



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการทดสอบการโก่งเดาะของเสาเหล็กกริดเป็นหน้าตัดทอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
ปลายยึดแน่น ภายใต้กำลังรับแรงอัดตามแนวแกน

Experimental Study on Fixed-end Column Buckling of Cold-formed Steel Rectangular
Tube Section Under Concentric Compression

นามผู้วิจัย นายอภิย์ เบ็ญจพงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิจพัฒน์ ภู่วรรณ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์ต่อกุล กาญจนลัย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการทดสอบการโก่งเดาะของเสาเหล็กกรีดเย็นหน้าตัดทอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายยึดแน่น
ภายใต้กำลังรับแรงอัดตามแนวแกน

Experimental Study on Fixed-end Column Buckling of Cold-formed Steel
Rectangular Tube Section Under Concentric Compression

โดย

นายอภิรักษ์ เบ็ญจพงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อกภัย เบ็ญจพงษ์ 2554: การศึกษาการทดสอบการโก่งเคาะของเสาเหล็กกริดยื่นหน้าตัด
ทอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายยึดแน่นภายใต้กำลังรับแรงอัดตามแนวแกน ปริญญาวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิจพัฒน์ ภู่วรรณ, Ph.D.
143 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นบทความที่วิจัยเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเคาะของเสาเหล็กกริดยื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายใต้กำลังการรับแรงอัดที่มีฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่นทั้งสองด้าน โดยหน้าตัดที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นหน้าตัดที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างและหน้าตัดที่ไม่มี ความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างที่เกิดจากการผลิต เพื่อให้เกิดพฤติกรรมที่ชัดเจนยิ่งขึ้นตัวอย่างจะถูก ทำให้เกิดการเสียรูปเป็นแนวโค้งที่พื้นผิวด้านหนึ่งของหน้าตัดสี่เหลี่ยม ผลจากการทดสอบทั้งหมด ได้นำมาเพื่อเปรียบเทียบกับกำลังการรับแรงอัดตามมาตรฐานการออกแบบ AISI และศึกษา พฤติกรรมการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดที่พฤติกรรมการโก่งเคาะเฉพาะที่และหลังการโก่งเคาะ เฉพาะที่ รวมไปถึงรูปแบบการวิบัติของเสาในแต่ละขนาด จากการศึกษาพบว่าเสาที่ไม่มีความ สมบูรณ์ทางด้านรูปร่างที่เกิดจากการผลิตในรูปแบบที่พิจารณาจะมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าเสาที่มี ความสมบูรณ์ของหน้าตัด โดยรูปแบบการวิบัติของเสาทั้งสองมีลักษณะใกล้เคียงกัน

Apai Benchapong 2011: Experimental Study on Fixed-end Column Buckling of Cold-formed Steel Rectangular Tube Section Under Concentric Compression. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Kitjapat Phuvoravan, Ph.D. 143 pages.

The research presents research on the buckling behavior of cold-formed steel rectangular tubular columns which is subjected to compression between fixed ends. The effects of imperfect sections from manufacturing process have been taken into consideration in the test specimens. The effect of imperfection is amplified in order to better investigate the behavior by making one side of rectangular specimen curved. All the experimental results are compared with the compressive design strength according to the AISI. The distributions of stress in the test specimens were also studied at the instances of local buckling and post-local buckling. From the studies, it is shown that the considered pattern of geometry imperfection from manufacturing process can increase the column strength. Nonetheless, the failure mode is similar to that of perfect columns.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความกรุณาของคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิจพัฒน์ ภู่วรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้สละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำ ตรวจสอบ แก้ไข และคอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านค่าใช้จ่าย และในด้านการอบรมสั่งสอนในด้านวิชาการและในด้านการใช้ชีวิตประจำวันซึ่งมีความจำเป็นในการดำเนินชีวิตและการทำงาน จนกระทั่งกระผมได้หล่อหลอมแนวความคิดและสติปัญญาวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จเรียบร้อยสมบูรณ์, ศาสตราจารย์ต่อกุล กาญจนาลัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในเชิงวิชาการทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และได้ให้โอวาทในการดำรงชีวิตในหน้าที่การงาน, ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ในด้านวิชาการ การทำงาน ทั้งในด้านการงานวิจัย และการทำงานในวิชาชีพ พร้อมทั้งได้อบรมสั่งสอน ด้านคุณธรรม และจริยธรรม ให้เป็นคนดีเพื่อออกไปจะได้ทำประโยชน์ให้สังคม และประเทศชาติ, รองศาสตราจารย์ ชวเลข วณิชเวทิน ผู้ทรงคุณวุฒิสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณบริษัทแปซิฟิกไพท์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุเหล็กกรีดยึดที่นำมาใช้ในการทดสอบ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องเครื่องมือทดสอบ รวมถึงความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัย

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อธรรมบุญ คุณแม่ณฤตยา และญาติพี่น้อง ทุกๆ ท่าน ที่ให้กำลังใจฟันฝ่าอุปสรรคปัญหาต่างๆ ในการดำรงชีวิตและการเรียนและได้ให้การสนับสนุนช่วยเหลือปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดำรงชีพ และดำเนินชีวิตที่ถูกต้องจนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จกับเป้าหมายที่ตั้งไว้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณดีทั้งปวงแก่ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ผู้มีพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และเพื่อนๆ ทุกคน

อภิษฎ์ เบ็ญจพงศ์

ตุลาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	40
ผลและวิจารณ์	50
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก กำลังรับแรงอัดของเหล็กรีดเย็น	98
ภาคผนวก ข ตัวอย่าง หน้าตัดต่อเสารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	134
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	143

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงขนาดของตัวอย่างเสาที่นำมาทดสอบ	43
2	ระยะที่เกิดจากการทำให้เสียรูปจากผิวระนาบเดิม	45
3	คุณสมบัติหน้าตัดของเสาเหล็กกรีดเย็น	45
4	คุณสมบัติของชิ้นส่วนแรงดึงของเสา R60-1 และ R60-2	51
5	คุณสมบัติของชิ้นส่วนแรงดึงของเสา R100-1 และ R100-2	53
6	คุณสมบัติของชิ้นส่วนแรงดึงของเสา R150-1 และ R150-2	54
7	หน่วยแรงการโก่งเดาะที่มีฐานรอง 2 ชนิด	57
8	หน่วยแรงการโก่งเดาะที่มีฐานรอง 2 ชนิดที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์	59
9	การเปรียบเทียบหน่วยแรงการโก่งเดาะแต่ละวิธี	60
10	น้ำหนักที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่	82
11	การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณตามมาตรฐาน AISI	8
12	การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณตามมาตรฐาน AISI*	84
13	การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	85
14	การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเสาที่ไม่สมบูรณ์	86
15	เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่หาได้ในแต่ละวิธี	86
ตารางผนวกที่		
ก1	กำลังรับแรงอัดของเหล็กกรีดเย็น R60-1, R60-2	95
ก2	กำลังรับแรงดึงของเหล็กกรีดเย็น R100-1, R100-2	113

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด	9
2	กราฟของเค้น-ความเครียดของเหล็ก G450 มาตรฐาน AS 1397	11
3	กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็ก G350 ผลิตตาม AS 1163	11
4	การวัดความเหนียว	12
5	รูปตัดตามยาวของหน้าตัดผนังและหลังคา	14
6	นวัตกรรมของหน้าตัด Supazed TM	14
7	แผ่นคลุมหลังคา Kliplok	15
8	การทาบแปที่รองรับพุก	15
9	หน้าตัดของชั้นวางของ	16
10	หน้าตัดของชั้นวางของ	17
11	การทดสอบโครงสร้างชั้นวางของ	17
12	หน้าตัดของโครงข้อหมุน	18
13	การทดสอบโครงข้อหมุน	18
14	แบบแปลน โครงสร้างเหล็กกริดเย็น	19
15	โครงคร่าวของบ้าน 2 ชั้น	19
16	ฐานรองรับอย่างง่ายของคานเสา	20
17	แรงภายในชิ้นส่วน dx	20
18	แบบจำลองฐานรองรับแบบยึดหมุนของเสา	23
19	การโก่งเดาะของเสา Pin-ended	23
20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักวิกฤติกับการ โกงตัวทางข้าง	25
21	ค่าคงที่ K ที่ขึ้นอยู่กับจุดยึดที่ปลาย	25
22	การโก่งเดาะเฉพาะที่ของชิ้นส่วน โครงสร้าง	26
23	ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัด	27
24	ชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัด	28
25	แบบจำลองฐานรองรับของขอบแต่ละด้าน	29
26	การโก่งเดาะเฉพาะที่ของชิ้นส่วนรับแรงอัด	30
27	กราฟสัมประสิทธิ์ของการ โกงเดาะสำหรับแผ่นบาง	31

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	สัมประสิทธิ์การโก่งเคาะเฉพาะที่ของแผ่นบาง	33
29	แบบจำลองฐานรองรับของขอบแต่ละด้าน	33
30	การกระจายหน่วยแรงประสิทธิ์ผล	34
31	การแบ่งแถบย่อยไฟไนต์สติฟของเหล็กทรงน้ำไม่มีขอบเม้ม	37
32	กราฟการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการโก่งเคาะของเหล็กทรงน้ำ	37
33	น้ำหนักโก่งเคาะหน้าตัดทรงน้ำไม่มีขอบเม้มสำหรับการอัดเยื้องศูนย์กลาง	39
34	ขนาดการวัดชิ้นส่วนตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM 370 06	41
35	การเตรียมตัวอย่างทดสอบแรงดึง	42
36	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) และ LVDT	44
37	การทำให้หน้าตัดเกิดความไม่สมบูรณ์ทางด้านรูปร่างเนื่องจากการผลิต	45
38	การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดและ LVDT ของเสาที่ไม่สมบูรณ์	46
39	การเตรียมพื้นผิวสำหรับอุปกรณ์วัดความเครียด	47
40	น้ำยาเคมีทำความสะอาดผิวเหล็ก	47
41	การติดตั้งอุปกรณ์วัดการยืดตัว (extensometer)	50
42	การวัดระยะเกจของชิ้นส่วนรับแรงดึง	51
43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R60_1	52
44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการอัตราการยืดตัว R60-2	52
45	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R 100-1	53
46	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R100-2	54
47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R150-1	55
48	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R150-1	55
49	ผังโครงสร้างอิสระของแผ่นบาง	56
50	เส้นโค้งฮิสเทติกของแผ่นบางที่ปลายยึดแน่น	57
51	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นบาง $a/b = 1$ ในกรณีของฐานรองรับ อย่างง่าย	60
52	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นบาง $a/b = 1$ ในกรณีของฐานรองรับ แบบยึดแน่น	61

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นบาง $a/b = 1$ ในกรณีของฐานรองรับแบบยึดแน่น	62
54	รูปแบบการโค้งเดาะแบบตัดในรูปแบบที่ 1 ของเสา R60-1 และ R60-2	63
55	รูปแบบการโค้งเดาะแบบตัดในรูปแบบที่ 2 ของเสา R60-1 และ R60-2	63
56	รูปแบบการโค้งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบที่ 1 ของเสา R100-1 และ R100-2	64
57	รูปแบบการโค้งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบที่ 2 ของเสา R100-1 และ R100-2	64
58	รูปแบบการโค้งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบที่ 1 ของเสา R150-1 และ R150-2	65
59	รูปแบบการโค้งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบที่ 2 ของเสา R150-1 และ R150-2	66
60	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโค้งตัวตามแนวแกนของเสา R60-1	67
61	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโค้งตัวทางข้างของเสา R60-1	68
62	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโค้งตัวตามแนวแกนของเสา R60-2	69
63	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโค้งตัวทางข้างของเสา R60-2	69
64	พฤติกรรมการเสีรูปร่างการโค้งเดาะแบบตัดของเสา R60-1	70
65	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโค้งตัวตามแนวแกนของเสา R100-1	71
66	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโค้งตัวทางข้างของเสา R100-1	72
67	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในด้านความลึก ของเสา R100-1	72
68	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโค้งตัวตามแนวแกนของเสา R100-2	73
69	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโค้งตัวทางข้างของเสา R100-2	74
70	ระยะการเคลื่อนตัวทางข้างที่กึ่งกลางความยาวของเสา R100-2	75
71	รูปแบบการวิบัติของเสาที่ทำการทดลอง	76
72	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโค้งตัวตามแนวแกนของเสา R150-1	77
73	พฤติกรรมการโค้งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอิลาสติกของเสา R150-2	77
74	กราฟระหว่างน้ำหนักกับการโค้งตัวทางข้างของเสา IM100-1	78
75	กราฟระหว่างน้ำหนักกับการโค้งตัวทางข้างของเสา IM100-2	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
76	พฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism	79
77	กราฟระหว่างน้ำหนักกับการ โกงตัวทางข้างของเสา IM100-2	80
78	พฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism	80
79	กราฟระหว่างน้ำหนักกับการ โกงตัวทางข้างของเสา IM100-2	81
80	พฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism	81
81	กราฟการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสา R100-2	87
82	กราฟการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสา R100-2	88
83	กราฟการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสา IM	89
84	ตัวอย่างการ โกงเดาะเฉพาะที่ของเสาเหล็กรีดเย็น R 100-1	90
85	ตัวอย่างการ โกงเดาะเฉพาะที่ของเสาเหล็กรีดเย็น IM 100-2	91
86	ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือวัดของเสาเหล็กรีดเย็น R 150-1	91
87	การวิบัติของเสา IM100-1 เนื่องจากการ โกงเดาะแบบเฉพาะที่	92

การศึกษาการทดสอบการโก่งเดาะของเสาเหล็กรีดเย็นหน้าตัดทอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ปลายยึดแน่นภายใต้กำลังรับแรงอัดตามแนวแกน

Experimental Study on Fixed-end Column Buckling of Cold-formed Steel Rectangular Tube Section Under Concentric Compression

คำนำ

ปัจจุบันวิกฤตปัญหาเศรษฐกิจในประเทศไทยทำให้อุตสาหกรรมการก่อสร้างเริ่มชะลอตัว เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างมีราคาเพิ่มสูงขึ้นทำให้ต้นทุนที่ใช้ในการก่อสร้างเพิ่มสูงมากขึ้น เช่นกัน ด้วยต้นทุนการผลิตเหล็กที่สูงขึ้น ทำให้เหล็กมีราคาสูงขึ้นเช่นกัน การผลิตเหล็กรีดเย็นขึ้นมาใช้แทนเหล็กรีดร้อน เพราะมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ราคาถูก เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จะทำให้ ต้นทุนการก่อสร้างลดลงทั้งในด้านค่าแรงงาน ค่าวัสดุ และค่าดำเนินการ ประเทศที่กำลังพัฒนาและพัฒนาแล้วจึงนำเหล็กรีดเย็นมาใช้แทนเหล็กรีดร้อนอย่างแพร่หลายในการก่อสร้าง โรงงานอุตสาหกรรม อาคารบ้านพักอาศัย โดยส่วนใหญ่ในประเทศไทยนำมาใช้ในส่วนของโครงหลังคา แต่ยังไม่ได้นำมาใช้เป็นโครงสร้างหลักอย่างแพร่หลาย ต่อมาได้มีการใช้ทำเป็นโครงสร้างช่วงยาวและชิ้นส่วนโครงสร้างรูปแบบต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม บ้านสำเร็จรูป ศูนย์การค้า โดยเหล็กรีดเย็นที่ใช้กันมากจะมีความหนาตั้งแต่ 0.3-6.3 มม. ขนาดความหนาตามท้องตลาดจะมีความหนาที่ 1.3, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2 มม. ที่นิยมใช้มากที่สุดก็จะมีขนาดความหนาที่ 1.6, 2.4 และ 3.2 มม. หน้าตัด ของเหล็กรีดเย็นที่นิยมใช้กันในประเทศไทยก็จะมีหน้าตัดรูปตัว C, รูปตัว I, รูปตัว U, รูปตัว Z และเหล็กทอรูปวงกลมและสี่เหลี่ยม เป็นต้น

การศึกษาถึงพฤติกรรมทางโครงสร้างของเหล็กรีดเย็นในประเทศไทยยังไม่ได้มีการศึกษาอย่างจริงจังจึงทำให้เกิดความไม่มั่นใจในการที่จะนำมาใช้ในโครงสร้างหลัก เช่น เสา คาน เป็นต้น ในต่างประเทศแถบทวีปยุโรป ไม่ว่าจะเป็น ออสเตรเลีย แคนาดา สหรัฐอเมริกา หรือ แม้กระทั่งในแถบทวีปเอเชีย เช่น จีน ญี่ปุ่น สิงคโปร์ มาเลเซีย มีการศึกษาคูณสมบัติของเหล็กรีดเย็นและศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของเหล็กรีดเย็น เพราะข้อเสียของเหล็กรีดเย็นที่มีความบางและกระบวนการผลิตด้วยการรีดเย็น ดังนั้น จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับกำลังการรับน้ำหนักและพฤติกรรมการโก่งเดาะ (Buckling behavior) ในหลายประเทศมีการจัดมาตรฐานการออกแบบและการก่อสร้าง เช่น มาตรฐานของอเมริกา (AISI CODE), มาตรฐานของประเทศยุโรป (EURO CODE) และมาตรฐานของนิวซีแลนด์ (AS/NZS) เป็นต้น

ในประเทศไทยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยเป็นผู้จัดทำมาตรฐานการออกแบบซึ่งอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบมาจาก Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members ของ American Iron and Steel Institute (AISI) มาใช้ในการออกแบบซึ่งอาจจะไม่มีความสอดคล้องกัน ในด้านการปฏิบัติงาน อีกทั้งยังสวนทางกับการนำมาใช้อย่างแพร่หลายแต่ยังขาดความรู้ความเข้าใจ ในด้านทฤษฎีพฤติกรรมของโครงสร้างและขาดความรู้ในการปฏิบัติงานจึงอาจทำให้เกิดความเสียหาย ที่จะเกิดขึ้นได้ในอนาคต

ด้วยเหตุผลที่เริ่มนำเหล็กรีดเย็นมาใช้กันงานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน งานวิจัยชิ้นนี้จะ ทำการศึกษาพฤติกรรมของของ โครงสร้างเหล็กรีดเย็นที่มีหน้าตัดทอที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความ สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง เนื่องจากเหล็กทอสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นหน้าตัดหนึ่งที่ทำ ง่ายและมีหลายขนาดทำให้วิศวกรและสถาปนิกได้เลือกใช้ตามความต้องการและตามความเหมาะสม งานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษามุ่งเน้นไปในพฤติกรรมการโก่งเดาะ (Buckling behavior) ของชิ้นส่วนโครงสร้าง เสาที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างและไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างที่อาจจะเกิดการเสียรูป ของผิวเหล็กเนื่องจากความหนาของเหล็กที่มีความบาง โดยการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะจะทำ การทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่างเสาทายใต้การรับแรงอัดในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาหาค่าหน่วยแรงใน สภาวะที่เกิดขึ้นและรูปแบบการ โก่งเดาะใน 2 แบบ เช่น การเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) และ การโก่งเดาะแบบคด (Flexural Buckling) ซึ่งจะเกิดเฉพาะในหน้าตัดปิด

ปัญหาความไม่สมบูรณ์ทางด้านรูปร่างเป็นอีกปัญหาที่พบมากทางกายภาพของวัสดุที่นำมาใช้ ในงานก่อสร้าง เนื่องจากความบางของเหล็กทำให้ผิวของเหล็กเกิดการเสียรูป ซึ่งอาจจะเกิดจาก กระบวนการผลิตหรือเกิดจากกระบวนการใช้งานที่มีผลทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง ส่งผลให้เกิดความไม่มั่นใจในการใช้งาน มีความยุ่งยากในการวิเคราะห์ โดยไม่สามารถวิเคราะห์ โดยใช้ทฤษฎีมาวิเคราะห์ได้ เนื่องจากปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ (Nonlinear Geometric) ปัญหานี้จะสามารถวิเคราะห์ได้หากใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นอีกวิธีที่ เลือกลงมาใช้วิเคราะห์ในกรณีที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง

แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ทาง คณิตศาสตร์ โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical method) เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์เพื่อหา ค่าที่ต้องการโดยจะเป็นการแก้สมการหลายชั้นแต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ โดยค่า คำตอบที่เป็นตัวเลขนี้เองจะสามารถจำลองหรือทำนายพฤติกรรมต่างๆของ โครงสร้างเหล็กรีด เย็นได้ แต่เพื่อความสะดวกและรวดเร็วจึงใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการ

จำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ซึ่งโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element program) จะสามารถจำลองและทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กกริดเย็นได้ ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นรูปสามมิติและแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาเป็นตัวเลขและในรูปแบบของข้อมูล ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างได้ และยังสามารถหาค่าน้ำหนักวิกฤตจากรูปแบบการโค้งงอ (Buckling) โดยการวิเคราะห์อ้างอิงมาตรฐานของของ American Iron and Steel Institute (AISI) เป็นหลัก และสามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีหรือแม้กระทั่ง นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยนำชิ้นส่วน โครงสร้างตัวอย่างที่มีความเหมือนกันกับแบบโครงสร้างที่ใช้จำลองในไฟไนต์เอลิเมนต์ มาใส่เงื่อนไขของการยึดรั้งและเงื่อนไขของการรับน้ำหนักในห้องปฏิบัติการแล้วทำการทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้ เพื่อเป็นที่ยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองและความเหมาะสมของแบบจำลองที่จะใช้ต่อไป

หากการวิจัยชิ้นนี้สามารถหาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาได้ ในกรณีศึกษาต่าง ๆ เช่น กรณีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างและกรณีที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง และคุณสมบัติทางกลของเหล็กกริดเย็นสอดคล้องกับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จะนำไปสู่การใช้งานที่มีความมั่นใจมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นความเข้าใจในพฤติกรรมทางโครงสร้างทั่วไปของเหล็กกริดเย็นจึงมีความสำคัญต่อความมั่นใจในการออกแบบโครงสร้างเหล็กกริดเย็นที่มีแนวโน้มการขยายตัวในการใช้งานที่สูงขึ้น แต่ทั้งนี้งานวิจัยในประเทศไทยเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กกริดเย็นยังมีการศึกษาที่ไม่กว้างขวางพอ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาเหล็กกริดเย็น โดยทำการทดสอบเสาเหล็กกริดเย็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายใต้กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่มีฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่นทั้งสองด้าน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแผ่กระจายของหน่วยแรงที่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ และหลังจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ ตลอดจนกำลังรับแรงอัดที่ทำให้เสาเกิดการโก่งเดาะและกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่ทำให้เสาเกิดการวิบัติของหน้าตัดเสาที่มีขนาดแตกต่างกันและหน้าตัดที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างที่เกิดจากการผลิต

วัตถุประสงค์

การทำงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมุ่งเน้นไปสู่การศึกษาในด้านการทดสอบพฤติกรรม การรับน้ำหนักของเหล็กกรีดเย็นและพฤติกรรมการ โกงเดาะของเสาที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดในหน้าเหล็กกรีดเย็นที่มีอัตราส่วน ความกว้างต่อความหนาที่มีค่ามากที่สุดในการทดสอบ
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการ โกงเดาะและพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของเสา ภายใต้การรับแรงอัดที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นของเหล็กกรีดเย็นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
3. เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการ โกงเดาะของเหล็กที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างกับ หน้าตัดที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างเนื่องจากการผลิต ตลอดจนเปรียบเทียบพฤติกรรม การ โกงเดาะและกำลังรับแรงอัดกับมาตรฐานการออกแบบของ AISI และ ผลจากการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของ โครงสร้างเสาเหล็กกรีดเย็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ภายใต้การรับแรงอัด โดยมีขอบเขตเงื่อนไขที่ปลายเป็นแบบปลายยึดแน่นทั้งสองด้าน โดยมีความ ยาวของชิ้นส่วนที่จะนำมาทดสอบเท่ากับ 95 ซม. มีหน้าตัดที่แตกต่างกัน 3 ขนาดดังนี้ R60x30x3.2, R100x50x1.6, และ R150x75x3.2 โดยจะพิจารณาหน้าตัดที่มีความสมบูรณ์และผลของความไม่ สมบูรณ์เนื่องจากการผลิตของหน้าตัดเหล็กกรีดเย็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เกิดจากการกระทำให้เสียรูป ในด้านความลึกอย่างสม่ำเสมอเพียงด้านเดียว ซึ่งอาจจะมีผลในการรับแรงอัดและรูปแบบของการ โกงเดาะ โดยการวิเคราะห์จะไม่พิจารณาหน่วยแรงตกค้างและพฤติกรรมในช่วงอินอลาสติก

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้จะเป็นประโยชน์กับการเข้าใจมาตรฐานการออกแบบเหล็กกรีดเย็นภายใต้ มาตรฐาน AISI เข้าใจพฤติกรรมการ โกงเดาะของโครงสร้างเสาเหล็กกรีดเย็นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตลอดจนการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดในเสาเหล็กกรีดเย็น ซึ่งนำไปสู่การนำไปใช้ออกแบบ โครงสร้าง เสาเหล็กกรีดเย็นอย่างถูกต้อง

การตรวจเอกสาร

ปัจจุบันธุรกิจการก่อสร้างในประเทศไทยได้ประสบกับปัญหาการขาดแคลนแรงงานในภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่ประหยัดทั้งเวลาและแรงงานเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่แก้ปัญหการขาดแคลนแรงงานในภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้าง วัสดุเหล็กกรีดยึดเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายและในอนาคตจะมีแนวโน้มที่นำมาใช้สูงขึ้นเนื่องจากเหล็กกรีดยึดมีข้อดีหลายอย่าง เช่น น้ำหนักเบา กำลังครากสูง และสามารถนำมาประกอบเป็นโครงสร้างขนาดเล็กและขนาดใหญ่ได้ง่าย สะดวกในการนำไปใช้ อีกทั้งยังมีความสวยงามของรูปร่างที่แตกต่างจากเหล็กกรีดยึดอื่น

ความรู้พื้นฐานของเหล็กกรีดยึด

เหล็กแผ่นรีดเย็นจะใช้แผ่นเหล็กกรีดยึดเป็นวัตถุดิบ โดยการนำม้วนของแผ่นเหล็กกรีดยึดไปรีดเย็นต่อที่อุณหภูมิห้องกำลังครากของเหล็กที่ได้จากการรีดเย็นแบบนี้จะมีกำลังครากที่ 2450 ksc ซึ่งค่ากำลังครากจะใกล้เคียงกับเหล็กกรีดยึดอื่นทั่วไป ซึ่งเหล็กขึ้นรูปเย็นประเภทนี้จะนิยมนำมาพับขึ้นรูปได้หน้าตัดต่างๆ เช่น รูปตัว C, รูปตัว I, รูปตัว U, รูปตัว Z และเหล็กท่อรูปวงกลมและรูปสี่เหลี่ยม โดยความหนาจะอยู่ระหว่าง 0.3 - 6 มิลลิเมตร ยกตัวอย่างกระบวนการผลิตหน้าตัดเหล็กกรีดยึดที่มีหน้าตัดเป็นท่อเช่น หน้าตัดท่อกกลม หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยจะผลิตขึ้นรูปจากแผ่นเหล็กกรีดยึดมารีดด้วยอุณหภูมิห้องให้เป็นเหล็กท่อกกลมจากนั้นเป็นกระบวนการเชื่อมประสานระหว่างด้านทั้งสองจะแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งจะแสดงขั้นตอนการผลิตและขึ้นรูปของเหล็กกรีดยึดที่เป็นหน้าตัดรูปกล่องสี่เหลี่ยม ซึ่งโดยทั่วไปหน้าตัดของเหล็กกรีดยึดประเภทนี้จะมีความหนาที่ 1.6 - 3.2 มิลลิเมตร แต่ในปัจจุบันในประเทศไทยได้มีบริษัทที่พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเหล็กกรีดยึด โดยพัฒนากระบวนการผลิตโดยใช้ระบบลูกกลิ้งขนาดใหญ่มีกำลังการบดอัดที่สูงขึ้น ทำให้เหล็กที่ได้จากการผลิตมีความหนาที่บาง โดยมีกำลังครากที่สูงขึ้นซึ่งมีค่าการครากที่เพิ่มขึ้นจากค่าการครากต่ำสุดที่ 245 MPa ไปเป็น 450 MPa ซึ่งเรียกเหล็กชนิดนี้ว่า เหล็กขึ้นรูปเย็นกำลังสูง เหล็กชนิดนี้เป็นเหล็กที่ได้จากการขึ้นรูปแบบรีดร้อนมารีดซ้ำด้วยลูกกลิ้ง โดยจะมีการจัดเรียงของเกรนในทิศทางเดียวกันกับการรีดของลูกกลิ้งซึ่งจะมีความหนาที่บางลงตั้งแต่ 1.0 ถึง 1.9 มิลลิเมตร ซึ่งจะส่งผลดีทำให้เหล็กมีกำลังครากที่สูงขึ้นน้ำหนักเบา แต่จะมีข้อเสียคือจะไม่ทนทานต่อการกัดกร่อนทำให้กำลังการรับน้ำหนักลดลง ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเหล็กขึ้นรูปเย็นกำลังสูงมาเคลือบสังกะสีและอลูมิเนียมเพื่อนำไปขึ้นรูปหน้าตัดในลักษณะต่างๆ แต่ที่นิยมในงานอุตสาหกรรมการก่อสร้างคือ รูปตัว C, และหน้าตัดรูปตัว Z ที่มีขอบเข้มนและไม่มีการเข้มน ซึ่งในกระบวนการผลิตเหล็กกรีดยึดยังมีความเครียดตกค้างในเนื้อเหล็ก ทำให้มีความแข็งแรงสูงความสามารถในการยึดตัวดีและยังมีความไม่สม่ำเสมอในคุณสมบัติเชิงกลสูง การขจัดความเค้นตกค้างจะทำได้โดยการ

อบเพื่อให้คลายความเครียดในเนื้อวัสดุของเหล็กโดยความหนาของเหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทั้งนี้ในงานโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาจะนำเหล็กที่มีชิ้นส่วนขนาดใหญ่มาทำเป็นโครงสร้างจึงทำให้เกิดความยากลำบากในการอบเพื่อคลายความเครียด อีกทั้งกระบวนการขึ้นรูปของเหล็กรีดเย็นเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ทางด้านรูปร่างซึ่งจะทำให้มีผลต่อกำลังของหน้าตัด เนื่องจากกระบวนการผลิตที่มีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของ โครงสร้างเหล็กรีดเย็นลดน้อยลงและยากที่จะทำนายถึงพฤติกรรมการเสียรูปและทำนายถึงกำลังการรับน้ำหนัก

การขึ้นรูปแบบเย็น (Cold Work of Forming)

คุณสมบัติเชิงกลของหน้าตัดเหล็กรับผลกระทบจากงานขึ้นรูปเย็นที่เกิดจากการคัดสำหรับหน้าตัดที่รีดเย็นจากแผ่น งานขึ้นรูปเย็นคัดแต่ละแผ่นปีก ในส่วนนี้กำลังแรงดึงสูงสุดของวัสดุและหน่วยแรงครากจะเพิ่มขึ้นด้วยการลดสัดส่วนความเหนียวในวัสดุ

สำหรับหน้าตัดเหล็กรีดเย็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากลวง ส่วนหน้าแบนจะได้รับขึ้นรูปเย็นก่อนส่วนที่เป็นท่อกลมแล้ว ทำซ้ำกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในกรณีนี้จะยากในการคำนวณตามหลักกำลังครากในแผ่นแบน (flats)

AS / NZS 4600 ช่วยให้การวัดความแข็งแรงของเหล็กหลังจากที่ทำงานเย็นที่จะใช้ในการออกแบบที่กำลังคราก สำหรับโครงสร้างหน้าตัดกลวง การกระจายแรงดึงสูงสุดและหน่วยแรงครากทำให้วัดในเหล็กขึ้นรูปเย็นที่เป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะปรากฏในภาพที่ 8 แสดงคุณสมบัติการกระจายสมำเสมอของแผ่นแบนตามขวางหน่วยแรงครากประมาณ 400 MPA สำหรับหน่วยแรงครากน้อย 350 MPA นี้เป็นหน่วยแรงครากของแผ่น (plate) ก่อนการขึ้นรูปซึ่งปกติประมาณ 300 MPA การเพิ่มของหน่วยแรงครากในมุมจะมีกำลังมากเฉลี่ยประมาณ 500 MPA

กระบวนการผลิตเหล็กรีดเย็นยังมีความเครียดตกค้างในเนื้อเหล็ก ทำให้มีความแข็งแรงสูง ความสามารถในการยึดตัวต่ำและยังมีความไม่สม่ำเสมอในคุณสมบัติเชิงกลสูง การขจัดความเค้นตกค้างจะทำได้โดยการอบเพื่อให้คลายความเครียดในเนื้อวัสดุของเหล็กโดยความหนาของเหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทั้งนี้ในงานโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาจะนำเหล็กที่มีชิ้นส่วนขนาดใหญ่มาทำเป็นโครงสร้างจึงทำให้เกิดความยากลำบากในการอบเพื่อคลายความเครียด อีกทั้งกระบวนการขึ้นรูปของเหล็กรีดเย็นเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ทางด้านรูปร่างซึ่งจะทำให้กำลังของหน้าตัดลดลง เนื่องจากกระบวนการผลิตที่มีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของ โครงสร้างเหล็กรีดเย็นลดน้อยลงและยากที่จะทำนายถึงพฤติกรรมการเสียรูปและทำนายถึงกำลังการรับน้ำหนัก การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กรีดเย็น ได้ทำการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายในต่างประเทศและได้มีการทดสอบ

ตัวอย่างของชิ้นส่วนโครงสร้าง คาน เสา จุดต่อ รอยเชื่อม เป็นต้น เพื่อพฤติกรรมการของโครงสร้าง เหล็กกรีดยื่นที่เกิดขึ้นจริงเพื่อใช้กำหนดและปรับปรุงตัวแปรในการออกแบบให้เหมาะสมยิ่งขึ้น สำหรับการออกแบบและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องจนนำไปสู่การกำหนดมาตรฐานและปรับปรุงมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

มาตรฐานการออกแบบและคุณสมบัติสำหรับเหล็กกรีดยื่น

ชิ้นส่วนเหล็กกรีดยื่นสามารถใช้อย่างมีประสิทธิภาพในการใช้งานจำนวนมาก แต่หน้าตัดเหล็กกรีดยื่นมักจะผลิตบางกว่าหน้าตัดเหล็กกรีดยื่น และมีรูปแบบของการวิบัติและการเสียรูปที่ไม่พบบ่อยในการออกแบบโครงสร้างเหล็กปกติและข้อกำหนดเพื่อการออกแบบที่จะต้องให้คำแนะนำ สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนที่มีความบาง (thin-walled) นอกจากนี้กระบวนการกรีดยื่นก่อให้เกิดความไม่สมบูรณ์ ของโครงสร้างเหล็กที่มีการขึ้นรูป และความเค้นตกค้างที่ค่อนข้างแตกต่างจากเหล็กแผ่นรีดร้อน จะต้องมีคุณสมบัติเฉพาะ ดังนั้นการออกแบบสำหรับชิ้นส่วนเหล็กกรีดยื่นจะมีการออกแบบต่างจากเหล็กกรีดยื่นเช่นกัน

คุณสมบัติของวัสดุ (Properties of Materials)

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ฯลฯ เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้น ๆ สามารถที่จะรับหรือต้านทานแรง หรือ แรงกระทำภายนอกที่มากกระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อเราจะเลือกใช้วัสดุ สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งจะเป็นแนวทางการออกแบบพื้นฐานและการทำความเข้าใจต่อพฤติกรรมวัสดุที่นำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น คุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิ คุณสมบัติเชิงเคมีและคุณสมบัติเชิงไฟฟ้า

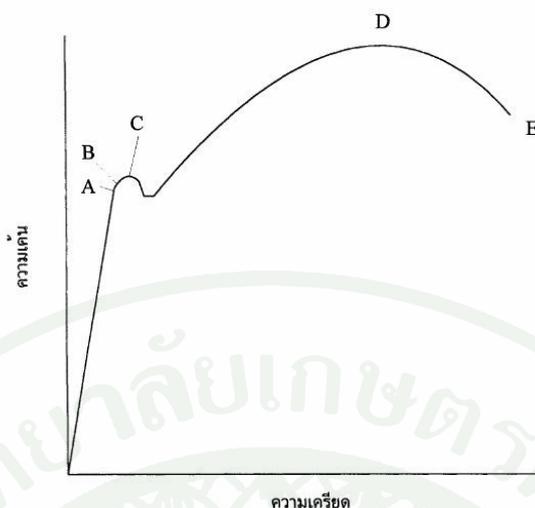
แต่ในทางวิศวกรรมโยธาจะมุ่งเน้นถึงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น หน่วยแรง (Stress) เป็นแรงต้านทานภายในของวัสดุที่เกิดจากแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งกล่าวได้ว่าหน่วยแรงหรือความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จากหลักการสมดุลแรงภายนอกเท่ากับแรงต้านทานภายใน ซึ่งแรงต้านทานภายในหรือความเค้นตามแนวแกน สามารถแบ่งออกตามลักษณะของแรงที่มากกระทำ เช่น หน่วยแรงดึงหรือความเค้นดึง หน่วยแรงอัดหรือความ

เค้นอัด (Compressive Stress) และหน่วยแรงเฉือน (Shear Stress) นอกจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุที่เกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ แล้ว

ความเครียดหรือการเปลี่ยนรูป คือ เมื่อวัสดุมีแรงภายนอกกระทำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในวัสดุ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้

1. การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่ถาวร กล่าวคือ เมื่อทำการดึงวัสดุไปถึงจุดหนึ่งและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามความยาวของวัสดุ หากแรงดึงที่กระทำไม่เกินจุดขีดจำกัดของวัสดุ เมื่อปลดปล่อยแรงดึง วัสดุที่เสียรูปไปแล้วจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม

2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ถาวร กล่าวคือ เมื่อทำการดึงวัสดุไปถึงจุดหนึ่งและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามความยาวของวัสดุ หากแรงดึงที่กระทำเกินจุดขีดจำกัดของวัสดุและเลยจุดครากของวัสดุ เมื่อปลดปล่อยแรงดึง วัสดุที่เสียรูปไปแล้วจะไม่เคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ซึ่งจะอธิบายได้จากกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ที่เกิดจากการดึงชิ้นส่วนวัสดุ ซึ่งอาจจะเป็น เหล็ก อะลูมิเนียม หรือ อาจจะเป็นไม้ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน การทำความเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุต้องรู้คุณสมบัติทางด้านเชิงกลของวัสดุ ซึ่งได้จากการทดสอบแล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์จนถึงกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล เช่นกราฟที่แสดงในภาพที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสามารถหาได้จากการพล็อตกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง



ภาพที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด

เมื่อทำการทดสอบตัวอย่าง โดยเริ่มดึงขึ้นทดสอบในอัตราความเร็วที่กำหนดไว้อย่างช้าๆ จากนั้นวัสดุ จะค่อย ๆ ยืดออก จนถึง จุด A ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะเป็นสัดส่วนโดยตรง เมื่อทำการเขียนกราฟแล้วกราฟจะเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) ที่เรียกว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าจุดพิคัดสัดส่วน (Proportional Limit) เป็นหน่วยแรงสูงสุดที่ความเค้นกับความเครียดเป็นปฏิภาคกันโดยตรง พิกัดจุดนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปสู่สภาพเดิมหรือที่เรียกว่า พฤติกรรมแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) กล่าวคือเมื่อปลดแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิมและเมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิคัดสัดส่วน เส้นกราฟโค้งออกจากเส้นตรงอย่างช้าๆ วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด B เรียกว่า จุดพิคัดอีลาสติกหรือพิคัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดสุดท้ายที่วัสดุนั้นยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น โดยทั่วไปจุด A และ จุด B อยู่ใกล้เคียงกัน จึงเรียกหน่วยแรงที่จุด A และ B ว่าเป็นหน่วยแรงที่จุดพิคัดยืดหยุ่นและเรียกช่วงความเครียดนี้ว่าช่วงยืดหยุ่น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation)

ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุ ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้ เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) โดยมีการยืดตัวมากในขณะที่หน่วยแรงมีค่าคงที่และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก เป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูปหลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นเพิ่มอย่างช้าหรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า

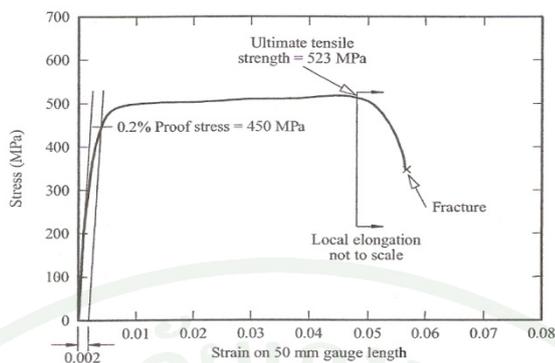
Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุ โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุ

จุด E ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุขาดออกจากกัน สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ค่าความเค้นประลัย จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุที่นำมาทดสอบลดน้อยลง ทำให้ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย

ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุดโดยไม่มี การลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง

ความเหนียว (Ductility)

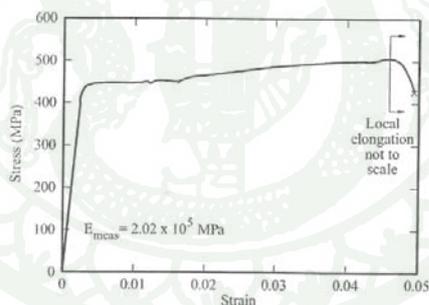
ความเหนียว (Ductility) หมายถึง ความสามารถของวัสดุที่จะยืดได้มากโดยไม่แตกหัก ผลจากการรีดเย็นจะช่วยลดปริมาณที่มีผลกระทบต่อปริมาณความเค้นในชิ้นส่วนของโครงสร้าง โดยพฤติกรรมโครงสร้างยังเหมือนเดิม การวัดความเหนียวเป็นเปอร์เซ็นต์การยืดออกถาวรหลังจากการแตกหัก (fracture) ในความยาว 50 มม. ของแผ่นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน AS1391 สำหรับแผ่นรีดร้อนและเหล็กแผ่นเหล็กรีดเย็นละมุน ค่าอยู่ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบแรงดึงในภาพที่ 3 (a) และ 3 (b) ตามลำดับ. ภายหลังจากการทดสอบความยาวเกจ 75 มม. มีระดับการยืดออกชดจากการยอมและการแข็งตัวเพิ่ม (strain hardening) การยืดออกอย่างสม่ำเสมอจากจุดครากขึ้นไปถึงแรงดึงสูงสุด ในภาพที่ 3 (c)



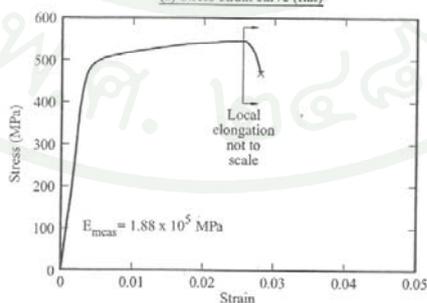
ภาพที่ 2 กราฟของเค้น-ความเครียดของเหล็ก G450 มาตรฐาน AS 1397

ที่มา: Hancock (2007)

สัดส่วนความกว้างของเส้นโค้งใน กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็ก ที่ใช้สำหรับ โครงสร้างเหล็กรีดเย็นแสดงใน ภาพที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าเหล็กเหล่านี้มีแรงดึงที่สูงและมักจะมี ความเหนียว เป็นผลของกระบวนการผลิต



(a) Stress-strain curve (flat)

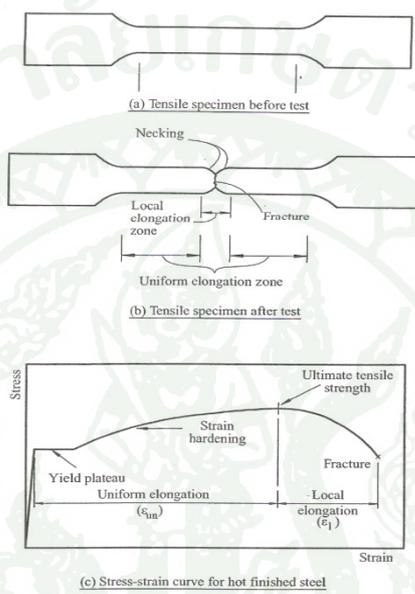


(b) Stress-strain curve (corner)

ภาพที่ 3 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็ก G350 ผลิตตาม AS 1163

ที่มา: Hancock (2007)

หลังจากแรงดึงสูงสุดได้ถึงคอคอดของเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นในช่วงที่สั้น (shorter length) ปกติประมาณ 12.5 มม. ตามที่ปรากฏในภาพที่ 4 (b) และสิ้นสุดลงเมื่อการแตกหัก (fracture) เกิดขึ้นในชิ้นส่วนทดสอบ การยืดออกในบริเวณคอคอดเรียกว่าการขยายพื้นที่ การประเมินความเหนียวเฉพาะที่ (local ductility) กำหนดได้โดยการคำนวณอัตราส่วนของพื้นที่ที่ลดลงที่จุดแตกหักในพื้นที่เดิม



ภาพที่ 4 การวัดความเหนียว

ที่มา: Hancock (2007)

ความทนทานการแตกหัก

โครงสร้างที่ได้รับการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบที่เหมาะสม โครงสร้างจะไม่มี การวิบัติอย่างรวดเร็วหากไม่รับน้ำหนักบรรทุกทุกเกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ สาเหตุของการวิบัติมีการ แสดงของรอยร้าว (cracks) มักจะเป็นผลจากการเชื่อมไม่สมบูรณ์หรือเกิดจากความล้า กัดกร่อน pitting ฯลฯ สาเหตุของการแตกหักอย่างรวดเร็วก็คือขนาดของรอยร้าวถึงจุดที่วิกฤตและการแตกร้าวย ขยายตัวจนกระทั่งโครงสร้างไม่มีเสถียรภาพ ปัจจัยของน้ำหนักที่กระทำ ขนาดรอยร้าวและความ ทนทานการแตกหักของวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามการขยายรอยร้าวยังเกี่ยวข้องกับพลังงานยืดหยุ่น

คุณสมบัติของมุมสำหรับหน้าตัดรีดเย็น

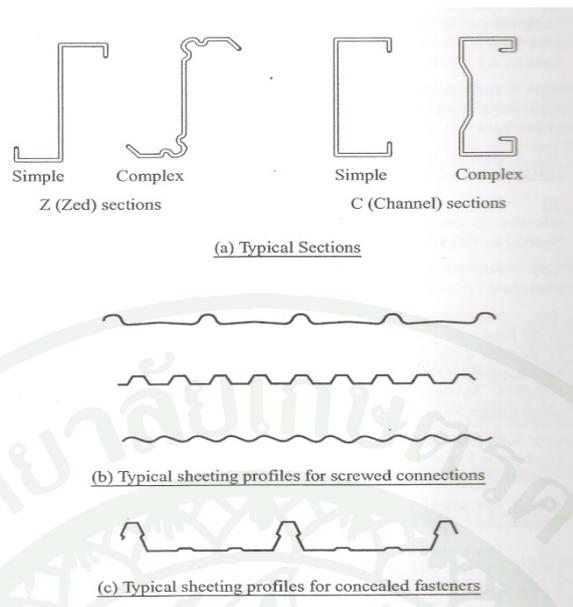
กระบวนการขึ้นรูปของหน้าตัดจะทำให้หน่วยแรงครากเพิ่มขึ้นและแรงดึงสูงสุดที่มุม โค้งเห็นก่อนหน้านี้ สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวง สำหรับหน้าตัดของกระบวนการขึ้นรูปเย็น ของ AS / NZS 4600 มีสูตรการคำนวณกำลังคลาก (f_{yc}) ที่เพิ่มขึ้นของมุม สูตรเหล่านี้มาจาก ทฤษฎีพื้นฐานและทดลองดังนี้

หน่วยแรงประสิทธิภาพประสิทธิผลความเครียดประสิทธิผล ($\sigma - \epsilon$) ลักษณะเฉพาะของเหล็กในเชิงพลาสติกของโค้งความเค้น-ความเครียด แบบโค้งความเครียดจะอธิบายโดยที่กำหนดในสมการ $\sigma = k\epsilon^n$, K คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงและ n เป็นช่วงความเครียดเพิ่มความแข็งแรง หน่วยแรงประสิทธิผล (σ) กำหนดโดยพลังงานการครากของ Von Mises

รูปร่างหน้าตัดและการใช้งานของโครงสร้างเหล็กรีดเย็น

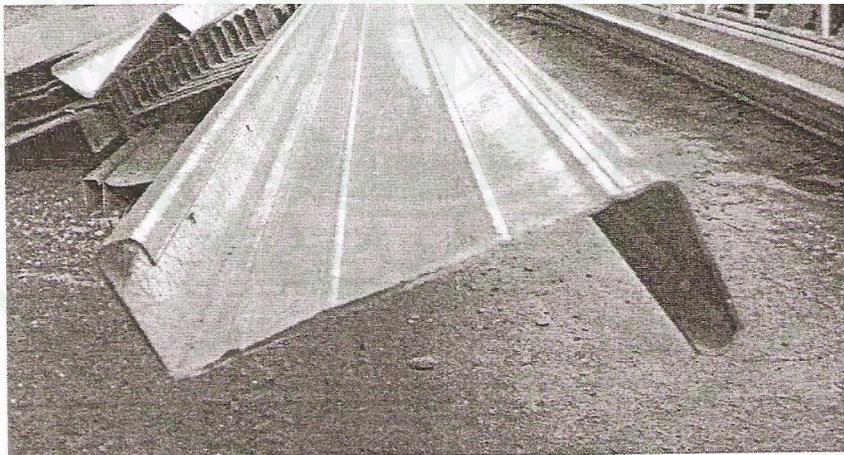
ระบบแผ่นหลังคาและอาคารอุตสาหกรรมการเกษตรและการค้า หน้าตัดทั่วไปสำหรับใช้ในหลังคาและระบบโครงคร่าวโดยทั่วไปจะใช้หน้าตัดตัว Z หรือ C เป็นหน้าตัดที่ใช้ในโครงหลังคา เช่น แป จันทัน อเส เป็นต้น

หน้าตัดแปกับหน้าตัดรางน้ำที่ค้ำยันหรือรองรับแผ่นหลังคา การยึดสกรูมักจะผ่านส่วนบนสุดสำหรับหลังคา อุปกรณ์ยึดสามารถใช้หลีกเลี่ยงการเจาะในแผ่นหลังคา หน้าตัดทั่วไปและรูปตัดทางขวางจะแสดงในภาพที่ 5 และนวัตกรรมการผลิตของ Supazed หน้าตัดในภาพที่ 6 และ Kliplok อุปกรณ์ยึดการคลุมในพับแปที่มีฐานรองรับโดยเสา ภาพที่ 8



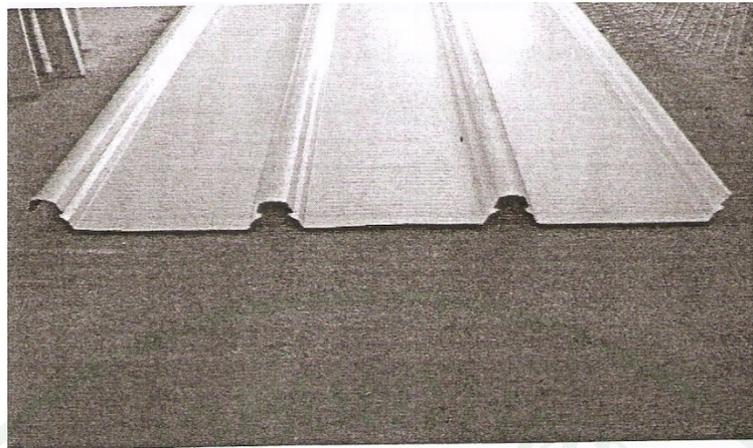
ภาพที่ 5 รูปตัดตามยาวของหน้าตัดผนังและหลังคา

ที่มา: Hancock (2007)



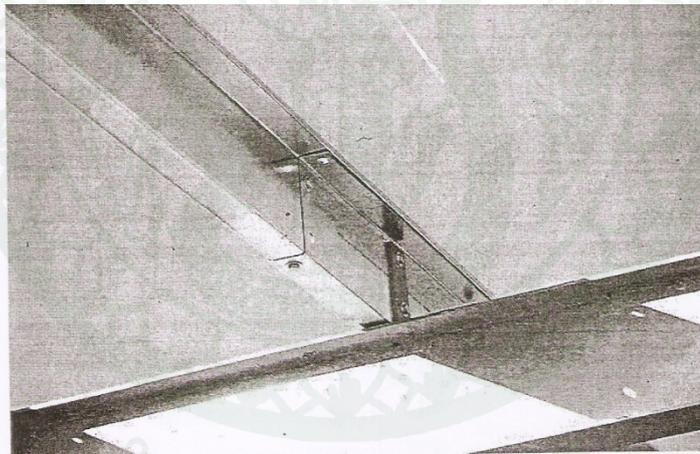
ภาพที่ 6 นวัตกรรมของหน้าตัด Supazed TM

ที่มา: Hancock (2007)



ภาพที่ 7 แผ่นคลุมหลังคา Kliplok

ที่มา: Hancock (2007)



ภาพที่ 8 การทาบแปที่รองรับพุก

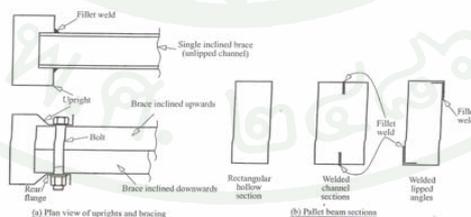
ที่มา: Hancock (2007)

โครงสร้างชั้นวางเหล็กสำหรับรองรับพื้นเก็บของ

ในประเทศไทยได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างเสาชั้นวางเหล็กสำหรับรองรับพื้นเก็บของชั้นวางชนิดของเสาตั้งตรง

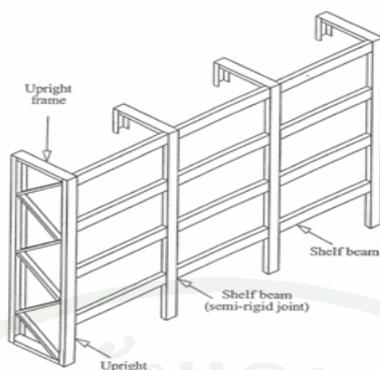
โครงสร้างชั้นวางของ โดยทั่วไปเป็นหน้าตัดรูปรางน้ำ โดยมีหรือไม่มีชิ้นส่วนปลายยึดหรือ อาจจะเป็นหน้าตัดต่อหรือหน้าตัดที่เหมือนท่อเช่นเหล็กทรงน้ำที่มีขอบเม้มจะเชื่อมให้ปลายติดกันใช้ เป็นคานพื้นหน้าตัดปกติจะปรากฏในภาพที่ 9 และชั้นวางเหล็กเก็บของในภาพที่ 10 ซึ่งรายละเอียด ข้อกำหนดจะมีในมาตรฐานออสเตรเลีย Standard AS 4084 ที่เคยได้ศึกษาและทำการทดสอบที่ แสดงในภาพที่ 11

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาชั้นวางสินค้าเหล็ก โดย ณีรัฐฉวี อัสวสงครามและคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักโดยการทดสอบของ เสาชั้นวางสินค้าเหล็กโดยการทดสอบ องค์อาคารเป็นเหล็กขึ้นรูปเย็นรูปตัวซีแบบมีปีกทามุมเอียง และมีการพับที่ปลายปีก ความยาวตัวอย่าง 355 มม. และ 700 มม. ผลการทดสอบกำลังที่สภาวะ ประลัยและรูปแบบการวิบัติเปรียบเทียบกับสมการออกแบบด้วยวิธีกำลังโดยตรงตามมาตรฐาน American Iron and Steel Institute (AISI) ผลการเปรียบเทียบพบว่าวิธีกำลังโดยตรง ทำนายผลกำลัง ของเสาได้ค่อนข้างใกล้เคียงโดยมีค่ามากกว่าผลการทดสอบเล็กน้อย สำหรับรูปแบบของการวิบัติ จากวิธีกำลัง โดยตรงได้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างทดสอบยาว 355 มม.



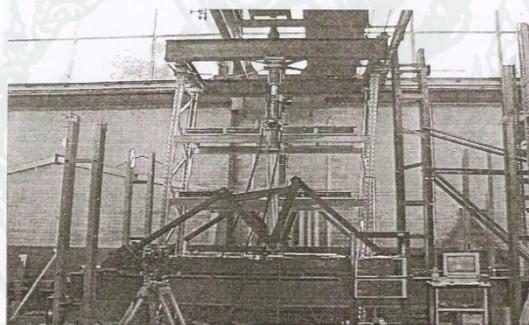
ภาพที่ 9 หน้าตัดของชั้นวางของ

ที่มา: Hancock (2007)



ภาพที่ 10 หน้าตัดของชั้นวางของ

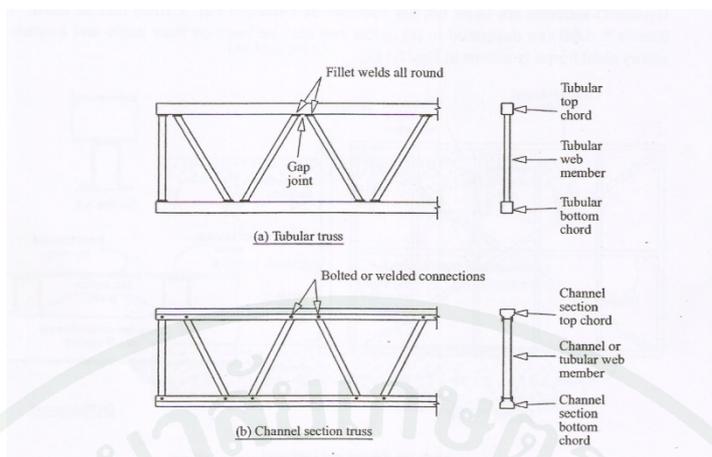
ที่มา: Hancock (2007)



ภาพที่ 11 การทดสอบ โครงสร้างชั้นวางของ

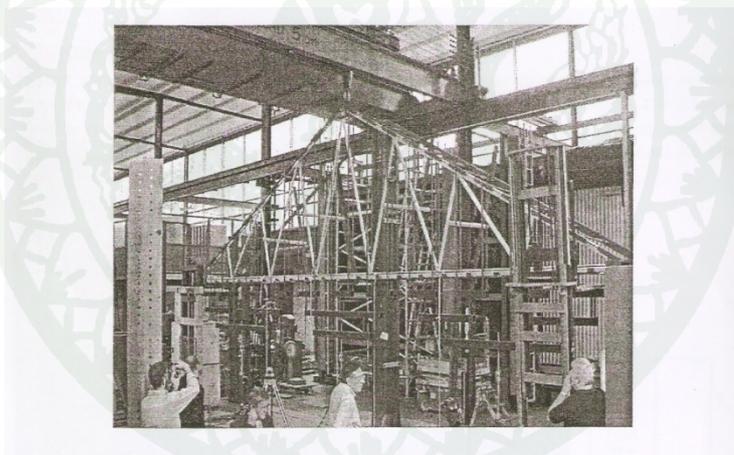
ที่มา: Hancock (2007)

ชิ้นส่วนโครงสร้างสำหรับโครงข้อหมุนในระนาบและสามมิติชิ้นส่วนโดยทั่วไปจะหน้าตัดกลมหรือรูปสี่เหลี่ยม ดังเช่นองค์อาคารของโครงข้อหมุน (chords) และแผ่นเอว (webs) มักจะมีรอยข้อต่อซึ่งจะแสดงในภาพที่ 12(a) ข้อต่อที่ยึดด้วยสลักสามารถทำได้โดยใช้สลักเกลียวต่อกันกับแผ่น (plate) ไปยังส่วนที่แสดงในภาพที่ 12(b) หน้าตัดเหล็กทรงน้ำและหน้าตัด Z ใช้ทั่วไปสำหรับชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนหลังคาเหล็กของเฟรมเหล็กของอาคาร โครงข้อหมุนสามารถประกอบจากเหล็กกรีดเย็นได้ โครงข้อหมุนหลังคาภายใต้การทดสอบจะแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 12 หน้าตัดของโครงข้อหมุน

ที่มา: Hancock (2007)

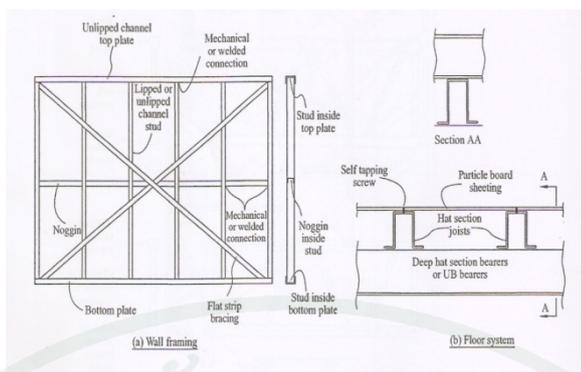


ภาพที่ 13 การทดสอบโครงข้อหมุน

ที่มา: Hancock (2007)

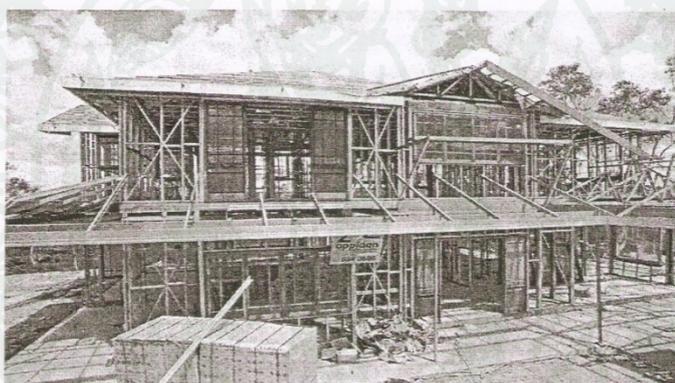
โครงกรอบที่เน้นผิวอาคาร(Frameless stressed-skin buildings)

องค์ประกอบทั่วไปจะเป็นวัสดุโครงหลังคาแสดงในภาพที่ 15 ที่มีหน้าตัดตามยาวจะยึดด้วยขอบยึด (stiffened) ใช้งานจากโครงสร้างเล็ก ๆ โครงผนังภายในหน้าตัดเหล็กทรงน้ำโดยทั่วไปที่มีขอบเม้มและไม่มีขอบเม้ม แผ่นด้านบนและด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 14 (a) Straps เหล็ก Flat ข้อกำหนดรายละเอียดของประเภทชิ้นส่วนโครงสร้างแสดงในภาพที่ 14 (b)



ภาพที่ 14 แบบแปลนโครงสร้างเหล็กกรีดยื่น

ที่มา: Hancock (2007)



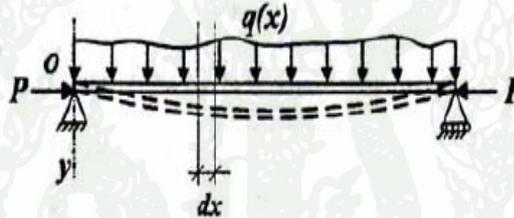
ภาพที่ 15 โครงคร่าวของบ้าน 2 ชั้น

ที่มา: Hancock (2007)

การวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาเหล็กกรีดยื่น

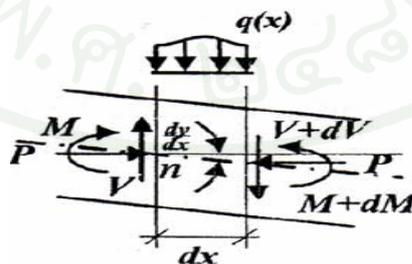
การวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะในชิ้นส่วนโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างคอนกรีต ไม้และเหล็กภายใต้กำลังรับแรงอัดตามแนวแกน โดยทั่วไปแล้วจะวิเคราะห์เกี่ยวกับปัญหาความมั่นคงของโครงสร้าง ซึ่งการศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเสาภายใต้กำลังรับแรงอัดโดยจะศึกษาพฤติกรรมความมีเสถียรภาพในการรับน้ำหนักของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำทางด้านข้าง ซึ่งโดยปกติประกอบไปด้วยการหาน้ำหนักวิกฤตที่ทำให้โครงสร้างเกิดการ

เคลื่อนที่ด้านข้างเนื่องจากแรงกระทำตามแนวแกนและเนื่องจากแรงที่กระทำตามขวาง ซึ่งจะเรียกโครงสร้างที่รับแรงตามแนวแกนและน้ำหนักที่กระทำตามขวางพร้อมกันจะเรียกโครงสร้างนี้ว่า Beam-Column จากทฤษฎีในช่วงอิลาสติก หน่วยแรงและระยะการเคลื่อนที่ของคาน จะเป็นสัดส่วนกับน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก แต่สำหรับคานที่รับทั้งแรงตามแนวแกนและแรงกระทำตามขวางที่กล่าวมาในข้างต้น การโก่งตัวของคานจะไม่เป็นสัดส่วนกับขนาดของแรงกดตามแนวแกน ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าการโก่งตัวของ Beam-Column และ โมเมนต์สูงสุด จะหาได้จากสมการพื้นฐานซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ จากภาพที่ 16 โดยจากภาพจะเป็นโครงสร้าง Beam-Column ที่มีแรงแผ่กระจายตามขวาง และมีแรงอัดตามแนวแกน จากภาพที่ 1 หากตัดชิ้นส่วนเล็กๆ dx ซึ่งจะหาความสัมพันธ์จากผลของแรงที่กระทำ มาสร้างเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ของ Beam-Column โดยหาได้จากการสมดุลแรงในแนวตั้ง สมดุลแรงในแนวราบและสมดุลโมเมนต์ภายในชิ้นส่วนของหน้าตัดที่แสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 16 ฐานรองรับอย่างง่ายของคานเสา

ที่มา: ชิวล็ค (2548)



ภาพที่ 17 แรงภายในชิ้นส่วน dx

ที่มา: ชิวล็ค (2548)

ในที่นี้สามารถเขียนสมการสมดุลภายในหน้าตัดชิ้นส่วน dx โดยใช้ผลรวมแรงตามแนวแกน y จะได้เป็นสมการที่ 1 เมื่อ v เป็นแรงเฉือนภายในหน้าตัด และ qdx เป็นน้ำหนักที่กระทำตามขวางของหน้าตัด

$$\sum F_y = 0$$

$$-v + qdx + (v + dv) = 0 \quad (1)$$

$$q = -\frac{dv}{dx} \quad (2)$$

สำหรับสมการสมดุลของโมเมนต์รอบจุด n ในภาพที่ 2 สามารถรวมสมการสมดุลได้เป็นสมการที่ 3 เมื่อตัวแปร M เป็นโมเมนต์ต้านทานภายในพื้นที่หน้าตัด

$$M + qdx \frac{dx}{2} + (v + dv)dx - (M + dM) + P \frac{dy}{dx} dx = 0 \quad (3)$$

เทอมยกกำลังสองของ dx , dm มีค่าน้อยมากจึงสมมุติให้เป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ 3 สามารถลดรูปมาเป็นสมการที่ 4 ซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการแรงเฉือน

$$v = \frac{dM}{dx} - P \frac{dy}{dx} \quad (4)$$

ดังนั้นสามารถหา M จากความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงมุมลาดเอียงกับโมเมนต์คด คือ moment–Curvature Relationship และ Force–deformation relationship จะได้เป็นสมการที่ 5

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M \quad (5)$$

ดังนั้นสมการเชิงอนุพันธ์ของ Beam – Column ที่มี EI คงที่จะเป็นสมการที่ 6 โดยที่ค่า EI เป็นความแข็งเกร็งของหน้าตัด

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P \frac{d^2 y}{dx^2} = -q \quad (6)$$

จากสมการที่ 6 ถ้าให้ $P = 0$ สมการ Beam – Column เหล่านี้จะเป็นสมการของคาน ที่ไม่มีแรงกระทำตามแนวแกน

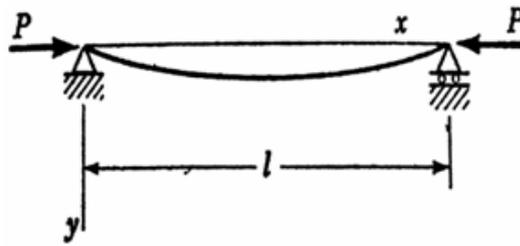
จากภาพที่ 1 เมื่อฐานรองรับของ Beam – Column เป็นแบบ Simply supported สามารถหาโมเมนต์ที่เกิดจากแรงตามแนวแกน P ซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์ และ น้ำหนักที่กระทำตามขวางทำให้เกิดโมเมนต์ จะได้สมการที่ 7 เมื่อ α^2 เท่ากับ $\frac{P}{EI}$ โดยที่ค่า y ในสมการที่ 7 จะเป็นสมการที่บอกเส้นโค้งการโก่งตัวของโครงสร้าง Beam – Column แสดงในสมการที่ 8 ซึ่งมี General Solution สำหรับค่า $y_c(x), y_p(x)$

$$\frac{dy^2}{dx^2} + \alpha^2 y = \frac{m(x)}{EI} \quad (7)$$

$$y(x) = y_c(x) + y_p(x) \quad (8)$$

ดังนั้นจากกระบวนการทางคณิตศาสตร์สำหรับฟังก์ชัน $y_c = A \cos \alpha x + B \sin \alpha x$ ซึ่งจะหาค่า A และ B สำหรับฟังก์ชัน $y_{p(x)} = -\frac{1}{p} \sum_{n=0}^{\infty} \left(-\frac{1}{\alpha^2} \right)^n \frac{d^{2n} m}{dx^{2n}}$ ซึ่งฟังก์ชัน $y_p(x)$ จะแสดงการโก่งตัวที่มีผลมาจากน้ำหนักที่กระทำตามขวางขึ้นกับรูปแบบการกระทำของแรงและฟังก์ชัน y_c จะแสดงการโก่งตัวที่มีผลมาจากแรงตามแนวแกน ซึ่งสามารถหาค่าของ A และ B โดยใช้ขอบเขตเงื่อนไขของฐานรองรับ จะแทนค่าลงในสมการที่ 8 ซึ่งจะหาค่าการโก่งตัวของโครงสร้าง Beam – Column โดยทั่วไปได้ และสามารถหาค่าโมเมนต์สูงสุดได้จากความสัมพันธ์ของ moment – Curvature

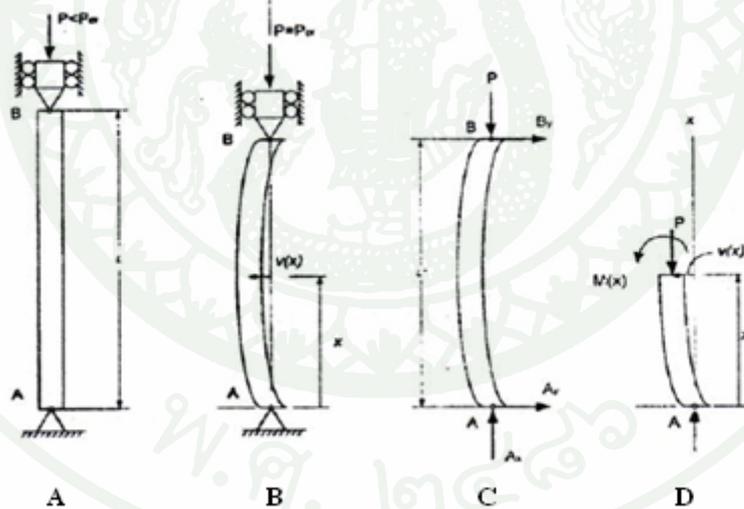
จากสมการทั่วไปของ Beam-Column ซึ่งหากกรณีที่ไม่มีแรงตามแนวแกนนั้นคือ $P=0$ ดังนั้นสมการของโครงสร้าง Beam-column จะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ของคานที่รับแรงกระทำตามขวางเพียงอย่างเดียวในทำนองเดียวกันหากไม่พิจารณาแรงที่กระทำทางขวางนั้นคือ $q=0$ ซึ่งจะสามารถพิสูจน์หาสมการทั่วไปสำหรับเสาที่มีฐานรองรับอย่างง่ายโดยพิจารณาจากภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แบบจำลองฐานรองรับแบบยึดหมุนของเสา

ที่มา: ชิวล็ค (2548)

พิจารณาภาพที่ 19 เป็นการโก่งเดาะของเสาเมื่อมีน้ำหนักที่กระทำตามแนวแกนน้อยซึ่งน้อยกว่าน้ำหนักวิกฤติจะไม่เกิดการโก่งเดาะทางข้างจะแสดงในภาพที่ 19(A) และเมื่อน้ำหนักที่กระทำตามแนวแกนมีค่าเท่ากับน้ำหนักวิกฤติเสาจะเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างจะแสดงในภาพที่ 19(B) ซึ่งสามารถหาค่าน้ำหนักวิกฤติได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของ Beam-Column



ภาพที่ 19 การโก่งเดาะของเสา Pin-ended

ที่มา: ชิวล็ค (2548)

ในกรณีที่มีแรงตามแนวแกนกระทำเพียงอย่างเดียวจะเขียนสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ 9 ซึ่งจะเป็นสมการทั่วไปของเสาที่เกิดจากแรงตามแนวแกนที่ทำให้เสาดเกิดการโก่งเดาะ ซึ่งจะทำให้เกิดโมเมนต์ภายในด้านทานอยู่ในหน้าตัด

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \alpha^2 y = 0 \quad (9)$$

ซึ่งในการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ในที่นี่จะกำหนดให้ $\alpha = \sqrt{\frac{P}{EI}}$ ซึ่งมี General Solution ของ $y(x) = A\cos\alpha x + B\sin\alpha x$ เมื่อ A และ B หาได้จากขอบเขตเงื่อนไขของจตุรรองรับ ดังนั้น เมื่อ

$$y(0) = A\cos\alpha(0) + B\sin\alpha(0) = 0, \quad A=0$$

$$y(L) = A\cos\alpha(L) + B\sin\alpha(L) = 0, \quad B\sin\alpha(L) = 0$$

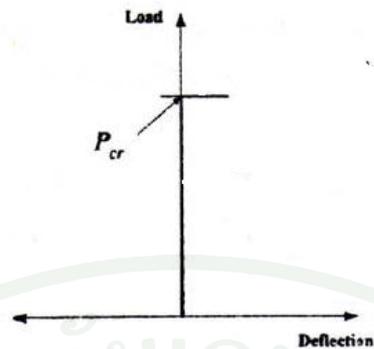
เมื่อ B ไม่เท่ากับ 0 ดังนั้น $\sin\alpha(L)$ จะต้องเป็น 0 ซึ่งค่าที่ทำให้ $\sin\alpha(L) = 0 = \sin n\pi, \alpha_n = \left(\frac{n\pi}{L}\right), n = 1, 2, \dots$ ดังนั้นเมื่อแทน $\alpha = \sqrt{\frac{P}{EI}}$ จะได้สมการหาน้ำหนักวิกฤติในกรณีที่มีจตุรรองรับเป็นแบบ Pin-end ได้ในสมการที่ 10

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (10)$$

ค่า n เท่ากับ 1 ในกรณีที่เสามีจตุรรองรับเป็นแบบ Pin-ended จะได้ค่า P ที่เรียกว่าน้ำหนักวิกฤติ ซึ่งเรียกว่า Euler load ที่มีค่าต่ำสุด ดังนั้นเราสามารถหาการเคลื่อนที่ทางข้างของเสาให้สอดคล้องกับน้ำหนักวิกฤติได้โดยสมการ

$$y(x) = B\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (11)$$

ฟังก์ชัน y เป็นฟังก์ชันที่แสดงรูปร่างของการโก่งเดาะ โดยค่า B เป็นตัวกำหนดทิศทางและแอมพลิจูดของการโก่งเดาะ ซึ่งความสัมพันธ์ของน้ำหนักวิกฤติกับการโก่งตัวทางข้างจะแสดงได้ในภาพที่ 5 จากภาพเมื่อน้ำหนักกระทำกับเสา เสาจะมีการโก่งตัวตามแนวแกนและเมื่อน้ำหนักกระทำถึงน้ำหนักวิกฤติเสาดจะเกิดการโก่งตัวออกทางด้านข้าง



ภาพที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักวิกฤติกับการโก่งตัวทางข้าง

ที่มา: ชิวล็ค (2548)

จากการแก้สมการเพื่อหาค่าคงที่ A, B ในสมการเชิงอนุพันธ์ เพื่อหาค่าน้ำหนักวิกฤติ ซึ่งได้มาจากขอบเขตเงื่อนไขของจตุรรองรับ ดังนั้นผลของจตุรรองรับ จะมีผลต่อน้ำหนักวิกฤติที่เพิ่มมากขึ้น และทำให้รูปแบบการโก่งตัวของฟังก์ชัน y เปลี่ยนไป ดังนั้นจากสมการที่ 10 สามารถหาค่าน้ำหนักวิกฤติที่มีจตุรรองรับแต่ละประเภทได้จากสมการที่ 12

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (12)$$

โดยที่ค่า L_e เป็นความยาวประสิทธิผลซึ่งมีค่าเท่ากับ KL โดยที่ K คือค่าคงที่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะจุดยึดที่ปลายที่แสดงในภาพที่ 21

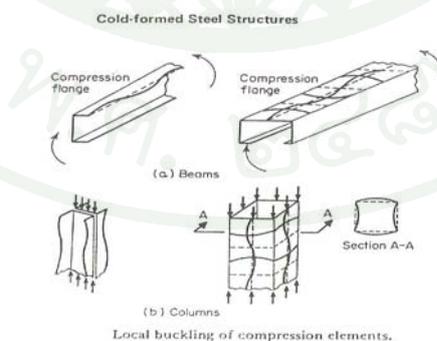
การโก่งตัวของแท่งตั้งตรงประเภท	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
ค่าคงที่ K	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
ค่า L_e โดยค่าคงที่ K สำหรับจตุรรองรับ	0.65	0.8	1.2	1.0	2.10	2.0

ภาพที่ 21 ค่าคงที่ K ที่ขึ้นอยู่กับจุดยึดที่ปลาย

ที่มา: ชิวล็ค (2548)

พื้นฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็นที่มีความบางโดยทั่วไปจะคำนึงถึงอัตราส่วนระหว่างความกว้างกับความหนาซึ่งจะมีผลต่อหน่วยแรงการโก่งเคาะ และรูปร่างของหน้าตัดจะมีผลต่อรูปแบบของการโก่งเคาะ เช่น รูปร่างหน้าตัดที่ปิดและรูปร่างหน้าตัดเปิด จากตัวงานวิจัยของ Young et al. (2003) ได้ทำการทดสอบเสาเหล็กรีดเย็นกำลังสูงสำหรับหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ขนาดแตกต่างกัน 4 ขนาด ซึ่งมีความยาวของเสาตั้งแต่ 360-3600 มิลลิเมตร โดยมีปลายทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่นเพื่อดูพฤติกรรมการโก่งเคาะและเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับมาตรฐานอเมริกา มาตรฐานนิวซีแลนด์/ ออสเตรเลีย และ มาตรฐานยุโรป โดยผลการเสีรูปร่างในหน่วยแรงสูงสุด จะมีการเสีรูปร่างในแบบการโก่งเคาะเฉพาะที่ การโก่งเคาะแบบดัด และการโก่งเคาะในรูปแบบผสมระหว่างการโก่งเคาะแบบดัดกับการโก่งเคาะเฉพาะที่ การเสีรูปร่างที่หน่วยแรงสูงสุดในหน้าตัดที่มีลักษณะหน้าตัดที่เปิดจะมีหน้าตัดรูป เหล็กฉาก เหล็กรูปรางน้ำ เหล็กรูปตัวซี เหล็กรูปตัวแซด เหล็กรูปหมวก รูปแบบของการโก่งเคาะจะเป็นแบบ โก่งเคาะเฉพาะที่ โก่งเคาะแบบเสีรูปร่างโก่งเคาะแบบบิด โก่งเคาะแบบดัด-บิด

