

การศึกษาการจัดเรียงตัวของแผ่นคั้งในเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอ  
STUDY OF THE REARRANGING ON WEB'S I-BEAM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาคณะมหัฒศุตวปริญญวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีลาตศึทนา 2557

การศึกษาการจัดเรียงตัวของแผ่นตั้งในเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอ  
STUDY OF THE REARRANGING ON WEB'S I-BEAM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

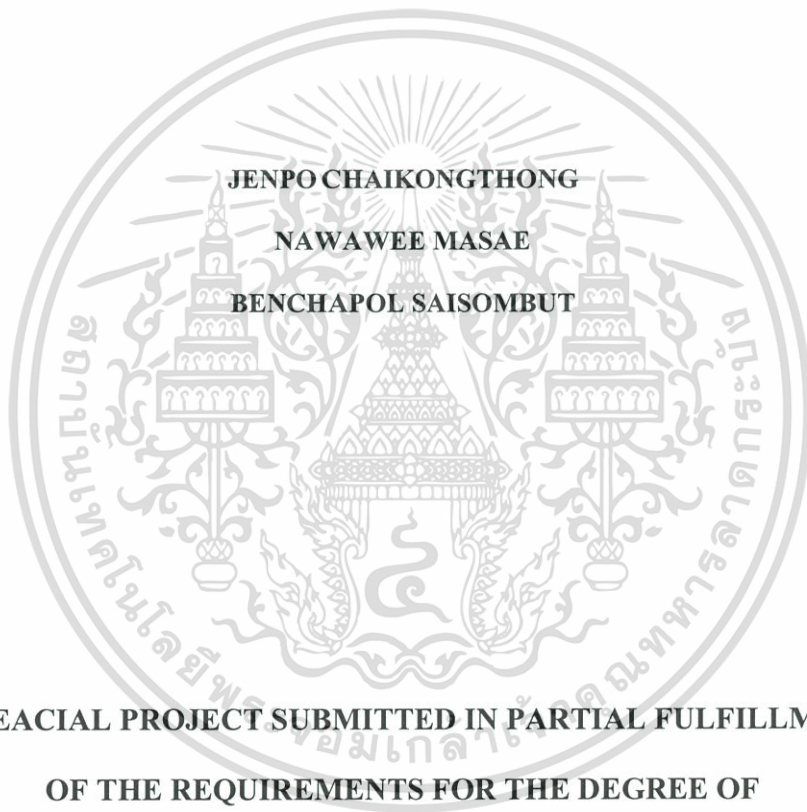
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **STUDY OF THE REARRANGING ON WEB'S I-BEAM**



**A SPEACIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF**

**BECHELOR OF CIVIL ENGINEERING**




**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการจัดเรียงตัวของแผ่นดินในเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอ		
นักศึกษา	นาย เจนภพ ไชยคงทอง	รหัสนักศึกษา	54010238
	นาย นาวาวี มะแส	รหัสนักศึกษา	54010702
	นาย เบลูจพล ไสยสมบัติ	รหัสนักศึกษา	54010743
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร		

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	
ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤกษ์	
ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร	
ดร.อัญจวิทย์ สุจริตพงศ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.นันทวัฒน์ จรัสโรจน์ธนเดช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 25 เดือน พค พ.ศ.2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาการจัดเรียงตัวของแผ่นตั้งในเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอ

นาย เจนภพ	ไชยคทอง	54010238
นาย นาวาวิ	มะแส	54010702
นาย เบญจพล	ไสยสมบัติ	54010743
ดร. อาทิตย์	เพชรศิธร	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557		

## บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน ได้มีเหล็กgrupพรรณมากมายหลายแบบที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันไป จากการสังเกตและวิเคราะห์รูปร่างของเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอ พบว่าในการออกแบบรูปหน้าตัดให้เป็นรูปตัวไอนั้น มีหลักการคือ เพื่อต้องการให้หน้าตัดมีค่า  $I$  (Moment of inertia) ที่สูง เนื่องจากค่า  $I$  จะแปรผันตามความสูงของหน้าตัดกำลังสาม แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ เมื่อยึดหน้าตัดออกไปมาก จะทำให้หน้าตัดมีลักษณะชะลูด ส่งผลให้เกิดการโก่งเดาะขึ้นที่แผ่นตั้งรับแรงอัด WLB (Web local buckling) ของเหล็กgrupพรรณดังกล่าว จึงได้มีความสนใจที่จะศึกษาการเปลี่ยนรูปแบบการวางตัวของแผ่นตั้งในเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอ เพื่อลดการโก่งเดาะที่แผ่นตั้งรับแรงอัดที่เกิดขึ้น โดยการศึกษาครั้งนี้ได้มีการจัดทำโมเดลตัวอย่างไว้สองแบบ แบบแรกคือแบบปรกติ และแบบที่สองที่เรียกว่าแบบ “ซิกแซก” ซึ่งได้ทำการทดสอบการรับโมเมนต์ดัดของโมเดลทั้งสองแบบ ผลการทดสอบพบว่าในรูปแบบแรกที่เป็นแบบปรกติ พบว่ารับแรงกดแบบ Middle-third ได้ 5.233 ตัน ก่อนการวิบัติแบบโก่งเดาะที่แผ่นตั้งรับแรงอัด WLB (Web local buckling) และในรูปแบบที่ได้มีการปรับปรุงแล้วสามารถรับแรงกดได้ถึง 9.804 ตัน ก่อนเกิดการวิบัติที่จุดคราก Yielding Failure โดยไม่เกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะที่แผ่นตั้งรับแรงอัด WLB (Web local buckling) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเหล็กที่ใช้ พบว่าในรูปแบบที่มีการปรับปรุงมีน้ำหนักเหล็กเพิ่มขึ้นเพียง 3.59% จากผลการทดสอบดังกล่าวทำให้เชื่อได้ว่า การศึกษาครั้งนี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอต่อไปในอนาคต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในงานทางด้านวิศวกรรมก่อสร้างให้ดียิ่งขึ้น

# Study Of The Rearranging On Web's I-Beam

Mr. Jenpop	Chaikongthong	54010238
Mr.Nawawee	Masae	54010702
Mr.Benchapol	Saisombut	54010743
Mr.Artit	Petchsasithon	Advisor

## ABSTRACT

There are many different types of steel beam that various size and shapes. An observation and analysis the shape of the I-Beam and the reason of I-Beam must being I-Shape. The principle is to design cross-section as much as have a high I value (Moment of inertia), because Moment of inertia is varies with a height of cross-section in unit cubed. On the other hand, the problem is when the cross-section have more height, it will be slender and buckling on web. So, there are interesting to design different rearranging web's I-beam, in order to prevent buckling. There are 2 cases, general beam and new design, zigzag array. They were testing in 2 point loads method, then resulted 5.233 tons and 9.804 tons respectively. The general I-beam was web clipping failed and zigzag I-beam was yield failed without web buckling. In addition to this, a comparison of weight between general and zigzag I-beam, zigzag I-beam have more weight just 3.59% than general I-beam. To conclude, this research will be guide line for design and potentially improve steel beam's strength, it could be efficient in construction engineering.

## กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษของกราบขอบพระคุณ ดร. อาทิตย์ เพชรศศิธร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ จนทำให้โครงการพิเศษนี้บรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี

ส่วนหนึ่งของการสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้ต้องขอขอบพระคุณ บริษัท Siam Yamato Steel Co., Ltd. (SYS) ที่มอบทุนสนับสนุนการวิจัยปริญญาโทฉบับนี้ ทางคณะผู้จัดทำมีความทราบซึ่งเป็นอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความดีและก่อประโยชน์แก่ส่วนรวม คณะผู้วิจัย ขอมอบความดีทั้งปวงให้แก่บิดาและมารดา ตลอดจนคุณอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยส่งเสริมให้คณะผู้วิจัยได้มีความรู้ความสามารถและประสบความสำเร็จในการศึกษา



เจนภพ ไชยทอง  
นาวี มะเส  
เบญจพล ไสยสมบัติ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญเนื้อหา .....	IV
สารบัญตาราง .....	IX
สารบัญรูป .....	X
1. บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	2
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 กาน (Beams หรือ Girders) .....	3
2.2 โมเมนต์ดัด แรงเฉือน และการโก่งตัว .....	4
2.2.1. โมเมนต์ดัด (M) .....	4
2.2.2. แรงเฉือน (V) .....	4
2.2.3. การแอนหรือโก่งตัวในแนวตั้ง ( $\Delta$ ).....	5
2.3 พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของกาน .....	6

2.3.1.พฤติกรรมในช่วงอีลาสติก .....	7
2.3.2.พฤติกรรมในช่วงพลาستيك .....	8
2.4.ลักษณะการวิบัติของคาน .....	9
2.5.การจำแนกประเภทของรูปตัด .....	10
2.6.กำลังต้านทาน โมเมนต์คัตประลัย $M_u$ .....	11
2.6.1.กำลังต้านทาน โมเมนต์คัตประลัยของรูปตัดแบบคอมแพค .....	11
2.6.1.1.ถ้าระยะค้ำยัน $L_b \leq L_p$ .....	11
2.6.1.2.ถ้าระยะค้ำยัน $L_p < L_b \leq L_r$ .....	12
2.6.1.3.ถ้าระยะค้ำยัน $L_b > L_r$ การวิบัติเป็นแบบLTB ในช่วงอีลาสติก .....	13
2.6.2.กำลังต้านทาน โมเมนต์คัตประลัยของรูปตัดแบบไม่คอมแพค .....	15
2.6.2.1. เมื่อ $\lambda \leq \lambda_n$ กำลังต้านทาน โมเมนต์คัตประลัย $M_n = M_p$ .....	15
2.6.2.2. เมื่อ $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ .....	15
2.6.2.3. เมื่อ $\lambda > \lambda_r$ .....	15
2.6.3.กำลังรับแรงเฉือนประลัย .....	18
2.7.ระยะแอ่นหรือโก่งตัวที่ยอมให้ .....	19
2.8.ผลของการกระทำของน้ำหนักแบบจุด .....	19
2.8.1. กรณีที่เหล็กแผ่นตั้งจะเกิดการคราก .....	20
2.8.1.1. น้ำหนักแบบจุดกระทำในช่วงคาน .....	20
2.8.1.2. น้ำหนักแบบจุดกระทำใกล้กับหรือที่ปลายคาน .....	20

2.8.2. กรณีที่เหล็กแผ่นตั้งจะเกิดการ โกง .....	20
2.8.2.1. น้ำหนักแบบจุด ห่างจากปลายคานไม่น้อยกว่าระยะ $d/2$ .....	20
2.8.2.2. น้ำหนักแบบจุด ห่างจากปลายคานน้อยกว่าระยะ $d/2$ .....	21
2.8.3. กรณีแผ่นตั้งเกิดการเซ .....	21
2.8.3.1. เมื่อ $(d_c/t_w)/(I/b_f) \leq 2.3$ .....	21
2.8.3.2. เมื่อ $(d_c/t_w)/(I/b_f) \leq 1.7$ .....	21
2.9. วิธีออกแบบคาน .....	21
2.10 การต่อโครงสร้าง โดยการเชื่อม .....	22
2.10.1 แบบของการเชื่อมต่อ.....	23
2.10.1.1 การเชื่อมต่อแบบฟิลเลท .....	23
2.10.1.2 การเชื่อมแบบต่อชนหรือในร่อง .....	23
2.10.1.3 การเชื่อมอดแบบปลั๊ก หรือสลอต .....	23
2.10.2 การตรวจสอบการเชื่อม .....	24
2.10.2.1 การวิบัติของรอยต่อเชื่อม .....	24
2.10.3 การออกแบบรอยต่อเชื่อม .....	26
2.10.3.1 การต่อเชื่อมแบบฟิลเลทหรือแบบต่อทาบ .....	26
2.10.3.1.1 มาตรฐาน LRFD .....	27
2.10.4 หน่วยแรงบนรอยเชื่อม .....	28
2.10.5 วิธีออกแบบรอยต่อเชื่อมเพื่อรับแรงร่วมศูนย์ .....	30
2.10.6 วิธีออกแบบรอยต่อเชื่อมต่อรับแรงเยื้องศูนย์ .....	31

