

การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยวิธีความกว้างประสิทธิภาพ
และวิธีฮิวริสติก

นางสาวประทุมรัตน์ ทักษะเศรษฐี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

OPTIMUM DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURES BY EFFECTIVE WIDTH
AND HEURISTIC METHODS

MissPrathumrat Thaksaserani

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างเหล็กชั้น
รูปเย็นโดยวิธีความกว้างประสิทธิผลและวิธีฮิวริสติก

โดย

นางสาวประทุมรัตน์ ทักษะเศรษฐี

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติตรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิตถากร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติตรี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัศววิชัย เล่นาวารี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิจพัฒน์ ภู่วรรณ)

ประทุมรัตน์ ทักษะเศรษฐี : การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยวิธีความกว้างประสิทธิภาพและวิธีฮิวริสติก. (OPTIMUM DESIGN OF COLD-FORMED STEEL STRUCTURES BY EFFECTIVE WIDTH AND HEURISTIC METHODS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร. ทักษิณ เทพชาติ, 101 หน้า.

ตามมาตรฐาน วสท. การออกแบบของค้ำอาคารรับแรงดัดของเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยวิธีความกว้างประสิทธิภาพ(effective width method) มีความน่าเชื่อถือ และสิ้นเปลืองเวลา เนื่องจากขั้นตอนการคำนวณจะมีการทำซ้ำ จนกระทั่งแกนสะเทิน (neutral axis) ของหน้าตัดประสิทธิภาพมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในค่าที่กำหนด จากนั้นจึงสามารถหาค่าโมดูลัสหน้าตัดค้ำเหล็ก เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค้ำรับแรงดัดต่อไป งานวิจัยนี้จะนำเสนอสมการอย่างง่ายในการหาโมดูลัสหน้าตัดค้ำเหล็กนี้โดยไม่ต้องมีขั้นตอนการคำนวณซ้ำ

จากการศึกษาเปรียบเทียบค่าโมดูลัสหน้าตัดค้ำเหล็กของหน้าตัดประสิทธิภาพของเหล็กขึ้นรูปเย็นรูปร่างน้ำที่มีเหล็กเสริมกำลัง ที่ขอบเป็นแบบขอบเฝ้มธรรมดาที่มีความสูงจาก 102 มม. ถึง 350 มม. และจากความหนาจาก 1 มม. ถึง 3 มม. พบว่าค่าที่ได้จากสมการอย่างง่ายกับค่าที่ได้จากมาตรฐาน วสท. มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 1.12% ภายใต้หน่วยแรงที่ระดับร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 100 ของค่าหน่วยแรงคราก

สำหรับการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้ได้ใช้สมการอย่างง่ายที่ได้นำเสนอในข้างต้นร่วมกับวิธีฮิวริสติก และจากตัวอย่างโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นที่ใช้ในการศึกษาพบว่าวิธีการนี้สามารถค้นหาค้ำตอบ ซึ่งได้แก่ขนาดหน้าตัดต่างของค้ำอาคารที่ทำให้น้ำหนักรวมของโครงสร้างมีค่าน้อยที่สุดได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2554

5270617321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : EFFECTIVE WIDTH METHOD / ITERATIONS / SIMPIFIED METHOD /
HEURISTIC METHOD

PRATHUMRAT THAKSASERANI : OPTIMUM DESIGN OF COLD-FORMED
STEEL STRUCTURES BY EFFECTIVE WIDTH AND HEURISTIC METHODS.

ADVISOR : PROF.THAKSIN THEPCHATRI, Ph.D., 101 pp.

According to EIT specification, the design of cold-formed steel beams using effective width method is tedious and time consumption. This is due to the procedure of elastic section modulus calculation which requires iterations until the change of the neutral axis of the effective section is less than the specified error. The bending moment capacity of the beam can then be computed. This research presents simply equations in the calculation step to eject the iteration process.

Cold-formed steel channels with simple lips having depth from 105 mm to 350 mm and thickness from 1 mm to 3 mm are used in this study. From the study it has been shown that the maximum difference of the elastic section modulus of the effective section computed from the proposed simplified method and the EIT specification is 1.12%. The comparison is based on stress levels vary from 50 percent to 100 percent of the yield stress.

In the optimum design process, the proposed simplified equations are used in conjunction with the heuristic algorithm. From a selected cold-formed steel structure, the study has shown that the method can effectively search for member sizes to obtain the minimum structural weight.

Department : Civil Engineering..... Student's Signature

Field of Study : Civil Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี ที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา สละเวลาอันมีค่ามาให้ความรู้ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ด้วยความเมตตา ทั้งยังเสนอแนวทางแก้ไขปัญหา และข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิตถากร (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์), รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี (กรรมการสอบวิทยานิพนธ์), ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิจพัฒน์ ภู่วรรณ (กรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการในการตรวจสอบและให้ข้อเสนอแนะ จนสามารถให้งานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนให้คำปรึกษามาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือโดยเฉพาะ นายปิยลักษณ์ วันทนาศิริ ที่เป็นที่คอยช่วยเหลือมาตลอดด้วยน้ำใจอันดี จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.2.1 งานวิจัยของการออกแบบหลักขั้นรูปเขียน.....	2
1.2.2 งานวิจัยของการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของโครงสร้างเหล็ก.....	3
1.2.2.1 งานวิจัยของการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของ โครงสร้างหลักขั้นรูปเขียน.....	3
1.2.2.2 งานวิจัยของการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของ โครงสร้างเหล็กขั้นรีดร้อน.....	4
1.3 วัตถุประสงค์.....	5
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	6
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความนำ.....	7
2.2 การออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐาน วสท.....	8
2.2.1 ชิ้นส่วนและคุณสมบัติของหน้าตัด.....	8
2.2.1.1 ข้อจำกัดและข้อพิจารณาเกี่ยวกับขนาด.....	8
2.2.1.1.1 ข้อพิจารณาของอัตราส่วนความกว้างส่วนเรียบ ต่อความหนาของแผ่นปีก.....	8

2.2.1.1.2 อัตราส่วนความลึกลงต่อความหนามากที่สุด ของแผ่นเอว.....	8
2.2.1.2 ความกว้างประสิทธิผลของชิ้นส่วนปลายยึด.....	9
2.2.1.2.1 ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดแบบคงที่ โดยการหากล้าง.....	9
2.2.1.2.2 แผ่นเอวและชิ้นส่วนปลายยึดอื่นๆ ภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่โดยการหากล้าง....	10
2.2.1.3 ความกว้างประสิทธิผลของชิ้นส่วนปลายยื่น.....	13
2.2.1.3.1 ชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัดแบบคงที่ โดยการหากล้าง.....	13
2.2.1.3.2 ชิ้นส่วนปลายยื่นและแผ่นเสริมกำลังที่ขอบ ภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่โดยการหากล้าง..	13
2.2.1.4 ความกว้างประสิทธิผลของชิ้นส่วนรับแรงอัดแบบคงที่ ซึ่งมีแผ่นเสริมกำลังที่ขอบเป็นขอบเข้มนแบบธรรมดา โดยการหากล้าง.....	15
2.2.2 วิธีการออกแบบโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น.....	18
2.2.2.1 วิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD)	18
2.2.2.2 วิธีวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design, LRFD).....	18
2.2.3 ขั้นตอนการออกแบบ.....	19
2.2.3.1 องค์อาคารรับแรงดึง.....	19
2.2.3.2 องค์อาคารรับแรงอัด.....	19
2.2.3.2.1 กำลังรับแรงอัดระบุเมื่อพิจารณาจากการคราก การโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัด แรงดัดและแรงบิดร่วมกัน และแรงบิด.....	20
2.2.3.2.2 กำลังรับแรงอัดระบุเมื่อพิจารณาจาก การโก่งเดาะแบบเสียรูป (Distortional Buckling Strength).....	22
2.2.3.3 องค์อาคารรับแรงดัด.....	24

บทที่	หน้า
2.2.3.3.1 กำลังต้านทานที่ระบุพิจารณาที่จุดเริ่มต้น ของการคราก (Yielding)	24
2.2.3.3.2 กำลังต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างจากการ บิด (Lateral-Torsional Buckling Strength)..	25
2.2.3.3.3 กำลังต้านทานการโก่งเดาะแบบเสียรูป (Distortional Buckling Strength).....	27
2.2.3.3.4 กำลังต้านทานแรงเฉือน.....	30
2.2.3.3.5 ผลรวมแรงดัดและแรงเฉือน.....	31
2.2.3.4 องค์อาคารรับแรงแนวแกนและแรงดัด.....	33
2.2.3.5 องค์อาคารรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน.....	35
2.3 การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดโดยวิธีวิวิธติก	38
2.3.1 การค้นหาแบบฮิลโคลมิง (Hill climbing).....	39
 บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัยและผลการวิเคราะห์งานวิจัย	
3.1 หลักการวิเคราะห์สมการอย่างง่ายและผลการวิเคราะห์สมการอย่างง่าย.....	41
3.2 หลักการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด และผลที่ได้จากโปรแกรม.....	45
 บทที่ 4 สรุปผลวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 สรุปผลการหาสมการอย่างง่าย.....	58
4.2 สรุปผลการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยวิธีความกว้างประสิทธิผลและวิธีวิวิธติก.....	59
4.3 ข้อเสนอแนะ.....	59
 รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก	62
ภาคผนวก ข	84
ภาคผนวก ค	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยวิธีฮิวริสติก.....	50
3.2 ตารางผลการคำนวณโดยแสดงน้ำหนักโครงสร้างแต่ละรอบของครั้งที่ 5.....	51
3.3 แสดงผลการวิเคราะห์หาแรงภายในของโปรแกรมที่ใช้เปรียบเทียบกับ Sap2000.....	52
3.4 แสดงอัตราส่วนในการรับกำลังแต่ละชิ้นส่วนของโปรแกรมและ SAP2000.....	55

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แผ่นเอวและชิ้นส่วนปลายยึดอื่นๆภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่.....	12
2.2	ระยะระหว่างผิวนอกของแผ่นเอวและชิ้นส่วนปลายยึดอื่นๆภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่.....	13
2.3	ชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัดแบบคงที่.....	13
2.4	ชิ้นส่วนปลายยื่นภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่โดยชอบตามยาวอยู่ในส่วนรับแรงอัด.....	14
2.5	ชิ้นส่วนปลายยื่นภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่ โดยเกิดทั้งแรงอัดและแรงดึง..	15
2.6	ชิ้นส่วนซึ่งมีแผ่นเสริมกำลังที่ขอบเป็นขอบมนแบบธรรมดา.....	17
2.7	แสดงตัวอย่างเมืองที่พนักงานขายต้องเดินทางไป.....	38
3.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%ความคลาดเคลื่อนสูงสุดกับค่า $C_{h(neg)}$	43
3.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%ความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างวิธีการทำซ้ำและวิธีใช้สมการอย่างง่ายของหน้าตัดต่างๆ.....	44
3.3	แสดงผังการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด.....	46
3.4	โครงหลังคาแสดง Node, Element และแรงที่กระทำ.....	49
3.5	แผนภูมิน้ำหนักของโครงสร้างที่เหมาะสมในแต่ละครั้งของการคำนวณ.....	51
3.6	แผนภูมิแสดงน้ำหนักของโครงสร้างแต่ละรอบของครั้งที่ 5 ในการคำนวณ.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิธีการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นปัจจุบันสามารถออกแบบได้ 2 วิธี คือวิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) และวิธีความกว้างประสิทธิผล (Effective Width Method) แต่วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการศึกษาพฤติกรรมของชิ้นงาน ไม่สามารถคำนวณได้โดยง่าย ทำให้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาวิธีการออกแบบโดยวิธีความกว้างประสิทธิผล (Effective Width Method) ซึ่งก็มีความยุ่งยากเมื่อต้องมีขั้นตอนการทำซ้ำในการหาความกว้างประสิทธิผลโดยการคำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีความกว้างประสิทธิผล (Effective Width Method) ได้รับการยอมรับและแพร่หลาย อีกทั้งยังนำไปใช้เป็นข้อกำหนดและมาตรฐานการออกแบบ โดยอาศัยหลักการ การโก่งเดาะในแผ่น (Local Plate Buckling) จะทำให้หน้าตัดประสิทธิผล รับแรงของแผ่นน้อยลง ซึ่งการคำนวณหาหน้าตัดประสิทธิผล ค่อนข้างยุ่งยากเนื่องมาจากขั้นตอนที่ต้องมีการกระทำซ้ำจนกระทั่งตำแหน่งแกนสะเทิน (Neutral Axis) ของหน้าตัดประสิทธิผลมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในค่าที่กำหนด จากนั้นจึงสามารถหาค่าโมดูลัสหน้าตัดอิลาสติก เพื่อนำไปใช้คำนวณหากำลังรับแรงดัดต่อไป ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเพื่อหาสมการสำหรับใช้เป็นสูตรอย่างง่ายโดยประมาณค่าตัวแปรที่มีผลทำให้สามารถลดขั้นตอนการคำนวณซ้ำได้ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมาณค่าดังกล่าวกับค่าที่ได้จากมาตรฐานการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, EIT Standard 1024-53 [1]

ในการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยทั่วไปจะต้องเลือกหน้าตัดของโครงสร้าง แล้วทำการวิเคราะห์หาแรงภายในจากนั้นจึงทำการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของแต่ละองค์อาคารในการปรับเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของแต่ละองค์อาคารจะใช้วิธีลองผิดลองถูก จนกว่าจะได้ขนาดหน้าตัดของแต่ละองค์อาคารที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำได้ แต่ขนาดหน้าตัดที่ได้อาจจะไม่ใช่หน้าตัดที่ทำให้โครงสร้างประหยัดที่สุด ดังนั้นนอกจากงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสูตรอย่างง่ายแล้วยังได้นำสูตรอย่างง่ายมาใช้ในการศึกษาการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นเพื่อช่วยในการคำนวณรวดเร็วขึ้นและทำให้ได้หน้าตัดที่ทำให้โครงสร้างประหยัดที่สุดโดยวัดจากน้ำหนักของเหล็กที่ใช้ทั้งโครงสร้าง โดยงานวิจัยนี้จะทำการวัดผลดังกล่าวจากการสร้างโปรแกรมเพื่อการออกแบบคำนวณหาหน้าตัดที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีฮิวริสติกสำหรับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น

ในการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด ได้มีการศึกษามา ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1983 และพัฒนาต่อจนถึงปัจจุบัน ซึ่งแนวคิดของการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด คือ หาจุดต่ำสุด จากสมการลากรองจ์ โดยวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งการหาจุดต่ำสุดจากสมการลากรองจ์นั้นมีความซับซ้อน และจะทำให้ได้สมการที่หาคำตอบได้ยาก ทำให้มีการนำวิธีต่างๆมาใช้ในการออกแบบอย่างเหมาะสม เช่น วิธีงานสมมุติ วิธีอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) วิธีอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว (simulated annealing algorithm) หลักการความหนาแน่นของพลังงานความเครียด (strain energy density) และอื่นๆ

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีฮิวริสติก โดยประยุกต์ใช้หลักการของฮิลโคลมิง ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายกับการปีนเขา มีกระบวนการในการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และสามารถหาคำตอบได้โดยง่าย

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 งานวิจัยของการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็น

การออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นในปัจจุบันมีวิธีการออกแบบเป็น 2 วิธีคือ วิธีความกว้างประสิทธิผล (Effective Width Method) และ วิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method)

วิธีความกว้างประสิทธิผลประสิทธิผล (Effective Width Method)[2] เป็นวิธีดั้งเดิมได้รับการยอมรับและใช้อย่างแพร่หลายโดยเริ่มพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ.1939 จนถึงปัจจุบัน

ปี ค.ศ. 1939 Professor George Winter และคณะ จากคอร์เนลมหาวิทยาลัย และมหาวิทยาลัยอื่นๆ ได้วิจัยเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยศึกษาพฤติกรรมของชิ้นส่วน Light-Gage Cold-Formed Steel Structure และเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการร่างข้อกำหนดในการออกแบบ โดยได้ศึกษาวิธีการออกแบบโดยวิธีความกว้างประสิทธิผล (Effective Width Method) สำหรับ ชิ้นส่วนการรับแรงในรูปแบบต่างๆ

ปี ค.ศ. 1949 – 1986 AISI ได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นจากการศึกษาจากงานวิจัยข้างต้นมาเป็นข้อกำหนดปี 1949, 1956, 1958, 1961, 1962,1968-1972, 1983, 1986

ปี คศ. 1996 AISI ได้รวมข้อกำหนดการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นแบบ Allowable Stress Design, ASD และข้อกำหนด Load and Resistance Factor Design, LRFD เป็นข้อกำหนดเดียวโดยเรียกว่า ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนเหล็กขึ้นรูปเย็น (specification for the design of cold-formed steel structure members) ปัจจุบันได้พัฒนาข้อกำหนดและนำมาใช้เป็นฉบับ AISI,2007 Cold-Formed Steel Design

ปี คศ. 2004 AISI ได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นวิธีกำลังรับแรงโดยตรง (Direct Strength Method) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่พัฒนาจากแถบอเมริกาเหนือ ออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ ทั้งนี้พัฒนามาเพื่อเป็นทางเลือก โดย ความสามารถในการรับแรงสามารถหาได้จาก การใช้คุณสมบัติทั้งหมดของหน้าตัดภายใต้การโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling), การโก่งเดาะแบบเสียรูป (distortional buckling) และ การโก่งเดาะโดยรวม (global buckling) เพื่อศึกษาเสถียรภาพของชิ้นส่วน จนกระทั่งหน้าตัดของชิ้นส่วนถึงจุดคลาก โดยตรวจสอบพฤติกรรมภายใต้ elastic buckling ดังนั้นกำลังที่หาได้จากวิธีดังกล่าวจึงเป็นอีกแนวทางในการออกแบบ

ปี คศ. 2006 B.W.Schafer and S.Adany [3]ได้เสนอแนวทางการศึกษาพฤติกรรมภายใต้การโก่งเดาะเชิงเส้น (elastic buckling) ด้วยวิธี Finite strip โดยใช้โปรแกรม CUFSM เป็นเครื่องมือในการศึกษาพฤติกรรม

1.2.2 งานวิจัยของการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของโครงสร้างเหล็ก

1.2.2.1 การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น (Cold-Formed Steel) มีการพัฒนางานวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มจาก

ปี คศ. 1971 Seaburg et al. ได้ใช้วิธีโดยตรงและส่วนผสม เป็นเทคนิคในการออกแบบเพื่อให้ได้น้ำหนักที่น้อยที่สุดของหน้าตัดรูปหมวก

ปี คศ. 1995 Park et al. ได้พัฒนาการจำลอง neural dynamics model สำหรับการหาค่าความเหมาะสมด้วย highly nonlinear และการข้อจำกัดที่ซับซ้อน ผลการศึกษาให้ค่าน้ำหนักต่ำสุดภายใต้จุดรองรับแบบง่าย บนมาตรฐาน AISI

ปี คศ. 2000 Nagy ได้เสนอวิธีอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม(Genetic Algorithm) เพื่อพัฒนาการหาวิธีการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด สำหรับหน้าตัด trapezoidal sheeting

ปี คศ. 2003 Wei Lu [4] ได้เสนอวิธีอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม(Genetic Algorithm) เพื่อพัฒนาการหาวิธีการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด สำหรับแป

ปี คศ. 2003-2005 Jaehong Lee, Sun-Myung Kim, Hyo-Seon Park, Byung-Hun Woo [5],[6] ได้เสนอวิธีเลียนแบบพันธุกรรมศาสตร์แบบละเอียด (Micro Genetic Algorithm, $\mu-GA$) ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจาก วิธีเลียนแบบพันธุกรรมศาสตร์ (Genetic Algorithm) เพื่อลดขั้นตอนการทำซ้ำและคำนวณทรัพยากรโดยใช้ประชากรเพียงเล็กน้อย พบว่ามีแนวโน้มที่แสดงให้เห็นว่าสามารถให้ค่าที่เหมาะสมได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Serial Genetic Algorithm, SGA และได้ยังได้ศึกษาอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของหน้าตัดรูปตัว C และ Lipped-C ของเสาภายใต้แรงอัด แรงดัด แรงบิด และภายใต้แรงดัดและแรงบิด พบว่า การเลือกใช้หน้าตัด Lipped-C ประหยัดกว่า หน้าตัดรูปตัว C 15% ภายใต้แรงที่เท่ากัน

1.2.2.2 การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างเหล็กรีดร้อน (Hot Rolled Steel) [7] มีการพัฒนางานวิจัย มาอย่างต่อเนื่อง ดังต่อไปนี้

ปี คศ. 2007 ดร.วิรัช เลิศไพฑูรย์พันธ์ และ ชัชวาล พูนลาภพานิช ได้เสนอวิธีการออกแบบโครงหลังคาเหล็กโดยอาศัยระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุกรรมศาสตร์(genetic algorithm) โดยใช้ตัวแปรจริง (real code) ที่สอดคล้องกับการใช้งาน เช่น ชนิดของวัสดุ คุณสมบัติของวัสดุ รูปร่างและลักษณะของโครงสร้าง มาใช้ในการสร้างสายพันธุ์ และใช้ข้อกำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน AISC/LRFD เป็นข้อจำกัดของปัญหา โดยประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจะขึ้นอยู่กับจำนวนประชากร และจำนวนรุ่นที่เหมาะสมกับปัญหา ซึ่งปกติยิ่งจำนวนประชากรมาก โอกาสที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ก็จะมีมาก แต่ก็ต้องใช้เวลามากขึ้นตามไปด้วย

ปี คศ. 2007 อลงกรณ์ ละม่อม ได้เสนอวิธีการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด สำหรับโครงถักในระนาบ ด้วยวิธีอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว(simulated annealing algorithm) โดยพัฒนาขึ้นจากการเลียนแบบพฤติกรรม การจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก จากการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบไปสู่การเรียงตัว

ที่เป็นระเบียบ โดยที่ค่อยๆ ปล่อยพลังงานออกมาเรื่อยๆ และวิธีวิธีวิฤตติกอัลกอริทึม โดยขนาดหน้าตัดที่ใช้ในการพิจารณา คือ ท่อกลวง (pipes) ซึ่งจะพบว่า เมื่อนำคำตอบที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ผลคำตอบจะมีค่าเท่ากัน จะพบว่าในการออกแบบโดยวิธีวิฤตติกอัลกอริทึม นั้น จะเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่า แต่ในการหาค้นหาคำตอบยังขาดความแม่นยำ และยังมีความแปรปรวนของคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้ง

ปี ค.ศ. 2011 **สุนิสสา ทองศรี** [7] ได้พัฒนาการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงถักเหล็กในระนาบโดยวิธีวิฤตติกโดยนำวิธีวิฤตติกของนายอลงกรณ์ ละม่อม มา อีกทั้งจะเพิ่มความหลากหลายของหน้าตัดขององค์อาคาร ได้แก่ เหล็กตัวไอ เหล็กตัวที เหล็กฉากเดี่ยว และเหล็กฉากคู่ โดยคำนึงถึงการโก่งเดาะเฉพาะที่และอัตราส่วนความชะลูด และจากตัวอย่างที่ได้ศึกษาพบว่า การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีวิฤตติก สามารถลดปริมาตรโครงสร้างชนิดโครงถักได้ประมาณ 2.58% เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา และสำหรับโครงข้อแข็ง 2 ตัวอย่างได้ 3.73% และ 16.38% ตามลำดับ

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกับการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยใช้วิธีความกว้างประสิทธิผล (Effective Width Method)
- เพื่อหาสมการเพื่อใช้เป็นสูตรอย่างง่ายในการคำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยใช้วิธีความกว้างประสิทธิผล (Effective Width Method) แต่ยังคงให้ผลในการออกแบบใกล้เคียงกับมาตรฐานการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, EIT Standard 1024-53 [1]
- เพื่อศึกษาการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับโครงเหล็กในระนาบโดยวิธีวิฤตติกของเหล็กขึ้นรูปเย็น

