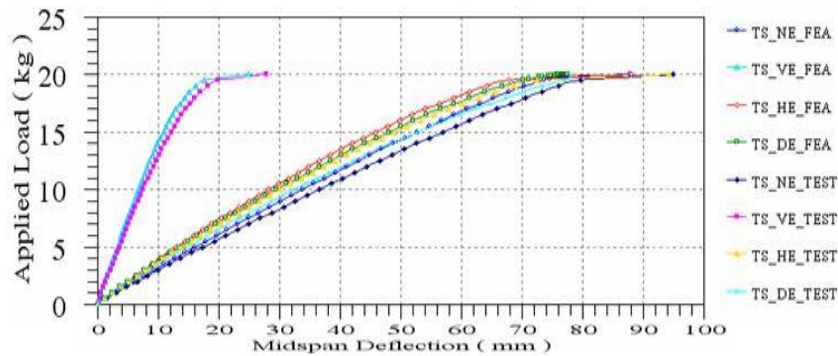
รูปที่ 4.3 แสดง Stress กับ Strain

ตารางที่ 4.1 ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ration) และค่าต่างๆสำหรับการใช้ในการสร้างแบบจำลองโมเดลการทดสอบ ที่กำหนดในการออกแบบ

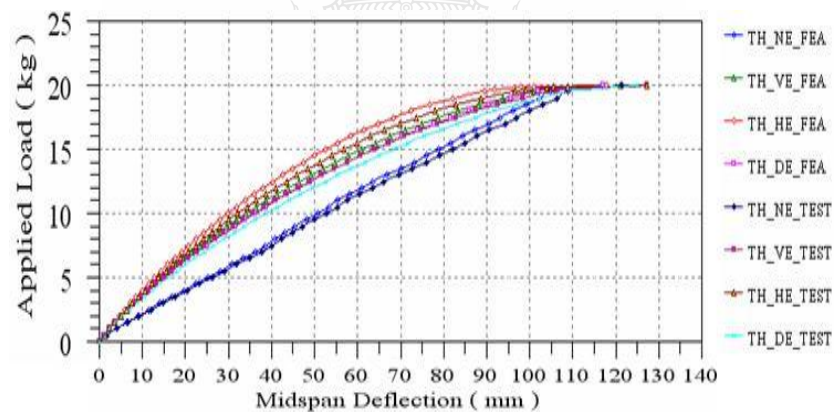
Specimen	Symbol	Minimum Yield Stress f_y (MPa)	Minimum Tensile Strength f_u (MPa)	Modulus of elasticity E (GPa)	Shear Modulus G (GPa)	Poisson's ration ν
Purlin TS4048 Top Span						
ตัวอย่างขรมคานที่ไม่ทำการบีบขึ้นลอนด้านข้าง	TS_NE	550	550	203	78	0.3
ตัวอย่างการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง	TS_VE	550	550	203	78	0.3
ตัวอย่างการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน	TS_HE	550	550	203	78	0.3
ตัวอย่างการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง	TS_DE	550	550	203	78	0.3
Purlin Top Hats				203	78	0.3
ตัวอย่างขรมคานที่ไม่ทำการบีบขึ้นลอนด้านข้าง	TH_NE	550	550	203	78	0.3
ตัวอย่างการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง	TH_VE	550	550	203	78	0.3
ตัวอย่างการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน	TH_HE	550	550	203	78	0.3
ตัวอย่างการบีบขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง	TH_DE	550	550	203	78	0.3

4.3 ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยื่น

ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) และการทดสอบการรับแรงกดตัดจริงในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างคานทดสอบหน้าตัด Top Span และ Top Hats ตามรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยื่นแบบหน้าตัด
รูป TOP SPAN

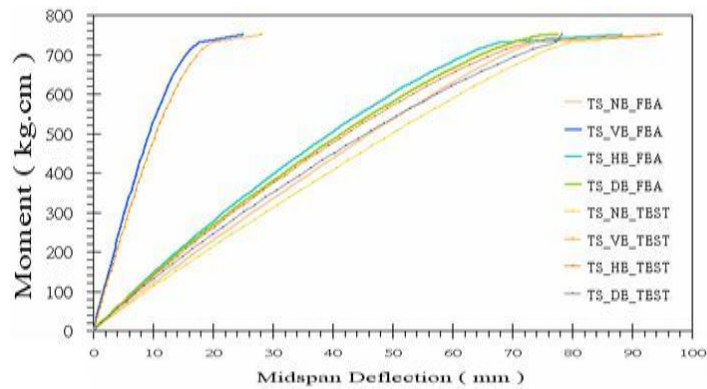


รูปที่ 4.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยื่นแบบหน้าตัด
รูป TOP HATS

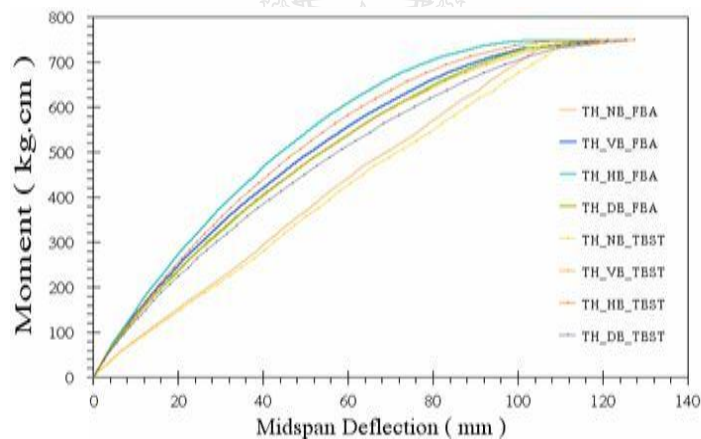
รูปที่ 4.4 แสดงว่าการป้มนั้นลอนแนวตั้งบนคานเหล็กกรีดยื่นสำหรับหน้าตัดแบบ Top Span จะรับแรงกดตัดได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการป้มนั้นลอนแนวนอน และรูปที่ 4.5 กราฟแสดงว่าการป้มนั้นลอนแนวนอนบนคานเหล็กกรีดยื่นสำหรับหน้าตัดแบบ Top Hats จะรับแรงกดตัดได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการป้มนั้นลอนแนวตั้ง การป้มนั้นลอนแนวเฉียงเอียง คานเหล็กกรีดยื่นที่ไม่มีมีการป้มนั้นลอนด้านข้าง ตามลำดับจากมากไปหาน้อย

4.4 ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืน

ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) และการทดสอบการรับแรงดัดจริงในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างคานทดสอบ Top Span และ Top Hats ตามรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ผลความสัมพันธ์ระหว่าง โมเมนต์ดัดและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืนแบบหน้าตัด
รุ่น TOP SPAN



รูปที่ 4.7 ผลความสัมพันธ์ระหว่าง โมเมนต์ดัดและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืนแบบหน้าตัด
รุ่น TOP HATS

รูปที่ 4.6 แสดงว่าการป้มนั้นลอนแนวตั้งบนคานเหล็กกรีดยั่งยืนสำหรับหน้าตัดแบบ Top Span จะรับแรงของโมเมนต์ดัดได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการป้มนั้นลอนแนวอน และรูปที่ 4.7 กราฟแสดงว่าการป้มนั้นลอนแนวอนบนคานเหล็กกรีดยั่งยืนสำหรับหน้าตัดแบบ Top Hats จะรับแรงของโมเมนต์ดัดได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการป้มนั้นลอนแนวตั้ง การป้มนั้นลอนแนวเฉียง คานเหล็กกรีดยั่งยืนที่ไม่มีการป้มนั้นลอนด้านข้าง ตามลำดับการรับโมเมนต์ดัดจากมากไปหาน้อย

4.5 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดสอบจริงของคาน ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของตัวอย่างคานเหล็กกริดเย็น โดยวัดที่ค่าการโก่งตัวในช่วงใช้งาน

Specimen	Symbol	Maximum Load		Percent Diff.
		Simulation FEA (kg)	Flexure Test (kg)	%
Purlin TS4048 Top Span				
ที่ไม่มีป้มน้ขึ้นลอนด้านข้าง	TS_NE	8.50	7.90	(+7.6)
ป้มน้ขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง	TS_VE	19.50	18.50	(+5.4)
ป้มน้ขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน	TS_HE	9.50	9.00	(+5.6)
ป้มน้ขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง	TS_DE	9.00	8.5	(+5.9)
Purlin Top Hats				
ที่ไม่มีป้มน้ขึ้นลอนด้านข้าง	TH_NE	5.50	5.00	(+10.0)
ป้มน้ขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง	TH_VE	7.00	6.50	(+7.7)
ป้มน้ขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน	TH_HE	8.00	7.50	(+6.7)
ป้มน้ขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง	TH_DE	6.00	5.50	(+9.1)

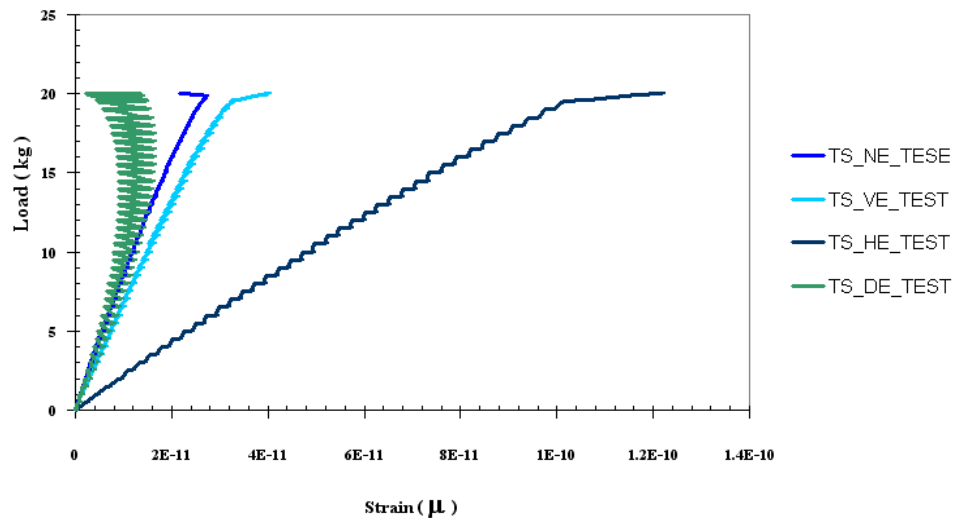
ค่าการโก่งตัวในช่วงใช้งานเท่ากับ 2.840 มม., 17.64 มม., 26.50 มม., 27.99 มม., 21.40 มม., 22.50 มม., 18.77 มม. สำหรับทิศทางทดสอบแนวตั้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 พบว่าการทดสอบจริงมีค่าการแอ่นตัวมากกว่าค่าการแอ่นตัวที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเมื่อค่าการโก่งตัวที่เท่ากันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าการทดสอบจริง ความแตกต่างเหล่านี้อธิบายได้ว่า วัสดุจริงจะมีความสามารถในการยืดหยุ่น คุณสมบัติความเหนียว (Ductility) [71] ลดลงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เนื่องจากวัสดุจริงมีหน้าตัดที่ไม่คงที่ การป้มน้ขึ้นลอนลึกไปทำให้ตัวขึ้นทดสอบถึงจุดครากก่อน การป้มน้ขึ้นลอนตื้นไปไม่ได้ช่วยเสริมความแข็งแรงของคานที่ทดสอบ อันเนื่องมาจากการควบคุมคุณภาพ อย่างไรก็ตามความแตกต่างเหล่านี้ถือว่ามีค่าน้อยและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

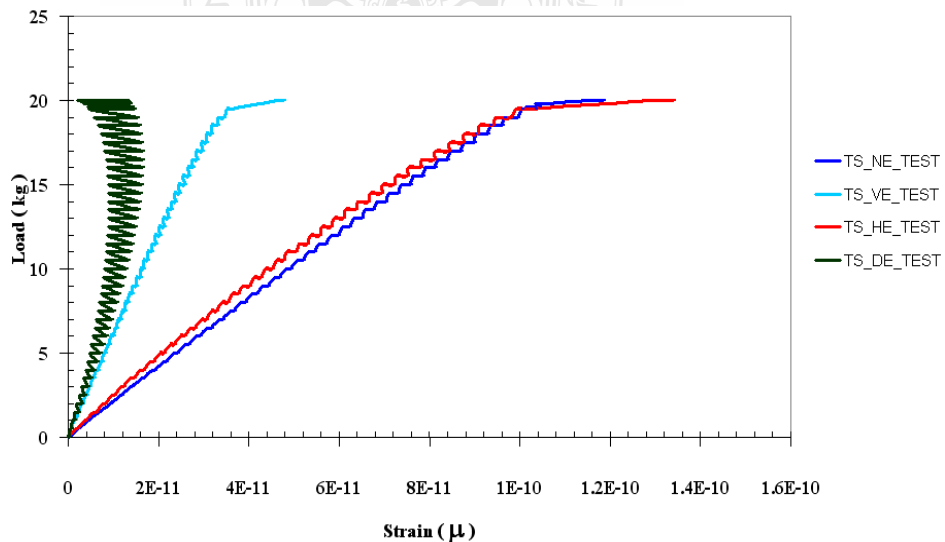
4.6 ผลการวิเคราะห์วัฏระยะการยืดตัวเมื่อรับแรงกดตัดของคานเหล็กกรีดยั่งยืนโดยใช้

Strain Gauges

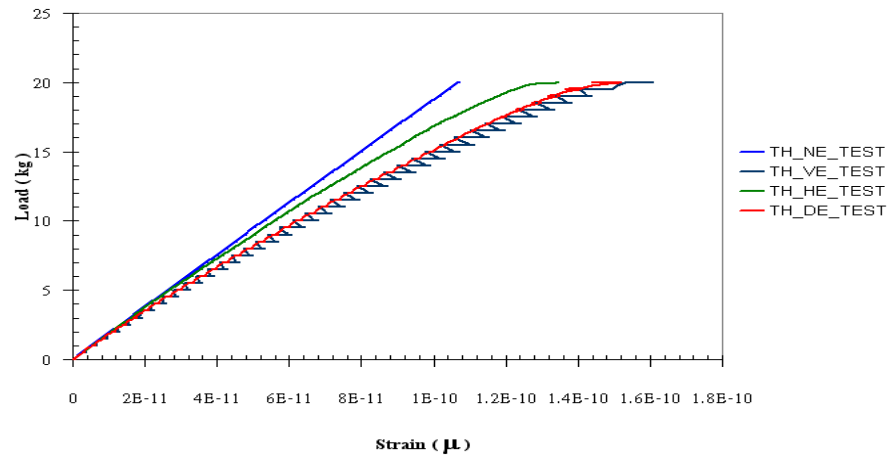
การวิเคราะห์วัฏระยะการยืดตัวเมื่อรับแรงกดตัดของคานเหล็กกรีดยั่งยืนโดยใช้ Strain Gauges ที่ติดตั้งในตำแหน่ง บนคาน ล่างคาน ณ บริเวณกึ่งกลางคานเพื่อดูผลการเสียรูปของคานที่มีการป้มนขึ้น ลอนข้างคานเหล็กกรีดยั่งยืนรูปแบบต่างๆที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัด ดังต่อไปนี้ สำหรับคานเหล็กกรีดยั่งยืนที่ติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา ตามรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10 และ 4.11



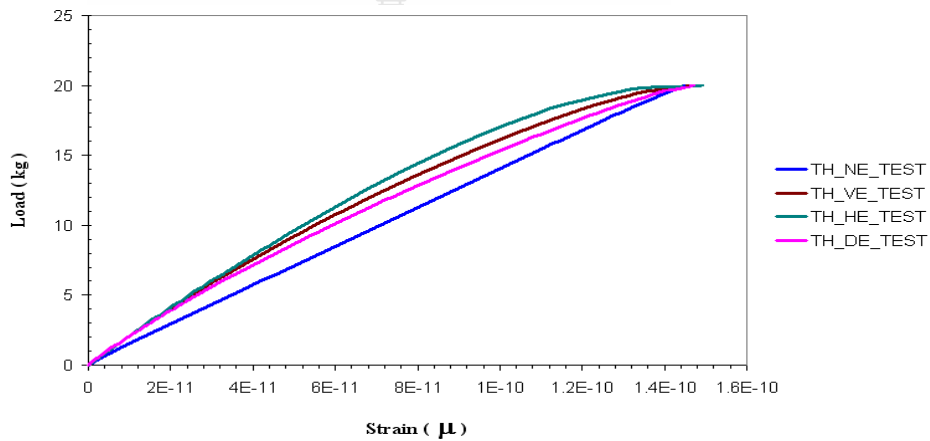
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด ที่ส่วนบนหลังคาน TOP SPAN



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด ที่ส่วนปีกกลางคาน TOP SPAN



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด ที่ส่วนบนหลังคาน TOP HATS



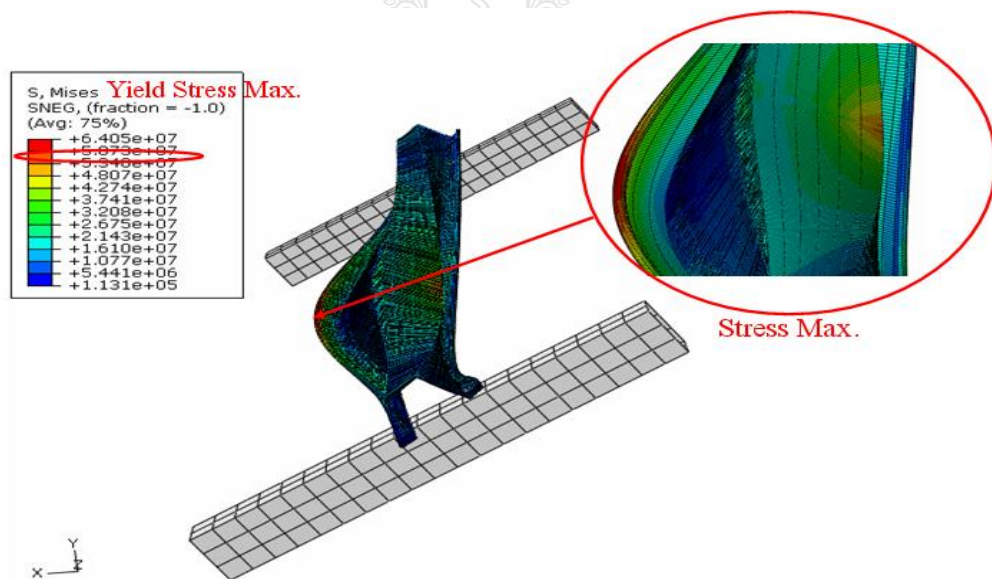
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด ที่ส่วนปีกกลางคาน TOP HATS

การวิเคราะห์วัฏระยะการยึดตัวเมื่อรับแรงกดคัตของคานเหล็กรีดเย็นที่มีการป้มนขึ้นลอนด้านข้างคานรูปแบบต่างๆ รูปที่ 4.8 คานหน้าตัด TOP SPAN ที่บริเวณส่วนบนหลังหน้าตัดคาน หน้าตัดคานจะมีการรับหน่วยแรงอัดเข้า โดยที่รูปแบบการขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงที่ข้างคานจะรับหน่วยแรงอัดเข้าได้ดีและมีการเสียรูปที่เกิดการยึดตัวของหน้าตัดคานน้อยกว่าหน้าตัดคานที่มีการป้มนขึ้นลอนรูปแบบอื่นๆ ส่วนรูปที่ 4.9 คานหน้าตัด TOP SPAN ที่บริเวณปีกกลางหน้าตัดคาน หน้าตัดคานจะมีการรับหน่วยแรงดึงออก โดยที่รูปแบบการขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียงที่ข้างคานจะรับหน่วยแรงดึงออกได้ดีและมีการเสียรูปที่เกิดการยึดตัวของหน้าตัดคานน้อยกว่าหน้าตัดคานที่มีการป้มนขึ้นลอนรูปแบบอื่นๆ

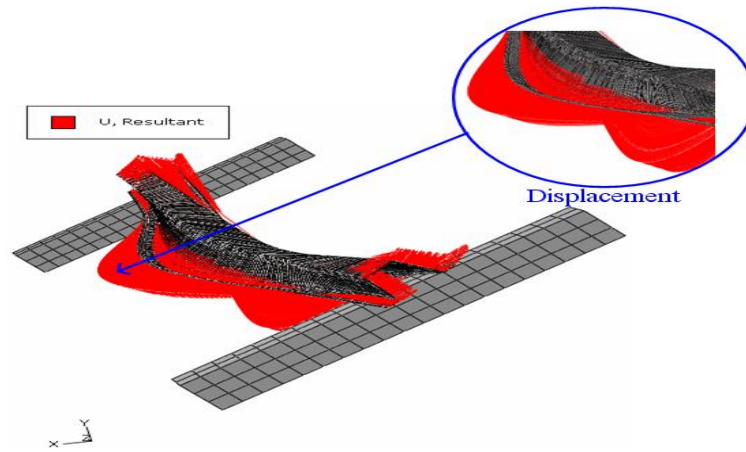
รูปที่ 4.10 คานหน้าตัด TOP HATS ที่บริเวณส่วนบนหลังหน้าตัดคาน หน้าตัดคานจะมีการรับหน่วยแรงอัดเข้า โดยคานที่ไม่มีการขึ้นลอนด้านข้างจะรับหน่วยแรงอัดเข้าได้ดีและมีการเสียรูปที่เกิด

การยึดตัวของหน้าตัดคานน้อยกว่าหน้าตัดคานที่มีการปมขึ้นลอนรูปแบบอื่นๆ ส่วนรูปที่ 4.11 คานหน้าตัด TOP HATS ที่บริเวณปีกล่างหน้าตัดคาน หน้าตัดคานจะมีการรับหน่วยแรงดึงออก โดยที่รูปแบบการขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งที่ข้างคานจะรับหน่วยแรงดึงออกได้ดีและมีการเสียรูปที่เกิดการยึดตัวของหน้าตัดคานน้อยกว่าหน้าตัดคานที่มีการปมขึ้นลอนรูปแบบอื่นๆ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด แสดงว่าระยะการยึดตัวเมื่อรับแรงกดคัดของคานเหล็กกริดเย็นที่มีค่าน้อยนั้น คานที่ทดสอบเกิดการ Fail ก่อนกำหนด ส่วนคานที่มีค่าระยะการยึดตัวมากเมื่อรับแรงกดคัดเป็นคานมีความเหนียว (Ductility of Sheet Metal) คือ ความเหนียวของแผ่นโลหะเป็นพฤติกรรมที่แสดงความสามารถในการยึดตัวของวัสดุขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในของวัสดุแต่ละประเภท วัสดุที่มีความเหนียวสูงจะมีการยืดหยุ่นตัวสูง ทำให้ไม่เกิดการ Fail ก่อนคานตัวอื่นๆ ถึงแม้จะเป็นคานที่ทำมาจากวัสดุเดียวกันก็ตาม ทั้งนี้เนื่องมาจากผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนที่ข้างคาน ที่ทำให้กลสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป ทำให้คานเพิ่มความสามารถในรับแรงกดคัดได้มากขึ้น

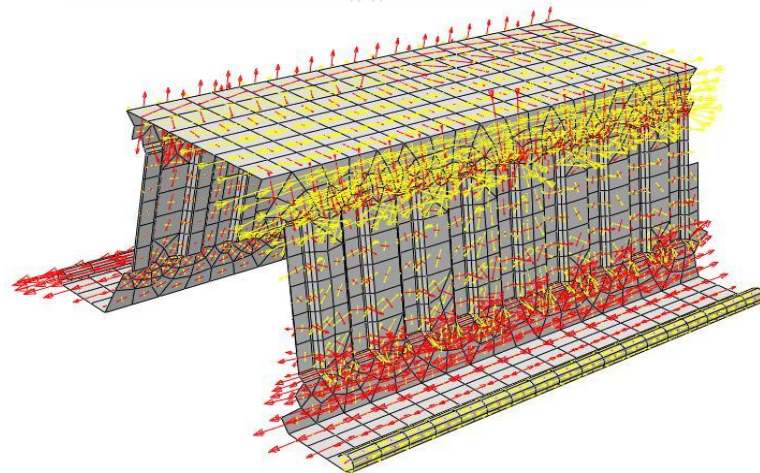
4.7 ผลการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของคานเหล็กกริดเย็นโดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามรูปที่ 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 และ 4.17



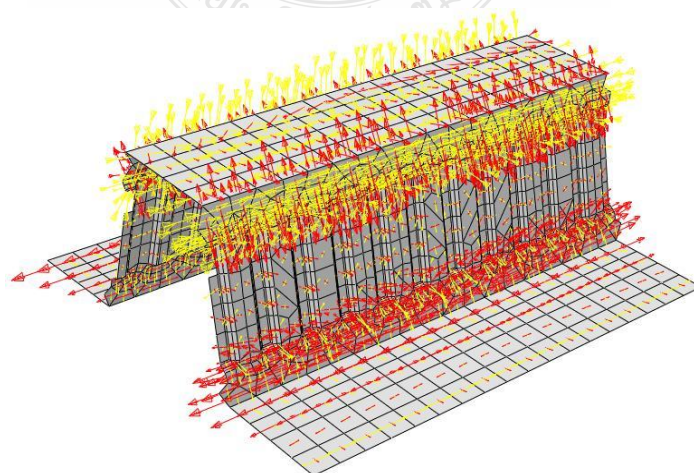
รูปที่ 4.12 Yield Stress Max. และ Stress Max.