	หน้า
2.10.7 การต่อปลายคาน .....	31
3. วิธีการทดสอบ .....	31
3.1 ขั้นตอนการออกแบบ .....	35
3.1.1 กำหนดขนาดของคาน .....	35
3.1.1.1 หาค่าความกว้างของปีกคาน .....	35
3.1.1.2 หาค่าความสูงของแผ่นดั่ง .....	35
3.1.2 หาค่าลึงรับแรงเฉือนของรอยเชื่อมบนเนื้อที่ประสิทธิผลแบบ Flat fillet .....	36
3.1.2.1 รอยเชื่อมระหว่างแผ่นดั่งของคานที่ตัดแปลง .....	36
3.1.2.2 รอยเชื่อมแผ่นดั่งในคานที่ยังไม่ตัดแปลง .....	37
3.1.2.3 รอยเชื่อมแผ่นดั่งในคานที่ตัดแปลงแล้ว .....	37
3.1.3 หาค่าแรงเฉือนประลัยของหน้าตัดที่ยังไม่ได้ตัดแปลง .....	37
3.1.4 ตรวจสอบเหล็กแผ่นดั่งของคาน .....	38
3.1.4.1 ค่าแรงอัดที่ทำให้เกิดการครากของเหล็กแผ่นดั่ง .....	38
3.1.4.2 ค่าแรงอัดที่ทำให้เกิดการโก่งที่เหล็กแผ่นดั่ง .....	38
3.2 ขั้นตอนการทำชิ้นงานทดสอบ .....	39
3.3 การทดสอบการรับแรงของชิ้นคานตัวอย่าง .....	42
4. ผลการทดลอง .....	48
4.1 การปรับเทียบค่าของอุปกรณ์ .....	48

4.2 กานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งตรง .....	50
4.3 กานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งซิกแซก .....	52
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	55
5.1 สรุปผล .....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	55



# สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ $C_d$ .....	6
2.2 ตารางอัตราส่วนของความกว้างต่อความหนา.....	10
2.3 พารามิเตอร์ของกำลังต้านทาน โมเมนต์ตัด.....	17
2.4 ขนาดเล็กที่สุดของขาเชื่อม.....	27
4.1 ตารางปรับเทียบค่าแรงกด.....	48
4.2 ผลการทดสอบคานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งตรง โดยวัดการแอ่นตัวกึ่งกลางคาน.....	50
4.3 ผลการทดสอบคานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งฉาก โดยวัดการแอ่นตัวกึ่งกลางคาน.....	52



# สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 คานในโครงสร้างหลังคา .....	3
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยึดหดตัวของเหล็กโครงสร้าง .....	7
2.3 การกระจายของหน่วยแรงคัตและหน่วยการยึดหดตัว.....	8
2.4 กำลังต้านทานแรงเฉือนประลัย .....	14
2.5 ตัวอย่างของค่า $C_b = \frac{1.25M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$ .....	14
2.6 ตัวอย่างการหากำลังต้านทานแรงคัตประลัยของรูปตัดแบบไม่คอมแพค .....	16
2.7 กำลังต้านทานแรงเฉือนประลัย .....	18
2.8 การกระทำของน้ำหนักแบบจุดบนคาน .....	20
2.9 ลักษณะการต่อเชื่อม .....	24
2.10 ระนาบของการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน .....	25
2.11 เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อมแบบต่อทาบ .....	26
2.12 หน่วยแรงบนรอยเชื่อม .....	29
2.13 การรับแรงกระทำในแนวตั้งฉาก .....	30
2.14 รอยต่อเชื่อมรับแรงเยื้องศูนย์กลาง .....	31
2.15 รอยต่อเชื่อมปลายคานช่วงเดียว.....	32
2.16 รอยเชื่อมที่ปลายคาน .....	34
3.1 หน้าตัดแผ่นเหล็กที่ออกแบบ.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป	หน้า
3.2 คัดแผ่นเหล็กให้ได้ขนาดและความยาวตามที่ออกแบบ .....	39
3.3 พับแผ่นเหล็กให้ได้ขนาด .....	40
3.4 นำชิ้นส่วนแผ่นดั่งและแผ่นนอนมาเชื่อมติดกัน .....	40
3.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์.....	41
3.6 โครงรับแรงทดสอบ .....	42
3.7 Hydraulic jack.....	42
3.8 คานถ่ายแรงแบบแรงกระทำสองจุด .....	43
3.9 Dial gauge .....	43
3.10 Load cell .....	44
3.11 Data logger .....	44
3.12 ติดตั้งคานขึ้นแท่นsupport .....	45
3.13 ติดตั้งคานถ่ายแรงแบบ Middle Third .....	45
3.14 วางเครื่องอัดไฮดรอลิก Hydraulic jack .....	46
3.15 ติดตั้งDial gauge ที่กึ่งกลางคาน .....	46
3.16 ปรับแก้ค่า Hydraulic jack กับ Load cell .....	47
3.17 อ่านค่าจาก Data logger .....	47
4.1 กราฟแสดงการปรับค่าของอุปกรณ์ โดยเทียบระหว่างไฮดรอลิกแจค กับ โหลดเซล.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการ โกงตัวกับแรงกด ของคานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งตรง.....	51
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการ โกงตัวกับแรงกด ของคานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งซิกแซก.....	53
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการ โกงตัวกับแรงกด ของคานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งซิกแซกเปรียบเทียบกับคาน เหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งตรง.....	54



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญญานิพนธ์

ในปัจจุบันได้มีเหล็กgrupพรรณมากมายหลายแบบที่มาขนาดและรูปร่างแตกต่างกันไป จากการสังเกตและวิเคราะห์รูปร่างของเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอ พบว่าในการออกแบบรูปหน้าตัดให้เป็นรูปตัวไอนั้น จุดประสงค์เพื่อต้องการให้หน้าตัดมีค่า I (Moment of inertia) ที่สูง เนื่องจากค่า I จะแปรผันตามความสูงของหน้าตัดกำลังสาม แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ เมื่อยึดหน้าตัดออกไปมาก จะทำให้หน้าตัดมีลักษณะ ชะลูด ส่งผลให้เกิดการโก่งเคาะขึ้นที่แผ่นตั้งรับแรงอัด Web Crippling ของเหล็กgrupพรรณดังกล่าว จึงได้มีความสนใจที่จะศึกษาการเปลี่ยนรูปแบบการวางตัวของแผ่นตั้งในเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอ ในการรับแรงกดที่ทำให้เกิด Bending moment

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความแตกต่างของการจัดเรียงตัวของแผ่นตั้งในเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอสองรูปแบบ เปรียบเทียบจากผลที่เกิดขึ้น
- 1.2.2 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของเหล็กgrupพรรณต่อไปในอนาคต

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษารูปแบบการใช้งานของเหล็กgrupพรรณรูปตัวไอ ในรูปแบบของคานประกอบขนาดเล็ก
- 1.3.2 ใช้มาตรฐาน AISC/LRFD ในการออกแบบคาน กำหนดค่า  $f_y = 2500$  ksc  $E = 2 \times 10^6$
- 1.3.3 ประกอบคานด้วยวิธีการเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.4 คานรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบ 2 จุด บนฐานรองรับ 2 จุด
- 1.3.5 วิเคราะห์ลักษณะของการวิบัติเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบจุดของคาน
- 1.3.6 สรุปผลการทดสอบระหว่างเหล็กทั้ง 2 ลักษณะ

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

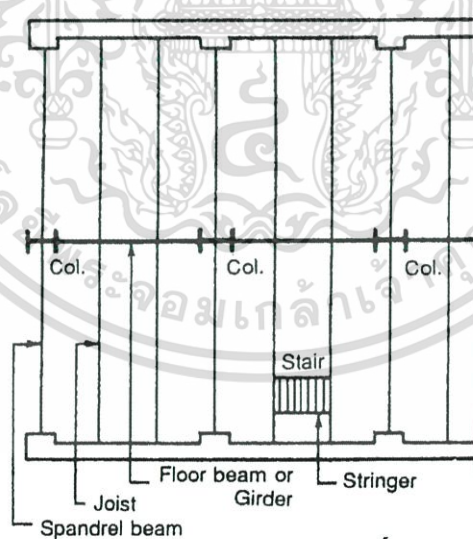
- 1.4.1 ศึกษาหัวข้อที่สนใจ เพื่อเลือกมาทำงานวิจัย
- 1.4.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการวิจัยของหัวข้อ
- 1.4.3 หาข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการใช้งานของเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอ
- 1.4.4 ตั้งสมมติฐาน กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย
- 1.4.5 ศึกษาและหาข้อมูลเกี่ยวกับคานเหล็ก รูปพรรณรูปตัวไอ
- 1.4.6 ออกแบบคานที่ใช้ในการทดสอบ
- 1.4.7 จัดหาวัสดุที่ใช้ทำโมเดล
- 1.4.8 ทำโมเดลตัวอย่างที่จะนำมาทดลอง
- 1.4.9 นำโมเดลตัวอย่างมาทดลองเพื่อวิเคราะห์ลักษณะของการวิบัติ
- 1.4.10 สรุปผลการทดลองโดยเปรียบเทียบระหว่างคานเหล็ก 2 ลักษณะ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1. คาน (Beams หรือ Girders)

คานเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ทำหน้าที่รับแรงดัด หรือ โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ซึ่งเกิดจากน้ำหนักหรือแรงกระทำในแนวขวางตั้งฉากกับแนวแกนของส่วน โครงสร้าง ทำให้คานแอ่นหรือโก่งตัว ส่วน โครงสร้างที่ทำหน้าที่แบบเดียวกับคาน แต่เรียกชื่อต่างไป ได้แก่ ตง (Joist) ซึ่งวางตั้งรับน้ำหนักที่ถ่ายจากพื้นโดยตรง คานเอก (Main Beam) เป็นคานขนาดใหญ่ที่อาจอยู่โดยรอบพื้นที่ห้องและรับน้ำหนักจากตงหรือเป็นคานที่วางขนานรับน้ำหนักที่ถ่ายจากพื้นสะพาน คานขอบ (Spandrel beam) เป็นคานริมนอกของอาคารรับน้ำหนักที่ถ่ายจากพื้นและผนัง คานแม่บันได (Stringer) เป็นคานรับน้ำหนักจากพื้นบันได และถ่ายน้ำหนักให้กับคานอื่นต่อไป แป (Purlin) เป็นคานใน โครงสร้างหลังคาที่วางพาดจากจั่วหนึ่ง ไปอีกจั่วหนึ่ง ทำหน้าที่รับน้ำหนักจากเครื่องมุง



รูปที่ 2.1 คานในโครงสร้างหลังคา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติ การคำนวณออกแบบคาน จะนำโมเมนต์คัตที่คานต้องรับหรือต้านทานมาพิจารณาหาขนาดรูปคัตคานที่ต้องใช้ แล้วจึงตรวจสอบว่าคานที่เลือกใช้นั้นมีกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนที่กระทำได้หรือไม่ ทั้งนี้ ต้องไม่ลืมพิจารณาถึงการโค้งหรือแอ่นตัวของคานในสภาวะที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานด้วย เพราะถ้าคานที่เลือกใช้มีการแอ่นหรือ โค้งตัวมากจะทำให้เกิดความเสียหายอื่นเช่น ฝ้าเพดานฉาบปูนแตกร้าว ไม่สามารถปิด-เปิดประตู หน้าต่างได้ตามปกติ เป็นต้น