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบข่ายการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษาหน้าตัดเปิดรูปตัวซีที่มีขอบเข้มนแบบธรรมดา ของบริษัทบลูสโคปไคสาขาจท์ (ประเทศไทย) จำกัด
2. โครงสร้างเป็นแบบ 2 มิติ
3. ไม่พิจารณาผลของการเยื้องศูนย์ที่จุดต่อ และผลของรูเจาะในองค์อาคาร
4. โครงสร้างมีฐานรองรับ (support) มีฐานรองรับชนิดหมุน (hinged support), ฐานรองรับชนิดลูกกลิ้ง (roller support) หรือฐานรองรับชนิดแน่น (fixed support) เท่านั้น ไม่รวมถึงฐานรองรับชนิดสปริง (spring support)
5. หลักการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดที่นำมาใช้เขียนโปรแกรม ใช้ร่วมกับสูตรอย่างง่าย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความนำ

การออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีความกว้างประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายมานาน ปัจจุบันใช้มาตรฐานสากล American Iron and Steel Institute, Cold-Formed Steel Design, 2007.(AISI 2007) [8] สำหรับในประเทศไทยใช้มาตรฐานการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็นของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, EIT Standard 1024-53 [1] โดยใช้มาตรฐาน AISI2007 [8],[9] เป็นมาตรฐานอ้างอิง

เนื่องจากเหล็กขึ้นรูปเย็นมีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนามากกว่าเหล็กขึ้นรูปร้อนทั่วไป จึงทำให้หมวดหมู่ในการวิบัติมีมากกว่าการออกแบบเหล็กทั่วไปเช่นกัน ดังนั้นหน้าตัดดังกล่าวจึงไม่สามารถรับกำลังได้เต็มพื้นที่ จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่จำเป็นต้องคำนวณหาหน้าตัดประสิทธิภาพ แล้วจึงนำมาคำนวณหาลำดับต่อไป โดยการหลักการคำนวณหาหน้าตัดประสิทธิภาพได้จากผลรวมของหน้าตัดประสิทธิภาพของแต่ละชั้นส่วนของหน้าตัด โดยแต่ละชั้นส่วนก็มีค่าในการคำนวณแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการยึดรั้ง แล้วจึงทำการออกแบบต่อไป

และในการคำนวณหน้าตัดที่เหมาะสมขององค์อาคารด้วยวิธีฮิวริสติก โดยประยุกต์ใช้หลักการของฮิลโคลมิง ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายกับการปีนเขา มีกระบวนการในการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และสามารถหาคำตอบได้โดยง่าย

เมื่อนำสมการอย่างง่ายเพื่อลดความยุ่งยากจากการทำซ้ำมาใช้คู่กับวิธีการคำนวณหน้าหน้าตัดที่เหมาะสมด้วยวิธีฮิวริสติกจะทำให้ได้ การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น

2.2 การออกแบบโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นตามมาตรฐานวิศวกรรมแห่งประเทศไทย, EIT Standard 1024-53 [1]

2.2.1 ชิ้นส่วนและคุณสมบัติของหน้าตัด

2.2.1.1 ข้อจำกัดและข้อพิจารณาเกี่ยวกับขนาด

2.2.1.1.1 ข้อพิจารณาของอัตราส่วนความกว้างส่วนเรียบต่อความหนาของแผ่นปีก

อัตราส่วนความกว้างส่วนเรียบต่อความหนาสูงสุด โดยกรณีไม่คิดแผ่นเสริมกำลังที่กึ่งกลางและให้ t เป็นความหนาจริงของชิ้นส่วน อัตราส่วนความกว้างส่วนเรียบต่อความหนาทั้งหมดสูงสุดที่ยอมให้จะหาได้จากข้อดังต่อไปนี้

1. ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดซึ่งมีปลายตามยาวด้านหนึ่งต่อกับแผ่นเอวหรือแผ่นปีก ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งถูกยึดโดย ขอบม้วนแบบธรรมดา (simple lip) ให้ $w/t \leq 60$
2. ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดซึ่งมีขอบตามยาวสองด้านต่อกับชิ้นส่วนปลายยึดอื่นให้ $w/t \leq 500$
3. ชิ้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัด ให้ $w/t \leq 60$

โดยที่

w = ความกว้างส่วนเรียบของแผ่นปีก

t = ความหนาของแผ่นปีก

2.2.1.1.2 อัตราส่วนความลึกต่อความหนามากที่สุดของแผ่นเอว

อัตราส่วน h/t ของแผ่นเอวขององค์อาคารรับแรงดัด จะต้องไม่เกินขีดจำกัด ดังต่อไปนี้

1. สำหรับแผ่นเอวที่ไม่มีการเสริมกำลัง ให้ $(h/t)_{\max} = 200$
2. สำหรับแผ่นเอวซึ่งมีแผ่นเสริมกำลังรับแรงแบกทานจะมีขีดจำกัด ดังต่อไปนี้

2.1 เมื่อใช้แผ่นเสริมกำลังรับแรงแบกทานเท่านั้น ให้ $(h/t)_{\max} = 260$

2.2 เมื่อใช้แผ่นเสริมกำลังรับแรงแบกทานและแผ่นเสริมกำลังที่กึ่งกลาง
ให้ $(h/t)_{\max} = 300$

โดยที่

h = ความลึกของส่วนเรียบของแผ่นเอวที่วัดในระนาบของแผ่นเอว

t = ความหนาของแผ่นเอว ถ้าแผ่นเอวที่ประกอบด้วยแผ่นสองแผ่นหรือมากกว่า ให้
คำนวณอัตราส่วน h/t สำหรับแต่ละแผ่น

2.2.1.2 ความกว้างประสิทธิผลของชิ้นส่วนปลายยึด

2.2.1.2.1 ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดแบบคงที่ โดยการหากล้าง

ความกว้างประสิทธิผล b จะคำนวณจากสมการ ดังต่อไปนี้

$$b = w \quad \text{เมื่อ} \quad \lambda \leq 0.673 \quad (2.1)$$

$$b = \rho w \quad \text{เมื่อ} \quad \lambda > 0.673 \quad (2.2)$$

โดยที่

w = ความกว้างส่วนเรียบ

ρ = ตัวคูณลดค่าเฉพาะที่

$$= (1 - 0.22/\lambda) / \lambda \quad (2.3)$$

λ = ตัวคูณความชะลูด

$$= \sqrt{\frac{f}{F_{cr}}} \quad (2.4)$$

โดยที่

f = หน่วยแรงในชิ้นส่วนรับแรงอัดซึ่งคำนวณได้ดังต่อไปนี้

สำหรับองค์อาคารรับแรงดัด

กรณีหากล้างด้านทานที่ระบุที่จุดเริ่มต้นของการคราก

- เมื่อจุดเริ่มต้นของการครากอยู่ในส่วนรับแรงอัดของชิ้นส่วน ให้ $f = F_y$
- เมื่อจุดเริ่มต้นของการครากอยู่ในส่วนรับแรงดึง หน่วยแรงรับแรงอัดของชิ้นส่วน f จะหาได้จากวิธีหน้าตัดประสิทธิภาพ ผล ค่าโมเมนต์เท่ากับ M_y (โมเมนต์ที่ทำให้เกิดจุดเริ่มต้นของการคราก)

กรณีกำลังต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างจากการบิด (Lateral-Torsional Buckling Strength) ให้ f เป็นหน่วยแรง F_c ใช้ในการหาโมดูลัสหน้าตัด

สำหรับองค์อาคารรับแรงอัด

- สำหรับองค์อาคารรับแรงอัด ให้ f เท่ากับ F_n ซึ่งหาได้จาก สมการ (2.37),(2.38)

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad (2.5)$$

k = สัมประสิทธิ์การโก่งเดาะของแผ่น
 = 4 สำหรับชิ้นส่วนปลายยึดโดยแผ่นเอวบนขอบตามยาวแต่ละด้านจะมีค่าสำหรับชนิดของชิ้นส่วนต่างๆให้ไว้ในหน้าตัดที่เกี่ยวข้อง

E = อีลาสติกโมดูลัสของเหล็ก

t = ความหนาของชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดแบบคงที่

μ = อัตราส่วนปัวซองของเหล็ก

2.2.1.2.2 แผ่นเอวและชิ้นส่วนปลายยึดอื่นๆภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่โดยการหาค่า

- สำหรับแผ่นเอวภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่ (f_1 เป็นหน่วยแรงอัดและ f_2 เป็นหน่วยแรงดึงซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 2.1 ก. สามารถคำนวณความกว้างประสิทธิภาพและสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะของแผ่นจากสมการ ดังต่อไปนี้

$$k = 4 + 2(1+\psi)^3 + 2(1+\psi) \quad (2.6)$$

สำหรับ $h_0 / b_0 \leq 4$

$$b_1 = \frac{b_e}{(3+\psi)} \quad (2.7)$$

$$b_2 = \frac{b_e}{2} \quad \text{เมื่อ } \psi > 0.236 \quad (2.8)$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad \text{เมื่อ } \psi \leq 0.236 \quad (2.8)$$

นอกจากนี้ $b_1 + b_2$ จะต้องไม่เกินส่วนรับแรงอัดของแผ่นเอวซึ่งคำนวณจาก วิธีหน้า
ตัดประสิทธิภาพผล

สำหรับ $h_0 / b_0 > 4$

$$b_1 = \frac{b_e}{(3+\psi)} \quad (2.9)$$

$$b_2 = \frac{b_e}{(1+\psi)} - b_1 \quad (2.10)$$

- สำหรับชิ้นส่วนปลายยึดอื่นๆภายใต้หน่วยแรงไม่คงที่ (f_1 เป็นหน่วยแรงอัดและ f_2 เป็นหน่วยแรงอัดซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 2.1 ข.) สามารถคำนวณความกว้างประสิทธิภาพผลและสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะของแผ่นจากสมการ ดังต่อไปนี้

$$k = 4 + 2(1+\psi)^3 + 2(1-\psi) \quad (2.11)$$

$$b_1 = \frac{b_e}{(3-\psi)} \quad (2.12)$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad (2.13)$$

โดยที่

k = สัมประสิทธิ์การโก่งเดาะของแผ่น

b_1 = ความกว้างประสิทธิภาพผลซึ่งมีนิยามตามรูปที่ 2.1

b_2 = ความกว้างประสิทธิภาพผลซึ่งมีนิยามตามรูปที่ 2.1

b_e = ความกว้างประสิทธิภาพผล b คำนวณตามหัวข้อ 2.2.1.2.1 โดยแทนค่า f ด้วย f_1 และใช้ k ตามสมการข้างต้น

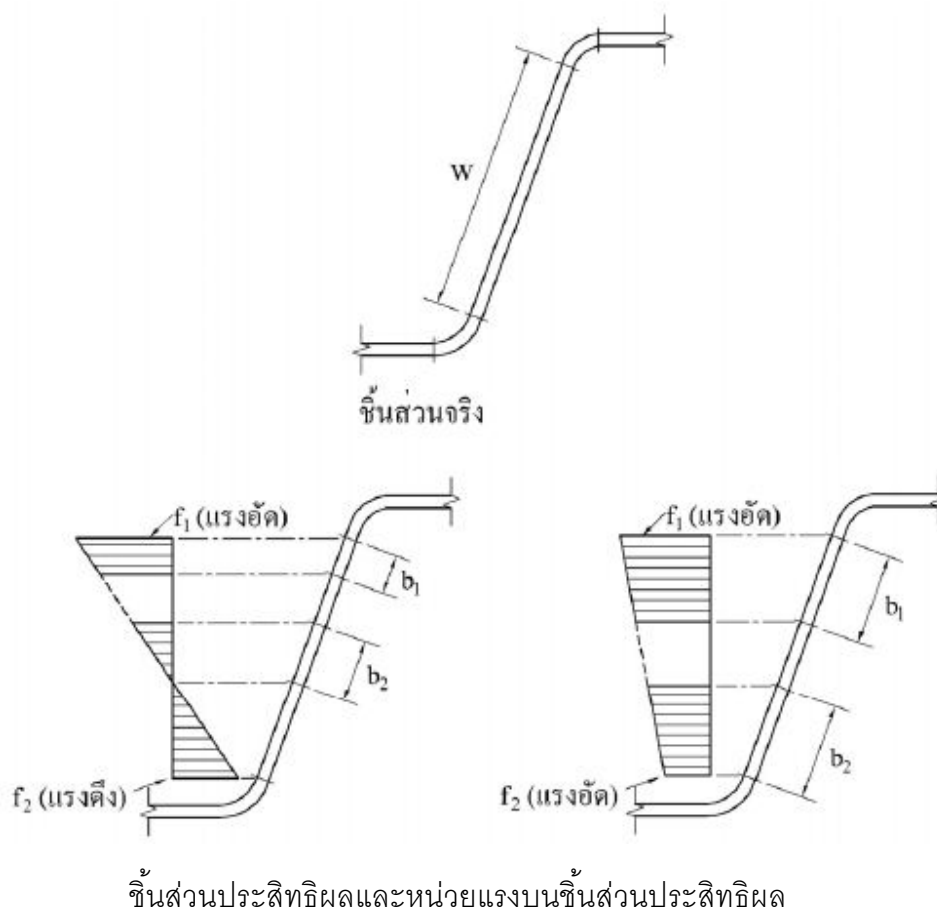
b_0 = ความกว้างระหว่างผิวนอกของแผ่นปีก

h_0 = ความลึกระหว่างผิวนอกของแผ่นเอว

f_1 = หน่วยแรงที่แสดงในรูปที่ 2.1

f_2 = หน่วยแรงที่แสดงในรูปที่ 2.1

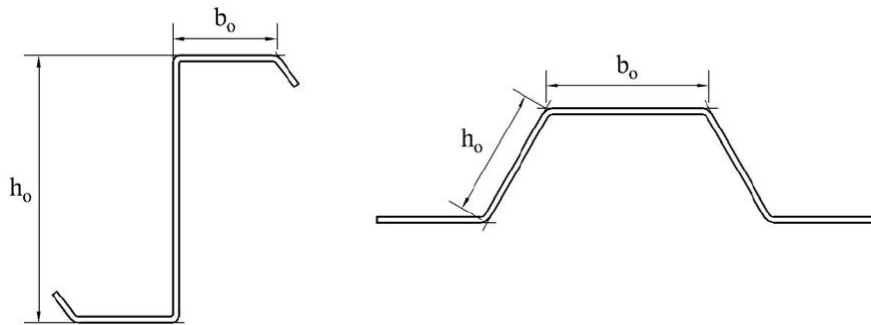
$$\psi = |f_2 / f_1|$$



ก. แผ่นเอวภายใต้หน่วยแรงไม่คงที่

ข. ชิ้นส่วนปลายยึดอื่นๆภายใต้หน่วยแรงไม่คงที่

ภาพที่ 2.1 แผ่นเอวและชิ้นส่วนปลายยึดอื่นๆภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่

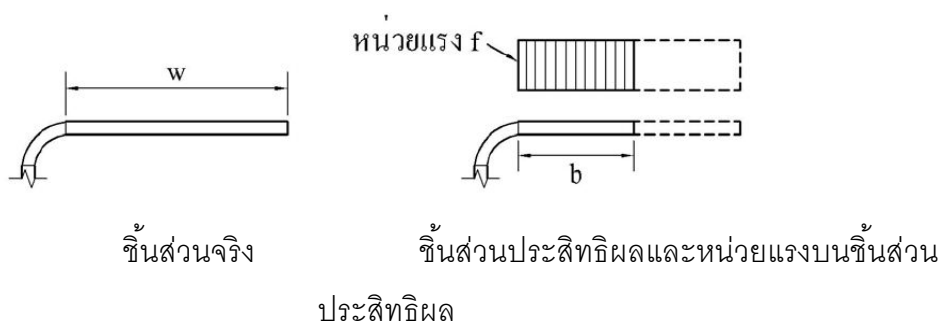


ภาพที่ 2.2 ระยะระหว่างผิวนอกของแผ่นเอวและชั้นส่วนปลายยึดอื่นๆภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่

2.2.1.3 ความกว้างประสิทธิผลของชั้นส่วนปลายยื่น

2.2.1.3.1 ชั้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัดแบบคงที่โดยการหาค่า

ความกว้างประสิทธิผล b จะหาจากวิธีเดียวกับ ชั้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดแบบคงที่ โดยการหาค่า w จากสมการ k ให้มีค่า 0.43 และ w ซึ่งมีนิยามอยู่ในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ชั้นส่วนปลายยื่นรับแรงอัดแบบคงที่

2.2.1.3.2 ชั้นส่วนปลายยื่นและแผ่นเสริมกำลังที่ขอบภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่โดยการหาค่า

ความกว้างประสิทธิผล b ของชั้นส่วนปลายยื่นภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่จะหาได้จากวิธีเดียวกับ ชั้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดแบบคงที่ โดยการหาค่า w โดยใช้สมการ k และ ρ ตามข้อกำหนด ดังต่อไปนี้

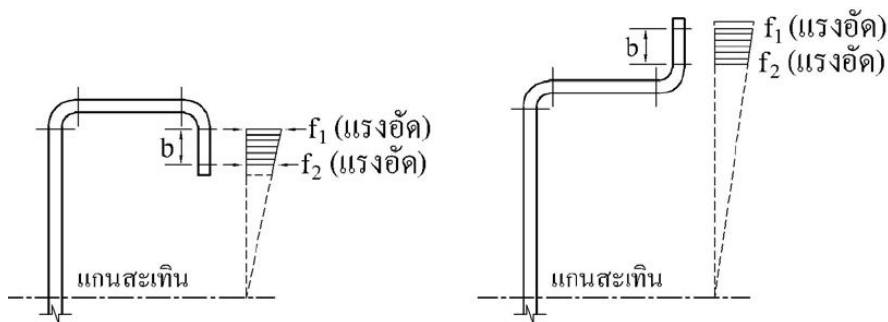
- สำหรับแผ่นเสริมกำลังภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่ (f_1 , f_2 เป็นหน่วยแรงอัดแสดงไว้ในภาพที่ 2.4)

เมื่อหน่วยแรงลดลงไปทางขอบยื่น (ดูภาพที่ 2.4 ก.)

$$k = \frac{0.578}{\psi + 0.34} \quad (2.14)$$

เมื่อหน่วยแรงเพิ่มไปทางขอบยื่น (ดูภาพที่ 2.4 ข.)

$$k = 0.57 - 0.21\psi + 0.07\psi^2 \quad (2.15)$$



ก. ขอบเฝ้ามอยู่ไปทางด้านใน

ข. ขอบเฝ้ามอยู่ไปทางด้านนอก

ภาพที่ 2.4 ชิ้นส่วนปลายยื่นภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่โดยขอบตามยาวอยู่ในส่วนรับแรงอัด

- สำหรับแผ่นเสริมกำลังภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่ (f_1 เป็นหน่วยแรงอัดและ f_2 เป็นหน่วยแรงดึง แสดงไว้ในภาพที่ 2.5)

กรณีขอบยื่นอยู่ในส่วนรับแรงอัด (ดูภาพที่ 2.5 ก.)

$$\rho = 1 \quad \text{เมื่อ } \lambda \leq 0.673(1 + \psi) \quad (2.16)$$

$$\rho = (1 + \psi) \frac{\left(1 - \frac{0.22(1 + \psi)}{\lambda}\right)}{\lambda} \quad \text{เมื่อ } \lambda > 0.673(1 + \psi) \quad (2.17)$$

$$k = 0.57 + 0.21\psi + 0.07\psi^2 \quad (2.18)$$

กรณีขอบยึดอยู่ในส่วนรับแรงอัด (ดูภาพที่ 2.5 ข.)

สำหรับ $\psi < 1$;

$$\rho = 1 \quad \text{เมื่อ } \lambda \leq 0.673(1 + \psi) \quad (2.19)$$

$$\rho = (1 - \psi) \frac{\left(1 - \frac{0.22}{\lambda}\right)}{\lambda} + \psi \quad \text{เมื่อ } \lambda > 0.673(1 + \psi) \quad (2.20)$$

$$k = 1.70 + 5\psi + 17.1\psi^2 \quad (2.21)$$

สำหรับ $\psi \geq 1$;

$$\rho = 1$$

โดยที่

$$\psi = |f_2 / f_1|$$

ρ = ตัวคูณลดค่าเฉพาะที่

λ = ตัวคูณความชะลูด

k = สัมประสิทธิ์การโก่งเดาะของแผ่น



ก. ขอบยื่นอยู่ในส่วนรับแรงอัด

ข. ขอบยึดอยู่ในส่วนรับแรงอัด

ภาพที่ 2.5 ชิ้นส่วนเปลี่ยนภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่ โดยเกิดทั้งแรงอัดและแรงดึง

2.2.1.4 ความกว้างประสิทธิผลของชิ้นส่วนรับแรงอัดแบบคงที่ซึ่งมีแผ่นเสริมกำลังที่ขอบเป็นขอบหม้มแบบธรรมดาโดยการหาค่า

สำหรับ $w/t \leq 0.328S$

$$I_a = 0$$

เมื่อไม่ต้องการแผ่นเสริมกำลังที่ขอบ

$$b = w$$

$$b_1 = b_2 = w/2 \quad \text{ดูภาพที่ 2.6}$$

$$d_s = d'_s$$

สำหรับ $w/t > 0.328S$

$$b_1 = (b/2)R_1 \quad \text{ดูภาพที่ 2.6}$$

$$b_2 = b - b_1 \quad \text{ดูภาพที่ 2.6}$$

$$d_s = d'_s R_1$$

โดยที่

$$S = 1.28\sqrt{E/f} \quad (2.22)$$

w = ความกว้างส่วนเรียบ

t = ความหนาของหน้าตัด

I_a = โมเมนต์อินเนอร์เซียของแผ่นเสริมกำลังที่เพียงพอทำให้แต่ละส่วนประกอบของชิ้นส่วนมีพฤติกรรมเหมือนกับชิ้นส่วนปลายยึด

$$I_a = 399t^4 \left[\frac{w/t}{S} - 0.328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 \frac{w/t}{S} + 5 \right] \quad (2.23)$$

b = ความกว้างประสิทธิผลที่ใช้ออกแบบโดยคำนวณวิธีเดียวกับ ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดแบบคงที่ โดยการหาค่า k แต่ให้ใช้ค่า สัมประสิทธิ์การโก่งเดาะดังต่อไปนี้

$$k = 3.75(R_1)^n + 0.43 \leq 4 \quad \text{เมื่อ } D/w \leq 0.25 \quad (2.24)$$

$$k = \left(4.82 - \frac{5D}{w} \right) (R_1)^n + 0.43 \leq 4 \quad \text{เมื่อ } 0.25 < D/w \leq 0.8 \quad (2.25)$$

k ในสมการ (2.24), (2.25) ใช้กับกรณีแผ่นเสริมกำลังที่ขอบเป็นขอบเฝ้แบบธรรมดา ($140^\circ \geq \theta \geq 40^\circ$)

b_1, b_2 = ส่วนของความกว้างประสิทธิผลซึ่งมีนิยามในภาพที่ 2.6

d_s = ความกว้างประสิทธิภาพที่ลดค่าของแผ่นเสริมกำลังซึ่งมีนิยามในภาพที่ 2.6 และใช้ในการคำนวณคุณสมบัติหน้าตัดประสิทธิภาพรวม

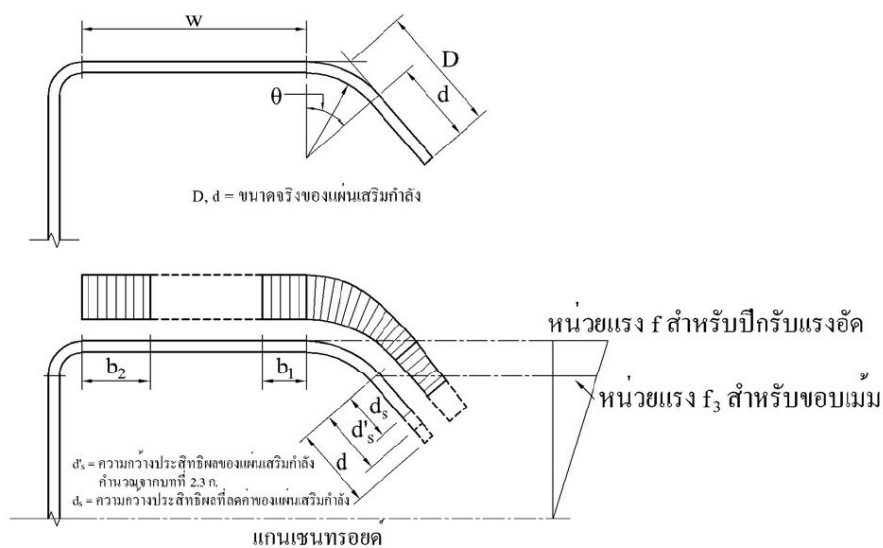
d'_s = ความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นเสริมกำลัง (ดูภาพที่ 2.6)

$$R_1 = I_s / I_a \leq 1 \tag{2.26}$$

I_s = โมเมนต์อินเนอร์เซียของแผ่นเสริมกำลังเต็มหน้าตัดรอบแกนเซนทรอยด์ของตัวมันเองซึ่งขนานกับชิ้นส่วนที่ปลายถูกยึด สำหรับแผ่นเสริมกำลังที่ขอบ ส่วนมุมโค้งระหว่างแผ่นเสริมกำลังและชิ้นส่วนที่ปลายถูกยึดจะไม่นับเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นเสริมกำลัง

$$I_s = (d^3 t \sin^2 \theta) / 12 \tag{2.27}$$

$$n = \left(0.582 - \frac{(w/t)}{4S} \right) \geq \frac{1}{3} \tag{2.28}$$



ภาพที่ 2.6 ชิ้นส่วนซึ่งมีแผ่นเสริมกำลังที่ขอบเป็นขอบเม้มแบบธรรมดา

2.2.2 วิธีการออกแบบโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น

แรงภายในที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างจะถูกนำมาออกแบบตามข้อกำหนด เพื่อให้องค์อาคารสามารถรับแรงได้อย่างปลอดภัยตามมาตรฐานของแต่ละข้อกำหนด ซึ่งในงานวิจัยจะเสนอแนวทางในการออกแบบครอบคลุมการออกแบบโดยวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD) และการออกแบบโดยวิธีการคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor Design, LRFD)