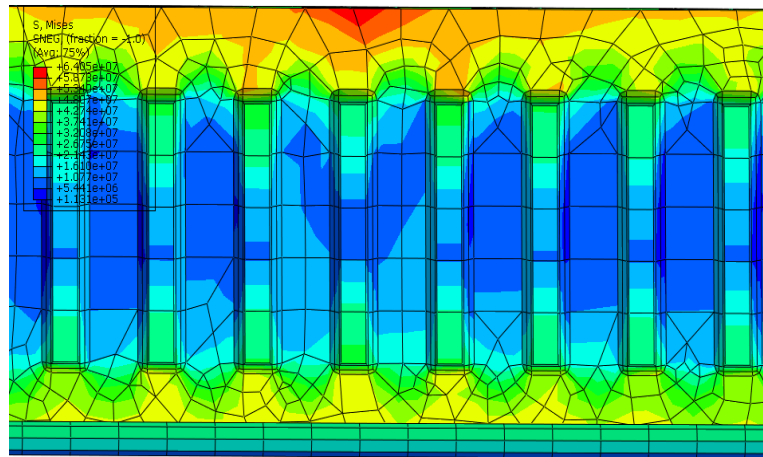
รูปที่ 4.13 ทิศทางการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกด



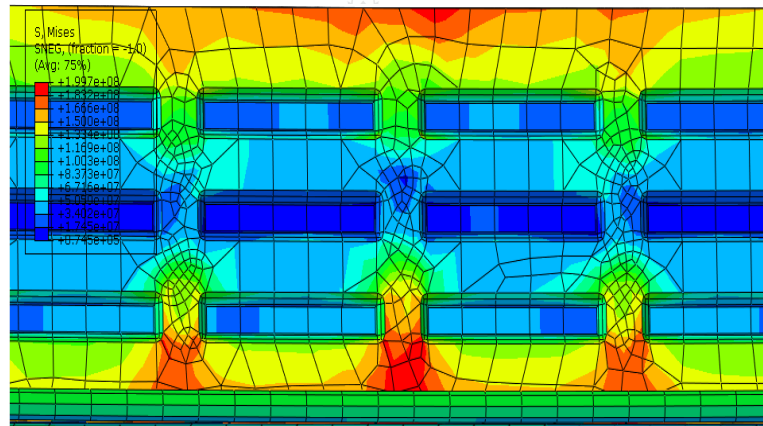
รูปที่ 4.14 ทิศทางของแรงดึง แรงอัด ในคาน Top Span โดยมากที่สุดแสดงเป็นสีแดง



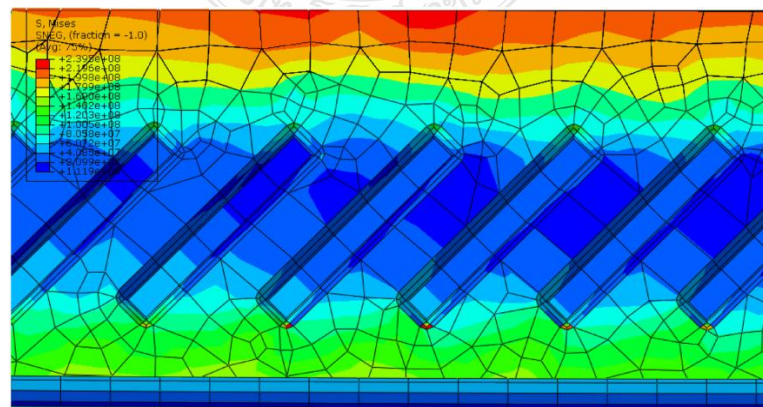
รูปที่ 4.15 ทิศทางของแรงดึง แรงอัด ในคาน Top Hats โดยมากที่สุดแสดงเป็นสีแดง



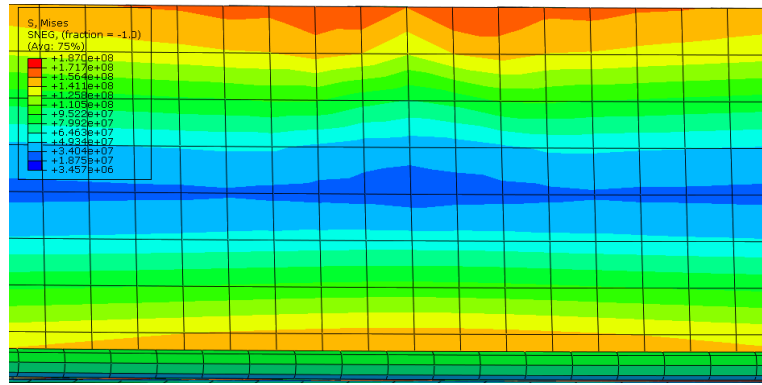
ก) Vertical Embossments



ข) Horizontal Embossments

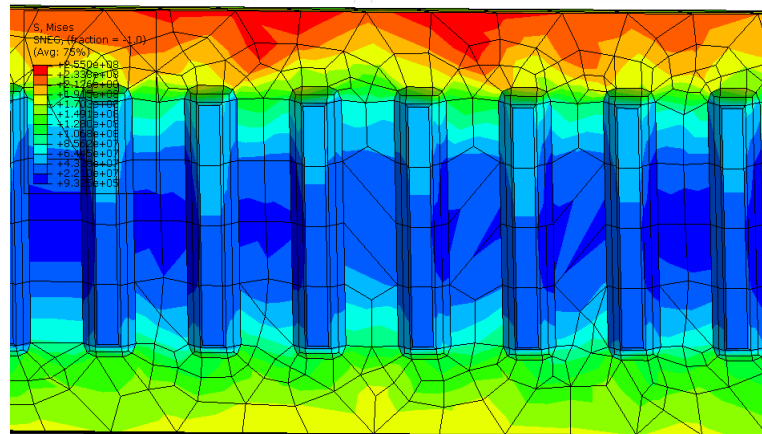


ค) Diagonal Embossments

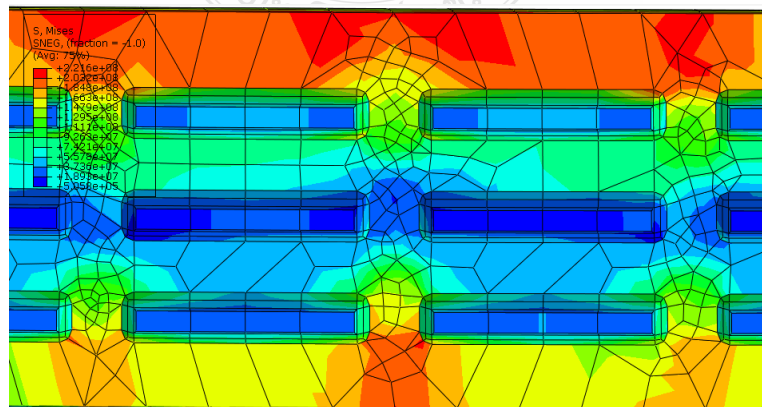


ง) Normal Beam

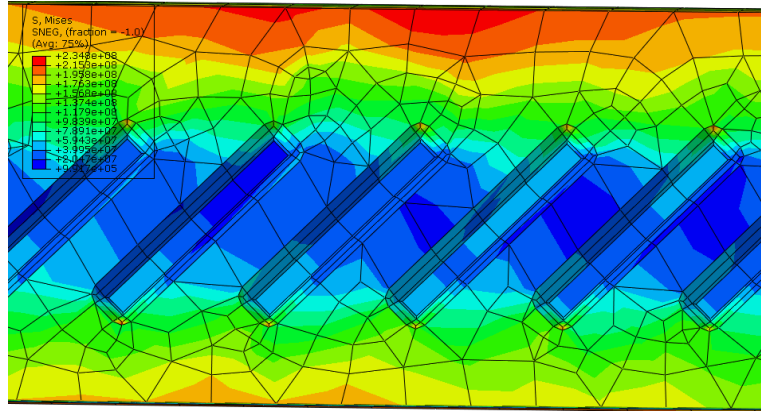
รูปที่ 4.16 ก ข ค ง แสดงการกระจาย Stress เมื่อรับแรงกดดัดของการขึ้นลอนแบบต่างๆ สำหรับคานเหล็กที่รีดเย็นหน้าตัด Top Span



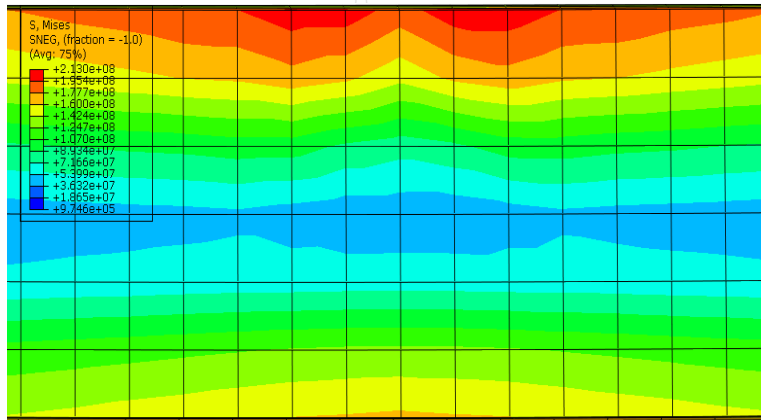
จ) Vertical Embossments



ฉ) Horizontal Embossments



ข) Diagonal Embossments



ค) Normal Beam

รูปที่ 4.17 จ ฉ ข ช แสดงการกระจาย Stress เมื่อรับแรงกดตัดของการขึ้นลอนแบบต่างๆ สำหรับคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hats

รูปที่ 4.12 แสดง Yield Stress Max. และ Stress Max. บริเวณที่มีการถ่ายแรงกดตัดกระทำแบบจุดโดยค่า $F_y = 5,500$ ksc. ซึ่งจะแสดงเป็นสีส้มถ้าการกระจายความเข้มหน่วยแรงเกินค่า F_y จะทำให้คานเหล็กกรีดเย็นตัวอย่างเกิดการเสียรูปอย่างถาวร ส่วนรูปที่ 4.13 แสดงทิศทางการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดจะแสดงการเสียรูปของคานที่ทดสอบว่ามีการเสียรูปเป็นแบบใดในสภาวะการใช้งานจำกัดทั้ง 3 แบบ รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงทิศทางของแรงดึง แรงอัด ในคาน โดยมิกำลังที่สุดแสดงเป็นสีแดง รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงการกระจาย Stress เมื่อรับแรงกดตัดของการขึ้นลอนรูปแบบต่างๆ โดยบริเวณที่รับแรงกดตัดมีค่ามากความเข้มของหน่วยแรงจะแสดงเป็นสีแดงเข้ม บริเวณมีความเข้มของหน่วยแรงน้อยจะแสดงเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งคานที่รับแรงกดตัดมากรูปแบบการขึ้นลอนจะมีผลช่วยเพิ่มความแกร่งในการต้านการรับแรงกดตัดมาก จะสังเกตเห็นความเข้มของหน่วยแรงบริเวณกลางคานมีสีน้ำเงินมาก เมื่อรับแรงกดตัดเท่ากัน

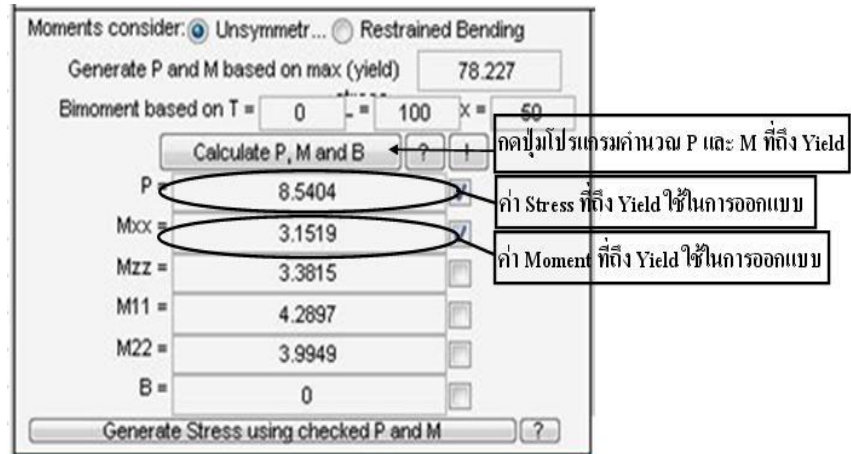
4.8 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของการป้มน้จ้ลอนรูปแบบต่างๆต่อการรับน้ำหนัก บรรทุก ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลเปรียบเทียบความแตกต่างของการป้มน้จ้ลอนรูปแบบต่างๆ ต่อการรับน้ำหนัก
บรรทุกของคานเหล็กรีดเย็น

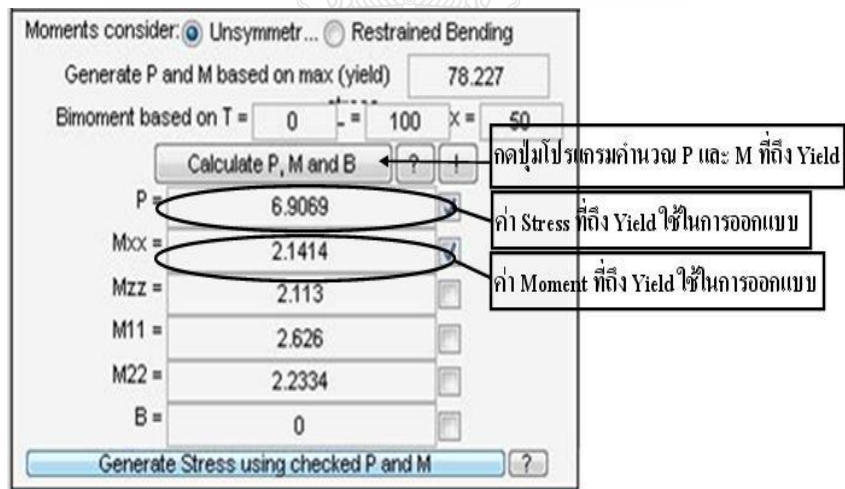
Specimen	Symbol	ผลเปรียบเทียบความแตกต่าง (เท่า)	
		FEA	Flexure Test
Purlin TS4048 Top Span			
ที่ไม่มีป้มน้จ้ลอน	TS_NE	1.00	1.00
ป้มน้จ้ลอนแนวตั้ง	TS_VE	2.29	2.34
ป้มน้จ้ลอนแนวนอน	TS_HE	1.12	1.14
ป้มน้จ้ลอนแนวเฉียงเอียง	TS_DE	1.06	1.08
Purlin Top Hats			
ที่ไม่มีป้มน้จ้ลอน	TH_NE	1.00	1.00
ป้มน้จ้ลอนแนวตั้ง	TH_VE	1.27	1.30
ป้มน้จ้ลอนแนวนอน	TH_HE	1.45	1.50
ป้มน้จ้ลอนแนวเฉียงเอียง	TH_DE	1.09	1.10

ตารางที่ 4.3 พบว่าความแตกต่างของการป้มน้จ้ลอนรูปแบบแนวตั้งมีผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด 2.29 ถึง 2.34 เท่าสำหรับคานหน้าตัด Top Span รองลงมาเป็นการป้มน้จ้ลอนแนวนอน ส่วนการป้มน้จ้ลอนรูปแบบแนวนอนมีผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด 1.45 ถึง 1.50 เท่าสำหรับคานหน้าตัด Top Hats รองลงมาเป็นการป้มน้จ้ลอนแนวตั้ง ซึ่งรูปแบบลอนมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงและการกระจายหน่วยแรงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกของคานเหล็กรีดเย็นไปยังจุดรองรับได้สมบูรณ์

4.9 ผลการวิเคราะห์การโก่งเดาะของคานาเหล็กรีดเย็นโดยใช้โปรแกรม CUFSM ตามรูปที่ 4.18 4.19 และ 4.20

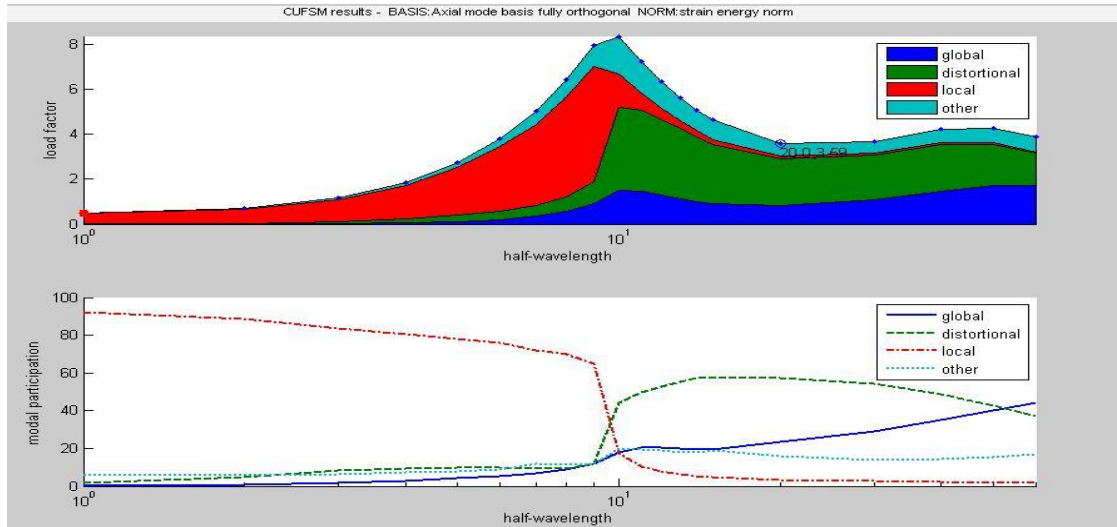


ก) ค่า P_y และ M_y ของ Top Span

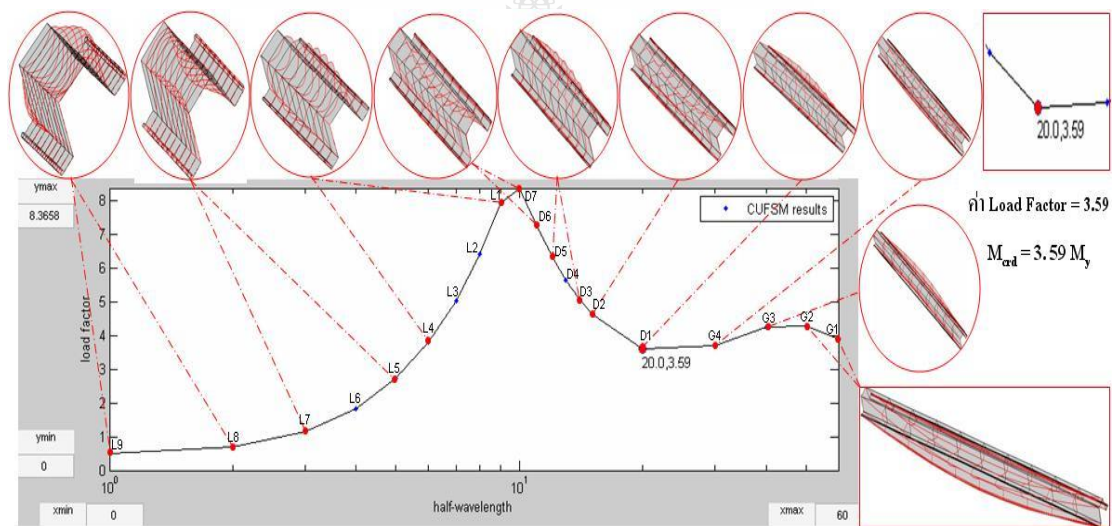


ข) ค่า P_y และ M_y ของ Top Hats

รูปที่ 4.18 ก ข แสดงโปรแกรมคำนวณค่า Stress และ Moment ที่ถึง Yield เพื่อใช้ออกแบบ สำหรับ แทนค่าในสมการวิธีกำลังรับแรงโดยตรง



รูปที่ 4.19 การ โกงเดาะร่วมและกราฟมาตรฐานพลังงานความเครียด



รูปที่ 4.20 การเสีรูปของคานในสภาวะการใช้งานจำกัด

รูปที่ 4.20 แสดงการเสีรูปของคานในสภาวะการใช้งานจำกัดและค่า Load Factor ของกราฟที่ การ โกงเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ เพื่อผลนที่ไปได้ไปคำนวณหาค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิด การ โกงเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่น (M_{crd}) จะได้ค่า $M_{crd} = 3.59 M_y$ L1 ถึง L9 แสดงการเสีรูปของคานที่ โกงเดาะแบบเฉพาะที่ D1 ถึง D7 แสดงการเสีรูปของคานที่ โกงเดาะแบบผิวดรูป G1 ถึง G4 แสดงการ เสีรูปของคานที่ โกงเดาะแบบรวม

4.10 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของคานเหล็กกรีดเย็นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM ของเหล็กที่ Grade Designation ต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 1.50 เมตร ติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 0 องศา ตามตารางที่ 4.4 ถึง 4.11

ตารางที่ 4.4 Load Factor สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงดัดโดยตรงที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจำลองคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด 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 4.5 Load Factor สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงดัดโดยตรงที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจำลองคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด 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

Load Factor คือ ตัวคูณนำหน้าบรรทัดของกราฟที่การโก่งเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ

Local Bucking คือ การโก่งเดาะเฉพาะที่

Distortional Bucking คือ การโก่งเดาะแบบผิดรูป

Global Bucking คือ การโก่งเดาะแบบรวม

hw หรือ half-wavelength คือ ครึ่งความยาวคลื่นของการโก่งเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ

My คือ ค่าโมเมนต์ดัดที่ถึงถึงจุดครากครั้งแรก (Yield Moment)

ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span

Grade Designation	M_{ne} (kip-in.)	M_{ne} (kip-in.)	M_{nd} (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 4.7 กำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Hats

Grade Designation	M_{ne} (kip-in.)	M_{ne} (kip-in.)	M_{nd} (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 4.8 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน

Grade Designation	M_{nd} (kg-cm.)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคาน(เท่า)			
		M_{nd}	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 4.9 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hats ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน

Grade Designation	M_{nd} (kg-cm.)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคาน(เท่า)			
		M_{nd}	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 4.8 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสำหรับการ โกงเดาะแบบผิวดรูป M_{nd} ของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Span ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การ โกงเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.46 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆมีค่าโมเมนต์การ โกงเดาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กกรีดเย็นจะมีค่าใกล้เคียงกัน และตารางที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสำหรับการ โกงเดาะแบบผิวดรูป M_{nd} ของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hats ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การ โกงเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.47 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆมีค่าโมเมนต์การ โกงเดาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กกรีดเย็นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่ากำลังรับแรงดัดสำหรับการ โกงเดาะที่เลือกใช้ในการออกแบบตามทฤษฎี $M_n \geq \text{Min}((M_{ne}, M_{ni}, M_{nd}))$ เมื่อคำนวณกับค่า Factor สำหรับการออกแบบแล้วได้ค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงที่ไม่ทำให้เกิดการ โกงเดาะเกินสภาวะการใช้งานจำกัดในการออกแบบ และเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน จึงทำให้กำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นที่เปรียบเทียบมีค่าที่พิจารณาไม่ต่างกัน เนื่องมาจากการเลือกใช้ค่าต่ำสุดเป็นค่าที่ยอมให้ในการออกแบบ

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบกำลังรับแรงค้ดโดยตรงของคานเหล็กกรีดยื่นหน้าค้ด Top Span ที่ออกแบบตามทฤษฎี

Grade Designation	Yield Stress (ksc)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงค้ดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี(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 4.11 เปรียบเทียบกำลังรับแรงค้ดโดยตรงของคานเหล็กกรีดยื่นหน้าค้ด Top Hats ที่ออกแบบตามทฤษฎี

Grade Designation	Yield Stress (ksc)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงค้ดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี(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 4.10 และตารางที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงค้ดโดยตรงของคานเหล็กกรีดยื่นที่ออกแบบตามทฤษฎี ASD, LRFD และLSD ของเหล็ก Grade Designation ปรากฏว่าการออกแบบโดยวิธี LRFD จะรับกำลังแรงค้ดโดยตรงได้มากที่สุดคือ 1.50 เท่า รองลงมาเป็นค่ารับกำลังแรงค้ดโดยตรงที่ออกแบบโดยวิธี LSD คือ 1.42 เท่า และค่ากำลังแรงค้ดโดยตรงน้อยที่สุด ที่ออกแบบโดยวิธี ASD คือ 1.00 เท่า ตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

4.11 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งค้ดของแบบจำลองคานเหล็กกรีดยื่นด้วยวิธี Finite Strip (FSM) กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ

ผลเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งค้ดของแบบจำลองคานเหล็กกรีดยื่นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการของคานเหล็กกรีดยื่นหน้าค้ด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation G550 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 0.90 เมตร ตามตารางที่ 4.12 และ 4.13

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span ด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง

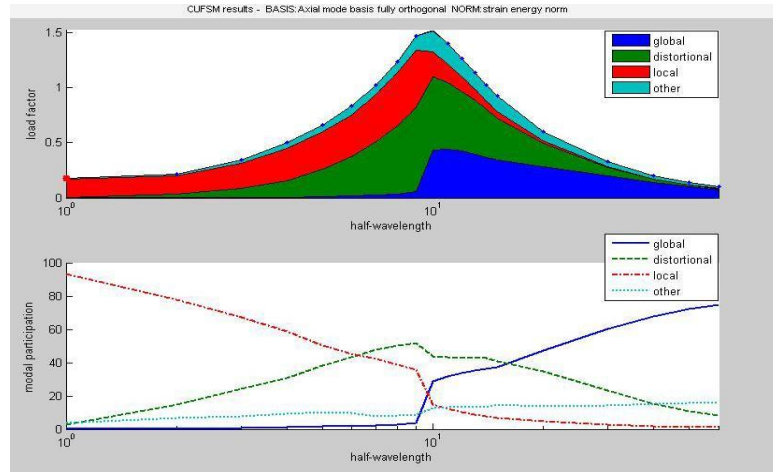
Grade Designation	Flexure Test (kg-cm.)	Finite Strip Method (FSM)		
		ASD (kg-cm.)	LRFD (kg-cm.)	LSD (kg-cm.)
G550	446.63	707.40	1,063.22	1,004.16
เปรียบเทียบการรับกำลังแรงดัด(เท่า)	1.00	1.58	2.38	2.25

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Hats ด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง

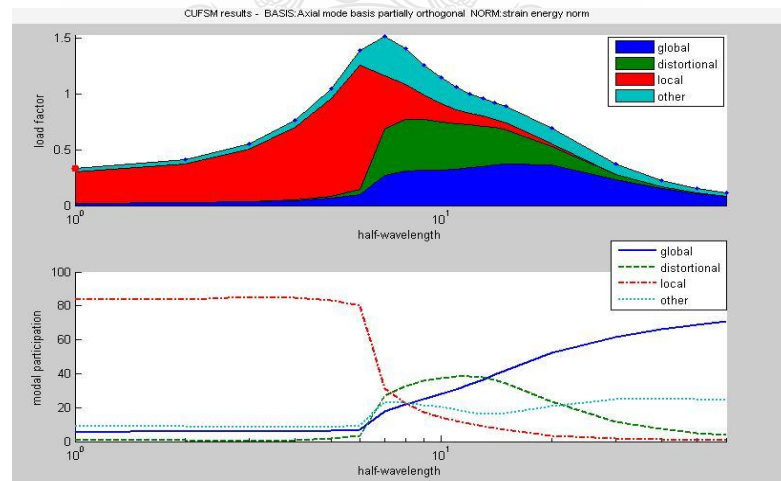
Grade Designation	Flexure Test (kg-cm.)	Finite Strip Method (FSM)		
		ASD (kg-cm.)	LRFD (kg-cm.)	LSD (kg-cm.)
G550	281.84	420.66	632.25	597.12
เปรียบเทียบการรับกำลังแรงดัด(เท่า)	1.00	1.49	2.24	2.12

ตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13 พบว่าการทดสอบจริงมีค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกริดยื่นหน้าตัด Top Span และหน้าตัด Top Hats ที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip และเมื่อเหล็ก Grade Designation ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุเท่ากันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip ให้ค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงในการออกแบบที่มากกว่าการทดสอบจริง ความแตกต่างเหล่านี้้อธิบายได้ว่า วัสดุจริงจะมีความสามารถในการยืดหยุ่น คุณสมบัติความเหนียว (Ductility) [3] ลดลงเมื่อนำหน้าคานบรรทุกเท่ากัน ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าเนื่องมาจากวัสดุจริงที่ทดสอบถึงจุดครากก่อน ในการออกแบบการประยุกต์ใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ด้วยการวิเคราะห์วิธี Finite Strip สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กกริดยื่นควรมีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลตัวอย่างทดสอบจริง เพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้

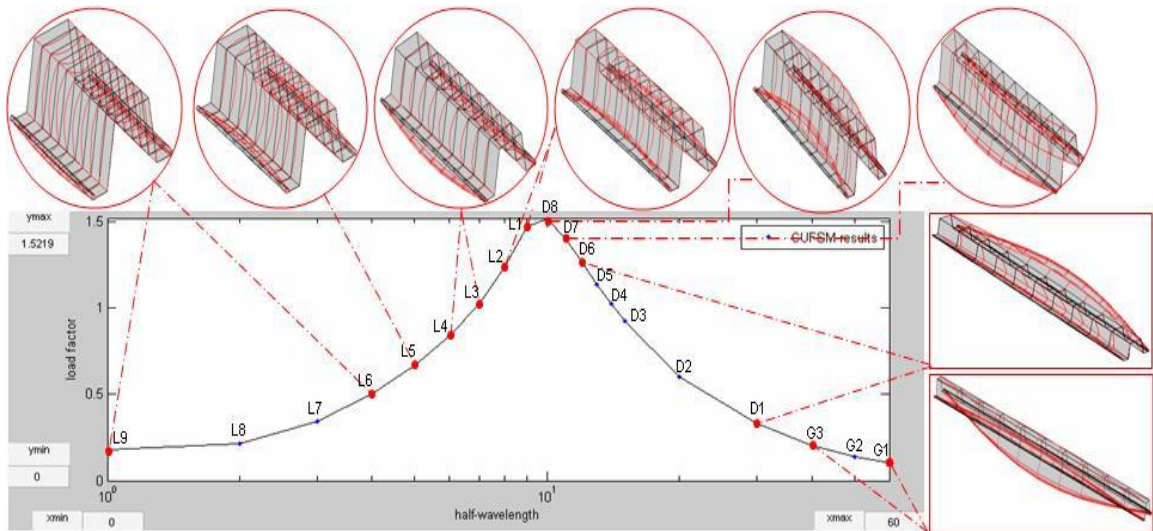
4.12 กราฟการโค้งเดาะร่วม กราฟมาตรฐานพลังงานความเครียด และการตรวจสอบการเสถียรภาพในสถานะการใช้งานจำกัด (key limit state) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโค้งเดาะแบบรวม การโค้งเดาะแบบผิดปกติ และการโค้งเดาะเฉพาะที่ ตามรูปที่ 4.21 ถึง 4.24



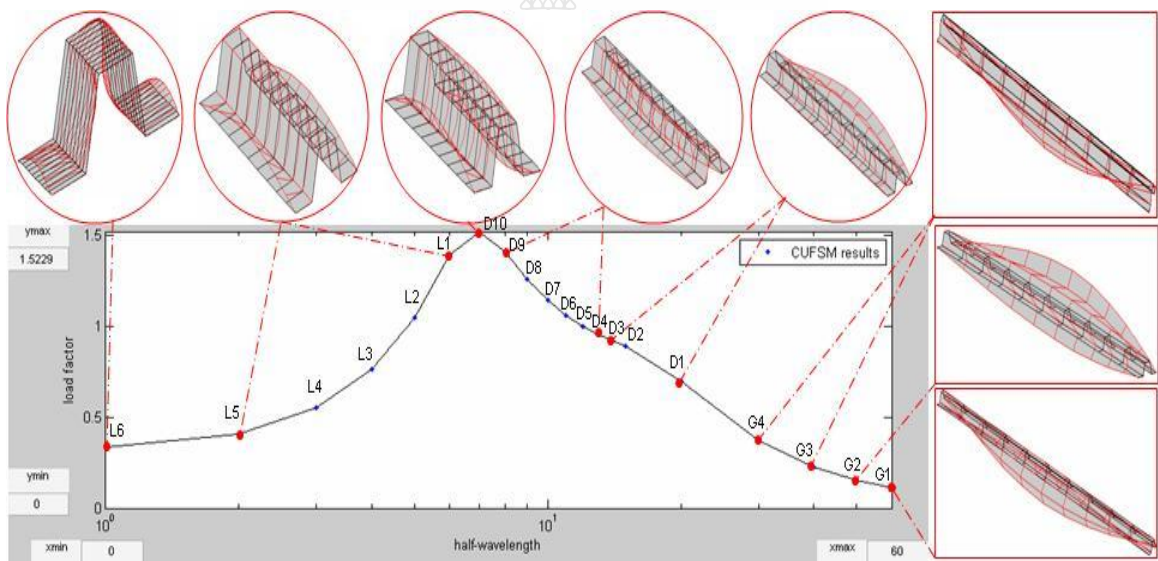
รูปที่ 4.21 การโค้งเดาะร่วมและมาตรฐานพลังงานความเครียดของแบบจำลองคานเหล็กกริดเย็นหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550



รูปที่ 4.22 การโค้งเดาะร่วมและมาตรฐานพลังงานความเครียดของแบบจำลองคานเหล็กกริดเย็นหน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550



รูปที่ 4.23 การ โกงเดาะของคานเหล็กกริดยื่นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550

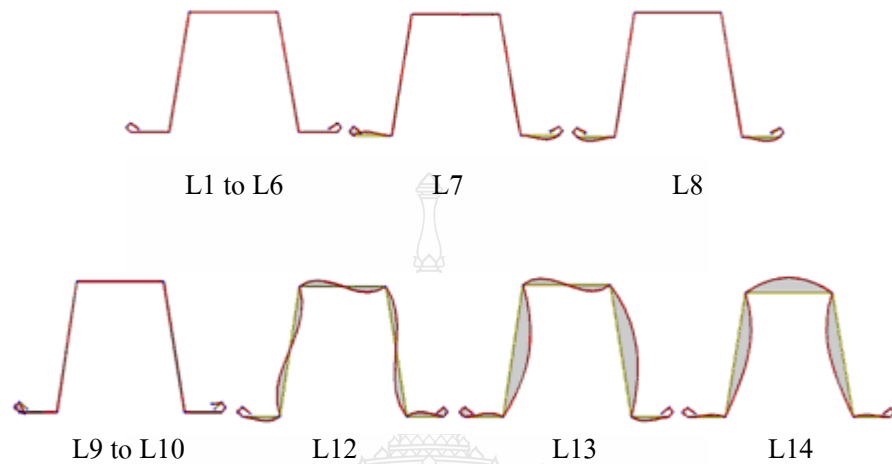


รูปที่ 4.24 การ โกงเดาะของคานเหล็กกริดยื่นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550

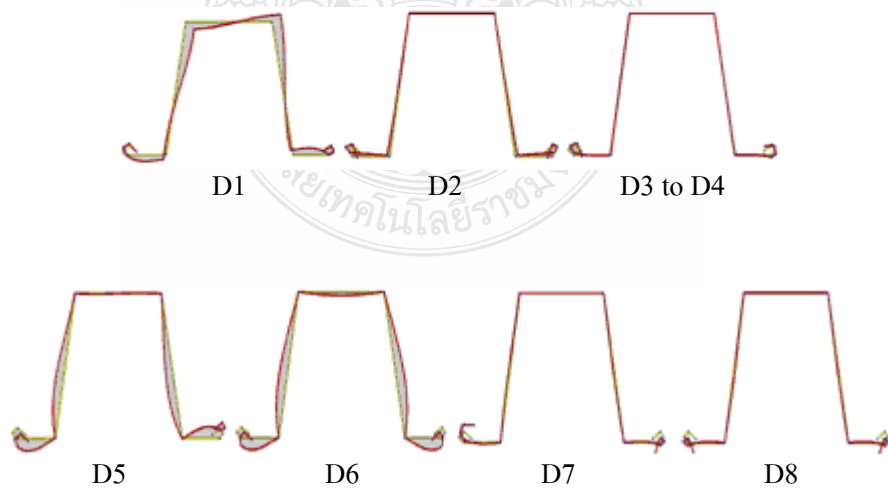
รูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 แสดงการเสีรูปร่างของคานในสภาวะการใช้งานจำกัดและค่า Load Factor ของกราฟที่การ โกงเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ เพื่อผลนาคที่ได้ไปคำนวณหาค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการ โกงเดาะแต่ละสภาวะ L1 ถึง L9 แสดงการเสีรูปร่างของคานที่ โกงเดาะแบบ เฉพาะที่ D1 ถึง D10 แสดงการเสีรูปร่างของคานที่ โกงเดาะแบบผิรูปร่าง G1 ถึง G4 แสดงการเสีรูปร่างของ คานที่ โกงเดาะแบบรวม

4.13 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเสียรูปของหน้าตัดคานเหล็กกรีดเย็นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM

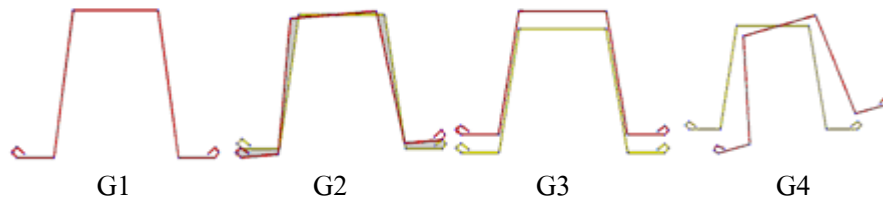
4.13.1 การเสียรูปของหน้าตัดคานเหล็กกรีดเย็นแบบ Top Span ที่ติดตั้งบนจตุรองรับเอียงทำมุม 0 องศา ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดคด ของเหล็ก Grade Designation G550 ตามรูปที่ 4.25 ถึง 4.27



รูปที่ 4.25 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดคดและเกิดการเสียรูปแบบโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Bucking) L1 ถึง L14

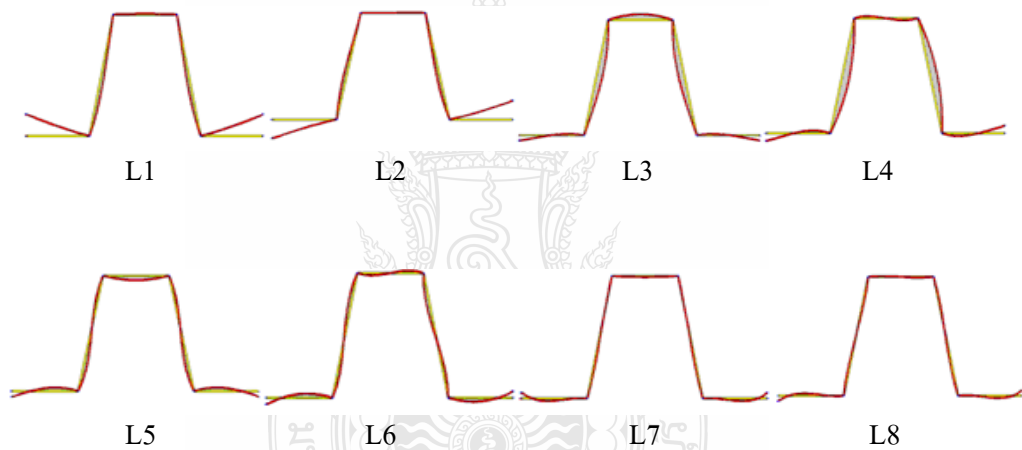


รูปที่ 4.26 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดคดและเกิดการเสียรูปแบบโก่งเดาะผิดรูป (Distortional Bucking) D1 ถึง D8

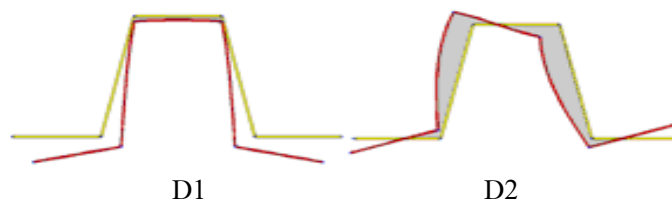


รูปที่ 4.27 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดค้ำและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะรวม (Global Bucking) G1 ถึง G4

4.13.2 การเสียรูปของหน้าตัดคานเหล็กกริดยื่นแบบ Top Hats ที่ติดตั้งบนจตุรองรับเอียงทำมุม 0 องศา ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดค้ำของเหล็ก Grade Designation G550 ตามรูปที่ 4.28 ถึง 4.30



รูปที่ 4.28 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดค้ำและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะเฉพาะที่ (Local Bucking) L1 ถึง L8

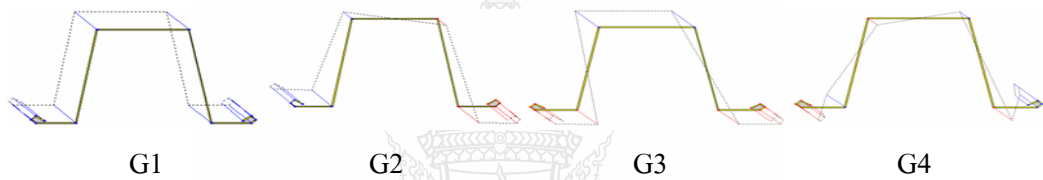


รูปที่ 4.29 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดค้ำและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะผิดรูป (Distortional Bucking) D1 ถึง D2

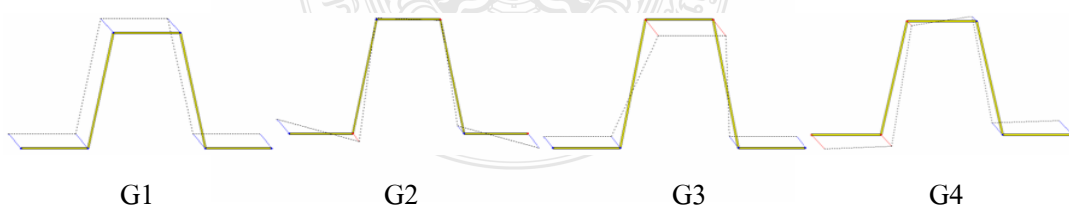


รูปที่ 4.30 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะรวม (Global Buckling) G1 ถึง G4

4.14 ผลการวิเคราะห์การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคานเหล็กกรีดเย็น ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM (ที่ติดตั้งบนจุดรองรับเอียงทำมุม 0 องศา) ตามรูป 4.31 และ 4.32



รูปที่ 4.31 การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะรวม G1 ถึง G4



รูปที่ 4.32 การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน Top Hats ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดตัดและเกิดการเสียรูปแบบ โกงเดาะรวม G1 ถึง G4

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลงานวิจัยผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการค้ำของคานเหล็กกรีดยี่นรูปทรงหมวก โดยใช้แบบจำลองคานหน้าตัด Hat Shape และมีการป้่มขึ้นลอนด้านข้าง 3 แบบ คือ ป้่มขึ้นลอนแนวตั้ง ป้่มขึ้นลอนแนวนอน และป้่มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง ความยาวคาน 1.70 เมตร ทำการค้ำตั้งบนจูดรองรับเอียงทำมุม 30 องศา และ ความยาวคาน 1.15 เมตร ทำการค้ำตั้งบนจูดรองรับเอียงทำมุม 0 องศา เฉพาะคานธรรมดาไม่มีการป้่มขึ้นลอน ที่มีแรงกระทำแบบจูดที่กึ่งกลางความยาวคาน จากการศึกษาของรูปแบบคานธรรมดาไม่มีการป้่มขึ้นลอนเปรียบเทียบกับรูปแบบคานที่มีการทำการป้่มขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) ที่ข้างคานเหล็กกรีดยี่น พฤติกรรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ และตรวจสอบการเสีຍรูปในสภาวะการใช้งานจำกัด (Key Limit State) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งคาะเฉพาะที่ การโก่งคาะแบบผิวดรูป และการโก่งคาะแบบรวม โดยใช้โปรแกรม CUFSM คำนวนหาค่ากำลังรับแรงแบบ “โดยตรง” ของเหล็กGrade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และG300 สรุปผลการวิจัยที่ได้ดังนี้

5.1.1 การป้่มขึ้นลอนแนวตั้งบนคานเหล็กกรีดยี่นสำหรับหน้าตัดแบบ Top Span จะรับแรงกดค้ำได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการป้่มขึ้นลอนแนวนอน และการป้่มขึ้นลอนแนวนอนบนคานเหล็กกรีดยี่นสำหรับหน้าตัดแบบ Top Hats จะรับแรงกดค้ำได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการป้่มขึ้นลอนแนวตั้ง การป้่มขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง คานเหล็กกรีดยี่นที่ไม่มีการป้่มขึ้นลอนด้านข้างตามลำดับจากการรับแรงกดค้ำมากไปหาน้อย

5.1.2 รูปแบบการขึ้นลอนต่อการเสริมกำลังรับน้ำหนักของคานที่เสริมความแกร่งจากมากไปหาน้อยตามลำดับ ได้แก่ การป้่มขึ้นลอนแนวตั้ง การป้่มขึ้นลอนแนวนอน และการป้่มขึ้นลอนแนวเฉียง สำหรับคานเหล็กกรีดยี่น (รูปทรงหมวก)

5.1.3 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำผลการวิเคราะห์ที่ได้เพื่อค้ำผลบริเวณที่มีการถ่ายแรงกดค้ำกระทำแบบจูด เกิดการกระจายความเข้มหน่วยแรงเกินค่า F_y ที่กำหนดหรือไม่ ถ้าเกินค่าที่กำหนดจะทำให้คานเหล็กกรีดยี่นเกิดการเสีຍรูปอย่างถาวร สามารถค้ำผลทิศทางการเคลื่อนตัวของการเสีຍรูปเมื่อรับแรงกดค้ำ และทิศทางของแรงดึง แรงอัด บริเวณที่มีการกระจาย Stress มากที่สุด

5.1.4 การวิเคราะห์การโก่งคาะโดยใช้โปรแกรม CUFSM จะได้ค่า Stress และ Moment ที่ทำให้คานเหล็กกรีดยี่นถึงจูดครากครั้งแรก และค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งคาะ ณ จูดวิกฤตแต่ละสภาวะ เป็นจำนวนที่เท่าที่แรงค้ำกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งคาะของ M_y นำค่าที่ได้ไปใช้ใน

ชุดสมการวิธีกำลังรับแรงโดยตรง โดยค่าการรับกำลังคัตที่ได้ในแต่ละสถานะการใช้งานจำกัด ได้แก่ การโก่งเดาะเฉพาะที่ การโก่งเดาะแบบผิวดรูป และการโก่งเดาะแบบรวม เป็นค่าโมเมนต์ที่เลือกใช้ในการออกแบบ $M_n \geq \text{Min}(M_{nc}, M_{nr}, M_{nd})$ เมื่อคำนวณกับค่า Factor สำหรับการออกแบบแล้วได้ค่ากำลังรับแรงคัตโดยตรงของคานที่ไม่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเกินสถานะการใช้งานจำกัดในการออกแบบ สามารถดูพลังงานความเครียดเนื่องจากคานที่เกิดแรงกคคคคคังได้

5.1.5 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการออกแบบกระบวนการขึ้นรูปขึ้นต้นสามารถใช้จำลองการทดสอบและวิเคราะห์การเสียรูปของวัสดุซึ่งมีสมบัติไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี และสามารถใช้ประโยชน์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างคานซึ่งมีหน้าตัดเดิมเหมือนการทดลองแต่รับน้ำหนักบรรทุกทุกและมีจุดรองรับเป็นรูปแบบอื่น โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้

5.1.6 การศึกษาการโก่งเดาะของคานเหล็กกรีดยึดในสถานะการใช้งานจำกัด พบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของคานเหล็กกรีดยึดด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กกรีดยึดหน้าตัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 1.15 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงคัตสำหรับการโก่งเดาะแบบผิวดรูป M_{nd} ของคานเหล็กกรีดยึดหน้าตัด Hat Shape ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.46 ถึง 1.47 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆมีค่าโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กกรีดยึดจะมีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของแบบจำลองคานเหล็กกรีดยึดด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ พบว่าการทดสอบจริงมีค่ากำลังรับแรงคัตโดยตรงของคานเหล็กกรีดยึดหน้าตัด Hat Shape ที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip ความแตกต่างเหล่านี้อธิบายได้ว่า วัสดุจริงจะมีความสามารถในการยืดหยุ่นมากกว่าและคุณสมบัติความเหนียว (Ductility) ลดลงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เนื่องมาจากวัสดุจริงที่ทดสอบถึงจุดครากก่อน

5.1.7 การประยุกต์ใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ด้วยการวิเคราะห์วิธี Finite Strip สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กกรีดยึดควรมีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลตัวอย่างทดสอบจริง เพื่อหาค่าผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้ สำหรับการทำนายหรือหาค่ากำลังรับแรงของชิ้นส่วน โดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการโก่งเดาะแบบยืดหยุ่น ขั้นตอนดังกล่าวนี้จะไม่จำเป็นต้องอาศัย การคำนวณค่าความกว้างประสิทธิผล หรือการคำนวณแบบซ้ำไปซ้ำมา แต่ทว่าใช้เพียงแค่ออกแบบและ พฤติกรรมการโก่งเดาะ แบบยืดหยุ่นของหน้าตัด เพื่อที่จะทำนายหรือหาค่ากำลังรับแรง ในการประยุกต์ใช้การออกแบบโครงสร้างผนังบาง (Thin – Walled Structures)

5.2 ข้อเสนอแนะ

รูปแบบการขึ้นลอนมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงค้ำของคานเหล็กรีดเย็นรูปทรงหมวก ดังนั้นการป้อนค่าขึ้นรูปเส้นต้องคำนึงถึงวิธีการที่ใช้ในการป้อนค่าขึ้นรูปของแม่พิมพ์ที่ทำการป้อนจริง ตัวแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) กับ แม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) ต้องมีความละเอียดและมีชัดเจนในพิมพ์ เพื่อให้ลอนที่ป้อนขึ้นรูปมีความชัดเจน โดยก่อนการป้อนขึ้นรูปต้องทำการทดสอบการลากขึ้นรูป (Deep Drawing) เพื่อหา ระยะของการยืดตัว (Stroke) ที่เหมาะสมก่อน ถ้าระยะของการยืดตัว (Stroke) ที่ใช้ป้อนลงลึกมากไปจะทำให้ตัวอย่างเกิดการย่น การฉีกขาด การเสียรูป โลหะหย่อน ผิวเกิดเสียหาย เป็นต้น ถ้าระยะของ Stroke ที่ใช้ป้อนลงลึกน้อยไปจะทำให้ตัวอย่างที่ป้อนขึ้นรูปไม่มีลอนที่เกิดจากการลากขึ้นรูปให้เห็น และไม่ได้ช่วยเสริมความแข็งแรงในการต้านการรับแรงกดค้ำให้กับวัสดุตัวอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแม่พิมพ์ที่ทำการป้อนค่าขึ้นรูปต้องทำการลบคมและลบมุมต่างๆ เพื่อป้องกันการที่มุมหรือคมจะกลายเป็นเหมือนกับลักษณะของกรรไกร ทำให้เกิดการคดกักตักชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการป้อนค่าขึ้นลอนอยู่ในขณะนั้น ทำให้ชิ้นตัวอย่างเสียหาย ความลึกของการป้อนขึ้นลอนชิ้นงานตัวอย่างที่เหมาะสมไม่ควรลึกเกิน 2 มิลลิเมตร สำหรับความหนาของชิ้นงานตัวอย่างที่ 0.45 มิลลิเมตร หรือ 4.4 เท่าของความหนาสำหรับตัวอย่างที่ทำการศึกษาวิจัยนี้ และตัวอย่างที่ใช้ทดสอบต้องมีหน้าตัดของคานเหล็กรีดเย็นที่คงที่ เท่ากันทุกตัวอย่างที่จะนำมาใช้ทดสอบ เพื่อให้ผลที่ได้จากการทดสอบ และตัวอย่างที่ใช้เปรียบเทียบมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบน้อย

อุปสรรคในการทำงานวิจัยที่มีผลต่อการศึกษาวิจัยมีดังต่อไปนี้

5.2.1 การหาวิธีทำการป้อนขึ้นรูปเหล็กรีดเย็น เนื่องจากเหล็กรีดเย็นเป็นเหล็กที่มีการนำมารีดซ้ำอีกครั้ง จึงมีการหาวิธีสร้างแม่พิมพ์ที่มีความละเอียดและมีการป้อนขึ้นรูปหรือพิมพ์รูปแบบลอนที่มีความชัดเจน เพื่อไม่ทำให้รูปแบบลอนที่พิมพ์เกิดการยืดตัวเกินจุด Plastic เนื่องจากวัสดุตัวอย่างมีการยืดหยุ่นตัวน้อย ในการศึกษาวิจัยนี้ใช้เครื่องแกะสลัก CNC Router Machine ทำการแกะสลักสร้างแม่พิมพ์ ซึ่งมีความสามารถในการทำการแกะสลักสร้างแม่พิมพ์ที่มีความละเอียดสูงและยังเป็นเครื่องจักรที่มีการใช้งานในวงการอุตสาหกรรมอยู่ในขณะนี้

5.2.2 วัสดุเหล็กที่นำมาใช้ทำการสร้างแม่พิมพ์ต้องเป็นเหล็กมีความแข็ง เป็นเหล็กเกรดที่ใช้สำหรับสร้างแม่พิมพ์หรือเหล็กที่ทำการสร้างแม่พิมพ์แล้วสามารถทำการชุบแข็งด้วยการเผาได้ คาร์บอนในตัววัสดุออกและทำให้เหล็กแข็งขึ้นได้ เมื่อเวลานำไปใช้งานในการป้อนขึ้นรูปลอนหรือพิมพ์ลาย ตัวแม่พิมพ์จะ得不เกิดการสึกหรอจากการใช้งานหรือเกิดลักษณะเย็นเมื่อมีการใช้งานพิมพ์ตัวอย่างที่มีจำนวนมากเป็นเวลานานทำให้ลอนที่ทำการป้อนค่าขึ้นรูปมีขนาดของลอนที่ไม่สม่ำเสมอ ันตลอดตัวอย่างเนื่องจากการชำรุดเสียหายของแม่พิมพ์ก่อน

5.2.3 ขาดการสนับสนุนทุนการวิจัยและงบประมาณของผู้วิจัยที่มีจำกัด เครื่องมือวัดในการทดสอบที่มีราคาแพงเนื่องมาจากเป็นเครื่องมือเฉพาะทาง เช่น เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัว Linear Position Transducer หรือ Linear Displacement Sensor เป็นต้น