ดังนั้นในการออกแบบเหล็กรีดเย็นไม่ว่าหน้าตัดชนิดใดสิ่งที่จะต้องคำนึงคือหน่วยแรงการโก่งเคาะและการเสีรูปร่างในรูปแบบต่างๆ ซึ่งการวิเคราะห์หน่วยแรงการโก่งเคาะในชิ้นส่วนโครงสร้างของเหล็กรีดเย็นที่เกิดการโก่งเคาะในรูปแบบต่างๆ จะใช้ทฤษฎีของแผ่นบางมาวิเคราะห์หาหน่วยแรงการโก่งเคาะในแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างเหล็กรีดเย็นที่มีความบางและอัตราส่วนของความกว้างและความหนาจะมีค่ามาก ดังนั้นชิ้นส่วนที่มีความบาง จะเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่โดยหน่วยแรงที่เกิดต่ำกว่าจุดครากของเหล็ก รูปแบบการโก่งเคาะเฉพาะที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างคานเนื่องจากแรงดัดในทิศทางตามความยาวของชิ้นส่วนและรูปแบบการโก่งเคาะเฉพาะที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างเสาเนื่องจากการรับแรงอัดในทิศทางตามความยาวของเสา แสดงในภาพที่ 22

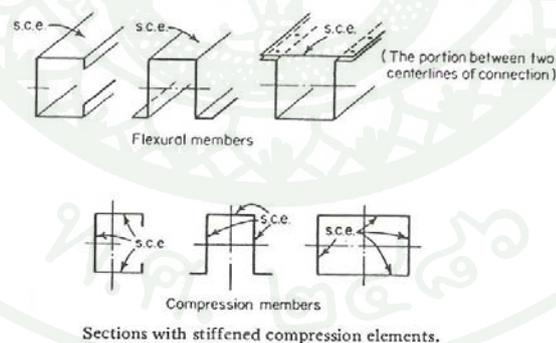


ภาพที่ 22 การโก่งเคาะเฉพาะที่ของชิ้นส่วนโครงสร้าง

ที่มา: Yu (2000)

การวิเคราะห์การแพร่กระจายของหน่วยแรงอัดและพฤติกรรมการโก่งเคาะของชิ้นส่วนแผ่นบางที่ประกอบเป็นหน้าตัดรับแรงอัด หน้าตัดแต่ละชนิดหน้าตัดจะมีความแตกต่างกันเนื่องจากองค์ประกอบของหน้าตัดที่มีการยึดรั้งระหว่างกันและในแต่ละด้านของหน้าตัดจะมีขอบปลายที่อิสระ เช่น หน้าตัดเหล็กกริดยื่นรูปตัวซี แผ่นเอวจะมีการยึดรั้งโดยปีกของหน้าตัดที่ขอบตามความยาวทั้งสองด้าน ปีกของหน้าตัดก็จะถูกยึดรั้งโดยแผ่นเอวด้านหนึ่งและจะถูกยึดรั้งโดยขอบเม้มชิ้นส่วนของขอบเม้มมีปลายด้านหนึ่งที่ถูกยึดรั้งโดยแผ่นปีกปลายด้านหนึ่งจะมีอิสระไม่ยึดรั้งกับชิ้นส่วนใด ในกรณีของหน้าตัดปิด จำพวกหน้าตัดท่อ เช่น หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส หน้าตัดรูปวงกลม จะมีการยึดรั้งกันระหว่างกันในทุกด้าน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การแพร่กระจายหน่วยแรงการโก่งเคาะและพฤติกรรมการโก่งเคาะในชิ้นส่วนที่มีความบางจะมีคำจำกัดความในแต่ละองค์ประกอบในหน้าตัด ดังนี้ ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดและชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัด

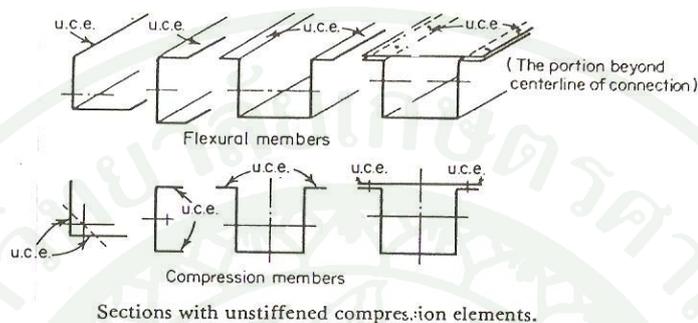
ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัด หมายถึง ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดคือชิ้นส่วนของหน้าตัดที่มีขอบตามยาวยึดติดกับส่วนประกอบของหน้าตัดทั้งสองด้าน โดยขอบทั้งสองข้างจะขนานกับหน่วยแรงอัด ในภาพที่ 23 แสดงตัวอย่างของชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดในหน้าตัดแต่ละชนิด เช่น ปีกที่รับแรงอัดขององค์อาคารอัด หรือปีกและแผ่นเอวในองค์อาคารที่รับแรงอัด โดยขอบทั้งสองข้างที่ขนานกับหน่วยแรง ถูกยึดรั้งด้วยแผ่นเอว ปีก ขอบ ครีบ หรืออย่างอื่นคล้ายกันแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัด

ที่มา: Yu (2000)

ชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัด หมายถึง ชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัดซึ่งขอบที่ขนานกับหน่วยแรงถูกยึดครั้งเพียงด้านเดียวและขอบอีกด้านหนึ่งจะไม่ยึดครั้งกับด้านใดด้านหนึ่ง เช่น ในกรณีของหน้าตัดรูปตัวซีที่ไม่มีขอบเม้ม ชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัดก็คือ แผ่นปีกของหน้าตัดรูปตัวซี ซึ่งจะแสดงในภาพที่ 24

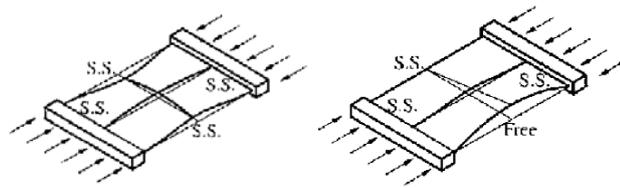


ภาพที่ 24 ชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัด

ที่มา: Yu (2000)

ขอบเขตเงื่อนไขที่ขอบยึดครั้งและขอบอิสระขององค์ประกอบชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดและองค์ประกอบชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัดสามารถจำลองปลายยึดครั้งโดยให้เป็นฐานรองรับในรูปแบบดังต่อไปนี้ เช่น แบบปลายยึดแน่น แบบปลายอิสระและแบบยึดหมุน ดังแสดงในภาพที่ 21 ขอบเขตเงื่อนไขเหล่านี้จะให้กำหนดแฟกเตอร์ k เพื่อกำหนดค่าคงที่ในการคำนวณหน่วยแรงการโก่งเคาะในแต่ละองค์ประกอบของหน้าตัดที่มีความบาง

โดยค่า k ขึ้นอยู่กับ m โดยที่ m เป็นจำนวนของ Half Sine Waves และขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว w/a กรณีของขอบเขตเงื่อนไขที่เป็นแบบยึดหมุนสี่ด้าน จากการศึกษาค้นคว้ายิ่งอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวยิ่งมากค่าแฟกเตอร์ k ที่นิยมใช้เท่ากับ 4 ซึ่งเหมาะสมเมื่ออัตราส่วนของ a/w มีค่ามาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทฤษฎีการวิเคราะห์แผ่นบาง



ภาพที่ 25 แบบจำลองฐานรองรับของขอบแต่ละด้าน

ที่มา: Hancock *et al.* (2001)

การวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่และหน่วยแรงการโก่งเดาะเฉพาะที่ของแผ่นบาง (Plate)

การโก่งเดาะเฉพาะที่มีผลต่อการค้ำของชิ้นส่วนแผ่นบางที่ยึดด้วยจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนขององค์ประกอบของหน้าตัดแสดงในภาพที่ 21 หน่วยแรงยึดหยุ่นวิกฤตสำหรับการโก่งเดาะเฉพาะที่ในอดีตได้รับการวิจัยโดย Timoshenko และ Gere หน่วยแรงยึดหยุ่นวิกฤตที่ใช้สำหรับการหาหน่วยแรงโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ของชิ้นส่วนแผ่นอัด คัดหรือแรงเฉือน ดังสมการที่ให้ไว้ในสมการที่ 13

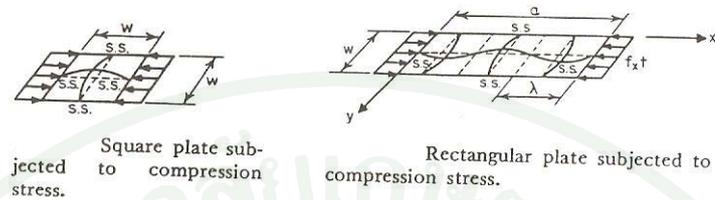
$$f_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(w/t)^2} \quad (13)$$

โดยสมการที่ 13 จะได้จากการพิจารณาชิ้นส่วนของแผ่นบาง(Plate) โครงสร้างที่มีฐานรองรับสองด้านโดยชิ้นส่วน โครงสร้างรับหน่วยแรงอัด ที่กระจายในทิศทางเดียว ทำให้เกิดการโก่งเดาะที่มีลักษณะการโก่งเดาะแบบโค้งเดียว (Single Curvature) ดังแสดงในภาพที่ 26 หน่วยแรงวิกฤตที่เกิดการโก่งเดาะของแผ่นบางสามารถคำนวณหาโดยใช้สมการของแผ่นบางโดยจะกล่าวถึงทฤษฎีของ Small Deflection Theory ดังนี้

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} + \frac{f_x t}{D} \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} = 0 \quad (14)$$

ตัวแปร D เป็นค่าความแข็งแกร่งของแผ่นบาง ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนปัวซองเรโซ (μ) ความหนา(t) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ค่าความแข็งแกร่งของแผ่นบางคำนวณได้จาก $D = \frac{Et^4}{12(1-\mu^2)}$

สมมติ m และ n เป็นจำนวนตัวเลข Half Sine Waves ในทิศทาง x และ y รูปแบบของการโก่งเคาะเฉพาะที่ของแผ่นบาง (Plate) ที่เหลี่ยมดั่งภาพข้างต้น โดยรูปแบบเป็น Double Series:



ภาพที่ 26 การโก่งเคาะเฉพาะที่ของชิ้นส่วนรับแรงอัด

ที่มา: Yu (2000)

$$\omega = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{w} \quad (15)$$

พิจารณาแผ่นบาง(Plate)มีฐานรองรับเป็นแบบยึดหมุนอย่างง่ายโดยใช้ขอบเขตเงื่อนไข สามารถแก้สมการโดยใช้เงื่อนไขสำหรับ $x=0$ ที่ a และ $y=0$ ที่ w และการโก่งที่ปลายเท่ากับ 0 เมื่อ $\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0$

$$\text{และ } \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = 0$$

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (16)$$

$$M_y = -D \left(\mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \quad (17)$$

แก้สมการที่ 13 โดยใช้สมการที่ 14 สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ 18

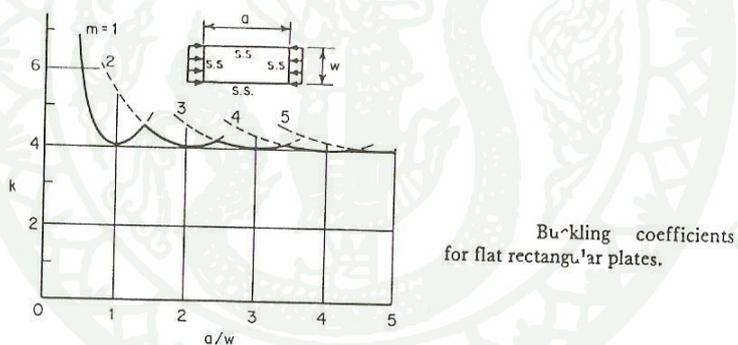
$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \left[\pi^4 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{w^2} \right)^2 - \frac{f_x t m^2 \pi^4}{D a^2} \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{w} = 0 \quad (18)$$

จากสมการข้างต้น ถ้า $A_{mn} = 0$ หรือสมการในวงเล็บเท่ากับ 0 จะได้สมการดังนี้

$$\pi^4 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{w^2} \right)^2 - \frac{f_x t m^2 \pi^4}{D a^2} = 0 \quad (19)$$

$$f_{cr} = f_x = \frac{D \pi^2}{t w^2} \left[m \left(\frac{w}{a} \right) + \frac{n^2}{m} \left(\frac{a}{w} \right) \right]^2 \quad (20)$$

จากสมการที่ 19 เมื่อแก้สมการจะหาค่าหน่วยแรงการโก่งเดาะเฉพาะที่ได้ในสมการที่ 20 โดยค่าของ k จะเท่ากับ $\left[m \left(\frac{w}{a} \right) + \frac{1^2}{m} \left(\frac{a}{w} \right) \right]^2$ ค่าของ k ที่ได้ในสมการจะแตกต่างกันแล้วแต่เงื่อนไขของขอบและอัตราส่วน a/w ค่าของ k ที่นิยมใช้เท่ากับ 4 ซึ่งเหมาะสมเมื่ออัตราส่วนของ a/w มีค่าค่อนข้างมากดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 กราฟสัมประสิทธิ์ของการโก่งเดาะสำหรับแผ่นบาง

ที่มา: Yu (2000)

จากรูปภาพที่ 23 ถ้าค่า m เปลี่ยนจาก m ไปเป็น $m+1$ เป็นเงื่อนไขของรูปแบบของ Half Sine Waves ที่คล้ายกันสองด้านที่จุดออกเด้นท์ นั่นคือ

$$m \left(\frac{w}{a} \right) + \frac{1}{m} \left(\frac{a}{w} \right) = (m+1) \left(\frac{w}{a} \right) + \frac{1}{m+1} \left(\frac{a}{w} \right) \quad (21)$$

หรือ

$$\frac{a}{w} = \sqrt{m(m+1)} \quad (22)$$

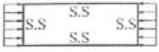
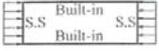
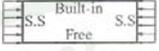
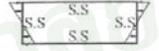
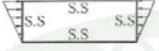
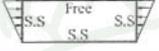
สำหรับแผ่นยาว

$$\frac{a}{w} \approx m \quad (23)$$

หรือ

$$\lambda = \frac{a}{w} \approx w \quad (24)$$

สัมประสิทธิ์ K เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการโค้งเคาะของแผ่นบางและขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของฐานรองรับและอัตราส่วนความกว้างหารด้วยความหนา สัมประสิทธิ์ของการโค้งเคาะกับส่วนหนึ่งของความยาวคลื่น (Wave-Length) ของการโค้งเคาะเฉพาะที่แสดงในภาพที่ 26 ตัวอย่างเช่น แผ่นบางที่มีขอบรองรับด้วยฐานรองรับอย่างง่ายทั้งสองด้านและมีแรงอัดกระจายในทิศทางตามความยาวของแผ่นบางจะโค้งเคาะที่ส่วนหนึ่งของความยาวคลื่นเท่ากับความกว้างแผ่นบาง ค่าสัมประสิทธิ์การโค้งเคาะของแผ่นบางในกรณีนี้เท่ากับ 4.0 แผ่นที่มีขอบตามยาวด้านหนึ่งอิสระและด้านอื่นรองรับด้วยฐานรองรับอย่างง่ายก็จะโค้งเคาะในส่วนหนึ่งของความยาวคลื่นเท่ากับความยาวแผ่นบาง ในกรณีนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้งเคาะจะมีค่าเท่ากับ 0.425 ดังแสดงในภาพที่ 28 โดยเฟคเตอร์ K ขึ้นอยู่กับ m โดยที่ m เป็นจำนวนของ Half Sine Waves และขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว w/a โดยสัญลักษณ์ w หมายถึงความกว้างของแผ่นบางและ a หมายถึงความยาวของแผ่นบาง

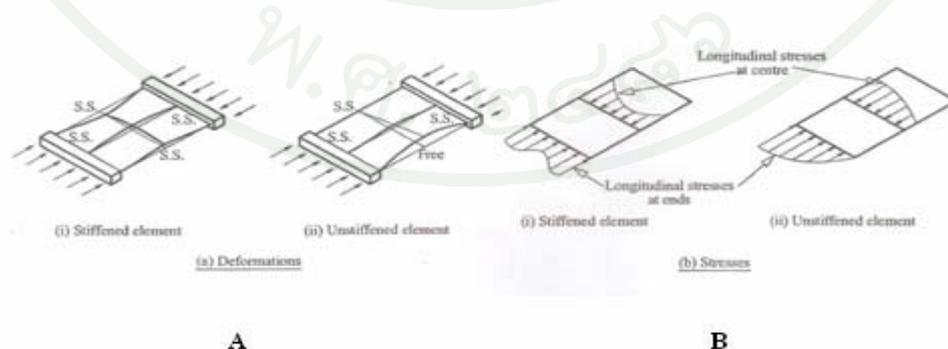
Case	Boundary Conditions	Loading	Buckling Coefficient (k)	Half - Wavelength
1		Uniform Compression	4.0	b
2		Uniform Compression	6.97	0.66b
3		Uniform Compression	0.425 0.675	$L = \infty$ $L = 2b$
4		Uniform Compression	1.247	1.636b
5		Pure Bending	23.9	0.7b
6		Bending + Compression	7.81	b
7		Bending + Compression	0.57	$L = \infty$
8		Pure Shear	5.35 9.35	$L = \infty$ $L = b$

L = Plate length, b = Plate width

ภาพที่ 28 สัมประสิทธิ์การ โกงเดาะเฉพาะที่ของแผ่นบาง

ที่มา: Hancock et al. (2001)

การ โกงเดาะเฉพาะที่แผ่นบางภายใต้การกระจายของหน่วยแรงอัดระหว่างแผ่นบางที่ไม่มี ความเสียดทาน ได้รับแรงกดจะเสียรูปหลังจากการ โกงเดาะดังแสดงในภาพที่ 29 (A) และจะ กระจายหน่วยแรงอัดตามภาพที่ 29 (B) จะเกิดขึ้นไม่จำกัดว่าเป็นชิ้นส่วนปลายยื่นหรือปลายยึด องค์กรประกอบของชิ้นส่วนหน้าตัดแผ่นบางยังรับน้ำหนักต่อด้วยองค์กรประกอบของหน้าตัดปลายยื่น ถึง 44.4% เมื่อเทียบกับองค์กรประกอบของหน้าตัดปลายยื่น

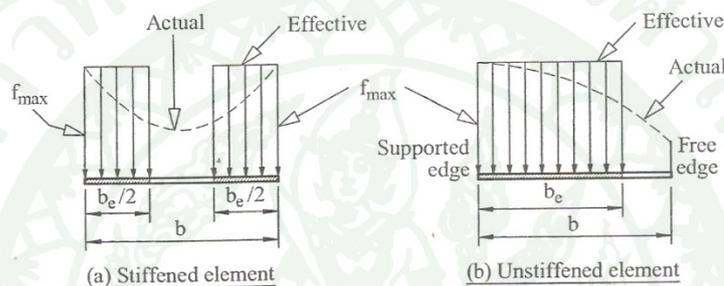


ภาพที่ 29 แบบจำลองฐานรองรับของขอบแต่ละด้าน

ที่มา: Hancock et al. (2001)

พฤติกรรมหลังการโก่งเดาะเฉพาะที่

การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของหลังการ โก่งเดาะและการวิบัติของแผ่นบางภายใต้การวิเคราะห์ และต้องใช้การวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์เพื่อคำตอบที่ถูกต้อง เพื่อหลีกเลี่ยงในการวิเคราะห์ที่ ซับซ้อนในการออกแบบ Karman แนะนำว่าการกระจายหน่วยแรงที่กึ่งกลางหน้าตัดของแผ่นเสริม กำลัง (stiffened) ถูกแทนที่สองข้างของความกว้างในด้านของแผ่นบางแต่ละแผ่นภายใต้การ กระจายของหน่วยแรงสูงสุด แสดงในภาพที่ 30 เป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในแผ่นบางบนความ กว้างที่มีประสิทธิผล



ภาพที่ 30 การกระจายหน่วยแรงประสิทธิผล

ที่มา: Hancock et al. (2001)

Karman ยังแนะนำหน่วยแรงที่กระทำกับขอบทั้งสองด้านแถบถือว่าเป็นหน่วยแรงที่กระจาย เป็นรูปสี่เหลี่ยมของความกว้างประสิทธิผลและที่สำคัญเมื่อหน่วยแรงยึดหยุ่นวิกฤตของแผ่นบางนี้มี ค่าเท่ากับกำลังครากของวัสดุที่วิบัติของแผ่นบาง องค์ประกอบของชิ้นส่วนรับแรงอัดในหน้าตัด เหล็กรีดเย็นที่มีความไม่สมบูรณ์ทางเรขาคณิตรวมทั้งหน่วยแรงตกค้างจากการรีดเย็น ดังนั้นสูตร ของ von Karman สำหรับความกว้างประสิทธิผลต้องมีการแก้ไขเพื่อลดแรงที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ Winter ได้เสนอและยืนยันการทดลอง ต่อ ไปนี้สูตรความกว้างที่มีประสิทธิผลสำหรับชิ้นส่วนปลาย ยึดรับแรงอัดและชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัด

การวิเคราะห์หาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงสำหรับพฤติกรรมหลังการ โก่งเดาะเป็นเรื่องที่ยาก ในการวิเคราะห์ Von Karman แนะนำว่าการแผ่กระจายหน่วยแรงที่กลางหน้าตัดของแผ่นปลายยึด ให้หน่วยแรงสูงสุดกระจายคงที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่งความกว้างของแผ่นปลายยึดเท่ากับ $b/2$ ในแต่ละด้านดังแสดงในภาพที่ 30 (B) Von Karman แนะนำอีกว่าทั้งสองด้านที่พิจารณาจะให้เท่ากับ

ความกว้าง b ของด้านแผ่นสี่เหลี่ยม โดยที่ b จะเรียกว่าความกว้างประสิทธิภาพของแผ่น และเมื่อหน่วยแรงวิกฤตยึดหยุ่นของแผ่นนี้มีค่าเท่ากับหน่วยแรงครากของวัสดุ การบิดของแผ่นจะเกิดขึ้นจากสมการที่ 2

$$F_y = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (25)$$

จากสมการที่ 25 และสมการที่ 26 นำมาหาความสัมพันธ์เพื่อหาความกว้างประสิทธิภาพที่ใช้สำหรับการออกแบบ สำหรับชิ้นส่วนปลายยึดและชิ้นส่วนปลายยื่นจะได้เป็นสมการที่ 3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง b/w เมื่อหน่วยแรงวิกฤตยึดหยุ่นของแผ่นนี้มีค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_y}} \quad (26)$$

ในหน้าตัดเหล็กกริดเย็นเกิดจากระบวนการขึ้นรูปเย็นให้มีลักษณะตามหน้าตัดที่ต้องการ ดังนั้นผลจากการขึ้นรูปเย็นทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ทางรูปร่างและทำให้เกิดหน่วยแรงตกค้างจึงทำให้กำลังของหน้าตัดลดลง โดยมีการปรับปรุงสูตรกับการทดลองให้มีความสอดคล้องกัน ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาสูตรที่ใช้ในการคำนวณสำหรับมาตรฐานการออกแบบในแต่ละประเทศอย่างเช่น ประเทศอเมริกาจะใช้มาตรฐานการคำนวณของ AISI สำหรับในประเทศไทยจะใช้มาตรฐานการออกแบบอาคารเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยเป็นผู้กำหนด

การวิเคราะห์การโก่งเดาะโดยวิธีไฟไนต์สตริป

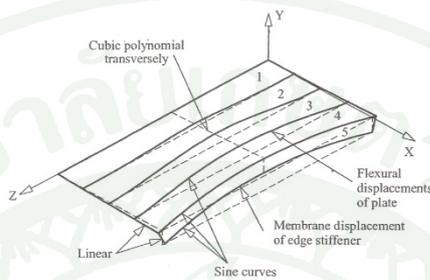
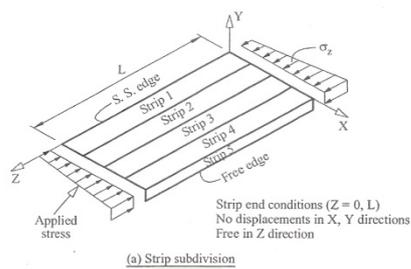
วิธี (finite strip method) ใช้วิเคราะห์การโก่งเดาะอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจสอบพฤติกรรมการโก่งเดาะของชิ้นส่วนเหล็กกริดเย็นภายใต้การอัดและการดัด การวิเคราะห์รูปแบบการโก่งเดาะใช้กราฟิกคอมพิวเตอร์จึงได้เป็นวิธีที่มีประโยชน์สำหรับการแสดงรูปแบบของการโก่งเดาะในชิ้นส่วนเปลือกบาง วัตถุประสงค์เพื่อจะใช้ไฟไนต์สตริปวิเคราะห์การโก่งเดาะเพื่ออธิบายรูปแบบการโก่งเดาะ (buckling mode) ของชิ้นส่วนเหล็กกริดเย็นภายใต้การอัดและการดัด นอกจากนี้การวิเคราะห์วิธีไฟไนต์สตริป (finite strip method) สามารถใช้หาค่าหน่วยแรงการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) และหน่วยแรงการโก่งเดาะแบบบิด (distortional buckling) ได้โดยง่ายกว่าวิธีใช้การคำนวณ ซึ่งจะยอมรับผลที่ได้ซึ่งจะใช้ค่าที่ถูกต้องมากในการคำนวณหาหน่วยแรงการโก่งเดาะ

เฉพาะที่ (local buckling stress) ในการออกแบบ ของ AS/NZS 4600. นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์หาหน่วยแรงการโก่งเดาะแบบบิดในการออกแบบตามที่ระบุไว้ในข้อ 3.3.3.3 และ 3.4.6 ของ AS / NZS 4,600

การวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์สตริปจะเหมือนกันกับที่ Cheung ได้อธิบายไว้สำหรับการวิเคราะห์หน่วยแรงเหล็กแผ่นพับและพัฒนาโดย Przemieniecki สำหรับการวิเคราะห์การโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ของหน้าตัดบาง วิธีอื่นที่เรียกว่าวิธี spline finite strip คือการพัฒนาของวิธี semi-analytical

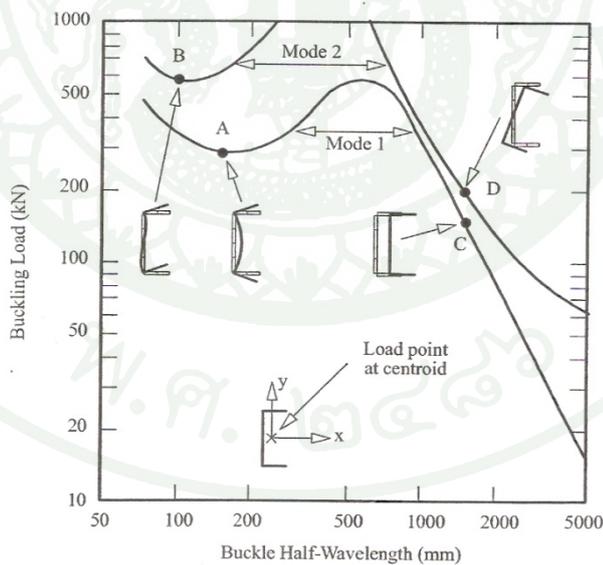
เพื่อแสดงวิธีการต่างๆ ที่เสาหน้าตัดรางน้ำที่ไม่สมมาตร อาจเกิดการโก่งเดาะภายใต้น้ำหนักรวมศูนย์และน้ำหนักเอียงศูนย์ ผลของการวิเคราะห์การโก่งเดาะโดยวิธี (semi-analytical) หน้าตัดเหล็กรางน้ำที่ไม่มีขอบเข้มน (unlipped channel) โดยมีความลึก 152 มม. กว้าง 50 มม. และหนา 3.2 มม. การวิเคราะห์เสถียรภาพของหน้าตัดรางน้ำ (Channel) แสดงในภาพที่ 31 กรณีกระจายของหน่วยแรงอัดแสดงในภาพที่ 30

กราฟนี้แสดงน้ำหนักที่เกิดการโก่งเดาะ (buckling load) (หน่วยแรงอัดคูณด้วยพื้นที่ทั้งหมด) ต่อของการโก่งเดาะสำหรับการโก่งเดาะสองแบบแรก จุดต่ำสุด (Point A) เกิดขึ้นในโค้งที่ลดลงในครึ่งความยาวคลื่น (half-wavelength) ประมาณ 160 มม. และสอดคล้องการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ในรูปแบบที่สมมาตร ในทำนองเดียวกันที่จุด B ในโค้งบนที่ต่ำสุดเกิดขึ้นในครึ่งความยาวคลื่น (half-wavelength) ประมาณ 100 มม. ซึ่งหมายถึงโหมดที่สองของการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) แสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 31 การแบ่งแถบย่อยไฟไนต์สตริปของ เหล็กทรงน้ำไม่มีขอบเม้ม

ที่มา: Hancock (2007)



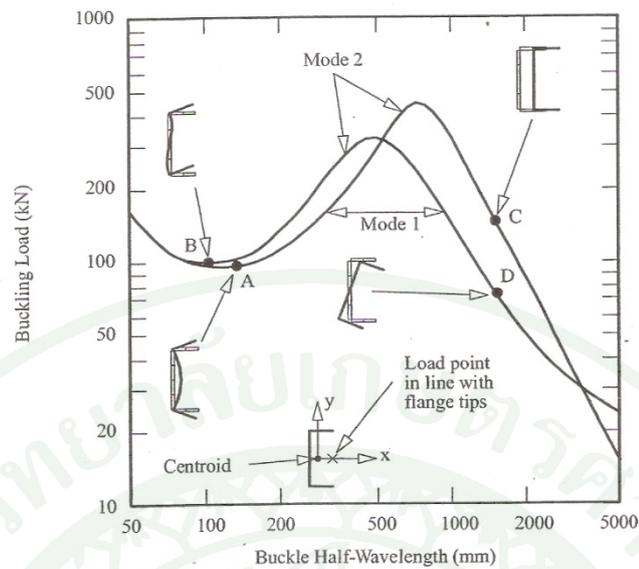
ภาพที่ 32 กราฟการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการโก่งเดาะของเหล็กทรงน้ำ

ที่มา: Hancock (2007)

ที่ครึ่งความยาวคลื่น (half-wavelength) เท่ากับ 1500 มม. โหมดแรกและที่โหมดที่สองของการโก่งเดาะ (จุด C และ D ตามลำดับ) มีรูปแบบแสดงในภาพที่ 31 จุด (C) ที่น้ำหนักวิกฤต 149 kN (189 MPA) หมายถึงการโก่งเดาะแบบคด (flexural-buckling) รอบแกน y จุดปลาย (D) ที่น้ำหนักวิกฤตของ 191 Kn (242 MPA)

สำหรับการโก่งเดาะแบบคดและบิด (flexural-torsional) รอบแกน x ซึ่งจะเป็นแกนสมมาตร ดังนั้นหน้าตัดของเสาจะทำให้หน้าหน้ากร่วมศูนย์ระหว่างจุดรองรับอย่างง่าย (simple supports) โดยระยะห่าง 1500 มม. และที่ป้องกันการหมุนตามยาวจะโก่งเดาะในรูปแบบของการคดและไม่อยู่ในโหมดการคดและไม่อยู่ในโหมดการคดและบิด (flexural-torsional). การวิเคราะห์เสถียรภาพของเหล็กกราฟนี้แสดงน้ำหนักการโก่งเดาะ (buckling load) กับการโก่งเดาะครึ่งความยาวคลื่น (half-wavelength) ของหน้าตัดภายใต้แรงอัดเชิงศูนย์สำหรับสองโหมดแรก เส้นโค้งของกราฟคล้ายคลึงกับภาพที่ 31 แต่แตกต่างกันสองประการที่สำคัญ

ประการแรก การโก่งเดาะแบบคด-บิดรวมกัน (flexural-torsional) บนโค้งในภาพที่ 32 ความโค้งของเส้นกราฟจะลดลง ในช่วง 540 mm-3300 mm. ซึ่งหมายความว่าน้ำหนักเชิงศูนย์สำหรับเสาระหว่างจุดรองรับอย่างง่าย (simple supports) โดยระยะห่าง 1500 มม. ที่น้ำหนักอยู่ตรงกลางระหว่างหน้าแปลนถึงปลายเสาจะโก่งเดาะที่น้ำหนักต่ำ โหมดการคด-บิด (flexural-torsional) (Point D) ต่ำกว่าในโหมด flexural (Point C) สำหรับครึ่งความยาวคลื่น (half-wavelength) มากกว่า 1000 mm เส้นโค้งโหมดการคด (flexural) ผ่านจุด C เหมือนในรูป 32 และ 33 และเฉพาะตำแหน่งการคด-การบิด (flexural-torsional) เส้นกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 33 น้ำหนักโก่งคดหน้าตัดรางน้ำไม่มีขอบเข้มนำมาใช้ในการอัดเยื้องศูนย์กลาง

ที่มา: Hancock (2007)

ประการที่สองน้ำหนักโก่งคดเฉพาะที่ (local buckling load) จุด A ได้ลดลงจาก 355 MPa สำหรับแรงอัดที่กระทำตามแกนในภาพที่ 33

เสายาวจะเกิดการโก่งคดแบบดัด (flexural) และเกิดโหมดการโก่งคดแบบดัด-บิด (flexural-torsional) การโก่งคดรวมทั้งโหมดการโก่งคดเฉพาะที่ นอกจากความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งคดเฉพาะที่ (local buckle) ความยาวคลื่นสั้น (short wavelength) และการโก่งคดของเสายาวความยาวคลื่น (wavelength) ในการออกแบบ ต้องพิจารณาผลของการคราก ทั้งสามรูปแบบของการโก่งคดในกรณีที่มีการโก่งคดแบบดัด-บิด (flexural-torsional) เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์สตีฟใช้เหมือนกับ Timoshenko และ Gere สำหรับเสาที่มีจุดรองรับอย่างง่าย (simply support) และการโก่งคดในครั้งความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวเสาก็สามารถใช้บัญญัติไม่เงื่อนไขขอบเขตสิ้นสุดง่ายและได้รับการพัฒนาเพื่อวิเคราะห์การโก่งคด (buckling) โครงสร้างเปลือกบางเรียบโดยทิวและ Hancock สรุปการเปรียบเทียบทั้งสองวิธีเมื่อประยุกต์ใช้กับหน้าตัดที่ความยาวคงที่

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดซึ่งใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดดังนี้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่องและอุปกรณ์มาตรฐาน
2. แผ่นโปรแกรมมาตรฐานเวอร์ชัน 4.5
3. เหล็กท่อบูรปลีเหลี่ยมผืนผ้ายาว 95 ซม.
4. มัลติมิเตอร์วัดความต้านทานเกจวัดค่าความเครียด
5. เกจวัดค่าความเครียด (strain Gauge) รุ่น (FLA-5-11-1L)
6. เกจวัดค่าการโก่งตัว (Dial Gauge) รุ่น (SDP-50C)
7. กาวสำหรับติดเกจวัดค่าความเครียด
8. เครื่องมือบัดกรีและตะกั่วบัดกรี
9. เทปพันสายไฟ สายไฟ
10. แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic jack) พร้อมเครื่องอ่านค่าน้ำหนัก (Load Cell) 200T
11. เครื่องแปลงข้อมูล (Data Logger) Data logger รุ่น SDA 810 C และรุ่น PCD 300A

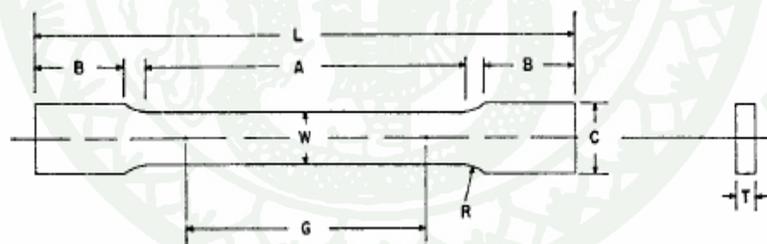
อุปกรณ์สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงซึ่งใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงดังนี้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่องและอุปกรณ์มาตรฐาน
2. อุปกรณ์วัดความยืดตัว (Extensometer)
3. เหล็กท่อบูรปลีเหลี่ยมผืนผ้า

4. แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic jack) พร้อมเครื่องอ่านค่าน้ำหนัก (Load Cell)
5. ไมโครมิเตอร์หรือเวอร์เนียสคาร์ิปเปอร์

วิธีการทดสอบแรงดึง

การทดสอบกำลังรับแรงดึงวิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึง แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้ง ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) และ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงในการดึงตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กรีดเย็นที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยจะทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM 370 06 ดังแสดงในภาพที่ 34 ใช้ automatic extensometer ในการตรวจวัดค่าความเครียด



	Standard Specimens				Subsize Specimen	
	Plate-Type, 1½-in. Wide		Sheet-Type, ½-in. Wide		¼-in. Wide	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gage length (Notes 1 and 2)	8.00 ± 0.01	200 ± 0.25	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.000 ± 0.003	25.0 ± 0.08
W—Width (Notes 3, 5, and 6)	1½ + ⅛ - ¼	40 + 3 - 6	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.250 ± 0.002	6.25 ± 0.05
T—Thickness (Note 7)						
R—Radius of fillet, min (Note 4)	½	13	½	13	¼	6
L—Over-all length, min (Notes 2 and 8)	18	450	8	200	4	100
A—Length of reduced section, min	9	225	2¼	60	1¼	32
B—Length of grip section, min (Note 9)	3	75	2	50	1¼	32
C—Width of grip section, approximate (Notes 4, 10, and 11)	2	50	¾	20	¾	10

ภาพที่ 34 ขนาดการวัดชิ้นส่วนตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM 370 06

ที่มา: American Society of Testing and Materials (2007)

การทดสอบแรงดึงของเหล็กรีดเย็นหน้าตัดทอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า การเตรียมตัวอย่างจะทำการตัดชิ้นส่วนมาจากหน้าตัดเหล็กกล่องในด้านความลึกของหน้าตัดทั้งสองด้านแสดงในภาพที่ 35 โดยจะมีตัวอย่างการทดสอบแรงดึงหน้าตัดอย่างละ 2 ชิ้น เพื่อจะศึกษาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึงกับอัตราการยืดตัวของเหล็กรีดเย็น นอกจากนี้จะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) หน่วยแรงสูงสุดและหน่วยแรงประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

1. ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area)
2. โมดูลัสอีลาสติกภายใต้พิคัสต์ส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus



ภาพที่ 35 การเตรียมตัวอย่างทดสอบแรงดึง

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลักโดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน การทดสอบแรงดึงนอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุและบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ

วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกริดเย็นในงานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาพฤติกรรมการของเสาที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างและพฤติกรรมของเสาที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างภายใต้กำลังรับแรงอัดที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่อง Instron ซึ่งจะมีความสามารถในการกดด้วยแรงสูงสุด 200 KN ความยาวของชิ้นส่วนสูงสุดที่ทดสอบได้ 2000 มม. ใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.5 มม./นาที สำหรับหน้าตัดทุกขนาด ซึ่งเครื่อง Instron จะบันทึกค่าน้ำหนักและการโก่งตัวตามแนวแกนไปจนถึงน้ำหนักสูงสุด การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