2.2.2.1 วิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD)

วิธี ASD นี้ใช้หลักการของกำลังที่ยอมให้ของส่วนประกอบโครงสร้างแต่ละส่วนจะต้องเท่ากับหรือมากกว่ากำลังที่ต้องการซึ่งหามาจากน้ำหนักบรรทุกระบุและการจัดกลุ่มน้ำหนักบรรทุก โดยสามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$R \leq R_n / \Omega \quad (2.29)$$

โดยที่

R = กำลังที่ต้องการ

R_n = กำลังที่ระบุ

Ω = ตัวคูณความปลอดภัย (safety factor)

$R_a = R_n / \Omega$ = กำลังที่ยอมให้

2.2.2.2 วิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก

(Load and Resistance Factor Design, LRFD)

วิธี LRFD นี้ใช้หลักการของภาวะสุดขีด โดยกำลังที่ใช้ออกแบบของส่วนประกอบโครงสร้างแต่ละส่วนจะต้องเท่ากับหรือมากกว่ากำลังที่ต้องการซึ่งหามาจากน้ำหนักบรรทุกระบุคูณด้วยตัวคูณน้ำหนักบรรทุกสำหรับกลุ่มน้ำหนักบรรทุกที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เขียนสมการ ได้ดังนี้

$$R_u \leq \phi R_n \quad (2.30)$$

โดยที่

R_u = กำลังที่ต้องการ

R_n = กำลังระบุ

ϕR_n = กำลังที่ใช้ในการออกแบบ

ϕ = ตัวคูณความต้านทาน(resistance factor)

2.2.3 ขั้นตอนการออกแบบ

2.2.3.1 องค์อาคารรับแรงดึง

สมมุติให้หน่วยแรงดึงรับแรงดึงกระจายตลอดทั้งหน้าตัดขององค์อาคาร จะหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่องค์อาคารรับได้ โดย

$$T_n = A_g F_y \quad (2.31)$$

โดยที่

T_n = กำลังรับแรงดึงระบุ

F_y = หน่วยแรงคราก

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด

Ω_t = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงดึง โดยวิธี ASD = 1.67

ϕ_t = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดึง โดยวิธี LRFD = 0.90

2.2.3.2 องค์อาคารรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดระบุที่นำมาใช้ต้องเป็นค่าต่ำสุดในกรณีที่ 1 เมื่อพิจารณาจากการคราก การโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัด แรงดัดและแรงบิดร่วมกัน และแรงบิด และกรณีที่ 2 เมื่อพิจารณาการโก่งเดาะแบบเสี้ยวรูป สามารถคำนวณได้ดังนี้

2.2.3.2.1 กำลังรับแรงอัดระบุ เมื่อพิจารณาจากการคราก การโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัด แรงดัดและแรงบิดร่วมกัน และแรงบิด

$$P_n = A_e F_n \quad (2.32)$$

โดยที่

Ω_c = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงอัด โดยวิธี ASD = 1.80

ϕ_c = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงอัด โดยวิธี LRFD = 0.85

P_n = กำลังรับแรงอัดระบุ

A_e = เนื้อที่หน้าตัดประสิทธิภาพ

F_n = หน่วยแรงอัดในหน้าตัด โดย F_n ขึ้นอยู่กับ λ_c จากสมการดังนี้

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad \text{เมื่อ } \lambda_c \leq 1.5 \quad (2.33)$$

$$F_n = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F_y \quad \text{เมื่อ } \lambda_c > 1.5 \quad (2.34)$$

โดยที่

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (2.35)$$

F_e = ค่าต่ำสุดของหน่วยแรงโก่งเดาะแบบอิลาสติก

F_e สำหรับหน้าตัดที่ไม่มีการโก่งเดาะเนื่องจากแรงบิดหรือแรงดัด และแรงบิดร่วมกัน

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (2.36)$$

โดยที่

E = อิลาสติกโมดูลัสของเหล็ก

K = ตัวคูณความยาวประสิทธิภาพ

L = ความยาวที่ปราศจากการค้ำยัน

r = รัศมีไจเรชั่นของหน้าตัด รอบแกนที่เกิดการโก่งเดาะ

F_e สำหรับหน้าตัดที่ไม่มีเกิดการโก่งเดาะเนื่องจากแรงบิดหรือแรงดัดและแรงบิดร่วมกัน

$$F_e = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] \quad (2.37)$$

หรือ

$$F_e = \frac{\sigma_t\sigma_{ex}}{\sigma_t + \sigma_{ex}} \quad (2.38)$$

โดยที่

$$\beta = 1 - (x_0 / r_0)^2 \quad (2.39)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (2.40)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} \quad (2.41)$$

G = โมดูลัสแรงเฉือนของเหล็ก

J = ค่าคงที่การบิดแบบ Saint-Venant ของหน้าตัด

C_w = ค่าคงที่การบิดเบี้ยวของหน้าตัด

K_t = ตัวคูณความยาวประสิทธิผล สำหรับการบิด

K_x = ตัวคูณความยาวประสิทธิผลสำหรับการดัดรอบแกน x

L_t = ความยาวที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้างสำหรับการบิด

L_x = ความยาวที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง สำหรับการดัดรอบแกน x

A = พื้นที่หน้าตัดที่ไม่ลดค่าเต็มที

r_0 = รัศมีไจเรชั่นแบบโพลาร์ของหน้าตัดรอบจุดศูนย์กลางแรงเฉือน

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2}$$

r_x, r_y = รัศมีไจเรชั่นของหน้าตัดรอบแกนหลักผ่านจุดศูนย์กลาง

x_0 = ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางแรงเฉือนและจุดศูนย์กลางตามแกนหลัก x

2.2.3.2.2 กำลังรับแรงอัดระบุ เมื่อพิจารณาการโก่งเดาะแบบเสียรูป (Distortional Buckling Strength)

$$P_n = P_y \quad \text{เมื่อ } \lambda_d \leq 0.561 \quad (2.42)$$

$$P_n = \left(1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right) \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P \quad \text{เมื่อ } \lambda_d > 0.561 \quad (2.43)$$

โดยที่

Ω_c = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงอัด โดยวิธี ASD = 1.80

ϕ_c = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงอัด โดยวิธี LRFD = 0.85

P_n = กำลังตามแนวแกนที่ระบุ

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crd}}} \quad (2.44)$$

$$P_y = A_g F_y \quad (2.45)$$

$$P_{crd} = A_g F_d \quad (2.46)$$

โดยที่

A_g = พื้นที่หน้าตัดรวม

F_y = หน่วยแรงคราก

$$F_d = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{k_{\phi fg} + k_{\phi wg}} \quad (2.47)$$

โดยที่

k_ϕ = ค่าสติเฟนสของการหมุน ซึ่งให้กำลังโดยองค์อาคารยี่ดั่ง

$k_{\phi fe}$ = ค่าสติเฟนสของการหมุนแบบอิลาสติกสำหรับแผ่นปีก

$$k_{\phi fe} = \left(\frac{\pi^4}{L} \right) \left(EI_{xf} (x_0 - h_x)^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_0 - h_x)^2 \right) + \left(\frac{\pi^2}{L} \right) GJ_f \quad (2.48)$$

$k_{\phi we(c)}$ = ค่าสติเฟนสของการหมุนแบบอิลาสติกสำหรับแผ่นเอวสำหรับองค์อาคารรับแรงอัด

$$k_{\phi we(c)} = \frac{Et^3}{6h_0(1-\mu^2)} \quad (2.49)$$

$\tilde{k}_{\phi fg}$ = ค่าสติเฟนสของการหมุนของหน้าตัดหารด้วยหน่วยแรง F_d ซึ่งต้องการโดยแผ่นปีก จากจุดต่อระหว่างแผ่นปีกกับแผ่นเอว

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \left[A_f \left((x_0 - h_x)^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 + 2y_0 (x_0 - h_x) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_x^2 + y_0^2 \right) + I_{xf} + I_{yf} \right] \quad (2.50)$$

$\tilde{k}_{\phi wg(c)}$ = ค่าสติเฟนสของการหมุนของหน้าตัดหารด้วยหน่วยแรง F_d ซึ่งต้องการโดยแผ่นเอว จากจุดต่อระหว่างแผ่นปีกกับแผ่นเอว สำหรับองค์อาคารรับแรงอัด

$$\tilde{k}_{\phi wg(c)} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{th_0^3}{60} \quad (2.51)$$

L = ค่าน้อยสุดระหว่าง $L_{cr(c)}$ และ L_m

$$L_{cr(c)} = \left(\frac{6\pi^4 h_0 (1-\mu^2)}{t^3} \left(I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right) \right)^{1/4} \quad (2.52)$$

L_m = ระยะระหว่างจุดยี่ดั่งที่ต้านทานการโก่งเดาะแบบเสี้ยวรูป ในกรณีที่มีการยี่ดั่งตลอด ความยาวคาน ระยะ $L_m = L_{cr(c)}$

I_{xf} = โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกน x ของแผ่นปีก

x_0 = ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางแรงเฉือนและจุดศูนย์กลางถ่วงตามแกนหลัก x

h_x = ระยะห่างตามแกน x ระหว่างจุดต่อของแผ่นปีกไปยังจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของแผ่นปีก

C_{wf} = ค่าคงที่การบิดเบี้ยวของหน้าตัดของแผ่นปีก

I_{xyf} = ผลคูณโมเมนต์อินเนอร์เซียเทียบกับแกน x และแกน y ของแผ่นปีก

I_{yf} = โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกน y ของแผ่นปีก

J_f = ค่าคงที่การบิดแบบ Saint-Venant ของแผ่นปีกรับแรงอัดรวมกับขอบเสริมกำลังรอบระบบแกน

G = โมดูลัสแรงเฉือนของเหล็ก

2.2.3.3 องค์การรับแรงดัด

กำลังต้านทานแรงดัดที่ระบุ M_n ที่นำมาใช้ต้องเป็นค่าต่ำสุดของกำลังต้านทานดังต่อไปนี้

1. กำลังต้านทานที่ระบุพิจารณาที่จุดเริ่มต้นของการคราก (yielding)
2. กำลังต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างจากการบิด (Lateral-Torsional Buckling Strength)
3. กำลังต้านทานการโก่งเดาะแบบเสียรูป (Distortional Buckling Strength)

กำลังต้านทานแรงดัดที่ระบุ M_n สามารถคำนวณได้ดังนี้

2.2.3.3.1 กำลังต้านทานที่ระบุพิจารณาที่จุดเริ่มต้นของการคราก (yielding)

ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยและค่าตัวคูณลดสำหรับหน้าตัดซึ่งมีแผ่นปีกรับแรงอัดที่เป็นชิ้นส่วนปลายยึดหรือปลายยึดบางส่วน

Ω_b = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงดัด โดยวิธี ASD = 1.67

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.95

ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยและค่าตัวคูณลดสำหรับหน้าตัดซึ่งมีแผ่นปีกรับแรงอัดที่เป็นชิ้นส่วนปลายยื่น

Ω_b = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงดัด โดยวิธี ASD = 1.67

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.90

กำลังต้านทานแรงดัดที่ระบุ, M_n คำนวณได้จากสมการ

$$M_n = S_e F_y \quad (2.53)$$

โดยที่

S_e = โมดูลัสหน้าตัดอิลาสติกของหน้าตัดประสิทธิผล ที่มีหน่วยแรงรับแรงดึงหรือแรงอัดด้านขอบนอกสุดเท่ากับหน่วยแรงคราก, F_y

F_y = หน่วยแรงคราก

2.2.3.3.2 กำลังต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างจากการบิด (Lateral-Torsional Buckling Strength)

ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยและค่าตัวคูณลด ดังนี้

Ω_b = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงดัด โดยวิธี ASD = 1.67

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.90

กำลังต้านทานแรงดัดที่ระบุ, M_n คำนวณได้จากสมการ

$$M_n = S_e F_c \quad (2.54)$$

โดยที่

S_e = โมดูลัสหน้าตัดอิลาสติกของหน้าตัดประสิทธิผล ที่มีหน่วยแรงรับแรงอัดด้านขอบนอกสุดเท่ากับ F_c

F_c สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_c = F_y \quad \text{เมื่อ } F_e \geq 2.78F_y \quad (2.55)$$

$$F_c = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_e} \right) \quad \text{เมื่อ } 2.78F_y > F_e > 0.56F_y \quad (2.56)$$

$$F_c = F_e \quad \text{เมื่อ } F_e \leq 0.56F_y \quad (2.57)$$

โดยที่

F_e = หน่วยแรงวิกฤติแบบอิลาสติกที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะด้านข้างจากการบิด สามารถคำนวณได้จาก

$$F_e = \frac{C_b r_0 A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad (2.58)$$

โดยที่

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2} \quad (2.59)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (2.60)$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{(K_y L_y / r_y)^2} \quad (2.61)$$

$$C_b = \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (2.62)$$

โดยที่

M_{\max} = โมเมนต์ดัดสูงสุด ในช่วงที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง

M_A = โมเมนต์ดัดสูงสุด ที่ระยะ 1/4 ของช่วงที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง

M_B = โมเมนต์ดัดสูงสุด ที่ระยะ 1/2 ของช่วงที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง

M_C = โมเมนต์ดัดสูงสุด ที่ระยะ 3/4 ของช่วงที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง

C_b = สามารถกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.00 ซึ่งครอบคลุมทุกกรณีและอยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัย สำหรับชิ้นส่วนแบบคานยื่น ซึ่งมีส่วนปลายแบบอิสระไม่มีการค้ำยันให้ใช้ค่า C_b เท่ากับ 1.00

r_0 = รัศมีไจเรชั่นแบบโพลาร์ของหน้าตัดรอบจุดศูนย์กลางแรงเฉือน

r_x, r_y = รัศมีไจเรชั่นของหน้าตัดรอบแกนหลักผ่านจุดศูนย์กลาง

x_0 = ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางแรงเฉือนและจุดศูนย์กลางตามแกนหลัก x

G = โมดูลัสแรงเฉือนของเหล็ก

J = ค่าคงที่การบิดแบบ Saint-Venant ของหน้าตัด

C_w = ค่าคงที่การบิดเบี้ยวของหน้าตัด

K_t = ตัวคูณความยาวประสิทธิผล สำหรับการบิด

K_y = ตัวคูณความยาวประสิทธิผลสำหรับการดัดรอบแกน y

L_t = ความยาวที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้างสำหรับการบิด

L_y = ความยาวที่ไม่มีการค้ำยันด้านข้าง สำหรับการดัดรอบแกน y

A = พื้นที่หน้าตัดที่ไม่ลดค่าเต็ม

2.2.3.3.3 กำลังต้านทานการโก่งเดาะแบบเสี้ยวรูป

(Distortional Buckling Strength)

ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยและค่าตัวคูณลด ดังนี้

Ω_b = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงดัด โดยวิธี ASD = 1.67

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.90

กำลังต้านทานแรงดัดที่ระบุ, M_n คำนวณได้จากสมการ

$$M_n = M_y \quad \text{เมื่อ } \lambda_d \leq 0.673 \quad (2.63)$$

$$M_n = \left(1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right) \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad \text{เมื่อ } \lambda_d > 0.673 \quad (2.64)$$

โดยที่

$$\lambda = \sqrt{M_y / M_{crd}} \quad (2.65)$$

$$M_y = S_{fy} F_y \quad (2.66)$$

$$M_{crd} = S_f F_d \quad (2.67)$$

โดยที่

S_{fy} = โมดูลัสหน้าตัดแบบอีลาสติกของหน้าตัดที่ไม่ลดค่าเต็มด้านขอบ
นอกสุด ที่จุดเริ่มต้นของการคราก

F_y = หน่วยแรงคราก

S_f = โมดูลัสหน้าตัดแบบอีลาสติกของหน้าตัดที่ไม่ลดค่าเต็มด้านขอบ
นอกสุดที่รับแรงอัด

F_d = หน่วยแรงแบบอีลาสติกที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะแบบเสี้ยวรูป

$$F_d = \beta \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} \quad (2.68)$$

โดยที่

β = ตัวแปรที่ควบคุมผลกระทบของโมเมนต์ที่ไม่คงที่

$$\beta = 1.0 \leq 1 + 0.4(L / L_m)^{0.7} (1 - M_1 / M_2)^{0.7} \leq 1.3 \quad (2.69)$$

$k_{\phi fe}$ = ค่าสติฟเนสของการหมุนแบบอีลาสติกสำหรับแผ่นปีก

$$k_{\phi fe} = \left(\frac{\pi^4}{L} \right) \left(EI_{xf} (x_0 - h_x)^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_0 - h_x)^2 \right) + \left(\frac{\pi^2}{L} \right) GJ_f \quad (2.70)$$

$k_{\phi we(b)}$ = ค่าสติฟเนสของการหมุนแบบอีลาสติกสำหรับแผ่นเอวสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด

$$k_{\phi we(b)} = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{3}{h_0} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{19h_0}{60} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \frac{h_0^3}{240} \right) \quad (2.71)$$

$\tilde{k}_{\phi fg}$ = ค่าสติฟเนสของการหมุนของหน้าตัดหารด้วยหน่วยแรง F_d ซึ่งต้องการโดยแผ่นปีก
จากจุดต่อระหว่างแผ่นปีกกับแผ่นเอว

$$\tilde{k}_{\phi_{fg}} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \left[A_f \left((x_0 - h_x)^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right)^2 + 2y_0 (x_0 - h_x) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}}\right) + h_x^2 + y_0^2 \right) + I_{xf} + I_{yf} \right] \quad (2.72)$$

$\tilde{k}_{\phi_{wg(b)}}$ = ค่าสติฟเนสของการหมุนของหน้าตัดหารด้วยหน่วยแรง F_d ซึ่งต้องการโดยแผ่นเอว จากจุดต่อระหว่างแผ่นปีกกับแผ่นเอว สำหรับองค์อาคารรับแรงดัด

$$\tilde{k}_{\phi_{wg(b)}} = \frac{h_0 t \pi^2}{13440} \left(\frac{[45360(1 - \xi_{web}) + 62610] \left(\frac{L}{h_0}\right)^2 + 448\pi^2 + \left(\frac{h_0}{L}\right)^2 [53 + 3(1 - \xi_{web})] \pi^4}{\pi^4 + 28\pi^2 \left(\frac{L}{h_0}\right)^2 + 420 \left(\frac{L}{h_0}\right)^4} \right) \quad (2.73)$$

k_ϕ = ค่าสติฟเนสของการหมุน ซึ่งให้กำลังโดยองค์อาคารยึดรั้ง

L = ค่าน้อยสุดระหว่าง $L_{cr(b)}$ และ L_m

L_m = ระยะระหว่างจุดยึดรั้งที่ต้านทานการโก่งเดาะแบบเสียรูปในกรณีที่มีการยึดรั้งตลอดความยาวคาน ระยะ $L_m = L_{cr(b)}$

$$L_{cr(b)} = \left(\frac{4\pi^4 h_0 (1 - \mu^2)}{t^3} \left(I_{xf} (x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}} (x_{of} - h_{xf})^2 \right) + \frac{\pi^4 h_0^4}{720} \right)^{1/4} \quad (2.74)$$

ξ_{web} = อัตราการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงแบบไม่คงที่ในแผ่นเอว

$$\xi_{web} = (f_1 - f_2) / f_1 \quad (2.75)$$

h_0 = ความลึกด้านนอกสุดของแผ่นเอว

E = อีลาสติกโมดูลัสของเหล็ก

G = โมดูลัสแรงเฉือน

μ = อัตราส่วนปัวซองของเหล็ก

t = ความหนาของเหล็กฐาน

I_{xf} = โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกน x ของแผ่นปีก

x_0 = ระยะห่างตามแกน x ระหว่างจุดต่อของแผ่นปีกกับเอว ไปยังจุดศูนย์กลางถ่วงของแผ่นปีก

h_x = ระยะห่างตามแกน x ระหว่างจุดต่อของแผ่นปีก ไปยังจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของแผ่นปีก

C_{wf} = ค่าคงที่การบิดเบี้ยวของหน้าตัดของแผ่นปีก

I_{xyf} = ผลคูณโมเมนต์อินเนอร์เซียเทียบกับแกน x และแกน y ของแผ่นปีก

I_{yf} = โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกน y ของแผ่นปีก

M_1, M_2 = ค่าต่ำสุดและสูงสุดของโมเมนต์ดัดที่จุดปลาย ในช่วงความยาวที่มีการค้ำยัน
ด้านข้าง L_m

J_f = ค่าคงที่การบิดแบบ Saint-Venant ของแผ่นปีกรับแรงอัดรวมกับขอบเสริมกำลังรอบระบบแกน

f_1, f_2 = หน่วยแรงที่ปลายทั้งสองข้างของแผ่นเอว

2.2.3.3.4 กำลังต้านทานแรงเฉือน

ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยและค่าตัวคูณลด ดังนี้

Ω_v = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงเฉือน โดยวิธี ASD = 1.60

ϕ_v = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.95

กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ, V_n คำนวณได้จากสมการ

$$V_n = A_w F_v \quad (2.76)$$

โดย

V_n = กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ

A_w = พื้นที่ของแผ่นเอว = ht

F_v = หน่วยแรงเฉือนระบุ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F_v = 0.60F_y \quad \text{เมื่อ } h/t \leq \sqrt{Ek_v / F_y} \quad (2.77)$$

$$F_v = \frac{0.60\sqrt{Ek_v F_y}}{(h/t)} \quad \text{เมื่อ } \sqrt{Ek_v / F_y} < h/t \leq 1.51\sqrt{Ek_v / F_y} \quad (2.78)$$

$$F_v = \frac{\pi^2 Ek_v}{12(1-\mu^2)(h/t)^2} \quad \text{เมื่อ } h/t > 1.51\sqrt{Ek_v / F_y} \quad (2.79)$$

โดยที่

h = ความสูงของส่วนเรียบของแผ่นเอวที่วัดในระนาบของแผ่นเอว

t = ความหนาของแผ่นเอว

E = อีลาสติกโมดูลัสของเหล็ก

k_v = สัมประสิทธิ์การโก่งเดาะเนื่องจากแรงเฉือน ในกรณีแผ่นเอวไม่เสริม

กำลังใช้ 5.34

μ = อัตราส่วนปัวซองของเหล็ก

2.2.3.3.5 ผลรวมแรงดัดและแรงเฉือน

วิธี ASD

สำหรับองค์อาคารที่รับแรงกระทำทั้งโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนพร้อมกัน กำลังต้านทานแรงดัดที่ต้องการ M ต้องมีค่าไม่เกิน M_n / Ω_b และกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต้องการ V ต้องมีค่าไม่เกิน V_n / Ω_v

สำหรับองค์อาคารที่ไม่มีการเสริมกำลังที่แผ่นเอว ผลรวมของกำลังแรงดัดที่ต้องการและกำลังแรงเฉือนที่ต้องการให้คำนวณดังนี้

$$\sqrt{\left(\frac{\Omega_b M}{M_{nco}}\right)^2 + \left(\frac{\Omega_v V}{V_n}\right)^2} \leq 1.0 \quad (2.80)$$

โดยที่

Ω_b = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงดัด โดยวิธี ASD = 1.67