5.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่จะใช้ในการศึกษาวิจัยต้องมีการนำมาประยุกต์เพื่อการใช้งานหรือเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือให้มีลักษณะเดียวเหมือนใกล้เคียงกับสภาพการทดสอบที่เกิดขึ้นจริง เครื่องมือบางอย่างที่จะนำมาใช้ขาดผู้ที่มีความรู้เฉพาะทางในการใช้เครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์ที่จะนำมาใช้เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยงานนั้นๆและไม่มีการดูแลบำรุงรักษาการใช้งานอย่างต่อเนื่อง

5.2.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Maths Model) ตัวอย่างโครงสร้างทดสอบที่มีความซับซ้อนมากๆ และขนาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใหญ่ มีเงื่อนไขขอบเขต Boundary Condition ที่ใหญ่ มี Node มี Element มี Meshing ที่มาก และการทำ Meshing สามเหลี่ยมทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากร (Resource) ที่ใช้ในการคำนวณของคอมพิวเตอร์มาก ต้องมีผู้ให้คำปรึกษาที่มีความเข้าใจในการใช้โปรแกรมที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Method (FEM) อย่างดี



เอกสารอ้างอิง

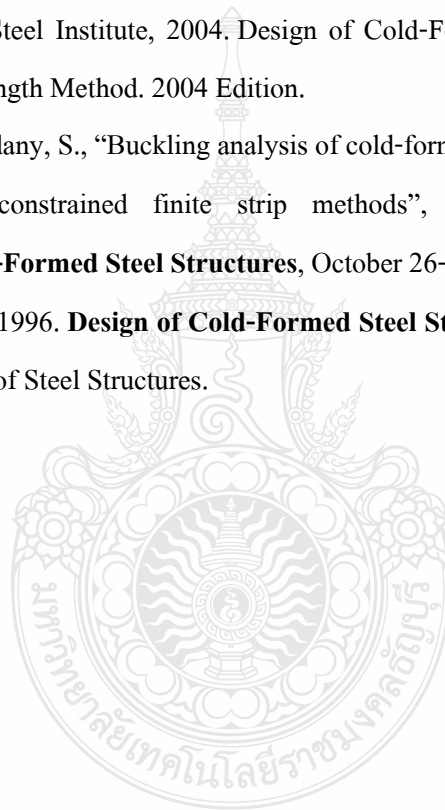
- [1] **American Iron and Steel Institute**, “Specification for the Design of Light – Gauge Steel Structural Members”, New York, N.Y. 1946.
- [2] **British Standards Institution**, “Specification for the Use of Cold-Formed Steel Sections in Buildings”, PD 4064, Addendum No. 1(1961) to BS449, 1959 “ The Use of Structural Steel in Buildings”.
- [3] **Standards Association of Australia**, “SAA Cold-Formed Steel Structures Code”, AS 1538-1974.
- [4] **American Iron and Steel Institute**, “Cold Steel Design Manual-Part 1, Specification”, New York, 1968.
- [5] **Standards Association of Australia**, “SAA Steel Structures Code”, ASCA1-1968.
- [6] Beck, V.R., “Behavior and design of Cold-Formed Members”, **Steel Construction, Journal of the Australian Institute of Steel Construction**, Vol. 8, No. 3, 1974.
- [7] **American Iron and Steel Institute**, “Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structures Members”, New York, 1980.
- [8] **American Iron and Steel Institute**, “Cold-Formed Steel Design Manual” Washington, 1986.
- [9] **Standards Association of Australian**, “Cold-Formed Steel Structures”, AS 1538 – 1988.
- [10] **Standards Association of Australia**, “SAA Steel Structures Code”, AS 1250 – 1981.
- [11] **American Iron and Steel Institute**, “Load and Resistance Factor Design Specification for Cold-Formed Steel Structural Members”, Washington, March 1991.
- [12] Brockenborough, R.L. “The 1996 AISI Specification”, **13th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel**, St Louis, October 1996.
- [13] Yu, W-W. “Golden Anniversary of AISI Specification”, **13th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel**, St Louis, October 1996.
- [14] **Standards Association of Australia**, “Steel Structural”, AS 4100-1990.
- [15] **Standards New Zealand**, “Steel Structures”, NZS 3404-1992.
- [16] **American Iron and Steel Institute**, “Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members”, April 1, 1996 Edition, Washington.
- [17] **Centre for Advanced Structural Engineering**, “International Workshop on Cold-Formed Steel Structural”, University of Sydney, February 1993.

- [18] **British Standards Institution**, “Code of Practice for the Design of Cold-Formed Sections”, BS 5950, Part 5, 1986.
- [19] **Canadian Standards Association**, “Cold-Formed Steel Structural Members”, CAN/CSA S136-94, Rexdale, Ontario, 1994.
- [20] **Comite Europeen de Normalisation**, “Eurocode 3 : Design of Steel Structural, Part 1.3 : General rules”, European Prestandard ENV 1993-1-3, 1996.
- [21] **Standards Association of Australia**, “Steel Storage Racking”, AS 4084-1993 (also “Steel Storage Racking – Commentary”, As 4084 Supp 1 – 1993).
- [22] **Standards Association of Australia**, “Domestic Metal Framing”, AS 3623-1993.
- [23] **Standards Association of Australia**, “Structural Steel Hollow Sections”, AS 1163-1991.
- [24] Pekoz, T. and McGuire, W., “Welding of Sheet Steel”, **Fifth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structural**, St Louis, Missouri, USA, 1980.
- [25] **Standards Association of Australia**, “Steel Sheet and Strip – Hot – Dipped zinc-Coated or Aluminium/Zinc-Coated”, AS 1397-1993.
- [26] **Standards Association of Australia**, “SAA Steel Loading Code, Part 1 : Dead and Live Loads and Load Combinations”, AS 1170. 1-1989.
- [27] **Standards Association of Australia**, “Wind Loads for Housing”, AS 4055-1992.
- [28] **Standards Association of Australia**, “SAA Loading Code, Part 2 : Wind Loads”, AS 1170.2-1989.
- [29] **Standards Association of Australia**, “Earthquake Loads”, AS 1170.4-1993.
- [30] **Standards New Zealand**, “General Structural Design and Design Loads for Buildings”, NZS 4203-1992.
- [31] **Centre for Advanced Structural Engineering**, “Program THIN-WALL, Users Manual, Version 1.2”, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, 1996.
- [32] **Centre for Advanced Structural Engineering**, “Users Manual for Program PRFELB: Elastic Flexural – Torsional Buckling Analysis, Version 3.0”, School of Civil Engineering, University of Sydney, 1997.
- [33] **Standards Association of Australia**, “Methods for Tensile Testing of Metals”, AS 1391-1991.
- [34] Dhalla, A.K, and Winter, G., “Steel Ductility Measurements”, **Journal of the Structural Division**, ASCE, Vol. 100, No. ST2, Feb. 1974, pp 427-444.

- [35] Dhalla, A.K, and Winter, G., “Suggested Steel Ductility Requirements”, **Journal of the Structural Division**, ASCE, Vol. 100, No. ST2, Feb. 1974, pp 445-462.
- [36] Yates, R., “The Effect on Ductility of Perforations in Thin High Strength Steels”, **BE(Hons) Thesis**, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, 1993.
- [37] Rogers, C.A. and Hancock, G.J. , “Ductility of G550 Sheet Steels in Tension”, **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Vol. 123, No. 12, 1997, pp 1586-1594.
- [38] Chajes, A., Britvec, S.J. and Winter, G., “Effects of Cold-Straining on Structural Sheet Steels”, **Journal of the Structural Division**, ASCE, Vol. 89, No. ST2, April 1963, pp 1-32.
- [39] Abel, A., “Historical Perspectives and Some of the Main Features of the Bauschinger Effect”, **Materials Forum**, Vol. 10 No. 1, First Quarter, 1987.
- [40] Karren, K.W., “Corner Properties of Cold-Formed Steel Shapes”, **Journal of the Structural Division**, ASCE, Vol. 93, No. SSI, Feb. 1967, pp 401-432.
- [41] Nadai, A, “Theory of Flow and Fracture in Solids, Vol. 1”, **McGraw-Hill Book Co.**, New York, N.Y., 1950.
- [42] Chipperfield, C.G., “Fracture Mechanics”, **Metals Australasia**, March 1980, pp 14-16.
- [43] Abel, A., “To Live with Cracks, An Introduction to Concepts of Fracture Mechanics”, **Australian Welding Journal**, March/April 1977, pp 7-9.
- [44] Toyoda, M., Hagiwara, Y., Kagawa, H. and Nakano, Y., “Deformability of Cold Formed Heavy Gauge RHS: Deformations and Fracture of Columns under Monotonic and Cyclic Bending Load”, **Tubular Structures V**, E. & F.N. Spon, 1993, pp 143-150.
- [45] Kikukawa, S., Okamoto, H., Sakae, K., Nakamura, H. and Akiyama, H., “Deformability of Heavy Gauge RHS - Experimental Investigation”, **Tubular Structures V**, E. & F.N. Spon, 1993, pp 151-160.
- [46] Cheung, Y.K., “Finite Strip Method in Structural Analysis”, **Pergamon Press**, Inc. New York, N.Y.,1976.
- [47] Przmieniecki, J.S., “Finite Element Structural Analysis of Local Instability”, **Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics**, Vol. 11, no. 1, Jan., 1973.
- [48] Plank, R.J. and Wittrick, W.H., “Buckling Under Combined Loading of Thin, Flat-Walled Structures by a Complex Finite Strip Method”, **international Journal For Numerical Methods in Engineering**, Vol. 8, No. 2, 1974, pp 323-329.

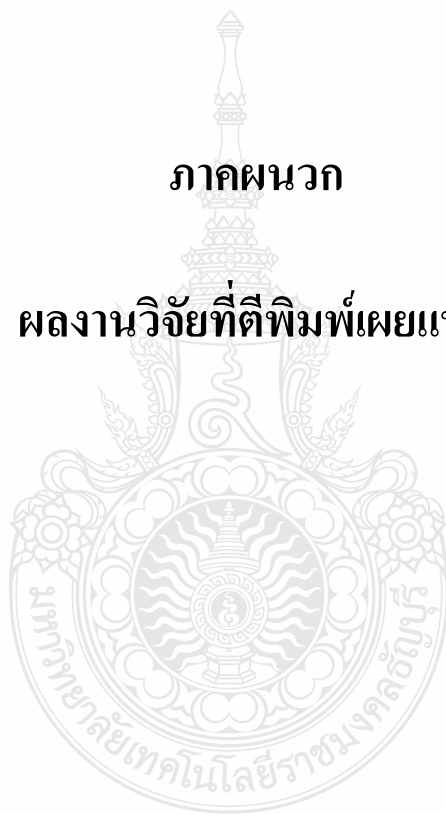
- [49] Lau, S.C.W and Hancock, G.J., “Buckling of Thin Flat-Walled Structures by a Spline Finite Strip Method”, **Thin-Walled Structures**, 1986, Vol. 4, No. 4, pp 269-294.
- [50] Hancock, G.J., “Local, Distortional and Lateral Buckling of I-Beams”, **Journal of the Structural Division**, ASCE, Vol. 104, No. ST11, Nov. 1978, pp 1787-1798.
- [51] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., “Theory of Elastic Stability”, **McGraw-Hill Book Co. Inc.**, New York, N.Y., 1959.
- [52] Hancock, G.J., “Distortional Buckling of Steel Storage Rack Columns”, **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Vol. III, No. 12, Dec. 1985.
- [53] Lau, S.C.W. and Hancock, G.J., “Distortional Buckling Formulas for Channel Columns”, **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Vol. 113, No. 5, May 1987.
- [54] Lau, S.C.W. and Hancock, G.J. “Distortional Buckling Tests of Cold-Formed Channel Sections”, Proceedings, **Ninth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures**, St Louis, Missouri, USA, November, 1988.
- [55] **Centre for Advanced Structural Engineering**, “Distortional Buckling of Hollow Flange Beam Sections”, Investigation Report S704, University of Sydney, Feb. 1989.
- [56] Pi, Y.L. and Trahair, N.S., “Lateral-Distortional Buckling of Hollow Flange Beams”, **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Vol. 123, No. 6, 1997, pp 695-702.
- [57] Bleich, F., “Buckling Strength of Metal Structures”, **Mc-Graw-Hill Book Co. Inc.**, New York, N.Y., 1952.
- [58] Bulson, P.S., “The Stability of Flat Plates”, **Chatto and Windus**, London, 1970.
- [59] Allen, H.G. and Bulson, P., “Background to Buckling”, **McGraw-Hill**, 1980.
- [60] Von Karman, T., Sechler, E.E. and Donnell, L.H., “The Strength of Thin Plates in Compression”, **Transactions ASME**, Vol. 54, MP 54-5, 1932.
- [61] Winter, G., “Strength of Thin Steel Compression Flanges”, Transactions, ASCE, Vol. 112, Paper No. 2305, 1947, pp 527-576.
- [62] Winter, G., “Thin-Walled Structures-Theoretical Solutions and Test Results”, Preliminary Publications of the Eighth Congress, IABSE, 1968, pp 101-112.
- [63] Kalyanaraman, V., Pekoz, T. and Winter, G., “Unstiffened Compression Elements”, **Journal of the Structural Division**, ASCE, Vol. 103, No. ST9, Sept 1977, pp 1833-1848.
- [64] Weng, C. C. and T. B. Pekoz, “Subultimate Behavior of Uniformly Compressed Stiffened Plate Elements”, **Research Report**, Cornell University, Ithaca, NY, 1986.

- [65] Ortiz-Colberg, R. and T. B. Pekoz, "Load Carrying Capacity of Perforated Cold-Formed Steel Columns", **Research Report No. 81-12**, Cornell University, Ithaca, NY, 1981.
- [66] Pekoz, T., "Development of a Unified Approach to the Design of Cold-Formed Steel Members", **American Iron and Steel Institute**, Research Report CF87-1, March 1987.
- [67] Desmond, T.P., Pekoz, T. and Winter, G., "Edge Stiffeners for Thin-walled Members, **Journal of Structural Engineering**", **Journal of Structural Engineering**, ASCE, 1981, 107(2), pp 329-353.
- [68] Desmond, T.P., Pekoz, T. and Winter, G., "Intermediate Stiffeners for Thin-walled Members", **Journal of Structural Engineering**, ASCE, 1981, 107(4), pp 627-648.
- [69] American Iron and Steel Institute, 2004. Design of Cold-Formed Steel Structural Members Using the Direct Strength Method. 2004 Edition.
- [70] Schafer, B.W. and Adany, S., "Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM :conventional and constrained finite strip methods", **18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures**, October 26-27, 2006, Orlando, Florida, 2006.
- [71] Gregory J. Hancock, 1996. **Design of Cold-Formed Steel Structures**. University of Sydney : BHP Steel Professor of Steel Structures.



ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่





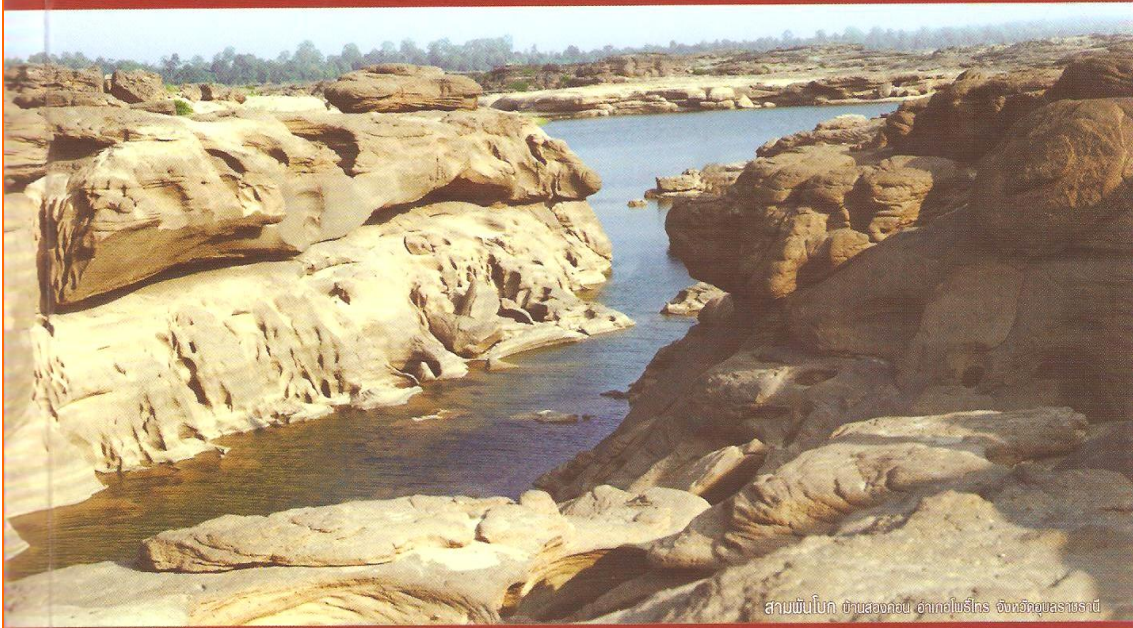
The 15th การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 National Convention on Civil Engineering (NCCE15) วิศวกรรมโยธากับการพัฒนาท้องถิ่น



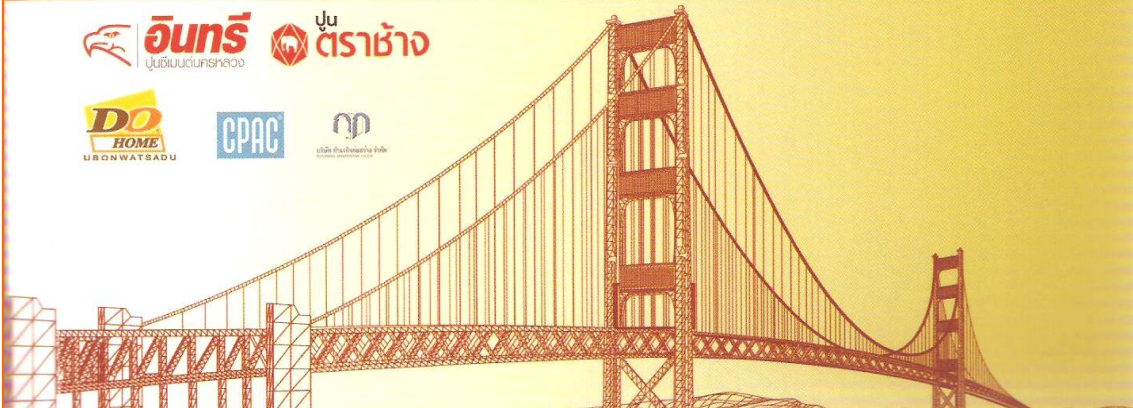
NCCE15

UBON RATCHATHANI วันที่ 12-14 พฤษภาคม 2553 จ.อุบลราชธานี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์



สามพันโบก ตำบลคอน อ่างทองศรีนคร จังหวัดอุบลราชธานี





เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ

วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15

PROCEEDINGS OF THE 15TH NATIONAL CONVENTION ON CIVIL ENGINEERING

วิศวกรรมโยธากับการพัฒนาท้องถิ่น

CIVIL ENGINEERING WITH LOCAL DEVELOPMENT

12 – 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2553

ศูนย์แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ อุบลราชธานี

12 – 14 May 2010

Sunee Grand & Convention Center, UbonRatchathani



ร่วมจัดโดย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ร่วมกับ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์



สารบัญชั้บทคัดย่อ (ต่อ)

	หน้า
STR008 WITHDRAWAL POWER OF NAIL IN ARTOCARPUS HETEROPHYLLUS LAM. EXT. BASED ON PROBABILITY THEORY <i>Noppadon Sudsui, Yos Sompornjaroensuk, Sutja Boonyachut</i>	250
STR009 STRESS INTENSITY FACTOR OF AN ELASTIC SOLID CONTAINING A FINITE CRACK UNDER THE COUPLED ELASTIC AND INDUCED THERMAL WAVES <i>P. Phurkhao</i>	251
STR011 AN INTEGRAL EQUATION GOVERNING A BENDING OF CENTRALLY CRUCIFORM CRACKED SQUARE PLATE <i>Yos Sompornjaroensuk</i>	252
STR012 ON TWO-COUPLED FREDHOLM INTEGRAL EQUATIONS FOR RECTANGULAR PLATE RESTING ON ANGLE-LEG CORNER SUPPORTS <i>Yos Sompornjaroensuk, Adisak Muengkling</i>	253
STR013 SEISMIC EVALUATION OF EXISTING GRAVITY LOAD DESIGNED BUILDING IN BHUTAN <i>Lobzang Dorji, Kitjapat Phuvoravan</i>	254
STR014 ผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการดัดของคานเหล็กรีดเย็น (รูปทรงหมวก) EMBOSMENTS EFFECT ON BENDING OF COLD-FORMED STEEL BEAM (HATS SHAPE) <i>มณฑรี เข็มเปี่ยม, มาโนช รุจิภากร</i>	255
STR015 BUCKLING BEHAVIOR OF COLD-FORMED STEEL SIGMA SECTION BY FINITE ELEMENT ANALYSIS <i>Panya Klongaksornkul, Kitjapat Phuvoravan</i>	256
STR016 การศึกษาการเสริมเหล็กที่มีผลต่อกำลังรับแรงดัดที่หัวสมอในพื้นคอนกรีตอัดแรง AT ANCHORAGE END IN POST-TENSION SLAB <i>รัตน์พันธุ์ แจ่มแสง, มาโนช รุจิภากร</i>	257
STR017 EFFECT OF INFILL CONFIGURATIONS ON RC FRAME BUILDING UNDER EARTHQUAKE LOADING <i>Karma Tshering, Piya Chotickai</i>	258
STR019 CREEP AND SHRINKAGE OF HIGH STRENGTH AND DURABLE CONCRETE CONTAINING HIGH VOLUME FLY ASH <i>Samreng Thongton</i>	259
STR020 CORNERS LIFTED UP SQUARE PLATE WITH SPECIFYING PARTIAL SIMPLE SUPPORT LENGTHS <i>Yos Sompornjaroensuk, Damang Dy</i>	260



ผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการค้ำของคานเหล็กรีดเย็น (รูปทรงหมวก)

EMBOSSMENTS EFFECT ON BENDING OF COLD-FORMED STEEL BEAM (HATS SHAPE)

มนตรี เย็นเปี่ยม (Montri Yenpiam)¹

มานุษ รุจิภากร (Manoch Rujipakorn)²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (montri.email@gmail.com)

²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (drmanoch@yahoo.com)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาถึงสภาวะวิบัติของโครงสร้าง อันเนื่องมาจากเหล็กรีดเย็นที่มีความบาง จึงต้องมีการควบคุมสัดส่วน รายละเอียดต่างๆขององค์อาคารอย่างพิถีพิถัน อีกทั้งยังต้องมีการคำนวณออกแบบที่มีความซับซ้อนมากกว่าเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปร้อน โดยใช้แบบจำลองคานหน้าค้ำ Hat Shape และมีการป้อนขึ้นลอนด้านข้าง 3 แบบ คือ ป้อนขึ้นลอนแนวตั้ง ป้อนขึ้นลอนแนวอน และป้อนขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง ทำการติดตั้งบนจตุรรองรับเอียงทำมุม 30 องศา และมีแรงกระทำแบบจุดที่กึ่งกลางความยาวคาน จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัว (Load-Deflection Curve) ของรูปแบบคานธรรมดาเปรียบเทียบกับรูปแบบคานที่มีการทำ Embossments ที่ข้างคานเหล็กรีดเย็น พฤติกรรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ พบว่าให้ค่าการแอ่นตัวที่สอดคล้องกัน และตรวจสอบการเสียรูปในสภาวะการใช้งานจำกัด (key limit state) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเคาะเฉพาที่ การโก่งเคาะแบบคิครูป และการโก่งเคาะแบบรวม โดยใช้โปรแกรม CUFSM คำนวณหาค่ากำลังรับแรงแบบ “โดยตรง” ผลการวิจัยที่ได้คือ รูปแบบการขึ้นลอนต่อการเสริมกำลังรับน้ำหนักของคานที่เสริมความแกร่งจากมากไปหาน้อยตามลำดับ ได้แก่ การป้อนขึ้นลอนแนวตั้ง การป้อนขึ้นลอนแนวอน และการป้อนขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง สำหรับคานเหล็กรีดเย็น (รูปทรงหมวก) สามารถหาผลการวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมได้โดยไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริง

ABSTRACT : This paper presents the model for Finite Element Method Analysis. To study the failure behavior of structure since the Cold-formed Steel is thin. As a result, it needs to be controlled carefully in any details. Furthermore, its design needs to be calculated more complicate than Hot-rolled Steel by using the Hat Shape steel and 3 patterns of Lateral Forming or Embossments which are vertical embossments, horizontal embossments and diagonal embossments. The installation on a support tilt angle 30 degrees and undergone point loading at the center of beam. This research also study about the relation between the weight of loading and Load-Deflection curve of normal beam compared with cold-formed beam with Embossment. It is found that the behaviors derived from analysis using finite element method and those from the actual test in the laboratory exhibit have the same consistent in deflections. Checking the gross properties after using for all of three key limit state; local buckling, distortional buckling and global buckling, by using CUFSM to calculate the “Direct” Strength, the result is embossments format with reinforcement stiffened in beam from many to less by step is vertical embossments, horizontal embossments and diagonal embossments for the Cold-formed Steel Beam (Hats Shape). It can find the analysis and can guess a status of test specimen without testing for actual specimen.