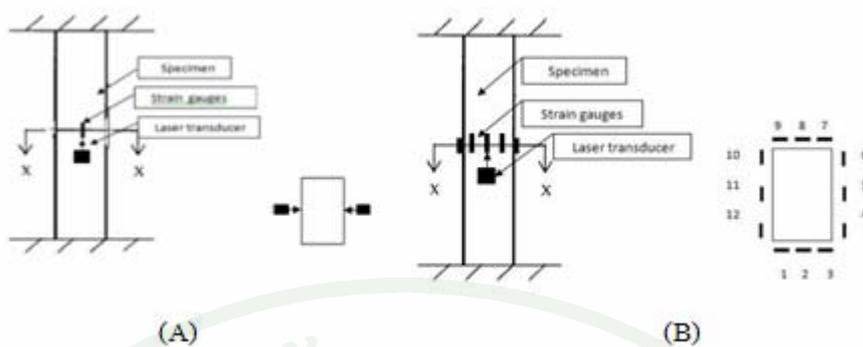
1. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกริดเย็นที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง

หน้าตัดเสานำมาทดสอบเป็นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ชื่อในการทดสอบ R60, R 100 และ R150 โดยหน้าตัดแต่ละขนาดจะมีขนาดความกว้าง ความลึกและความหนาที่แตกต่างกัน 3 ขนาด โดยจะทดสอบหน้าตัดละ 2 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของตัวอย่างเสานำมาทดสอบ

Specimen	Depth	Width	Thickness	Radius	Length	Area
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm. ²
R60-1	60	30	3.2	2	950	508.7
R60-2	60	30	3.2	2	950	508.7
R100-1	100	50	1.6	2	950	463.2
R100-2	100	50	1.6	2	950	463.2
R150-1	150	75	3.2	2	950	1373
R150-2	150	75	3.2	2	950	1373

การวัดหน่วยแรงอัดของตัวอย่างเสา R60-1, R60-2 จะใช้อุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) ติดกับผิวของหน้าตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาวเสาเพื่อวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นตามหน้าตัดขวางและจะติดตั้ง LVDT ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดการโก่งตัวด้านข้างในตำแหน่งกึ่งกลางเสาเพื่อดูพฤติกรรมการโก่งเดาะ ดังแสดงในภาพที่ 36(A)



ภาพที่ 36 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) และ LVDT (A) ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) และ LVDT สำหรับเสาหน้าตัด R60-1, R60-2 (B) ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) และ LVDT สำหรับเสาหน้าตัด R100-1, R 100-2 และ R150-1, R150-2

สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะของหน้าตัดเสา R100-1, R 100-2 และ R150-1, R150-2 โดยทำนายว่าจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ ดังนั้นการวัดการกระจายตัวของหน่วยแรงจะติดอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) ด้านละ 3 ตำแหน่งของหน้าตัดขวาง สำหรับการวัดค่าการโก่งตัวทางข้าง จะใช้ LVDT ติดตั้งทั้ง 4 ด้านของหน้าตัดเพื่อดูการโก่งตัวทางด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 36 (B) โดยค่าอุปกรณ์ความเครียด (Strain gauges) ที่วัดได้จะนำมาคำนวณหาความเครียดและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดแล้วนำมาเขียนกราฟเพื่อดูการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของหน้าตัด

2. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกริดเย็นที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง

การทดสอบในกรณีนี้จะใช้เหล็กที่มีขนาดหน้าตัดแตกต่างกัน 2 ขนาดโดยทำการทดสอบหน้าตัดละ 2 ตัวอย่าง และใช้ชื่อเรียกในการทดสอบว่า IM100-1 และ IM150-1 ซึ่งมีขนาดเดียวกับหน้าตัดเสา R100-1 และ R150-2 ตามลำดับ โดยหน้าตัดของเสา IM100-1 และ IM150-1 จะทำให้เกิดการเสีรูปที่ฉิวระนาบโดยการกดด้วยเครื่องไฮดรอลิคผ่านเพลากลมให้เสีรูปบริเวณกึ่งกลางหน้าตัดแสดงในรูปที่ 37 ให้ได้ระยะการเสีรูปสูงสุดจากระนาบเดิมประมาณ 5 มิลลิเมตร ซึ่งจากการวัดขนาดการเสีรูปที่เกิดขึ้นจริงจะวัดค่าเฉลี่ยการเสีรูปจากระนาบเดิมโดยจะแสดงในตารางที่ 2

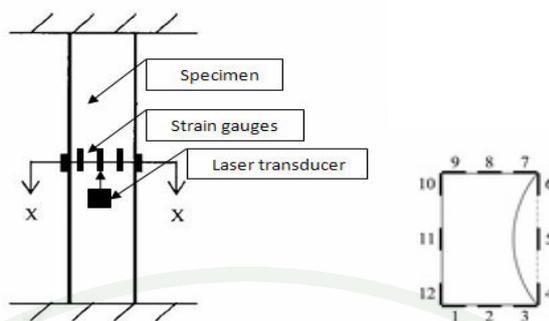
ตารางที่ 2 ระยะที่เกิดจากการทำให้เสียรูปจากผิวระนาบเดิม

Specimen	average(mm.)
IM100-1	5.3
IM100-2	5.8
IM150-1	5.4
IM150-2	5.1



ภาพที่ 37 การทำให้หน้าตัดเกิดความไม่สมบูรณ์ทางด้านรูปร่างเนื่องจากการผลิต

การวัดการกระจายของหน่วยแรงอัดในตัวอย่างเสา IM100-1, IM100-2 และ IM150-1, IM150-2 สำหรับในการวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะของหน้าตัดเสาที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง โดยทำนายว่าจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ ดังนั้นการวัดการกระจายของหน่วยแรงจะติดอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) และ LVDT โดยจะติดอุปกรณ์วัดความเครียด ด้านละ 3 ตำแหน่งของหน้าตัด สำหรับการวัดค่าการโก่งตัวทางข้างจะติดตั้ง LVDT ทั้ง 4 ด้านของหน้าตัดเพื่อดูการโก่งตัวทางด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 38 โดยค่าอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) ที่วัดได้ จะนำมาคำนวณหาค่าความเครียดและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในหน้าตัดแล้วนำมาเขียนกราฟเพื่อดูการกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของหน้าตัด



ภาพที่ 38 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดและ LVDT ของเสาที่ไม่มีความสมบูรณ์

การเตรียมตัวอย่างและการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด

1. ตรวจสอบเช็คอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) โดยทำการวัดความต้านทานของอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) ด้วยเครื่องโวลต์มิเตอร์ซึ่งค่าความต้านทานจะต้องไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด

2. การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดของเหล็กจะต้องทำการขัดผิวเหล็กด้วยกระดาษทรายเป็นรูปก้นหอยเพื่อให้เกิดพื้นที่ผิวที่มีความเสียดทานกับอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) จนกระทั่งผิวของเหล็กเกิดเป็นเนื้อสีขาวที่แสดงในภาพที่ 39

3. ใช้น้ำยาเคมีชนิด Acetone ทำความสะอาดผิวเหล็กบริเวณที่ทำการขัดด้วยกระดาษทราย โดยใช้สำลีจุ่มน้ำยา Acetone แสดงในภาพที่ 40 เช็ดจนกระทั่งพื้นที่ผิวที่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) สะอาดโดยไม่มีฝุ่นและเศษสนิมติดอยู่บริเวณพื้นผิว

4. ทำการติดกาวที่อุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauges) ในด้านหลังของแผ่นวงจรถึงกาวที่ใช้ติดจะต้องเป็นกาวเฉพาะในการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด จากนั้นนำอุปกรณ์วัดความเครียดมาติดตั้งกับชิ้นส่วนตัวอย่างในตำแหน่งที่กึ่งกลางความยาว



ภาพที่ 39 การเตรียมพื้นผิวสำหรับอุปกรณ์วัดความเครียด



ภาพที่ 40 น้ำยาเคมีทำความสะอาดผิวเหล็ก

1. กำลังการรับแรงอัดของเสาเหล็กกรีดเย็นตามมาตรฐาน AISI

การหาค่ากำลังรับแรงอัดที่ระบุในมาตรฐาน AISI สำหรับเสาเหล็กกรีดเย็นที่มีหน้าตัดปิด ภายใต้การรับแรงอัดในแนวแกนผ่านจุดศูนย์กลาง ค่ากำลังรับแรงอัดของเสาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 27

$$P_n = A_e F_n \quad (27)$$

เมื่อ A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพที่หาได้จากความกว้างประสิทธิภาพ F_n เป็นหน่วยแรงการโก่งเดาะระบุ กำลังรับแรงอัดระบุคำนวณได้จากพื้นที่ประสิทธิภาพที่จุดเริ่มของการคราก โดยคำนวณจากความกว้างประสิทธิภาพของชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดโดยพิจารณาจากตัวคูณความชะลูดเมื่อ $\lambda \leq 0.673$ จะใช้ $b=w$ เมื่อ b เป็นความกว้างประสิทธิภาพที่ใช้ออกแบบและ w เป็นความกว้างส่วนเรียบ ตัวคูณความชะลูด (λ) หาได้จากสมการที่ 28

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{f_{cr}}} \quad (28)$$

เมื่อค่า f เป็นหน่วยแรงในชิ้นส่วนรับแรงอัด และค่า F_{cr} เป็นหน่วยแรงวิกฤตยึดหยุ่นหาได้จากสมการที่ 1 และเมื่อ $\lambda \geq 0.673$ จะใช้ $b = \rho w$ เมื่อ ρ เป็นตัวคูณลดเฉพาะที่มีค่าสมการที่ 29

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right) / \lambda \quad (29)$$

สำหรับชิ้นส่วนรับแรงอัดจะให้ f เท่ากับ F_n เมื่อ F_n เป็นหน่วยแรงการโก่งเดาะที่ระบุซึ่งสามารถคำนวณ F_n ได้จากสมการที่ 30 ในกรณีที่ $\lambda_c \leq 1.5$ และค่า F_n ในกรณีที่ $\lambda_c \geq 1.5$ สามารถคำนวณได้ในสมการที่ 31 โดย λ_c เป็นตัวคูณความชะลูดที่หาได้จากสมการที่ 32

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad (30)$$

$$F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y \quad (31)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_4}} \quad (32)$$

โดยที่ค่า เป็นหน่วยแรงครากที่ใช้ออกแบบและ F_e เป็นหน่วยแรงการโก่งเดาะในแบบอิลาสติกให้ใช้ค่าต่ำสุดระหว่างหน่วยแรงการโก่งเดาะเนื่องจากแรงคัต แรงบิด และแรงคัตบิดร่วมกัน แต่สำหรับหน้าตัดปิดหรือหน้าตัดที่มีความสมมาตรแบบสองแกนจะไม่มีพฤติกรรมการ

วิบัติเนื่องจากแรงดัด แรงบิด และแรงดัดบิดร่วมกัน โดยหน้าตัดปิดจะมีการวิบัติแบบการดัดและการโค้งเดาะเฉพาะที่โดยค่า F_e หาได้จากสมการที่ 33

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (33)$$

เมื่อ KL เป็นความยาวประสิทธิ์ผลซึ่งค่า k จะขึ้นอยู่กับฐานรองรับของเสา r เป็นรัศมีไจเรชั่นรอบแกน y

ตารางที่ 3 คุณสมบัติหน้าตัดของเสาเหล็กกริดเย็น

Specimen	A	I_x	I_y	R_x	R_y
mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
R60-1	508.7	125000	42500	15.676	9.140
R100-1	463.2	613000	213000	36.379	21.444
R150-1	1373	4020000	13780000	54.110	100.182
R60-2	508.7	125000	42500	15.676	9.140
R100-2	463.2	613000	213000	36.379	21.444
R150-2	1373	4020000	13780000	54.110	100.182

ผลและวิจารณ์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง

การทดสอบกำลังรับแรงดึงเป็นการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของชิ้นส่วนตัวอย่างที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดของหน้าตัดเสาเหล็กกริดเย็น โดยวัตถุประสงค์ของการทดสอบแรงดึงเพื่อจะต้องการทราบคุณสมบัติของวัสดุ เช่น กำลังพิสูจน์ (proof stress) ที่ 0.2% ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น เพื่อนำค่าดังกล่าวมาคำนวณกำลังรับแรงอัดสูงสุดของหน้าตัดและหน่วยแรงการโก่งเดาะในแต่ละน้ำหนักที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะในช่วงต่างๆ การทดสอบแรงดึงจะทดสอบกับเครื่อง Electromechanical Universal Testing Machine SCHENCK RSA 250 โดยใช้การเคลื่อนที่ของเครื่องในการควบคุมการทดสอบ 0.5 มม./วินาที โดยจะทำการตัดชิ้นตัวอย่างจากเหล็กที่ใช้ในการทดสอบแรงอัด โดยตัดจากเสา R60-1, R60-2, R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 ซึ่งจะทำการตัดจากตัวอย่างทดสอบตัวอย่างละ 1 ชิ้น การทดสอบจะทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM A370 ที่แสดงในภาพที่ 34 การวัดการอัตราส่วนความเครียดจากเครื่องมืออุปกรณ์วัดการยืดตัวของวัสดุ ที่เรียกว่า extensometer ดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการยืดตัว (extensometer)

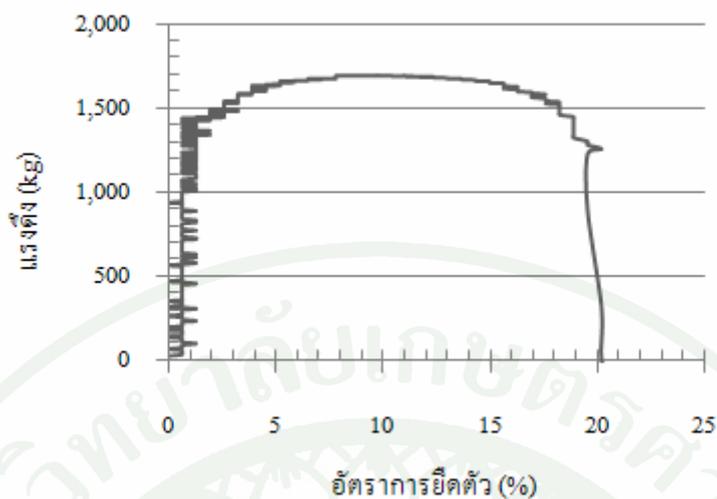


ภาพที่ 42 การวัดระยะเกจของชิ้นส่วนรับแรงดึง

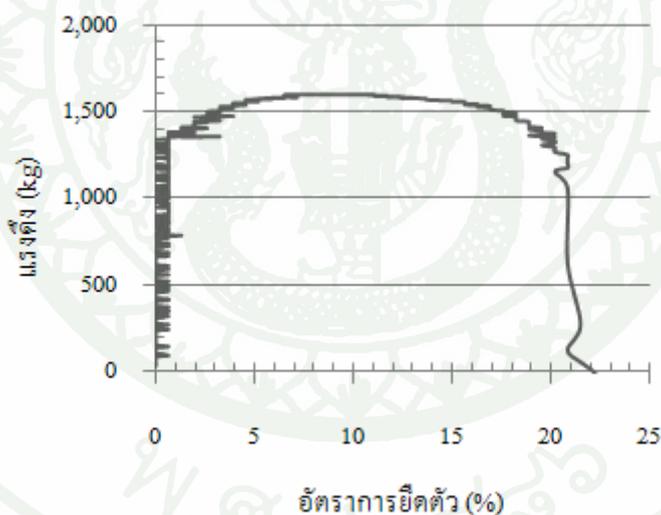
สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของเหล็ก R60-1 และ R60-2 สามารถเขียนกราฟได้ ดังแสดงในภาพที่ 43 และ ภาพที่ 44 ซึ่งจะเป็นกราฟที่เขียนระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัวของ เหล็ก ซึ่งจากกราฟสามารถหา กำลังครากของเหล็กที่ 0.2% และค่ายังก์โมดูลัส ซึ่งสามารถสรุป คุณสมบัติของหน้าตัดของชิ้นส่วนตัวอย่าง R60-1 และ R60-2 ซึ่งจะสรุปได้ในตารางที่ 4 สามารถ นำไปคำนวณค่ากำลังอัดประลัยของเสา R60-1 และ R60-2 ได้ในแต่ละวิธี

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของชิ้นส่วนรับแรงดึงของเสา R60-1 และ R60-2

Specimen	R1 -60	R2-60
ความหนา (cm.)	0.284	0.288
ความกว้าง (cm.)	1.256	1.258
พื้นที่ภาคตัดขวาง (cm ²)	0.36	0.362304
แรงดึงที่ความเค้นครากที่ 0.2% (kg.)	1,428.03	1,355.05
แรงดึงสูงสุด (kg.)	1,698.27	1,600.41
ความเค้นครากที่ 0.2% (ksc)	4,003.41	3,740.08
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ksc)	4,761.00	4,417.31
ยังก์โมดูลัส (ksc)	2,109,786	2,146,483
อัตราการยืดตัว (%)	27.18	29.38



ภาพที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R60-1



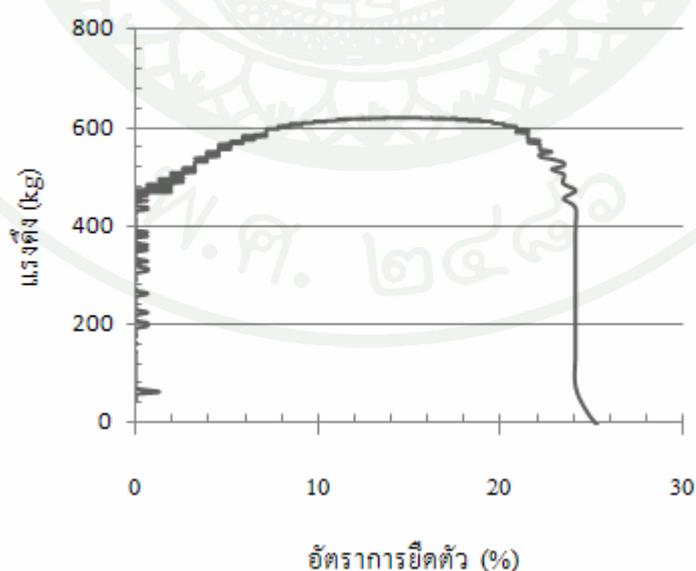
ภาพที่ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการอัตราการยืดตัว R60-2

สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของเหล็ก R100-1 และ R100-2 สามารถเขียนกราฟได้ดังแสดงในภาพที่ 45 และ ภาพที่ 46 ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกราฟที่เขียนระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัวของเหล็ก ซึ่งจากกราฟสามารถหา กำลังครากของเหล็กที่ 0.2% และค่ายังก์โมดูลัส ซึ่งสามารถสรุปคุณสมบัติของหน้าตัดของชิ้นส่วนตัวอย่าง R100-1 และ R100-2 ซึ่งจะสรุปได้ใน

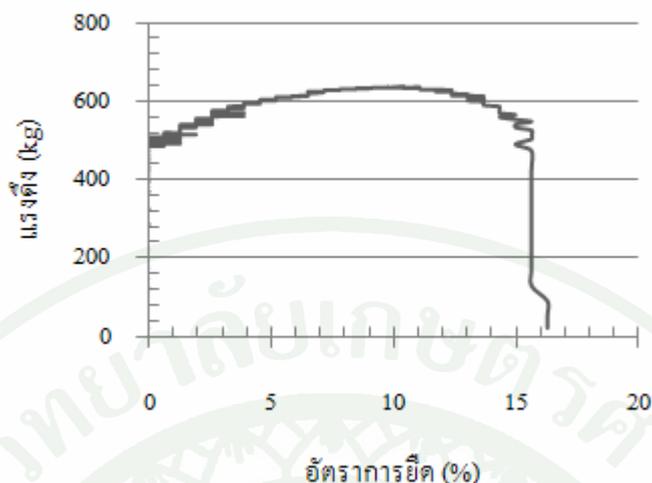
ตารางที่ 5 สามารถนำไปคำนวณค่ากำลังอัดประลัยของเสา R100-1 และ R100-2 ได้ในแต่ละวิธี ซึ่งค่ายังค์โมดูลัสของตัวอย่างชิ้นส่วน R100-1 และ R100-2 มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของ AISI ที่ใช้คำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณกำลังการทดสอบมีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของชิ้นส่วนแรงดึงของเสา R100-1 และ R100-2

Specimen	R1 -100	R2-100
ความหนา (cm.)	0.148	0.149
ความกว้าง (cm.)	1.256	1.259
พื้นที่ภาคตัดขวาง (cm ²)	0.193	0.188
แรงดึงที่ความเค้นครากที่ 0.2% (kg.)	471.97	485.32
แรงดึงสูงสุด (kg.)	622.43	636.70
ความเค้นครากที่ 0.2% (ksc)	2535.56	2575.03
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ksc)	3343.87	3378.20
ยังค์โมดูลัส (เมกะปาสคาล)	1,965,341	1,869,317
อัตราการยืดตัว (%)	27.18	29.38



ภาพที่ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R 100-1

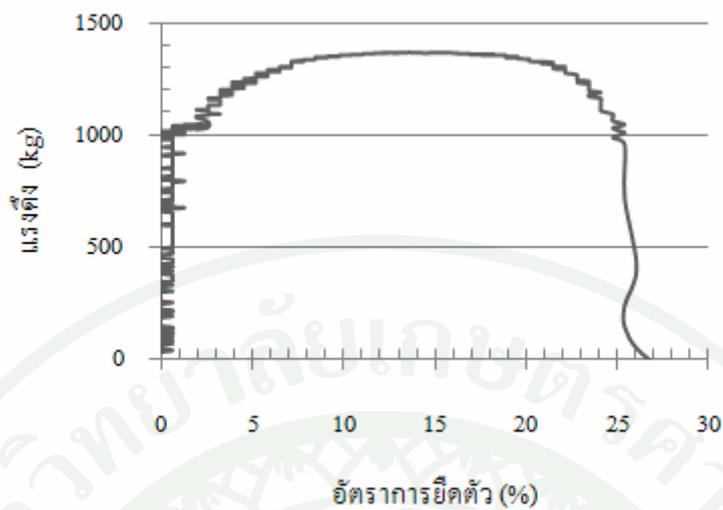


ภาพที่ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R100-2

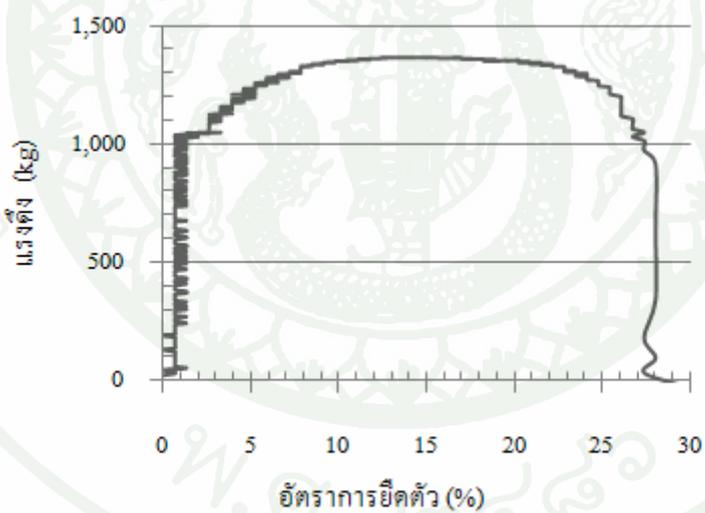
สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของเหล็ก R150-1 และ R150-2 สามารถเขียนกราฟได้ดังแสดงในภาพที่ 47 และ ภาพที่ 48 ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกราฟที่เขียนระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัวของเหล็ก ซึ่งจากกราฟสามารถหา กำลังครากของเหล็กที่ 0.2% และค่ายังค์โมดูลัส ซึ่งสามารถสรุปคุณสมบัติของหน้าตัดของชิ้นส่วนตัวอย่าง R150-1 และ R150-2 ซึ่งจะสรุปได้ในตารางที่ 6 สามารถนำไปคำนวณค่ากำลังอัดประลัยของเสา R150-1 และ R150-2 ได้ในแต่ละวิธี

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของชิ้นส่วนแรงดึงของเสา R150-1 และ R150-2

Specimen	R1 -150	R2-150
ความหนา (cm.)	0.271	0.269
ความกว้าง (cm.)	1.261	1.259
พื้นที่ภาคตัดขวาง (cm ²)	0.34	0.34
แรงดึงที่ความเค้นครากที่ 0.2% (kg.)	1,022.73	1,033
แรงดึงสูงสุด (kg.)	1,371.05	1,374.11
ความเค้นครากที่ 0.2% (ksc)	2992.80	3049.94
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ksc)	4012.07	4057.35
ยังค์โมดูลัส (เมกะปาสคาล)	2,016,412	2,095,311
อัตราการยืดตัว (%)	27.18	29.38



ภาพที่ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R150-1

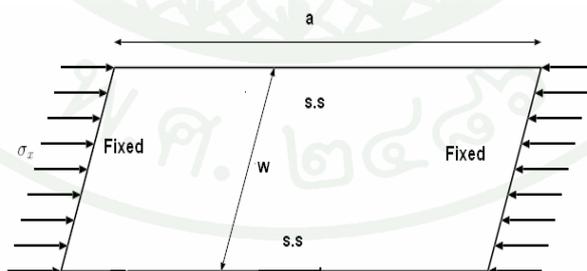


ภาพที่ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับอัตราการยืดตัว R150-2

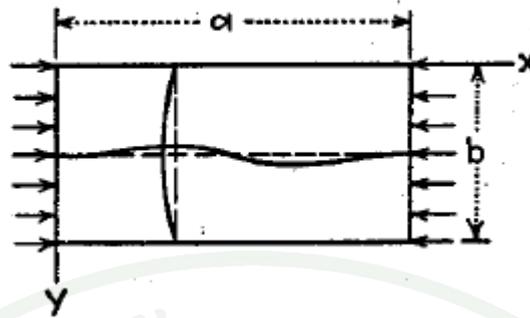
การวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเคาะของแผ่นบาง

พฤติกรรมการโก่งเคาะของแผ่นบางในช่วงอีลาสติก เป็นพื้นฐานการออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเคาะของโครงสร้างที่ผลิตขึ้นจากเหล็กกรีดเย็น พฤติกรรมการโก่งเคาะเฉพาะในช่วงอีลาสติก หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีค่าไม่ถึงกำลังครากของเหล็ก กล่าวคือเมื่อน้ำตัดที่ผลิตขึ้นจะเหล็กกรีดเย็นมีน้ำหนักกระทำให้เกิดการเสียรูปโดยมีระนาบของพื้นผิวเหล็กเกิดเป็นคลื่นรูปไซน์ ในขณะที่เสายังไม่เกิดการเสียรูปทางด้านข้าง ซึ่งเรียกว่าการโก่งเคาะเฉพาะที่ ดังนั้นเมื่อปล่อยน้ำหนักที่กระทำออกจากโครงสร้างเสาเหล็กกรีดเย็น จะเกิดการคืนรูปของระนาบผิวเสาเป็นระนาบคงเดิม ซึ่งแสดงว่าหน่วยแรงที่ทำให้เกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่ยังไม่ไปถึงจุดครากและถึงกำลังประลัยของเหล็ก แต่ทั้งนี้ในการออกแบบหน้าตัดสำหรับโครงสร้างเหล็กกรีดเย็นจะนำผลกระทบที่เกิดจากการโก่งเคาะเฉพาะที่มาคิดในการออกแบบ

ปัจจัยที่สำคัญของการเกิดพฤติกรรมการโก่งเคาะเฉพาะที่ คือ อัตราส่วนความกว้างต่อความยาว ซึ่งหาก อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวมีค่ามากพฤติกรรมการโก่งเคาะเฉพาะที่จะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การหาหน่วยแรงของการโก่งเคาะเฉพาะที่ในช่วงอีลาสติกจะใช้สูตรของ Timoshenko and Gere ในสมการที่ 13 ซึ่งมีค่า k เป็นสัมประสิทธิ์ของการโก่งเคาะ ซึ่งในกรณีของชิ้นส่วนปลายยึดจะมีค่าเท่ากับ 4 และในกรณีชิ้นส่วนปลายอื่นจะมีค่าเท่ากับ 0.435 สำหรับในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์เสาที่มีหน้าตัดเป็นรูปทอสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งชิ้นส่วนที่ประกอปกันจะเป็นชิ้นส่วนปลายยึด ดังนั้นรูปแบบจำลองของด้านประกอปกจะทำให้เป็นฐานรองรับอย่างง่ายสำหรับทั้งสองด้านตามความยาว สำหรับด้านที่กำหนดให้เป็นฐานรองรับจะกำหนดเป็นแบบยึดแน่น ดังแสดงในภาพที่ 49 และมีแรงกระทำตามแนวแกนตามความยาวของแผ่นบางซึ่งทำให้เกิดเส้นโค้งอีลาสติกดังแสดงในภาพที่ 50



ภาพที่ 49 ผังโครงสร้างอิสระของแผ่นบาง



ภาพที่ 50 เส้นโค้งอิลาสติกของแผ่นบางที่ปลายยึดแน่น

หน่วยแรงการโก่งเคาะเฉพาะที่ของแผ่นบาง (Plate) สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการดังต่อไปนี้
พิจารณาแผ่นบางที่มีความกว้าง $w = 150$ mm. ความยาว $a = 150$ mm. ความหนาของแผ่นบาง $t = 3.2$, อัตราส่วนปัวซองของเรโซ เท่ากับ 0.3 โมดูลัสอิลาสติก $E = 200,000$ N/mm² เมื่อ $\frac{a}{w} = 1$ จากตารางที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบขอบเขตเงื่อนไขระหว่างปลายยึดแน่นและแบบฐานรองรับอย่างง่าย เมื่ออัตราส่วน $a/w = 1$ ค่า $k = 4$ ดังนั้นหน่วยแรงการโก่งเคาะเฉพาะที่ของแผ่นบางจะคำนวณหาค่าได้ดังต่อไปนี้ เพื่อจะเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงการโก่งเคาะแต่ละเงื่อนไขของฐานรองรับ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างโดยจะมีผลต่อค่า k

$$\sigma_{cr} = \frac{4x\pi^2 x 200000}{12(1 - 0.3^2) \left(\frac{150}{3.2}\right)^2} = 329.067 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

ตารางที่ 7 หน่วยแรงการโก่งเคาะที่มีฐานรองรับ 2 ชนิด

Simply		Fixed		
a/w	k	F _{cr} (Timoshenko)	k	F _{cr} (Timoshenko)
0.6	5.14	423	13.38	1101
1	4	329	6.74	555
1.4	4.47	368	5.45	448
1.41	4.49	369	4.73	423
3	4	329	4.41	363
6.33	4	329	4.2	357

การวิเคราะห์หาค่า k ที่มีขอบเขตถี่ของไอด้านรับแรงเป็นแบบยึดแน่น ซึ่งค่า k ที่นำมาวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงการโก่งเดาะเฉพาะที่จะใช้ $k=4$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะที่มีฐานรองรับอย่างง่าย เนื่องจากค่าดังกล่าวได้มาจากการพิสูจน์มาจากขอบเขตถี่ของไอที่แตกต่างกัน โดยค่า k ขึ้นอยู่กับ m และ n โดยที่ m และ n เป็นจำนวนของคลื่นครึ่งลูกของการโก่งเดาะ (Half Sine Waves) ในทิศทางแกน x และ y ตามลำดับ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว w/a กรณีของขอบเขตถี่ของไอที่เป็นแบบยึดหมุนสี่ด้าน จากการศึกษาพบว่ายังอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว ยิ่งมากค่าของ k อัตราส่วน a/w ค่าของ k ที่นิยมใช้เท่ากับ 4 ซึ่งจะเหมาะสม เมื่ออัตราส่วนของ a/w มีค่าค่อนข้างมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทฤษฎีการวิเคราะห์แผ่นบาง (Plate) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถศึกษาพฤติกรรมของการโก่งเดาะเฉพาะที่ของแต่ละความยาวของแผ่นบาง (Plate) ได้ โดยการจำลองให้ความยาวของแผ่นบาง (Plate) เปลี่ยนแปลงไป ตั้งแต่ความยาวที่สั้นและความยาวที่มาก โดยการคำนวณใช้ค่า k ที่วิเคราะห์ได้จากสมการคณิตศาสตร์ของ Timoshenko และ Gere ดังแสดงในตารางที่ 7 เพื่อเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงวิกฤตที่วิเคราะห์ได้โดยใช้ค่าจริงของค่า k และค่า $k=4$ โดยเป็นค่าประมาณ ไม่ว่าฐานรองรับเป็นอย่างไรหรือเป็นแบบยึดแน่น

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นบางภายใต้แรงอัดตามแนวแกน

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถหาได้โดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ การเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดต่างกันจะนำไปสู่ไฟไนต์เอลิเมนต์เมตริกซ์ในรูปแบบต่างกันไป

ในกรณีของแผ่นบางซึ่งเป็นปัญหาความเค้นในระนาบ (Plane Stress) ค่าความเค้น σ_z ในแนวตั้งฉากกับแผ่น ถูกสมมติให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าความเค้นย่อยต่างๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ซึ่งจะแสดงค่าความเครียดย่อย (Strain Components) ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

โดย E เป็นค่ายังส์โมดูลัสของ และ ν แทนค่าอัตราส่วนของปัวส์ซอง และค่า ε_x , ε_y แทนค่าความเครียดฉาก (Normal Strain) ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ และ γ_{xy} แทนค่าความเครียดเฉือน

หลักการจำลองพฤติกรรมของแผ่นบางโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะจำลองพฤติกรรมการโก่งคาะในช่วงอิลาสติก โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้โปรแกรม Nastran เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ หลักการวิเคราะห์หาค่าวิกฤตของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้ทฤษฎีของความมั่นคงของโครงสร้างในกรณีของแผ่นบาง โดยสมมุติรูปแบบของการโก่งคาะของแผ่นบางซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการเมตริกซ์เป็นสตีเฟนสของแผ่นบาง โดยจะหาค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดความสอดคล้องกับรูปแบบการโก่งคาะซึ่งเป็นค่าเจาะจง (Eigenvalue) ซึ่งหากนำมาคูณกับหน่วยแรงที่ทำให้เกิดการโก่งคาะเริ่มแรกจะได้หน่วยแรงที่ทำให้เกิดการโก่งคาะของแผ่นบาง

การจำลองพฤติกรรมการโก่งคาะของแผ่นบางโดยใช้โปรแกรม Nastran จะต้องทราบคุณสมบัติของวัสดุโมดูลัสความยืดหยุ่น $E = 2.17 \times 10^6$ ksc และอัตราส่วนปัวซองเรโซ $\nu = 0.3$ โดยมีหน่วยแรงการโก่งคาะเริ่มต้นเท่ากับ 100 ksc ซึ่งจากการวิเคราะห์จะแสดงไว้ในตารางที่ 8

$$\sigma_{cr} = \text{Eigenvalue} \times \text{Apply stress}$$

$$\sigma_{cr} = 3.10 \times 100 = 310 \frac{N}{mm^2}$$

ตารางที่ 8 หน่วยแรงการโก่งคาะที่มีฐานรอง 2 ชนิดที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์

Simply			Fixed	
a/b	k	F _{cr} (FEM)	k	F _{cr} (FEM)
0.6	5.14	393	13.38	1028
1	4	310	6.74	525
1.4	4.47	352	5.45	436
1.41	4.49	354	4.73	356
3	4	321	4.41	358
6.33	4	324	4.2	330

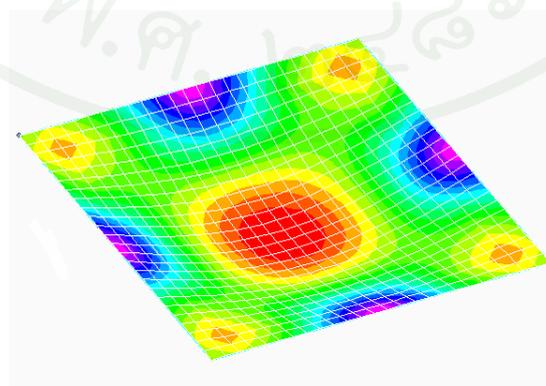
จากผลการจำลองหน่วยแรงการโก่งคาะเฉพาะที่ของแผ่นบางโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะให้อัตราส่วนทางความกว้างต่อความยาวแปรผันดังแสดงในตารางที่ 7 จะเปรียบเทียบระหว่างขอบเขตเงื่อนไขที่มีปลายยึดหมุนและปลายยึดแน่น เมื่อค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างมีค่า

เท่ากับ 6.33 จะได้ผลลัพธ์ซึ่งจะเป็นค่าหน่วยแรงการโก่งเคาะเฉพาะที่ของแผ่นบางมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าหน่วยแรงการโก่งเคาะเฉพาะที่ของแผ่นบางที่มีปลายยึดหมุนเท่ากับ 324 N/mm^2 และแผ่นบางที่มีปลายยึดแน่นเท่ากับ 330 N/mm^2 โดยมีการกระจายตัวของหน่วยแรงซึ่งแสดงเป็นแผนภูมิสีของแผ่นบางดังแสดงในภาพที่ 51 และ ภาพที่ 52 ตามลำดับ

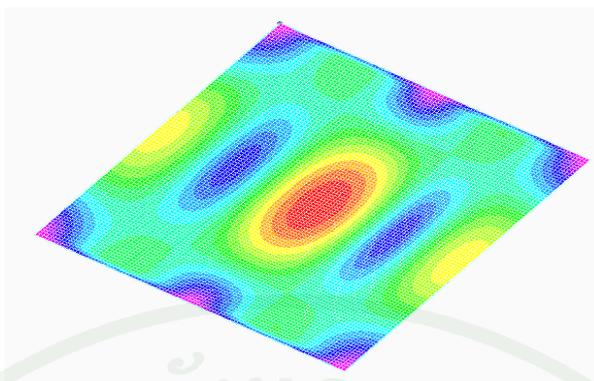
สำหรับการวิเคราะห์หน่วยแรงการโก่งเคาะของแผ่นบางในช่วงอิลาสติก โดยอาศัยสูตรการคำนวณของ Timoshenko ซึ่งหาได้จากสมการที่ 13 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการแทนสูตรในสมการแสดงไว้ในตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสูตรการคำนวณกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจากตารางเมื่อค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวมีค่ามาก หน่วยแรงการโก่งเคาะเฉพาะที่ของแผ่นบางในช่วงอิลาสติกมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบหน่วยแรงการโก่งเคาะของแผ่นบางแต่ละวิธี

Simply				Fixed			
a/b	k	$F_{cr}(\text{Timoshenko})$	$F_{cr}(\text{FEM})$	k	$F_{cr}(\text{Timoshenko})$	$F_{cr}(\text{FEM})$	
0.6	5.14	423	393	13.38	1101	1028	
1	4	329	310	6.74	555	525	
1.4	4.47	368	352	5.45	448	436	
1.41	4.49	369	354	4.73	423	356	
3	4	329	321	4.41	363	358	
6.33	4	329	324	4.2	357	330	



ภาพที่ 51 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นบาง $a/b = 1$ ในกรณีของฐานรองรับอย่างง่าย



ภาพที่ 52 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นบาง $a/b = 1$ ในกรณีของฐานรองรับแบบยึดแน่น