Ω_v = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงเฉือน โดยวิธี ASD = 1.60

V_n = กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ

M_n = กำลังต้านทานแรงดัดที่ระบุ

M_{nxo} = กำลังต้านทานแรงดัดที่ระบุรอบแกนศูนย์ถ่วง

M = กำลังต้านทานแรงดัดที่ต้องการ

V = กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต้องการ

วิธี LRFD

สำหรับองค์อาคารที่รับแรงกระทำทั้งโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนพร้อมกัน กำลังต้านทานแรงดัดที่ต้องการ \bar{M} ต้องมีค่าไม่เกิน $\phi_b M_n$ และกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต้องการ V ต้องมีค่าไม่เกิน $\phi_v V_n$

สำหรับองค์อาคารที่ไม่มีการเสริมกำลังที่แผ่นเอว ผลรวมของกำลังแรงดัดที่ต้องการ และกำลังแรงเฉือนที่ต้องการให้คำนวณดังนี้

$$\sqrt{\left(\frac{\bar{M}}{\phi_b M_{nxo}}\right)^2 + \left(\frac{\bar{V}}{\phi_v V_n}\right)^2} \leq 1.0 \quad (2.81)$$

โดยที่

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.95 สำหรับหน้าตัดซึ่งมีแผ่นปีกรับแรงอัดที่เป็นชิ้นส่วนปลายยึดหรือปลายยึดบางส่วน

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.90 สำหรับหน้าตัดซึ่งมีแผ่นปีกรับแรงอัดที่เป็นชิ้นส่วนปลายยื่น

ϕ_v = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงเฉือน โดยวิธี LRFD = 0.95

V_n = กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ

M_n = กำลังต้านทานแรงดัดที่ระบุ

M_{nxo} = กำลังต้านทานแรงดัดที่ระบุรอบแกนศูนย์ถ่วง

\bar{M} = กำลังต้านทานแรงดัดที่ต้องการหรือโมเมนต์ดัดที่ปรับค่า

\bar{V} = กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต้องการหรือแรงเฉือนที่ปรับค่าแล้ว

2.2.3.4 องค์การรับแรงแนวแกนและแรงดัด

วิธี ASD

Ω_b = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงดัด โดยวิธี ASD = 1.67

Ω_t = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงดึงโดยวิธี ASD = 1.67

กำลังที่ต้องการต้องเป็นไปตามสมการนี้

$$\frac{\Omega_b M_x}{M_{nxt}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{nyt}} + \frac{\Omega_t T}{T_n} \leq 1.0 \quad (2.82)$$

$$\frac{\Omega_b M_x}{M_{nx}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{ny}} - \frac{\Omega_t T}{T_n} \leq 1.0 \quad (2.83)$$

$$M_{nxt}, M_{nyt} = S_{ft} F_y \quad (2.84)$$

โดยที่

S_{ft} = โมดูลัสหน้าตัดอีลาสติกด้านขอบนอกสุดที่รับแรงดึงรอบแกนที่เหมาะสม สำหรับหน้าตัดที่ไม่ลดค่าเต็มที

F_y = หน่วยแรงคราก

M_x, M_y = กำลังต้านทานแรงดัดที่ต้องการแกน x และแกน y ตามลำดับ

T = กำลังรับแรงดึงที่ต้องการ

M_{nx}, M_{ny} = กำลังรับโมเมนต์ดัดที่ระบุรอบแกนศูนย์ถ่วง

วิธี LRFD

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.90 หรือ 0.95 สำหรับหน้าตัดรับแรงดัด

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.90 สำหรับคานาที่ไม่มีการค้ำยัน
ด้านข้าง

ϕ_t = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดึง โดยวิธี LRFD = 0.95

กำลังที่ต้องการต้องเป็นไปตามสมการนี้

$$\frac{\bar{M}_x}{\phi_b M_{nxt}} + \frac{\bar{M}_y}{\phi_b M_{nyt}} + \frac{\bar{T}}{\phi_t T_n} \leq 1.0 \quad (2.85)$$

$$\frac{\bar{M}_x}{\phi_b M_{nx}} + \frac{\bar{M}_y}{\phi_b M_{ny}} + \frac{\bar{T}}{\phi_t T_n} \leq 1.0 \quad (2.86)$$

$$\bar{M}_x = M_{ux}, \bar{M}_y = M_{uy} \quad (2.87)$$

$$M_{nxt}, M_{nyt} = S_{ft} F_y \quad (2.88)$$

โดยที่

S_{ft} = โมดูลัสหน้าตัดคิลาสติกด้านขอบนอกสุดที่รับแรงดึงรอบแกนที่เหมาะสม
สำหรับหน้าตัดที่ไม่ลดค่าเต็มที่

F_y = หน่วยแรงคราก

\bar{M}_x, \bar{M}_y = กำลังต้านทานแรงดัดที่ต้องการหรือโมเมนต์ดัดที่รับค่าแล้วในแกน x
และแกน y ตามลำดับ

\bar{T} = กำลังรับแรงดึงที่ต้องการ หรือแรงดึงที่รับค่า

M_{nx}, M_{ny} = กำลังรับโมเมนต์ดัดที่ระบุรอบแกนศูนย์ถ่วง

T_n = กำลังรับแรงดึงระบุ

2.2.3.5 องค์อาคารรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน

วิธี ASD

Ω_b = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงดัด โดยวิธี ASD = 1.67

Ω_c = ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับแรงอัด โดยวิธี ASD = 1.80

กำลังที่ต้องการต้องเป็นไปตามสมการนี้

$$\frac{\Omega_c P}{P_n} + \frac{\Omega_b C_{mx} M_x}{M_{nx} \alpha_x} + \frac{\Omega_b C_{my} M_y}{M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0 \quad (2.89)$$

$$\frac{\Omega_c P}{P_{no}} + \frac{\Omega_b M_x}{M_{nx}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{ny}} \leq 1.0 \quad (2.90)$$

เมื่อ $\Omega_c P / P_n \leq 0.15$ ให้คำนวณโดยสมการ

$$\frac{\Omega_c P}{P_n} + \frac{\Omega_b M_x}{M_{nx}} + \frac{\Omega_b M_y}{M_{ny}} \leq 1.0 \quad (2.91)$$

โดยที่

P = กำลังรับแรงอัดที่ต้องการ

P_n = กำลังรับแรงอัดที่ระบุ

P_{no} = กำลังรับแรงตามแนวแกนที่ระบุ โดยที่ $F_n = F_y$

M_x, M_y = กำลังรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการรอบแกนศูนย์กลางของหน้าตัดประสิทธิภาพซึ่งใช้หา กำลังรับแรงอัดที่ต้องการ

M_{nx}, M_{ny} = กำลังรับโมเมนต์ดัดที่ระบุรอบแกนศูนย์กลาง

$$\alpha_x = 1 - \frac{\Omega_c P}{P_{Ex}} > 0$$

$$\alpha_y = 1 - \frac{\Omega_c P}{P_{Ey}} > 0$$

โดยที่

$$P_{Ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}$$

$$P_{Ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2}$$

C_{mx}, C_{my} = สัมประสิทธิ์การยึดรั้ง โดยคำนวณได้จาก

สำหรับองค์อาคารรับแรงอัดในโครงสร้างแบบโครง
ซึ่งไม่มีการเคลื่อนรอยต่อ

$$C_m = 0.85$$

สำหรับองค์อาคารรับแรงอัดในโครงสร้างแบบโครง ซึ่งมีการยึดรั้งป้องกันการเคลื่อนตัวของรอยต่อ และไม่มีแรงดัดข้างมากกระทำระหว่างจุดรับแรง
ปฏิกริยาในระนาบของแรงดัด

$$C_m = 0.6 - 0.4(M_1 / M_2)$$

สำหรับองค์อาคารรับแรงอัดในโครงสร้างแบบโครง ซึ่งมีการยึดรั้งป้องกันการเคลื่อนตัวของรอยต่อ และมีแรงดัดข้างมากกระทำระหว่างจุดรับแรง
ปฏิกริยา ในระนาบของแรงดัด

กรณีที่ องค์อาคารซึ่งมีการยึดรั้งที่ปลาย $C_m = 0.85$

กรณีที่ องค์อาคารซึ่งไม่มีการยึดรั้งที่ปลาย $C_m = 1.0$

วิธี LRFD

ϕ_c = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงอัด โดยวิธี LRFD = 0.85

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.90 หรือ 0.95 สำหรับหน้าตัดรับ
แรงดัด

ϕ_b = ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงดัด โดยวิธี LRFD = 0.90 สำหรับคานที่ไม่มีการค้ำยัน
ด้านข้าง

กำลังที่ต้องการต้องเป็นไปตามสมการนี้

$$\frac{\bar{P}}{\phi_c P_n} + \frac{C_{mx} \bar{M}_x}{\phi_b M_{nx} \alpha_x} + \frac{C_{my} \bar{M}_y}{\phi_b M_{ny} \alpha_y} \leq 1.0 \quad (2.92)$$

$$\frac{\bar{P}}{\phi_c P_{no}} + \frac{\bar{M}_x}{\phi_b M_{nx}} + \frac{\bar{M}_y}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0 \quad (2.93)$$

เมื่อ $\bar{P} / \phi_c P_n \leq 0.15$ ให้คำนวณโดยสมการ

$$\frac{\bar{P}}{\phi_c P_n} + \frac{\bar{M}_x}{\phi_b M_{nx}} + \frac{\bar{M}_y}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0 \quad (2.94)$$

โดยที่

M_{nx}, M_{ny} = กำลังรับโมเมนต์ดัดที่ระบุนรอบแกนศูนย์ถ่วง

\bar{M}_x, \bar{M}_y = กำลังรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการหรือโมเมนต์ดัดที่ปรับค่า รอบแกนศูนย์ถ่วง

\bar{P} = กำลังรับแรงอัดที่ต้องการหรือแรงอัดที่ปรับค่า

P_n = กำลังรับแรงอัดที่ระบุ

P_{no} = กำลังรับแรงตามแนวแกนที่ระบุ โดยที่ $F_n = F_y$

$$\alpha_x = 1 - \frac{\bar{P}}{P_{Ex}} > 0$$

$$\alpha_y = 1 - \frac{\bar{P}}{P_{Ey}} > 0$$

โดยที่

$$P_{Ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2}$$

$$P_{Ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2}$$

2.3 การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดโดยวิธีฮิวริสติก

การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฮิวริสติกนั้น เป็นขบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด จากฐานข้อมูลที่มีจำนวนมาก การค้นหาแบบฮิวริสติก คือการลดจำนวนตัวเลือกของคำตอบ ก่อนที่จะไปสู่คำตอบจริง เพื่อลดจำนวนทางเลือกของการค้นหา ซึ่งแตกต่างกับการค้นหาข้อมูลแบบธรรมดาที่ จะต้องทำการตรวจสอบข้อมูลที่ละตัวทุกตัวจนครบ



ภาพที่ 2.7 แสดงตัวอย่างเมืองที่พนักงานขายต้องเดินทางไป

การแก้ปัญหาแบบฮิวริสติกที่มักจะถูกหยิบมาเป็นตัวอย่างในการอธิบาย คือ การเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman) ปัญหาคือ พนักงานขายต้องการเดินทางไปให้ได้ครบทุกเมือง และกลับมายังจุดเริ่มต้น โดยให้ได้ระยะทางโดยรวมสั้นที่สุด การแก้ปัญหานี้ด้วยวิธีการปกติ ก็คือ การหาเส้นทางเดินที่เป็นไปได้ทั้งหมด แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน และเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด และจากภาพที่ 2.7

จำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด เมื่อมีเมืองทั้งหมด 7 เมือง คือ $(7-1)!/2 = 360$ แบบ แต่การทำเช่นนี้จะทำได้ก็ต่อเมื่อ เมืองต่างๆ ที่จะต้องเดินทาง มีจำนวนน้อย หาก มีเมือง 100 เมือง จะมีเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4.67×10^{155} แบบ ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะหาเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาคำตอบ

ดังนั้น เมื่อเราต้องการระยะทางโดยรวมสั้นที่สุด เราก็น่าจะเลือกเมืองที่อยู่ใกล้มากที่สุดกับเมืองที่เราอยู่ในปัจจุบัน แล้วเดินทางไปเมืองนั้นก่อน เมื่อไปถึงเมืองนั้นแล้วค่อยทำในทำนองเดียวกันอีกว่า จะเดินไปยังเมืองที่ใกล้ที่สุดเมืองถัดไป ทำเช่นนี้จะจนกระทั่งเดินทางครบทุกเมือง ก็น่าจะจะได้ระยะทางโดยรวมสั้นที่สุด แม้ว่าวิธีการเช่นนี้จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคำตอบที่ได้มีแนวโน้มว่าจะดี แต่อย่างไรก็ดี คำตอบที่ได้โดยวิธีนี้อาจไม่เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดก็ได้ วิธีการเช่นนี้ก็คือการนำความรู้แบบหนึ่งมาแก้ไขปัญหา ซึ่งเรียกฮิวริสติก

ในการค้นหาแบบฮิวริสติก มีเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการค้นหา คือ ฟังก์ชันฮิวริสติก ที่ทำหน้าที่ในการวัดขนาดของความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหา เพื่อกำหนดทิศทางของกระบวนการค้นหาคำตอบให้อยู่ในทิศทางที่ได้ประโยชน์สูงสุด

2.3.1 การค้นหาแบบฮิลไคลมิง(Hill climbing)

เป็นวิธีการค้นหาข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายกับการปีนเขา การที่นักปีนเขาจะเดินทางไปถึงยอดเขา นักปีนเขาจะต้องมองหาก่อนว่ายอดเขานั้นอยู่ตรงไหนแล้วจะต้องพยายามปีนขึ้นไปให้ถึงยอดเขาให้ได้ เพื่อที่จะเดินทางไปให้ถึงยอดเขาโดยเร็วที่สุด ดังนั้นจึงต้องสังเกตว่าทิศทางใดเมื่อปีนแล้วจะยิ่งใกล้ยอดเขา และหลีกเลี่ยงทิศทางที่เมื่อไปแล้ว จะทำให้ตัวเองห่างจากยอดเขา และจะทำเช่นนั้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงยอดเขา

โดยมีการนำฟังก์ชันฮิวริสติก มาช่วยในกระบวนการค้นหา เพื่อให้ได้คำตอบอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ซึ่งค่าของฟังก์ชันฮิวริสติกนั้น บางครั้งอาจใช้ในลักษณะที่ถ้าค่าสูง แสดงว่าสถานะนั้นอยู่ใกล้โหนดเป้าหมายมาก ค่าต่ำแสดงว่าอยู่ไกล แต่บางครั้งอาจนิยามในลักษณะตรงกันข้าม คือถ้าค่าน้อยแสดงว่าอยู่ใกล้ และค่ามากแสดงว่าอยู่ไกล ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าฮิวริสติกของสถานะปัจจุบันกับสถานะใหม่ จึงควรเปรียบเทียบให้ตรงตามลักษณะของฟังก์ชัน

อย่างไรก็ดีอัลกอริทึมนี้จะมีประสิทธิภาพมาก ถ้าใช้ฟังก์ชันฮิวริสติกที่ดีมาก ๆ ในกรณีที่ฟังก์ชันฮิวริสติกไม่ดีนัก อัลกอริทึมนี้ก็อาจหลงเส้นทางได้ และอาจไม่พบคำตอบแม้ว่าตัวอย่างที่กำลังค้นหามีคำตอบอยู่ด้วยก็ตาม

อัลกอริทึม

หลักการการทำงานของการค้นหาแบบฮิลไคลมิง คือ สร้างสถานะใหม่ขึ้นมา แล้วตรวจสอบว่าสถานะใหม่ดีกว่าสถานะปัจจุบันหรือไม่ ด้วยการอาศัยฮิวริสติกฟังก์ชัน ถ้าดีกว่าให้สถานะใหม่เป็นสถานะปัจจุบัน แล้วทำการตรวจสอบต่อไป ถ้าไม่ดีกว่า ให้สร้างสถานะใหม่ขึ้นมา แล้วทำการตรวจสอบจนกว่าจะพบ สถานะที่ดีกว่าสถานะปัจจุบัน เขียนเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- 1.สร้างสถานะเริ่มเป็นสถานะปัจจุบัน

2. ตรวจสอบสถานะปัจจุบันกับสถานะเป้าหมาย ถ้าสถานะปัจจุบันนี้คือสถานะเป้าหมาย ให้แสดงคำตอบและเลิกการทำงาน แต่ถ้าสถานะเริ่มต้นไม่ได้เป็นสถานะเป้าหมายให้ทำงานตามขั้นตอนถัดไป

3. ทำงานตามขั้นตอนด้านล่าง จนพบคำตอบ หรือจนกระทั่งไม่มีตัวดำเนินการใดๆ ที่จะใช้สร้างสถานะปัจจุบัน

3.1 เลือกตัวดำเนินการที่ยังไม่ได้ใช้สร้างสถานะปัจจุบัน เพื่อเป็นสถานะใหม่ขึ้นมา แล้วทำงานต่อในขั้นตอนถัดไป

3.2 ตรวจสอบสถานะใหม่

3.2.1 ถ้าเป็นคำตอบให้แสดงคำตอบและเลิกการทำงาน

3.2.2 ถ้าไม่ใช่ แต่สถานะที่ได้ดีกว่าสถานะปัจจุบัน ให้สถานะนี้เป็นสถานะปัจจุบัน

3.2.3 ถ้าไม่ใช่ แต่สถานะที่ได้แย่กว่าสถานะปัจจุบัน ให้กลับไปทำงานตามขั้นตอน

3.1 ใหม่

4. ให้เลิกทำงานและรายการว่างงานค้นหาประสบความสำเร็จล้มเหลว

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัยและผลการวิเคราะห์งานวิจัย

3.1 หลักการวิเคราะห์สมการอย่างง่ายและผลการวิเคราะห์สมการอย่างง่าย

หลักการในการหาค่าหน้าตัดประสิทธิภาพ Effective Area ในการออกแบบของค้ำอาคารรับแรงดัด โดยการพิจารณาชิ้นส่วนของหน้าตัดแต่ละส่วน ซึ่งในงานวิจัยเลือกชิ้นงานเป็นหน้าตัด LLC ของบริษัท บลูสโคป ไลด์สาขา (ประเทศไทย) จำกัด

หน้าตัด LLC สามารถแบ่งชิ้นส่วนของหน้าตัดได้ดังนี้

1. ชิ้นส่วนปลายยึดรับแรงอัดแบบคงที่
2. แผ่นเอวหรือชิ้นส่วนปลายยึดภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่
3. ชิ้นส่วนปลายยื่นหรือแผ่นเสริมกำลังที่ขอบภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่

โดยแต่ละชิ้นส่วนจะมีค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะของแผ่น (k) ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของการยึดรั้ง และแรงที่กระทำ และจะเห็นได้ว่าชิ้นส่วนที่มีผลกับกระบวนการทำซ้ำ ในกรณีนี้คือแผ่นเอว(web) หรือ ชิ้นส่วนปลายยึดภายใต้หน่วยแรงแบบไม่คงที่เพราะเป็นส่วนสำคัญที่กำหนดตำแหน่งแกนสะเทิน(N.A.)

โดยรูปแบบหน้าตัดประสิทธิภาพที่จะคำนวณได้ของแผ่นเอว(web) แบ่งเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 เกิดเมื่อพื้นที่หน้าตัดส่วนประสิทธิภาพส่วนเอวมมากกว่า พื้นที่หน้าตัดส่วนที่รับแรงอัดส่วนเอว เรียกว่า Fully Effective Web

กรณีที่ 2 เกิดเมื่อพื้นที่หน้าตัดส่วนประสิทธิภาพส่วนเอวน้อยกว่า พื้นที่หน้าตัดส่วนที่รับแรงอัดส่วนเอว เรียกว่า Not Fully Effective Web ซึ่งในกรณีนี้ต้องปรับแก้แนวแกนสะเทิน (N.A.) ให้เหมาะสมโดยใช้ค่าผลต่างของหน้าตัดส่วนรับแรงอัดส่วนเอวและหน้าตัดประสิทธิภาพส่วนเอว ดังสมการ

$$h_{reg} = h_{bw} - (h_1 + h_2) \quad (3.1)$$

จากสมการที่(2.6),(2.11) ค่าสัมประสิทธิ์การโก่งเดาะของแผ่นเอว, k ขึ้นอยู่กับ ψ และจากการศึกษาพบว่า การทำซ้ำจะหยุดเมื่อค่า ψ มีค่างที่

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการขั้นตอนการทำซ้ำมี 3 ตัวแปรสำคัญคือ

1. ค่า ψ

2. ค่า Y_0

3. ค่า h_{neg}

โดยที่

$$\psi = |f_2 / f_1|$$

f_1 = หน่วยแรงที่แสดงในรูปที่ 2.1

f_2 = หน่วยแรงที่แสดงในรูปที่ 2.1

Y_0 = ระยะแกนสะเทินนับจากขอบด้านนอกของส่วนปีกบน

สมการที่นำมาใช้และคำนวณเพื่อจะทำการเปรียบเทียบค่าตอบระหว่างวิธีตามมาตรฐานวสท. ซึ่งมีการคำนวณซ้ำและวิธีที่ใช้สมการอย่างง่าย คือ

$$\psi' = \sqrt{\frac{b_e}{B}} \quad \text{แทนค่า } \psi \quad (3.2)$$

$$Y_0' = \frac{h_0}{1 + \psi'} \quad \text{แทนค่า } Y_0 \quad (3.3)$$

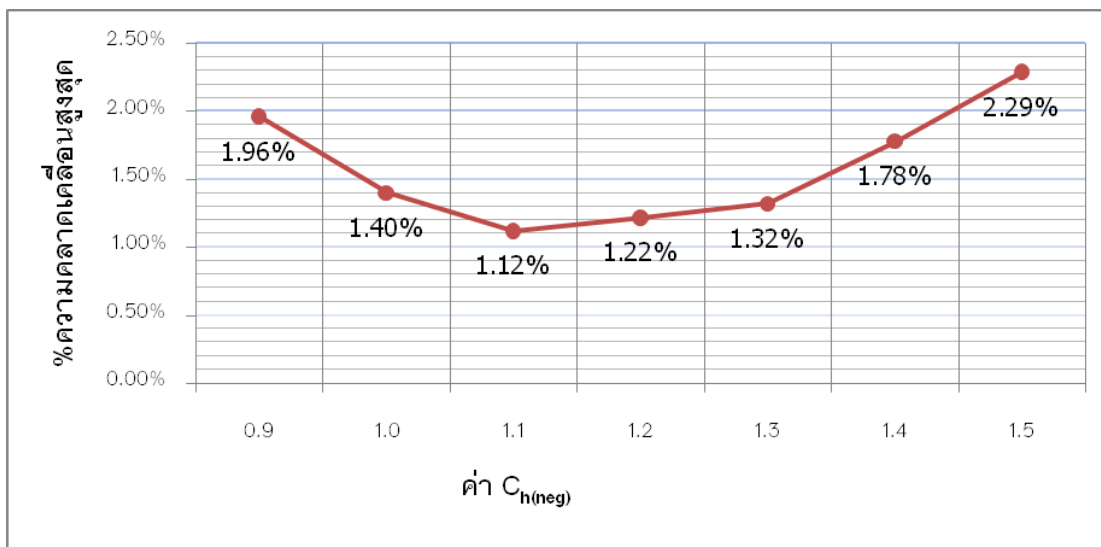
$$h'_{neg} = C_{h(neg)} \left(h_{cw} - (h_1 + h_2) \right) \quad \text{แทนค่า } h_{neg} \quad (3.4)$$