## 2.2. โมเมนต์คัต แรงเฉือน และการโค้งตัว

2.2.1. โมเมนต์คัต (M) ที่กระทำต่อคานที่หน้าตัดใดๆ ซึ่งอยู่ทางด้านใดด้านหนึ่งของรูปคัต เป็นผลรวมทางพีชคณิตของโมเมนต์คัตที่ได้จากการกระทำของน้ำหนักหรือแรงภายนอกที่อยู่ทางด้านใดด้านหนึ่งของรูปคัตนั้น ค่าโมเมนต์คัตสูงสุด ( $M_{max}$ ) ที่วิเคราะห์ได้จากทฤษฎีอิลาสติกของการวิเคราะห์โครงสร้าง อาจเขียนได้ในรูปสมการ ดังนี้

$$M_{max} = C_{dm} WL$$

ในที่นี้  $W =$  น้ำหนักทั้งหมดที่กระทำบนคาน

$L =$  ช่วงความยาวของคานระหว่างฐานรองรับที่ปลายทั้งสอง

$C_{dm} =$  ค่าสัมประสิทธิ์

ขึ้นกับลักษณะของน้ำหนักที่กระทำและลักษณะการยึดปลายคาน

ส่วนหน่วยแรงคัตในช่วงอิลาสติกพิจารณาได้จากสูตรแรงคัต  $f_c = Mc/I$  ซึ่งมีค่าสูงสุดที่หลังคานและท้องคาน โดยที่  $c$  เป็นระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน และ  $I$  เป็น โมเมนต์อินเนอร์เซียของรูปคัตรอบแกนที่รับ โมเมนต์คัต (M)

2.2.2. แรงเฉือน (V) ที่กระทำต่อคานที่หน้าตัดใดๆ ซึ่งอยู่ทางด้านใดด้านหนึ่งของรูปคัต เป็นผลรวมทางพีชคณิตของน้ำหนักหรือแรงกระทำภายนอกที่อยู่ทางด้านใดด้านหนึ่งของรูปคัตนั้น

ส่วนหน่วยแรงเฉือนในแนวอนที่เกิดจากแรงเฉือน (V) ในแนวตั้ง พิจารณาได้จากสูตร  $f_v = VQ/It$  ซึ่งมีค่าสูงสุดที่แนวแกนสะเทินของรูปคัต โดยที่  $Q$  เป็น โมเมนต์รอบแกนสะเทินของเนื้อที่ส่วนที่อยู่นอกแนวที่ต้องการหาหน่วยแรงเฉือน และ  $t$  เป็นความหนาของรูปคัตส่วนที่ต้องการหาหน่วยแรงเฉือน

อย่างไรก็ดี เมื่อใช้คานเหล็กรูปพรรณ เช่น รูปตัดตัว W หรือตัว C หน่วยแรงเฉือนในปีกคานจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้น เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น จึงให้พิจารณาจากค่า “เฉลี่ย” ของหน่วยแรงเฉือนที่คำนวณจากสมการ  $f_v = V/d_{tw}$  โดยที่  $d$  และ  $t_w$  เป็นความลึกทั้งหมดของรูปตัดคานและความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง (web) ตามลำดับ

2.2.3. การแอ่นหรือโก่งตัวในแนวตั้ง ( $\Delta$ ) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีอิลาสติกโดย พิจารณาจากผลการกระทำของโมเมนต์คด จะได้ค่าการแอ่นหรือโก่งตัวสูงสุด ( $\Delta_{max}$ ) ที่เขียนอยู่ในรูปของสมการ ดังนี้

$$\Delta_{max} = C_d \frac{WL^3}{EI}$$

ในที่นี้  $W$  = น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่กระทำบนคาน

$L$  = ช่วงความยาวของคานระหว่างฐานรองรับที่ปลายทั้งสอง

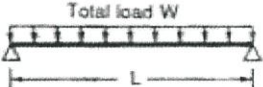
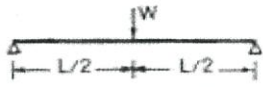
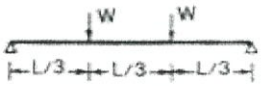
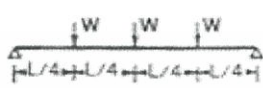
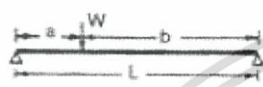

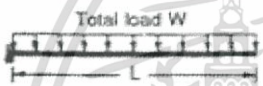

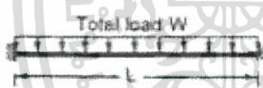
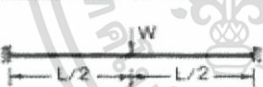

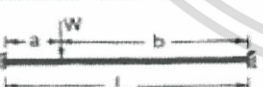
$E$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ

$I$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียของรูปตัดรอบแกนสะเทิน

$C_d$  = ค่าสัมประสิทธิ์

ขึ้นกับลักษณะของน้ำหนักกระทำและลักษณะของการยึดปลายคาน

ดังแสดงในตาราง 2.1

แบบของคานและการรับน้ำหนัก	$C_{dm}$	$C_d$
	$\frac{1}{8}$	$\frac{5}{384}$
	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{48}$
	$\frac{1}{3}$	$\frac{23}{648}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{19}{384}$
	$\frac{ab}{L^2} \frac{1}{9\sqrt{3}}$	$\frac{a}{L} \left(1 - \frac{a^2}{L^2}\right)^{\frac{3}{2}}$
	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{60}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8}$
	1	$\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{324}$
	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{192}$
	$\frac{5}{48}$	$\frac{7}{1920}$
	$\frac{ab^2}{L^3}$	

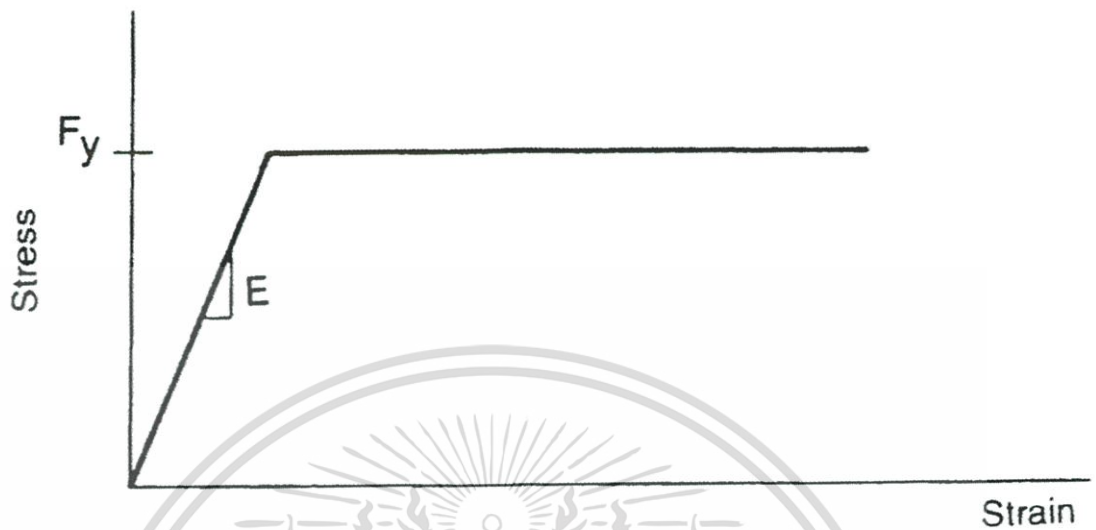
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์  $C_d$

### 2.3. พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคาน

พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดครอบแกนหลักของคานที่จะพิจารณาต่อไปนี้อาศัยสมมุติฐานว่าคานมีความสมมาตรทั้งสองแกน มีรูปตัดแบบคอมแพค (compact section) โดยมีการค้ำยันทางข้าง (lateral support) ที่ปีกคานด้านรับแรงอัดอย่างพอเพียง ไม่เกิดการบิดและโก่งตัวทางข้าง

และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดัดหรือหน่วยแรงอัดกับหน่วยการยืดหดตัวของเหล็กเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเป็นแบบอีลาสติก และพลาสติกโดยสมบูรณ์ โดยมีหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับหน่วยแรงที่จุดคราก ( $F_y$ ) ของวัสดุที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 4.2



### รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัวของเหล็กโครงสร้าง

พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดรอบแกนหลัก แบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงอีลาสติก และช่วงพลาสติก ตามความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดหดตัว ดังต่อไปนี้

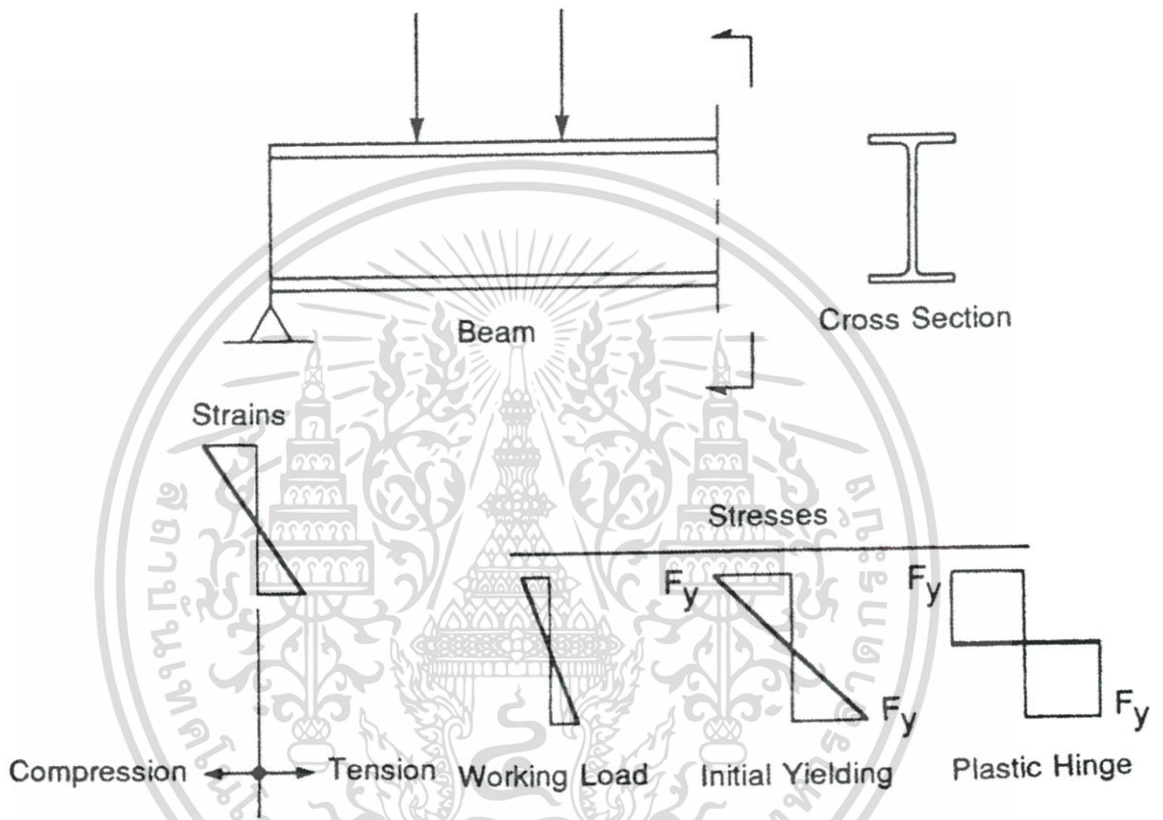
#### 2.3.1. พฤติกรรมในช่วงอีลาสติก

ขณะที่คานเริ่มรับน้ำหนักบรรทุก สามารถคำนวณหาหน่วยแรงดัด ( $f_b$ ) ณ จุดใด ๆ บนหน้าตัดคานที่เกิดจากโมเมนต์ดัดสูงสุด ( $M$ ) ได้โดยใช้สูตรของแรงดัด (Flexural Formula) ดังที่กล่าวข้างต้น นั่นคือ  $f_b = M_y/I_x$  ในเมื่อ  $I_x$  เป็น โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนสะเทิน การกระจายของหน่วยการยืดหดตัวและของหน่วยแรงดัดในขณะนี้เป็นเส้นตรงและเป็นสัดส่วนกัน โดยมีค่าเป็นศูนย์ที่แกนสะเทินและมีค่าสูงสุดที่ผิวบนและผิวล่างของคาน ดังรูปที่ 4.3 ถ้าให้  $c$  เป็นระยะห่างจากแกนสะเทินถึงผิวบนสุดและผิวล่างสุดของคาน ดังนั้น หน่วยแรงดัดที่หลังคานและที่ท้องคาน  $f_b = M_y/I_x$  หรือ โมเมนต์ดัดสูงสุดขณะนั้น  $M = (I_x/c)f_b$  หรือ  $M = S_x f_b$  นั่นเอง ในเมื่อ  $S_x = I_x/c$  ซึ่งเรียกว่า โมดูลัสอีลาสติกของหน้าตัด

เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น หน่วยแรงดัดและหน่วยการยืดหดตัวก็จะเพิ่มมากขึ้น โดยยังคงเป็นสัดส่วนกัน จนกระทั่ง หน่วยของการยืดหดตัวที่ผิวล่างและผิวบนของคานมีค่าเท่ากับหน่วยการยืดหดตัวที่จุดคราก (yield strain) ซึ่งหน่วยแรงดัดสูงสุดที่ผิวบนและผิวล่างของคานจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็ก ( $F_y$ ) โมเมนต์ดัดสูงสุดขณะนี้เป็น โมเมนต์ดัดที่ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เหล็กเริ่มคราก (yield moment :  $M_r$ ) มีค่าเท่ากับ  $S_x F_y$  ซึ่งเป็น โมเมนต์ดัดสูงสุดในช่วงอีลาสติก ที่เหล็กรูปดัดนั้นๆจะรับได้ อย่างไรก็ตามที่คานจะรับน้ำหนักจะมีหน่วยแรงคงค้าง (residual stress :  $F_r$ ) กระทำอยู่ก่อนซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวไม่เท่ากันของเหล็ก โครงสร้างที่ผลิตแบบรีดร้อน ดังนั้น คานเหล็กจะเริ่มครากที่หน่วยแรงเท่ากับ  $F_y - F_r$  นั่นคือ โมเมนต์ดัดที่ทำให้คานเหล็กเริ่มคราก  $M_r = S_x(F_y - F_r)$



รูปที่ 2.3 การกระจายของหน่วยแรงดัดและหน่วยการยืดหดตัว

### 2.3.2. พฤติกรรมในช่วงพลาสติก

เมื่อคานต้องรับน้ำหนักบรรทุกหรือ โมเมนต์ดัดเพิ่มมากขึ้นอีก หน่วยการยืดหดตัวบนหน้าตัดคานก็จะเพิ่มมากขึ้นและมีค่าเกินกว่าหน่วยการยืดหดตัวที่จุดคราก แต่หน่วยแรงดัดที่ผิวบนสุดและผิวล่างสุดของคานจะไม่เพิ่มขึ้นอีก และมีค่าเท่าเดิมคือเท่ากับหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็ก เพราะเหล็กมีกำลังรับแรงได้ไม่เกินกว่ากำลังที่จุดคราก ( $F_y$ ) นั่นเอง (ตามสมมุติฐานของรูปที่ 4.2) แต่เพื่อต้านทานต่อ โมเมนต์ดัดที่กระทำเพิ่มขึ้น หน่วยแรงดัดจะเริ่มแผ่จากผิวบนและผิวล่างของคานเข้าหาแนวแกนสะเทินเรื่อยๆ ฉะนั้นขณะนี้บางส่วนของหน้าตัดจะเกิดการคราก การแผ่ของหน่วยแรงดัดเข้าหาแนวสะเทินจะมีต่อไปเมื่อ โมเมนต์ดัดกระทำเพิ่มมากขึ้นอีก จนกระทั่งตลอดทั้งหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดของคานเกิดการครากหมด ( เรียกว่า full plastification ) โมเมนต์คัตที่กระทำขณะนี้ถือเป็นค่าสูงสุดที่หน้าตัดคานจะรับได้ในช่วงพลาสติก ( ก่อนที่คานจะวิบัติ ) เรียกว่า โมเมนต์คัตพลาสติก ( plastic moment :  $M_p$  ) ดังรูปที่ 4.3 และมีค่าเท่ากับ  $Z_x F_y$  ในเมื่อ  $Z_x$  เป็น โมดูลัสพลาสติกของหน้าตัด ( plastic section modulus )

ตรงตำแหน่งที่โมเมนต์คัตมีค่าเท่ากับ โมเมนต์คัตพลาสติก จะมีสภาพคล้ายจุดยึดหมุน เรียกว่า จุดหมุนพลาสติก ( plastic hinge ) นั่นคือ ถึงแม้ว่าจะมีน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นอีก โมเมนต์คัตตรงตำแหน่งนี้จะไม่เพิ่มขึ้นอีกเลย

อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์คัตพลาสติกต่อโมเมนต์คัตที่จุดคราก เรียกว่าตัวประกอบรูปตัด ( shape factor ) มีค่าเท่ากับ 1.50 สำหรับรูปตัดสี่เหลี่ยมตัน และมีค่า 1.10 ถึง 1.20 สำหรับเหล็ก รูปพรรณมาตรฐาน นั่นคือ คานรูปตัดแบบคอมแพคที่มีค้ำยันทางข้างอย่างพอเพียงจะสามารถรับโมเมนต์คัตสูงสุดเท่ากับ โมเมนต์คัตพลาสติก โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก โมเมนต์คัตที่จุดครากอีกอย่างน้อย 10 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่คานจะวิบัติ อนึ่งหน่วยแรงคงค้าง ไม่มีผลกระทบต่อโมเมนต์คัตพลาสติก

อย่างไรก็ดี ถ้าคานมีการค้ำยันทางข้างไม่เพียงพอ คานจะสามารถรับโมเมนต์คัตได้ไม่ถึง  $M_p$  เพราะอาจจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะแห่งก่อนหรืออาจเกิดการบิดและโก่งตัวเซออกทางข้าง การวิเคราะห์ขั้นสูงเพื่อศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับการบิดและโก่งทางข้าง จะหากำลังรับโมเมนต์คัตทั้งในช่วงอีลาสติก และพลาสติกของคานในลักษณะนี้ได้ ซึ่งพบว่า

$$\text{โมเมนต์คัตวิกฤตในช่วงอีลาสติก: } M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w}$$

ส่วนโมเมนต์คัตวิกฤตในช่วงอินีลาสติก ได้จากการแทนค่า  $E$  และ  $G$  ด้วย  $E_T$  และ  $G_T$  ตามลำดับ

จากค่าโมเมนต์คัตวิกฤตที่ได้ จะนำไปพิจารณาหาข้อกำหนดเกี่ยวกับระยะค้ำยันทางข้าง ดังที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน AISC/LRFD

## 2.4. ลักษณะการวิบัติของคาน

จากพฤติกรรมการรับโมเมนต์คัตของคานที่กล่าวข้างต้น จะเห็นว่า คานเป็นส่วน โครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วน โครงสร้างสองส่วน คือส่วน โครงสร้างที่รับแรงดึงส่วนหนึ่งและส่วน โครงสร้างที่รับแรงอัดอีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นลักษณะของการวิบัติของคานเนื่องจาก โมเมนต์คัต จะประกอบด้วย การวิบัติเนื่องจากแรงดึงและแรงอัด โดยที่ด้านล่างของคานที่อยู่ใต้แนวแกน

สะพานจะวิบัติในลักษณะถูกดึงจนถึงจุดครากและยึดตัวออก ในขณะที่ด้านบนของคานที่อยู่เหนือแนวแกนสะพานจะวิบัติเนื่องจากการกระทำของแรงอัด ซึ่งอาจวิบัติในลักษณะของการโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (local buckling) หรือในลักษณะที่เกิดการบิดและโก่งตัวทางข้าง (lateral torsional buckling) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือร่วมกัน

การวิบัติในลักษณะของการโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (local buckling) อาจเกิดที่ปีกคานด้านที่รับแรงอัด (เรียกว่า Flange Local Buckling : FLB) หรือที่เหล็กแผ่นตั้งที่รับแรงอัด (เรียกว่า Web Local Buckling : WLB) ก่อนที่คานจะสามารถรับโมเมนต์คัตได้สูงสุดเท่ากับ โมเมนต์คัตพลาสติก ( $M_p$ ) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาของแต่ละชิ้นส่วน (width-thickness ratio) หากคานมีรูปตัดแบบคอมแพคซึ่งอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาของแต่ละชิ้นส่วนมีค่าน้อย และมีค้ำยันทางข้างที่ปีกรับแรงอัดอย่างพอเพียง จะสามารถรับโมเมนต์คัตได้สูงสุดเท่ากับ  $M_p$  ก่อนเกิดการวิบัติ

การออกแบบส่วน โครงสร้างรับแรงคัต-มาตรฐาน AISC/LRFD

## 2.5.การจำแนกประเภทของรูปตัด

มาตรฐาน AISC/LRFD จำแนกประเภทของรูปตัดเป็นแบบคอมแพค แบบไม่คอมแพค และแบบชะลุค โดยใช้อัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาซึ่งใช้สัญลักษณ์  $\lambda$  เป็นตัวกำหนด ดังตารางที่ 2.2 โดยให้  $\lambda_p$  เป็นพิกัดสำหรับรูปตัดแบบคอมแพคและ  $\lambda_r$  เป็นพิกัดสำหรับรูปตัดแบบไม่คอมแพค ดังต่อไปนี้

รูปตัดเป็นแบบคอมแพค ถ้า  $\lambda \leq \lambda_p$  และปีกคานเชื่อมต่อกับเหล็กแผ่นตั้งตลอดความยาว

รูปตัดเป็นแบบไม่คอมแพค ถ้า  $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

รูปตัดเป็นแบบชะลุค ถ้า  $\lambda > \lambda_r$

อนึ่ง หากปรากฏว่าชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งไม่คอมแพค ก็ให้ถือว่ารูปตัดนั้น ไม่คอมแพค

ชิ้นส่วน	อัตราส่วน $\lambda$	คอมแพค $\lambda_p$	ไม่คอมแพค $\lambda_r$
ปีกคาน	$b_f/2t_f$	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$0.83\sqrt{E/(F_y - F_r)}$
แผ่นตั้ง	$h/t_w$	$3.76\sqrt{E/F_y}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$

ตารางที่ 2.2 ตารางอัตราส่วนของความกว้างต่อความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้

$b_f, t_f$  = ความกว้างและความหนาของปีกคาน ตามลำดับ

$h$  = ระยะช่วงว่างระหว่างรอยพอกของเหล็กแผ่นตั้งของเหล็กรูปพรรณ

$t_w$  = ความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง

$E$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

$F_y$  = กำลังจุดครากของเหล็ก

$F_r$  = หน่วยแรงอัดคงค้างในปีกคาน = 700 กก./ตร.ซม. สำหรับเหล็กรูปพรรณ

ระยะค้ำยันทางข้าง

มาตรฐาน AISC/LRFD ให้พิจารณาระยะที่ทำค้ำยันทางข้าง  $L_b$  ซึ่งทำให้เกิดการวิบัติลักษณะต่างๆ ต่อไปนี้

ถ้าระยะ  $L_b \leq L_p$  การวิบัติของคานเกิดจากการรูดตลอดหน้าตัด

ถ้าระยะ  $L_p < L_b < L_r$  การวิบัติของคานเกิดจากการบิดและ โกงทางข้างในช่วงอีลาสติก

ถ้า  $L_b < L_p < L_r$  การวิบัติของคานเกิดจากการบิดและ โกงทางข้างในช่วงอินอีลาสติก

## 2.6. กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัย $M_u$

มาตรฐาน AISC/LRFD ให้พิจารณาออกแบบส่วน โครงสร้างที่รับ โมเมนต์ดัด โดยใช้หลักการว่า โมเมนต์ดัดที่กระทำซึ่งได้จากน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว  $M_u$  ต้องมีค่าไม่เกินกว่า กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดประลัย  $M_n$  ที่ลดค่าแล้วดังสมการ  $M_u \leq \phi_b M_n$

โดยที่  $\phi_b$  เป็นตัวคูณลดกำลัง มีค่าเท่ากับ 0.90 และ  $M_n$  เป็นกำลังระบุ หรือ เรียกในที่นี้ว่า กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดประลัยของรูปตัด

### 2.6.1. กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของรูปตัดแบบคอมแพค

กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดประลัยรอบแกนหลักของรูปตัดแบบคอมแพคขึ้นกับระยะค้ำยันด้านข้าง  $L_b$  ที่อาจทำให้คานวิบัติเนื่องจากการบิดและ โกงทางข้าง ดังต่อไปนี้