KEYWORDS : Embossments, Global buckling, Local buckling, Distortional buckling, Direct Strength



1. บทนำ

1.1 ความเป็นมา

เหล็กรีดเย็น (Cold - Formed Steel) ผลิตด้วยการรีดขึ้นรูปจากเหล็กกล้ากำลังสูงที่เคลือบกันสนิมด้วยสังกะสีหรือเหล็กกล้าประสมบางที่เป็นแผ่น หรือเส้นมีความหนา 0.4 ถึง 25 มม. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้กำลังบรรทุกน้ำหนักสำหรับอาคารเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรง ทัดตั้งได้สะดวก รวดเร็ว ประหยัดเวลา เนื่องจากเหล็กรีดเย็นมีความบางของหน้าตัดก็เพิ่มขีดจำกัดการออกแบบโครงสร้างอย่างมาก ต้องมีการควบคุมสัดส่วนและรายละเอียดต่างๆขององค์อาคารอย่างพิถีพิถันอีกทั้งการคำนวณออกแบบมีความซับซ้อนกว่าเหล็กรูปพรรณทั่วไป และเพื่อให้เกิดความประหยัดค่าใช้จ่ายของการก่อสร้างหรือจุดคุ้มทุนเนื่องจากเหล็กมีราคาต้นทุนการก่อสร้างที่สูง โดยใช้การเสริมความแกร่ง (Stiffness) ของเหล็กขึ้นรูปขึ้นเพื่อลดต้นทุนของวัสดุคือ วิธีการสมบัติของวัสดุ ทำการเพิ่มความแข็งของเหล็กขึ้นรูปขึ้นด้วยการป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) ที่คานเหล็กรีดเย็น ทำให้เหล็กขึ้นรูปเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น ในอนาคตโครงสร้างที่ใช้จากเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปขึ้นจะถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างในประเทศไทยอย่างกว้างขวางมากขึ้น แต่การออกแบบยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของผู้ออกแบบทั่วไป ประกอบกับการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเหล็กชนิดนี้ มีขั้นตอนการทำที่ยุ่งยากเมื่อต้องคำนวณด้วยมือ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองเพื่อผลการวิเคราะห์ที่ได้กับตัวอย่างทดสอบจริง เปรียบเทียบความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการกระจายความเค้นหน่วยแรงในหน้าตัดคานเหล็กรีดเย็นแบบ Top Span และ Top Hats ของการป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) บริเวณที่มีการถ่ายแรงลดกระทำแบบจุด การหาค่า Stress และ Displacement การออกแบบโครงสร้างผนังบาง (Thin - Walled Structures) ของเหล็กรีดเย็นด้วยวิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) เครื่องมือสำหรับการคำนวณใช้โปรแกรม CUFSM และเอกสารประกอบคือ ข้อกำหนดรายละเอียดสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง

ที่ทำจากเหล็กรีดเย็นของอเมริกาเหนือ (North American Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI 2004) ตรวจสอบการเสถียรของเหล็กขึ้นรูปเย็นในสภาวะการใช้งานจำกัด (key limit state)

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์การโก่งคาะของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรีดเย็นโดยใช้โปรแกรม CUFSM ด้วยวิธีวิเคราะห์ Finite Strip แบบทั่วไปและแบบจำกัดขอบเขตของ รองศาสตราจารย์ Ben Schafer มหาวิทยาลัยจอร์เจียเทคนอลยี นัลดีมอร์ มลรัฐแมริแลนด์ สหรัฐอเมริกา [1]

1.4 ทฤษฎี

การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรีดเย็น โดยการใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง ของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา (AISI) [2]

การออกแบบคานเหล็กรีดเย็น

ตารางที่ 1 ค่า Factor Ω และ ϕ ในการออกแบบ

อเมริกาและเม็กซิโก		แคนาดา
Ω_0 (ASD)	ϕ_0 (LRFD)	ϕ_0 (LSD)
1.67	0.90	0.85

การโก่งคาะแบบบิดตัวด้านข้าง

กำลังรับแรงดัดระบุ M_{cr} สำหรับการโก่งคาะแบบบิดตัวด้านข้างคือ

สำหรับ $M_{cr} < 0.56M_y$,

$$M_{cr} = M_y \quad (1)$$

สำหรับ $2.78M_y \geq M_{cr} \geq 0.56M_y$,

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

สำหรับ $M_{cr} > 2.78M_y$,

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

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

โดย S_x เป็นค่าโมดูลัสของหน้าตัดรวมเมื่อผิวบนสุดหรือผิวล่างสุดนั้นเกิดการครากครั้งแรก

M_{cr} = ค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งคาะแบบบิดหมุนในรูปแบบการโก่งคาะแบบบิดตัวด้านข้าง ซึ่งได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CUFSM



การ โกงเคาะเฉพาะที่

กำลังรับแรงดัดระบุ M_d สำหรับการ โกงเคาะแบบเฉพาะที่ คือ สำหรับ $\lambda_y \leq 0.776$

$$M_d = M_{nc} \tag{5}$$

สำหรับ $\lambda_y > 0.776$

$$M_d = \left(1 - 0.15 \left(\frac{M_{crd}}{M_{nc}} \right)^{0.4} \right) \left(\frac{M_{crd}}{M_{nc}} \right)^{0.4} M_{nc} \tag{6}$$

โดย $\lambda_y = \sqrt{M_{nc} / M_{crd}}$ (7)

M_{crd} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการ โกงเคาะแบบเฉพาะที่อีลหุ่่น ซึ่งได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CUFSM M_{nc} สามารถให้ค่าจำกัดความ ได้ตามสมการที่ 1

การ โกงเคาะแบบคิรูป

กำลังรับแรงดัดระบุ M_d สำหรับการ โกงเคาะแบบคิรูป คือ

สำหรับ $\lambda_y \leq 0.673$

$$M_d = M_y \tag{8}$$

สำหรับ $\lambda_y > 0.673$

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

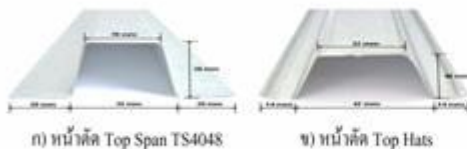
โดย $\lambda_y = \sqrt{M_y / M_{crd}}$ (10)

M_{crd} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการ โกงเคาะแบบคิรูปอีลหุ่่น ซึ่งได้จากการคำนวณ โดยโปรแกรม CUFSM M_y หาได้จากสมการที่ 4

2. วิธีคำนวณการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างคานเหล็กกริดเอ็นสำหรับทดสอบ

เป็นการเตรียมตัวอย่างคานเหล็กกริดเอ็นที่มีอยู่ในท้องตลาด ปัจจุบัน ตัวอย่างคานเหล็กกริดเอ็นที่ใช้เป็นเหล็กขึ้นรูปเอ็นที่เกิดจากการดัดหรือพับจากเหล็กแผ่นเรียบหน้าคิรูปทรงหมวก (Hat Shape) เป็นเหล็กกล้ากำลังสูงมีค่า Yield Strength 550 MPa ความหนาของคานตัวอย่าง 0.45 มิลลิเมตร ตามภาพที่ 1



ก) หน้าคัต Top Span TS4048 ข) หน้าคัต Top Hats

ภาพที่ 1 แสดงหน้าคัตของคานเหล็กกริดเอ็นที่เลือกใช้ในการทดสอบ

2.2 การสร้างแม่พิมพ์เหล็กเพื่อใช้ในงานวิจัย

การสร้างแม่พิมพ์เหล็กโดยใช้เครื่องแกะสลักทำแม่พิมพ์ (CNC Router Machine) ลักษณะของแม่พิมพ์ที่สร้างมี 2 แบบด้วยกันคือ

1. แบบที่หนึ่ง เป็นแท่นปั๊มตัวผู้เรียกว่า Punch
2. แบบที่สอง เป็นแม่พิมพ์ตัวเมียเรียกว่า Die

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ เกรดเหล็กโทซชนิดเหล็กหัวแดง สำหรับเป็นวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์เนื่องจากมีขายในท้องตลาด และมีคุณสมบัติ คือ เป็นเหล็กเกรด S45C จัดเป็นจำพวกเหล็กคาร์บอนปานกลาง สามารถนำมาชุบแข็งได้ง่าย ตามภาพที่ 2 3 และ 4



ก) เครื่อง CNC MAKINO ข) เครื่องปั๊มข้อเสือ

ภาพที่ 2 เครื่องCNCที่ใช้ทำการแกะสลักและเครื่องปั๊มขึ้นลอน



ค) เครื่องCNCdie สลักแม่พิมพ์ ง) รูปเดินแบบที่สร้างโดย CAD 3D

ภาพที่ 3 การแกะสลักแม่พิมพ์ที่ต้องการความละเอียดของงาน



จ) แม่พิมพ์สำหรับหน้าคัต Top Span ฉ) แม่พิมพ์สำหรับหน้าคัต Top Hats

ภาพที่ 4 แม่พิมพ์สำหรับปั๊มขึ้นลอนตัวอย่างคานหน้าคิรูปทรงหมวก

2.3 การปั๊มขึ้นลอนตัวอย่างคานเหล็กกริดเอ็น

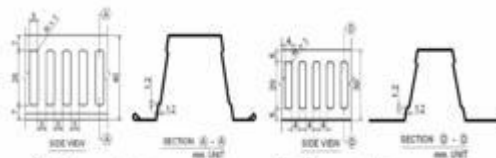
การปั๊มขึ้นลอนตัวอย่างคานเหล็กกริดเอ็นที่ขึ้นนี้ต้องการทดสอบการปั๊มลากขึ้นรูปก่อน ในการคำนวณการวิจัยนี้ใช้วิธีการทดสอบปั๊มขึ้นรูปตามแม่พิมพ์จริง ดูผลจริงของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Punch) กับ แม่พิมพ์ตัวเมีย (Die) โดยทำการปั๊มขึ้นรูปกับ



ตัวอย่างที่ศึกษาวิจัยเพื่อหาระยะของการยึดตัว (Stroke) ที่เหมาะสม อัตราชะของการยึดตัว (Stroke) ที่ใช้ปริมาณล็กมากไปจะทำให้ตัวอย่างเกิดการร่อน การฉีกขาด การเสียรูป โหลห้อยจนผิวเกิดเสียหาย เป็นต้น อัตราชะของ Stroke ที่ใช้ปริมาณล็กน้อยไปจะทำให้ตัวอย่างที่ป้อนขึ้นรูปไม่มีลอนที่เกิดจากการลากขึ้นรูปให้เห็น และไม่ได้ช่วยเสริมความแกร่งให้กับวัสดุตัวอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแม่พิมพ์ที่ทำการป้อนลากขึ้นรูปต้องทำการลบคมและลบมุมต่างๆเพื่อป้องกันการที่มุมหรือคมจะกลายเป็นเหมือนกับลักษณะของกรรไกร ทำให้เกิดการคมกดคัสขึ้นงานตัวอย่างที่ทำการป้อนลากขึ้นลอนอยู่ในขณะนั้น ทำให้ขึ้นตัวอย่างเสียหาย ความลึกของการป้อนขึ้นลอนตามเหล็กรีดเย็นตัวอย่างที่เหมาะสมไม่ควรล็กเกิน 2 มิลลิเมตรที่ความหนาของขึ้นงานตัวอย่าง 0.45 มิลลิเมตร หรือสำหรับตัวอย่างที่ทำการศึกษาวิจัยนี้

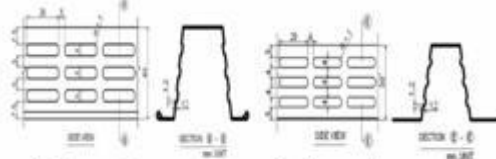
รูปการป้อนขึ้นลอนด้านข้าง (Embossments) มีหลายรูปแบบที่ทำการศึกษาวิจัยนี้เลือกทำการศึกษเพียง 3 รูปแบบ มีดังนี้

1. รูปแบบแรก ป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง มีขนาดและระยะห่างของลอน ตามภาพที่ 5



ก) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Span ข) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Hats ภาพที่ 5 ขนาดลอนแนวตั้งตัวอย่างคานหน้าตัดรูปทรงหามวกด้านข้าง

2. รูปแบบที่สอง ป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวอน มีขนาดและระยะห่างของลอน ตามภาพที่ 6



ก) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Span ข) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Hats ภาพที่ 6 ขนาดลอนแนวอนตัวอย่างคานหน้าตัดรูปทรงหามวกด้านข้าง

3. รูปแบบที่สาม ป้อนขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง มีขนาดและระยะห่างของลอน ตามภาพที่ 7



ก) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Span ข) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Hats ภาพที่ 7 ขนาดลอนแนวเฉียงตัวอย่างคานหน้าตัดรูปทรงหามวกด้านข้าง

การป้อนขึ้นลอนกับตัวอย่างคานเหล็กรีดเย็นที่ทดสอบจริงที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว ตามภาพที่ 8 9 และ 10



ก) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Span ข) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Hats ภาพที่ 8 การป้อนขึ้นลอนตัวอย่างคานหน้าตัดรูปทรงหามวกด้านข้างแนวตั้ง



ก) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Span ข) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Hats ภาพที่ 9 การป้อนขึ้นลอนตัวอย่างคานหน้าตัดรูปทรงหามวกด้านข้างแนวอน



จ) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Span ฉ) ป้อนขึ้นลอนหน้าตัดแบบ Top Hats ภาพที่ 10 การป้อนขึ้นลอนตัวอย่างคานหน้าตัดรูปทรงหามวกด้านข้างแนวเฉียง

2.4 การทดสอบหาคูสมบัติของวัสดุในทางวิศวกรรม

การทดสอบหาคูสมบัติของวัสดุในทางวิศวกรรม (Property of Materials) โดยใช้การทดสอบแรงดึงของเหล็กโครงสร้าง (Tension Test of Structural Steel) อ้างอิงมาตรฐาน JIS Z 2201 Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials นำค่าคูสมบัติของวัสดุที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ผลได้แก่ ค่าโมดูลัสของการ



ยึดหยุ่น (Modulus of Elasticity) E ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) V เป็นต้น

ขั้นตอนการทดสอบแรงดึงของเหล็กโครงสร้าง

1. ทำการเตรียมตัวอย่าง จำนวน 3 ตัวอย่างต่อคานเหล็กกรีดซีหนึ่งแบบ มีหน้าตัดแบบ Top Span และ Top Hais จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ตามภาพที่ 11 และตารางที่ 2



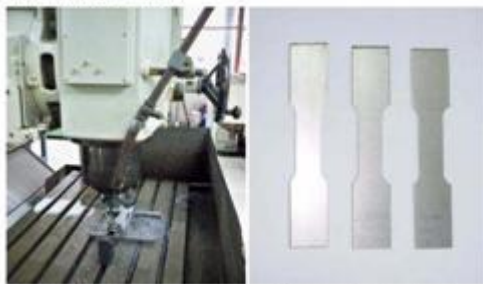
ภาพที่ 11 รูปร่างและมิติของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 2 ขนาดรูปร่างและมิติของชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง

ความหนา	ความกว้างของส่วนขนาน	ความยาวของสปีด	ความยาวของส่วนขนาน	พิสัยช่วงได้
	b	L_0	L_c	ขง.นำ & ค่าคง
ไม้ต้น 6	25 ± 0.7	50 ± 5	ประมาณ 60	15
ต้น 6	40 ± 0.7	200 ± 20	ประมาณ 220	25

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

2. ซัดเส้นทำเครื่องหมายระยะห่างประมาณ 50 มิลลิเมตร ที่ชิ้นทดสอบเพื่อใช้ตรวจสอบระยะการยืดตัว ก่อนและหลังดึงชิ้นทดสอบ
3. นำชิ้นทดสอบเข้าติดตั้งในเครื่องดึง แล้วทำการดึงชิ้นทดสอบ บันทึกแรงดึงและการยืดตัว จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน
4. นำชิ้นตัวอย่างมาต่อชนกันให้สนิท แล้ววัดค่าการยืดตัว
5. นำค่าต่างๆที่บันทึกไว้ไปคำนวณและสร้างกราฟความสัมพันธ์ ตามภาพที่ 12 13 และ 14



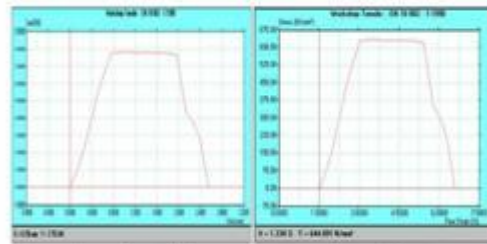
ก) เครื่องขึ้นทดสอบด้วยเครื่อง CNC ข) ชิ้นทดสอบที่เตรียมเสร็จแล้ว

ภาพที่ 12 การเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง CNC



ค) เครื่องดึงเหล็กชื่อ DARTEC ง) หัวจับทำการดึงขึ้นทดสอบ

ภาพที่ 13 เครื่องดึงเหล็กชื่อ DARTEC และการดึงขึ้นทดสอบ



จ) กราฟ Load กับ การยืดตัว ด) กราฟ Stress กับ Strain

ภาพที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ การยืดตัว และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain

6. การกำหนดค่าโมดูลัสของการยึดหยุ่น (Modulus of elasticity) ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) และค่าต่างๆสำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลองการทดสอบ ดังนั้นคือ ค่า Minimum Yield Stress (f_y) 550 MPa ค่า Minimum Tensile Strength (f_u) 550 MPa ค่า Modulus of elasticity (E) 203 GPa ค่า Shear Modulus (G) 78 GPa ค่า Poisson's ratio (V) 0.3

2.5 แผนผัง (Flow Chart) แสดงขั้นตอนการศึกษาวิจัยทดสอบคานเหล็กกรีดซี ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ขั้นตอนการศึกษาวิจัยทดสอบคานเหล็กกรีดซี



2.6 การทดสอบกำลังดัดของคานเหล็กรีดเย็น

การทดสอบกำลังดัดของเหล็กรีดเย็น (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) มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนการทดสอบกำลังดัดของคานเหล็กรีดเย็น

1. เตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบมีหน้าตัด 2 แบบ คือ Top Span และ Top Hats แบ่งเป็น 4 รูปแบบ คือ ขรรมคาไม่มีปี่มลอน ด้านข้าง ปี่มขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน ปี่มขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง ปี่มขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงเอียง ความยาวตัวอย่าง 1.70 เมตร แล้วทำการติดข้อต่อตัวอย่าง ทำการตีเส้น Mesh ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร และติดตั้ง Strain Gauges ที่ตำแหน่ง บนคาน ล่างคาน บริเวณกึ่งกลางคานเพื่อผลการเสีรูปของคาน ตามภาพที่ 16



ก) ทำการตีเส้น Mesh 1 x 1 ซม. ข) Strain Gauges และชุดต่อสาย

ภาพที่ 16 การติดข้อต่อตัวอย่าง ทำการตีเส้น Mesh ขนาด 1 x 1 เซนติเมตรและติดตั้ง Strain Gauges ที่ตำแหน่ง บนคาน ล่างคาน บริเวณกึ่งกลางคาน

2. เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ตามภาพที่ 17 18 และ 19



ก) เครื่องกลึงชื่อ Testometric ข) ตำแหน่งที่กีดกึ่งกลางคาน

ภาพที่ 17 เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบและตำแหน่งที่กีดคาน



ก) เครื่องวัด Displacement Transducer ข) เครื่องวัด Displacement Transducer

ภาพที่ 18 เครื่องวัด Displacement Sensor



ก) Magnetic สำหรับติดตั้งเครื่องมือ ข) เครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger

ภาพที่ 19 Magnetic และเครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger

3. ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสีรูปของคานเหล็กรีดเย็น ในขนาดรับแรงกดคดคดตามภาพที่ 20



ก) ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือวัด ข) ติดตั้งเครื่องมือวัดบนคานเอียง

ภาพที่ 20 ติดตั้งเครื่องมือวัดกลางคาน วัดการเคลื่อนตัวขนาดรับแรงกดคด

4. ติดตั้งตัวอย่างทดสอบบนจตุรกรรับเอียงทำมุม 30 องศา

5. ทำการกลนน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน อ่านค่าแรงกระทำทุกๆ 0.50 กิโลกรัม จนถึง 20 กิโลกรัม

6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) กับระยะแอ่นตัว (Deflection)

2.7 วิเคราะห์การเสีรูปของตัวอย่างคานเหล็กรีดเย็นด้วย Finite Element Analysis (FEA)

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (Model) เพื่อทำนายพฤติกรรม

1. การสร้างชิ้นส่วน (Create Part)
2. การสร้างคุณสมบัติวัสดุ (Create Material Properties)
3. กำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Assign Material Properties)
4. การสร้างตาข่ายเพื่อถ่ายแรงการวิเคราะห์ (Create Mesh)
5. การสร้างแรงที่กระทำหรือน้ำหนักบรรทุกและเงื่อนไขข้อต่อขอบเขต (Create Load & Boundary Condition)
6. การสร้างไฟล์งานกำหนดการประมวลผลและส่งมอบประมวลผลงาน (Create Job & Submit Job)
7. การดูผลลัพธ์ (View Results)



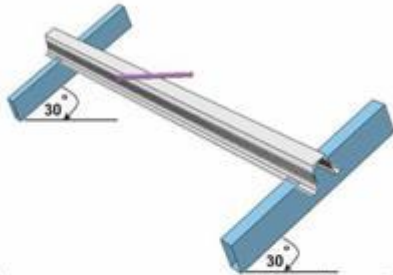
8. รูปแบบการจำลอง Model มีดังต่อไปนี้ตามภาพที่ 21 22 และ 23



ก) คานปกติไม่มีบีมลอนด้านข้าง ข) คานบีมขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้ง
ภาพที่ 21 Model ที่ไม่มีการบีมขึ้นลอนด้านข้าง และบีมขึ้นลอนด้านข้างแนวตั้งบนคานเหล็กกริดเอ็น หน้าตัดแบบ Top Span และ Top Hats



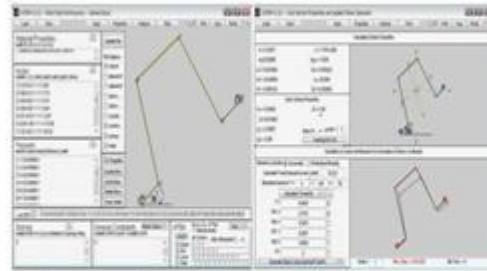
ค) คานบีมขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน ง) คานบีมขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียง
ภาพที่ 22 Model ที่มีการบีมขึ้นลอนด้านข้างแนวนอน และบีมขึ้นลอนด้านข้างแนวเฉียงบนคานเหล็กกริดเอ็น หน้าตัดแบบ Top Span และ Top Hats



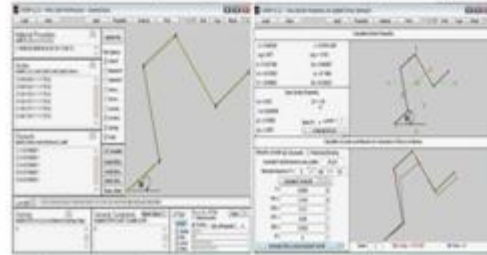
ภาพที่ 23 รูปแบบการจำลอง Model คานเหล็กกริดเอ็นทั้งหมดติดตั้งบนจุดรองรับเอียงทำมุม 30 องศา

2.8 การวิเคราะห์การโก่งค้ำของคานเหล็กกริดเอ็นโดยใช้โปรแกรม CUF5M

CUFSM หรือ Cornell University – Finite Strip Method มีขั้นตอนการวิเคราะห์การโก่งค้ำของคานเหล็กกริดเอ็นดังต่อไปนี้ 1. เริ่มวิเคราะห์การโก่งค้ำของคานหน้าตัด 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 โปรแกรมจะคำนวณค่าให้เอง ทำการป้อนค่า f_y ถ้าข้อมูลหน่วยเป็น ksc ให้เปลี่ยนเป็น ksi โดยใช้ค่า 70.30814062หาร แล้วคำนวณหาค่า P และ M ที่ทำให้โครงสร้างถึงคราก (Yield) ครั้งแรก กดที่ Menu Bar ของ Calculate P and M ตามภาพที่ 24

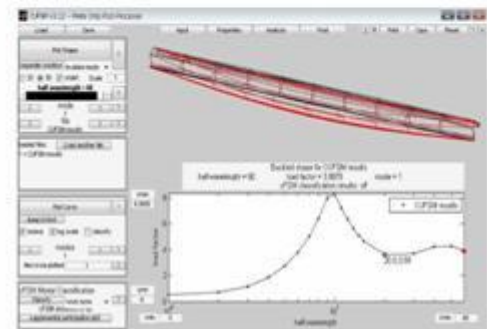


ก) ส่วน Input ของข้อมูล Top Span ข) การป้อนข้อมูลส่วน Properties

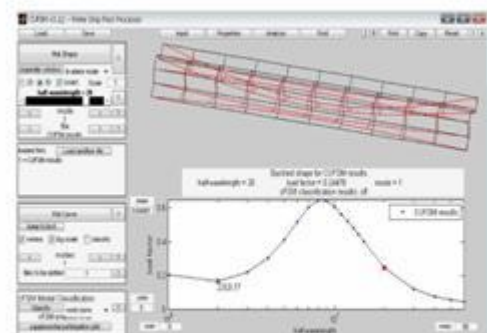


ก) ส่วน Input ของข้อมูล Top Hats ง) การป้อนข้อมูลส่วน Properties
ภาพที่ 24 การป้อนข้อมูลคานที่ทดสอบในส่วน Input และการป้อนข้อมูลในส่วน Properties ของคานหน้าตัด Top Span และ Top Hats

2. กด Menu Bar ของ Analyze โปรแกรมจะวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผล ตามภาพที่ 25 และ 26



ภาพที่ 25 โปรแกรมวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผลตาม Top Span



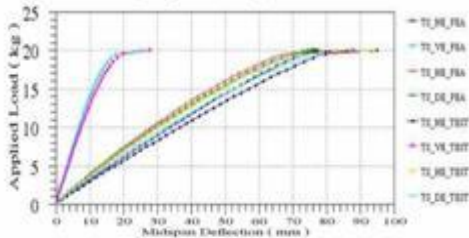
ภาพที่ 26 โปรแกรมวิเคราะห์ประมวลผลและแสดงผลตาม Top Hats

3. ในโปรแกรม Load ที่กระทำบนคานจะกระจายเป็นจุด 2 จุด โดยแบ่งคานเป็น 3 ช่วงระยะเท่ากัน จากจุดรองรับถึงจุดรองรับ ที่ช่วงระยะ $L/3$ และคานตัวอย่างมีเฉพาะที่ไม่มีการบีมขึ้น ลอนด้านข้างคานเหล็กกรีดยั่งยืนเท่านั้น
4. หน่วยวัดที่ใช้ในโปรแกรมเป็นระบบอังกฤษ (US Unit)

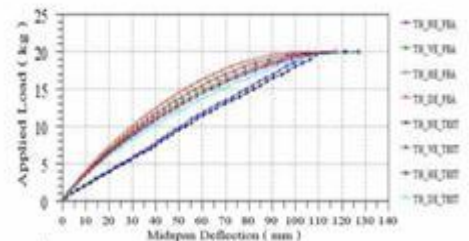
3. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

3.1 ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืน

ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) และการทดสอบการรับแรงดัดจริงในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างคานทดสอบหน้าคัต Top Span และ Top Hats ตามภาพที่ 27 และ 28



ภาพที่ 27 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืนแบบหน้าคัตรุ่น TOP SPAN

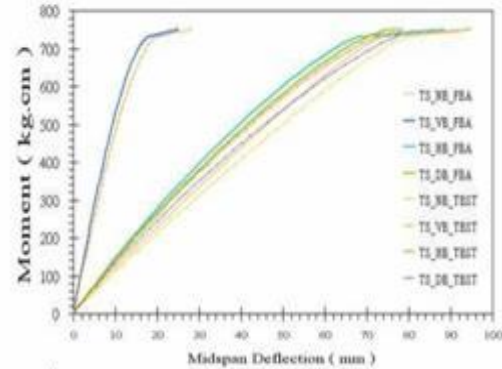


ภาพที่ 28 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืนแบบหน้าคัตรุ่น TOP HATS