โดยที่

$C_{h(neg)}$ = ค่าคงที่เพื่อปรับแก้หน้าตัดประสิทธิภาพ

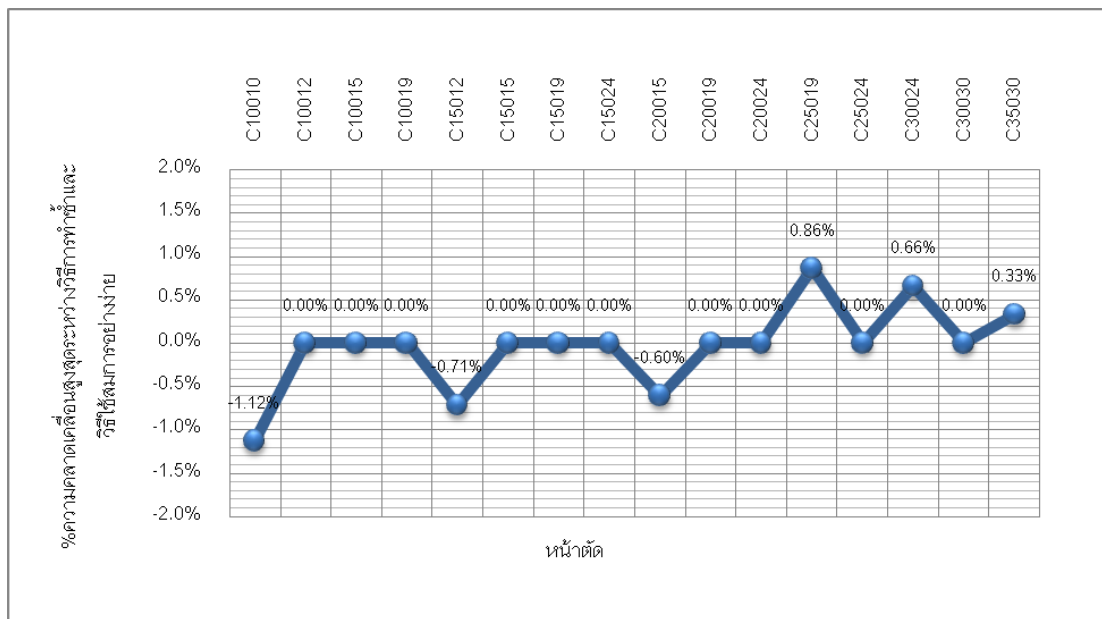
= 0 เมื่อ Fully Effective Web

= 1.10 เมื่อ Not Fully Effective Web ทั้งนี้ค่าคงที่ดังกล่าวหาได้จากการแทนค่าสมการที่ (3.2),(3.3) แล้วพิจารณา ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างการทำซ้ำและการใช้สมการอย่างง่าย ของค่า $C_{h(neg)}$ ต่างๆกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%ความคลาดเคลื่อนสูงสุดกับค่า $C_{h(neg)}$



ภาพที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%ความคลาดเคลื่อนสูงสุดกับค่า $C_{h(neg)}$

ดังนั้นเมื่อนำสมการ(3.2),(3.3),(3.4) มาใช้เพื่อลดขั้นตอนการทำซ้ำแล้วนำค่าโมดูลัสหน้าตัดอิลาสติก มาเปรียบเทียบกับทั้ง 2 วิธีดังในภาพที่ 3.2 ดังนี้ โดยจะแสดงผลของความคลาดเคลื่อนสูงสุดของหน้าตัด จากการคำนวณหน่วยแรงทั้งหมด 7 ค่า ทั้งนี้ไม่เกินหน่วยแรงที่จุดครากของหน้าตัดที่พิจารณา



ภาพที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%ความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างวิธีการทำซ้ำและวิธีใช้สมการอย่างง่ายของหน้าตัดต่างๆ

จากภาพที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า ผลจากการใช้สมการ (3.2),(3.3),(3.4) โดยการเปรียบเทียบผลโมดูลัสหน้าตัดอิลาสติก ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธีปกติที่มีการทำซ้ำ โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 1.12% และยังลดระยะเวลาในการคำนวณได้อีกด้วยทั้งนี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณค่าโมดูลัสหน้าตัดอิลาสติกของหน้าตัด C15012 ที่ หน่วยแรง 5,098 ksc. โดยวิธีความกว้างประสิทธิผลที่ต้องมีกระบวนการทำซ้ำและวิธีความกว้างประสิทธิผลที่ใช้สมการอย่างง่าย(แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.) ซึ่งพบว่า

วิธีที่1 โดยวิธีความกว้างประสิทธิผลที่ต้องมีกระบวนการทำซ้ำ ต้องทำซ้ำกัน 8 รอบจึงทำให้ได้ค่าโมดูลัสหน้าตัดที่คงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.856 cm³

วิธีที่ 2 วิธีความกว้างประสิทธิผลที่ใช้สมการอย่างง่าย สามารถคำนวณได้ใน 1 รอบ และทำให้ได้ค่าโมดูลัสหน้าตัดที่คงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.839 cm³

ทั้งสองวิธีให้ค่า Se ที่ต่างกัน 0.14% ซึ่งถือว่าน้อยมากในขณะเดียวกันวิธีที่ 2 ก็ยังสามารถคำนวณได้รวดเร็วกว่าและไม่ยุ่งยากเท่าวิธีการที่ 1 ดังนั้นจากผลการคำนวณนี้ จึงได้นำวิธีการคำนวณวิธีความกว้างประสิทธิผลที่ใช้สมการอย่างง่าย ไปทำการหาหน้าตัดเพื่อการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีอิลาสติก ต่อไป

3.2 หลักการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดและผลที่ได้จากโปรแกรม

ในการค้นหาคำตอบโดยการนำวิธีของฮิวริสติก มาประยุกต์ใช้ เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั้น สามารถแสดงหลักการทำงานของโปรแกรม ได้ดังภาพที่ 3.3

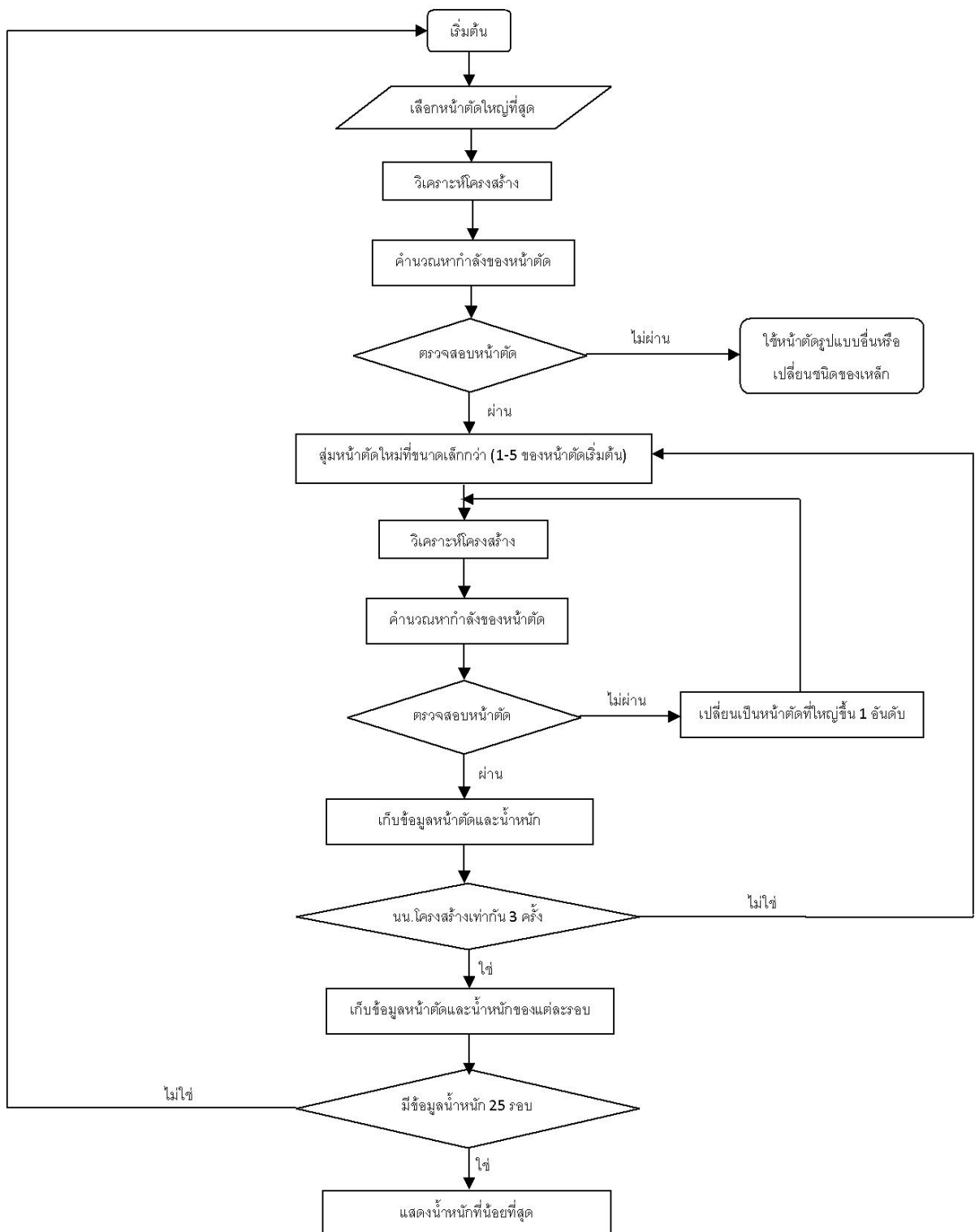
เมื่อกำหนดกลุ่มวัสดุให้กับชิ้นส่วนแล้ว และจากภาพที่ 3.3 เริ่มจากการ กำหนดขนาดหน้าตัดเริ่มต้น โดยกำหนดให้หน้าตัดเริ่มต้นนั้นมีขนาดที่ใหญ่ที่สุดมาทำการวิเคราะห์ หาแรงภายในของแต่ละชิ้นส่วน ออกมา และตรวจสอบความสามารถในการรับแรงของแต่ละชิ้นส่วน หากหน้าตัดที่ใหญ่ที่สุดไม่สามารถรับแรงที่มากกระทำได้ตามมาตรฐาน EIT ให้เลือกใช้น้ำตัดอื่นหรือเปลี่ยนชนิดวัสดุของโครงสร้าง

หากโครงสร้างสามารถรับแรงที่มากกระทำได้ ตามมาตรฐานของEIT จะทำการบันทึกข้อมูลของขนาดหน้าตัดไว้ หลังจากนั้น เริ่มทำการลดขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนลงอีกครั้งโดยการสุ่มหน้าตัดให้เล็กลง ในช่วง 1-5 หน้าตัดแล้วทำการตรวจสอบหน้ากึ่งกลางของหน้าตัดซึ่งถือว่าเป็นหน้าตัดเริ่มต้นรอบใหม่ ถ้าการตรวจสอบหน้าตัดรอบใหม่ไม่ผ่าน จะทำการเพิ่มขนาดของหน้าตัดขึ้นมาหนึ่งขนาด แต่ถ้าหากหน้าตัดเริ่มต้นในรอบใหม่ผ่านให้กลับไปขั้นตอนการสุ่มอีกครั้ง

ทุกครั้งของรอบการคำนวณจะทำการบันทึกข้อมูลหน้าตัดไว้และแสดงผลคำตอบก็ต่อเมื่อ พบคำตอบที่มีค่าน้ำหนักรวมของโครงสร้างทั้งหมดเหมือนกัน 3 รอบหลังจากนั้นจะแสดงผลที่ได้ ที่มีค่าน้อยที่สุดออกมาหนึ่งครั้ง

จากนั้นทำใหม่ตามขั้นตอนข้างต้นอีก จนครบ 25 ครั้ง และแสดงผลของคำตอบที่น้อยที่สุดที่ได้ จากการวิเคราะห์หาในจำนวน 25 ครั้ง ถือเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

จากภาพที่ 3.3 อธิบายหลักการการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด โดยฟังก์ชันฮิวริสติกในที่นี้คือ ฟังก์ชันในการตรวจสอบกึ่งกลางของหน้าตัดถ้าหากตรวจสอบหน้าตัดไม่ผ่าน นั้นแสดงว่าหน้าตัดนี้ยังไม่ใช่คำตอบและเลือกหน้าตัดที่ใหญ่ขึ้นในการคำนวณต่อไป เหมือนกับการเลือกเมืองต่อไปที่น่าจะใกล้กว่า เป็นหน้าตัดเริ่มต้นในการตรวจสอบอีกครั้ง หรือถ้าการตรวจสอบหน้าตัดผ่าน ก็แสดงว่าหน้าตัดนั้นเป็นคำตอบหนึ่งของการออกแบบ แต่อาจจะยังไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด จำเป็นต้องทำการสุ่มใช้น้ำตัดเล็กและตรวจสอบกึ่งกลางของหน้าตัดอีกครั้ง ทั้งนี้ ทำยที่สุดแล้วกำหนดให้แสดงน้ำหนักเท่ากัน 3 รอบที่เกิดจากการเลือกหน้าตัดใหม่



ภาพที่ 3.3 แสดงผังการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด

โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณออกแบบ, แสดงผลการตรวจสอบหน้าตัดกับโปรแกรม SAP2000 V15 ซึ่งตัวอย่างนี้นำมาจากคู่มือการออกแบบโครงสร้างโรงงานสำเร็จรูป (Steel Truss Design Handbook) ของบริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

โครงหลังคาเมืองค้ออาคาร 81 ชั้นส่วน มีลักษณะดังภาพที่ 3.4 การเชื่อมต่อระหว่างชั้นส่วนทุกจุดภายในแบบข้อหมุน โครงภายนอกเป็นเป็นโครงข้อแข็ง มีฐานรองรับเป็นแบบที่ฐานรองรับชนิดหมุน (hinged support) โดยมีข้อมูลของแรงกระทำกับโครงสร้างดังนี้

น้ำหนักบรรทุกคงที่

งานต่อระบบน้ำ เครื่องกล ไฟฟ้า	10 kg/m ²
Metal Sheet	5 kg/m ²
แปเหล็ก	8 kg/m ²
	<u>23</u> kg/m ²
โครงสร้างเหล็กตามขนาดจริงที่ใช้	
น้ำหนักบรรทุกจร	30 kg/m ²
แรงลม	25 kg/m ²

ออกแบบภายใต้ข้อกำหนด ASD

Combination Load case

$$\begin{aligned} \text{Load case 1 : 1DL+1LL} &= 23+30 \\ &= 53 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Load case 2 : 0.75(DL+LL+WL)} &= 0.75(23+30+25) \\ &= 58.50 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Load case 3 : 0.75(DL +WL)} &= 0.75(23+25) \\ &= 36 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Use Load case 2 for span 6.0m m. : } W &= 58.5 \times 6 \\ &= 351 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

โดยแบ่งกลุ่มของโครงสร้างเป็นที่ใช้หน้าตัดเดียวกันเป็น 3 กลุ่ม

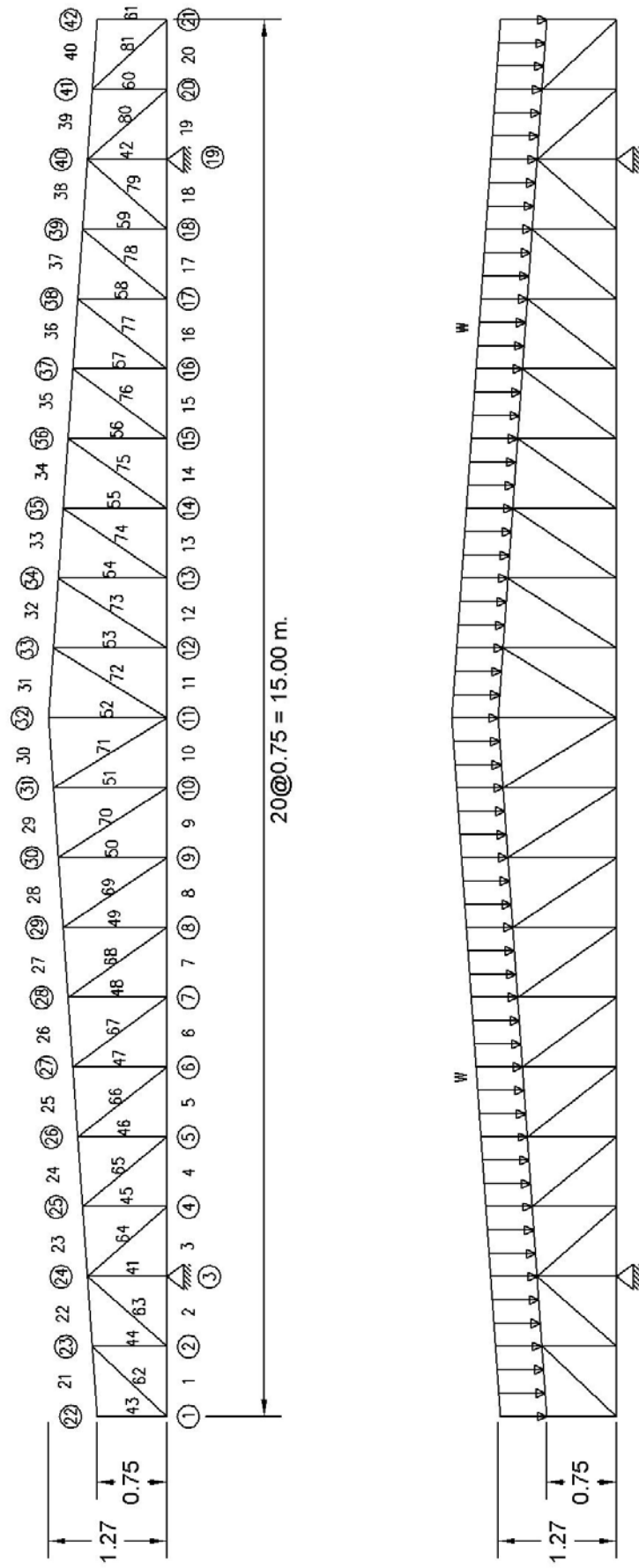
กลุ่มที่ 1 ชั้นส่วนที่ 1-42

กลุ่มที่ 2 ชั้นส่วนที่ 43-61

กลุ่มที่ 3 ชั้นส่วนที่ 62-81

ทุกกลุ่มใช้เหล็ก Cold Formed Steel [10] ที่มีคุณสมบัติดังนี้

No.	size	Fy	E	G	weight	area	depth	width	lip	thickness	r	Ix	Iy
		ksc	ksc	ksc	kg/m	Ag	H1	B1	D1	t			
						cm ²	cm	cm	cm	cm			
1	C10010	5608	2074057	794469	1.78	2.16	10.2	5.10	1.25	0.10	0.50	36.40	7.55
2	C10012	5098	2074057	794469	2.1	2.58	10.2	5.10	1.25	0.12	0.50	43.20	8.92
3	C10015	4589	2074057	794469	2.62	3.23	10.2	5.10	1.35	0.15	0.50	53.70	11.20
4	C10019	4589	2074057	794469	3.29	4.09	10	5.10	1.45	0.19	0.50	67.30	14.20
5	C15012	5098	2074057	794469	2.89	3.54	15	6.40	1.45	0.12	0.50	129	18.80
6	C15015	4589	2074057	794469	3.59	4.43	15	6.40	1.55	0.15	0.50	161	23.70
7	C15019	4589	2074057	794469	4.51	5.61	15	6.40	1.65	0.19	0.50	202	30.00
8	C15024	4589	2074057	794469	5.7	7.12	15	6.40	1.85	0.24	0.50	254	38.60
9	C20015	4589	2074057	794469	4.49	5.55	20	7.60	1.55	0.15	0.50	353	39.60
10	C20019	4589	2074057	794469	5.74	7.13	20	7.60	1.90	0.19	0.50	451	53.10
11	C20024	4589	2074057	794469	7.24	9.04	20	7.60	2.10	0.24	0.50	569	68.10
12	C25019	4589	2074057	794469	6.5	8.08	25	7.60	1.85	0.19	0.50	762	56.10
13	C25024	4589	2074057	794469	8.16	10.20	25	7.60	2.05	0.24	0.50	962	72.10
14	C30024	4589	2074057	794469	10.09	12.60	30	9.60	2.75	0.24	0.50	1700	151
15	C30030	4589	2074057	794469	12.76	16.00	30	9.60	3.15	0.30	0.50	2130	196
16	C35030	4589	2074057	794469	15.23	19.10	35	12.50	3.00	0.30	0.50	3580	382



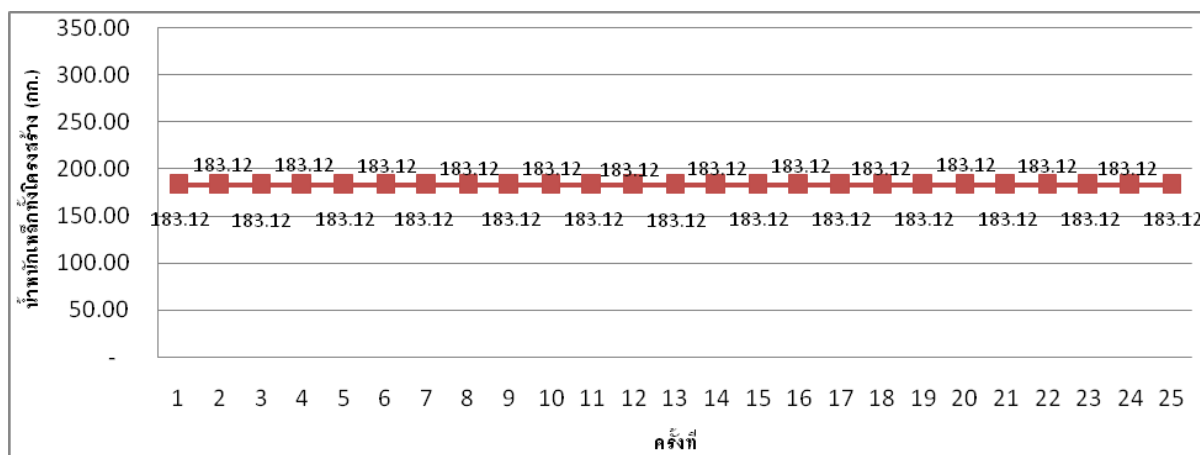
ภาพที่ 3.4 โครงหลังคาแสดง Node, Element และแรงที่

ผลที่ได้จากการออกแบบพบว่า หน้าตัดที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มที่ 1 คือ หน้าตัด 4 : C10019
 กลุ่มที่ 2 คือ หน้าตัด 1 : C10010 กลุ่มที่ 3 คือ หน้าตัด 1 : C10010 ซึ่งมีน้ำหนักรวม 183.12 กก. โดยได้
 แสดงตารางสรุปผลการเลือกหน้าตัดด้วยวิธีฮิวริสติกทั้ง 25 ครั้งในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการเลือกขนาดหน้าตัดด้วยวิธีฮิวริสติก

ครั้งที่	หน้าตัด	จำนวนรอบ	น้ำหนักเหล็กทั้งโครงสร้าง (กก.)
1	4,1,1	12	183.12
2	4,1,1	15	183.12
3	4,1,1	18	183.12
4	4,1,1	14	183.12
5	4,1,1	18	183.12
6	4,1,1	15	183.12
7	4,1,1	17	183.12
8	4,1,1	14	183.12
9	4,1,1	12	183.12
10	4,1,1	15	183.12
11	4,1,1	18	183.12
12	4,1,1	14	183.12
13	4,1,1	18	183.12
14	4,1,1	15	183.12
15	4,1,1	17	183.12
16	4,1,1	12	183.12
17	4,1,1	12	183.12
18	4,1,1	15	183.12
19	4,1,1	18	183.12
20	4,1,1	14	183.12
21	4,1,1	18	183.12
22	4,1,1	15	183.12
23	4,1,1	12	183.12
24	4,1,1	15	183.12
25	4,1,1	12	183.12

และได้แสดงแผนภูมิน้ำหนักของโครงสร้างที่เหมาะสมในแต่ละครั้งของการคำนวณในภาพที่ 3.5

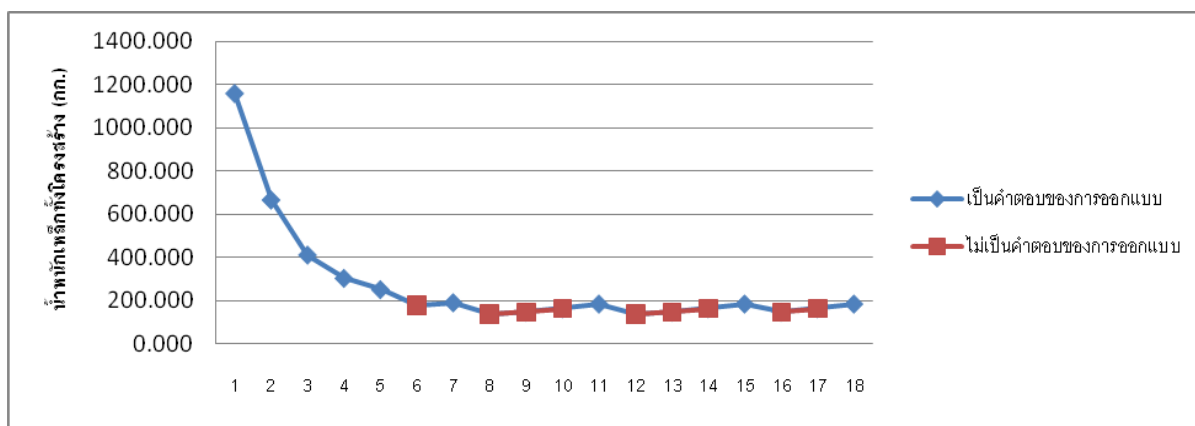


ภาพที่ 3.5 แผนภูมิน้ำหนักของโครงสร้างที่เหมาะสมในแต่ละครั้งของการคำนวณ

พร้อมทั้งยกตัวอย่างผลการคำนวณโดยแสดงน้ำหนักโครงสร้างแต่ละรอบของครั้งที่ 3 ในตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.6