#### 2.6.1.1 .ถ้าระยะค้ำยัน $L_b \leq L_p$ :

กรณีรับ โมเมนต์ดัดรอบแกนหลัก  $M_{nx} = M_p = Z_x F_y \leq 1.5 M_y$

(ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้ โกงตัวมากเกินไปเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน นั่นคือให้ใช้  $Z_x/S_x \leq 1.5$ )

กรณีรับ โมเมนต์ดัดรอบแกนรอง กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดประลัย(ไม่

ขึ้นกับระยะค้ำยันด้านข้าง)  $M_{ny} = M_{py} = Z_y F_y$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1.2. ถ้าระยะค้ำยัน $L_p < L_b \leq L_r$ : การวิบัติเป็นแบบ LTB ในช่วงอิลาสติก

$$M_{nx} = C_b \left[ M_p - (M_p - M_r) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$$

$$\text{ในที่นี้ } C_b = \frac{12.5 M_{\max}}{2.5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

เมื่อ  $M_{\max}$  เป็นค่าสัมบูรณ์ ของ โมเมนต์ค้ดที่มากที่สุดในช่วงที่ไม่มีค้ำยัน

$M_A$  เป็นค่าสัมบูรณ์ ของ โมเมนต์ค้ดตรงจุด 1/4 ในช่วงที่ไม่มีค้ำยัน

$M_B$  เป็นค่าสัมบูรณ์ ของ โมเมนต์ค้ดตรงจุด 1/2 ในช่วงที่ไม่มีค้ำยัน

$M_C$  เป็นค่าสัมบูรณ์ ของ โมเมนต์ค้ดตรงจุด 3/4 ในช่วงที่ไม่มีค้ำยัน

อย่างไรก็ดี ในทุกกรณีอาจใช้ค่า  $C_b$  เท่ากับหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ได้รูปตัดที่ใหญ่ขึ้น

$C_b = 1.0$  สำหรับคานยื่น หรือเมื่อ โมเมนต์ค้ดที่อยู่ในช่วงที่ไม่มีการค้ำยัน มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่ามากของโมเมนต์ค้ดตรงจุดค้ำยัน

อนึ่งมาตรฐาน AISC/LRFD ปี ค.ศ. 1986 ใช้ค่า  $C_b = 1.75 + 1.05(M_1/M_2) + 0.3(M_1/M_2)^2 \leq 2.3$

เมื่อ  $M_1 < M_2$  และอัตราส่วนระหว่าง  $M_1/M_2$  มีค่าบวกเมื่อ โมเมนต์ค้ดทำให้เกิดการโค้งสองทาง และในทุกกรณีอาจพิจารณาใช้  $C_b = 1.0$

ระยะ  $L_p = 1.76 r_y \sqrt{E/F_y}$  สำหรับคานรูปตัดแบบตัวไอหรือคานที่ใช้เหล็กที่มีกำลังจุดครากต่างกันและคานรูปตัว c

ระยะ  $L_r = \frac{r_x X_1}{(F_y - F_r)} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (F_y - F_r)^2}}$  สำหรับคานรูปตัดแบบตัวไอหรือคานที่มีความสมมาตรแกนเดียวหรือสองแกน โดยมีเนื้อที่หน้าตัดของปีกคานรับแรงอัดมากกว่าหรือเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของปีกคานรับแรงดึง

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJ_A}{2}}$$

$$X_2 = 4 \frac{C_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{GJ}\right)^2$$

$S_x$  = โมดูลัสสถิติกของหน้าตัดรอบแกนหลัก

$E$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก

$G$  = โมดูลัสการเฉือนของเหล็ก (shear modulus)

$J$  = ค่าคงที่ของการบิด (torsional constant)

$F_y$  = กำลังจุดครากของเหล็ก

$I_y$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกน  $y$

$C_w$  = ค่าคงที่ของการบิดเบี้ยว (warping constant)

$F_r$  = หน่วยแรงอัดคงค้าง (700 กก./ซม.<sup>2</sup> สำหรับเหล็กรูปพรรณ และ 1150 กก./ซม.<sup>2</sup> สำหรับรูปตัดที่ได้จากการเชื่อม)

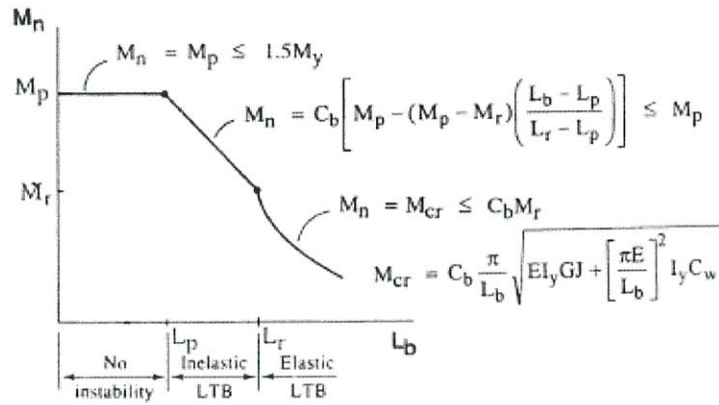
2.6.1.3. ถ้าระยะค้ำยัน  $L_b > L_p$  การวิบัติเป็นแบบ LTB ในช่วงอีลาสติก

$$M_{nx} = M_{cr} \leq M_p$$

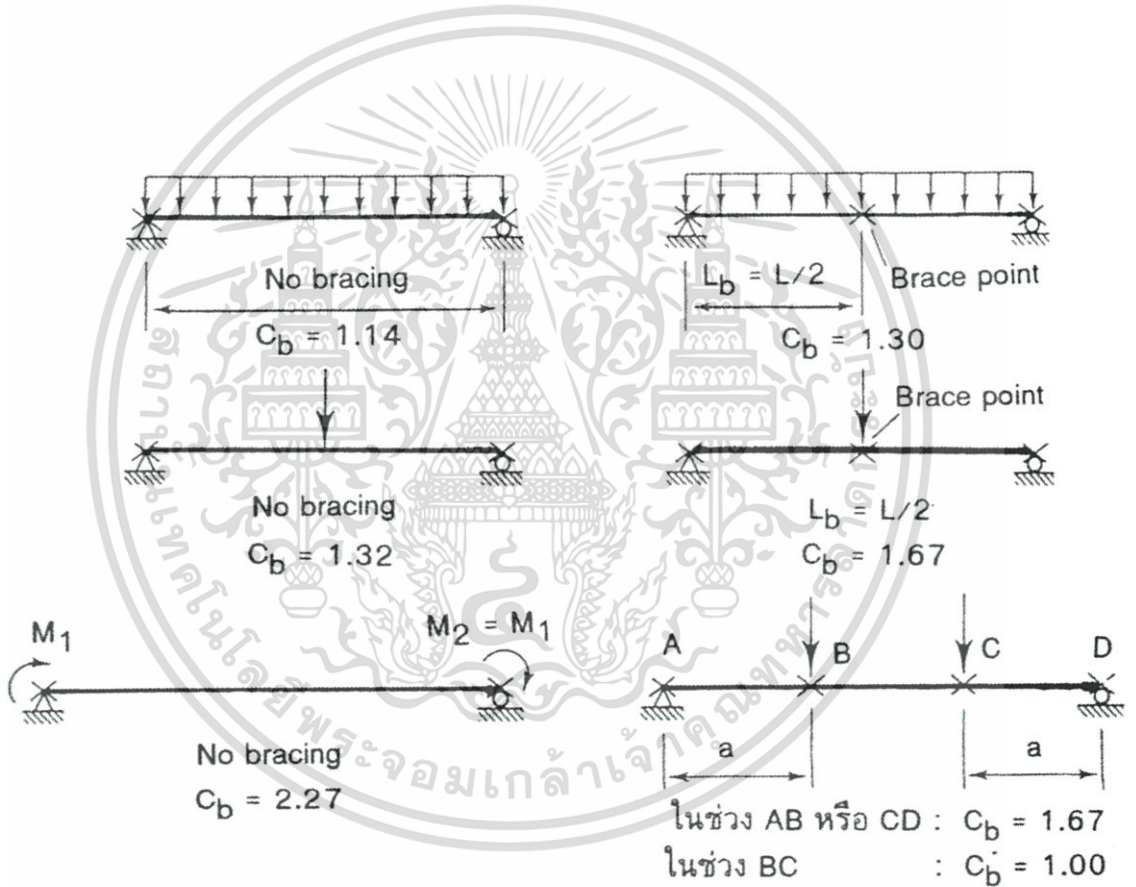
ในเมื่อ

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left[\frac{\pi E}{L_b}\right]^2 I_y C_w} = \frac{C_b S_x X_1 \sqrt{2}}{L_b / r_y} \sqrt{1 + \frac{X_1^2 X_2}{2(L_b / r_y)^2}}$$

สำหรับคานารูปตัดแบบตัวไอหรือคานาที่มีความสมมาตรแกนเดียวหรือสองแกน โดยมีเนื้อที่หน้าตัดของปีกคานารับแรงอัดมากกว่าหรือเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของปีกคานารับแรงดึง หรือคานาที่ใช้เหล็กที่มีกำลังจุดครากต่างกัน



รูปที่ 2.4 กำลังต้านทานแรงเฉือนประลัย



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของค่า  $C_b = \frac{1.25M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2. กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของรูปตัดแบบไม่คอมแพค

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยรอบแกนหลักของรูปตัดแบบไม่คอมแพคเป็นค่าน้อยที่สุดของกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยที่ได้จากการพิจารณาลักษณะของการวิบัติต่างๆ คือ ก) การบิดและ โกงทางข้าง LTB ข) การ โกงเฉพาะแห่งของปีกคาน FLB ค) การ โกงเฉพาะแผ่นของแผ่นดั่ง WLB

2.6.2.1. เมื่อ  $\lambda \leq \lambda_n$  กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัย  $M_n = M_p$

2.6.2.2. เมื่อ  $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยสำหรับการวิบัติแบบ LTB

$$M_n = C_b \left[ M_p - (M_p - M_r) \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \leq M_p$$

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยสำหรับการวิบัติแบบ FLB หรือ WLB

$$M_n = \left[ M_p - (M_p - M_r) \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right]$$

2.6.2.3. เมื่อ  $\lambda > \lambda_r$

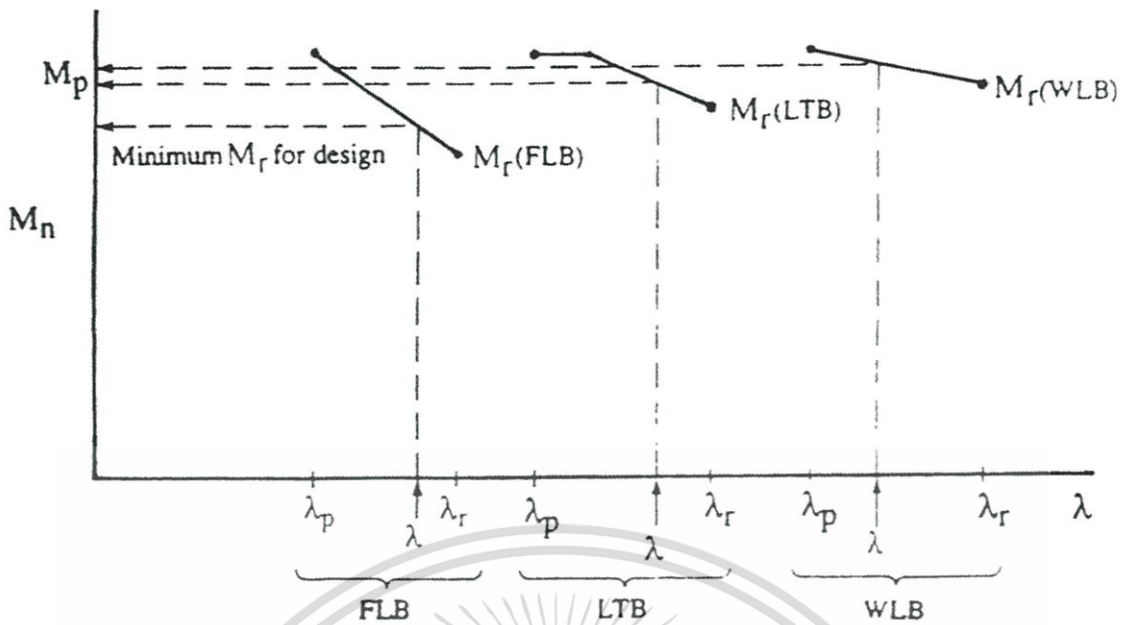
กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัย  $M_n = M_{cr} \leq M_p$