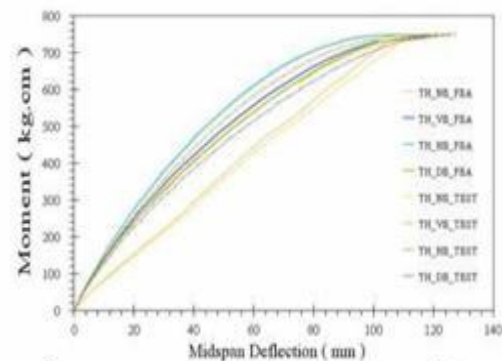
ภาพที่ 27 กราฟแสดงว่าการบีมขึ้นลอนแนวตั้งบนคานเหล็กกรีดยั่งยืนสำหรับหน้าคัตแบบ Top Span จะรับแรงดัดได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการบีมขึ้นลอนแนวอน และภาพที่ 28 กราฟแสดงว่าการบีมขึ้นลอนแนวอนบนคานเหล็กกรีดยั่งยืนสำหรับหน้าคัตแบบ Top Hats จะรับแรงดัดได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการบีมขึ้นลอนแนวตั้ง การบีมขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง คานเหล็กกรีดยั่งยืนที่ไม่มีการบีมขึ้นลอนด้านข้าง ตามลำดับจากการรับแรงดัดคามากไปหาน้อย

3.2 ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืน

ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) และการทดสอบการรับแรงดัดจริงในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างคานทดสอบ Top Span และ Top Hats ตามภาพที่ 29 และ 30



ภาพที่ 29 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืนแบบหน้าคัตรุ่น TOP SPAN



ภาพที่ 30 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและการโก่งตัวของคานเหล็กกรีดยั่งยืนแบบหน้าคัตรุ่น TOP HATS

ภาพที่ 29 กราฟแสดงว่าการบีมขึ้นลอนแนวตั้งบนคานเหล็กกรีดยั่งยืนสำหรับหน้าคัตแบบ Top Span จะรับแรงของโมเมนต์ดัดได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการบีมขึ้นลอนแนวอน และภาพที่ 30 กราฟแสดงว่าการบีมขึ้นลอนแนวอนบนคานเหล็กกรีดยั่งยืนสำหรับหน้าคัตแบบ Top Hats จะรับแรงของโมเมนต์ดัดได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการบีมขึ้นลอนแนวตั้ง การบีมขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง คานเหล็กกรีดยั่งยืนที่ไม่มีการบีมขึ้นลอนด้านข้าง ตามลำดับจากการรับโมเมนต์ดัดมากไปหาน้อย



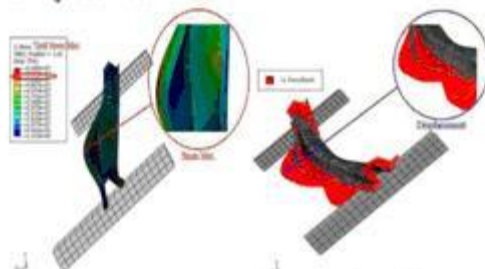
3.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับการทดสอบจริงของคาน ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แลพอน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของตัวอย่างคานเหล็กรีดเย็น โดยวัดที่ค่าการโก่งตัวในช่วงใช้งาน

Specimen	Symbol	Maximan Load		Percent Diff. (%)
		Simulation FEA (kg)	Flexure Test (kg)	
Purlin TS4048 Top Span				
ที่ไม่ขึ้นลอนขึ้นชัน	TS_NE	8.50	7.90	(+ 7.6)
ขึ้นชันลอนขึ้นชันคว่ำ	TS_VE	19.50	18.50	(+ 5.4)
ขึ้นชันลอนขึ้นชันขนานบน	TS_HE	9.50	9.00	(+ 5.6)
ขึ้นชันลอนขึ้นชันคว่ำซ้อน	TS_DE	9.00	8.50	(+ 5.9)
Purlin Top Hats				
ที่ไม่ขึ้นลอนขึ้นชัน	TH_NE	5.50	5.00	(+ 10.0)
ขึ้นชันลอนขึ้นชันคว่ำ	TH_VE	7.00	6.50	(+ 7.7)
ขึ้นชันลอนขึ้นชันขนานบน	TH_HE	8.00	7.50	(+ 6.7)
ขึ้นชันลอนขึ้นชันคว่ำซ้อน	TH_DE	6.00	5.50	(+ 9.1)

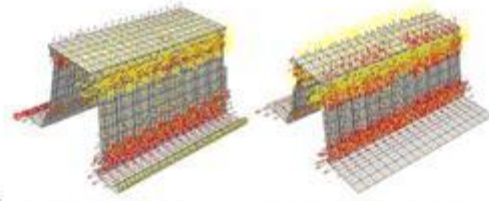
ค่าการโก่งตัวในช่วงใช้งานอยู่ที่ 28.40 มม. 17.64 มม. 26.50 มม. 26.05 มม. 27.99 มม. 21.40 มม. 22.50 มม. 18.77 มม. สำหรับคานเหล็กรีดเย็นชนิดต่างๆ

ตารางที่ 3 พบว่าการทดสอบจริงมีค่าการแอ่นตัวมากกว่าค่าการแอ่นตัวที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเมื่อค่าการโก่งตัวที่เท่ากันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าการทดสอบจริง ความแตกต่างเหล่านี้มีสาเหตุได้ว่า วัสดุจริงจะมีความสามารถในการยืดหยุ่น คุณสมบัติความเหนียว (Ductility) [3] ลดลงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เนื่องจากวัสดุจริงมีหน้าตัดที่ไม่คงที่ การบีบขึ้นลอนอีกไปทำให้ตัวขึ้นทดสอบถึงจุดครากก่อน การบีบขึ้นลอนคืนไปไม่ได้ช่วยเสริมความแกร่งของคานที่ทดสอบ อันเนื่องมาจากการควบคุมคุณภาพ อย่างไรก็ตามความแตกต่างเหล่านี้ถือว่ามีค่าน้อยและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

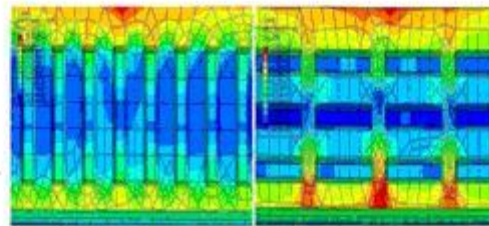


ก) Yield Stress Max. และ Stress Max. ข) ทิศทางการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกด

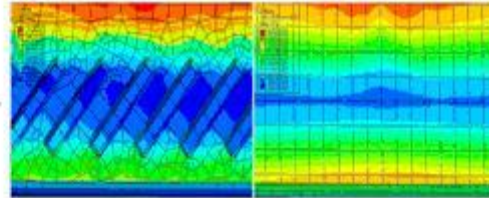
ภาพที่ 31 Yield Stress Max. และทิศทางการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกด



ค) ทิศทางของแรงในคาน Top Span ง) ทิศทางของแรงในคาน Top Hats
ภาพที่ 32 ทิศทางของแรงดึง แรงอัด ในคาน โดยมากที่สุดแสดงเป็นสีแดง

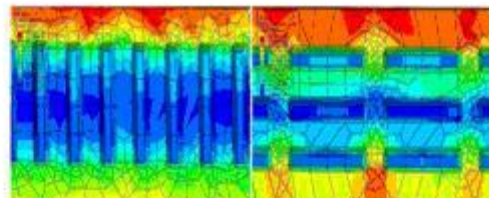


ข) Vertical Embossments ค) Horizontal Embossments

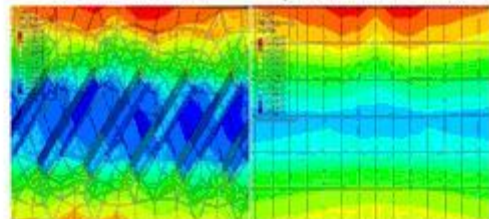


ง) Diagonal Embossments จ) Normal Beam

ภาพที่ 33 การกระจาย Stress เมื่อรับแรงกดคดของการขึ้นลอนแบบต่างๆ สำหรับคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top Span



ค) Vertical Embossments ง) Horizontal Embossments



ง) Diagonal Embossments จ) Normal Beam

ภาพที่ 34 การกระจาย Stress เมื่อรับแรงกดคดของการขึ้นลอนแบบต่างๆ สำหรับคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top Hats

ภาพที่ 31 แสดง Yield Stress Max. และ Stress Max. บริเวณที่มีการถ่ายแรงกดคดกระทำแบบจุด โดยค่า $F_y = 5,500$ ksc. ซึ่งจะแสดงเป็นสีส้มถ้าการกระจายความเค้นหน่วยแรงเกินค่า F_y จะทำ

ให้คานเหล็กยึดเอ็นตัวอย่างเกิดการเสียรูปอย่างฉิว ส่วนทิศทางการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดค้ำจะแสดงการเสียรูปของคานที่ทดสอบว่ามีการเสียรูปเป็นแบบใดในสภาวะการใช้งานจำกัดทั้ง 3 แบบ ภาพที่ 32 แสดงทิศทางของแรงดึง แรงอัด ในคานโคยมีค่ามากที่สุดแสดงเป็นสีแดง ภาพที่ 33 และ 34 แสดงการกระจาย Stress เมื่อรับแรงกดค้ำของการขึ้นลอนรูปแบบต่างๆ โดยบริเวณที่รับแรงกดค้ำมีค่ามากความเข้มของหน่วยแรงจะแสดงเป็นสีแดงเข้ม บริเวณที่มีความเข้มของหน่วยแรงน้อยจะแสดงเป็นสีน้ำเงิน

3.4 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของการบีบขึ้นลอนรูปแบบต่างๆต่อการรับน้ำหนักบรรทุก ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลเปรียบเทียบความแตกต่างของการบีบขึ้นลอนรูปแบบต่างๆต่อการรับน้ำหนักบรรทุกของคานเหล็กยึดเอ็น

Specimen	Symbol	ผลเปรียบเทียบความแตกต่าง (เท่า)	
		FEA	Flexure Test
Purlin TS4048 Top Span			
ที่ไม่มีขึ้นลอน	TS_NE	1.00	1.00
บีบขึ้นลอนแนวตั้ง	TS_VE	2.29	2.34
บีบขึ้นลอนแนวนอน	TS_HE	1.12	1.14
บีบขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง	TS_DE	1.06	1.08
Purlin Top Hats			
ที่ไม่มีขึ้นลอน	TH_NE	1.00	1.00
บีบขึ้นลอนแนวตั้ง	TH_VE	1.27	1.30
บีบขึ้นลอนแนวนอน	TH_HE	1.45	1.50
บีบขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง	TH_DE	1.09	1.10

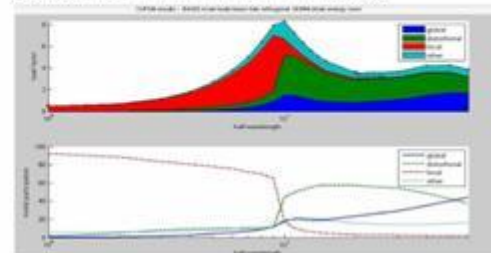
ตารางที่ 4 พบว่าความแตกต่างของการบีบขึ้นลอนรูปแบบแนวตั้งมีผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด 2.29 ถึง 2.34 เท่า สำหรับคานหน้าค้ำ Top Span รองลงมาเป็นการบีบขึ้นลอนแนวนอน ส่วนการบีบขึ้นลอนรูปแบบแนวอนมีผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด 1.45 ถึง 1.50 เท่าสำหรับคานหน้าค้ำ Top Hats รองลงมาเป็นการบีบขึ้นลอนแนวตั้ง ซึ่งรูปแบบลอนมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงและการกระจายหน่วยแรงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกของคานเหล็กยึดเอ็นไปยังจุดรองรับได้สมบูรณ์

3.5 ผลการวิเคราะห์การโก่งเคาะของคานเหล็กยึดเอ็น โดยใช้โปรแกรม CUFSM ตามภาพที่ 35 36 และ 37

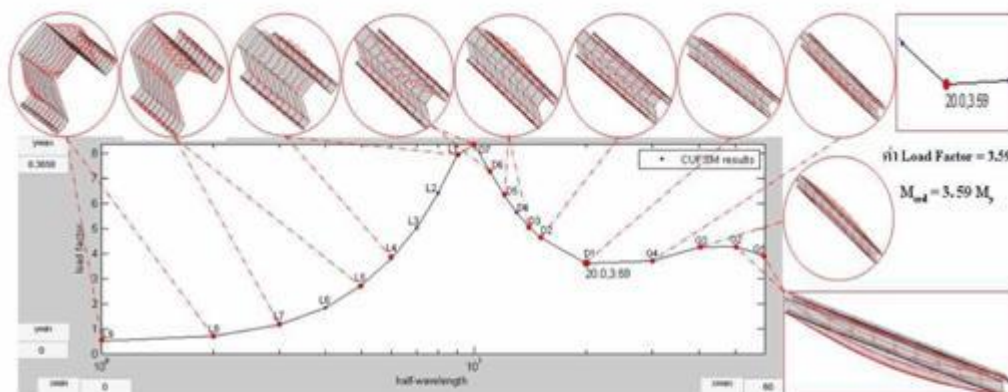


ก) ค่า P_y และ M_y ของ Top Span ข) ค่า P_y และ M_y ของ Top Hats

ภาพที่ 35 โปรแกรมคำนวณค่า Stress และ Moment ที่ถึง Yield เพื่อใช้ออกแบบ สำหรับแทนค่าในสมการวิธีกำลังรับแรงโดยตรง



ภาพที่ 36 กราฟการโก่งเคาะร่วมและกราฟหารฐานพลังงานความเครียด



ภาพที่ 37 แสดงการเสียรูปของคานในสภาวะการใช้งานจำกัดและค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งเคาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ เพื่อค้นหาที่ได้ไปคำนวณหาค่าแรงค้ำค้ำกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเคาะแบบบิดรูปยืดหยุ่น (M_{cr}) จะได้ค่า $M_{cr} = 3.59 M_y$, L1 ถึง L9 แสดงการเสียรูปของคานที่โก่งเคาะแบบเฉพาะที่ D1 ถึง D7 แสดงการเสียรูปของคานที่โก่งเคาะแบบบิดรูป G1 ถึง G4 แสดงการเสียรูปของคานที่โก่งเคาะแบบรวม



4. สรุปผลการวิจัย

จากผลงานวิจัยผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการค้ำของคานเหล็กรีดเย็นรูปทรงหวมก พบว่าการบีบขึ้นลอนแนวตั้งบนคานเหล็กรีดเย็นสำหรับหน้าตัดแบบ Top Span จะรับแรงกดค้ำได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการบีบขึ้นลอนแนวอน และการบีบขึ้นลอนแนวอนบนคานเหล็กรีดเย็นสำหรับหน้าตัดแบบ Top Hats จะรับแรงกดค้ำได้มากกว่าทุกรูปแบบ รองลงมาเป็นการบีบขึ้นลอนแนวตั้ง การบีบขึ้นลอนแนวเฉียงเอียง คานเหล็กรีดเย็นที่ไม่มีกรบีบขึ้นลอนด้านข้าง ตามลำดับจากการรับแรงกดค้ำมากไปหาน้อย การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำผลการวิเคราะห์ที่ได้เพื่อหุลบริเวณที่มีการถ่ายแรงกดค้ำกระทำแบบจุด เกิดการกระจายความเข้มข้นแรงเกินค่า F_c ที่กำหนดหรือไม่ ถ้าเกินค่าที่กำหนดจะทำให้คานเหล็กรีดเย็นเกิดการเสีรูปร่างอย่างฉิว สามารถหุลทิศทางเคลื่อนตัวของการเสีรูปร่างเมื่อรับแรงกดค้ำ และทิศทางของแรงดึงแรงอัด บริเวณที่มีการกระจาย Stress มากที่สุด การวิเคราะห์การโก่งค้ำโดยใช้โปรแกรม CUFSM จะได้ค่า Stress และ Moment ที่ทำให้คานเหล็กรีดเย็นถึงจุดครากครั้งแรก และค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งค้ำ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ เป็นจำนวนที่เท่าที่แรงค้ำกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งค้ำของ M_x นำค่าที่ได้ไปใช้ในหุลสมการวิธีกำลังรับแรงโดยตรง โดยค่าการรับกำลังค้ำที่ได้ในแต่ละสภาวะการใช้งานจำกัด ได้แก่ การโก่งค้ำเฉพาะที่ การโก่งค้ำแบบค้ำรูป และการโก่งค้ำแบบรวม เป็นค่าโมเมนต์ที่เลือกใช้ในการออกแบบ $M_x \geq \text{Min}(M_{x1}, M_{x2}, M_{x3})$ เมื่อคำนวณกับค่า Factor สำหรับการออกแบบแล้วได้ค่ากำลังรับแรงค้ำโดยตรงของคานที่ไม่ทำให้เกิดการโก่งค้ำเกินสภาวะการใช้งานจำกัดในการออกแบบ สามารถหุลงานความเครียดเนื่องจากคานที่เกิดแรงกดค้ำค้ำได้ สรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการออกแบบกระบวนการขึ้นรูปขึ้นส่วนสามารถใช้จำลองการทดสอบและวิเคราะห์การเสีรูปร่างของวัสดุซึ่งมีสมบัติไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี และสามารถใช้ประโยชน์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างคานซึ่งมีหน้าตัดเดิมเหมือนการทดลองแต่รับน้ำหนักบรรทุกและมีจุดรองรับเป็นรูปแบบอื่นโดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหุลการวิเคราะห์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สถาบันเทคโนโลยีอานาชาติสิริธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

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.

Engineering Today

วารสารเพื่อความก้าวหน้าในวงการวิศวกรรมและอุตสาหกรรม

THAILAND ENERGY AWARDS



2009

2007

2005

- ยุทธศาสตร์ 3 วงแหวน 5 ประตุ โอกาสและความท้าทายของประเทศไทย
- "ก๊อไทย" หม้อแปลงสัญชาติไทย พัฒนา Lab ทดสอบมาตรฐานระดับโลก
- โครงการพัฒนาและผลิตเพิ่มเติมชุดลดอันตรายจากสะเก็ดระเบิดสังหารบุคคล (2)
- จีเอ็ม จับมือเอสไอซี ไขว้นวัตกรรมปี 2030 ในงานวีลด์ เอ็กซ์โป 2010

WWW.ENGINEERINGTODAY.NET

ปีที่ 8 ฉบับที่ 90 พฤษภาคม 2553



เครื่องพิมพ์บรรจุภัณฑ์ INK JET



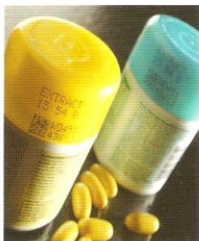
High speed post-filler printing without the need to split the production line

Domino A-Series plus Duo

The high speed, high volume ink jet solution for specialist applications



Class-leading performance at any duty cycle (low, medium or high)



High print density applications, including machine readable codes



บริษัท คิว ที เอส จำกัด
Q I I S CO., LTD.

19/20-22 บล๊อค เอ รอยลชีต้อเวนิว ถนนพระราม 9 แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10310 โทร. 0-2203-0357 โทรสาร 0-2203-0245
E-mail : market@ham.co.th, market@qiis.co.th www.qiis.co.th





business for the **betterment**
of our **environment...**



PDG's corporate headquarters located at Phatumthani, Thailand.

PD Genesis Engineering (knowns as PDG) is an innovative engineering company involved in the construction of complex facilities for the protection of the environment. PDG is involved in all aspects of design, equipment supply, construction, operation and maintenance of water and wastewater treatment works, sludge treatment plants and air pollution treatment works.

Technologies for water and wastewater problems



PDG offers a broad range of clarification and filtration processes to produce potable water and as pre-treatment for industrial requirements.



Providing complete wastewater treatment and water recycle system with Membrane Bio-Reactor process



Design, construction, installation and commissioning wastewater treatment plant, capacity 1,200 cu.m./day



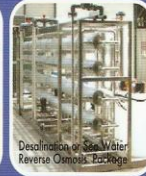
The "G-CMF" Continuous Membrane Filtration System use latest technology, hollow fiber MF/UF membrane technology, to produce pure water from any water source.

The G-CMF systems remove bacteria, viruses, iron, and other solids particulates to deliver water that consistently measures up to even the toughest standards.

The G-CMF systems, are specifically designed to process water for drinking, industrial processes and secondary wastewater effluent for reuse.



Package MBR system



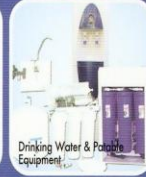
Desalination or Sea Water Reverse Osmosis Package



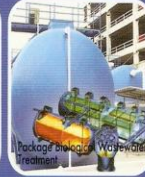
RO membrane MF/UF Membrane



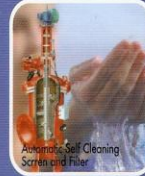
G-CMF(MF/UF) Water Treatment Package



Drinking Water & Potable Equipment



Package Biological Wastewater Treatment



Automatic Self-Cleaning Screen and Filter



Pressure Media Filter System



Cooling Tower Water Treatment System

PDG offers a wide array of complementation products for all water and wastewater treatment needs.

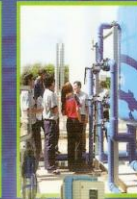


Package Wastewater Treatment FRP-Tank System for residential estates, hospitals etc.



System for Industrial Wastewater Treatment

Our Experties



We are able to drive our solutions through our teams of highly motivated and experienced specialists.



PDG's core strength is in providing turnkey engineering expertise for a wide range of water and wastewater treatment solutions. Our know-how spans the entrie range of treatment methods which include biological treatment systems, physio-chemical treatment systems, membrane systems and hybrid treatment systems.

PD Genesis Engineering Co.,Ltd บริษัท พีดี เจเนซิส เอ็นจิเนียริง จำกัด

★ 1/11 Moo.3, Lamlukka Road, Ladsawai, Lamlukka, Phatumthani 12150 Thailand

★ 1/11 หมู่ 3 ถนนลำลูกกา ตำบลลาดสวาย อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150



Tel : 02-791 0111, 02-199 2068-9 Fax : 02-791 0100-2, 02-199 2070 E-mail: info@pdgenesis.com

www.pdgenesis.com



16 บทสนทนาวิชาการ

คืนแดนศิวิไลซ์ให้กรุงเทพฯ
กิตติ วิสุทธิรัตนกุล

37 Technology

จีเอ็ม จับมือเอสเอไอซี ไตร่ตนครกรรมปี 2030
ในงานเวิร์ลด์ เอ็กซ์โป 2010
กอบบรณาธิการ

40 Environment

MTEC จับมือ TGO ผลักดันฉลาก "คาร์บอนฟุตพริ้นท์"
สาวิตรี ระงับพิช

44 Energy Today

เกณฑ์การบริโภคพลังงานในอุตสาหกรรม (2)
ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, มานิจ ทองประเสริฐ

รายงานพิเศษ

48 ยุทธศาสตร์ 3 วงแหวน 5 ประตุ

โอกาสและความท้าทายของประเทศไทย
สาวิตรี ระงับพิช

52 Productivity Facilitator

โมเดลการพัฒนาองค์กรอย่างยั่งยืน
พริ้ม ศรีทานาม

55 Factory Today

"ดิวิไทย" หม้อแปลงสัญชาติไทย
พัฒนา Lab ทดสอบมาตรฐานระดับโลก
พริ้ม ศรีทานาม

บทความ

58 การก่อเกาะของคานเหล็กยึดยื่นในสภาวะการใช้งานจำกัด
มนตรี เข็มเปี่ยม, มาโนช รุจิภากร

65 โครงการพัฒนาและผลิตเพิ่มเติม

ชุดลดอันตรายจากสะเก็ดระเบิดสิ่งทหารบุคคล (2)
สุจิระ ขจรจิตต์เมศร์, จิระชัย เกียรติประจักษ์, คำรง เรืองฤทธิ์,
อภิชาติ ทิมสุวรรณ

68 IT Update

การจัดการความเสี่ยง : ศูนย์ข้อมูลองค์กร
และความต่อเนื่องทางธุรกิจ
ธีว โยชิตะ

70 Safety Culture

เรื่องที่ต้องป้องกันไว้ก่อน
วิฑูรย์ ลิ้มโชติดี

72 เรื่องจากปก

เทคโนโลยีการพิมพ์หมึกระบบ Ink Jet
บริษัท ดิว อีส จำกัด



การโก่งเดาะของคานเหล็กรีดเย็น ในสภาวะการใช้งานจำกัด

BUCKING OF COLD-FORMED STEEL BEAM IN KEY LIMIT STATE

คานเหล็กรีดเย็น
หน้าตัด Top Spanคานเหล็กรีดเย็น
หน้าตัด Top Hats

รูปที่ 1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Finite Strip Method

บทความวิชาการนี้เป็นการศึกษาก่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Finite Strip แบบทั่วไป และแบบจำกัดขอบเขต สำหรับการวิเคราะห์ทางเสถียรภาพของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น อันเนื่องมาจากเหล็กรีดเย็นที่มีความบาง ก่อให้เกิดความยุ่งยากต่อปัญหาทางด้านความไร้เสถียรภาพของชิ้นส่วน โดยเฉพาะสำหรับรูปแบบการโก่งเดาะที่มีความซับซ้อน โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Hat Shape ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ และตรวจสอบการเสถียรภาพในสภาวะการใช้งานจำกัด (Key Limit State) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะแบบรวม การโก่งเดาะแบบบิดรูป และการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยใช้โปรแกรม CUFSM คำนวณค่ากำลังรับแรงแบบ "โดยตรง" เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาที่ได้ คือ การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี ได้แก่ ASD, LRFD และ LSD การเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กรีดเย็นด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างผนังบาง (Thin-Walled Structures)

เหล็กรีดเย็น (Cold-Formed Steel) ผลิตด้วยการรีดขึ้นรูปจากเหล็กกล้ากำลังสูงที่เคลือบกันสนิมด้วยสังกะสีหรือเหล็กกล้าประสมบางที่เป็นแผ่น หรือเส้นมีความหนา 0.4 ถึง 25 มม. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้กำลังบรรทุกน้ำหนักสำหรับอาคาร เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรง ติดตั้งได้รวดเร็ว ประหยัดเวลา เนื่องจากเหล็กรีดเย็นมีความบางของหน้าตัดก็เพิ่มขีดจำกัดต่อการออกแบบโครงสร้างอย่างมาก ต้องมีการควบคุมสัดส่วนและรายละเอียดต่างๆ ขององค์อาคารอย่างพิถีพิถัน อีกทั้งการคำนวณออกแบบมีความซับซ้อนกว่าเหล็กรูปพรรณทั่วไป แต่การออกแบบยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของผู้ออกแบบทั่วไป ประกอบกับการคำนวณเพื่อหาลำดับรับน้ำหนักของเหล็กชนิดนี้ มีขั้นตอนการทำที่ยากเมื่อต้องคำนวณด้วยมือ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงเสถียรภาพของหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยการใช้วิธี Finite Strip แบบทั่วไปและแบบถูกจำกัดขอบเขตซึ่งได้ถูกนำไปใช้อย่างประสบความสำเร็จในโปรแกรม CUFSM การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพีชคณิตผสมผสานกับการระบุรูปแบบของการโก่งเดาะอย่างถูกต้องแม่นยำนั้นถือว่าเป็นขั้นบันไดแรกสำหรับการก้าวไปสู่การประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบ ได้แก่ วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่ได้กับตัวอย่างทดสอบจริง เปรียบเทียบความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้

*ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
montri_email@gmail.com**อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
dr_manoch@yahoo.com

วัตถุประสงค์

บทความนี้เป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพของชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็นในหน้าตัดคานเหล็กรีดเย็นแบบ Top Span และ Top Hats การออกแบบโครงสร้างผนังบาง (Thin-Walled Structures) ของเหล็กรีดเย็น ด้วยวิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) เครื่องมือสำหรับการคำนวณใช้โปรแกรม CUFSM และเอกสารประกอบ คือ ข้อกำหนดรายละเอียดสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากเหล็กรีดเย็นของอเมริกาเหนือ (North American Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI 2004) ตรวจสอบการเสถียรภาพของเหล็กขึ้นรูปเย็นในภาวะการใช้งานจำกัด (Key Limit State)^[1]

ทฤษฎี

การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรีดเย็น โดยการใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง ของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา (AISI)^[2]

การออกแบบคานเหล็กรีดเย็น

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

การโก่งเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง

กำลังรับแรงดัดระบุ M_{ne} สำหรับการโก่งเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง คือ

สำหรับ $M_{cre} < 0.56 M_y$

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

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

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

สำหรับ $M_{cre} > 2.78 M_y$

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

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

โดย S_f เป็นค่าโมดูลัสของหน้าตัดรวมเมื่อผิวบนสุดหรือผิวล่างสุดนั้นเกิดการครากครั้งแรก

M_{cre} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแบบยืดหยุ่นในรูปแบบการโก่งเดาะแบบบิดตัวด้านข้าง ซึ่งได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CUFSM

การโก่งเดาะเฉพาะที่

กำลังรับแรงดัดระบุ M_{nl} สำหรับการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ คือ สำหรับ $\lambda_l \leq 0.776$

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

สำหรับ $\lambda_l > 0.776$

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

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

M_{crl} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแบบเฉพาะที่ยืดหยุ่น ซึ่งได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CUFSM

M_{ne} สามารถให้ค่าจำกัดความได้ตามสมการที่ 1

การโก่งเดาะแบบบิดรูป

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

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

สำหรับ $\lambda_d > 0.673$

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

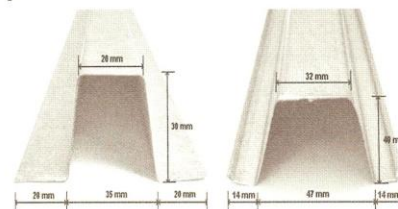
$$\text{โดย } \lambda_d = \sqrt{M_y / M_{crl}} \quad (10)$$

M_{crl} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแบบบิดรูปยืดหยุ่น ซึ่งได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CUFSM

M_y หาได้จากสมการที่ 4

ตัวอย่างคานเหล็กรีดเย็นสำหรับทดสอบ

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



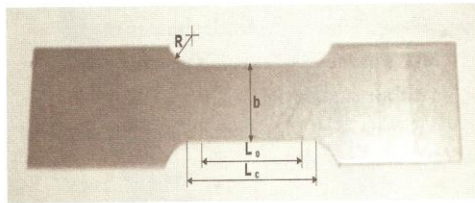
รูปที่ 2 หน้าตัดของคานเหล็กรีดเย็นที่เลือกใช้ในการทดสอบ

การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในทางวิศวกรรม

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

ขั้นตอนการทดสอบแรงดึงของเหล็กโครงสร้าง

1. ทำการเตรียมตัวอย่างจำนวนสามตัวอย่างต่อคานเหล็กรีดเย็น หนึ่งแบบ มีหน้าตัดแบบ Top Span และ Top Hats จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ตามรูปที่ 3 และตารางที่ 2



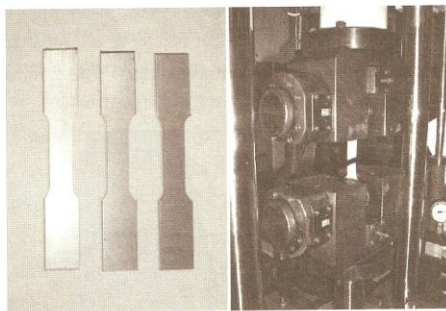
รูปที่ 3 รูปร่างและมิติของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 2 ขนาดรูปร่างและมิติของชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง

ความหนา	ความกว้างของส่วนขนาน b	ความยาวของกึ่งคิ L _g	ความยาวของส่วนขนาน L _c	รัศมีส่วนโค้งของ R ค่าสุด
ไม่เกิน 6	25 ± 0.7	50 ± 5	ประมาณ 60	15
เกิน 6	40 ± 0.7	200 ± 20	ประมาณ 220	25

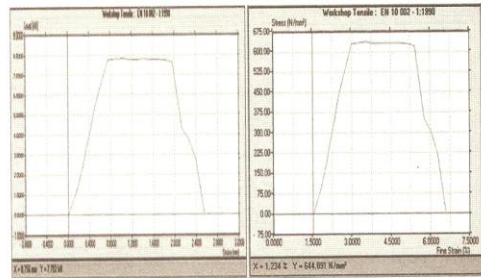
หน่วยเป็นมิลลิเมตร

2. ชีตเส้นทำเครื่องหมายระยะห่างประมาณ 50 มิลลิเมตร ที่ชิ้นทดสอบเพื่อใช้ตรวจสอบระยะการยืดตัวก่อนและหลังดึงชิ้นทดสอบ
3. นำชิ้นทดสอบเข้าติดตั้งในเครื่องดึง แล้วทำการดึงชิ้นทดสอบบันทึกค่าแรงดึงและการยืดตัว จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน
4. นำชิ้นตัวอย่างมาต่อชนกันให้สนิท แล้ววัดค่าการยืดตัว
5. นำค่าต่างๆ ที่บันทึกไว้ไปคำนวณและสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4 และ 5



ก) ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง ข) หัวจับทำการดึงชิ้นทดสอบ

รูปที่ 4 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงและการดึงชิ้นทดสอบ



ค) กราฟ Load กับ การยืดตัว ง) กราฟ Stress กับ Strain

รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ การยืดตัว และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain

6. การกำหนดค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) และค่าต่างๆ สำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลองการทดสอบ ดังนี้คือ 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 Ratio (ν) 0.3

การทดสอบกำลังดัดของคานเหล็กรีดเย็น

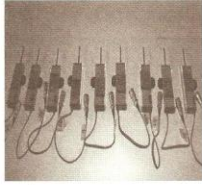
การทดสอบกำลังดัดของเหล็กรีดเย็น (Flexural Test of Cold-Formed Steel Beam) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products โดยนำผลการทดสอบที่ได้ของค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว (Load-Deflection Curve) และค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานเหล็กรีดเย็นมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี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

ขั้นตอนการทดสอบกำลังดัดของคานเหล็กรีดเย็น

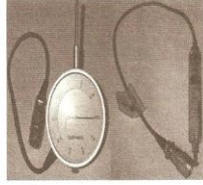
1. เตรียมตัวอย่างที่จะทดสอบมีหน้าตัดสองแบบ คือ Top Span และ Top Hats ความยาวตัวอย่าง 1.15 เมตร แล้วทำการติดเชือกตัวอย่าง ทำการตีเส้น Mesh ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร และติดตั้ง Strain Gauges ที่ตำแหน่ง บนคาน ล่างคาน บริเวณกึ่งกลางคาน เพื่อดูผลการเสียรูปของคาน
2. เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ตามรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 เครื่องกดยี่ห้อ Testometric และเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ



ก) เครื่อง Transducer Displacement



ข) เครื่อง Transducer Displacement

รูปที่ 7 เครื่อง Transducer Displacement Sensor

3. ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการดูผลการเสียรูปของคานเหล็กรีดเย็น ในขนาดรับแรงกดตัดตามรูปที่ 8



ก) ติดตั้งเครื่องมือวัดคาน Top Span



ข) ติดตั้งเครื่องมือวัดคาน Top Hats

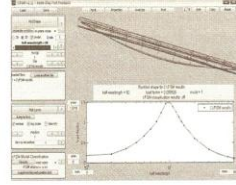
รูปที่ 8 ติดตั้งเครื่องมือวัดกลางคานวัดการเคลื่อนตัวและตำแหน่งที่มีการเสียรูปของคานเหล็กรีดเย็นขนาดรับแรงกดตัด

4. ติดตั้งตัวอย่างทดสอบบนจุดรองรับ
5. ทำการกดน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน อ่านค่าแรงกระทำทุก ๆ 0.50 กิโลกรัม จนถึง 20 กิโลกรัม
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) กับระยะเยื้องตัว (Deflection) และหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานเหล็กรีดเย็น

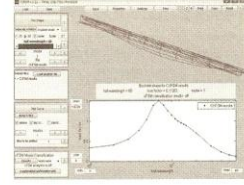
การวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของคานเหล็กรีดเย็น โดยใช้โปรแกรม CUFSM

CUFSM หรือ Cornell University-Finite Strip Method มีขั้นตอนการวิเคราะห์การโก่งเดาะของคานเหล็กรีดเย็น ดังต่อไปนี้

1. เริ่มวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของคานหน้าตัด 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 แล้ว Input ข้อมูลใน Menu Bar ของ Properties โปรแกรมจะคำนวณค่าให้เอง ทำการป้อนค่า f_y ถ้าข้อมูลหน่วยเป็น ksc ให้เปลี่ยนเป็น ksi โดยใช้ค่า 70.30814062 หากแล้วคำนวณหาค่า P และ M ที่ทำให้โครงสร้างถึงคราก (Yield) ครั้งแรก กดที่ Menu Bar ของ Calculate P and M



รูปที่ 9 โปรแกรมวิเคราะห์ประมวลผล และแสดงผลคาน Top Span



รูปที่ 10 โปรแกรมจะวิเคราะห์ประมวลผล และแสดงผลคาน Top Hats

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

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของคานเหล็กรีดเย็น ด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 1.50 เมตร ติดตั้งบนจุดรองรับเอียงทำมุม 0 องศา ตามตารางที่ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10

ตารางที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสำหรับการโก่งเดาะแบบผิวดรูป M_{nd} ของคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top Span ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.46 เท้า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆ มีค่าโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กรีดเย็นจะมีค่าใกล้เคียงกัน และตารางที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสำหรับการโก่งเดาะแบบผิวดรูป M_{nd} ของคานเหล็กรีดเย็นหน้าตัด Top Hats ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.47 เท้า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆ มีค่าโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กรีดเย็นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่ากำลังรับแรงดัดสำหรับการโก่งเดาะที่เลือกใช้ในการออกแบบตามทฤษฎี $M_n \geq \text{Min}(M_{ne}, M_{nr}, M_{nd})$ เมื่อคำนวณกับค่า Factor สำหรับการออกแบบแล้วได้กำลังรับแรงดัดโดยตรงที่ไม่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเกินสภาวะการใช้งานจำกัดในการออกแบบ และเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กรีดเย็นที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน จึงทำให้กำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กรีดเย็นที่เปรียบเทียบมีค่าที่พิจารณาไม่ต่างกัน เนื่องมาจากการเลือกใช้ค่าต่ำสุดเป็นค่าที่ยอมใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ 3 Load Factor สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงดัดโดยตรงที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจำลองคานเหล็กยึดยื่นหน้าตัด 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 สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงดัดโดยตรงที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจำลองคานเหล็กยึดยื่นหน้าตัด 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 หน่วยแรงดัดที่จุดคาน

Load Factor คือ ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกของกราฟที่การโก่งคาน ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ

Local Bucking คือ การโก่งคานเฉพาะที่

Distortional Bucking คือ การโก่งคานแบบผิดรูป

Global Bucking คือ การโก่งคานแบบรวม

hw หรือ half-wavelength คือ ครึ่งความยาวคลื่นของการโก่งคาน ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ

My คือ ค่าโมเมนต์ดัดที่ถึงจุดคานครั้งแรก (Yield Moment)

ตารางที่ 5 กำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กยึดยื่นหน้าตัด Top Span

Grade Designation	M _{ne} (kip-in.)	M _{nl} (kip-in.)	M _{nd} (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 กำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กยึดยื่นหน้าตัด Top Hats

Grade Designation	M _{ne} (kip-in.)	M _{nl} (kip-in.)	M _{nd} (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 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Span ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน

Grade Designation	M _{nd} (kg-cm.)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคาน (เท่า)			
		M _{nd}	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

หมายเหตุ

ASD คือ การออกแบบโดยวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design)

LRFD คือ การออกแบบโดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design)

LSD คือ การออกแบบในภาวะขีดสุด (Limit States Design)

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด 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 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นที่ออกแบบตามทฤษฎี ASD, LRED และ LSD ของเหล็ก Grade Designation ปรากฏว่าการออกแบบโดยวิธี LRED จะรับกำลังแรงดัดโดยตรงได้มากที่สุด คือ 1.50 เท่า รองลงมาเป็นค่ารับกำลังแรงดัดโดยตรงที่ออกแบบโดยวิธี LSD คือ 1.42 เท่า และค่ากำลังแรงดัดโดยตรงที่น้อยที่สุดที่ออกแบบโดยวิธี ASD คือ 1.00 เท่า ตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

2. การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของแบบจำลองคานเหล็กกรีดเย็นด้วยวิธี Finite Strip (FSM) กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ

ผลเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของแบบจำลองคานเหล็กกรีดเย็นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation G550 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 0.90 เมตร ตามตารางที่ 11 และ 12

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Span ด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง

Grade Designation	Flesure 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 8 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hats ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน

Grade Designation	M _{nd} (kg-cm.)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคาน (เท่า)			
		M _{nd}	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

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hats ที่ออกแบบตามทฤษฎี

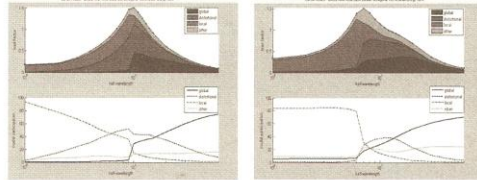
Grade Designation	Yield Stress (ksc)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี (เท่า)		
		ASD	LRFD	LSD
G550	5,500	1.00	1.50	1.42
G360	3,600	1.00	1.50	1.42
G350	3,500	1.00	1.50	1.42
G300	3,000	1.00	1.50	1.42

ตารางที่ 11 และตารางที่ 12 พบว่าการทดสอบจริงมีค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Span และหน้าตัด Top Hats ที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip และเมื่อเหล็ก Grade Designation ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุเท่ากัน ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip ให้ค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงในการออกแบบที่มากกว่าการทดสอบจริง ความแตกต่างเหล่านี้ถือได้ว่าวัสดุจริงจะมีความสามารถในการยืดหยุ่น คุณสมบัติความเหนียว (Ductility)^[2] ลดลงเมื่อนำน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เนื่องจากวัสดุจริงที่ทดสอบถึงจุดครากก่อน ในการออกแบบการประยุกต์ใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ด้วยวิธีการวิเคราะห์วิธี Finite Strip สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กกรีดเย็นควรมีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลตัวอย่างทดสอบจริง เพื่อหาค่าผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลโดยไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรีดเย็นหน้าตัด Top Hats ด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง

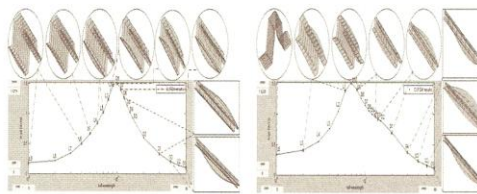
Grade Designation	Flesure Test (kg-cm.)	Finite Strip Method (FSM)		
		ASD (kg-cm.)	LRFD (kg-cm.)	LSD (kg-cm.)
G550	281.84	420.66	632.25	597.12
เปรียบเทียบการรับกำลังแรงดัด (เท่า)	1.00	1.49	2.24	2.12

3. กราฟการโก่งเดาะร่วม กราฟมาตรฐานพลังงานความเครียด และการตรวจสอบการเสียบรูปในสภาวะการใช้งานจำกัด (Key Limit State) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งเดาะแบบรวม การโก่งเดาะแบบผิวดรูป และการโก่งเดาะเฉพาะที่ ตามรูปที่ 11, 12, 13 และ 14



รูปที่ 11 กราฟการโก่งเดาะร่วมและกราฟมาตรฐานพลังงานความเครียดของแบบจำลองคานเหล็กกรัดยื่นหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550

รูปที่ 12 กราฟการโก่งเดาะร่วมและกราฟมาตรฐานพลังงานความเครียดของแบบจำลองคานเหล็กกรัดยื่นหน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550



รูปที่ 13 กราฟการโก่งเดาะของคานเหล็กกรัดยื่นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550

รูปที่ 14 กราฟการโก่งเดาะของคานเหล็กกรัดยื่นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550

รูปที่ 13 และรูปที่ 14 แสดงการเสียบรูปของคานในสภาวะการใช้งานจำกัดและค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ เพื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแต่ละสภาวะ L1 ถึง L9 แสดงการเสียบรูปของคานที่โก่งเดาะแบบเฉพาะที่ D1 ถึง D10 แสดงการเสียบรูปของคานที่โก่งเดาะแบบผิวดรูป G1 ถึง G4 แสดงการเสียบรูปของคานที่โก่งเดาะแบบรวม

จากผลการศึกษาการโก่งเดาะของคานเหล็กกรัดยื่นในสภาวะการใช้งานจำกัด พบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของคานเหล็กกรัดยื่นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFSM โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กกรัดยื่นหน้าตัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 1.50 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดัดสำหรับการโก่งเดาะแบบผิวดรูป M_{pd} ของคานเหล็กกรัดยื่นหน้าตัด Hat Shape ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.46 ถึง 1.47 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆ มีค่าโมเมนต์การโก่งเดาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กกรัดยื่นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งเดาะของแบบจำลองคานเหล็กกรัดยื่นด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้อง

ปฏิบัติการ พบว่าการทดสอบจริงมีค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงของคานเหล็กกรัดยื่นหน้าตัด Hat Shape ที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip ความแตกต่างเหล่านี้อธิบายได้ว่า วัสดุจริงจะมีความสามารถในการยืดหยุ่นมากกว่า และคุณสมบัติความเหนียว (Ductility) ลดลงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เนื่องมาจากวัสดุจริงที่ทดสอบถึงจุดครากก่อน ในส่วนการตรวจสอบการเสียบรูปในสภาวะการใช้งานจำกัดจะได้ค่า Stress และ Moment ที่ทำให้คานเหล็กกรัดยื่นถึงจุดครากครั้งแรก และค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งเดาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ เป็นจำนวนที่เท่าที่แรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะของ M_y นำค่าที่ได้ไปใช้ในชุดสมการวิธีกำลังรับแรงโดยตรง โดยค่าการรับกำลังดัดที่ได้ตามทฤษฎี $M_y \geq \min(M_{re}, M_{ri}, M_{rd})$ เมื่อคำนวณกับค่า Factor สำหรับการออกแบบแล้วได้ค่ากำลังรับแรงดัดโดยตรงที่ไม่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเกินสภาวะการใช้งานจำกัดในการออกแบบ การประยุกต์ใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ด้วยการวิเคราะห์วิธี Finite Strip

สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กกรัดยื่นควรมีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการทดสอบจริง เพื่อหาค่าผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่ดี สำหรับการทำนายหรือหาค่ากำลังรับแรงของชิ้นส่วน โดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรม การโก่งเดาะแบบยืดหยุ่น ขั้นตอนดังกล่าวนี้จะไม่จำเป็นต่อองค์การคำนวณค่าความกว้างประสิทธิภาพ หรือการคำนวณแบบซ้ำไปซ้ำมา แต่ทว่าใช้เพียงแค่ค่าคุณสมบัติรวม และพฤติกรรมการโก่งเดาะแบบยืดหยุ่นของหน้าตัด เพื่อที่จะทำนายหรือหาค่ากำลังรับแรงในการประยุกต์ใช้การออกแบบโครงสร้างผนังบาง (Thin-Walled Structures)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้ารัตนธรรมาวุธวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ 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.



วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา

ISSN 0857-7951

ปีที่ 21 ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2553

สารบัญ

สาขาวิศวกรรมโยธา

การโก่งเคาะของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นสำหรับโครงสร้างผนังบาง 1

Physical Model Simulations of Solar Thermal Energy Storage in Basaltic Rock Fills 11

การประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นตรงสำหรับการควบคุมการตัดเหล็กรูปพรรณ 25

ผลของการเติมของเสียนทรีย์ที่มีต่อลักษณะการชะละลายจากดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง 35

อิทธิพลของมาตรการจัดการความต้องการเดินทางที่มีต่อความตั้งใจเปลี่ยนไปใช้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน
ของผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลในกรุงเทพมหานคร: กรณีศึกษามาตรการเชิงบังคับและมาตรการเชิงสนับสนุน 46

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยเสี่ยงต่อระยะเวลาก่อสร้างถนน 56

อิทธิพลของน้ำต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของฐานรากเข็มพืด 65

Prediction of Net Expansion of Expansive Concrete under Restraint 75

การศึกษาคุณลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ตั้งด้วยการตรวจวัดคลื่นขนาดเล็กที่ผิวดิน 85

Evaluation on use of Half-Cell Potential for Measuring Corrosion Potential of Steel Bars in Reinforced
Concrete Subjected to Carbonation 92

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

การศึกษาเปรียบเทียบการวางผังโรงงานด้วยวิธีการทางพันธุกรรมและวิธี Differential Evolution 99

การลดความสูญเปล่าในโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์น็อคดาวน์ 109

การศึกษาความรุนแรงของการระเบิดจากการเชื่อมโดยใช้แก๊ส 117

การปรับปรุงกระบวนการขนส่งเพื่อลดต้นทุนของโรงงานชิ้นส่วนอะไหล่ยนต์ 123

การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตชิ้นส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 133

สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

การนำของเสียประเภทพลาสติกมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยใช้
ผงหินปูน-ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน 141



RESEARCH AND DEVELOPMENT JOURNAL OF THE ENGINEERING INSTITUTE OF THAILAND

UNDER H.M. THE KING'S PATRONAGE

ISSN 0857-7951

Volume 21 No. 3, 2010

Content

Civil Engineering

Buckling of Cold-Formed Steel Beam for Thin-Walled Structures	1
Physical Model Simulations of Solar Thermal Energy Storage in Basaltic Rock Fills	11
The Application of Linear Programming for Controlling of Structural Steel Cutting	25
Organic Waste Amendments Effect on Leaching Characteristics from Highly Pb-Contaminated Soil	35
Influences of Travel Demand Management Measures on Intention to Use Rail Rapid Transit of Private Car Users in Bangkok: A Case Study of Coercive and Non-coercive Measures	46
Analysis of Risk Factors Affecting Highway Construction Duration	56
The Effect of Water on the Capacity of Sheet Pile Foundation	65
Prediction of Net Expansion of Expansive Concrete under Restraint	75
Exploration of Site Characteristics of Subsoils by Microtremor Observations	85
Evaluation on use of Half-Cell Potential for Measuring Corrosion Potential of Steel Bars in Reinforced Concrete Subjected to Carbonation	92

Industrial Engineering

A Comparison of Plant Layout using Genetic Algorithm and Differential Evolution	99
Loss Reduction in Knockdown Furniture Factory	109
Pernicious Study of Explosion from Oxy-Fuel Gas Welding	117
Transportation Process Improvement for Cost Reduction in Automotive Spare Part Factory	123
Efficiency Improvement in Hard Disk Drive Components Manufacturing	133

Environmental Engineering

Utilization of Label Waste for making Interlocking Concrete Paving Block by using Limestone Powder-Cement as Binder	141
---	-----

Published by The Engineering Institute of Thailand
under His Majesty The King's Patronage, Bangkok, Thailand.