ตารางที่ 3.2 ตารางผลการคำนวณโดยแสดงน้ำหนักโครงสร้างแต่ละรอบของครั้งที่ 3

จำนวนรอบ	น้ำหนักเหล็กทั้งโครงสร้าง (กก.)
1	1156.712
2	664.184
3	409.664
4	301.864
5	249.874
6	178.019
7	189.281
8	135.190
9	145.348
10	161.855
11	183.124
12	135.190
13	145.348
14	161.855
15	183.124
16	145.348
17	161.855
18	183.124



ภาพที่ 3.6 แผนภูมิแสดงน้ำหนักของโครงสร้างแต่ละรอบของครั้งที่ 5 ในการคำนวณ

จากผลข้างต้นเห็นได้ว่าหน้าตัดที่เหมาะสมที่สุดคือหน้าตัด ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อตรวจสอบว่าการออกแบบถูกต้องและมีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการเปรียบเทียบกับโปรแกรมออกแบบโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเป็น SAP2000 โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุให้เหมือนกัน สรุปผลการวิเคราะห์และออกแบบได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการวิเคราะห์หาแรงภายในของโปรแกรมที่ใช้เปรียบเทียบกับ Sap2000

Frame	From SAP2000			From Program			Different Force (%)		
	MaxABS(P)	MaxABS(V)	MaxABS(M)	Axial Force	V2	M3	Axial Force	V2	M3
1	145.12	31.05	20.92	145.10	31.06	20.91	0.0%	0.0%	0.0%
2	339.76	100.09	53.46	339.90	100.03	53.42	0.0%	0.1%	0.1%
3	3460.41	133.46	86.45	3460.76	133.35	86.37	0.0%	0.1%	0.1%
4	1989.49	12.55	12.94	1989.53	12.58	12.96	0.0%	-0.2%	-0.1%
5	653.66	9.92	10.97	653.65	9.92	10.96	0.0%	0.0%	0.0%
6	307.98	2.22	11.95	308.03	2.22	11.93	0.0%	0.1%	0.1%
7	994.92	2.58	13.19	994.99	2.58	13.18	0.0%	-0.2%	0.1%
8	1434.95	1.53	13.65	1435.03	1.53	13.65	0.0%	-0.1%	0.0%
9	1664.43	1.33	13.97	1664.52	1.33	13.99	0.0%	0.2%	-0.1%
10	1701.28	8.55	13.95	1701.37	8.52	13.93	0.0%	0.3%	0.1%
11	1701.28	8.55	13.95	1701.37	8.52	13.93	0.0%	0.3%	0.1%
12	1664.43	1.33	13.97	1664.52	1.33	13.99	0.0%	0.2%	-0.1%
13	1434.95	1.53	13.65	1435.03	1.53	13.65	0.0%	-0.1%	0.0%
14	994.92	2.58	13.19	994.99	2.58	13.18	0.0%	-0.2%	0.1%
15	307.98	2.22	11.95	308.03	2.22	11.93	0.0%	0.1%	0.1%
16	653.66	9.92	10.97	653.65	9.92	10.96	0.0%	0.0%	0.0%

Frame	From SAP2000			From Program			Different Force (%)		
	MaxABS(P)	MaxABS(V)	MaxABS(M)	Axial Force	V2	M3	Axial Force	V2	M3
17	1989.49	12.55	12.94	1989.53	12.58	12.96	0.0%	-0.2%	-0.1%
18	3460.41	133.46	86.45	3460.76	133.35	86.37	0.0%	0.1%	0.1%
19	339.76	100.09	53.46	339.90	100.03	53.42	0.0%	0.1%	0.1%
20	145.12	31.05	20.92	145.10	31.06	20.91	0.0%	0.0%	0.0%
21	18.64	133.52	19.11	18.66	133.53	19.09	-0.1%	0.0%	0.1%
22	159.84	207.18	62.28	159.81	207.07	62.21	0.0%	0.1%	0.1%
23	1238.16	271.01	102.12	1238.19	270.80	101.99	0.0%	0.1%	0.1%
24	2566.29	151.32	19.82	2566.39	151.30	20.31	0.0%	0.0%	-2.4%
25	3532.16	141.31	16.06	3532.29	141.30	16.16	0.0%	0.0%	-0.6%
26	4220.24	134.09	19.93	4220.39	134.09	19.92	0.0%	0.0%	0.0%
27	4661.36	134.5	21.24	4661.53	134.50	21.24	0.0%	0.0%	0.0%
28	4891.15	134.05	21.41	4891.32	134.05	21.40	0.0%	0.0%	0.0%
29	4928.8	141.29	24.13	4928.98	141.28	24.22	0.0%	0.0%	-0.4%
30	4828.19	164.29	21.37	4828.33	164.24	21.34	0.0%	0.0%	0.1%
31	4828.19	164.29	21.37	4828.33	164.24	21.34	0.0%	0.0%	0.1%
32	4928.8	141.29	24.13	4928.98	141.28	24.22	0.0%	0.0%	-0.4%
33	4891.15	134.05	21.41	4891.32	134.05	21.40	0.0%	0.0%	0.0%
34	4661.36	134.5	21.24	4661.53	134.50	21.24	0.0%	0.0%	0.0%
35	4220.24	134.09	19.93	4220.39	134.09	19.92	0.0%	0.0%	0.0%
36	3532.16	141.31	16.06	3532.29	141.30	16.16	0.0%	0.0%	-0.6%
37	2566.29	151.32	19.82	2566.39	151.30	20.31	0.0%	0.0%	-2.4%
38	1238.16	271.01	102.12	1238.19	270.80	101.99	0.0%	0.1%	0.1%
39	159.84	207.18	62.28	159.81	207.07	62.21	0.0%	0.1%	0.1%
40	18.64	133.52	19.11	18.66	133.53	19.09	-0.1%	0.0%	0.1%
41	2473.87	85.29	39.84	2474.10	85.16	39.78	0.0%	0.2%	0.2%
42	2473.87	85.29	39.84	2474.10	85.16	39.78	0.0%	0.2%	0.2%
43	133.56	9.5	5.44	133.55	9.52	5.45	0.0%	-0.2%	-0.2%
44	348.31	7.395E-17	1.483E-17	348.44	0.00	0.00	0.0%	-	-
45	1816.43	0	0	1816.72	0.00	0.00	0.0%	-	-
46	1590.43	2.958E-16	7.084E-17	1590.45	0.00	0.00	0.0%	-	-
47	1233.39	0	0	1233.43	0.00	0.00	0.0%	-	-
48	922.02	0	0	922.05	0.00	0.00	0.0%	-	-
49	621.42	0	0	621.44	0.00	0.00	0.0%	-	-
50	338.31	5.916E-16	1.724E-16	338.32	0.00	0.00	0.0%	-	-
51	62.53	0	0	62.52	0.00	0.00	0.0%	-	-
52	337.56	0	0	337.70	0.00	0.00	0.0%	-	-
53	62.53	0	0	62.52	0.00	0.00	0.0%	-	-

Frame	From SAP2000			From Program			Different Force (%)		
	MaxABS(P)	MaxABS(V)	MaxABS(M)	Axial Force	V2	M3	Axial Force	V2	M3
54	338.31	0	0	338.32	0.00	0.00	0.0%	-	-
55	621.42	0	0	621.44	0.00	0.00	0.0%	-	-
56	922.02	0	0	922.05	0.00	0.00	0.0%	-	-
57	1233.39	0	0	1233.43	0.00	0.00	0.0%	-	-
58	1590.43	0	0	1590.45	0.00	0.00	0.0%	-	-
59	1816.43	0	0	1816.72	0.00	0.00	0.0%	-	-
60	348.31	0	0	348.44	0.00	0.00	0.0%	-	-
61	133.56	9.5	5.44	133.55	9.52	5.45	0.0%	-0.2%	-0.2%
62	226.91	0.5	0.14	226.91	0.50	0.14	0.0%	-0.1%	1.9%
63	295.53	0.5	0.14	295.77	0.50	0.14	-0.1%	-0.1%	-1.6%
64	2229.65	0.5	0.14	2230.14	0.50	0.14	0.0%	-0.1%	-1.6%
65	2095.46	0.5	0.15	2095.53	0.50	0.15	0.0%	-0.1%	1.9%
66	1560.64	0.5	0.15	1560.69	0.50	0.15	0.0%	-0.1%	-1.5%
67	1152.91	0.5	0.16	1152.95	0.50	0.16	0.0%	-0.1%	1.6%
68	763.51	0.5	0.16	763.53	0.50	0.16	0.0%	-0.1%	-1.7%
69	411.65	0.5	0.17	411.66	0.50	0.17	0.0%	-0.1%	1.1%
70	68.88	0.5	0.17	68.90	0.50	0.17	0.0%	-0.1%	-2.0%
71	186.88	0.5	0.18	186.98	0.50	0.18	-0.1%	-0.1%	0.5%
72	186.88	0.5	0.18	186.98	0.50	0.18	-0.1%	-0.1%	0.5%
73	68.88	0.5	0.17	68.90	0.50	0.17	0.0%	-0.1%	-2.0%
74	411.65	0.5	0.17	411.66	0.50	0.17	0.0%	-0.1%	1.1%
75	763.51	0.5	0.16	763.53	0.50	0.16	0.0%	-0.1%	-1.7%
76	1152.91	0.5	0.16	1152.95	0.50	0.16	0.0%	-0.1%	1.6%
77	1560.64	0.5	0.15	1560.69	0.50	0.15	0.0%	-0.1%	-1.5%
78	2095.46	0.5	0.15	2095.53	0.50	0.15	0.0%	-0.1%	1.9%
79	2229.65	0.5	0.14	2230.14	0.50	0.14	0.0%	-0.1%	-1.6%
80	295.53	0.5	0.14	295.77	0.50	0.14	-0.1%	-0.1%	-1.6%
81	226.91	0.5	0.14	226.91	0.50	0.14	0.0%	-0.1%	1.9%

และตรวจสอบผลการตรวจสอบหน้าตัดและดูประสิทธิภาพการนำโปรแกรมมาใช้จากอัตราส่วน

ความปลอดภัยดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราส่วนในกรรับกำลังแต่ละชิ้นส่วนของโปรแกรมและ SAP2000

Group	Frame	Section	AISI-ASD96	AISI2007 with simplified eq.	AISI-ASD96	AISI2007 with simplified eq.
			TotalRatio	TotalRatio	Max TotalRatio	Max TotalRatio
1	1	C10019	0.100	0.090	0.916	0.869
	2	C10019	0.252	0.224		
	3	C10019	0.813	0.831		
	4	C10019	0.379	0.360		
	5	C10019	0.151	0.139		
	6	C10019	0.060	0.060		
	7	C10019	0.124	0.124		
	8	C10019	0.165	0.165		
	9	C10019	0.186	0.186		
	10	C10019	0.189	0.189		
	11	C10019	0.189	0.189		
	12	C10019	0.186	0.186		
	13	C10019	0.165	0.165		
	14	C10019	0.124	0.124		
	15	C10019	0.06	0.060		
	16	C10019	0.151	0.139		
	17	C10019	0.379	0.360		
	18	C10019	0.813	0.831		
	19	C10019	0.252	0.224		
	20	C10019	0.100	0.090		
	21	C10019	0.071	0.076		
	22	C10019	0.212	0.211		
	23	C10019	0.550	0.524		
	24	C10019	0.498	0.476		
	25	C10019	0.651	0.618		
	26	C10019	0.781	0.741		
	27	C10019	0.861	0.816		
	28	C10019	0.900	0.853		
	29	C10019	0.916	0.869		
	30	C10019	0.888	0.84		
	31	C10019	0.888	0.843		
	32	C10019	0.916	0.869		
	33	C10019	0.900	0.853		
	34	C10019	0.861	0.816		
	35	C10019	0.781	0.7413		

Group	Frame	Section	AISI-ASD96	AISI2007 with simplified eq.	AISI-ASD96	AISI2007 with simplified eq.
			TotalRatio	TotalRatio	Max TotalRatio	Max TotalRatio of
1	36	C10019	0.651	0.618		
	37	C10019	0.498	0.476		
	38	C10019	0.550	0.524		
	39	C10019	0.212	0.211		
	40	C10019	0.071	0.076		
	41	C10019	0.513	0.524		
	42	C10019	0.513	0.524		
2	43	C10010	0.098	0.093	0.861	0.744
	44	C10010	0.154	0.1428		
	45	C10010	0.861	0.744		
	46	C10010	0.781	0.651		
	47	C10010	0.629	0.505		
	48	C10010	0.489	0.377		
	49	C10010	0.343	0.254		
	50	C10010	0.195	0.138		
	51	C10010	0.037	0.025		
	52	C10010	0.046	0.046		
	53	C10010	0.037	0.025		
	54	C10010	0.195	0.138		
	55	C10010	0.343	0.254		
	56	C10010	0.489	0.377		
	57	C10010	0.629	0.505		
58	C10010	0.781	0.651			
59	C10010	0.861	0.744			
60	C10010	0.154	0.142			
61	C10010	0.098	0.093			
3	62	C10010	0.031	0.031	0.308	0.308
	63	C10010	0.041	0.041		
	64	C10010	0.308	0.308		
	65	C10010	0.290	0.289		
	66	C10010	0.216	0.215		
	67	C10010	0.159	0.159		
	68	C10010	0.106	0.105		
	69	C10010	0.057	0.057		
	70	C10010	0.010	0.010		
	71	C10010	0.141	0.077		

Group	Frame	Section	AISI-ASD96	AISI2007 with simplified eq.	AISI-ASD96	AISI2007 with simplified eq.
			TotalRatio	TotalRatio	Max TotalRatio	Max TotalRatio of
3	72	C10010	0.141	0.077		
	73	C10010	0.010	0.010		
	74	C10010	0.057	0.057		
	75	C10010	0.106	0.106		
	76	C10010	0.160	0.160		
	77	C10010	0.216	0.216		
	78	C10010	0.290	0.290		
	79	C10010	0.308	0.308		
	80	C10010	0.041	0.041		
	81	C10010	0.032	0.032		

และเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 3.6 จะพบว่าการทำงานด้วยวิธีฮิวริสติกนั้น จะเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ในแต่ละครั้งของการคำนวณ ดังนั้น จากข้อมูลทีกล่าวมาข้างต้น ทำให้สรุปได้ว่า การหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก มีแนวโน้มว่าสามารถช่วยในการค้นหาหน้าตัดอย่างเหมาะสมให้กับโครงสร้าง และน่าจะช่วยทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบาและยังช่วยประหยัดค่าวัสดุได้อีกด้วย

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคำถามการหาสมการอย่างเพื่อช่วยลดความยุ่งยากในขั้นตอนการทำซ้ำเมื่อขึ้นส่วนของโครงสร้างรับแรงค้ำ พร้อมทั้งได้นำสมการที่ได้ไปใช้หาเหล็กขึ้นรูปเย้นที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีอีวิริสติกทั้งนี้ยังอยู่บนพื้นฐานของการออกแบบด้วยการคำนวณหาความกว้างประสิทธิภาพ ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยสามารถแบ่งสรุปได้เป็น ดังนี้

4.1 สรุปผลการหาสมการอย่างง่าย

ผลที่ได้จากการใช้สมการที่ (3.2)-(3.4)

$$\psi' = \sqrt{\frac{b_e}{B}} \quad \text{แทนค่า } \psi$$

$$Y_0' = \frac{h_0}{1 + \psi'} \quad \text{แทนค่า } Y_0$$

$$h'_{neg} = C_{h(neg)} (h_{cw} - (h_1 + h_2)) \quad \text{แทนค่า } h_{neg}$$

โดยที่

$$C_{h(neg)} = \text{ค่าคงที่เพื่อปรับแก้หน้าตัดประสิทธิภาพ}$$

$$= 0 \quad \text{เมื่อ Fully Effective Web}$$

$$= 1.10 \quad \text{เมื่อ Not Fully Effective Web}$$

โดยใช้หน้าตัดรูป LLC ของบริษัทลูสโคป โไลสาขา (ประเทศไทย) จำกัด ทั้งหมด 16 หน้าตัดมาคำนวณหาหน้าตัดโมดูลัสสี่เหลี่ยมที่หน่วยแรงต่างๆกันและสูงที่สุดที่หน่วยแรงที่จุดคราก พบว่าให้ค่าหน้าตัดโมดูลัสสี่เหลี่ยมใกล้เคียงกับการออกแบบโดยวิธีตามมาตรฐานการออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย้น ของ

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย โดยมีค่าต่างกันสูงสุด 1,12% ของค่าหน้าตัดโมดูลัสสถิตที่คำนวณด้วยสมการอย่างง่าย อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณได้มาก ยกตัวอย่างหน้าตัด C15012 ที่หน่วยแรงเท่ากับ 5098 ksc. ต้องการการคำนวณซ้ำถึง 8 ครั้งด้วยวิธีปกติ แต่ให้ค่าหน้าตัดโมดูลัสสถิตที่ต่างไปเพียง 0.14% ของการคำนวณด้วยสมการอย่างง่าย จึงถือได้ว่าสมการดังกล่าวมีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้ออกแบบโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นต่อไป

4.2 สรุปผลการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยวิธีความกว้างประสิทธิผลและวิธีวิริสติก.

การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาโครงหลังคาที่นำรูปแบบมาจาก คู่มือการออกแบบโครงสร้างโรงงานสำเร็จรูป (Steel Truss Design Handbook) ของบริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด โดยการเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนทุกจุดภายในเป็นแบบข้อหมุน โครงภายนอกเป็นเป็นโครงข้อแข็ง ออกแบบด้วยวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD) โดยผลที่ได้จากการศึกษารูปแบบการลู่เข้าของค้ำตอพบว่าการลู่เข้าหาค้ำตอในแต่ละรอบการคำนวณจะให้ค้ำตอที่ดีขึ้นทุกๆ รอบการคำนวณ และเข้าใกล้ค้ำตอมากขึ้น และการหาค้ำตอด้วยวิธีวิริสติก มีแนวโน้มว่าสามารถช่วยในการค้นหาหน้าตัดอย่างเหมาะสมให้กับโครงสร้าง และน่าจะช่วยทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบาและยังช่วยลดค่าวัสดุได้อีกด้วย

4.3 ข้อเสนอแนะ

4.3.1 งานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาในใช้อัลกอริทึมที่ตามหลักการของฮิลโคลมิงกับโครงสร้างเหล็กขึ้นรูปเย็น โดยให้ผลการออกแบบไปในทิศทางที่ดีกว่าคือมีแนวโน้มให้ค้ำตอที่ดีขึ้นทุกๆ รอบของการคำนวณ

4.3.2 งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาไปยังใช้กับโครงสร้างรูปแบบอื่นๆได้อีกหลายรูปแบบ และเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับโครงสร้างที่มีชิ้นส่วนรับแรงดัด

รายการอ้างอิง

- [1] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. การออกแบบเหล็กขึ้นรูปเย็น. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร, 2553.
- [2] Wei-Wen Yu. Cold-Formed Steel Design. Third Edition, 2000.
- [3] B.W. Schafer and S. Ádány. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM conventional and constrained finite strip methods. 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures On October 26-27 2006, Orlando, Florida.
- [4] Wei Lu. Optimum Design Of Cold-Formed Steel Purlins Using Genetic Algorithms.
- [5] Jaehong Lee, Sun-Myung Kim, Hyo-Seon Park, Byung-Hun Woo, Optimum design of cold-formed steel channel beams using micro Genetic Algorithm, Engineering Structures 27 (2005) :17–24.
- [6] Jaehong Lee, Sun-Myung Kim, Hyo-Seon Park, Optimum design of cold-formed steel columns by using micro genetic algorithms, Thin-Walled Structures 44 (2006): 952–960.
- [7] สุนิสา ทองศรี. การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงถักเหล็กในระนาบโดยวิธีฮิวริสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [8] American Iron and Steel Institute. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2007.
- [9] American Iron and Steel Institute. Cold-Formed Steel Design Manual, 2008.
- [10] บริษัทบลูสโคปไอสตาจท์ (ประเทศไทย) จำกัด. คู่มือผลิตภัณฑ์แป้นไอสตาจท์ตัว C และ Z สำหรับโครงสร้างคร่าเหล็ก.[ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: http://www.bluescopesteelasia.com/BlueScopeSteel/country/thailand/lysaght/th/tools_resources.cfm?nID=5F4A4122-4BBE-4E81-AEA5-76A6AD7E9229&ID=881&var=brochure [มกราคม, 2554].
- [11] ระพินทร์ โพธิ์ศรี. สถิติเพื่อการวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างรายการคำนวณหน้าตัดโมดูลัสพลาสติก

พิจารณาหน้าตัด C15012 ที่ หน่วยแรง 5,098 ksc โดยวิธีความกว้างประสิทธิผลที่ต้องมีกระบวนการทำซ้ำและวิธีความกว้างประสิทธิผลที่ใช้สมการอย่างง่าย

- รายการคำนวณการหาหน้าตัดโมดูลัสพลาสติกโดยวิธีความกว้างประสิทธิผล

section	H	B	D	t	d	R	Fy
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	ksc
C15012	15.2	6.4	1.45	0.12	0.83	0.5	5098
	E	A	rx	ry	x0	J	Cw
	ksc	cm ²	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁶
	2074057	3.54	6.04	2.30	-4.87	0.02	901.3
	lx	ly	f				
	cm ⁴	cm ⁴	ksc				
	129	18.8	5098				