การวิเคราะห์หน้าตัดเสาเหล็กท่อบูรีเหลี่ยมผืนผ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดสอบเสาเหล็กท่อบูรีเหลี่ยมผืนผ้า ในห้องปฏิบัติการ การคาดคะเนน้ำหนักวิกฤต และรูปแบบการโก่งเดาะ มีความสำคัญมาก เพราะจะส่งผลไปถึงการติดตั้ง เครื่องมือวัด เช่น เครื่องมือวัดการโก่งตัว และ เครื่องมือวัดความเค้นและความเครียด เพราะสิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่จะได้มาซึ่งผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำ การคาดคะเนโดยการใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นอีกวิธีที่นำมาจำลองพฤติกรรมทางโครงสร้าง โดยสามารถวิเคราะห์หาได้ด้วยมือ หรือ ใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ หลักการวิเคราะห์หาน้ำหนักวิกฤตของไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้ทฤษฎีของความมั่นคงของโครงสร้าง ปัญหาความมั่นคงของโครงสร้าง (stability problems) กล่าวคือ สมมุติให้น้ำหนักกระทำกับโครงสร้าง ซึ่งทำให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ (sway) แต่ในความเป็นจริง โครงสร้างอาจจะไม่เกิดการเคลื่อนตัว (on sway) ก็ได้ ในทฤษฎีความมั่นคงของโครงสร้าง จะกำหนดให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนตัว (sway) ซึ่งจะหาน้ำหนัก (load) ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัว (sway) ซึ่งเรียกว่า น้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) ที่ทำให้เกิดหรือไม่เกิดการเคลื่อนตัวก็ได้

การจำลองชิ้นส่วนเสาเหล็กท่อบูรีเหลี่ยมผืนผ้า

ปัจจุบันโครงสร้างอาคารเหล็กที่มีความซับซ้อนยุ่งยากต่อการวิเคราะห์ รวมถึงการศึกษาวิจัย ปัญหาที่มีความยากและซับซ้อน หากทำการวิเคราะห์ด้วยมือ ดังนั้น โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นทางเลือกหนึ่งซึ่งจะนำมาใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยชิ้นนี้ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ในการวิเคราะห์ตัวอย่างชิ้นส่วนเหล็กท่อบูรีเหลี่ยมที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้นำมาจำลองการรับแรงอัดใน โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองจะใช้เอลิเมนต์แบบ plate element ในการวิเคราะห์ เนื่องจากเหล็กท่อบูรีเหลี่ยมมีความ

หน้าที่บาง โดยให้เงื่อนไขของจุดรองรับของปลายทั้ง 2 ด้าน เป็นแบบยึดแน่น โดยให้น้ำหนักที่กระทำเป็นหน่วยแรง 100 ksc ที่ปลายเสาด้านหนึ่ง โดยการจำลองน้ำหนักที่กระทำ สามารถทำได้ โดยการแปลงแรงดันที่กระทำต่อพื้นที่ให้เป็นแรงกระทำต่อจุด (node)

ตัวอย่างชิ้นส่วนที่นำมาวิเคราะห์

หน้าตัดเสาที่นำมาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้หน้าตัด R60-1, R60-2, R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 โดยหน้าตัดแต่ละขนาดจะมีขนาดความกว้าง ความลึกและความหนาที่แตกต่างกัน 3 ขนาด ดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 53 หน้าตัดเสาเหล็กท่อนที่มีความสมบูรณ์ของระนาบ

หน้าตัดเหล็กรีดเย็นท่อบูรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 60x303.2 ยาว 950 มิลลิเมตร

คุณสมบัติของวัสดุ

โมดูลัสความยืดหยุ่น $E = 2.17 \times 10^6$ ksc

อัตราส่วนปัวซองเรโซ $\nu = 0.3$

หน้าตัดเหล็กรีดเย็นท่อบูรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า R60-1 และ R60-2 ยาว 95 เซนติเมตร

พื้นที่หน้าตัดของเหล็กท่อบูรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเท่ากับ 5.09 cm^2 โดยให้แรงดันต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 100 ksc โดยคิดเป็น แรงที่กระทำต่อจุดเท่ากับ 23.13kg เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วจะได้ค่าน้ำหนักวิกฤตเท่ากับ 12,848 Kg และรูปแบบของการโก่งเดาะของหน้าตัดของหน้าตัดต่อเหล็กรีดเย็นขนาด 60x30x3.2 ยาว 95 เซนติเมตร เป็นลักษณะของ การโก่งเดาะแบบตัดแสดงในภาพที่ 54 ในรูปแบบตัดที่ 1 และในภาพที่ 55 ในรูปแบบตัดที่ 2



ภาพที่ 54 รูปแบบการโก่งเคาะแบบตัดในรูปแบบที่ 1 ของเสา R60-1 และ R60-2



ภาพที่ 55 รูปแบบการโก่งเคาะแบบตัดในรูปแบบที่ 2 ของเสา R60-1 และ R60-2

หน้าตัดเหล็กกรีดยื่นต่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 100x50x1.6 ยาว 950 มิลลิเมตร

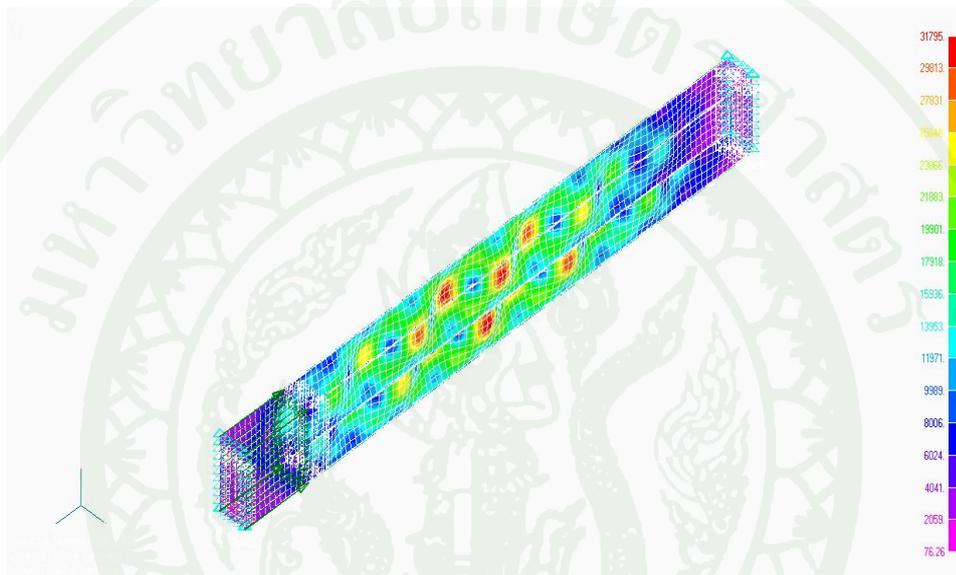
คุณสมบัติของวัสดุ

โมดูลัสความยืดหยุ่น $E = 2.17 \times 10^6$ ksc

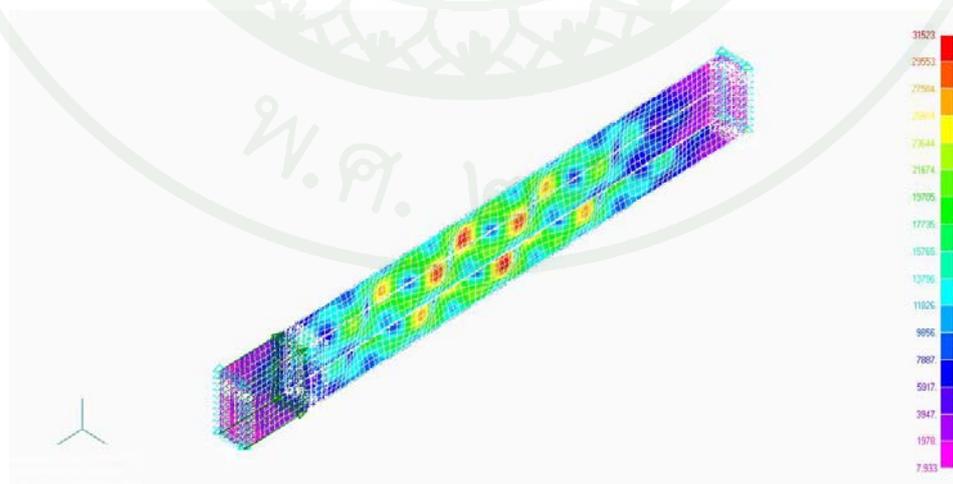
อัตราส่วนปัวซอง $\nu = 0.3$

หน้าตัดเหล็กกรีดเย็นท่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ของเสา R100-1 และ R100-2 ยาว 950 มิลลิเมตร

พื้นที่หน้าตัดของเหล็กท่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเท่ากับ 4.63 cm^2 โดยให้แรงดันต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 100 ksc โดยคิดเป็นแรงที่กระทำต่อจุดเท่ากับ 12.18 kg เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วจะได้ค่าน้ำหนักวิกฤตเท่ากับ $11,217 \text{ kg}$ รูปแบบของการโก่งเคาะของหน้าตัดของหน้าตัดต่อเหล็กกรีดเย็นของเสา R100-1 และ R100-2 เป็นลักษณะของการโก่งเคาะเฉพาะที่ดังแสดงในภาพที่ 56 ในรูปแบบการโก่งเคาะเฉพาะที่ 1 และในภาพที่ 57 ในรูปแบบที่ 2 การโก่งเคาะเฉพาะที่



ภาพที่ 56 รูปแบบการโก่งเคาะเฉพาะที่ในรูปแบบที่ 1 ของเสา R100-1 และ R100-2



ภาพที่ 57 รูปแบบการโก่งเคาะเฉพาะที่ในรูปแบบที่ 2 ของเสา R100-1 และ R100-2

หน้าตัดเหล็กกรีดเย็นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 150x75x3.2 ยาว 950 มิลลิเมตร

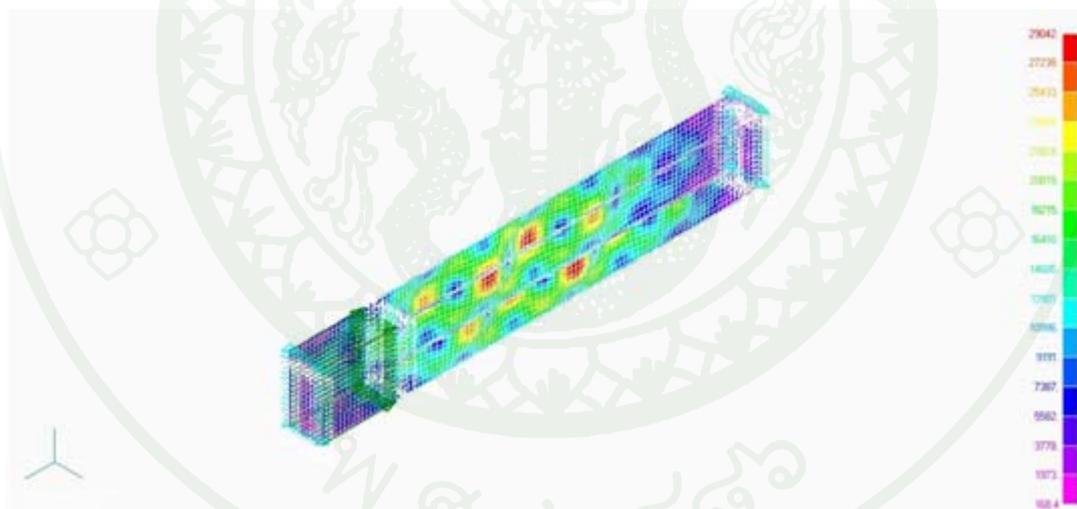
คุณสมบัติของวัสดุ

โมดูลัสความยืดหยุ่น $E = 2.17 \times 10^6$ ksc

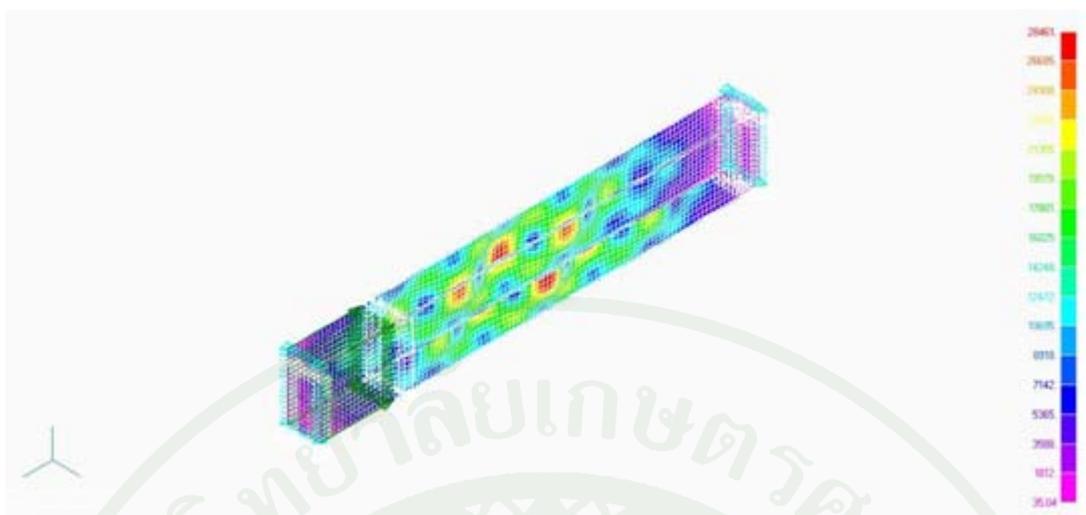
อัตราส่วนปัวซองของเรโซ $\nu = 0.3$

หน้าตัดเหล็กกรีดเย็นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดของเสา R150-1 และ R150-2 ยาว 950 มิลลิเมตร

พื้นที่หน้าตัดของเหล็กที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเท่ากับ 13.17 cm^2 โดยให้แรงดันต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 100 ksc โดยคิดเป็นแรงที่กระทำต่อจุดเท่ากับ 27.4 kg เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วจะได้ค่าน้ำหนักวิกฤตเท่ากับ 58,837 kg รูปแบบของการโก่งเดาะของหน้าตัดของหน้าตัดต่อเหล็กกรีดเย็นขนาด 150x75x3.2 เป็นลักษณะของการโก่งเดาะเฉพาะที่ดังแสดงในภาพที่ 58 ในรูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ 1 และในภาพที่ 59 ในรูปแบบที่ 2 การโก่งเดาะเฉพาะที่



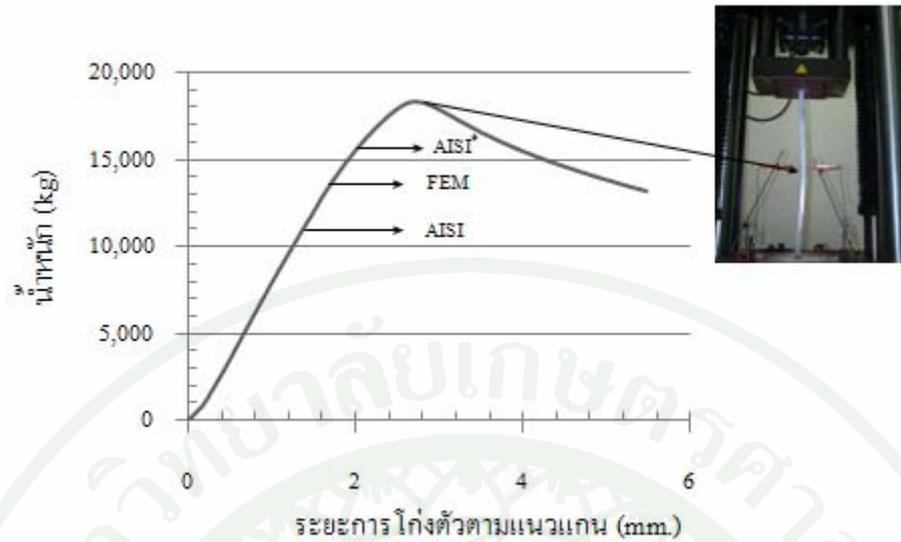
ภาพที่ 58 รูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบที่ 1 ของเสา R150-1 และ R150-2



ภาพที่ 59 รูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบที่ 2 ของเสา R150-1 และ R150-2

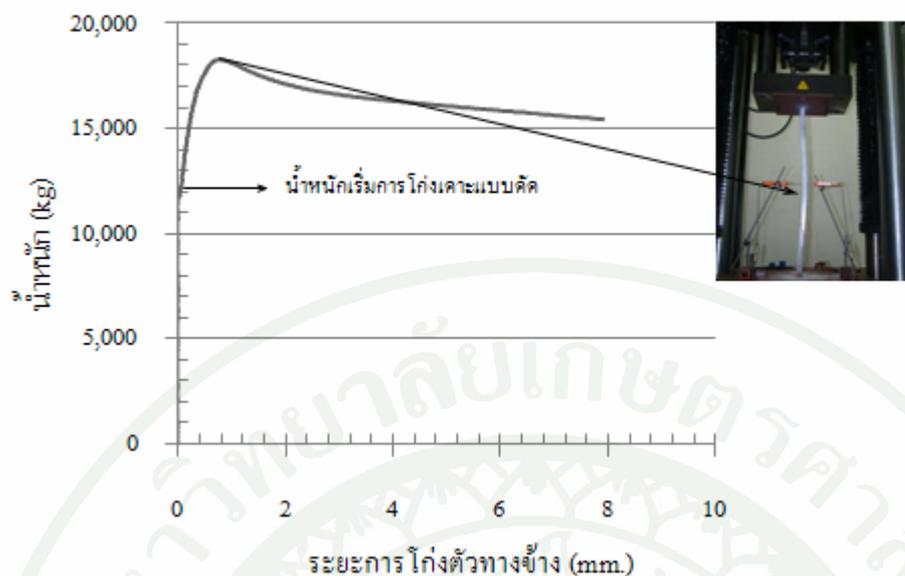
ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาเหล็กกรีดเย้นที่ได้จากการทดสอบ

พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาเหล็กกรีดเย้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาเหล็กกรีดเย้น R60-1 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวตามแนวแกนที่ได้จากข้อมูลที่แสดงในตารางภาคผนวกที่ ก1 นำมาเขียนกราฟแสดงในภาพที่ 60 การโก่งตัวตามแนวแกนจะเริ่มมีการโก่งตัวเพียงเล็กน้อยเมื่อน้ำหนักมากกระทำและจะมีการโก่งตัวตามแนวแกนของเสาอย่างต่อเนื่องจนถึงน้ำหนักที่ประมาณ 12,089 kg. เสาจะเริ่มมีการโก่งตัวออกทางข้างในแนวแกน y แต่ทั้งนี้ระยะการโก่งตัวตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นทีละน้อย จนไปถึงน้ำหนักประลัยที่ 18,296 kg. น้ำหนักก็จะเริ่มลดลงแต่ยังมีการโก่งตัวตามแนวแกนและการโก่งตัวทางด้านข้างที่มีเพิ่มมากขึ้น เสาจะมีการเสียรูปในแนวแกน y จากลักษณะกราฟที่แสดงในภาพที่ 61 เสาจะไม่มีการโก่งเดาะเฉพาะที่และจะไม่มีการโก่งตัวที่แสดงให้เห็นเป็นพฤติกรรมการเสียรูปแบบ inelastic local buckling แต่จะมีลักษณะการวิบัติการโก่งเดาะแบบคดแสดงในภาพที่ 64 เนื่องมาจากอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของเสามีค่าน้อย



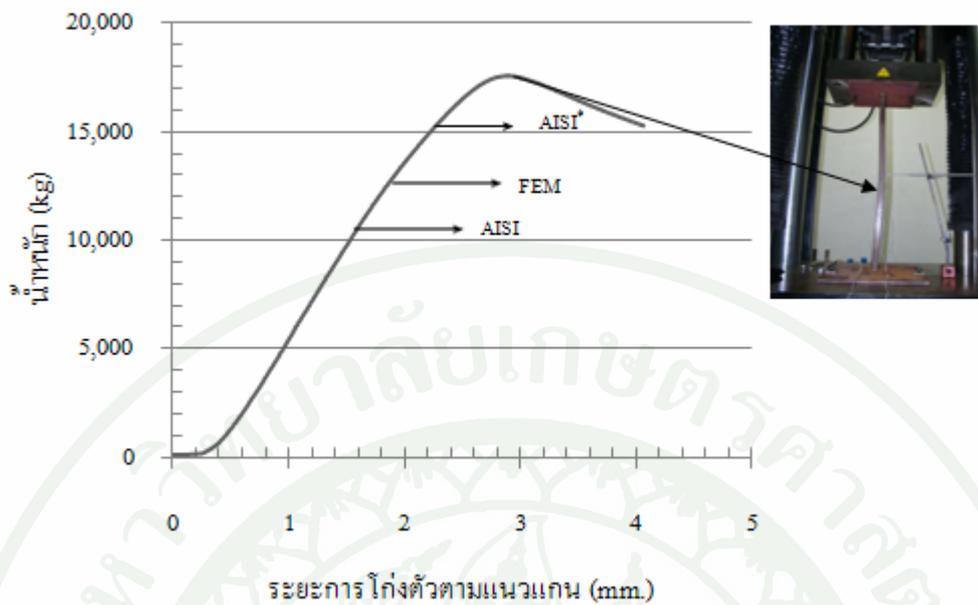
ภาพที่ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวตามแนวแกนของเสา R60-1

สำหรับผลการทดสอบเสา R60-1 ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยเป็นการเก็บข้อมูลของน้ำหนักจากเครื่อง Inston และข้อมูลระยะการโก่งตัวทางด้านข้างจะเก็บข้อมูลจาก LVDT ที่ติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางเสาในทิศทางแกน y ของหน้าตัด จากการทดสอบพบว่า เสา R60-1 จะเริ่มมีการโก่งเคาะทางด้านข้างที่น้ำหนัก 12,089 Kg. และเสาจะโก่งตัวทางด้านข้างอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งรับน้ำหนักได้ สูงสุดที่ 18,296 Kg. น้ำหนักจะเริ่มลดลงในขณะที่การโก่งตัวทางด้านข้างจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังแสดงในภาพที่ 61 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางด้านข้าง



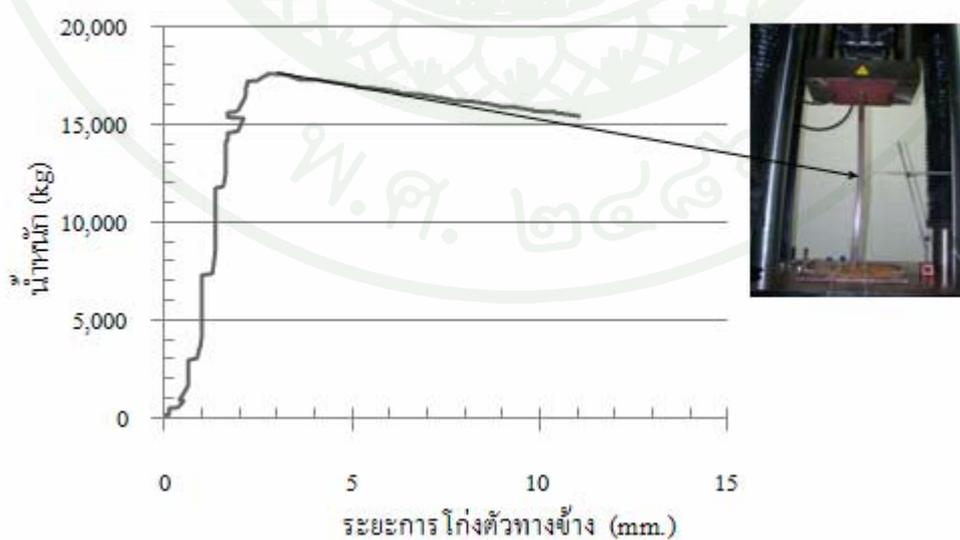
ภาพที่ 61 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างของเสา R60-1

สำหรับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาเหล็กรีดเย็น R60-2 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวตามแนวแกนที่ได้จากข้อมูลที่แสดงในตารางภาคผนวกที่ ก1 นำมาเขียนกราฟแสดงในภาพที่ 62 การโก่งตัวตามแนวแกนจะเริ่มมีการโก่งตัวเพียงเล็กน้อยเมื่อน้ำหนักมากระทำและจะมีการโก่งตัวตามแนวแกนของเสาอย่างต่อเนื่อง จนไปถึงน้ำหนักประลัยที่ 17,598 kg. น้ำหนักก็จะเริ่มลดลงแต่ยังมีการโก่งตัวตามแนวแกนและการโก่งตัวทางด้านข้างที่มีเพิ่มมากขึ้น เสาจะมีการเสียรูปในแนวแกน y จากลักษณะกราฟที่แสดงในภาพที่ 62 เสาจะไม่มี การโก่งเดาะเฉพาะที่และจะไม่พบพฤติกรรมที่แสดงให้เห็นเป็นพฤติกรรมการเสียรูปแบบ inelastic local buckling แต่จะมีลักษณะการวิบัติการโก่งเดาะแบบดัด เนื่องจากอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของเสามีค่าน้อย



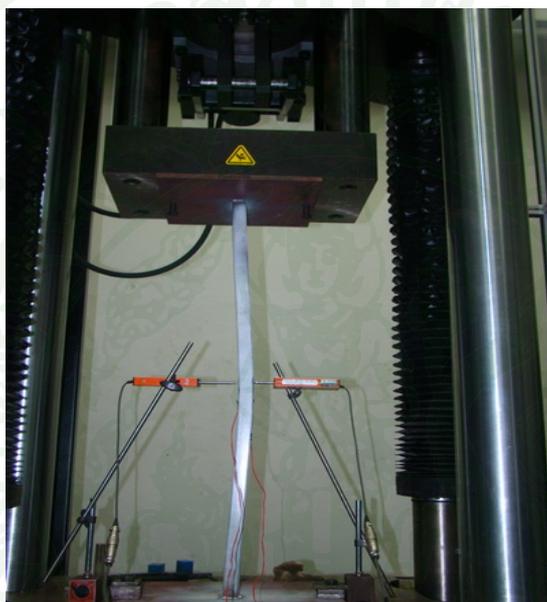
ภาพที่ 62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวตามแนวแกนของเสา R60-2

สำหรับผลการทดสอบเสา R60-2 ที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยเป็นการเก็บข้อมูลของน้ำหนักจากเครื่อง Inston และข้อมูลระยะการโก่งตัวทางด้านข้างจะเก็บข้อมูลจาก LVDT ที่ติดตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางเสาในทิศทางแกน y ของหน้าตัด จากการทดสอบพบว่า เสา R60-2 จะมีลักษณะการเอียงศูนย์ซึ่งดูได้จากกราฟที่แสดงในภาพที่ 63



ภาพที่ 63 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างของเสา R60-2

จากกราฟจะไม่แสดงพฤติกรรมของการ โกงัดเคาะทางข้าง แต่จะแสดงพฤติกรรมของเสาที่มี การเอียงศูนย์ซึ่งจะทำให้เกิดโมเมนต์ที่ปลาย ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักก็ลดลงไปและ เสาจะ โกงัดตัวทางด้านข้างเนื่องจากการเอียงศูนย์และน้ำหนักตามแนวแกนที่กระทำอย่างต่อเนื่องจน กระทั่งรับน้ำหนักได้ สูงสุดที่ 17,598 Kg. น้ำหนักจะเริ่มลดลงในขณะที่การ โกงัดตัวทางด้านข้างจะมี การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังแสดงในภาพที่ 63 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการ โกงัดตัวทางด้านข้าง

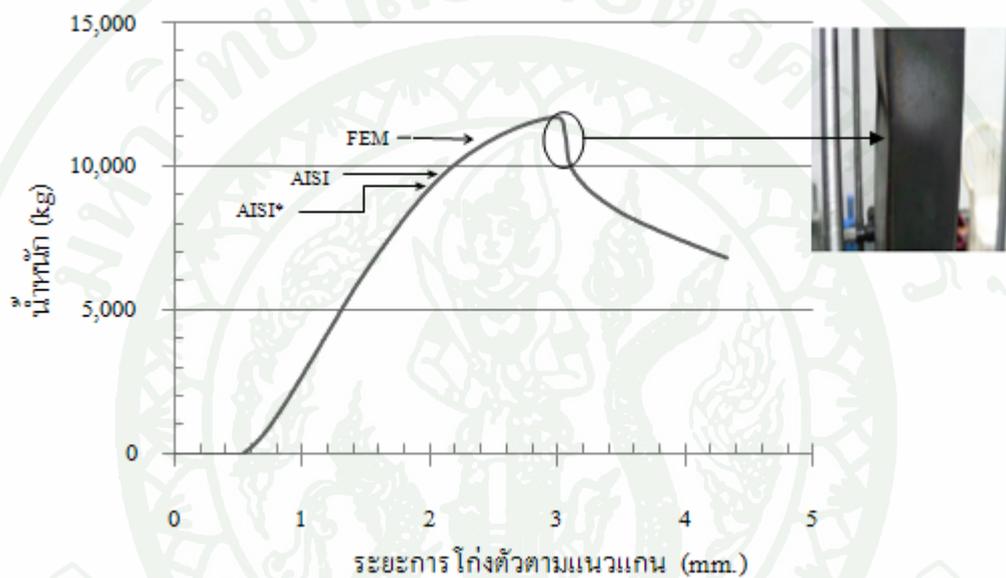


ภาพที่ 64 พฤติกรรมการเสียรูปการ โกงัดเคาะแบบดัดของเสา R60-1

การวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความสมบูรณ์ทางด้าน รูปร่างจะใช้การทดสอบในห้องทดลองและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้มาตรฐาน AISI ซึ่งจะใช้คุณสมบัติของวัสดุมาคำนวณตามข้อกำหนด และคุณสมบัติวัสดุที่ได้จากการทดสอบ แรงดึงเพื่อหาค่ายังก์โมดูลัส และค่ากำลังครากของเหล็ก โดยใช้สัญลักษณ์ AISI* ที่ใช้ในการ คำนวณและเขียนลงไปในกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับระยะการขีดตัวตาม แนวแกน

พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาเหล็กกริดเขียนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจากผลการทดสอบกำลังรับ แรงอัดตามแนวแกนของเสาเหล็กกริดเขียนของเสา R100-1 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักกับระยะการ โกงัดตัวตามแนวแกนที่ได้จากข้อมูลที่แสดงในตารางภาคผนวกที่ ก2 นำมาเขียน

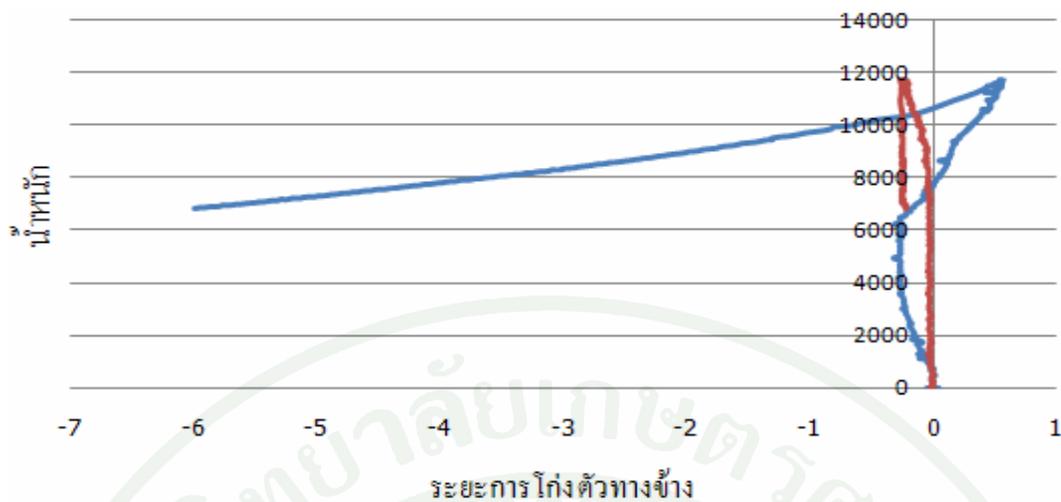
กราฟแสดงในภาพที่ 65 เสาจะมีการโก่งตัวตามแนวแกนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง เสาเริ่มจะมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบคลื่นไซน์ (sine wave) ในบริเวณฐานรองรับทั้งสองด้านและเกิดขึ้นต่อไปจนกระทั่งมีรูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ตลอดความยาวเสาในด้านความลึกทั้งสองด้านของหน้าตัด เมื่อเสารับน้ำหนักไปถึง 9,028kg. และจะสามารถรับน้ำหนักต่อไปได้จนถึงน้ำหนักสูงสุดซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า พหุติกรรมหลังการโก่งเดาะ (Post Local Buckling) ซึ่งจะเกิดในเฉพาะเหล็กรีดเย็นที่มีความบาง โดยมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาที่มีค่ามาก



ภาพที่ 65 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวตามแนวแกนของเสา R100-1

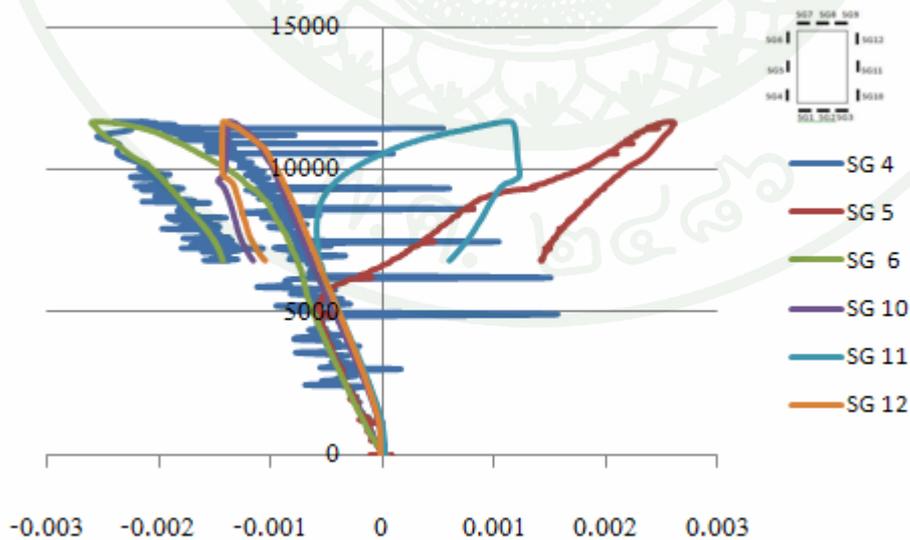
จากกราฟที่แสดงในภาพที่ 65 เสาจะเริ่มมีการเสียรูปแบบ inelastic local buckling ที่บริเวณกึ่งกลางเสาและจะมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 11,711kg. และน้ำหนักจะค่อยๆเริ่มลดลง หลังจากเสารับน้ำหนักสูงสุดการโก่งตัวตามแนวแกนจะมีค่าคงที่ ในขณะที่น้ำหนักลดน้อยลงซึ่งจะแสดงในกรอบวงกลมภายในกราฟที่แสดงในภาพที่ 65 โดยเสาจะเกิดการเสียรูปแบบในลักษณะ Roof Mechanism

ดังนั้น เสาจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงยึดหย่อนก่อนที่เสาจะเกิดการเสียรูปแบบ inelastic local buckling แสดงในภาพที่ 84



ภาพที่ 66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างของเสา R100-1

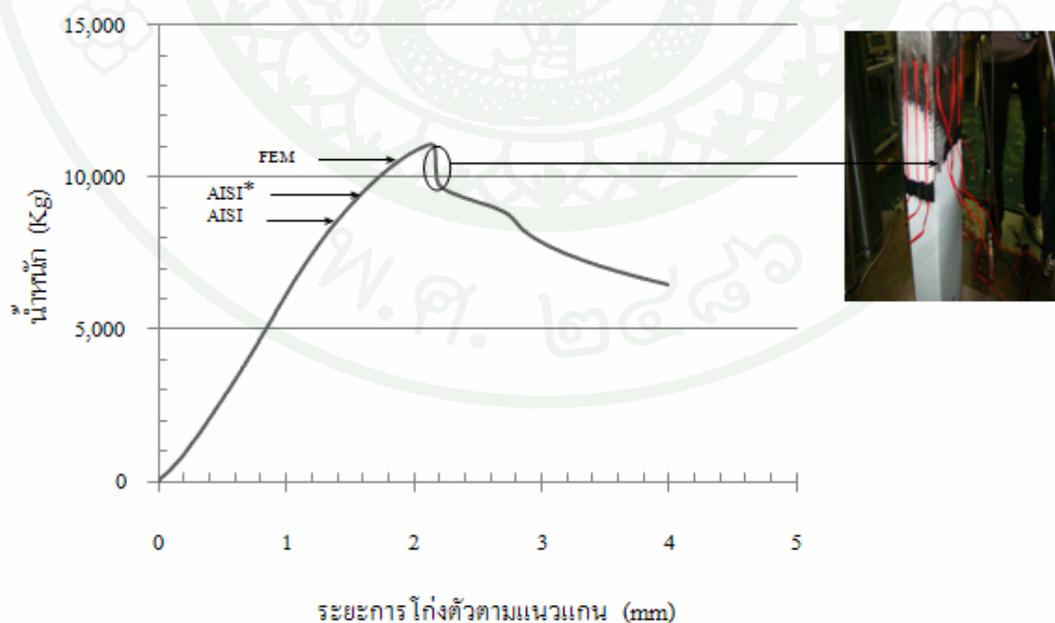
พฤติกรรมการโก่งเคาะทางข้างของเสาที่มีความบางเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้าง จากกราฟที่ได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัด LVDT ในแนวแกน y เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างจากภาพที่ 66 แสดงให้เห็นว่าไม่มีพฤติกรรมการโก่งเคาะทางด้านข้าง แต่จะมีพฤติกรรมการโก่งเคาะเฉพาะที่ของเสาที่มีความบาง ซึ่งจากกราฟมีลักษณะที่ไม่คงที่เหมือนกับกราฟของเสา R60-1 ที่แสดงในภาพที่ 61 ที่แสดงพฤติกรรมของการโก่งเคาะทางด้านข้างอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในด้านความลึก ของเสา R100-1

การวิเคราะห์พฤติกรรมของหน้าตัดเหล็กกรีดเย็นที่มีความบาง จากภาพที่ 67 เป็นกราฟที่ได้จากการนำข้อมูลที่ได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดที่ตำแหน่งตามความกว้างของหน้าตัดเสา R100-1 โดย SG 4 และ SG 6 จะติดที่ขอบตามขวางของหน้าตัดและ SG 5 ติดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัด ในทำนองเดียวกัน SG 10 และ SG 12 จะติดที่ขอบตามขวางของหน้าตัดและ SG 11 ติดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัด จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อน้ำหนักไปถึงจุดสูงสุดจะมีการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ตำแหน่ง SG 5 และ SG 11 จากความเครียดอัดไปเป็นความเครียดดึง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่เกิดการเสีรูปร่างมากที่สุด