สำหรับคานเหล็กรูปพรรณรูปตัว I หรือ C จะหาค่า  $M_{cr}$  ได้ดังต่อไปนี้  
กรณีวิบัติแบบ LTB หาค่าของ  $M_{cr}$  โดยใช้สมการ

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left[ \frac{\pi E}{L_b} \right]^2 I_y C_w} = \frac{C_b S_x X_1 \sqrt{2}}{L_b / r_y} \sqrt{1 + \frac{X_1^2 X_2}{2(L_b / r_y)^2}}$$

กรณีวิบัติแบบ FLB โมเมนต์ดัด  $M_{cr} = 0.69 E S_x / (b_f / 2t_f)^2$

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าของ  $M_p$ ,  $M_r$ ,  $\lambda_p$  และ  $\lambda_r$  สำหรับสภาวะวิบัติของคานรูปตัดแบบต่างๆ  
สังเกตว่าสัญลักษณ์ของตัว  $\lambda$ ,  $\lambda_p$  และ  $\lambda_r$  มีความหมายต่างกัน



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดประลัยของรูปตัดแบบไม่คอมแพค

รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดประลัยของรูปตัดแบบไม่คอมแพค ซึ่งสามารถหาค่าได้จากตารางที่ 2.3 แล้วนำค่าที่ได้ในแต่ละกรณีมาประมาณ (interpolate) หาค่าของ  $M_n$  สำหรับพารามิเตอร์  $\lambda$  ที่ต้องการ ค่าน้อยที่สุดของ  $M_n$  เป็นกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของรูปตัดแบบไม่คอมแพค

Cross Section	$M_p$	Limit State	$M_r$	$\lambda$	$\lambda_p$	$\lambda_r$
Channels and doubly and singly symmetric I-shaped beams bending about major axis	$F_y Z_x$	LTB: doubly symmetric members and channels	$(F_y - F_r) S_x$	$L_b / r_y$	$1.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	* (see below)
		LTB: singly symmetric members	$(F_y - F_r) S_{xc}$ $\leq F_y S_{xt}$	$L_b / r_y$	$1.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	Value of $\lambda$ for which $M_{cr} = M_r$ with $C_b = 1$
		FLB	$(F_y - F_r) S_x$	$b/t$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.83 \sqrt{\frac{E}{F_y - 700}}$ for rolled shapes $0.62 \sqrt{\frac{E}{F_y - 1150}}$ for welded shapes
		WLB	$F_y S_x$	$h/t_w$	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Channels and doubly symmetric I-shaped members bending about minor axis	$F_y Z_y$	FLB	$F_y S_y$	Same as for major-axis bending		
Solid rectangular bars bending @major axis	$F_y Z_x$	LTB	$F_y S_x$	$L_b / r_y$	$\frac{0.13E\sqrt{JA}}{M_p}$	$\frac{2E\sqrt{JA}}{M_r}$
Symmetric box sections loaded in a plane of symmetry	$F_y Z$	LTB	$(F_y - F_r) S_x$	$L_b / r_y$	$\frac{0.13E\sqrt{JA}}{M_p}$	$\frac{2E\sqrt{JA}}{M_r}$
		FLB	$F_y S_x$	$b/t$	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y - F_r}}$
		WLB	$F_y S_x$	$h/t_w$	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

$$\lambda_r = \frac{X_1}{(F_y - F_r)} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (F_y - F_r)^2}} \quad \text{where } X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJA}{2}} \quad X_2 = 4 \frac{C_w}{I_y} \left( \frac{S_x}{GJ} \right)^2$$

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ของกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3. กำลังรับแรงเฉือนประลัย

กำลังรับแรงเฉือนประลัยของเหล็กแผ่นตั้ง (ที่ไม่มีเหล็กเสริมข้างคานและอัตราส่วน  $h/t_w$  น้อยกว่า 260) มีค่าเท่ากับ  $\phi_v V_n$  ในเมื่อตัวคูณลดกำลัง  $\phi_v = 0.90$  และ  $V_n$  เป็นกำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ หรือกำลังต้านทานแรงเฉือนประลัย ซึ่งหาได้ดังต่อไปนี้

เมื่อ  $h/t_w \leq 1.10\sqrt{5E/F_y}$  เหล็กแผ่นตั้งไม่สูญเสียเสถียรภาพ

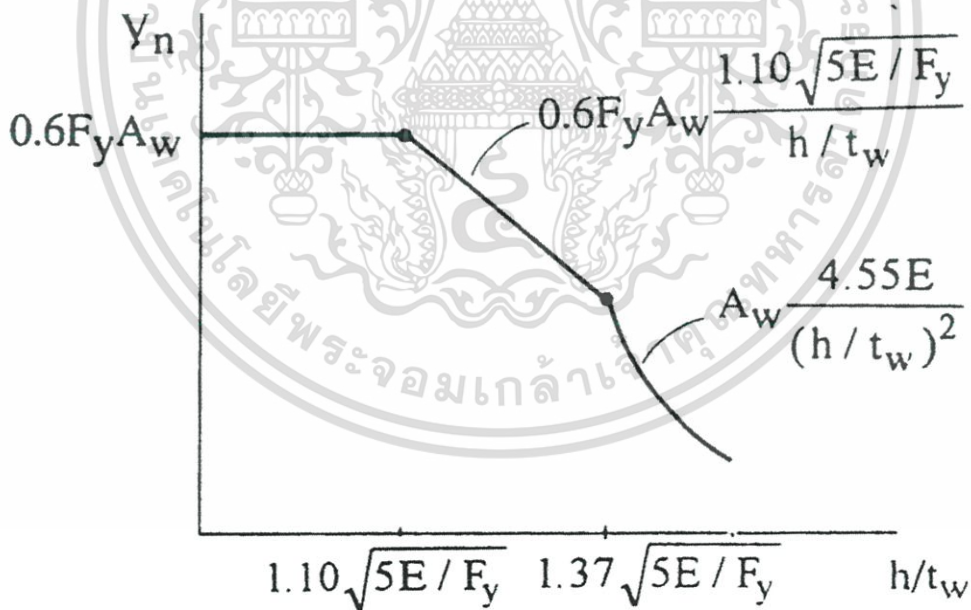
$$\text{กำลังต้านทานแรงเฉือนประลัย } V_n = 0.6F_y A_w$$

เมื่อ  $1.10\sqrt{5E/F_y} < h/t_w \leq 1.37\sqrt{5E/F_y}$  เหล็กแผ่นตั้งโค้งเคาะในช่วงอินีลาสติก

$$\text{กำลังต้านทานแรงเฉือนประลัย } V_n = 0.6F_y A_w \frac{1.10\sqrt{5E/F_y}}{h/t_w}$$

เมื่อ  $1.37\sqrt{5E/F_y} < h/t_w \leq 260$  เหล็กแผ่นตั้งโค้งเคาะในช่วงอีลาสติก

$$\text{กำลังต้านทานแรงเฉือนประลัย } V_n = A_w \frac{4.55E}{(h/t_w)^2}$$



รูปที่ 2.7 กำลังต้านทานแรงเฉือนประลัย

ในที่นี้  $A_w =$  เนื้อที่หน้าตัดเหล็กแผ่นตั้ง  $= dt_w$

$d =$  ความลึกทั้งหมดของคาน

$t_w =$  ความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$h$  = ขนาดของแผ่นตั้งเป็นช่วงระหว่างรอยพอก (fillet) ของเหล็กรูปพรรณและเป็นช่องว่างระหว่างปีกคานเมื่อนำตัดประกอบจากการเชื่อม

$F_y$  = กำลังจุดครากของเหล็กแผ่นตั้ง

อนึ่ง เมื่อ  $h/t_w > 260$  ให้เสริมเหล็กชั้นคานที่เหล็กแผ่นตั้ง (web stiffener)

## 2.7. ระยะแอนหรือโก่งตัวที่ยอมให้ – มาตรฐาน AISC/ASD/LRFD

มาตรฐาน AISC/ASD/LRFD กำหนดระยะโก่งตัวมากที่สุดที่ยอมให้ภายใต้การบรรทุกของน้ำหนักคงที่ใช้งานและน้ำหนักจรใช้งาน ดังต่อไปนี้

- L/360 สำหรับงานก่อสร้างต่างๆ ที่ฉาบผิว plastered construction
- L/240 สำหรับงานพื้นที่ไม่ฉาบผิว unplastered floor construction
- L/180 สำหรับงานหลังคาที่ไม่ฉาบผิว unplastered roof construction

ในที่นี้  $L$  เป็นช่วงความยาวคาน

อนึ่ง มาตรฐาน AISC ให้ข้อสังเกตว่า อาจไม่ต้องคำนวณหาค่าการโก่งตัวของคาน ถ้าใช้อัตราส่วนระหว่างความลึกของคาน ไม่น้อยกว่าค่าต่อไปนี้

ก.)  $F_y/(0/027E)$  สำหรับคานที่รองรับพื้น

ข.)  $F_y/(0/035E)$  สำหรับแปที่รองรับหลังคา

## 2.8. ผลของการกระทำของน้ำหนักแบบจุด (Concentrated Loads on Beams)

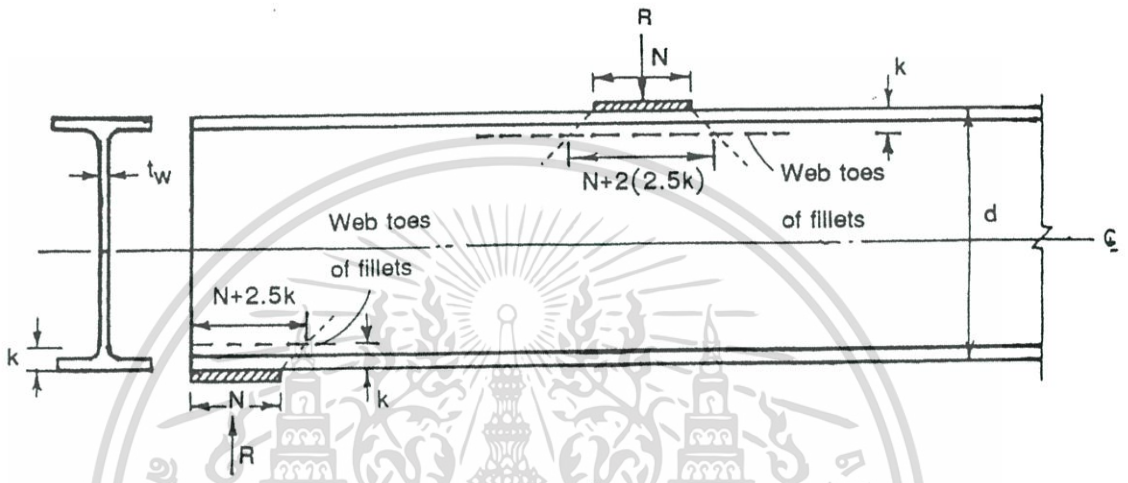
เมื่อคานต้องรับน้ำหนักแบบจุด เช่น แรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับน้ำหนักจากตง คานหรือเสาถอยที่บริเวณระหว่างช่วงคาน จะต้องใช้แผ่นเหล็กทรง bearing plate เพื่อช่วยกระจายน้ำหนักกดอัดแบบจุดที่กระทำออกไปผ่านเหล็กปีกคานที่อยู่ด้านบนหรือด้านล่างเข้าสู่เหล็กแผ่นตั้งที่มีเนื้อที่รับแรงกดอัดน้อยเป็นผลให้เหล็กแผ่นตั้งอาจเกิดการวิบัติเฉพาะแห่งขึ้นได้ เช่น เหล็กแผ่นตั้งเกิดการครากหรืออยู่ web yielding ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเหล็กปีกคานกับเหล็กแผ่นตั้ง toe of fillet เหล็กแผ่นตั้งเกิดการโค้งงอ web crippling เมื่อเหล็กแผ่นตั้งค่อนข้างจะลุด หรือเหล็กแผ่นตั้งเซออกทางข้าง sidesway web buckling เมื่อทำค้ำยันตรงตำแหน่งที่รับน้ำหนักปีกคานด้านรับแรงอัดอย่างเดียว ทำให้ปีกคานด้านรับแรงดึงเซออกทางข้าง