1 iteration

- compression flange

$$w = b - 2(r + t)$$

$$= 5.160 \quad \text{cm}$$

$$w/t = 43.000 \quad \text{ok}$$

$$S = 25.818 \quad \text{check case 2}$$

case 2

$$I_a = 0.041 \quad \text{cm}^4$$

$$A_s = 0.014 \quad \text{cm}^2$$

$$n = 0.333$$

$$R_1 = 0.140 \quad \text{use } 0.140$$

$$R_2 = 1.860$$

$$k = 2.205 \quad \text{use } 2.205$$

$$I_s = 0.006 \quad \text{cm}^4$$

$$\lambda = 1.510$$

$$\rho = 0.566 \quad \text{use } 0.566$$

	b_eff	=	2.919	cm	
b.	stiifener lip				
	d/t	=	6.917		
	f1	=	4682.111	ksc	
	f2	=	4125.355	ksc	
	phi	=	0.881		
	k	=	0.473		
	lamda	=	0.502		
	rho	=	1.000	use	1
	ds'	=	0.830	cm	
	As'	=	0.100	cm ²	
	ds	=	0.116	cm	
c.	web				
	Yo	=	7.600	cm	
	check T-C?	=	T-C		
	H/B	=	2.375		
	h	=	13.960	cm	
	h/t	=	116.333		
	f1	=	4682.111	ksc	
	f2	=	-4682.111	ksc	
	phi	=	1.000		
	k	=	24.000		
	lamda	=	1.187		
	rho	=	0.686	use	0.686
	he	=	9.582	cm	
	h1	=	2.396	cm	
	h2	=	4.791	cm	
	check effective web				
	h1+h2	=	7.187	cm.	check fully effective web

$$hcw = 6.980 \text{ cm}$$

d. recompute properties by parts

$$h(\text{neg}) = 0.000 \text{ cm}$$

$$y \text{ distance} = 3.016 \text{ cm}$$

Element	L	Y from top fiber	Ly	Ly ²	I'x
Top flange	2.919	0.060	0.175	0.011	0.004
Bottom flange	5.160	15.140	78.122	1,182.773	0.006
web	13.960	7.600	106.096	806.330	226.712
Negative web element	-	3.016	-	-	-
top inside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom inside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top outside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom outside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top lip	0.116	0.678	0.079	0.054	0.000
bottom lip	0.830	14.165	11.757	166.537	0.048
sum	26.503		222.966	2,548.249	226.874

average of y

$$y = 8.413 \text{ cm in below top fiber}$$

$$Ix = 107.924 \text{ cm}^4$$

$$Se(1) = 12.829 \text{ cm}^3 \quad \text{Go to next iteration}$$

2 iteration

a. compression flange

$$w = b - 2(r + t)$$

$$= 5.160 \text{ cm}$$

$$w/t = 43.000 \text{ ok}$$

$$S = 25.818 \text{ check case 2}$$

case 2

$$I_a = 0.041 \text{ cm}^4$$

$$A_s = 0.014 \text{ cm}^2$$

$$n = 0.333$$

$$R1 = 0.140 \text{ use } 0.140$$

	R2	=	1.860		
	k	=	2.205	use	2.205
	Is	=	0.006	cm ⁴	
	lamda	=	1.510		
	rho	=	0.566	use	0.566
	b	=	2.919	cm	
b.	stifener lip				
	d/t	=	6.917		
	f1	=	4722.290	ksc	
	f2	=	4219.324	ksc	
	phi	=	0.893		
	k	=	0.469		
	lamda	=	0.507		
	rho	=	1.000	use	1
	ds'	=	0.830	cm	
	As'	=	0.100	cm ²	
	ds	=	0.116	cm	
c.	web				
	Y1	=	8.413	cm	
	check T-C?	=	T-C		
	H/B	=	2.375		
	h	=	13.960	cm	
	h/t	=	116.333		
	f1	=	4722.290	ksc	
	f2	=	-3737.237	ksc	
	phi	=	0.791		
	k	=	19.080		
	lamda	=	1.337		
	rho	=	0.625	use	0.625

$$h_e = 8.725 \text{ cm}$$

$$h_1 = 2.301 \text{ cm}$$

$$h_2 = 4.362 \text{ cm}$$

check effective web

$$h_1 + h_2 = 6.664 \text{ cm} \quad \text{check not fully effective web}$$

$$h_{cw} = 7.793 \text{ cm}$$

d. recompute properties by parts

$$h(\text{neg}) = -1.129 \text{ cm}$$

$$y \text{ distance} = 3.486 \text{ cm}$$

Element	L	Y from top fiber	Ly	Ly ²	I'x
Top flange	2.919	0.060	0.175	0.011	0.004
Bottom flange	5.160	15.140	78.122	1182.773	0.006
web	13.960	7.600	106.096	806.330	226.712
Negative web element	-1.129	3.486	-3.936	-13.721	-0.120
top inside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom inside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top outside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom outside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top lip	0.116	0.678	0.079	0.054	0.000
bottom lip	0.830	14.165	11.757	166.537	0.048
sum	25.374		219.029	2534.528	226.754

average of y

$$y = 8.632 \text{ cm} \quad \text{in below top fiber}$$

$$I_x = 104.473 \text{ cm}^4$$

$$S_e(2) = 12.103 \text{ cm}^3$$

$$S_e(1) - S_e(2) = 0.726 \text{ cm}^3 \quad \text{Go to next iteration}$$

3 iteration

a. compression flange

$$w = b - 2(r + t)$$

$$= 5.160 \text{ cm}$$

$$w/t = 43.000 \text{ ok}$$

$$S = 25.818 \text{ check case 2}$$

case 2

la	=	0.041	cm ⁴	
As	=	0.014	cm ²	
n	=	0.333		
R1	=	0.140	use	0.140
R2	=	1.860		
k	=	2.205	use	2.205
Is	=	0.006	cm ⁴	

lamda	=	1.510		
rho	=	0.566	use	0.566
b	=	2.919	cm	

b. stiffer lip

d/t	=	6.917		
f1	=	4731.834	ksc	
f2	=	4241.644	ksc	
phi	=	0.896		
k	=	0.467		
lamda	=	0.508		
rho	=	1.000	use	1
ds'	=	0.830	cm	
As'	=	0.100	cm ²	
ds	=	0.116	cm	

c. web

Y1	=	8.632	cm	
check T-C?	=	T-C		
H/B	=	2.375		
h	=	13.960	cm	
h/t	=	116.333		

$$\begin{aligned}
 f1 &= 4731.834 && \text{ksc} \\
 f2 &= -3512.809 && \text{ksc} \\
 \phi &= 0.742 \\
 k &= 18.064 \\
 \lambda &= 1.375 \\
 \rho &= 0.611 && \text{use } 0.611 \\
 h_e &= 8.527 && \text{cm} \\
 h_1 &= 2.279 && \text{cm} \\
 h_2 &= 4.264 && \text{cm}
 \end{aligned}$$

check effective web

$$\begin{aligned}
 h_1+h_2 &= 6.542 \text{ cm} && \text{check not fully effective web} \\
 h_{cw} &= 8.012 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

d. recompute properties by parts

$$\begin{aligned}
 h(\text{neg}) &= -1.470 \text{ cm} \\
 y \text{ distance} &= 3.633 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Element	L	Y from top fiber	Ly	Ly^2	I_x
Top flange	2.919	0.060	0.175	0.011	0.004
Bottom flange	5.160	15.140	78.122	1182.773	0.006
web	13.960	7.600	106.096	806.330	226.712
Negative web element	-1.470	3.633	-5.340	-19.404	-0.265
top inside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom inside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top outside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom outside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top lip	0.116	0.678	0.079	0.054	0.000
bottom lip	0.830	14.165	11.757	166.537	0.048
sum	25.033		217.625	2528.845	226.610

average of y

$$\begin{aligned}
 y &= 8.693 && \text{cm} && \text{in below top fiber} \\
 I_x &= 103.627 && \text{cm}^4 \\
 S_e(3) &= 11.920 && \text{cm}^3 \\
 S_e(2)-S_e(3) &= 0.183 && \text{cm}^3 && \text{Go to next iteration}
 \end{aligned}$$

4 iteration

a. compression flange

$$\begin{aligned}
 w &= b-2(r+t) && \text{cm} \\
 &= 5.160 \\
 w/t &= 43.000 && \text{ok} \\
 S &= 25.818 && \text{check case 2}
 \end{aligned}$$

case 2

$$\begin{aligned}
 I_a &= 0.041 && \text{cm}^4 \\
 A_s &= 0.014 && \text{cm}^2 \\
 n &= 0.333 \\
 R_1 &= 0.140 && \text{use } 0.140 \\
 R_2 &= 1.860 \\
 k &= 2.205 && \text{use } 2.205 \\
 I_s &= 0.006 && \text{cm}^4 \\
 \lambda &= 1.510 \\
 \rho &= 0.566 && \text{use } 0.566 \\
 b &= 2.919 && \text{cm}
 \end{aligned}$$

b. stiffener lip

$$\begin{aligned}
 d/t &= 6.917 && \text{ksc} \\
 f_1 &= 4734.417 && \text{ksc} \\
 f_2 &= 4247.686 \\
 \phi &= 0.897 \\
 k &= 0.467 \\
 \lambda &= 0.509 \\
 \rho &= 1.000 && \text{use } 1 \\
 d_s' &= 0.830 && \text{cm} \\
 A_s' &= 0.100 && \text{cm}^2 \\
 d_s &= 0.116 && \text{cm}
 \end{aligned}$$

c. web

$$Y_1 = 8.693$$

$$\begin{aligned}
 \text{check T-C?} &= \text{T-C} \\
 \text{H/B} &= 2.375 \\
 h &= 13.960 \quad \text{cm} \\
 h/t &= 116.333 \\
 f1 &= 4734.417 \quad \text{ksc} \\
 f2 &= -3452.053 \quad \text{ksc} \\
 \text{phi} &= 0.729 \\
 k &= 17.798 \\
 \text{lamda} &= 1.386 \\
 \text{rho} &= 0.607 \quad \text{use} \quad 0.607 \\
 \text{he} &= 8.474 \quad \text{cm} \\
 h1 &= 2.272 \quad \text{cm} \\
 h2 &= 4.237 \quad \text{cm}
 \end{aligned}$$

check effective web

$$\begin{aligned}
 h1+h2 &= 6.510 \quad \text{cm} \quad \text{check not fully effective web} \\
 \text{hcw} &= 8.073 \quad \text{cm}
 \end{aligned}$$

d. recompute properties by parts

$$\begin{aligned}
 \text{h(neg)} &= -1.564 \quad \text{cm} \\
 \text{y distance} &= 3.674
 \end{aligned}$$

Element	L	Y from top fiber	Ly	Ly ²	I'x
Top flange	2.919	0.060	0.175	0.011	0.004
Bottom flange	5.160	15.140	78.122	1182.773	0.006
web	13.960	7.600	106.096	806.330	226.712
Negative web element	-1.564	3.674	-5.746	-21.111	-0.319
top inside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom inside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top outside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom outside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top lip	0.116	0.678	0.079	0.054	0.000
bottom lip	0.830	14.165	11.757	166.537	0.048
sum	24.940		217.220	2527.138	226.556

average of y:	y	=	8.710	cm	in below top fiber
	Ix	=	103.408	cm ⁴	
	Se(4)	=	11.873	cm ³	
	Se(3)-Se(4)	=	0.048	cm ³	Go to next iteration

5 iteration

a. compression flange

w	=	b-2(r+t)	cm
	=	5.160	cm
w/t	=	43.000	ok
S	=	25.818	check case 2

case 2

la	=	0.041	cm ⁴
As	=	0.014	cm ²
n	=	0.333	
R1	=	0.140	use 0.140
R2	=	1.860	
k	=	2.205	use 2.205
Is	=	0.006	cm ⁴
lamda	=	1.510	
rho	=	0.566	use 0.566
b	=	2.919	cm

b. stiffener lip

d/t	=	6.917	ksc
f1	=	4735.106	ksc
f2	=	4249.296	
phi	=	0.897	
k	=	0.467	
lamda	=	0.509	
rho	=	1.000	use 1
ds'	=	0.830	cm

	As'	=	0.100	cm ²	
	ds	=	0.116	cm	
c.	web				
	Y1	=	8.710	cm	
	check T-C?	=	T-C		
	H/B	=	2.375		
	h	=	13.960	cm	
	h/t	=	116.333	ksc	
	f1	=	4735.106	ksc	
	f2	=	-3435.863		
	phi	=	0.726		
	k	=	17.728		
	lamda	=	1.389		
	rho	=	0.606	use	0.606
	he	=	8.460	cm	
	h1	=	2.271	cm	
	h2	=	4.230	cm	
	check effective web				
	h1+h2	=	6.501	cm	check not fully effective web
	hcw	=	8.090	cm	
d.	recompute properties by parts				
	h(neg)	=	-1.589	cm	
	y distance	=	3.685	cm	

Element	L	Y from top fiber	Ly	Ly ²	I' _x
Top flange	2.919	0.060	0.175	0.011	0.004
Bottom flange	5.160	15.140	78.122	1182.773	0.006
web	13.960	7.600	106.096	806.330	226.712
Negative web element	-1.589	3.685	-5.855	-21.579	-0.334
top inside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom inside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top outside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom outside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top lip	0.116	0.678	0.079	0.054	0.000
bottom lip	0.830	14.165	11.757	166.537	0.048
sum	24.914		217.110	2526.670	226.540

average of y : y = 8.714 cm in below top fiber

$$I_x = 103.351 \text{ cm}^4$$

$$S_e(5) = 11.860 \text{ cm}^3$$

$$S_e(4) - S_e(5) = 0.013 \text{ cm}^3 \quad \text{Go to next iteration}$$

6 iteration

a. compression flange

$$w = b - 2(r + t)$$

$$= 5.160 \text{ cm}$$

$$w/t = 43.000 \text{ ok}$$

$$S = 25.818 \text{ check case 2}$$

case 2

$$I_a = 0.041 \text{ cm}^4$$

$$A_s = 0.014 \text{ cm}^2$$

$$n = 0.333$$

$$R_1 = 0.140 \text{ use } 0.140$$

$$R_2 = 1.860$$

$$k = 2.205 \text{ use } 2.205$$

$$I_s = 0.006 \text{ cm}^4$$

	lamda	=	1.510		
	rho	=	0.566	use	0.566
	b	=	2.919	cm	
b.	stiifener lip				
	d/t	=	6.917		
	f1	=	4735.289	ksc	
	f2	=	4249.723	ksc	
	phi	=	0.897		
	k	=	0.467		
	lamda	=	0.509		
	rho	=	1.000	use	1
	ds'	=	0.830	cm	
	As'	=	0.100	cm ²	
	ds	=	0.116	cm	
c.	web				
	Y1	=	8.714	cm	
	check T-C?	=	T-C		
	H/B	=	2.375		
	h	=	13.960	cm	
	h/t	=	116.333		
	f1	=	4735.289	ksc	
	f2	=	-3431.568	ksc	
	phi	=	0.725		
	k	=	17.710		
	lamda	=	1.389		
	rho	=	0.606	use	0.606
	he	=	8.457	cm	
	h1	=	2.270	cm	
	h2	=	4.228	cm	

check effective web

$$h_1+h_2 = 6.499 \quad \text{cm} \quad \text{check not fully effective web}$$

$$hcw = 8.094 \quad \text{cm}$$

d. recompute properties by parts

$$h(\text{neg}) = -1.595 \quad \text{cm}$$

$$y \text{ distance} = 3.688 \quad \text{cm}$$

Element	L	Y from top fiber	Ly	Ly ²	I'x
Top flange	2.919	0.060	0.175	0.011	0.004
Bottom flange	5.160	15.140	78.122	1182.773	0.006
web	13.960	7.600	106.096	806.330	226.712
Negative web element	-1.596	3.688	-5.885	-21.704	-0.338
top inside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom inside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top outside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom outside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top lip	0.116	0.678	0.079	0.054	0.000
bottom lip	0.830	14.165	11.757	166.537	0.048
sum	24.908		217.081	2526.545	226.536

$$\text{average of } y: y = 8.715 \quad \text{cm} \quad \text{in below top fiber}$$

$$Ix = 103.335 \quad \text{cm}^4$$

$$Se(6) = 11.857 \quad \text{cm}^3$$

$$Se(5)-Se(6) = 0.003 \quad \text{cm}^3 \quad \text{Go to next iteration}$$

7 iteration

a. compression flange

$$w = b-2(r+t)$$

$$= 5.160 \quad \text{cm}$$

$$w/t = 43.000 \quad \text{ok}$$

$$S = 25.818 \quad \text{check case 2}$$

case 2

$$I_a = 0.041 \quad \text{cm}^4$$

$$A_s = 0.014 \quad \text{cm}^2$$

$$n = 0.333$$

	R1	=	0.140	use	0.1403
	R2	=	1.860		
	k	=	2.205	use	2.2045
	Is	=	0.006	cm ⁴	
	lamda	=	1.510		
	rho	=	0.566	use	0.5657
	b	=	2.919	cm	
b.	stiifener lip				
	d/t	=	6.917		
	f1	=	4735.337	ksc	
	f2	=	4249.836	ksc	
	phi	=	0.897		
	k	=	0.467		
	lamda	=	0.509		
	rho	=	1.000	use	1
	ds'	=	0.830	cm	
	As'	=	0.100	cm ²	
	ds	=	0.116	cm	
c.	web				
	Y1	=	8.715	cm	
	check T-C?	=	T-C		
	H/B	=	2.375		
	h	=	13.960	cm	
	h/t	=	116.333		
	f1	=	4735.337	ksc	
	f2	=	-3430.430	ksc	
	phi	=	0.724		
	k	=	17.705		
	lamda	=	1.390		

$$\begin{aligned} \rho &= 0.606 && \text{use } 0.606 \\ h_e &= 8.456 && \text{cm} \\ h_1 &= 2.270 && \text{cm} \\ h_2 &= 4.228 && \text{cm} \end{aligned}$$

check effective web

$$\begin{aligned} h_1+h_2 &= 6.498 && \text{cm} && \text{check not fully effective web} \\ h_{cw} &= 8.095 && \text{cm} \end{aligned}$$

d. recompute properties by parts

$$\begin{aligned} h(\text{neg}) &= -1.597 && \text{cm} \\ y \text{ distance} &= 3.689 && \text{cm} \end{aligned}$$

Element	L	Y from top fiber	Ly	Ly^2	I_x
Top flange	2.919	0.060	0.175	0.011	0.004
Bottom flange	5.160	15.140	78.122	1182.773	0.006
web	13.960	7.600	106.096	806.330	226.712
Negative web element	-1.597	3.689	-5.892	-21.737	-0.340
top inside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom inside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top outside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom outside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top lip	0.116	0.678	0.079	0.054	0.000
bottom lip	0.830	14.165	11.757	166.537	0.048
sum	24.906		217.073	2526.512	226.535

$$\text{average of } y: y = 8.716 \text{ cm in below top fiber}$$

$$I_x = 103.331 \text{ cm}^4$$

$$S_e(7) = 11.856 \text{ cm}^3$$

$$S_e(6)-S_e(7) = 0.001 \text{ cm}^3 \quad \text{Go to next iteration}$$

8 iteration

a. compression flange

$$w = b-2(r+t)$$

$$= 5.160 \text{ cm}$$

$$w/t = 43.000 \quad \text{ok}$$

$$S = 25.818 \quad \text{check case 2}$$

case 2

la	=	0.041	cm ⁴	
As	=	0.014	cm ²	
n	=	0.333		
R1	=	0.140	use	0.1403
R2	=	1.860		
k	=	2.205	use	2.2045
Is	=	0.006	cm ⁴	
lamda	=	1.510		
rho	=	0.566	use	0.5657
b	=	2.919	cm	

b. stiifener lip

d/t	=	6.917		
f1	=	4735.350	ksc	
f2	=	4249.866	ksc	
phi	=	0.897		
k	=	0.467		
lamda	=	0.509		
rho	=	1.000	use	1
ds'	=	0.830	cm	
As'	=	0.100	cm ²	
ds	=	0.116	cm	

c. web

Y1	=	8.716	cm	
check T-C?	=	T-C		
H/B	=	2.375		
h	=	13.960	cm	
h/t	=	116.333		
f1	=	4735.350	ksc	

$$\begin{aligned}
 f_2 &= -3430.129 && \text{ksc} \\
 \phi &= 0.724 \\
 k &= 17.703 \\
 \lambda &= 1.390 \\
 \rho &= 0.606 && \text{use } 0.606 \\
 h_e &= 8.455 && \text{cm} \\
 h_1 &= 2.270 && \text{cm} \\
 h_2 &= 4.228 && \text{cm}
 \end{aligned}$$

check effective web

$$\begin{aligned}
 h_1+h_2 &= 6.498 && \text{cm} && \text{check not fully effective web} \\
 hc_w &= 8.096 && \text{cm}
 \end{aligned}$$

d. recompute properties by parts

$$\begin{aligned}
 h(\text{neg}) &= -1.598 && \text{cm} \\
 y \text{ distance} &= 3.689 && \text{cm}
 \end{aligned}$$

Element	L	Y from top fiber	Ly	Ly ²	I'x
Top flange	2.919	0.060	0.175	0.011	0.004
Bottom flange	5.160	15.140	78.122	1182.773	0.006
web	13.960	7.600	106.096	806.330	226.712
Negative web element	-1.598	3.689	-5.894	-21.746	-0.340
top inside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom inside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top outside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom outside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top lip	0.116	0.678	0.079	0.054	0.000
bottom lip	0.830	14.165	11.757	166.537	0.048
sum	24.905		217.071	2526.503	226.534

$$\text{average of } y: y = 8.716 \text{ cm in below top fiber}$$

$$I_x = 103.330 \text{ cm}^4$$

$$Se(8) = 11.856 \text{ cm}^3$$

$$Se(7)-Se(8) = 0.000 \text{ cm}^3, \text{ So Final Se} = 11.856 \text{ cm}^3$$

2. รายการคำนวณการหาหน้าตัดโมดูลัสขีลาสติกโดยวิธีความกว้างประสิทธิภาพ
โดยใช้ร่วมกับสมการอย่างง่าย

section	H	B	D	t	d	R	Fy
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	ksc
C15012	15.2	6.4	1.45	0.12	0.83	0.5	5098
	E	A	rx	ry	x0	J	Cw
	ksc	cm ²	cm	cm	cm	cm ⁴	cm ⁶
	2074057	3.54	6.04	2.30	-4.87	0.02	901.3
	lx	ly	f				
	cm ⁴	cm ⁴	ksc				
	129	18.8	5098				

- a. compression flange

$$w = b - 2(r + t)$$

$$= 5.160 \quad \text{cm}$$

$$w/t = 43.000 \quad \text{ok}$$

$$S = 25.818 \quad \text{check case 2}$$

case 2

$$I_a = 0.041 \quad \text{cm}^4$$

$$A_s = 0.140 \quad \text{cm}^2$$

$$n = 0.333$$

$$R_1 = 0.140 \quad \text{use } 0.140$$

$$R_2 = 1.860$$

$$k = 2.205 \quad \text{use } 2.205$$

$$I_s = 0.006 \quad \text{cm}^4$$

$$\lambda = 1.510$$

$$\rho = 0.566 \quad \text{use } 0.566$$

$$b = 2.919 \quad \text{cm}$$

- b. stiffener lip

$$d/t = 6.917$$

$$f_1 = 4,682.111 \quad \text{ksc}$$

$f_2 = 4,125.355$ ksc
 $\phi = 0.881$
 $k = 0.473$
 $\lambda = 0.502$
 $\rho = 1.000$ use 1
 $d_s' = 0.830$ cm
 $A_s' = 0.100$ cm²
 $d_s = 0.116$ cm

c. web

$Y_o' = 8.675$ cm
 check T-C? = T-C
 $H/B = 2.375$
 $h = 13.960$ cm
 $h/t = 116.333$
 $f_y = 4,733.658$ ksc
 $\Phi' = 0.752$
 $k = 18.262$
 $\lambda = 1.368$
 $\rho = 0.613$ use 0.613
 $h_e = 8.564$ cm
 $h_1 = 2.282$ cm
 $h_2 = 4.282$ cm

check effective web

$h_1 + h_2 = 6.564$ cm check not fully effective web
 $h_{cw} = 8.055$ cm

d. recompute properties by parts

$h(\text{neg})' = -1.640$ cm
 y distance = 3.722 cm

Element	L	Y from top fiber	Ly	Ly ²	I'x
Top flange	2.919	0.060	0.175	0.011	0.004
Bottom flange	5.160	15.140	78.122	1182.773	0.006
web	13.960	7.600	106.096	806.330	226.712
Negative web element	-1.640	3.722	-6.106	-22.727	-0.368
top inside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom inside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top outside corner	0.879	0.263	0.232	0.061	0.026
bottom outside corner	0.879	14.937	13.136	196.211	0.026
top lip	0.116	0.678	0.079	0.054	0.000
bottom lip	0.830	14.165	11.757	166.537	0.048
sum	24.863		216.860	2525.521	226.507

average of y: $y = 8.722$ cm in below top fiber

$I_x = 103.264$ cm⁴

$Se = 11.839$ cm³

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายการคำนวณการตรวจสอบหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยวิธีความกว้าง ประสิทธิภาพร่วมกับสมการอย่างง่ายโดย

พิจารณาหน้าตัดของกลุ่มที่ 1 ที่โปรแกรมเลือกซึ่งคือหน้าตัด C10019 โดยมีแรงภายในชิ้นส่วน
ดังนี้

$$P = 4928.98 \quad \text{kg}$$

$$M_x = 2421.98 \quad \text{kg.cm}$$

$$V = 141.28 \quad \text{kg}$$

การตรวจสอบหน้าตัดเหล็กขึ้นรูปเย็นโดยวิธีความกว้างประสิทธิภาพร่วมกับสมการอย่างง่าย
ตรวจสอบโดย 2 วิธี ดังนี้

1. โดยวิธีกำลัง

Compute nominal strength

Compute M_{nx}

LC size : C10019

H (mm)	b (mm)	D (mm)	t (mm)	r (mm)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)
102	51	14.5	1.9	5.0	67.3	14.2
ro(cm)	Ag(cm ²)	d (mm)	rx(cm)	ry(cm)	Sx (cm ³)	H/b
6.186	4.090	7.6	4.056	1.863	13.196	2
Fey	Fet	E (ksc)	Fy (ksc)	Cb	Lcr(cm)	Af(cm ²)
7106.98	4512.59	2074056.5	4589	1.15	30.056	1.190
hx (mm)	xof (mm)	yof (mm)	lxf (cm ⁴)	lyf (cm ⁴)	lxyf (cm ⁴)	Jf (cm ⁴)
-29.860	19.240	0.147	0.135	1.592	0.336	0.014
G (ksc)	Lb (cm)					
794469	100					