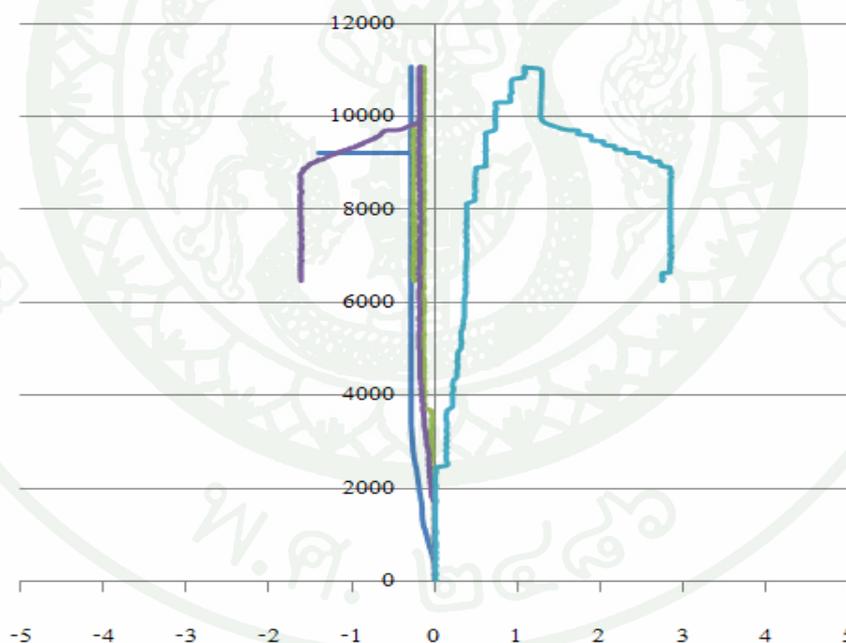
สำหรับเสา R100-2 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวตามแนวแกนที่ได้อาจได้จากข้อมูลที่แสดงในตารางภาคผนวกที่ ก2 นำมาเขียนกราฟแสดงในภาพที่ 68 เสาจะมีการโก่งตัวตามแนวแกนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง เสาเริ่มจะมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบคลื่นไซน์ (sine wave) ในบริเวณฐานรองรับทั้งสองด้านและเกิดขึ้นต่อไปจนกระทั่งมีรูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ตลอดความยาวเสาในด้านความลึกทั้งสองด้านของหน้าตัด เมื่อเสารับน้ำหนักไปถึง 7,762 kg. และจะสามารถรับน้ำหนักต่อไปได้จนถึงน้ำหนักสูงสุดซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่าพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะ (Post Local Buckling) ซึ่งจะเกิดในเฉพาะเหล็กกรีดเย็นที่มีความบาง โดยมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาที่มีค่ามาก



ภาพที่ 68 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวตามแนวแกนของเสา R100-2

จากกราฟที่แสดงในภาพที่ 68 เสาจะเริ่มมีการเสียรูปแบบ inelastic local buckling ที่บริเวณกึ่งกลางเสาจะสูงสุดอยู่ที่ 11,062kg. หลังจากเสารับน้ำหนักสูงสุดการโก่งตัวตามแนวแกนจะมีค่าคงที่ในขณะที่น้ำหนักลดน้อยลง ที่ตำแหน่งนี้เสาจะเริ่มเกิดการเสียรูปในลักษณะ Roof Mechanism ดังนั้น เสาจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงยึดหย่อนก่อนที่เสาจะเกิดการเสียรูปแบบ inelastic local buckling

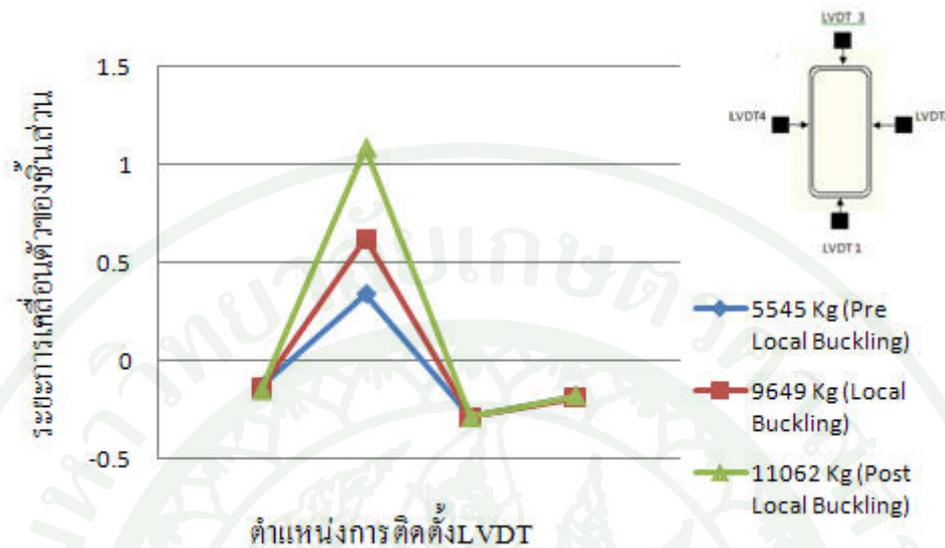
พฤติกรรมการโก่งเดาะทางข้างของเสาที่มีความบางของเสา R100-2 เมื่อเปรียบเทียบกับความกว้าง จากกราฟที่ได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัด LVDT ในแนวแกน y เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างจากภาพที่ 69 แสดงให้เห็นว่าไม่มีพฤติกรรมการโก่งเดาะทางด้านข้าง แต่จะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสาที่มีความบาง ซึ่งจากกราฟมีลักษณะที่ไม่คงที่เหมือนกับกราฟของเสา R60-1 ที่แสดงในภาพที่ 61 ที่แสดงพฤติกรรมของการโก่งเดาะทางข้างอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 69 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างของเสา R100-2

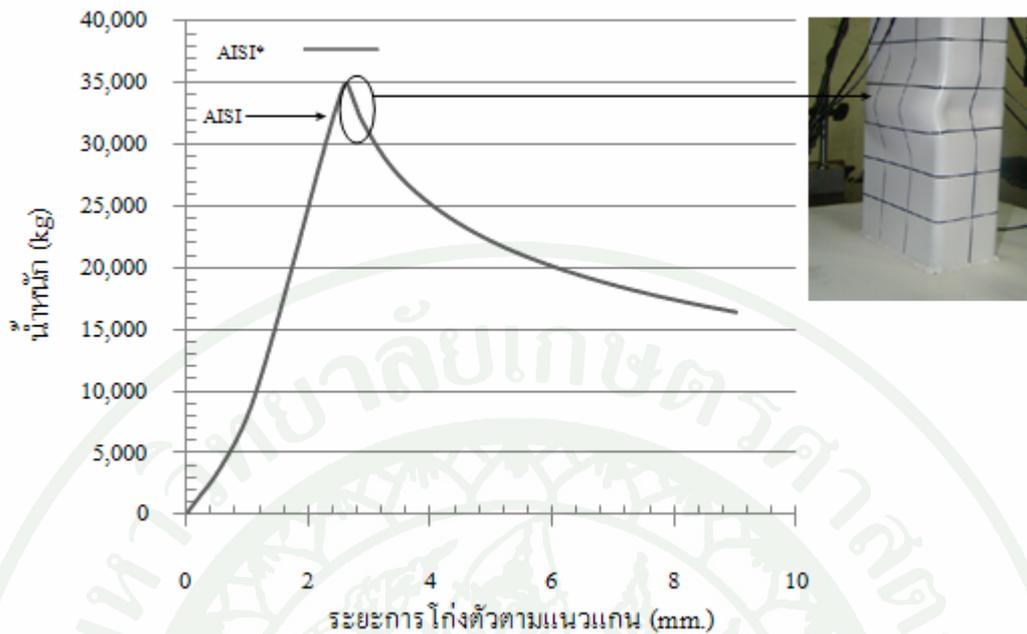
การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนเสาเหล็กกรีดยื่นหน้าตัดทอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะทำการติดตั้ง LVDT เพื่อการเปลี่ยนแปลงรูปของผิวระนาบ จากข้อมูลที่เก็บได้จาก LVDT นำมาเขียนกราฟที่แสดงในภาพที่ 70 จากกราฟเป็นข้อมูลที่แสดงระยะการเคลื่อนตัวกับน้ำหนักก่อนและหลังที่

เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อน้ำหนักเริ่มมากขึ้นการเคลื่อนตัวของผิวระนาบในตำแหน่ง LVDT 2 และ LVDT 4 มีค่ามากเนื่อง



ภาพที่ 70 ระยะเวลาเคลื่อนตัวทางข้างที่กึ่งกลางความยาวของเสา R100-2

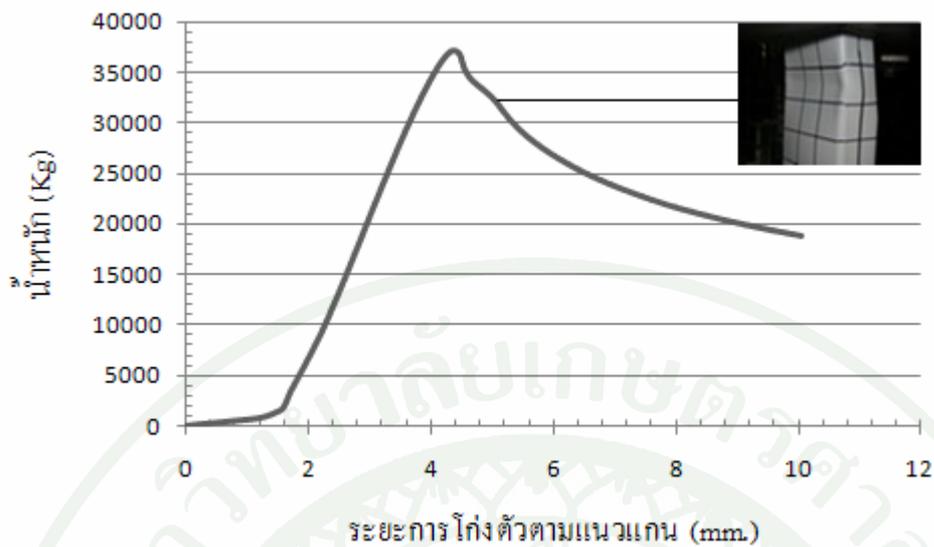
สำหรับเสา R150-1 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะเวลาโก่งตัวตามแนวแกนที่ได้จากข้อมูลที่แสดงในตารางภาคผนวกที่ 1 นำมาเขียนกราฟแสดงในภาพที่ 71 เสาจะมีการโก่งตัวตามแนวแกนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง เสาเริ่มจะมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบคลื่นไซน์ (sine wave) ในบริเวณฐานรองรับทั้งสองด้านและเกิดขึ้นต่อไปจนกระทั่งมีรูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ตลอดความยาวเสาในด้านความลึกทั้งสองด้านของหน้าตัด เมื่อเสารับน้ำหนักไปถึง 30,615 kg. และจะสามารถรับน้ำหนักต่อไปได้จนถึงน้ำหนักสูงสุดซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า พฤติกรรมหลังการโก่งเดาะ (Post Local Buckling) ซึ่งจะเกิดในเฉพาะเหล็กกรีดเย็นที่มีความบาง โดยมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาที่มีค่ามาก



ภาพที่ 71 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวตามแนวแกนของเสา R150-1

จากกราฟที่แสดงในภาพที่ 71 เสาจะเริ่มมีการเสียรูปแบบ inelastic local buckling ที่บริเวณโคนเสาด้านล่าง ซึ่งจะมีน้ำหนักสูงสุดอยู่ที่ 34,974kg. หลังจากน้ำหนักสูงสุดการโก่งตัวตามแนวแกนจะมีการลดลงเล็กน้อย ในขณะที่น้ำหนักลดลง โดยเสาจะเกิดการเสียรูปแบบในลักษณะ Roof Mechanism

สำหรับเสา R150-2 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวตามแนวแกน นำมาเขียนกราฟแสดงในภาพที่ 72 เสาจะมีการโก่งตัวตามแนวแกนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง เสาเริ่มจะมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ในรูปแบบคลื่นไซน์ (sine wave) ในบริเวณฐานรองรับทั้งสองด้านและเกิดขึ้นต่อไปจนกระทั่งมีรูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ตลอดความยาวเสาในด้านความลึกทั้งสองด้านของหน้าตัด เมื่อเสารับน้ำหนักไปถึง 30,615 kg. และจะสามารถรับน้ำหนักต่อไปได้จนถึงน้ำหนักสูงสุดซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า พฤติกรรมหลังการโก่งเดาะ (Post Local Buckling) ซึ่งจะเกิดในเฉพาะเหล็กรีดเย็นที่มีความบาง โดยมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาที่มีค่ามาก



ภาพที่ 72 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวตามแนวแกนของเสา R150-2

จากกราฟที่แสดงในภาพที่ 72 เสาจะเริ่มมีการเสียรูปแบบ inelastic local buckling ที่บริเวณโคนเสาด้านบน เสาจะรับน้ำหนักสูงสุดอยู่ที่ 35,863kg. หลังจากนั้นน้ำหนักสูงสุดการโก่งตัวตามแนวแกน จะมีการลดลงเล็กน้อย ในขณะที่น้ำหนักลง โดยเสาจะเกิดการเสียรูปในลักษณะ Roof Mechanism

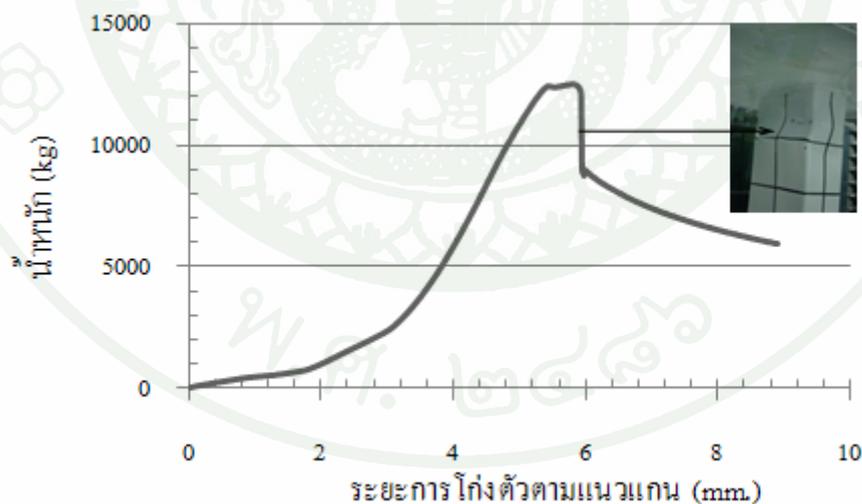


ภาพที่ 73 พฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอิลาสติกของเสา R150-2

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาเหล็กรีดเย็นที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างที่ได้จากการทดสอบ

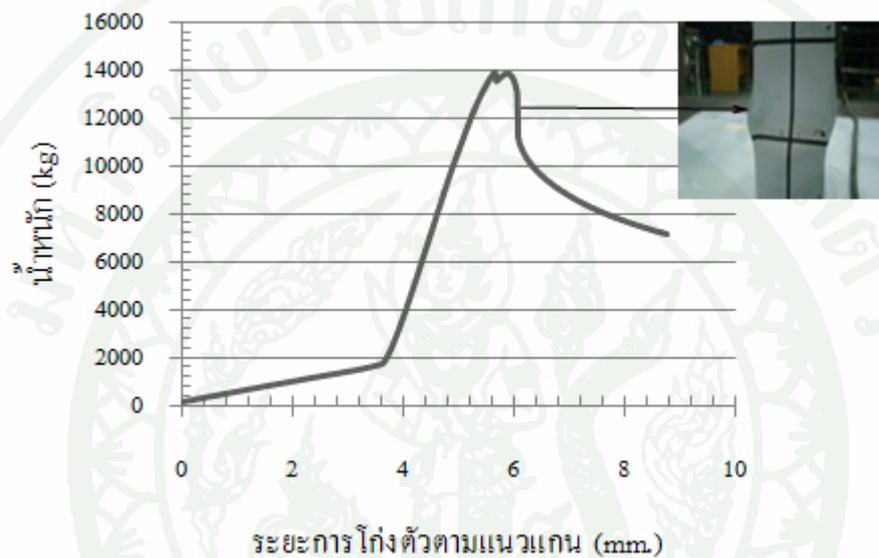
เสาเหล็กรีดเย็นในรูปแบบที่ทำการศึกษาจะทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ทางด้านรูปร่างในพิวระนาบของด้านความลึกประมาณ 5 mm. ตลอดความยาวของหน้าตัด โดยจะมีการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 หน้าตัด ดังนี้ IM100-1, IM100-2, IM150-1, IM150-2 จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดจะเก็บข้อมูลของน้ำหนักที่กระทำและข้อมูลระยะการโก่งตัวตามแนวแกนจากเครื่อง Inston

จากการทดสอบพบว่า เสา IM100-1 จะเริ่มมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ ที่น้ำหนัก 10,879kg. ในด้านความลึกของหน้าตัดที่ไม่ทำให้เกิดความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างและเมื่อเสารับน้ำหนักถึงน้ำหนักสูงสุดที่ 12,524kg. เสาจะโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอินอีลาสติกที่เรียกว่า inelastic local buckling และทางด้านความลึกที่มีระนาบไม่สมบูรณ์จะไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอีลาสติกแต่จะเกิดพฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism และน้ำหนักจะลดลงอย่างต่อเนื่องในขณะที่การโก่งตัวตามแนวแกนมีค่าลดลงเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 74

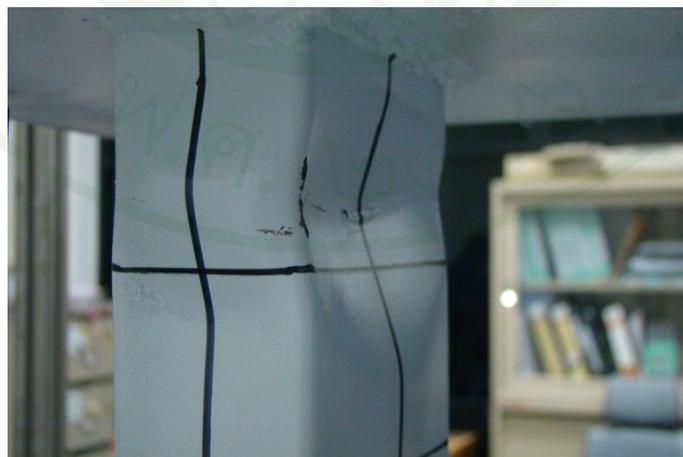


ภาพที่ 74 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างของเสา IM100-1

สำหรับเสา IM100-2 จะเริ่มมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ที่น้ำหนัก 11,650kg. ในด้านความลึกของหน้าตัดที่ไม่ทำให้เกิดความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างตลอดความยาวเสาและเมื่อเสารับน้ำหนักถึงน้ำหนักสูงสุดที่ 13,893kg. เสาจะโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอินอลาสติกที่เรียกว่า inelastic local buckling และทางด้านความลึกที่มีระนาบไม่สมบูรณ์จะไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอีลาสติก แต่จะเกิดพฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism แสดงในภาพที่ 76 โดยที่น้ำหนักจะลดลงอย่างต่อเนื่องในขณะที่การโก่งตัวตามแนวแกนมีค่าลดลงเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 75

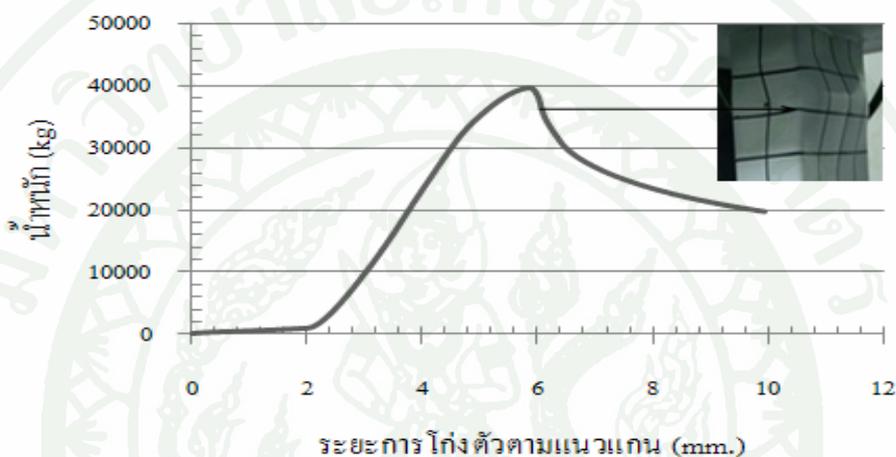


ภาพที่ 75 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างของเสา IM100-2



ภาพที่ 76 พฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism

สำหรับเสา IM150-1 จะเริ่มมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ ที่น้ำหนัก 35,777kg. ในด้านความลึกของหน้าตัดที่ไม่ทำให้เกิดความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างตลอดความยาวเสาและเมื่อเสารับน้ำหนักถึงน้ำหนักสูงสุดที่ 39,712kg. เสาจะโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอินอลาสติกที่เรียกว่า inelastic local buckling และทางด้านความลึกที่มีระนาบไม่สมบูรณ์จะไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอีลาสติก แต่จะเกิดพฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism โดยที่น้ำหนักจะลดลงอย่างต่อเนื่องในขณะที่การโก่งตัวตามแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 77

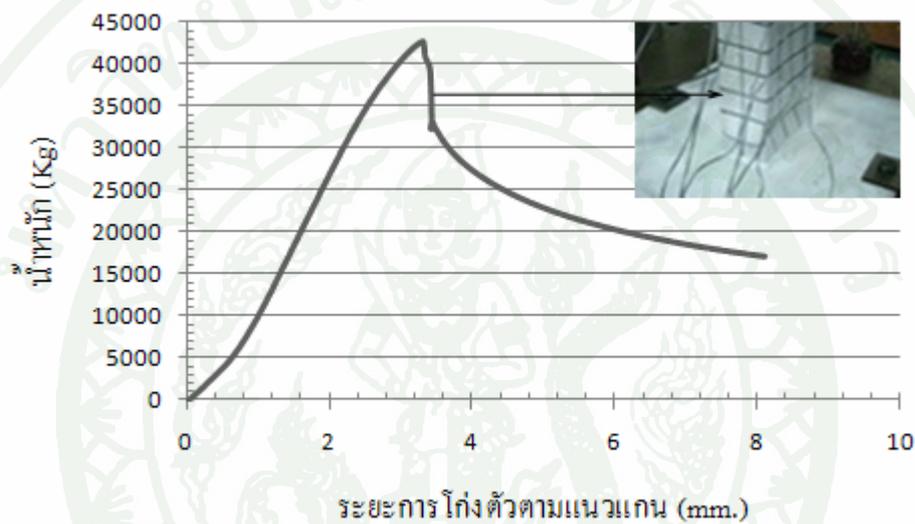


ภาพที่ 77 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างของเสา IM150-1

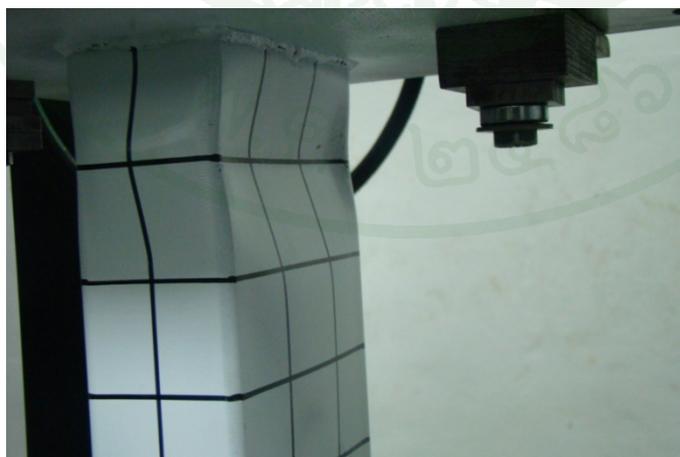


ภาพที่ 78 พฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism

สำหรับเสา IM150-2 จะเริ่มมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ ที่น้ำหนัก 38,277kg. ในด้านความลึกของหน้าตัดที่ไม่ทำให้เกิดความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างตลอดความยาวเสาและเมื่อเสารับน้ำหนักถึงน้ำหนักสูงสุดที่ 42,656kg. เสาจะโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอินอลาสติกที่เรียกว่า inelastic local buckling และทางด้านความลึกที่มีระนาบไม่สมบูรณ์จะไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอีลาสติก แต่จะเกิดพฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism แสดงในภาพที่ 79 โดยที่น้ำหนักจะลดลงอย่างต่อเนื่องในขณะที่การโก่งตัวตามแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 80



ภาพที่ 79 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการโก่งตัวทางข้างของเสา IM150-2



ภาพที่ 80 พฤติกรรม inelastic local buckling ที่เรียกว่า Roof Mechanism

การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของเสาที่ได้จากการทดลองกับแต่ละวิธี

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในงานวิจัยนี้จะทดสอบเสาที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาที่มีค่าน้อย เช่น R60-1, R60-2 กับอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาที่มีค่ามาก ของเสา R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 โดยมีคุณสมบัติของหน้าตัดซึ่งแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะแสดงขนาดของชิ้นส่วนที่นำมาทดสอบ และตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติของหน้าตัดที่นำมาใช้ทดสอบ สำหรับเสาที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง IM100-1, IM100-2 และ IM150-1, IM150-2 จะทำให้เกิดการเสียรูปในพิวระนาบตามความลึกของหน้าตัดเพียงด้านเดียว ดังแสดงในภาพที่ 37 โดยมีระยะการเสียรูปจากพิวระนาบของตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2 โดยจะวัดการเสียรูปเฉลี่ยตามความยาวจากพิวระนาบเดิม ซึ่งในการทดสอบจะต้องสังเกต น้ำหนักที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยจะสรุปไว้ในตารางที่ 10 ซึ่งจะแสดงน้ำหนักที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่มีความสมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ทางรูปร่าง ซึ่งสำหรับเสาที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาที่มีค่ามากเสาจะมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ในด้านความลึกก่อนที่เสาจะมีการโก่งเดาะเฉพาะที่ในด้านความกว้าง เนื่องจากอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามีผลทำให้เกิดการโก่งเดาะที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 10 น้ำหนักที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่

Specimen	Local Buckling	Ultimate Load	Specimen	Local Buckling	Ultimate Load
mm.	Kg.	Kg.	mm.	Kg.	Kg.
R100-1	9,028	11,711	IM100-1	10,879	12,524
R100-2	7,762	11,062	IM100-2	11,650	13,893
R150-1	30,615	34,974	IM150-1	35,777	39,712
R150-2	33,217	37,257	IM150-2	38,277	42,656

สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณจากมาตรฐาน AISI โดยคุณสมบัติของวัสดุของเสาที่นำมาใช้ในการทดสอบจะนำมาทดสอบกำลังรับแรงดึงเพื่อวิเคราะห์หาหน่วยแรงครากและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งจะนำมาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดตามมาตรฐาน AISI ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 11 โดยใช้สัญลักษณ์ AISI* ซึ่งจะใช้ค่าคุณสมบัติจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงของตัวอย่างที่นำมาทดสอบในเสา สำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้ AISI แสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณตามมาตรฐาน AISI

Specimen	KI/R _y	Test	AISI	Comparison
mm.	mm.	P _{exp} (Kg)	P _n (Kg)	%
R60-1	68	18,296	11,113	39.26
R60-2	68	17,598	11,113	36.85
R100-1	29	11,711	9,445	19.35
R100-2	29	11,062	9,445	14.62
R150-1	20	34,974	33,568	4.02
R150-2	20	35,863	33,568	6.40
Average				20.08

จากตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน AISI ซึ่งจากตารางแสดงให้เห็นว่า ค่าน้ำหนักสูงสุดที่ได้จากการทดสอบมีค่าที่สูงกว่าจากการทำนายค่ากำลังอัดสูงสุดที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน AISI ซึ่งจะใช้กำลังครากที่ 2450 ksc และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E = 2,100,000 ksc ซึ่งจะเป็นค่าที่ใช้สำหรับการออกแบบตามมาตรฐาน โดยทั่วไป โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 20.08 % ทั้งนี้เนื่องจากค่ากำลังครากและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการทำนายกำลังรับแรงอัดสูงสุดไม่ใช่ค่าที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเสาที่นำมาใช้ในการทดสอบ จากตารางอัตราส่วนความชะลูดที่มีค่ามาก โดยที่อัตราส่วนความกว้างต่อความหนามีค่าน้อย อย่างเช่นเสา R60-1 และ R60-2 ซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่น้ำหนักสูงสุดเสาจะมีการโก่งเคาะแบบคด และถ้าอัตราส่วนความชะลูดที่มีน้อย โดยที่อัตราส่วนความกว้างต่อความหนามีค่าที่มาก เช่นเสา R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 เสาจะเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่

สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณจากมาตรฐาน AISI* โดยคุณสมบัติของวัสดุของเสาที่นำมาใช้ในการทดสอบจะนำมาทดสอบกำลังรับแรงดึงเพื่อวิเคราะห์หาหน่วยแรงครากและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งจะนำมาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดตามมาตรฐาน AISI ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 12 โดยใช้สัญลักษณ์ AISI*

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณตามมาตรฐาน AISI*

Specimen	KI/R _y	Test	AISI*	Comparison
mm.	mm.	P _{exp} (Kg)	P _n * (Kg)	%
R60-1	68	18,296	16,321	10.79
R60-2	68	17,598	15,521	11.80
R100-1	29	11,711	9,332	20.31
R100-2	29	11,062	9,801	11.40
R150-1	20	34,974	39,445	12.78
R150-2	20	35,863	39,958	11.42
Average				13.08

จากตารางที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน AISI ค่ากำลังครากและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ซึ่งค่าที่ได้จะใช้ในการทำนายกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามวิธีของ AISI ของเสาที่นำมาใช้ในการทดสอบ จากการทดสอบและการคำนวณตามมาตรฐานที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 13.08 % ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบทั้งนี้เนื่องจากนำค่าที่ได้จากการทดสอบกำลังครากและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสา มาทำนายกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน AISI สำหรับอัตราส่วนความชะลูดที่มีค่ามาก โดยที่อัตราส่วนความกว้างต่อความหนามีค่าที่น้อย อย่างเช่นเสา R60-1 และ R60-2 ซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่น้ำหนักสูงสุดเสาจะมีการโก่งเคาะแบบคด และถ้าอัตราส่วนความชะลูดที่มีน้อย โดยที่อัตราส่วนความกว้างต่อความหนามีค่าที่มาก เช่นเสา R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 เสาจะเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่

สำหรับการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับกำลังการรับแรงอัดสูงสุดของเสา R60-1, R60-2, R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 ที่ได้จากการทดสอบ แสดงในตารางที่ 12 ซึ่งในการจำลองกำลังรับแรงอัดในไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น $E = 2,170,000$ ksc และค่าอัตราส่วนปัวซองเรโซเท่ากับ 0.3 ซึ่งในการวิเคราะห์จะวิเคราะห์ในช่วงยืดหยุ่น ดังนั้นค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบกับผลการจำลองในไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกันมากซึ่งจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 32.44% ซึ่งจะมีค่าที่มากที่สุดในการคำนวณแต่ละวิธี

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Specimen	KI/R _y	Test	FEM	Comparison
mm.	mm.	P _{exp} (Kg)	P _{FEM(Kg)}	%
R60-1	68	18,296	12,848	29.78
R60-2	68	17,598	12,848	26.99
R100-1	29	11,711	11,217	4.22
R100-2	29	11,062	11,217	1.40
R150-1	20	34,974	58,837	68.23
R150-2	20	35,863	58,837	64.06
Average				32.44

ดังนั้นจากตารางที่ 11 ตารางที่ 12 และ ตารางที่ 13 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าการคำนวณโดย AISI และ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากค่าที่ใช้คำนวณตามแบบ AISI จะใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E อยู่ในขีดจำกัดยืดหยุ่น แต่ในการทดสอบเสาจะวิบัติด้วย Inelastic Buckling ดังนั้นกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการคำนวณตาม AISI และ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงมีค่าแตกต่างจากการทดสอบ ซึ่งหากเปลี่ยนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น E เป็น ค่า Tangent Modulus โดยหาได้จากกราฟ Stress-strain ในช่วงที่เลยขีดจำกัดยืดหยุ่น มาแทนในสมการหาหน้าทึบวิกฤตจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากยิ่งขึ้น

สำหรับเสาที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างเสา R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 และ เสาที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง IM100-1, IM100-2, IM150-1, IM150-2 จากการทดสอบ ในกรณีเสาที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างจะมีกำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าเสาที่ไม่มีความสมบูรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 13 ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.14% เนื่องจากเสาด้อย่างของ IM100-1, IM100-2, IM150-1, IM150-2 มีการทำให้เกิดโค้งมุมสมมาตรที่ระนาบของหน้าตัด ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการขึ้นรูปเย็นที่ได้จากการทำให้เกิดโค้งมุมจึงเป็นผลให้เกิดการต้านทานการโก่งเดาะเฉพาะที่ จึงทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 14 เป็นการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างกับกำลังรับแรงอัดที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างเนื่องจากการผลิต ที่เปรียบเทียบกับหน้าตัดเสา R100-1, R100-2, R150-1, R150-2 และ IM100-1, IM100-2, IM150-1, IM150-2

สำหรับการเปรียบเทียบพฤติกรรมการวิบัติของเสาที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างกับการวิบัติของเสาที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างเนื่องจากการผลิต โดยสรุปได้ในตารางที่ 15 โดยการวิบัติจะมีลักษณะเช่นเดียวกันคือ การวิบัติโดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ดังแสดงในตาราง โดย F จะแทนอักษรย่อ การโก่งเดาะแบบคด และ L จะแทนอักษรย่อ การโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยที่เสา R60-1, R60-2 เป็นเสาที่มีอัตราความชะลูดมากและมีความหนาที่มากเมื่อเทียบกับความกว้างของหน้าตัดเกิดการโก่งเดาะแบบคด และเสามีอัตราความชะลูดน้อยและมีความหนาน้อยเมื่อเทียบกับความกว้างของหน้าตัด R100-1, R100-2, R150-1, R150-2 เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเสาที่ไม่สมบูรณ์

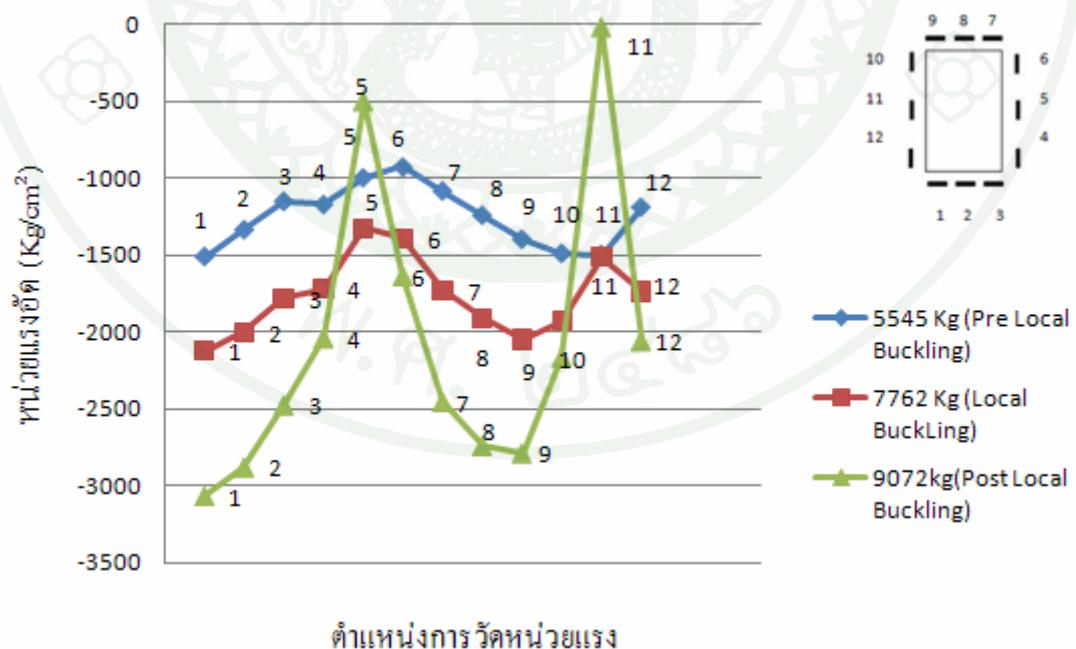
Specimen	KI/R _y	Test	Specimen(IM)	Test	Comparison
mm.	mm.	P _{exp} (Kg)	mm.	P _{exp} (Kg)	%
R60-1	68	18,296	-	-	
R60-2	68	17,598	-	-	
R100-1	29	11,711	IM100-1	12,524	0.06
R100-2	29	11,062	IM100-2	13,893	0.20
R150-1	20	34,974	IM150-1	39,712	0.12
R150-2	20	35,863	IM150-2	42,656	0.16
Average					0.14

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่หาได้ในแต่ละวิธี

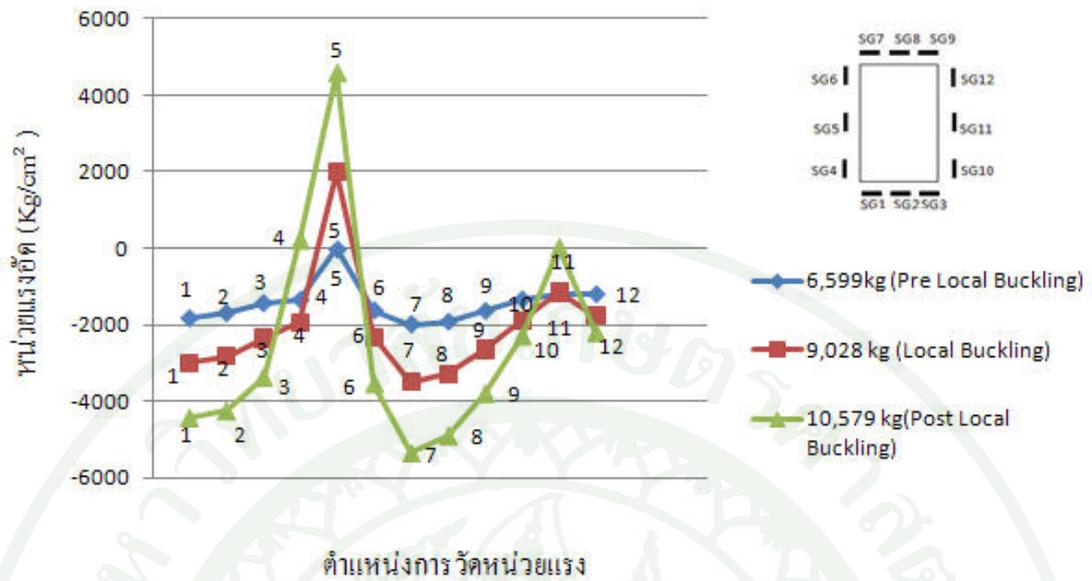
Specimen	KI/R _y	Test	AISI	AISI*	FEM	Specimen (IM)	Test	Failure Mode
mm.	mm.	P _{exp} (Kg)	P _n (Kg)	P _{n*} (Kg)	P _{FEM} (Kg)	mm.	P _{exp} (Kg)	
R60-1	68	18,296	11,113	16,321	12,848	-	-	F
R60-2	68	17,598	11,113	15,521	12,848	-	-	F
R100-1	29	11,711	9,445	9,332	11,217	IM100-1	12,524	L
R100-2	29	11,062	9,445	9,801	11,217	IM100-2	13,893	L
R150-1	20	34,974	33,568	39,445	58,837	IM150-1	39,712	L
R150-2	20	35,863	33,568	39,958	58,837	IM150-2	42,656	L

2. พฤติกรรมการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัด

การวัดการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในหน้าตัดเสา R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 ที่วัดในตำแหน่งกึ่งกลางเสาดังแสดงในภาพที่ 36(B) จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง R150-1, R150-2 จะไม่มีพฤติกรรมการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดอย่างเด่นชัด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแสดงตัวอย่างเฉพาะผลการทดสอบของเสา R100-1, R100-2 การกระจายตัวของหน่วยแรงอัดที่แสดงในภาพที่ 81 เป็นการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดในหน้าตัดเสา R100-2 ที่เกิดจากการรับแรงอัด ซึ่งจะทำให้เกิดการโก่งคาะเฉพาะที่และหลังการโก่งคาะเฉพาะที่ โดยมีลักษณะการแผ่กระจายหน่วยแรงอัดตามตำแหน่งที่ 4, 5, 6 และ 10, 11, 12 ซึ่งเมื่อแรงอัดเพิ่มมากขึ้น หน่วยแรงอัดในตำแหน่ง 5,11 ที่กึ่งกลางตามหน้าตัดขวางจะมีค่าลดน้อยลงซึ่งจะแสดงในกราฟเส้นสีแดงเป็นหน่วยแรงการโก่งคาะเฉพาะที่และกราฟเส้นสีเขียวเป็นหน่วยแรงอัดหลังการโก่งคาะเฉพาะที่ จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมหลังการโก่งคาะเฉพาะที่จะมีหน่วยแรงที่ขอบทางด้านความลึกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการแผ่กระจายหน่วยแรงอัดที่ได้รับการศึกษาโดย Von Kaman นำไปสู่ทฤษฎีการออกแบบเหล็กกริดเอ็น โดยการใช้ความกว้างประสิทธิภาพ และพฤติกรรมการแผ่กระจายหน่วยแรงอัดในหน้าตัดขวางมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 81 กราฟการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสา R100-2