การป้องกันมิให้เกิดการวิบัติเฉพาะแห่งในเหล็กแผ่นตั้ง กกระทำโดยที่เพิ่มความยาว  $N$  ของแผ่นเหล็กทรง เพิ่มความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง หรือเสริมเหล็กแผ่นตั้งด้วยเหล็กเสริมข้างคานแบบรับแรงกด bearing stiffener

การกระจายของน้ำหนักแบบจุดเข้าสู่เหล็กแผ่นตั้ง พิจารณาให้ตำแหน่งวิกฤตซึ่งทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กแผ่นตั้งเกิดการครากอยู่ที่ระยะ  $k$  ซึ่งเป็นระยะของความหนาของปีกคานรวมกับระยะพอกตรงรอยต่อระหว่างปีกคานกับเหล็กแผ่นตั้งและให้น้ำหนักกระจายออกไปในแต่ละข้างด้วยความชัน 1 ต่อ 2.5 ตามรูปที่แสดง ซึ่งจะเห็นว่า น้ำหนักที่กระทำระหว่างช่วงคานจะกระจายออกไปทั้งสองด้าน ดังนั้นพื้นที่รับแรงกดอัดคือ  $(5k + N)t_w$  ส่วนที่ปลายคาน แรงปฏิกิริยาจะกระจายออกไปเพียงด้านเดียวเท่านั้น ดังนั้นพื้นที่ที่รับแรงกดอัดที่บริเวณฐานรองคือ  $(2.5k + N)t_w$  โดยที่  $t_w$  เป็นความหนาของเหล็กแผ่นตั้ง



รูปที่ 2.8 การกระทำของน้ำหนักแบบจุดบนคาน

มาตรฐาน AISC/LRFD ให้ข้อกำหนดเพื่อป้องกันมิให้เกิดการวิบัติเฉพาะแห่งในเหล็กแผ่นตั้ง ดังต่อไปนี้

2.8.1. กรณีที่เหล็กแผ่นตั้งเกิดการคราก กำลังรับแรงอัดของเหล็กแผ่นตั้งตรงรอยพอกเท่ากับ  $\phi R_n$  เมื่อ  $\phi = 1.0$  และกำลังต้านทาน  $R_n$  หาได้จาก

2.8.1.1. น้ำหนักแบบจุดกระทำในช่วงคาน (ห่างจากปลายคานไม่น้อยกว่าความลึกของคาน)

$$R = (5k + N)F_y t_w$$

2.8.1.2. น้ำหนักแบบจุดกระทำใกล้กับหรือที่ปลายคาน

$$R = (2.5k + N)F_y t_w$$

หมายเหตุ ความยาวของแผ่นเหล็กรับแรงกดไม่ควรน้อยกว่าระยะ  $k$

2.8.2. กรณีที่เหล็กแผ่นตั้งเกิดการโก่ง น้ำหนักหรือแรงอัดต้องไม่เกินกว่า  $\phi R_n$  เมื่อ  $\phi = 0.75$  และกำลังต้านทาน  $R_n$  หาได้จาก

2.8.2.1. น้ำหนักแบบจุด ห่างจากปลายคานไม่น้อยกว่าระยะ  $d/2$

$$R = 0.80 t_w^2 \left[ 1 + 3 \left( \frac{N}{d} \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{E F_y (t_f / t_w)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.2.2. น้ำหนักแบบจุด ห่างจากปลายคานน้อยกว่าระยะ $d/2$

$$R = 0.40t_w^2 \left[ 1 + 3 \left( \frac{N}{d} \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{E F_y (t_f / t_w)} \quad \text{เมื่อ } N/d \leq 0.2$$

$$R = 0.40t_w^2 \left[ 1 + \left( 4 \frac{N}{d} - 0.2 \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{E F_y (t_f / t_w)} \quad \text{เมื่อ } N/d >$$

0.2

อนึ่ง เมื่อใช้เหล็กเสริมข้างคานยาวอย่างน้อยครึ่งหนึ่งของความลึกของเหล็กแผ่นตั้ง ไม่ต้องตรวจสอบเกี่ยวกับการ โกงของเหล็กแผ่นตั้ง

2.8.3. กรณีแผ่นตั้งเกิดการเซ น้ำหนักหรือแรงอัดต้องไม่เกินกว่า  $\phi R_n$  เมื่อ  $\phi=0.85$  และกำลังต้านทาน  $R_n$  หาได้จาก

2.8.3.1. เมื่อ  $(d_c/t_w)/(I/b_f) \leq 2.3$  และทำค้ำยันที่ปีกคานด้านที่รับน้ำหนักแบบจุด

$$R = \frac{0.40Et_w^3}{h} \left[ 1 + 0.4 \left( \frac{d_c/t_w}{I/b_f} \right)^3 \right]$$

2.8.3.2. เมื่อ  $(d_c/t_w)/(I/b_f) \leq 1.7$  และไม่ทำค้ำยันที่ปีกคานด้านที่รับน้ำหนักแบบจุด

$$R = \frac{0.40Et_w^3}{h} \left[ 0.4 \left( \frac{d_c/t_w}{I/b_f} \right)^3 \right]$$

อนึ่ง เมื่อ  $(d_c/t_w)/(I/b_f)$  มีค่าเกินกว่า 2.3 หรือ 1.7 หรือในกรณีที่รับน้ำหนักแบบแผ่ไม่ต้องตรวจสอบสองกรณีข้างต้น

## 2.9. วิธีออกแบบคาน

ในการคำนวณออกแบบคาน มักใช้วิธีเลือกรูปตัดของคาน ให้สามารถรับ โมเมนต์คัตได้ก่อน แล้วจึงตรวจสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ตลอดจนจนวนค่าการตกหรือโก่งตัวของคานที่เกิดขึ้น โดยให้มีค่าไม่เกินกว่าข้อกำหนดของมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ

การออกแบบคานเหล็กรูปพรรณ อาจกระทำตามลำดับต่อไปนี้

2.9.1. เลือกรูปตัดคาน คำนวณหาน้ำหนักบรรทุกใช้งานหรือน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว ที่กระทำบนคาน

2.9.2. คำนวณหา โมเมนต์คัตและแรงเฉือนที่มากที่สุดที่คานต้องรับ

2.9.3. หาระยะที่ทำค้ำยันทางข้าง lateral support

2.9.4. คำนวณหาหน่วยแรงคัตที่ยอมให้ หรือกำลังรับแรงคัตประลักษ์จากรูปตัดที่เลือกใช้ ซึ่งขึ้นกับประเภทของรูปตัดและระยะค้ำยันทางข้าง

2.9.5. คำนวณหา โมดูลัสอินertiaของหน้าตัด หรือ โมดูลัสพลาสติกที่ต้องการ ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับเหล็กรูปตัดที่เลือกใช้ข้างต้น หากรูปตัดที่เลือกใช้ไม่เหมาะสม ให้กลับไปดำเนินการใหม่ตั้งแต่ต้น

2.9.6. ตรวจสอบ การรับแรงเฉือน และการ โกงตัวในแนวตั้ง

2.9.7. ตรวจสอบการครากหรืออยู่ การ โกง และการเซของเหล็กแผ่นตั้ง เมื่อคานรับน้ำหนักแบบจุด

## 2.10 การต่อโครงสร้างโดยการเชื่อม (Welded Connections)

ในปัจจุบัน การประกอบโครงสร้างเหล็ก มักทำโดยวิธีเชื่อมเป็นส่วนใหญ่ การเชื่อมเป็นวิธีการต่อชิ้น โลหะตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปให้ติดกันโดยใช้ความร้อนเผาขึ้น โลหะตรงบริเวณที่จะต่อให้กลายเป็นแอ่งและหลอมติดเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีลวดเชื่อมเป็นตัวประสานวิธีเชื่อมที่นิยมมากที่สุดในงานโครงสร้างเหล็ก คือ วิธีใช้ประกายไฟฟ้า หรือ ที่เรียกว่า อาร์ค ซึ่งเป็นตัวให้ความร้อน

การเชื่อมต่อโครงสร้างเหล็กมีทั้งแบบเชื่อมธรรมดาทั่วไป โดยใช้ลวดเชื่อมชนิดที่มีเปลือกหุ้ม เรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า shielded metal arc welding : SMAW เปลือกหุ้มนี้เมื่อถูกหลอมเหลวจะกลายเป็นชีตะกรันปกคลุมรอยเชื่อมไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศ แบบนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมที่บังคับด้วยมือในสนาม การเชื่อมอีกแบบหนึ่งเรียกว่า submerged (hidden) arc welding : SAW โดยใช้ผงฟลักซ์ (flux) ประกอบกับลวดเชื่อม ในขณะที่เชื่อมจะมองไม่เห็นประกายไฟเนื่องจากมีผงฟลักซ์ ที่ปล่อยออกมาปกคลุม ดังนั้น อาจเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า การเชื่อมใต้ฟลักซ์ แบบนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมในโรงงานที่ทำแบบอัตโนมัติ มีรอยเชื่อมซึมลึกกว่าแบบ SMAW คุณภาพของรอยเชื่อมจึงสูงกว่า รอยเชื่อมจะมีคุณภาพตามที่ต้องการเมื่อเลือกใช้ลวดเชื่อมให้เหมาะสมกับเนื้อโลหะที่จะเชื่อม

การเชื่อมอาจกระทำในตำแหน่งหรือท่าต่างๆ ซึ่งได้แก่ เชื่อมในแนวราบ ( flat weld ) เชื่อมในแนวนอน (horizontal weld ) เชื่อมในแนวตั้ง (vertical weld ) หรือเชื่อมในแนวแฉก ( overhead weld ) โดยมากจะเลือกใช้เชื่อมในแนวราบเป็นอันดับแรก การเชื่อมในแนวนอน และในแนวตั้งเป็นอันดับรองลงมาตามลำดับ ส่วนรอยเชื่อมต่อระหว่างแผ่นโลหะ อาจเป็น รอยต่อแบบต่อชน (butt joint ) รอบต่อแบบต่อทาบหรือต่อเกย (lap joint ) รอยต่อแบบตัวที (tee joint ) รอยต่อแบบต่อขอบ (edge joint ) หรือรอยต่อแบบต่อมุม (corner joint ) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.1 แบบของการเชื่อมต่อ

แบบของการเชื่อมต่อแบ่งออกเป็น 3 แบบที่สำคัญ คือ

**2.10.1.1 การเชื่อมต่อแบบฟิลเลท ( Fillet weld )** หรือเรียกในที่นี้ว่า การเชื่อมแบบต่อทาบ ที่เชื่อมตามแนวยาวหรือตามแนวขวางของชิ้นส่วนตรงส่วนที่ทำมุมจากกัน

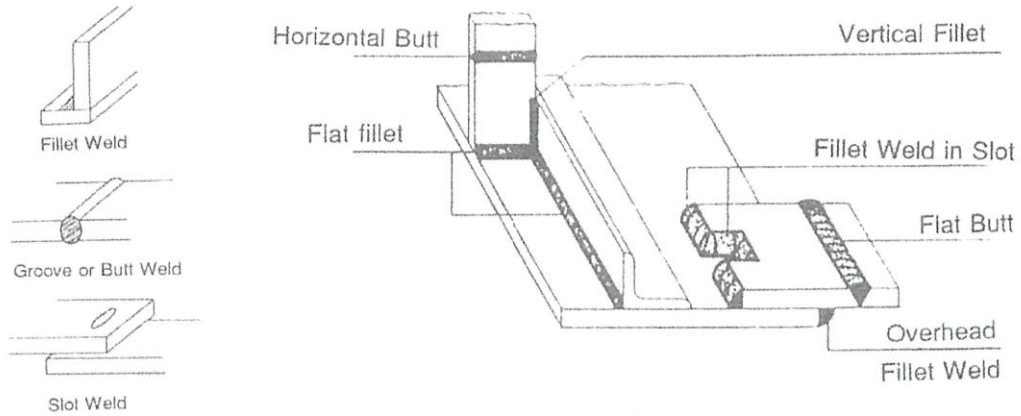
การเชื่อมแบบต่อทาบ เป็นการต่อแผ่นเหล็กที่ตั้งฉากกันหรือซ้อนกัน แล้วเชื่อมตามแนวยาวหรือตามแนวขวางของชิ้นส่วนตรงส่วนที่ทำมุมจากกัน รอยเชื่อมต่อแบบฟิลเลทสามารถรับได้ทั้งแรงดึง แรงอัด และแรงเฉือน การต่อเหล็กโครงสร้างโดยใช้การเชื่อมแบบนี้นิยมใช้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 เนื่องจากทำได้ง่ายและราคาถูกกว่าการเชื่อมในลักษณะอื่น