IPB Bending Strength (Purlin) about X-axis

$$F_{cr,x} \text{ (ksc)} = 4589 \quad \text{ksc}$$

Sex - IPB

a. top flange

$$w = 37.20 \quad \text{mm}$$

$$w/t = 19.579$$

$$S = 27.212$$

$$\text{FLB} = \text{yes}$$

la	=	312.009	mm ⁴
ls	=	69.505	mm ⁴
Ri	=	0.223	
n	=	0.402	
D/w	=	0.390	
k	=	2.000	
Fcr	=	9778.400	ksc
lamda	=	0.685	
rho	=	0.991	
w_eff	=	36.863	mm

c. top stiffener lip

d/t	=	4	
f1	=	3968.135	ksc
f2<f1	=	3284.284	ksc
phi	=	0.828	
k	=	0.495	
Fcr	=	57994.593	ksc
lamda	=	0.262	
rho	=	1	
ds'	=	7.6	mm
ds	=	1.693	mm

d. web

Yo	=	51.116	mm.
h	=	88.2	mm
h/t	=	46.421	
w_eff	=	36.863	mm
w	=	37.2	mm
phi	=	0.995	
k	=	23.882	

$$\begin{aligned}
 F_{cr} &= 20775.209 && \text{ksc} \\
 f_1 &= 3969.543 && \text{ksc} \\
 \lambda &= 0.437 \\
 \rho &= 1 \\
 h_{\text{eff}} &= 88.2 && \text{mm} \\
 h_1 &= 22.075 && \text{mm} \\
 h_2 &= 44.1 && \text{mm}
 \end{aligned}$$

e. check effective web

$$\begin{aligned}
 h_1+h_2 &= 66.175 && \text{mm} \\
 h_{cw} &= 44.216 && \text{mm} \quad \text{web is fully effective} \\
 h_{\text{neg}} &= 0 && \text{mm} \\
 y_{\text{dist}} &= 28.975 && \text{mm}
 \end{aligned}$$

d. compute S_{e_x}

Element	L_{eff} mm	y from top mm	$L*y$ mm^2	$L*y^2$ mm^3	$I'x / t$ mm^3
top flange	36.86	0.95	35.02	33.27	11.09
bottom flange	37.20	101.05	3759.06	379853.01	11.19
web	88.20	51.00	4498.20	229408.20	57177.41
negative web element	0.00	28.98	0.00	0.00	0.00
top inside corner	9.34	3.11	29.05	90.34	31.39
bottom inside corner	9.34	98.89	923.78	91352.97	31.39
top outside corner	9.34	3.11	29.05	90.34	31.39
bottom outside corner	9.34	98.89	923.78	91352.97	31.39
top lip	1.69	7.75	13.11	101.59	0.40
bottom lip	7.60	91.30	693.88	63351.24	36.58
sum	208.92		10904.94	855633.95	57362.22

$$\begin{aligned}
 y &= 52.20 && \text{mm below top fiber} \\
 I_x &= 65.32 && \text{cm}^4 \\
 \text{compute } S_{e_x} &= 12.51 && \text{cm}^3 / \text{member} \\
 \text{use } S_{e_x} &= 12.51 && \text{cm}^3 / \text{member} \\
 M_n_{\text{IPB}} &= 574.30 && \text{kg.m}
 \end{aligned}$$

LTB Bending Strength (Purlin) about X-axis

LTB_X:

$$F_e = (C_b \cdot r_0 \cdot A_g / S_{fx}) \cdot \sqrt{F_{ey} \cdot F_t}$$

$$= 12437.84 \quad \text{ksc}$$

if $F_e \leq 0.56F_y$ \implies Elastic LTB

$$F_{cr,x} = \min(F_e, F_y)$$

$$= 4589 \quad \text{ksc}$$

if $0.56F_y < F_e < 2.78F_y$ \implies Inelastic LTB

$$F_{cr,x} = 10/9 F_y (1 - 10/36 \cdot (F_y / F_e))$$

$$= 4576.317 \quad \text{ksc}$$

if $F_e \geq 2.78F_y$ \implies no LTB

$$F_{cr,x} = F_y = 4589 \quad \text{ksc}$$

$$F_{cr,x} (\text{ksc}) = 4576.317 \quad \text{ksc}$$

Sex - LTB

a. top flange

$$w = 37.200 \quad \text{mm}$$

$$w/t = 19.579$$

$$S = 27.250$$

$$\text{FLB} = \text{yes}$$

$$I_a = 309.637 \quad \text{mm}^4$$

$$I_s = 69.505 \quad \text{mm}^4$$

$$R_i = 0.224$$

$$n = 0.402$$

$$D/w = 0.390$$

$$k = 2.004$$

$$F_{cr} = 9799.138 \quad \text{ksc}$$

$$\lambda = 0.683$$

$$\rho = 0.992$$

$$w_{\text{eff}} = 36.911 \quad \text{mm}$$

c. top stiffener lip

$$d/t = 4$$

$$f_1 = 3957.168 \quad \text{ksc}$$

$$f_2 < f_1 = 3275.207 \quad \text{ksc}$$

$$\begin{aligned}
 \phi &= 0.828 \\
 k &= 0.495 \\
 F_{cr} &= 57994.593 \quad \text{ksc} \\
 \lambda &= 0.261 \\
 \rho &= 1 \\
 d_s' &= 7.6 \quad \text{mm} \\
 d_s &= 1.706 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

d. web

$$\begin{aligned}
 Y_o &= 51.099 \quad \text{mm} \\
 h &= 88.2 \quad \text{mm} \\
 h/t &= 46.421 \\
 w_{\text{eff}} &= 36.911 \quad \text{mm} \\
 w &= 37.2 \quad \text{mm} \\
 \phi &= 0.996 \\
 k &= 23.899 \\
 F_{cr} &= 20789.627 \quad \text{ksc} \\
 f_1 &= 3958.373 \quad \text{ksc} \\
 \lambda &= 0.436 \\
 \rho &= 1 \\
 h_{\text{eff}} &= 88.200 \quad \text{mm} \\
 h_1 &= 22.071 \quad \text{mm} \\
 h_2 &= 44.100 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

e. check effective web

$$\begin{aligned}
 h_1+h_2 &= 66.171 \quad \text{mm} \\
 hcw &= 44.199 \quad \text{mm} \quad \text{web is fully effective} \\
 h_{\text{neg}} &= 0 \quad \text{mm} \quad h_{\text{neg}} = 0 \\
 y_{\text{dist}} &= 28.971 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

d. compute Se_x

Element	L_{eff}	y from top	$L*y$	$L*y^2$	$I'x / t$
	mm	mm	mm ²	mm ³	mm ³
top flange	36.91	0.95	35.07	33.31	11.10
bottom flange	37.20	101.05	3759.06	379853.01	11.19
web	88.20	51.00	4498.20	229408.20	57177.41
negative web element	0.00	28.97	0.00	0.00	0.00
top inside corner	9.34	3.11	29.05	90.34	31.39
bottom inside corner	9.34	98.89	923.78	91352.97	31.39
top outside corner	9.34	3.11	29.05	90.34	31.39
bottom outside corner	9.34	98.89	923.78	91352.97	31.39
top lip	1.71	7.75	13.23	102.54	0.41
bottom lip	7.60	91.30	693.88	63351.24	36.58
sum	208.98		10905.10	855634.95	57362.25

$$y = 52.182 \quad \text{mm below top fiber}$$

$$I_x = 65.350 \quad \text{cm}^4$$

compute $Se_x = 12.524 \quad \text{cm}^3 / \text{member}$

use $Se_x = 12.524 \quad \text{cm}^3 / \text{member}$

$$Mn_{LTB} = 573.121 \quad \text{kg.m}$$

Distortional Bending Strength (Purlin) about X-axis

1. if $\lambda_d \leq 0.673$ $Mn = My$

2. if $\lambda_d > 0.673$ $Mn = My * (1 - 0.22*(Mcrd / My)^{0.5}) * (Mcrd / My)^{0.5}$

$$\beta = 1$$

$$\text{sine} = 2$$

$$L = 30.056 \quad \text{cm}$$

$$kpfe = 506.803 \quad \text{kg.cm/cm}$$

$$kpwe = 429.820 \quad \text{kg.cm/cm}$$

$$k'pfg = 0.145 \quad (\text{kg.cm/cm}) / \text{ksc}$$

$$k'pwg = 0.006 \quad (\text{kg.cm/cm}) / \text{ksc}$$

$$k\phi = 0$$

$$Fd = 6187.580 \quad \text{ksc}$$

$$Sfc = 13.196 \quad \text{cm}^3$$

$$\begin{aligned}
 S_x &= 13.196 \quad \text{cm}^3 \\
 M_{crd} &= 816.518 \quad \text{kg.m} \\
 M_y &= 605.568 \quad \text{kg.m} \\
 \lambda_d &= 0.861 \\
 M_{n_d} &= 523.543 \quad \text{kg.m / member}
 \end{aligned}$$

Compute Pn

H (mm)	b (mm)	D (mm)	t (mm)	r (mm)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)
102	51	14.5	1.9	5	67.3	14.2
A(cm ²)	r_x (cm)	r_y (cm)	c_y (cm)	E (ksc)	F_y (ksc)	C_b
4.09	4.056	1.863	1.755	2074056.5	4589	1.15
h_x (mm)	x_{of} (mm)	y_{of} (mm)	I_{xf} (cm ⁴)	I_{yf} (cm ⁴)	I_{xyf} (cm ⁴)	J_f (cm ⁴)
-29.860	19.240	0.147	0.135	1.592	0.336	0.014
A_f (cm ²)	G (ksc)	L _b (cm)	L _{cr} (cm)	K _x	K _y	K _z
1.190	794469	100	27.96	1	1	1
L _x (m)	L _y (m)	L _z (m)	J (cm ⁴)	C_w (cm ⁶)	r_o^2 (cm ²)	beta
0.75	1	1	0.0515	338.529	38.270	0.521
a-bar	b-bar	c-bar	d (mm)			
100.1	49.1	12.6	7.6			

Compression Member Bend & Twist Buckling

a. axial compressive stress

	X-axis	Y-axis	Z-axis
r	4.056	1.863	-
L	0.75	1	1
K	1	1	1
KL/r	18.489	53.668	-
F_e (ksc)	59881.071	7106.984	4688.868
F_{ez}	4512.588		
F_e (min)	4512.588		
F_y/F_e	1.017		
F_n (ksc)	2998.237		

b. flange

$$w = 37.2 \quad \text{mm}$$

$$w/t = 19.579$$

	S	=	33.666	
	FLB	=	yes	
	Ia	=	84.778	mm ⁴
	I _s	=	69.505	mm ⁴
	R _i	=	0.820	
	n	=	0.437	
	D/w	=	0.390	
	k	=	3.063	
	F _{cr}	=	14976.29	ksc
	lamda	=	0.447	
	rho	=	1	
	b _{eff}	=	37.2	mm
c.	stiffener lip			
	d/t	=	4	
	f ₁	=	2998.23	ksc
	f ₂ <f ₁	=	2998.23	ksc
	phi	=	1	
	k	=	0.431	
	F _{cr}	=	50535.98	ksc
	lamda	=	0.244	
	rho	=	1	
	ds'	=	7.6	mm
	ds	=	6.23	mm
d.	web			
	h	=	88.2	mm
	h/t	=	46.421	
	f ₁	=	2998.23	ksc
	f ₂	=	2998.23	ksc
	phi	=	1	

$$\begin{aligned}
 k &= 4 \\
 F_{cr} &= 3479.58 \quad \text{ksc} \\
 \lambda &= 0.928 \\
 \rho &= 0.822 \\
 h_{eff} &= 72.49 \quad \text{mm} \\
 \text{e. } A_e & \\
 A_g &= 4.09 \quad \text{cm}^2 \\
 A_e &= 3.740 \quad \text{cm}^2 \\
 \text{f. } P_{n_b} & \\
 P_{n_b} &= 11,212.27 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

Compression Member (Rafter) Distortion Buckling

$$1. \text{ if } \lambda_d \leq 0.561 \quad P_n = P_y$$

$$1. \text{ if } \lambda_d > 0.561 \quad P_n = P_y * (1 - 0.25*(P_{crd} / P_y)^{0.6}) * (P_{crd} / P_y)^{0.6}$$

$$\begin{aligned}
 L &= 27.958 \quad \text{cm} \\
 k_{pfe} &= 654.574 \quad \text{kg.cm/cm} \\
 k_{pwe} &= 255.440 \quad \text{kg.cm/cm} \\
 k'_{pfg} &= 0.168 \quad (\text{kg.cm/cm}) / \text{ksc} \\
 k'_{pwg} &= 0.042 \quad (\text{kg.cm/cm}) / \text{ksc} \\
 k_{\phi} &= 0 \\
 F_d &= 4,330.65 \quad \text{ksc} \\
 A_g &= 4.09 \quad \text{cm}^2 \\
 P_{crd} &= 17,712.37 \quad \text{kg} \\
 P_y &= 18,769.01 \quad \text{kg} \\
 \lambda_d &= 1.029 \\
 P_{n_d} &= 13,750.62 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

Compute Pno

H (mm)	b (mm)	D (mm)	t (mm)	r (mm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)
102	51	14.5	1.9	5	67.3	14.2
A(cm ²)	r _x (cm)	r _y (cm)	c _y (cm)	E (ksc)	F _y (ksc)	C _b
4.09	4.056	1.863	1.755	2074056.5	4589	1.15
h _x (mm)	x _{of} (mm)	y _{of} (mm)	I _{xf} (cm ⁴)	I _{yf} (cm ⁴)	I _{xyf} (cm ⁴)	J _f (cm ⁴)
-29.860	19.240	0.147	0.135	1.592	0.336	0.014
A _f (cm ²)	G (ksc)	L _b (cm)	L _{cr} (cm)	K _x	K _y	K _z
1.190	794469	100	27.96	1	1	1
L _x (m)	L _y (m)	L _z (m)	J (cm ⁴)	C _w (cm ⁶)	r _o ² (cm ²)	beta
0.75	1	1	0.0515	338.529	38.270	0.521
a-bar	b-bar	c-bar	d (mm)			
100.1	49.1	12.6	7.6			

Compression Member (Rafter) Bend & Twist Buckling

a. axial compressive stress

$$F_n \text{ (ksc)} = 4589 \quad \text{ksc}$$

b. flange

$$w = 37.2 \quad \text{mm}$$

$$w/t = 19.579$$

$$S = 27.212$$

$$\text{FLB} = \text{yes}$$

$$I_a = 312.009 \quad \text{mm}^4$$

$$I_s = 69.505 \quad \text{mm}^4$$

$$R_i = 0.223$$

$$n = 0.402$$

$$D/w = 0.390$$

$$k = 2.000$$

$$F_{cr} = 9778.400 \quad \text{ksc}$$

$$\lambda = 0.685$$

$$\rho = 0.991$$

$$b_{\text{eff}} = 36.863 \quad \text{mm}$$

c.	stiffener lip			
	d/t	=	4	
	f1	=	4589	ksc
	f2<f1	=	4589	ksc
	phi	=	1	
	k	=	0.431	
	Fcr	=	50535.98	ksc
	lamda	=	0.301	
	rho	=	1	
	ds'	=	7.6	mm
	ds	=	1.693	mm
d.	web			
	h	=	88.2	mm
	h/t	=	46.421	
	f1	=	4589	ksc
	f2	=	4589	ksc
	phi	=	1	
	k	=	4	
	Fcr	=	3479.587	ksc
	lamda	=	1.148	
	rho	=	0.704	
	h_eff	=	62.089	mm
e.	Ae			
	Ag	=	4.09	cm ²
	Ae	=	3.357	cm ²
f.	Pno_b			
	Pno_b	=	15403.627	kg

Shear Strength

E (ksc)	Fy (ksc)				
2074056.5	4589				
H (mm)	b (mm)	D (mm)	t (mm)	r (mm)	h _y (mm)
102	51	14.5	1.9	5	88.2

$$h / tw = 46.421$$

$$kv = 5.34$$

$$(E*kv / Fy)^{0.5} = 49.127$$

$$1.51*(E*kv/Fy)^{0.5} = 74.182$$

$$Fv = 2753.400 \quad \text{ksc}$$

$$Vn = 4614.148 \quad \text{kg}$$

Tension Strength

$$\begin{aligned} Tn \text{ (kg)} &= AgFy \\ &= 18769.01 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

Check Ratio Frame no.29

กำลังต้านทานที่ต้องการ จากตารางที่ 3.2

$$T = 0 \quad \text{kg.}$$

$$P = 4928.98 \quad \text{kg.}$$

$$Mx = 2421.98 \quad \text{kg.cm}$$

$$V = 141.28 \quad \text{kg.}$$

กำลังต้านทานระบุจากการคำนวณข้างต้น

$$Tn = 18769.01 \quad \text{kg}$$

$$\begin{aligned} Pn &= \min(Pn_b, Pn_d) \\ &= 11212.271 \quad \text{kg} \end{aligned}$$

$$Pn0 = 13750.622 \quad \text{kg}$$

$$\begin{aligned} Mn_x &= \min(Mn_{IPB}, Mn_{LTB}, Mn_{DT}) \\ &= 52354.253 \quad \text{kg.cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mn_{xt} &= S_x F_y \\ &= 60556.804 \quad \text{kg.cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{nx0} &= M_{nx} \\
 &= 52354.253 \quad \text{kg.cm} \\
 V_n &= 4614.148 \quad \text{kg.} \\
 \text{ASD} \quad \text{Ratio case1} &= 1.67(M_x/M_{nx} + T/T_n) \\
 &= 0.067 \\
 \text{Ratio case2} &= 1.67(M_x/M_{nx} - T/T_n) \\
 &= 0.077 \\
 \text{Ratio case3} &= \sqrt{(1.67M_x/M_{nx0})^2 + (1.6V/V_n)^2} \\
 &= 0.092 \\
 \text{Ratio case4} &= 1.8P/P_n + 1.67M_x/M_{nx} \\
 &= 0.723 \\
 \text{if } 1.8P/P_n > 0.15 & \\
 \text{Ratio case5} &= 1.8P/P_n + 1.67C_{mx}(M_x/M_{nx}/\text{Alphax}) \\
 &= 0.868 \\
 \text{Max Ratio} &= 0.868 \quad \text{ตรงกับในโปรแกรม (โดยดูจากตารางที่ 3.3)}
 \end{aligned}$$

2. โดยการตรวจสอบการโก่งเดาะ

นอกจากการตรวจสอบด้วยวิธีกำลังตามรายละเอียดข้างต้นในงานวิจัยนี้ยังทำการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยการโก่งเดาะดังนี้

ค่าโก่งเดาะสูงสุดที่ node 11 เท่ากับ 1.36 cm.

$$\begin{aligned}
 \text{คำนวณอัตราส่วนเพิ่มการโก่งเดาะเนื่องจากหน้าตัดประสิทธิภาพ} &= \frac{\Sigma(S_{full} / S_{eff})}{3} \\
 &= \frac{\left(\frac{13.196}{12.51} + \frac{13.196}{15.524} + \frac{13.196}{13.196} \right)}{3} \\
 &= 1.036
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ค่าโก่งเดาะสุดท้าย} &= 1.36 \times 1.036 \\
 &= 1.41 \quad \text{cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าโก่งเดาะที่ยอมให้ } L/240 &= 1200/240 \\
 &= 5.0 \quad \text{cm} > 1.41 \quad \text{cm} \quad \text{ผ่าน}
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค

การหาขนาดของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม

การค้นหาคำตอบในงานวิจัยนี้เป็นการค้นหาแบบสุ่ม โดยใช้หลักการทางสถิติ [11] อ้างอิงในการกำหนดจำนวนครั้งในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม

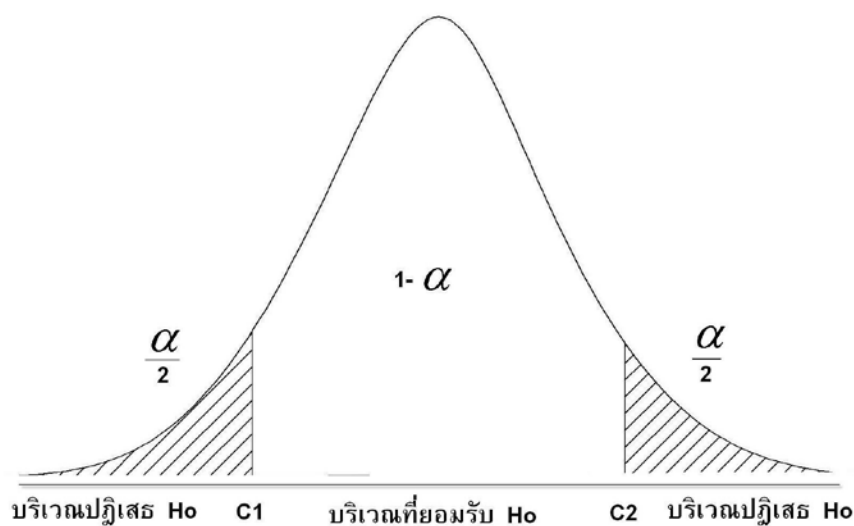
การคำนวณหาขนาดกลุ่มตัวอย่างตามหลักการทางสถิติ

การคำนวณหาขนาดกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากกลุ่มตัวอย่างเดิมซ้ำกันหลายๆครั้งตามขนาดของกลุ่มตัวอย่างโดยมีหลักการดังนี้

1. กำหนดสมมติฐาน

H_0 : ค่าเฉลี่ยของคำตอบทั้งหมด n ครั้ง = k

H_1 : ค่าเฉลี่ยของคำตอบทั้งหมด $n+1$ ครั้ง $\neq k$



ภาพที่ 1 แสดงบริเวณที่ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ในกรณีการทดสอบ 2 ทาง

2. สูตรในการคำนวณหาขนาดกลุ่มตัวอย่างตามหลักการทางสถิติ

$$n = (Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2 (\sigma / ES)^2$$

โดยที่

n = ขนาดกลุ่มตัวอย่าง

$Z_{\alpha/2}$ = ค่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งปกติ ณ $\alpha / 2$ โดยค่า α คือ โอกาสในการตัดสินใจปฏิเสธ H_0 ในกรณีที่ H_0 เป็นจริง

Z_{β} = ค่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งปกติ ณ β โดยค่า β คือ โอกาสในการตัดสินใจยอมรับ H_0 ในกรณีที่ H_0 ไม่จริง

σ = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการแจกแจงของประชากร

ES = Effect size

3. กำหนดระดับนัยสำคัญ (Level of Significant หรือ α)

ระดับนัยสำคัญคือการกำหนดขอบเขตพลาดเคลื่อนประเภท I ที่ยอมให้เกิดในงานวิจัย โดยปกติเรามักจะเลือกระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ และ 0.01 หรือที่มีระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และ 99% ตามลำดับ

4. กำหนดขนาด effect size

Effect size หมายถึง ขนาดความแตกต่างของผลลัพธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง H_0 และ H_1 โดยมีเกณฑ์ ดังนี้

$ES = 0.2\sigma$ ทำให้กลุ่มตัวอย่างมีขนาดใหญ่

$ES = 0.5\sigma$ ทำให้กลุ่มตัวอย่างมีขนาดกลาง

$ES = 0.8\sigma$ ทำให้กลุ่มตัวอย่างมีขนาดเล็ก

จากสูตรข้างต้น กำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% สามารถคำนวณหา Effect size

ดังนี้

$ES = 0.2\sigma$

$$n = (1.96 + 1.64)^2 (\sigma / 0.2\sigma)^2$$

$$= 324 \text{ ตัวอย่าง}$$

$ES = 0.5\sigma$

$$n = (1.96 + 1.64)^2 (\sigma / 0.5\sigma)^2$$

$$= 51.84 \text{ ตัวอย่าง} \approx 52 \text{ ตัวอย่าง}$$

$ES = 0.8\sigma$

$$n = (1.96 + 1.64)^2 (\sigma / 0.8\sigma)^2$$

$$= 20.36 \text{ ตัวอย่าง} \approx 21 \text{ ตัวอย่าง}$$

จะเห็นได้ว่าที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เมื่อ Effect size ลดลงขนาดกลุ่มตัวอย่างจะเพิ่มมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้ถือได้ว่ามีกลุ่มตัวอย่างมีขนาดเล็ก ดังนั้นจำนวนครั้งที่น้อยที่สุดในการค้นหาคำตอบคือ 21 ครั้ง ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ 25 ครั้งในการค้นหาคำตอบทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างและความซับซ้อนในการออกแบบ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวประทุมรัตน์ ทักษะเศรษฐี เกิดวันที่ 12 ตุลาคม 2519 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในปีการศึกษา 2542 หลังจากนั้นได้เข้าทำงานที่บริษัทเอกชน มีประสบการณ์ในการทำงาน 10 ปี จึงเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552