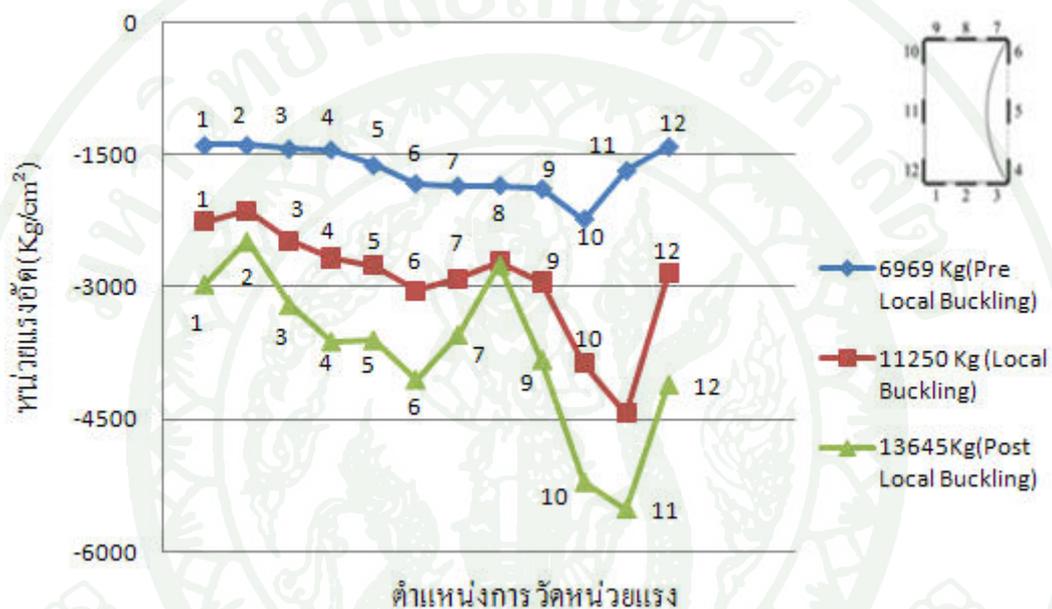


ภาพที่ 82 กราฟการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสา R100-2

การวัดการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในหน้าตัดเสา R100-1 และที่วัดในตำแหน่งกึ่งกลางเสาดังแสดงในภาพที่ 36(B) ตัวอย่างผลการทดสอบของเสา R 100-2 ที่แสดงในภาพที่ 82 เป็นการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดในหน้าตัดเสาที่เกิดจากการรับแรงอัด ซึ่งจะทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และหลังการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยมีลักษณะการแผ่กระจายหน่วยแรงอัดตามตำแหน่งที่ 4, 5, 6 และ 10, 11, 12 ซึ่งเมื่อแรงอัดเพิ่มมากขึ้น หน่วยแรงอัดในตำแหน่ง 5, 11 ที่กึ่งกลางตามหน้าตัดขวางจะมีค่าลดน้อยลงซึ่งจะแสดงในกราฟเส้นสีแดงเป็นหน่วยแรงการโก่งเดาะเฉพาะที่และกราฟเส้นสีเขียวเป็นหน่วยแรงอัดหลังการโก่งเดาะเฉพาะที่จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะเฉพาะที่จะมีหน่วยแรงที่ขอบทางด้านความลึกเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Von Kaman

การวัดการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในหน้าตัด IM100-1, IM100-2, และ IM 150-1, IM150-2 ที่วัดในตำแหน่งกึ่งกลางเสาดังแสดงในภาพที่ 38 ตัวอย่างผลการทดสอบกำลังการรับแรงอัดของเสา IM100-2 ที่แสดงในภาพที่ 83 เป็นการกระจายตัวของหน่วยแรงในเสา ที่เกิดจากพฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และหลังการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสา โดยด้านที่ไม่มีควมสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างในตำแหน่ง 4, 5, 6 การแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดจะมีค่าน้อยกว่าด้านที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง สำหรับการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดในตำแหน่งที่

วัดในตำแหน่งที่ 10,11,12 การแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดจะมีค่ามากในตำแหน่ง4,6 และหน่วยแรงอัดในตำแหน่งที่ 5 จะมีหน่วยแรงอัดน้อยกว่าที่ขอบทั้งสองด้านซึ่งกราฟเส้นสีแดงจะเป็นหน่วยแรงที่เกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่และกราฟเส้นสีเขียวจะเป็นหน่วยแรงอัดที่เกิดจากหลังการโก่งเคาะเฉพาะที่ ซึ่งการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดของหน้าตัดที่ไม่มีคุณสมบัติทางด้านรูปร่างจะมีการแผ่กระจายที่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับการแผ่กระจายของหน่วยแรงอัดที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง

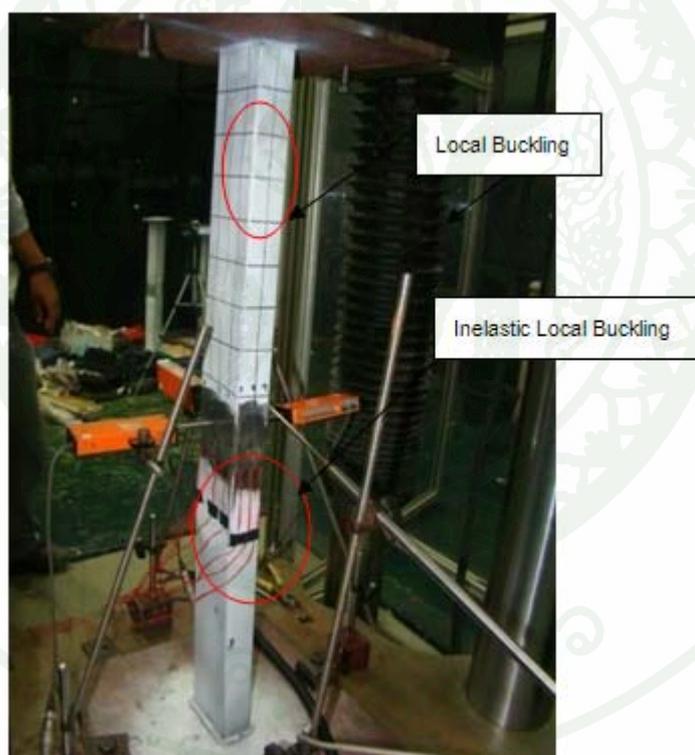


ภาพที่ 83 กราฟการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางเสา IM 100-2

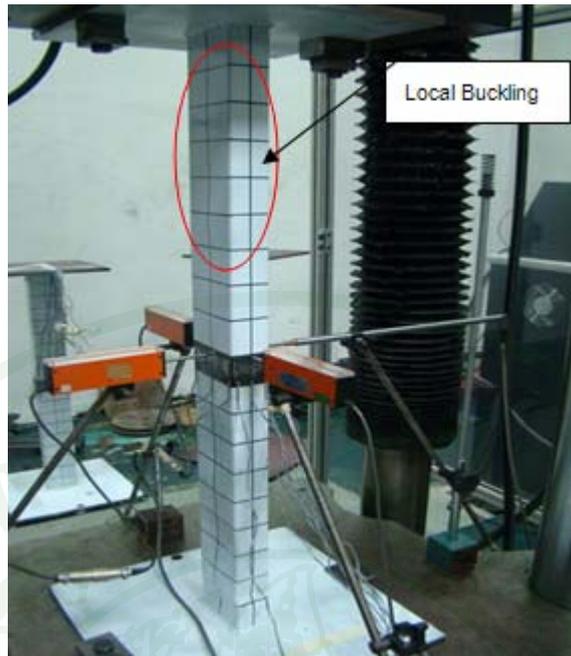
พฤติกรรมการวิบัติ

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการวิบัติของเหล็กรีดเย็นหน้าตัดทอรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความสมบูรณ์และไม่มีคุณสมบัติทางด้านรูปร่างแสดงในภาพที่ 86 ซึ่งหน้าตัดเสาที่นำมาทดสอบเป็นเสาขนาด R60-1, R60-2 ซึ่งจะมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาแน่น และเสาที่มีหน้าตัดขนาด R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 จะมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาแน่นที่มีค่ามาก ซึ่งเป็นผลทำให้พฤติกรรมการวิบัติที่แตกต่างกัน โดยเสา R60-1, R60-2 จะมีการวิบัติเนื่องจากการโก่งเคาะแบบดัดที่น้ำหนักสูงสุด โดยมีการโก่งตัวของเสาในรอบแกน y แสดงในภาพที่ 63

สำหรับพฤติกรรมการวิบัติของเสาที่มีหน้าตัดที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาที่มาก เช่น R100-1, R100-2 และ R150-1, R150-2 จะมีพฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่ในด้านความลึกของหน้าตัด แสดงในภาพที่ 84 ซึ่งเป็นตัวอย่างการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสาเหล็กกริดเย็น R 100-1 ก่อนที่หน้าตัดเสาจะวิบัติแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอินอีลาสติก (inelastic local buckling) ที่เรียกว่า Roof Mechanism ซึ่งจะเป็นการ โกงออกและโกงเข้าของพื้นผิวทั้ง 4 ด้านของหน้าตัดแสดงในภาพที่ 85 แต่สำหรับเสา IM100-1, IM100-2, IM150-1, IM150-2 จะไม่แสดงพฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่ในด้านที่ไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่าง แต่จะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ในด้านที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างก่อนที่หน้าตัดเสาวิบัติแบบการโก่งเดาะเฉพาะที่ในช่วงอินอีลาสติก (inelastic local buckling) ดังแสดงในภาพที่ 86 สำหรับเสาที่มีความลึกเท่ากับ 100 มม. และเสาที่มีความลึก 150 มม. จะมีลักษณะการเสียรูปที่แสดงในภาพที่ 87



ภาพที่ 84 ตัวอย่างการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสาเหล็กกริดเย็น R 100-1



ภาพที่ 85 ตัวอย่างการโก่งคาะเฉพาะที่ของเสาเหล็กกริดเย็น IM 100-2



ภาพที่ 86 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือวัดของเสาเหล็กกริดเย็น R150-1



ภาพที่ 87 การวิบัติของเสา IM150-1 เนื่องจากการ โกงเตาะแบบเฉพาะที่ในช่วงอินอีลาสติก
(inelastic local buckling)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกริดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในหน้าตัดที่มีขนาดหน้าตัดแตกต่างกันและเป็นหน้าตัดที่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างเปรียบเทียบกับมาตรฐาน AISI และการทดสอบของหน้าไม่มีความสมบูรณ์ทางด้านรูปร่างในรูปแบบที่พิจารณาสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. เสา R60-1 และเสา R60-2 เกิดพฤติกรรมการโก่งเดาะแบบคัต เนื่องจากอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามีค่าน้อย และเสา R100-1, R100-2, R150-1, R150-2 จะเกิดพฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่แบบ inelastic local buckling ที่น้ำกำลังรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจากอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามีค่ามากและจะมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับการคำนวณในแบบ AISI* เนื่องจากใช้คุณสมบัติของวัสดุของเสามาทำนายค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

2. กำลังรับแรงอัดของเสา IM100-1, IM100-2, IM150-1, IM150-2 ในรูปแบบที่พิจารณามีกำลังสูงกว่าเสาที่มีความสมบูรณ์เนื่องจาก การทำให้เกิดโค้งมุมจะมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัดและต้านทานการโก่งเดาะเฉพาะที่และจะเกิดพฤติกรรมการโก่งเดาะเฉพาะที่ในด้านที่สมบูรณ์ก่อนที่จะเกิดพฤติกรรมแบบ inelastic local buckling ในทุกด้านของหน้าตัด

3. การกระจายหน่วยแรงอัดของเสาที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามีค่ามากเช่น เสา R100-1, R100-2 จะพฤติกรรมของหน่วยแรงอัดหลังการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยที่ขอบทางด้านความลึกมีค่าสูง ในขณะที่ตำแหน่งกลางของความลึกในหน้าตัดขวางจะมีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดในการของออกแบบ AISI 2007

4. ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่มากกว่าการทดสอบเนื่องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะวิเคราะห์ในช่วงอิลาสติก แต่สำหรับการทดสอบเสาจะอยู่ในช่วงอินอิลาสติก ซึ่งหากเปลี่ยนค่าโมดูลัสอิลาสติก E เป็น ค่า Tangent Modulus โดยหาได้จากกราฟ Stress-strain ในช่วงที่เลยขีดจำกัดยืดหยุ่น มาแทนในโปรแกรมนี้ นักวิฤตจะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

การทดสอบเสาเหล็กกรีดยึดที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายใต้กำลังรับแรงอัดในงานวิจัยฉบับนี้เป็น งานวิจัยฉบับแรกที่ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสา ดังนั้นตัวแปรในการทดสอบที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงและตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการทำนายกำลังรับแรงอัดที่ควรแจกแจงในข้อเสนอแนะดังนี้

1. ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบจะต้องมีความแม่นยำในการติดตั้งตำแหน่งเครื่องมือวัดความเครียดเพื่อจะได้ค่าการกระจายตัวของหน่วยแรงที่แผ่กระจายตลอดทั้งหน้าตัดและจะเห็นพฤติกรรมการแผ่กระจายตัวที่มีความเด่นชัดและการติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการเสีรูปร่างข้างจะต้องมีตำแหน่งและความแข็งแรงที่ดีเพื่อไม่ให้เครื่องมือวัดหลุดจากตำแหน่งที่ต้องการ

2. การใช้แผ่นเหล็กยึดปลายเสาโดยวิธีเชื่อม ต้องใช้แผ่นเหล็กที่มีความหนาพอเพื่อจะทำให้แผ่นยึดปลายไม่เกิดการเสีรูปร่างในแนวระนาบเพราะจะส่งผลให้การแผ่กระจายของน้ำหนักไม่เต็มพื้นที่หน้าตัด ส่งผลให้เสาเกิดการเยื้องศูนย์ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบเกิดการคลาดเคลื่อนนำไปสู่การแสดงผลพฤติกรรมทางด้านรับน้ำหนักและการแผ่กระจายตัวของหน่วยแรงไม่เด่นชัด อีกทั้งพฤติกรรมการเสีรูปร่างจะไม่เป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้

3. ในการศึกษาพฤติกรรมความไม่สมบูรณ์ทางด้านรูปร่างซึ่งเกิดจากการผลิต สำหรับงานวิจัยฉบับนี้จะมีทำให้เสีรูปร่างในพื้นที่ผิวระนาบด้านความลึกเพียงระนาบเดียวซึ่งมีผลในการรับกำลังของน้ำหนักที่สูงขึ้น ในการศึกษาขั้นต่อไปควรมีลักษณะการทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ในรูปร่างที่มากขึ้นซึ่งจะส่งผลในการพัฒนากำลังรับแรงอัดของหน้าตัดที่สูงขึ้นเช่นกัน

4. ในการศึกษาพฤติกรรมของกำลังรับน้ำหนักของเหล็กกรีดยึด ในขั้นต่อไปควรมีการคำนึงถึงหน่วยแรงตกค้างซึ่งเกิดจากการผลิตจะเป็นอีกปัจจัยที่มีผลกระทบการรับกำลังของหน้าตัดโดยการทดสอบผลของความเค้นตกค้าง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์(ว.ส.ท.). 2541. “มาตรฐานสำหรับอาคารเหล็กรีดเย็น. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ.

มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศไทย. 2549. “มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดเย็น” มอก.1228-2549.

ชีวลักษณ์ พงษ์บุรณกิจ. 2548. เอกสารเอกสารประกอบการเรียนวิชา *Stability of structures*. สำนักพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี เจ, กรุงเทพฯ.

ณัฐวุฒิ อิศวสงคราม และ ประกิจ เปรมธรรมกร. 2554. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาชั้นวางสินค้าเหล็ก, น. 263 ในรายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง). มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม.

ASTM. 2006. *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. n.p.

AISI. 2007. *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. n.p

ASCE. 1991. “*Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members.*” American Society of Civil Engineers, ANSI/ASCE-8-90, New York.

Australian/New Zealand Standard (Aust/NZS). 2001. “*Cold-formed stainless steel structures.*” **Australian/New Zealand Standard**, AS/NZS 4673:2001, Standards Australia, Sydney, Australia.

Bernard, E.S., R. Coleman and R.Q.Bridge. 1999. Measurement and assessment of imperfections in thin-walled panels. **Thin Walled Structures**, 33(1999): 103-126.

Dubina, D., and V. Ungureanu. 2002. Effect of imperfections on numerical simulation on instability behaviour of cold-formed steel members. **Thin Walled Structures**, 40(3): 239-262.

G.J. Hancock. 2007. **Design of Cold-Formed Steel Structures (to AS/NZS4600:2500)**. Fourth Edition. National Library of Australia Cataloguing-in-Publication entry, Australia.

_____, M.T. Murray., and D.S. Ellifritt. 2001. **Cold-Formed Steel Structure to the AISI Specification**, Marcel Dekker, Inc. New York.

Rasmussen, K.J., and G.J. Hancock. 1988. Geometric imperfections in plated structures subject to interaction between buckling modes. **Thin Walled Structures** 6(1988): 433-452.

Yu, W. W. 2000. **Cold-Formed Steel Design**. John Wiley and Sons, Inc. New York

Wang, S.T. 1969. “Cold-rolled austenitic stainless steel: Material properties and structural performance.” Rep. No. 334, Dept. of Structural Engineering, Cornell Univ., Ithaca, New York.

_____, G. Winter and S.J. Errera. 1975. “Behavior of cold-rolled stainless steel members.” **J. Struct. Div. ASCE**, 101(11): 2337–2357.

Young, B., and W. Hartono. 2002. “Compression tests of stainless steel tubular members.” **J. Struct. Eng.**, 128(6), 754–761.

_____, and Y. Liu. 2003. “Experimental investigation of cold-formed stainless steel columns.” **J. Struct. Eng.**, 129(2), 169–176. Yu, W. W. (2000). **Cold-formed steel design**, 3rd Ed., Wiley, New York.

Young B, and G.J. Hancock. 2003. Compression tests of channels with inclined simple edge stiffeners. **Journal of Structural Engineering** 129(10): 1403–11.





ภาคผนวก ก
กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเสาเหล็กรีดเย็น

ตารางผนวกที่ ก1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวของเสา R60-1 และ R60-2

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
52.64	0.00	101.50	0.00
67.22	0.01	102.09	0.01
67.94	0.01	104.55	0.01
79.46	0.03	105.78	0.02
93.49	0.03	106.18	0.03
115.12	0.04	106.62	0.04
158.68	0.04	109.04	0.04
198.12	0.06	109.54	0.06
226.18	0.06	110.38	0.06
268.30	0.07	112.15	0.07
321.55	0.08	112.60	0.08
348.80	0.09	113.49	0.09
388.45	0.10	114.42	0.10
450.42	0.11	116.16	0.11
479.53	0.11	116.66	0.11
518.14	0.12	119.35	0.12
580.05	0.13	121.49	0.13
598.64	0.14	123.50	0.14
627.20	0.15	124.62	0.15
685.21	0.15	127.70	0.15
718.06	0.17	127.62	0.17
753.83	0.17	130.91	0.17
818.60	0.18	133.37	0.18
877.32	0.19	137.31	0.19
919.18	0.20	138.15	0.20
983.72	0.20	141.11	0.20
1058.39	0.22	148.46	0.22

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
1101.01	0.22	147.67	0.22
1163.04	0.23	151.25	0.23
1253.97	0.24	160.22	0.24
1296.57	0.25	164.05	0.25
1356.52	0.25	174.70	0.25
1461.28	0.27	204.69	0.27
1501.49	0.27	218.04	0.27
1558.89	0.28	234.73	0.28
1651.14	0.29	264.10	0.29
1704.21	0.30	286.38	0.30
1761.03	0.30	303.63	0.30
1842.60	0.31	335.05	0.31
1912.04	0.32	369.68	0.32
1965.85	0.33	387.15	0.33
2039.42	0.34	415.13	0.34
2125.20	0.35	461.19	0.35
2177.80	0.36	478.72	0.36
2246.57	0.36	507.44	0.36
2340.17	0.37	562.77	0.37
2388.55	0.38	582.24	0.38
2449.98	0.39	612.47	0.39
2550.14	0.40	675.97	0.40
2596.97	0.41	708.26	0.41
2655.73	0.41	742.37	0.41
2750.02	0.43	800.97	0.42
2807.24	0.43	850.19	0.43
2865.58	0.44	888.59	0.44

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
2948.97	0.44	942.38	0.44
3026.37	0.46	1009.16	0.46
3082.21	0.46	1046.36	0.46
3154.27	0.47	1099.59	0.47
3244.35	0.48	1179.59	0.48
3297.65	0.49	1217.12	0.49
3363.19	0.50	1264.26	0.50
3471.43	0.51	1345.17	0.51
3522.75	0.51	1380.31	0.51
3584.94	0.52	1428.99	0.52
3697.45	0.53	1512.68	0.53
3748.39	0.54	1561.59	0.54
3809.19	0.55	1610.93	0.55
3909.66	0.55	1684.24	0.55
3977.66	0.57	1752.32	0.57
4035.66	0.57	1801.64	0.57
4121.58	0.58	1866.41	0.58
4208.04	0.59	1943.69	0.59
4263.83	0.60	1991.83	0.60
4339.99	0.60	2050.46	0.60
4436.91	0.62	2143.10	0.62
4485.82	0.62	2190.91	0.62
4554.94	0.63	2246.57	0.63
4663.26	0.64	2344.21	0.64
4712.79	0.65	2392.31	0.65
4776.27	0.65	2446.19	0.65
4892.39	0.67	2535.68	0.66

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
4941.57	0.67	2600.67	0.67
4997.96	0.68	2651.63	0.68
5103.89	0.69	2726.98	0.69
5221.33	0.70	2860.94	0.70
5313.56	0.71	2925.22	0.71
5390.29	0.72	3013.05	0.72
5443.09	0.73	3064.48	0.73
5527.51	0.74	3122.14	0.74
5616.76	0.75	3223.06	0.75
5668.98	0.76	3271.97	0.76
5746.43	0.76	3326.14	0.76
5844.34	0.77	3434.75	0.77
5893.51	0.78	3491.43	0.78
5963.49	0.79	3544.45	0.79
6073.34	0.80	3642.98	0.79
6117.83	0.81	3712.80	0.81
6183.08	0.81	3765.22	0.81
6285.42	0.83	3847.62	0.82
6341.50	0.83	3938.15	0.83
6404.73	0.84	3988.79	0.84
6494.93	0.84	4057.13	0.84
6563.19	0.86	4153.49	0.86
6625.21	0.86	4200.12	0.86
6704.47	0.87	4263.95	0.87
6787.37	0.88	4373.29	0.88
6845.33	0.89	4421.00	0.89
6916.51	0.90	4477.56	0.90

ตารางผนวกที่ ก1

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
7010.35	0.91	4589.32	0.91
7064.81	0.91	4636.82	0.91
7132.57	0.92	4691.43	0.92
7232.01	0.93	4793.85	0.93
7284.97	0.94	4860.55	0.94
7347.10	0.95	4916.06	0.95
7441.76	0.96	5005.80	0.95
7506.08	0.97	5090.26	0.97
7564.46	0.97	5143.69	0.97
7648.59	0.98	5222.88	0.98
7726.76	0.99	5316.87	0.99
7784.01	1.00	5371.52	1.00
7856.61	1.00	5440.99	1.00
7944.56	1.02	5549.17	1.02
7999.07	1.02	5601.82	1.02
8066.44	1.03	5671.13	1.03
8164.35	1.04	5785.96	1.04
8214.65	1.05	5839.56	1.05
8273.66	1.05	5903.55	1.05
8375.41	1.07	6001.62	1.06
8429.14	1.07	6065.38	1.07
8483.36	1.08	6127.51	1.08
8573.22	1.09	6212.05	1.09
8639.17	1.10	6290.49	1.10
8692.45	1.10	6350.07	1.10
8772.18	1.11	6425.37	1.11
8855.07	1.12	6509.90	1.12

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
8904.54	1.13	6563.82	1.13
8975.28	1.14	6631.23	1.14
9068.09	1.15	6727.86	1.15
9116.32	1.16	6784.22	1.16
9177.68	1.16	6847.41	1.16
11157.65	1.40	8924.51	1.40
11233.63	1.42	9029.86	1.42
11285.61	1.42	9075.64	1.42
11348.43	1.43	9130.83	1.43
11432.40	1.44	9235.15	1.44
11481.60	1.45	9290.25	1.45
11539.25	1.45	9343.28	1.45
11630.53	1.47	9436.96	1.46
11677.74	1.47	9506.02	1.47
11729.52	1.48	9558.07	1.48
11809.82	1.49	9628.76	1.49
11870.46	1.50	9715.23	1.50
11931.91	1.50	9762.55	1.50
12004.38	1.51	9839.45	1.51
12089.80	1.52	9935.10	1.52
12141.31	1.53	9982.57	1.53
12208.62	1.54	10051.43	1.54
12306.66	1.55	10152.93	1.55
12353.69	1.56	10198.50	1.56
12417.43	1.56	10261.78	1.56
12514.76	1.57	10363.06	1.57
12565.29	1.58	10414.22	1.58

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
12617.53	1.59	10473.29	1.59
12712.34	1.59	10562.29	1.59
12775.07	1.61	10628.35	1.61
12823.14	1.61	10685.32	1.61
12902.63	1.62	10767.24	1.62
12971.60	1.63	10841.85	1.63
13015.39	1.64	10893.76	1.64
13081.09	1.64	10965.57	1.64
13163.11	1.66	11048.40	1.66
13201.93	1.66	11100.86	1.66
13262.73	1.67	11161.65	1.67
13352.12	1.68	11249.79	1.68
13387.49	1.69	11298.33	1.69
13441.22	1.70	11353.97	1.70
13538.98	1.71	11445.03	1.71
13573.58	1.71	11498.57	1.71
13620.61	1.72	11551.98	1.72
13709.33	1.73	11628.17	1.73
13753.28	1.74	11695.64	1.74
13796.29	1.75	11745.89	1.75
13875.37	1.75	11812.63	1.75
13934.08	1.77	11888.40	1.77
13975.08	1.77	11935.05	1.77
14028.66	1.78	11996.68	1.78
14107.80	1.79	12080.79	1.79
14142.35	1.80	12125.67	1.80
14204.47	1.80	12178.07	1.80

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
14281.42	1.82	12269.28	1.82
14313.86	1.82	12314.14	1.82
14370.66	1.83	12359.56	1.83
14454.66	1.84	12443.44	1.84
14486.76	1.85	12498.08	1.85
14536.18	1.85	12539.33	1.85
14615.99	1.87	12609.99	1.86
14652.17	1.87	12676.54	1.87
14696.79	1.88	12718.92	1.88
14768.79	1.89	12782.63	1.89
14813.17	1.90	12865.01	1.90
14853.21	1.91	12900.64	1.91
14917.37	1.91	12955.66	1.91
14974.88	1.92	13043.98	1.92
15013.77	1.93	13077.66	1.93
15067.35	1.94	13128.71	1.94
15130.73	1.95	13220.80	1.95
15167.66	1.96	13256.14	1.96
15214.91	1.96	13299.93	1.96
15287.59	1.97	13386.00	1.97
15321.16	1.98	13432.60	1.98
15364.93	1.99	13468.29	1.99
15437.33	2.00	13545.15	1.99
15475.85	2.01	13600.16	2.01
15515.12	2.01	13636.08	2.01
15574.89	2.02	13703.77	2.02
15624.16	2.03	13771.82	2.03

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
15658.17	2.04	13802.95	2.04
15711.88	2.04	13862.97	2.04
15770.11	2.06	13938.14	2.06
15803.73	2.06	13971.73	2.06
15848.57	2.07	14025.84	2.07
15913.63	2.08	14106.77	2.08
15941.75	2.09	14137.07	2.09
15979.16	2.10	14182.67	2.10
16053.72	2.11	14260.47	2.11
16080.59	2.11	14297.70	2.11
16114.30	2.12	14342.21	2.12
16181.37	2.13	14413.01	2.13
16216.62	2.14	14458.66	2.14
16246.11	2.15	14500.58	2.15
16302.49	2.15	14562.09	2.15
16348.23	2.17	14621.92	2.17
16375.24	2.17	14658.96	2.17
16424.18	2.18	14712.02	2.18
16481.45	2.19	14778.81	2.19
16506.01	2.20	14817.49	2.20
16547.88	2.20	14865.29	2.20
16613.70	2.22	14937.38	2.22
16634.36	2.22	14974.71	2.22
16673.20	2.23	15016.63	2.23
16742.90	2.24	15082.66	2.24
16760.17	2.25	15128.08	2.25
16792.74	2.25	15164.67	2.25

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
16862.35	2.27	15223.08	2.26
16885.38	2.27	15277.99	2.27
16913.66	2.28	15313.17	2.28
16976.79	2.29	15363.69	2.29
17002.15	2.30	15427.22	2.30
17022.85	2.31	15460.99	2.31
17080.40	2.31	15504.45	2.31
17126.13	2.32	15576.01	2.32
17143.86	2.33	15606.73	2.33
17188.82	2.34	15640.59	2.34
17245.99	2.35	15715.62	2.35
17261.58	2.36	15748.49	2.36
17296.69	2.36	15781.61	2.36
17359.27	2.37	15844.40	2.37
17373.47	2.38	15890.23	2.38
17403.93	2.39	15918.45	2.39
17468.78	2.40	15971.09	2.39
17484.49	2.41	16027.77	2.41
17509.82	2.41	16055.71	2.41
17563.83	2.42	16099.28	2.42
17588.94	2.43	16165.01	2.43
17611.88	2.44	16187.52	2.44
17657.29	2.44	16226.33	2.44
17689.52	2.46	16297.70	2.46
17708.57	2.46	16316.48	2.46
17745.86	2.47	16351.07	2.47
17786.58	2.48	16421.32	2.48

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
17803.37	2.49	16443.40	2.49
17832.27	2.50	16471.23	2.50
17879.16	2.51	16534.56	2.50
17894.07	2.51	16569.07	2.51
17916.67	2.52	16588.85	2.52
17964.15	2.53	16648.77	2.53
17976.30	2.54	16691.28	2.54
17995.54	2.55	16708.76	2.55
18033.83	2.55	16755.95	2.55
18054.43	2.57	16804.55	2.57
18065.30	2.57	16819.35	2.57
18093.58	2.58	16859.97	2.58
18121.60	2.59	16915.00	2.59
18128.57	2.60	16926.40	2.60
18147.49	2.60	16958.88	2.60
18180.20	2.62	17018.78	2.62
18184.09	2.62	17027.07	2.62
18193.53	2.63	17056.15	2.63
18230.06	2.64	17105.44	2.64
18227.65	2.65	17119.62	2.65
18229.82	2.65	17144.65	2.65
18262.54	2.67	17184.70	2.66
18261.36	2.67	17210.52	2.67
18256.35	2.68	17229.83	2.68
18275.22	2.69	17259.70	2.69
18285.09	2.70	17291.97	2.70
18273.55	2.71	17305.59	2.71

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
18281.23	2.71	17327.91	2.71
18295.56	2.72	17364.31	2.72
18276.82	2.73	17375.18	2.73
18274.55	2.74	17391.60	2.74
18292.15	2.75	17431.66	2.75
18267.67	2.76	17437.05	2.76
18258.63	2.76	17445.82	2.76
18280.41	2.77	17477.54	2.77
18252.17	2.78	17486.57	2.78
18236.34	2.79	17488.99	2.79
18254.77	2.79	17510.14	2.79
18230.36	2.81	17528.24	2.81
18210.72	2.81	17525.24	2.81
18217.37	2.82	17536.66	2.82
18201.51	2.83	17563.07	2.83
18174.57	2.84	17554.02	2.84
18174.43	2.84	17556.54	2.84
18167.83	2.86	17587.68	2.86
18133.46	2.86	17575.31	2.86
18125.03	2.87	17570.51	2.87
18127.55	2.88	17598.45	2.88
18092.18	2.89	17588.15	2.89
18076.05	2.90	17576.57	2.90
18082.32	2.91	17591.13	2.90
18044.34	2.91	17588.55	2.91
18023.28	2.92	17569.77	2.92
18028.02	2.93	17577.26	2.93

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
17990.68	2.94	17581.42	2.94
17967.08	2.95	17555.36	2.95
17963.96	2.95	17550.66	2.95
17938.39	2.97	17556.93	2.97
17907.58	2.97	17528.59	2.97
17898.77	2.98	17518.18	2.98
17878.67	2.99	17532.98	2.99
17850.24	3.00	17500.51	3.00
17829.68	3.00	17485.65	3.00
17817.71	3.02	17503.26	3.02
17783.35	3.02	17471.25	3.02
17763.28	3.03	17448.72	3.03
17757.26	3.04	17463.55	3.04
17720.69	3.05	17438.08	3.05
17695.04	3.05	17412.37	3.05
17691.64	3.07	17415.35	3.06
17658.16	3.07	17399.40	3.07
17628.32	3.08	17371.02	3.08
17619.08	3.09	17368.74	3.09
17594.04	3.10	17357.39	3.10
17563.21	3.11	17324.63	3.11
17546.26	3.11	17316.15	3.11
17533.67	3.12	17314.15	3.12
17499.95	3.13	17278.87	3.13
17475.46	3.14	17269.46	3.14
17472.34	3.15	17271.87	3.15
17434.84	3.16	17235.57	3.16

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
17408.07	3.16	17219.26	3.16
17409.29	3.18	17220.73	3.18
17370.26	3.18	17187.63	3.18
17339.34	3.19	17167.47	3.19
17335.52	3.19	17162.07	3.19
17305.93	3.21	17138.78	3.21
17271.84	3.21	17115.95	3.21
17261.62	3.22	17103.79	3.22
17242.84	3.23	17090.18	3.23
17205.80	3.24	17065.16	3.24
17188.34	3.24	17043.03	3.24
17178.61	3.26	17034.58	3.26
17138.20	3.26	17006.31	3.26
17117.81	3.27	16983.92	3.27
17115.76	3.28	16980.93	3.28
17074.89	3.29	16952.96	3.29
17049.35	3.30	16925.00	3.30
17055.58	3.31	16922.78	3.31
17013.15	3.31	16898.51	3.31
16981.98	3.32	16868.43	3.32
16981.94	3.33	16856.41	3.33
16950.07	3.34	16844.57	3.34
16917.41	3.35	16813.34	3.35
16911.35	3.35	16801.04	3.35
16887.90	3.37	16798.85	3.37
16853.29	3.37	16761.89	3.37
16841.15	3.38	16741.47	3.38

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
16829.09	3.39	16746.00	3.39
16791.04	3.40	16706.25	3.40
16776.66	3.40	16680.10	3.40
16768.55	3.42	16681.36	3.42
16730.76	3.42	16647.62	3.42
16710.45	3.43	16618.79	3.43
16709.86	3.44	16615.48	3.44
16669.07	3.45	16593.38	3.45
16646.90	3.45	16559.85	3.45
16644.24	3.47	16549.39	3.46
16610.41	3.47	16538.22	3.47
16585.24	3.48	16503.85	3.48
16576.50	3.49	16488.19	3.49
16551.00	3.50	16485.20	3.50
16523.29	3.51	16446.78	3.51
16509.60	3.51	16424.92	3.51
16493.45	3.52	16427.52	3.52
16463.87	3.53	16389.62	3.53
16445.15	3.54	16367.44	3.54
16436.31	3.55	16374.37	3.55
16406.18	3.56	16337.34	3.56
16384.42	3.56	16310.18	3.56
16382.13	3.58	16311.87	3.57
16351.23	3.58	16282.72	3.58
16324.72	3.59	16252.98	3.59
16320.27	3.60	16250.57	3.59
16295.83	3.61	16230.23	3.61

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
16266.29	3.61	16199.33	3.61
16256.42	3.62	16190.10	3.62
16242.05	3.63	16179.95	3.63
16211.71	3.64	16145.45	3.64
16194.58	3.64	16134.72	3.64
16188.94	3.66	16128.33	3.66
16155.35	3.66	16091.65	3.66
16134.05	3.67	16076.10	3.67
16134.99	3.68	16077.81	3.68
16101.03	3.69	16041.18	3.69
16076.42	3.70	16021.73	3.70
16078.81	3.71	16018.28	3.71
16046.53	3.71	15988.02	3.71
16018.98	3.72	15966.96	3.72
16014.89	3.73	15959.81	3.73
15994.89	3.74	15941.15	3.74
15963.21	3.75	15917.44	3.75
15955.63	3.75	15903.13	3.75
15942.61	3.77	15889.19	3.77
15910.52	3.77	15865.44	3.77
15896.88	3.78	15847.90	3.78
15891.58	3.79	15843.04	3.79
15857.85	3.80	15817.61	3.80
15839.31	3.80	15794.45	3.80
15843.68	3.82	15794.50	3.82
15806.81	3.82	15768.88	3.82
15785.66	3.83	15743.69	3.83

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
15791.00	3.84	15739.42	3.84
15756.05	3.85	15721.36	3.85
15731.40	3.85	15693.10	3.85
15732.60	3.86	15684.29	3.86
15705.98	3.87	15672.60	3.87
15679.13	3.88	15641.95	3.88
15675.17	3.89	15631.79	3.89
15657.56	3.90	15630.16	3.90
15628.17	3.91	15597.78	3.91
15618.35	3.91	15579.26	3.91
15611.55	3.92	15586.13	3.92
15580.37	3.93	15551.35	3.93
15567.29	3.94	15528.15	3.94
15564.18	3.95	15532.61	3.95
15532.55	3.96	15504.51	3.96
15517.99	3.96	15477.98	3.96
15517.63	3.98	15476.70	3.97
15484.53	3.98	15460.72	3.98
15466.69	3.99	15432.12	3.99
15462.17	3.99	15425.22	3.99
15439.16	4.01	15415.13	4.01
15416.70	4.01	15384.98	4.01
15409.46	4.02	15373.98	4.02
15392.49	4.03	15371.09	4.03
15369.54	4.04	15338.50	4.04
15356.28	4.04	15320.73	4.04
15346.58	4.06	15329.10	4.06
15322.12	4.06	15293.67	4.06

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

R1 60x30x3.2		R2 60x30x3.2	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
15305.47	4.07	15275.50	4.07
15756.05	3.85	15721.36	3.85
15731.40	3.85	15693.10	3.85
15732.60	3.86	15684.29	3.86
15705.98	3.87	15672.60	3.87
15679.13	3.88	15641.95	3.88
15675.17	3.89	15631.79	3.89
15657.56	3.90	15630.16	3.90
15628.17	3.91	15597.78	3.91
15618.35	3.91	15579.26	3.91
15611.55	3.92	15586.13	3.92
15580.37	3.93	15551.35	3.93
15567.29	3.94	15528.15	3.94
15564.18	3.95	15532.61	3.95
15532.55	3.96	15504.51	3.96
15517.99	3.96	15477.98	3.96
15517.63	3.98	15476.70	3.97
15484.53	3.98	15460.72	3.98
15466.69	3.99	15432.12	3.99
15462.17	3.99	15425.22	3.99
15439.16	4.01	15415.13	4.01
15416.70	4.01	15384.98	4.01
15409.46	4.02	15373.98	4.02
15392.49	4.03	15371.09	4.03
15369.54	4.04	15338.50	4.04
15356.28	4.04	15320.73	4.04
15346.58	4.06	15329.10	4.06
15322.12	4.06	15293.67	4.06
15305.47	4.07	15275.50	4.07