การโก่งคาะของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นสำหรับโครงสร้างผนังบาง

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

บทความวิชาการนี้เป็นการศึกษาการรับแรงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Finite Strip แบบทั่วไปและแบบจำกัดขอบเขต สำหรับการวิเคราะห์ทางเสถียรภาพของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น อันเนื่องมาจากเหล็กขึ้นรูปเย็นที่มีความบาง ก่อให้เกิดความยุ่งยากต่อปัญหาทางด้านความไร้เสถียรภาพของชิ้นส่วน โดยเฉพาะสำหรับรูปแบบการโก่งคาะที่มีความซับซ้อน โดยใช้แบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 และ G300 ศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์และตรวจสอบการเสถียรภาพในสภาวะการใช้งานจำกัด (key limit state) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโก่งคาะแบบรวม การโก่งคาะแบบผิดรูป และการโก่งคาะเฉพาะที่ โดยใช้โปรแกรม CUFSM คำนวณค่ากำลังรับแรงแบบ “โดยตรง” เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาที่ได้คือการเปรียบเทียบกำลังแรงคดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี ได้แก่ ASD, LRFD และ LSD การเปรียบเทียบกำลังแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธี 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) ผลิตร่วมกับการรีดขึ้นรูปจากเหล็กกล้ากำลังสูงที่เคลือบกันสนิมด้วยสังกะสีหรือเหล็กกล้าประสมบางที่เป็นแผ่น หรือเส้นมีความหนา 0.4 ถึง 25 มม. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้กำลังบรรทุกน้ำหนักสำหรับอาคาร เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรง ติดตั้งได้สะดวกรวดเร็ว ประหยัดเวลา เนื่องจากเหล็กขึ้นรูปเย็นมีความบางของหน้าตัดก็เพิ่มขีดจำกัดการออกแบบโครงสร้างอย่างมาก ต้องมีการควบคุมสัดส่วนและรายละเอียดต่างๆของอาคารอย่างพิถีพิถันอีกทั้งการคำนวณออกแบบมีความซับซ้อน

RECEIVED 14 February, 2010

ACCEPTED 7 September, 2010

กว่าเหล็กรูปพรรณทั่วไป แต่การออกแบบยังไม่เป็นที่คุ้นเคยของผู้ออกแบบทั่วไป ประกอบกับการคำนวณเพื่อกำหนดรับน้ำหนักของเหล็กชนิดนี้ มีขั้นตอนการทำที่ยุงยากเมื่อต้องคำนวณด้วยมือ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจถึงเสถียรภาพของหน้าตัดของชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยการใช้วิธี Finite Strip แบบทั่วไปและแบบถูกจำกัดขอบเขตซึ่งได้นำไปใช้อย่างประสบความสำเร็จในโปรแกรม CUFSM การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงพีชคณิตผสมผสานกับการระบุรูปแบบของการโก่งคดอย่างถูกต้องแม่นยำนั้นถือว่าเป็นขั้นบันไดแรกสำหรับการก้าวไปสู่การประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบได้แก่ 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

การออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยการใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง ของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยหรืออเมริกา (AISI) [2]

การออกแบบคานเหล็กขึ้นรูปเย็น

ตารางที่ 1 ค่าFactor Ω และ ϕ ในการออกแบบ

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

การโก่งคดแบบบิดตัวด้านข้าง

กำลังรับแรงคดระดับ M_{ue} สำหรับการโก่งคดแบบบิดตัวด้านข้าง คือ

สำหรับ $M_{ue} < 0.56M_y$
 $M_{ue} = M_{ue}$ (1)

สำหรับ $2.78M_y \geq M_{ue} \geq 0.56M_y$
 $M_{ue} = \frac{10}{9} M_y \left(1 - \frac{10M_y}{36M_{cre}} \right)$ (2)

สำหรับ $M_{ue} > 2.78M_y$
 $M_{ue} = M_y$ (3)

$M_y = S_x F_y$ (4)

โดย S_x เป็นค่าโมเมนต์ของหน้าตัดรวมเมื่อผิวบนสุดหรือผิวล่างสุดนั้นเกิดการครากครั้งแรก

M_{ue} = ค่าแรงกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งคดแบบบิดหมุนในรูปแบบการโก่งคดแบบบิดตัวด้านข้าง ซึ่งได้จากการคำนวณ โดยโปรแกรม CUFSM

การโก่งคดเฉพาะที่

กำลังรับแรงคดระดับ M_{ue} สำหรับการโก่งคดแบบเฉพาะที่ คือ

สำหรับ $\lambda_c \leq 0.776$
 $M_{ue} = M_{ne}$ (5)

สำหรับ $\lambda_c > 0.776$
 $M_{ue} = \left(1 - 0.15 \left(\frac{M_{crit}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right) \left(\frac{M_{crit}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne}$ (6)

โดย $\lambda_c = \sqrt{M_{ne} / M_{crit}}$ (7)

M_{ue} = ค่าแรงคดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งคดแบบเฉพาะที่บิดหมุน ซึ่งได้จากการคำนวณ โดยโปรแกรม CUFSM

M_{ne} สามารถหาค่าจำกัดความได้ตามสมการที่ 1

การโก่งคดแบบบิดรูป

กำลังรับแรงดัดระบุ M_{sd} สำหรับการโก่งเดาะแบบผิวดรูป คือ
สำหรับ $\lambda_a \leq 0.673$

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

สำหรับ $\lambda_a > 0.673$

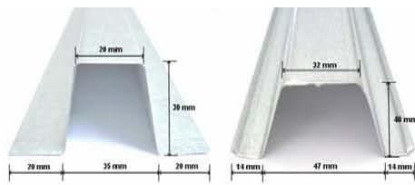
$$M_{sd} = \left(1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad (9)$$

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

M_{crd} = ค่าแรงดัดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่น 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



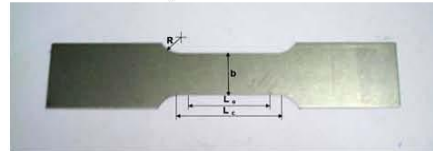
รูปที่ 2 หน้าตัดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นที่เลือกใช้ในการทดสอบ

5. การทดสอบหาคคุณสมบัติของวัสดุในทางวิศวกรรม

การทดสอบหาคคุณสมบัติของวัสดุในทางวิศวกรรม (Property of Materials) โดยใช้การทดสอบแรงดึงของเหล็กโครงสร้าง (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) V 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

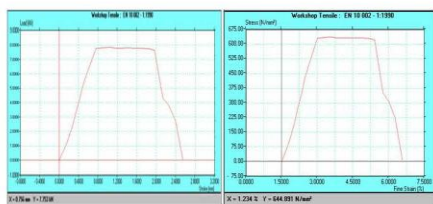
ความหนา	จรวด	จรวด	จรวด	จรวด	จรวด
t	L_g	L_c	ของ L_0	จรวด	
0.45	25 ± 0.7	50 ± 0.5	ประมาณ 60	1E	
0.45	25 ± 0.7	20 ± 0.5	ประมาณ 220	2E	

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

2. ขีดเส้นทำเครื่องหมายระยะห่างประมาณ 50 มิลลิเมตร ที่ชิ้นทดสอบเพื่อใช้ตรวจสอบระยะการยื่นตัว ก่อนและหลังดึงชิ้นทดสอบ
 3. นำชิ้นทดสอบเข้าติดตั้งในเครื่องดึง แล้วทำการดึงชิ้นทดสอบ
 - บันทึกค่าแรงดึงและการยืดตัว จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน
 - นำชิ้นตัวอย่างมาต่อชนกัน ให้สนิท แล้ววัดค่าการยืดตัว
 - นำค่าต่างๆที่บันทึกไว้ไปคำนวณและสร้างกราฟความสัมพันธ์
- ตามรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึง ข) หัวจับทำการดึงชิ้นทดสอบ



ค) กราฟ Load กับ การขีดตัว ง) กราฟ Stress กับ Strain

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ การขีดตัว และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain

6. การกำหนดค่าโมดูลัสของการขีดหยุ่น (Modulus of elasticity) ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ration) และค่าต่างๆ สำหรับใช้ในการสร้างแบบจำลองการทดสอบ ดังนี้คือ 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. การทดสอบกำลังค้ดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็น

การทดสอบกำลังค้ดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็น (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) และค่าโมเมนต์ค้ดสูงสุดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip (FSM)

ขั้นตอนการทดสอบกำลังค้ดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็น

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



รูปที่ 6 เครื่องกค้ดชื่อ Testometric และเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ



ก) เครื่อง Transducer Displacement ข) เครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger

รูปที่ 7 เครื่อง Transducer Displacement Sensor และ Data Logger

3. ติดตั้งเครื่องมือวัดในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนตัวและต้องการผลการเสีรูปร่างของคานเหล็กขึ้นรูปเย็น ในขนาดรับแรงค้ดค้ดตามรูปที่ 8



ก) ติดตั้งเครื่องมือวัดคาน Top Span ข) ติดตั้งเครื่องมือวัดคาน Top Hats

รูปที่ 8 ติดตั้งเครื่องมือวัดกลางคานวัดการเคลื่อนตัวและตำแหน่งที่มีการเสีรูปร่างของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นขนาดรับแรงค้ดค้ด

4. ติดตั้งตัวอย่างทดสอบบนจตุรรองรับ
5. ทำการคคน้ำหนักบรรทุกที่กึ่งกลางคาน อ่านค่าแรงกระทำทุกๆ 0.50 กิโลกรัม จนถึง 20 กิโลกรัม

6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Load) กับ เหล็กขึ้นรูปยื่น
ระยะแอ่นตัว (Deflection) และหาค่าโมเมนต์ค้ดสูงสุดของคาน

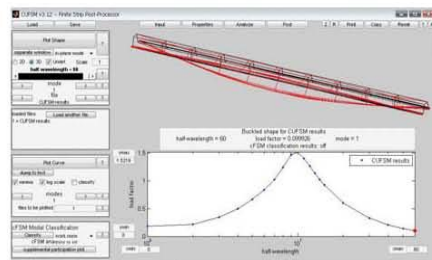
7. การวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งคาะของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นโดยใช้โปรแกรม CUFISM

CUFISM หรือ Cornell University – Finite Strip Method มี ข้อมูลใน Menu Bar ของ Properties โปรแกรมจะคำนวณค่าให้
ขั้นตอนการวิเคราะห์การโก่งคาะของคานเหล็กขึ้นรูปยื่น เองทำการป้อนค่า f_y ถ้าข้อมูลหน่วยเป็น ksc ให้เปลี่ยนเป็น ksi
ดังต่อไปนี้ โดยใช้ค่า 70.30814062 ทหาร แล้วคำนวณค่า P และ M ที่ทำ
ให้โครงสร้างถึงคราก (Yield) ครั้งแรก กดที่ Menu Bar ของ

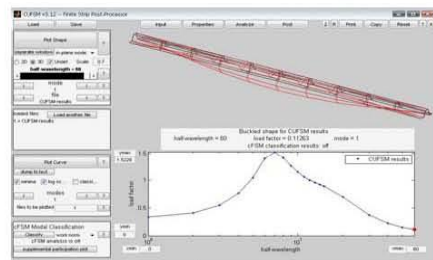
1. เริ่มวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งคาะของคานหน้าคัด Top Span และ Top Hats โดยทำการ Input ข้อมูลของคานที่ทดสอบ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) พิกัดจุด (Nodes) ส่วนประกอบชิ้นส่วน (Elements) ความยาวและช่วงความละเอียดที่วิเคราะห์ (Lengths) ในส่วนของพิกัดจุด (Nodes) เกี่ยวกับ Stress ถ้าไม่มีข้อมูลให้ใส่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

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 การวิเคราะห์เสถียรภาพการโก่งคาะของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้โปรแกรม CUFISM ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) โดยใช้ และ G300 ความยาวช่วงคานที่พิจารณา 1.50 เมตร ติดตั้งบนจุดรองรับเอียงทำมุม 0 องศา ตามตารางที่ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10
แบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าคัด Top Span และ Top Hats ของเหล็ก Grade Designation ได้แก่ G550, G360, G350 10

ตารางที่ 3 Load Factor สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงค้ดโดยครั้งที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าคัด Top Span

Grade Designation	Yield Stress (ksc)	Yield Stress (ksi)	Load Factor				My (kip-in.)	My (kg-cm.)		
			Local Buckling	l/w	Distortional Buckling	l/w			Global Buckling	l/w
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 สำหรับการออกแบบกำลังรับแรงคด โดยตรงที่คำนวณด้วยวิธี FSM ของแบบจ็อลอกานเหล็กชั้นรูปยื่นหน้าคัต 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 หน่วยแรงคดที่จุดคราก

Global Bucking คือ การ โกงคดแบบรวม

Load Factor คือ ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกของกราฟที่การ โกงคดจะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสถานะ

hw หรือ half-wavelength คือ ครึ่งความยาวคลื่นของการ โกงคดจะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสถานะ

Local Bucking คือ การ โกงคดเฉพาะที่

My คือ ค่าโมเมนต์คดที่ถึงถึงจุดครากครั้งแรก (Yield Moment)

Distortional Bucking คือ การ โกงคดแบบบิดรูป

ตารางที่ 5 กำลังรับแรงคด โดยตรงของจกานเหล็กชั้นรูปยื่นหน้าคัต Top Span

Grade Designation	M _{ne} (kip-in.)	M _{ne} (kip-in.)	M _{nt} (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 กำลังรับแรงคด โดยตรงของจกานเหล็กชั้นรูปยื่นหน้าคัต Top Hats

Grade Designation	M _{ne} (kip-in.)	M _{ne} (kip-in.)	M _{nt} (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 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคด โดยตรงของจกานเหล็กชั้นรูปยื่นหน้าคัต Top Span ที่กำลังคูณสมบัตินิวคุดต่างกัน

Grade Designation	M _{nt} (kg-cm.)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงคด โดยตรงของจกาน (เท่า)			
		M _{nt}	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

หมายเหตุ

ASD คือ การออกแบบ โดยวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design)

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคด โดยตรงของจกานเหล็กชั้นรูปยื่นหน้าคัต Top Hats ที่กำลังคูณสมบัตินิวคุดต่างกัน

Grade Designation	M _{nt} (kg-cm.)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงคด โดยตรงของจกาน (เท่า)			
		M _{nt}	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

LRFD คือ การออกแบบ โดยวิธีค้ำคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design)

LSD คือ การออกแบบในภาวะขีดสุด (Limit States Design)

ตารางที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงคดสำหรับการโค้งเกาะแบบผิกรูป M_{nd} ของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าคัด Top Span ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การโค้งเกาะแบบผิกรูปยี่ดหุ่ย่นมากที่สุด 1.46 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆมีค่าโมเมนต์การโค้งเกาะแบบผิกรูปของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นจะมีค่าใกล้เคียงกัน และตารางที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงคดสำหรับการโค้งเกาะแบบผิกรูป M_{nd} ของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าคัด Top Hats ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การโค้งเกาะแบบผิกรูปยี่ดหุ่ย่นมากที่สุด 1.47 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆมีค่าโมเมนต์การโค้งเกาะแบบผิกรูปของคานเหล็กขึ้นรูป

ยื่นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่ากำลังรับแรงคดสำหรับการโค้งเกาะ ที่เลือกใช้ในการออกแบบตามทฤษฎี $M_u \geq \text{Min}(M_{ue}, M_{us}, M_{ud})$ เมื่อคำนวณกับค่า Factor สำหรับการออกแบบแล้วได้ค่ากำลังรับแรงคดโดยตรงที่ไม่ทำให้เกิดการโค้งเกาะเกินสภาวะการใช้งานจำกัดในการออกแบบ และเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นที่ กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน จึงทำให้กำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นที่เปรียบเทียบมีค่าที่พิจารณาไม่ต่างกัน เนื่องมาจากการเลือกใช้ค่าค่าสุดเป็นค่าที่ยอมให้ในการออกแบบ

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าคัด Top Span ที่ออกแบบตามทฤษฎี

Grade Designation	Yield Stress (ksi)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี (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 10 เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าคัด Top Hats ที่ออกแบบตามทฤษฎี

Grade Designation	Yield Stress (ksi)	เปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานที่ออกแบบตามทฤษฎี (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 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นที่ออกแบบตามทฤษฎี ASD, LRED และ LSD ของเหล็ก Grade Designation ปรากฏว่าการออกแบบโดยวิธี LRED จะรับกำลังแรงคดโดยตรงได้มากที่สุด

คือ 1.50 เท่า รองลงมาเป็นค่ารับกำลังแรงคดโดยตรงที่ออกแบบโดยวิธี LSD คือ 1.42 เท่า และค่ากำลังแรงคดโดยตรงน้อยที่สุด ที่ออกแบบโดยวิธี ASD คือ 1.00 เท่า ตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

8.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการโค้งเกาะของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปยื่นด้วยวิธี Finite Strip (FSM) กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ

ผลเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพการโค้งเกาะของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปยื่นด้วยวิธี Finite Strip Method (FSM) กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงใน

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

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบค่ารับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด 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
เปรียบเทียบการรับกำลังแรงคัต(เท่า)	1.00	1.58	2.38	2.25

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบค่ารับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Hats ด้วยวิธี FSM กับผลการทดสอบตัวอย่างจริง

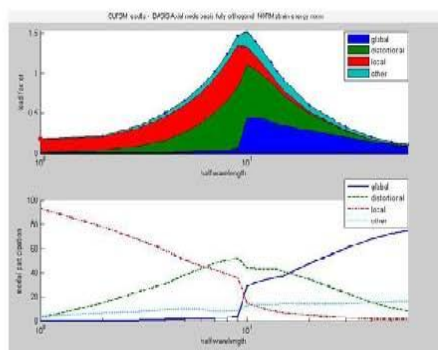
Grade Designation	Flexure Test (kg-cm)	Finite Strip Method (FSM)		
		ASD (kg-cm)	LRFD (kg-cm)	LSD (kg-cm)
G550	281.84	420.66	632.25	597.12
เปรียบเทียบการรับกำลังแรงคัต(เท่า)	1.00	1.49	2.24	2.12

ตารางที่ 11 และตารางที่ 12 พบว่าการทดสอบจริงมีค่ากำลังรับแรงคัต โดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Span และหน้าตัด Top Hats ที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip และเมื่อเหล็ก Grade Designation ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุเท่ากันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip ให้ค่ากำลังรับแรงคัต โดยตรงในการออกแบบที่มากกว่าการทดสอบจริง ความแตกต่างเหล่านี้อธิบายได้ว่า วัสดุจริงจะมีความสามารถในการยืดหยุ่น คุณสมบัติความเหนียว (Ductility) [๖] ลดลงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite

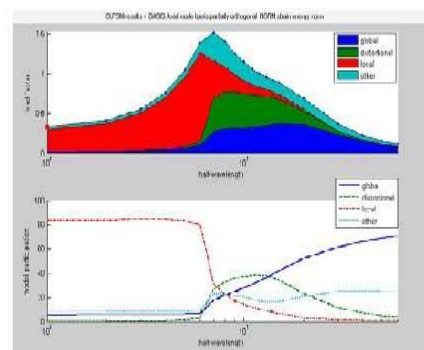
strip จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เนื่องจากวัสดุจริงที่ทดสอบถึงจุดครากก่อน ในการออกแบบการประยุกต์ใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ด้วยการวิเคราะห์วิธี Finite Strip สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กขึ้นรูปยื่นควรมีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลตัวอย่างทดสอบจริง เพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้

8.3 กราฟการโค้งเดาะร่วม กราฟมาตรฐานพลังงาน ความเครียด และการตรวจสอบการเสียรูปในสถานะการใช้งานจำกัด (key limit state) ทั้งสามแบบ ได้แก่ การโค้งเดาะแบบ

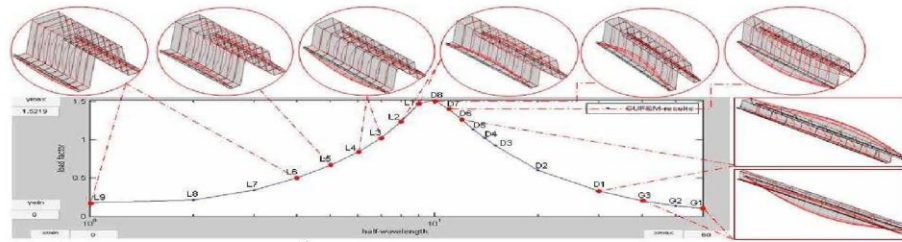
รวม การโค้งเดาะแบบคิดรูป และการโค้งเดาะเฉพาะที่ ตามรูปที่ 11, 12, 13 และ 14



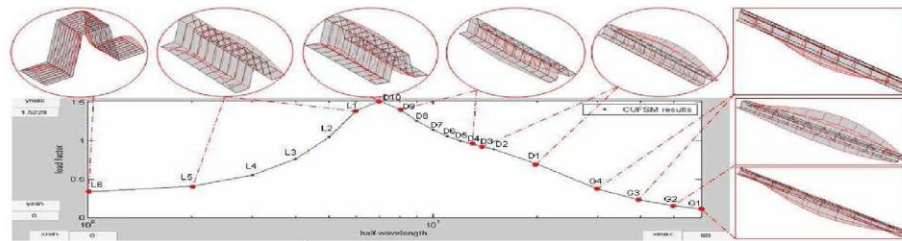
รูปที่ 11 กราฟการโค้งเดาะร่วมและกราฟมาตรฐานพลังงาน ความเครียดของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550



รูปที่ 12 กราฟการโค้งเดาะร่วมและกราฟมาตรฐานพลังงาน ความเครียดของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปยื่นหน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550



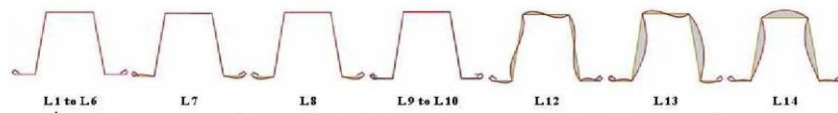
รูปที่ 13 กราฟการโก่งคดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Span เหล็กเกรด G550



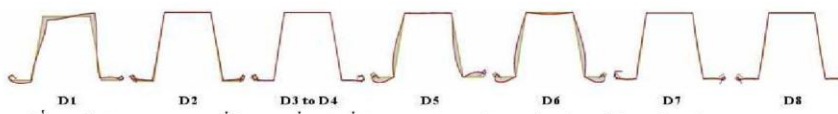
รูปที่ 14 กราฟการโก่งคดของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นในสภาวะการใช้งานจำกัดของแบบจำลองคานหน้าตัด Top Hats เหล็กเกรด G550

รูปที่ 13 และรูปที่ 14 แสดงการเสถียรของคานในสภาวะการ
ใช้งานจำกัดและค่า Load Factor ของกราฟที่การโก่งคด ณ
จุดวิกฤตแต่ละสภาวะ เพื่อผลหน้าที่ได้ไปคำนวณหาค่าแรงคด
กระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งคดแต่ละสภาวะ L1 ถึง L9

แสดงการเสถียรของคานที่โก่งคดแบบเฉพาะที่ D1 ถึง D10
แสดงการเสถียรของคานที่โก่งคดแบบผิดรูป G1 ถึง G4
แสดงการเสถียรของคานที่โก่งคดแบบรวม



รูปที่ 15 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดคดและเกิดการเสถียรแบบ โกงคดเฉพาะที่ (Local Buckling)



รูปที่ 16 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดคดและเกิดการเสถียรแบบ โกงคดผิดรูป (Distortional Buckling)



รูปที่ 17 หน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดคดและเกิดการเสถียรแบบ โกงคดรวม (Global Buckling)



รูปที่ 18 การกระจายหน่วยแรงในหน้าตัดคาน Top Span ที่เกิดการเคลื่อนตัวเมื่อรับแรงกดคดและเกิดการเสถียรแบบ โกงคดรวม

9. บทสรุป

จากผลการศึกษากาการ โกงเคาะของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นในสถานะการใช้งานจำกัด พบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพการ โกงเคาะของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธี 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 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงคดสำหรับกาการ โกงเคาะแบบผิวดรูป M_{xx} ของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ที่กำลังคุณสมบัติวัสดุต่างกัน ของเหล็กที่ใช้ในการออกแบบปรากฏว่าเหล็ก Grade Designation G550 รับโมเมนต์การ โกงเคาะแบบผิวดรูปยืดหยุ่นมากที่สุด 1.46 ถึง 1.47 เท่า ส่วนเหล็ก Grade Designation อื่นๆมีค่าโมเมนต์การ โกงเคาะแบบผิวดรูปของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการ โกงเคาะของแบบจำลองคานเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธี Finite Strip กับผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ พบว่าการทดสอบจริงมีกำลังรับแรงคดโดยตรงของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นหน้าตัด Hat Shape ที่น้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip ความแตกต่างเหล่านี้อธิบายได้ว่า วัสดุจริงมีความสามารถในการยืดหยุ่นมากกว่าและคุณสมบัติความเหนียว (Ductility) ลดลงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Strip จะมีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เนื่องจากวัสดุจริงที่ทดสอบถึงจุดครากก่อน ในส่วนการตรวจสอบการเสถียรภาพในสถานะการใช้งานจำกัดจะได้ค่า Stress และ Moment ที่ทำให้คานเหล็กขึ้นรูปเย็นถึงจุดครากครั้งแรก และค่า Load Factor ของกราฟที่การ โกงเคาะ ณ จุดวิกฤตแต่ละสถานะ เป็นจำนวนที่เท่าที่แรงคดกระทำวิกฤตที่ทำให้เกิดการ โกงเคาะของ M_y นำค่าที่ได้ไปใช้ในหาคสมการวิธีกำลังรับแรงโดยตรง โดยค่าการรับกำลังคดที่ได้ตามทฤษฎี $M_u \geq \text{Min}(M_{ux}, M_{uy}, M_{uz})$ เมื่อคำนวณกับค่า Factor สำหรับการออกแบบแล้วได้กำลังรับแรงคดโดยตรงที่ไม่ทำให้เกิดการ โกงเคาะเกินสถานะการใช้งานจำกัดในการออกแบบ การประยุกต์ใช้วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ด้วยการวิเคราะห์วิธี Finite Strip สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้าง

เหล็กขึ้นรูปเย็นควรมีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลตัวอย่างทดสอบจริง เพื่อหาผลการวิเคราะห์ที่มีความสอดคล้องกันเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล โดยที่ไม่ต้องทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อหาผลการวิเคราะห์ได้ สำหรับการ ทำนายหรือหาค่ากำลังรับแรงของชิ้นส่วน โดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการ โกงเคาะแบบยืดหยุ่น ชิ้นตอนดังกล่าว นั้นจะไม่จำเป็นต้องอาศัย การคำนวณค่าความกว้างประสิทธิภาพ หรือการคำนวณแบบซ้ำไปซ้ำมาแต่ทว่า ใช้เพียงแค่ค่าคุณสมบัติรวม และ พฤติกรรมการ โกงเคาะ แบบยืดหยุ่นของหน้าตัด เพื่อที่จะทำนายหรือหาค่ากำลังรับแรง ในการประยุกต์ใช้การออกแบบโครงสร้างผนังบาง (Thin - Walled Structures)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิริธร 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.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายมนตรี เย็นเปี่ยม
วัน เดือน ปีเกิด	27 มีนาคม 2511
ที่อยู่	6/112 หมู่ 6 หมู่บ้าน ราชพฤกษ์ ถนน คลอง 3 ตำบล คลอง 3 อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12120
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เมื่อ พ.ศ.2539
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2548 - 2549	วิศวกรออกแบบโครงสร้าง บริษัท เต็มโก้ จำกัด มหาชน
พ.ศ. 2549 - 2552	ผู้บริหาร/ผู้จัดการโครงการ บริษัท สโตนเฮนจ์ จำกัด และบริษัท ซีอีแอล เอ็นจิเนียส์ จำกัด
พ.ศ. 2552 – ปัจจุบัน	ที่ปรึกษาโครงการก่อสร้างอาคารศูนย์บริการทางการแพทย์และ ศูนย์วิจัยเฉลิมพระเกียรติ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม บริษัท ฟิวเจอร์ เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด
ผลงานวิจัย	
	มนตรี, และมาโนช, “ผลกระทบรูปแบบการขึ้นลอนต่อการตัดของคานเหล็กกรีดเย็น (รูปทรง หวมก),” ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, วันที่ 12 – 14 พฤษภาคม 2553, ณ โรงแรม สุนีย์ แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชั่น เซนเตอร์, จังหวัดอุบลราชธานี, 2553. หน้า 255.
	มนตรี, และมาโนช, “การโค้งเคาะของคานเหล็กกรีดเย็นในสภาวะการใช้งานจำกัด,” วารสาร เพื่อความก้าวหน้าในวงการวิศวกรรมและอุตสาหกรรม Engineering Today, ปีที่ 8, ฉบับที่ 90, มิถุนายน 2553, หน้า 58-64.
	มนตรี, และมาโนช, “การโค้งเคาะของคานเหล็กขึ้นรูปเย็นสำหรับโครงสร้างผนังบาง,” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา วสท, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน 2553, หน้า 1-10.