ตารางผนวกที่ ก2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะการโก่งตัวของเสา R100-1 และ R100-2

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
-49.89	0.00	2.62	0.00
-50.94	0.00	58.81	0.01
-46.75	0.00	64.81	0.01
-41.50	0.00	115.23	0.02
-41.38	0.00	149.53	0.03
-37.59	0.00	170.85	0.04
-40.63	0.00	201.14	0.04
-40.51	0.00	242.06	0.06
-38.00	0.00	264.11	0.06
-38.95	0.00	292.22	0.07
-40.29	0.00	342.19	0.08
-37.64	0.00	364.30	0.09
-39.61	0.00	392.86	0.10
-42.42	0.00	450.98	0.11
-40.32	0.00	474.44	0.11
-38.31	0.00	502.43	0.12
-42.13	0.00	556.46	0.13
-39.84	0.00	590.14	0.14
-40.38	0.00	618.12	0.15
-40.84	0.00	664.25	0.15
-40.98	0.00	706.27	0.17
-39.57	0.00	735.11	0.17
-41.18	0.00	777.22	0.18
-40.76	0.00	835.09	0.19
-38.89	0.00	867.58	0.20
-40.49	0.00	908.76	0.20
-40.70	0.00	979.97	0.22
-39.72	0.00	1010.50	0.22

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
-39.74	0.00	1049.17	0.23
-41.48	0.00	1123.87	0.24
-40.46	0.00	1152.35	0.25
-37.59	0.00	1188.68	0.25
-42.10	0.00	1254.78	0.26
-40.90	0.00	1295.35	0.27
-38.40	0.00	1331.80	0.28
-41.74	0.00	1387.44	0.29
-39.69	0.00	1438.92	0.30
-37.56	0.00	1474.20	0.30
-41.42	0.00	1523.43	0.31
-40.01	0.00	1585.18	0.32
-38.54	0.00	1620.81	0.33
-39.94	0.00	1668.39	0.34
-41.29	0.00	1742.12	0.35
-38.70	0.00	1774.83	0.36
-39.22	0.00	1819.18	0.36
-40.72	0.00	1897.23	0.37
-39.30	0.00	1930.03	0.38
-37.10	0.00	1972.18	0.39
-40.79	0.00	2039.11	0.39
-40.26	0.00	2088.18	0.41
-37.58	0.00	2128.87	0.41
-40.68	0.00	2189.98	0.42
-40.28	0.00	2250.24	0.43
-38.57	0.00	2292.17	0.44
-41.36	0.00	2343.23	0.44
-40.60	0.00	2412.10	0.46

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
-37.95	0.00	2451.65	0.46
-39.81	0.01	2496.71	0.47
-38.96	0.01	2573.63	0.48
-38.87	0.01	2609.56	0.49
-40.03	0.01	2649.68	0.50
-40.69	0.01	2731.98	0.51
-38.57	0.01	2769.09	0.51
-37.19	0.01	2806.31	0.52
-37.94	0.01	2876.99	0.53
-21.87	0.01	2925.58	0.54
13.55	0.01	2965.71	0.55
45.74	0.01	3025.68	0.55
68.81	0.01	3087.75	0.57
101.98	0.01	3127.22	0.57
141.88	0.01	3180.57	0.58
163.19	0.01	3253.90	0.59
192.98	0.01	3291.07	0.60
239.51	0.01	3339.32	0.60
260.41	0.01	3425.12	0.62
290.71	0.01	3460.02	0.62
345.89	0.01	3505.21	0.63
364.21	0.01	3593.18	0.64
392.88	0.01	3628.67	0.65
448.43	0.01	3672.24	0.65
479.43	0.01	3746.23	0.66
512.82	0.01	3795.36	0.67
566.72	0.01	3838.03	0.68
612.95	0.01	3906.64	0.69

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
645.36	0.01	3968.27	0.70
694.18	0.01	4013.35	0.70
754.06	0.01	4070.78	0.71
786.46	0.01	4144.89	0.72
832.72	0.01	4185.78	0.73
905.93	0.01	4241.08	0.74
935.92	0.01	4325.59	0.75
982.12	0.01	4363.87	0.76
1062.32	0.01	4415.01	0.76
1093.48	0.01	4503.27	0.77
1139.18	0.01	4542.29	0.78
1207.86	0.01	4590.43	0.79
1258.47	0.01	4668.97	0.79
1304.18	0.01	4720.99	0.81
1364.17	0.01	4770.35	0.81
1430.06	0.01	4840.28	0.82
1474.45	0.01	4903.58	0.83
1529.61	0.01	4949.38	0.84
1606.05	0.01	5011.23	0.84
1648.92	0.01	5086.23	0.86
1699.05	0.01	5131.57	0.86
1783.89	0.01	5187.30	0.87
1825.36	0.01	5270.00	0.88
1872.60	0.01	5314.05	0.89
1957.36	0.01	5364.19	0.90
2005.91	0.01	5449.30	0.91
2053.26	0.01	5493.54	0.91
2126.08	0.01	5544.71	0.92

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
2192.86	0.01	5620.42	0.93
2240.29	0.01	5680.23	0.94
2300.02	0.01	5726.45	0.95
2379.99	0.01	5791.97	0.95
2424.20	0.01	5861.91	0.97
2477.36	0.01	5908.39	0.97
2567.91	0.01	5966.43	0.98
2610.73	0.01	6045.46	0.99
2660.08	0.01	6089.65	1.00
2753.08	0.01	6142.32	1.00
2796.80	0.01	6229.61	1.02
2843.16	0.01	6269.92	1.02
2927.43	0.01	6317.37	1.03
2987.09	0.01	6400.00	1.04
3033.27	0.01	6443.97	1.05
3101.93	0.01	6485.87	1.05
3177.37	0.01	6557.85	1.06
3221.98	0.01	6618.40	1.07
3281.75	0.01	6658.23	1.08
3368.84	0.01	6721.26	1.09
3412.01	0.01	6787.56	1.10
3467.03	0.01	6815.74	1.10
3564.24	0.01	6872.77	1.11
3605.11	0.01	6951.84	1.12
3652.49	0.01	6987.51	1.13
3749.51	0.01	7034.51	1.14
3795.33	0.01	7116.63	1.15
3842.34	0.01	7150.31	1.16

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
3926.36	0.01	7192.64	1.16
3985.40	0.01	7268.20	1.17
4032.65	0.01	7306.96	1.18
4103.09	0.01	7343.29	1.19
4175.83	0.01	7406.56	1.19
4218.08	0.01	7455.19	1.21
4281.56	0.01	7494.14	1.21
4366.25	0.01	7549.87	1.22
4410.12	0.01	7609.36	1.23
4468.63	0.01	7644.93	1.24
4558.88	0.01	7695.88	1.24
4599.63	0.01	7762.11	1.26
4654.23	0.01	7795.15	1.26
4741.78	0.01	7841.46	1.27
4790.52	0.01	7909.85	1.28
4843.92	0.01	7939.68	1.29
4919.16	0.01	7981.13	1.30
4982.86	0.01	8049.74	1.31
5033.82	0.01	8082.70	1.31
5098.27	0.01	8120.81	1.32
5173.78	0.01	8179.88	1.33
5223.38	0.01	8221.48	1.34
5278.60	0.01	8257.19	1.35
5361.78	0.01	8305.53	1.35
5409.08	0.01	8353.03	1.37
5460.31	0.01	8387.37	1.37
5547.51	0.01	8429.49	1.38
5593.09	0.01	8483.02	1.39

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
5639.92	0.01	8514.35	1.40
5712.94	0.01	8552.15	1.40
5769.46	0.01	8611.65	1.42
5815.43	0.01	8642.70	1.42
5875.93	0.02	8677.70	1.43
5946.04	0.02	8733.24	1.44
5991.10	0.02	8766.88	1.45
6042.49	0.02	8799.44	1.45
6119.77	0.02	8845.47	1.46
6162.09	0.02	8889.80	1.47
6208.03	0.02	8920.39	1.48
6291.63	0.02	8959.86	1.49
6331.32	0.02	9009.47	1.50
6372.32	0.02	9039.27	1.50
6449.79	0.02	9073.72	1.51
6497.74	0.02	9128.62	1.52
6535.64	0.02	9152.86	1.53
6599.42	0.02	9183.54	1.54
6660.18	0.02	9241.99	1.55
6698.90	0.02	9267.08	1.56
6753.02	0.02	9293.64	1.56
6822.18	0.02	9345.41	1.57
6859.10	0.02	9378.96	1.58
6908.73	0.02	9407.51	1.59
6984.52	0.02	9450.87	1.59
7018.27	0.02	9490.15	1.61
7063.02	0.02	9513.90	1.61
7143.05	0.02	9550.63	1.62

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
7155.34	0.02	9597.01	1.63
7204.44	0.02	9617.82	1.64
7277.25	0.02	9649.47	1.64
7322.12	0.02	9700.96	1.66
7360.00	0.02	9719.34	1.66
7423.46	0.02	9749.63	1.67
7475.58	0.02	9804.30	1.68
7513.94	0.02	9821.41	1.69
7570.40	0.02	9846.01	1.70
7633.25	0.02	9895.46	1.70
7670.50	0.02	9919.50	1.71
7719.05	0.02	9942.24	1.72
7788.87	0.02	9983.95	1.73
7822.69	0.02	10016.41	1.74
7868.30	0.02	10035.36	1.75
7938.03	0.02	10071.87	1.75
7973.81	0.02	10108.12	1.77
8018.42	0.02	10124.91	1.77
8080.41	0.02	10155.96	1.78
8124.51	0.02	10200.10	1.79
8163.85	0.02	10216.45	1.80
8220.18	0.02	10243.27	1.80
8271.98	0.02	10289.19	1.82
8310.22	0.02	10301.29	1.82
8358.39	0.02	10324.36	1.83
8417.13	0.02	10366.63	1.84
8453.94	0.02	10383.13	1.85
8496.31	0.02	10404.08	1.85

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
8559.69	0.02	10439.15	1.86
8595.09	0.02	10464.25	1.87
8631.30	0.02	10481.03	1.88
8692.34	0.02	10511.08	1.89
8731.61	0.02	10540.90	1.90
8766.47	0.02	10558.98	1.91
8817.86	0.02	10583.49	1.91
8866.35	0.02	10617.21	1.92
8899.89	0.02	10629.58	1.93
8942.55	0.02	10649.12	1.94
8997.96	0.02	10687.16	1.95
9028.42	0.02	10698.23	1.96
9064.41	0.02	10716.00	1.96
9125.01	0.02	10747.40	1.97
9152.71	0.02	10761.56	1.98
9182.73	0.02	10774.40	1.99
9243.49	0.02	10800.65	1.99
9272.92	0.02	10825.24	2.01
9300.63	0.02	10835.93	2.01
9352.98	0.02	10855.55	2.02
9389.16	0.02	10885.26	2.03
9414.69	0.02	10892.52	2.04
9459.18	0.02	10907.00	2.04
9503.65	0.02	10938.74	2.06
9527.11	0.02	10945.99	2.06
9566.85	0.02	10955.63	2.07
9617.24	0.02	10989.41	2.08
9640.23	0.02	10993.37	2.09

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
9671.50	0.02	11000.46	2.10
9727.93	0.02	11023.15	2.10
9747.87	0.02	11036.44	2.11
9776.15	0.02	11036.66	2.12
9829.57	0.02	11050.55	2.13
9851.77	0.02	11062.41	2.14
9874.29	0.02	11049.45	2.15
9920.80	0.02	11039.20	2.15
9951.00	0.02	11009.86	2.17
9970.84	0.02	10837.25	2.17
10010.49	0.02	10269.08	2.18
10043.99	0.02	9913.54	2.18
10064.18	0.02	9775.08	2.20
10097.49	0.02	9706.45	2.20
10137.07	0.02	9690.61	2.22
10154.26	0.02	9645.46	2.22
10184.27	0.02	9615.98	2.23
10226.24	0.02	9608.41	2.24
10243.24	0.02	9579.97	2.25
10269.50	0.02	9553.97	2.25
10312.03	0.02	9542.84	2.26
10328.27	0.02	9525.95	2.27
10350.54	0.02	9501.01	2.28
10387.73	0.02	9489.19	2.29
10411.27	0.02	9478.58	2.30
10430.26	0.02	9455.92	2.31
10460.97	0.02	9441.00	2.31
10489.41	0.02	9437.67	2.32

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
10507.63	0.02	9412.91	2.33
10531.06	0.02	9399.07	2.34
10565.01	0.02	9402.86	2.35
10579.98	0.02	9376.01	2.36
10601.83	0.02	9359.28	2.36
10639.18	0.02	9359.84	2.37
10653.67	0.03	9336.97	2.38
10671.42	0.03	9319.65	2.39
10709.77	0.03	9316.04	2.39
10727.37	0.03	9303.98	2.41
10743.92	0.03	9287.53	2.41
10771.28	0.03	9276.90	2.42
10797.82	0.03	9270.95	2.43
10811.72	0.03	9252.20	2.44
10834.10	0.03	9239.98	2.44
10863.98	0.03	9241.83	2.46
10875.90	0.03	9221.28	2.46
10894.88	0.03	9205.82	2.47
10927.97	0.03	9208.01	2.48
10938.93	0.03	9187.95	2.49
10953.46	0.03	9172.10	2.50
10991.57	0.03	9170.53	2.50
11001.76	0.03	9158.13	2.51
11010.60	0.03	9140.68	2.52
11044.38	0.03	9133.65	2.53
11061.27	0.03	9126.45	2.54
11070.35	0.03	9108.61	2.55
11096.65	0.03	9097.41	2.55

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
11121.19	0.03	9096.82	2.57
11126.08	0.03	9075.89	2.57
11148.28	0.03	9061.13	2.58
11176.25	0.03	9067.77	2.59
11180.51	0.03	9042.85	2.60
11194.44	0.03	9024.42	2.60
11227.82	0.03	9029.77	2.62
11232.90	0.03	9008.02	2.62
11243.86	0.03	8986.51	2.63
11280.57	0.03	8985.76	2.64
11284.77	0.03	8967.86	2.65
11293.38	0.03	8943.69	2.65
11325.12	0.03	8937.81	2.66
11334.82	0.03	8926.57	2.67
11340.50	0.03	8899.91	2.68
11364.93	0.03	8886.40	2.69
11381.26	0.03	8879.16	2.70
11385.27	0.03	8848.42	2.71
11403.93	0.03	8830.14	2.71
11425.02	0.03	8825.23	2.72
11430.09	0.03	8789.43	2.73
11445.96	0.03	8764.70	2.74
11469.49	0.03	8761.54	2.75
11470.68	0.03	8717.63	2.76
11483.24	0.03	8688.18	2.76
11511.29	0.03	8672.68	2.77
11511.52	0.03	8629.55	2.78
11519.61	0.03	8587.50	2.79

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
11542.91	0.03	8556.30	2.79
11548.61	0.03	8508.26	2.81
11555.96	0.03	8459.28	2.81
11573.14	0.03	8424.92	2.82
11583.44	0.03	8387.43	2.83
11588.75	0.03	8340.82	2.84
11600.56	0.03	8307.26	2.84
11617.89	0.03	8281.21	2.86
11620.61	0.03	8238.72	2.86
11628.83	0.03	8206.91	2.87
11650.10	0.03	8199.19	2.88
11650.55	0.03	8160.79	2.89
11655.78	0.03	8132.71	2.90
11675.18	0.03	8118.78	2.90
11676.60	0.03	8085.34	2.91
11677.08	0.03	8057.70	2.92
11689.88	0.03	8041.51	2.93
11695.35	0.03	8016.29	2.94
11694.56	0.03	7990.56	2.95
11701.18	0.03	7970.52	2.95
11711.19	0.03	7955.15	2.97
11705.01	0.03	7928.69	2.97
11706.32	0.03	7908.03	2.98
11711.03	0.03	7897.81	2.99
11704.98	0.03	7869.89	3.00
11696.71	0.03	7845.84	3.00
11703.57	0.03	7842.06	3.02
11675.93	0.03	7812.69	3.02

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
11629.29	0.03	7789.81	3.03
11570.80	0.03	7780.43	3.04
11413.91	0.03	7760.49	3.05
11195.45	0.03	7736.19	3.05
10922.07	0.03	7722.85	3.06
10587.06	0.03	7710.14	3.07
10343.36	0.03	7685.41	3.08
10198.23	0.03	7667.99	3.09
10078.50	0.03	7663.85	3.10
9974.54	0.03	7636.91	3.11
9905.57	0.03	7617.25	3.11
9843.64	0.03	7618.27	3.12
9770.55	0.03	7589.97	3.13
9718.94	0.03	7569.15	3.14
9677.33	0.03	7571.49	3.15
9616.14	0.03	7545.79	3.16
9566.87	0.03	7523.61	3.16
9538.36	0.03	7519.60	3.17
9477.63	0.03	7504.47	3.18
9433.98	0.03	7479.97	3.19
9410.43	0.03	7471.54	3.19
9355.88	0.03	7462.99	3.21
9311.49	0.03	7437.91	3.21
9286.81	0.03	7425.87	3.22
9242.39	0.03	7423.78	3.23
9201.72	0.03	7395.82	3.24
9176.81	0.03	7384.03	3.24
9143.31	0.03	7386.24	3.26

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
9103.86	0.03	7358.44	3.26
9077.73	0.03	7341.29	3.27
9053.48	0.03	7348.29	3.28
9014.11	0.03	7319.43	3.29
8986.54	0.03	7299.49	3.30
8967.79	0.03	7299.91	3.30
8927.06	0.03	7281.60	3.31
8900.26	0.03	7262.87	3.32
8886.14	0.04	7257.43	3.33
8848.66	0.04	7247.04	3.34
8818.65	0.04	7227.19	3.35
8803.52	0.04	7219.33	3.35
8770.02	0.04	7213.01	3.37
8740.38	0.04	7192.57	3.37
8720.62	0.04	7181.52	3.38
8695.15	0.04	7183.28	3.39
8664.42	0.04	7157.72	3.40
8641.45	0.04	7145.34	3.40
8623.59	0.04	7148.22	3.42
8591.79	0.04	7123.84	3.42
8565.17	0.04	7110.55	3.43
8552.74	0.04	7108.91	3.44
8521.32	0.04	7091.99	3.45
8492.49	0.04	7076.79	3.45
8483.41	0.04	7070.38	3.46
8452.36	0.04	7060.62	3.47
8423.53	0.04	7042.98	3.48
8411.83	0.04	7033.99	3.49

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
8386.58	0.04	7029.62	3.50
8353.56	0.04	7012.43	3.51
8341.80	0.04	6999.03	3.51
8324.72	0.04	6999.80	3.52
8295.88	0.04	6982.77	3.53
8279.83	0.04	6967.68	3.54
8269.26	0.04	6970.95	3.55
8240.76	0.04	6951.75	3.56
8221.75	0.04	6936.71	3.56
8217.82	0.04	6933.83	3.57
8187.73	0.04	6922.13	3.58
8163.01	0.04	6905.90	3.59
8166.18	0.04	6899.46	3.59
8133.25	0.04	6895.46	3.61
8109.46	0.04	6877.35	3.61
8106.48	0.04	6866.39	3.62
8082.69	0.04	6869.82	3.63
8056.04	0.04	6848.65	3.64
8048.23	0.04	6834.77	3.64
8032.49	0.04	6843.36	3.66
8005.35	0.04	6820.23	3.66
7992.99	0.04	6803.90	3.67
7981.78	0.04	6811.92	3.68
7954.76	0.04	6792.50	3.69
7938.72	0.04	6773.77	3.70
7935.44	0.04	6772.98	3.70
7905.58	0.04	6767.19	3.71
7888.42	0.04	6747.65	3.72

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

R1 100x50x1.6		R2 100x50x1.6	
Load (kg)	Deflection(mm.)	Load (kg)	Deflection(mm.)
7888.24	0.04	6744.74	3.73
7857.76	0.04	6740.46	3.74
7837.61	0.04	6719.64	3.75
7836.35	0.04	6713.88	3.75
7810.24	0.04	6715.87	3.77
7788.11	0.04	6693.10	3.77
7782.25	0.04	6683.71	3.78
7763.85	0.04	6692.48	3.79
7740.63	0.04	6667.35	3.80
7730.09	0.04	6656.03	3.80
7717.95	0.04	6663.34	3.82
7692.47	0.04	6641.65	3.82
7679.69	0.04	6629.03	3.83
7671.83	0.04	6630.59	3.84
7645.60	0.04	6617.21	3.85
7631.54	0.04	6603.22	3.85
7628.44	0.04	6600.71	3.86
7595.01	0.04	6591.26	3.87
7581.73	0.04	6576.07	3.88
7579.97	0.04	6570.65	3.89
7554.22	0.04	6568.09	3.90
7536.99	0.04	6551.98	3.91
7528.69	0.04	6543.63	3.91
7509.83	0.04	6546.85	3.92
7490.04	0.04	6526.99	3.93
7477.24	0.04	6515.52	3.94
7465.22	0.04	6521.65	3.95
7443.94	0.04	6501.80	3.96



ภาคผนวก ข
ตัวอย่าง หน้าตัดท่อเสารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ตัวอย่าง
หน้าตัดท่อเสารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การออกแบบกำลังการรับแรงอัดของเสาเหล็กกริดเย็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามมาตรฐาน AISI
ออกแบบตัวอย่างการทดสอบ R60-1 และ R60-1

หน้าตัดขนาด 60 X 30 X 3.2

คุณสมบัติของหน้าตัด

$E = 2,170,000 \text{ ksc}$, $\nu = 0.3$, $I_x = 21.4 \text{ cm}^4$, $I_y = 21.4 \text{ cm}^4$, $R_x = 2.05$, $R_y = 2.05$, $A = 5.087 \text{ cm}^2$
 $F_y = 2,497 \text{ ksc}$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu)^2} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$$F_{cr} = 4 \frac{3.14^2 \times 2,170,000}{12(1-0.3)^2} \left(\frac{3.2}{49.6} \right)^2 = 32,620.67 \text{ ksc}$$

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

$$F_e = \frac{3.14^2 \times 2,170,000}{(0.65 \times 95 / 1.18)^2} = 7820.77 \text{ ksc}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{2497}{7820}} = 0.565$$

เมื่อ $\lambda_c \leq 1.5$

จะได้

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y$$

$$F_n = (0.658^{0.565^2}) 2497 = 2184.6 \text{ ksc}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{f_{cr}}}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{2184.6}{32620.6}} = 0.258$$

$$\text{ใช้ } b = w$$

$$P_n = A_e F_n$$

$$P_n = 5.087 \times 2184.6 = 11,113 \text{ Kg}$$

การออกแบบกำลังการรับแรงอัดของเสาเหล็กกริดเขียนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามมาตรฐาน AISI ออกแบบตัวอย่างการทดสอบ R60-1 และ R60-1

หน้าตัดขนาด 100 X 50 X 1.6

คุณสมบัติของหน้าตัด

$$E = 2,170,000 \text{ ksc}, \nu = 0.3, I_x = 61.3 \text{ cm}^4, I_y = 21.1 \text{ cm}^4, R_x = 3.55, R_y = 2.06, A = 4.632 \text{ cm}^2$$

$$F_y = 2,497 \text{ ksc}$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu)^2} \left(\frac{t}{w} \right)^2$$

$$F_{cr} = 4 \frac{3.14^2 \times 2,170,000}{12(1-0.3)^2} \left(\frac{0.16}{42.8} \right)^2 = 32,620.67 \text{ ksc}$$

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

$$F_e = \frac{3.14^2 \times 2,170,000}{(0.65 \times 95 / 2.06)^2} = 23835.27 \text{ ksc}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{2497}{23835}} = 0.323$$

เมื่อ $\lambda_c \leq 1.5$

จะได้

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{f_{cr}}}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{2390}{2037}} = 1.083$$

$$\lambda \geq 0.673$$

$$\text{ใช้ } b = w\rho$$

$$F_n = (0.658^{\lambda^2}) F_y$$

$$F_n = (0.658^{0.323^2}) 2497 = 2390 \text{ ksc}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right) / \lambda$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{1.083}\right) / 1.083 = 0.735$$

$$\therefore b = 10 \times 0.735 = 7.35$$

$$\therefore A_e = (5 \times 1.6) \times 2 + (7.35 \times 1.6) \times 2 = 39.52$$

$$P_n = A_e F_n$$

$$P_n = 3.952 \times 2390 = 9.44 \text{ T}$$

การออกแบบกำลังการรับแรงอัดของเสาเหล็กกริดเย็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามมาตรฐาน AISI ออกแบบตัวอย่างการทดสอบ R60-1 และ R60-1

หน้าตัดขนาด 150 X 75 X 3.2

คุณสมบัติของหน้าตัด

$$E = 2,170,000 \text{ ksc}, \nu = 0.3, I_x = 402 \text{ cm}^4, I_y = 137 \text{ cm}^4, R_x = 5.41, R_y = 3.16, A = 13.73 \text{ cm}^2$$

$$F_y = 2,497 \text{ ksc}$$

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu)^2} \left(\frac{t}{w}\right)^2$$

$$F_{cr} = 4 \frac{3.14^2 \times 2,170,000}{12(1-0.3)^2} \left(\frac{0.32}{6.45}\right)^2 = 19250 \text{ ksc}$$

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

$$F_e = \frac{3.14^2 \times 2,170,000}{(0.65 \times 95 / 3.16)^2} = 56086 \text{ ksc}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{2497}{56086}} = 0.210$$

$$\text{เมื่อ } \lambda_c \leq 1.5$$

จะได้

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{f_{cr}}}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{2451}{4122}} = 0.77$$

$$\lambda \geq 0.673$$

ใช้ $b = w\rho$

$$F_n = (0.658^{\lambda^2}) F_y$$

$$F_n = (0.658^{0.210^2}) 2497 = 2451 \text{ ksc}$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right) / \lambda$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0.221}{0.777}\right) / 0.777 = 0.927$$

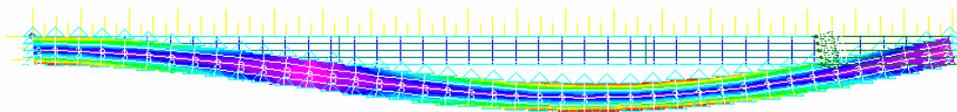
$$\therefore b = 15 \times 0.925 = 13.914$$

$$\therefore A_e = (7.5 \times 3.2) \times 2 + (13.9 \times 3.2) \times 2 = 13.69$$

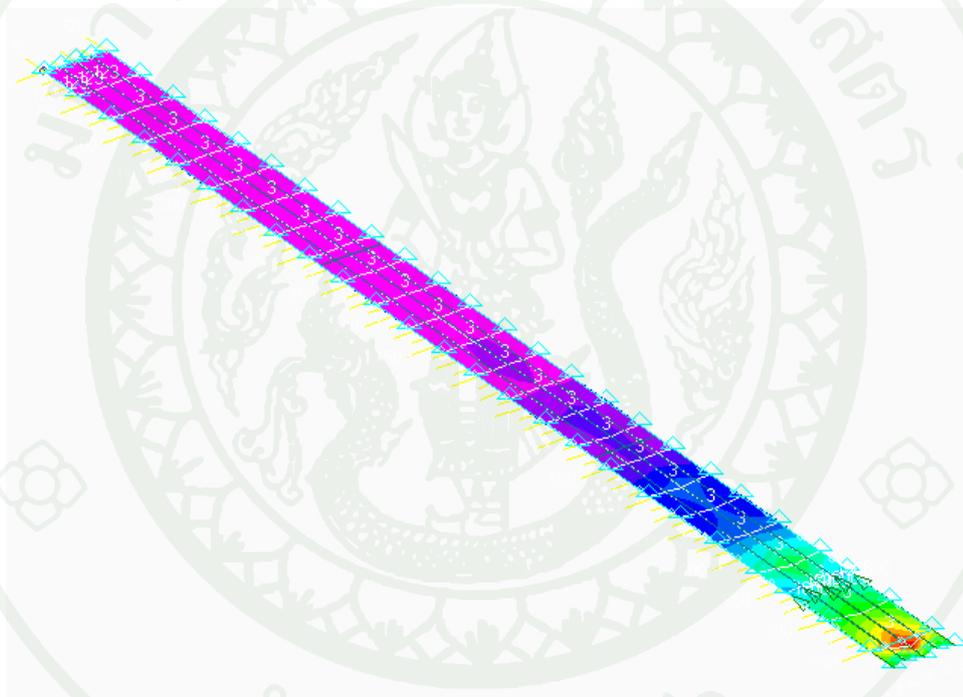
$$P_n = A_e F_n$$

$$P_n = 13.69 \times 2451 = 33568$$

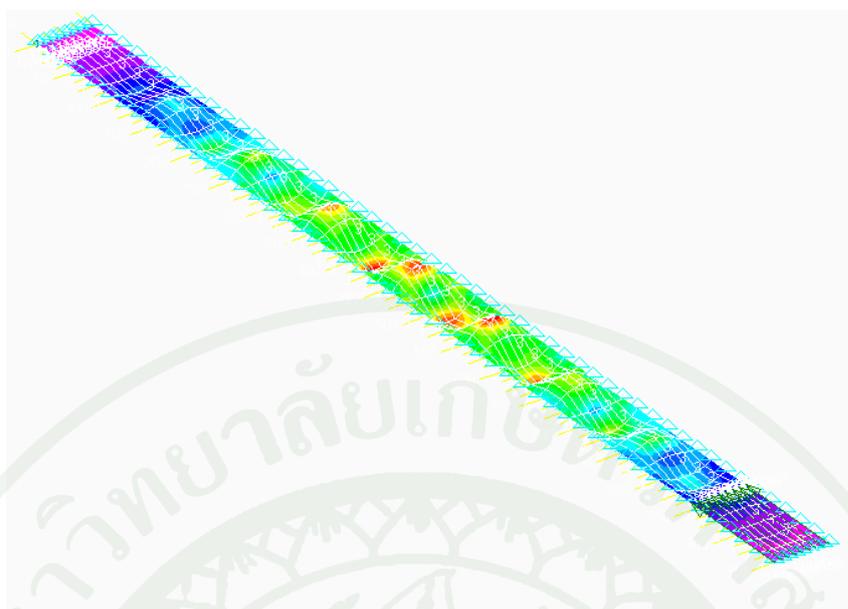
ผลการวิเคราะห์แผ่นบางโดยโปรแกรม Nastran



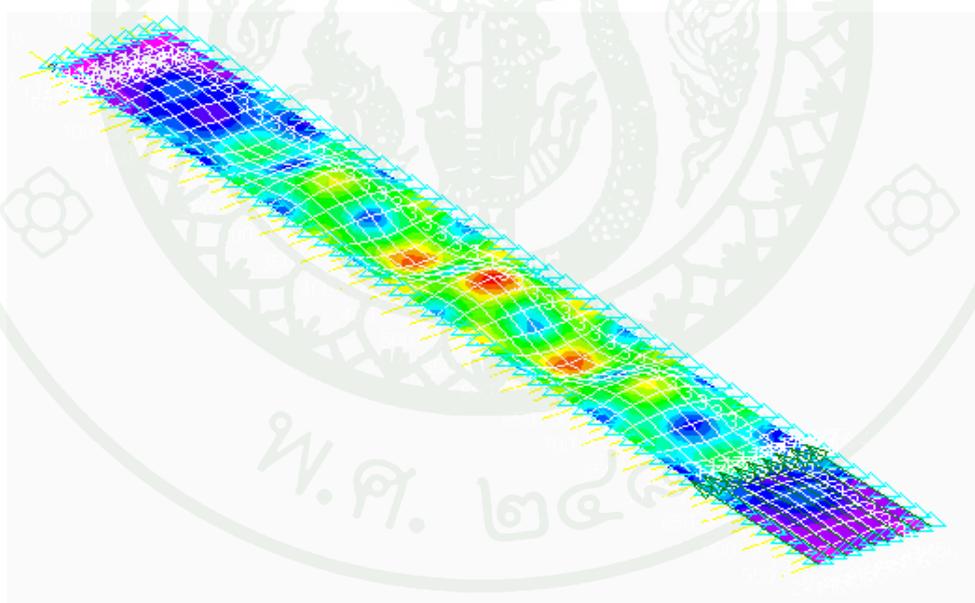
ภาพผนวกที่ ข1 การโก่งเดาะแผ่นบางขนาด 30x950 mm.



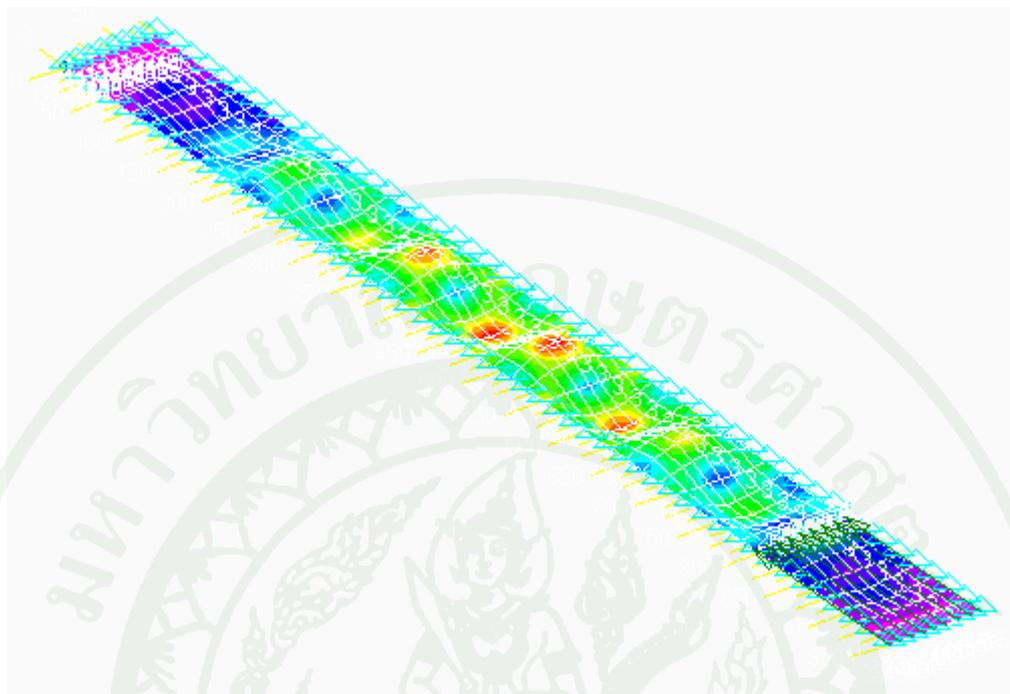
ภาพผนวกที่ ข2 การโก่งเดาะของแผ่นบางขนาด 50x950 mm.



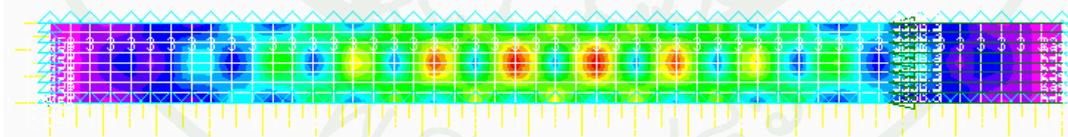
ภาพผนวกที่ ข3 กรณีการ โกงเดาะของแผ่นบางที่มีปลายยึดแน่น ขนาด 50x950x1.6 mm



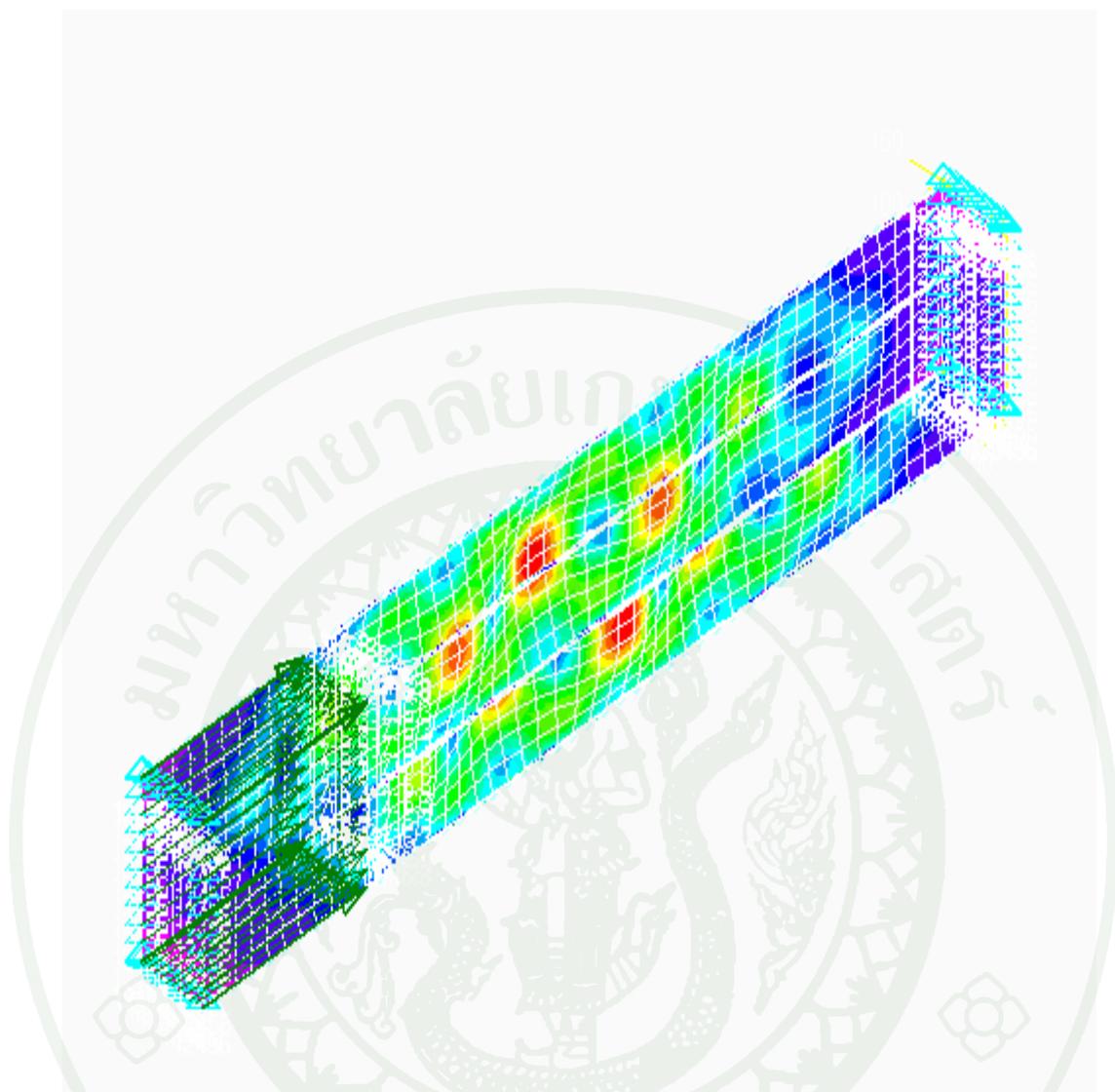
ภาพผนวกที่ ข4 กรณีการ โกงเดาะของแผ่นบางที่มีปลายยึดแน่น ขนาด 100x950x1.6 mm



ภาพผนวกที่ ข5 กรณีการโค้งเดาะของแผ่นบางที่มีปลายยึดแน่น ขนาด 75x950x1.6 mm



ภาพผนวกที่ ข6 กรณีการโค้งเดาะของแผ่นบางที่มีปลายยึดแน่น ขนาด 150x950x1.6 mm



ภาพผนวกที่ ข7 แบบจำลองการโก่งเคาะเฉพาะที่ในช่วงอีลาสติกของเสา 150x75x3.2

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายอภิย์ เบ็ญจพงศ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันพุธที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดยะลา
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน 2549