**2.10.1.2 การเชื่อมแบบต่อชนหรือในร่อง (Butt weld หรือ Groove weld )** ที่เชื่อมในร่องลึกตลอดความหนาของชิ้นส่วน (complete penetration ) หรือเพียงบางส่วนของความหนา (partial penetration ) ของชิ้นส่วนนั้น

การเชื่อมแบบต่อชน เป็นการเชื่อมต่อตรงขอบปลายชิ้นส่วนที่นำมาวางชนกันการทำรอยต่อแบบนี้ต้องเตรียมขอบปลายที่จะเชื่อมไว้ก่อนล่วงหน้า ลักษณะการเชื่อมมีทั้งแบบเชื่อมในร่องลึกตลอดความหนาของชิ้นส่วนที่นำมาต่อ หรือเชื่อมในร่องลึกเพียงบางส่วนของความหนาก็ได้ ปกติ รอยเชื่อมแบบนี้จะใช้สำหรับรับแรงดึง หรือแรงอัด โดยตรงนิยมใช้ในการต่อส่วนโครงสร้างประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากราคาค่อนข้างแพง

**2.10.1.3 การเชื่อมอุดแบบปลั๊ก หรือสลอท ( plug หรือ slot weld )** ในรูกลมหรือในช่องยา

การเชื่อมอุดแบบปลั๊กหรือสลอท เป็นการต่อแผ่นเหล็กทั้ง 2 ชั้นที่นำมาซ้อนกัน โดยเจาะรูหรือทำช่องเตรียมไว้ก่อน แล้วจึงเชื่อมอุดลงในช่องให้ติดกัน การเชื่อมลักษณะนี้เป็นการเชื่อมต่อทาบนั่นเอง สามารถรับแรงเฉือนได้ดี แต่ชิ้นส่วนอาจจะเกิดการบิดงอ หรือโก่งตัว



รูปที่ 2.9 ลักษณะการต่อเชื่อม

ลวดเชื่อมที่ใช้เป็นตัวประสานเพื่อเชื่อมต่อส่วนของโครงสร้าง ปกติบอกเป็นสัญลักษณ์ ดังนี้ E\_XX ซึ่งตัว E หมายถึง ลวดเชื่อมหรืออิเล็กโทรด (electrode) ตัวถัดไปเป็นตัวเลขสองตัว เช่น 70 หมายถึงลวดเชื่อมนี้สามารถรับแรงดึงประตัยได้ไม่น้อยกว่า 70 ksi ( kip/sq. in ) ส่วนตัวอักษร XX บอกถึงคุณลักษณะการเคลือบผิวหรือสารที่ใช้เป็นเปลือกหุ้มลวดเชื่อมรวมทั้งตำแหน่งหรือท่าของการเชื่อมที่เหมาะสมกับงาน เป็นต้น ดังนั้น เมื่อนำลวดเชื่อมมาใช้ ต้องศึกษาและเลือกให้เหมาะสมกับกำลังต้านทานของชิ้น โลหะนั้นตลอดจนสภาพการใช้งาน เช่น

E 60 ใช้กับเหล็กที่มีกำลังจุดครากไม่เกิน 42 ksi เช่น เหล็กชนิด A 36

E 70 ใช้กับเหล็กที่มีกำลังจุดครากไม่เกิน 55 ksi เช่น เหล็กชนิด A 36 ( $F_y = 36$  ksi ) หรือ A 572 Grade 50 ( $F_y = 50$  ksi )

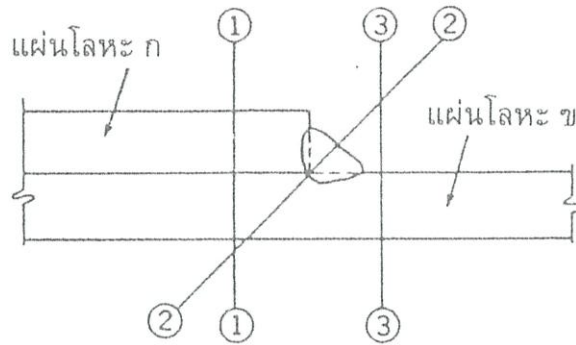
E 80 ใช้กับเหล็กที่มีกำลังจุดครากไม่เกิน 65 ksi เช่น เหล็กชนิด A572 Grade 60 ( $F_y = 60$  ksi ) หรือ Grade 65 ( $F_y = 65$  ksi ) เป็นต้น

**2.10.2 การตรวจสอบการเชื่อม** อาจใช้วิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย เช่น ใช้การทดสอบด้วยภาพเอ็กซเรย์ หรือทดสอบด้วยคลื่นเสียงอุลตราโซนิก หรือตรวจสอบโดยใช้เกจวัดขนาดของรอยเชื่อม

### 2.10.2.1 การวิบัติของรอยต่อเชื่อม และเนื้อที่ประสิทธิภาพของรอยเชื่อม

การวิบัติของรอยต่อเชื่อมอาจเกิดได้ 2 แบบ คือ การวิบัติที่รอยเชื่อม หรือการวิบัติที่แผ่นเหล็กซึ่งนำมาต่อ การวิบัติทั้งสองแบบเกิดจากแรงกระทำในระนาบใดระนาบหนึ่ง เช่น แรงดึง แรงอัด แรงเฉือน ซึ่งอาจอยู่ในระนาบของรอยเชื่อมหรือระนาบของแผ่นเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ระนาบของการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน

รูปที่ 2.10 แสดงระนาบของการวิบัติที่รอยเชื่อมหรือที่แผ่นเหล็กเมื่อรับแรงเฉือน โดยเหล็กแผ่นอาจเกิดการวิบัติโดยแรงเฉือนที่ระนาบ 1-1 หรือ 3-3 และรอยเชื่อมเกิดการวิบัติที่ระนาบ 2-2 ซึ่งเป็นระนาบที่มีพื้นที่น้อยที่สุดที่เรียกว่า เนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม โดยหาได้จาก ผลคูณของความยาวของรอยเชื่อมกับระยะความหนาประสิทธิผล ( effective throat thickness )

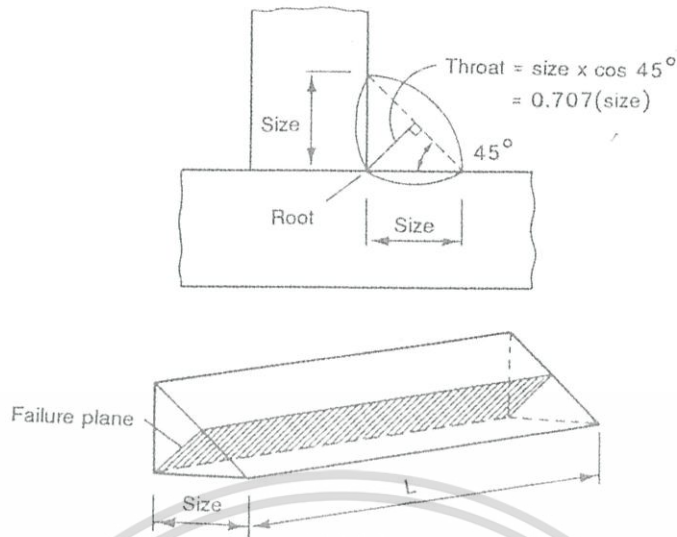
สำหรับการเชื่อมแบบต่อทาบที่มีขนาดขาเชื่อมเท่ากัน (equal leg fillet weld) ระยะความหนาประสิทธิผลจะเป็นระยะที่สั้นที่สุดที่วัดจากมุมของการเชื่อม (root of the weld) ไปยังผิวเชื่อมสมมุติ ซึ่งเป็นผิวเชื่อมในแนวเรียบที่วัดจากขาเชื่อมหนึ่งไปยังขาเชื่อมอีกอันหนึ่ง นั่นคือ ระยะความหนาประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ 0.707 เท่าของขนาดขาเชื่อมเมื่อเชื่อมด้วยวิธี SMAW ( แต่ถ้าเชื่อมด้วยวิธี SAW จะให้ค่ามากขึ้นอีกเล็กน้อย ) ส่วนการเชื่อมแบบต่อทาบที่มีขนาดขาเชื่อมไม่เท่ากัน ( unequal leg fillet weld ) ไปยังผิวเชื่อมสมมุติ ดังกล่าว

สำหรับการเชื่อมแบบต่อชน และเชื่อมตลกดความหนาของชิ้นส่วน :

$$\text{เนื้อที่ประสิทธิผล} = (\text{ความหนาของชิ้นส่วนที่บางกว่า}) (\text{ความยาวของการเชื่อม})$$

สำหรับการเชื่อมในรูหรือในช่อง :

$$\text{เนื้อที่ประสิทธิผล} = \text{เนื้อที่หน้าตัดของรูหรือช่องที่รับแรงกระทำ}$$



รูปที่ 2.11 เนื้อที่ประสิทธิภาพของรอยเชื่อมแบบต่อทาบ

### 2.10.3 การออกแบบรอยต่อเชื่อม – มาตรฐาน AISC

การพิจารณาหาค่ารับแรงของรอยต่อเชื่อมโดยวิธี LRFD สำหรับการทำรอยต่อเชื่อมแบบต่อชน แบบต่อทาบ และแบบเชื่อมในรูหรือในช่อง ซึ่งค่ารับแรงของรอยต่อเชื่อมจะเป็นค่าน้อยระหว่างค่ารับแรงของลวดเชื่อมกับค่ารับแรงของเหล็กแผ่นที่นำมาเชื่อมต่อ ( Base Metal)

#### 2.10.3.1 การต่อเชื่อมแบบฟิลเลทหรือแบบต่อทาบ (fillet weld)

ค่ารับแรงของรอยเชื่อมแบบต่อทาบ ให้พิจารณาจากค่ารับแรงเฉือนบนเนื้อที่ประสิทธิภาพของรอยเชื่อมเสมอไป ไม่ว่าจะแรงจะกระทำในทิศทางใดก็ตาม

โดยวิธี LRFD

ค่ารับแรงประลัยของลวดเชื่อม  $\phi F_w A_w$  เมื่อตัวคูณลดกำลัง  $\phi = 0.75$

$$= (0.75) (0.6 F_{Exx}) (0.707 \times \text{size} \times L) \quad \text{กก.}$$

หรือ  $= (0.45 F_{Exx}) (0.707 \times \text{size}) \quad \text{กก./ซม.}$

$$= 1555 (\text{size}) \quad \text{กก./ซม. ( เมื่อใช้ลวดเชื่อม$$

ชนิด E 70 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

= 1335 (size)

กก./ชม. ( เมื่อใช้ลวดเชื่อม

ชนิด E 60 )

นอกจากการพิจารณากำลังรับแรงเฉือนของลวดเชื่อมดังกล่าวข้างต้นแล้วยังต้องพิจารณาถึงกำลังรับแรงของชิ้นส่วนที่นำมาเชื่อมต่อ ( Base Metal ) ด้วย เมื่อต้องรับแรงกระทำในลักษณะต่างๆ เช่น แรงเฉือน แรงดึง หรือแรงเฉือนร่วมกับแรงดึง (Block Shear) เป็นต้น เช่น การเชื่อมขาดที่เหล็กแผ่นตามแนวรอยเชื่อม มีค่าเท่ากับ  $0.75 (0.6 F_u A_{BM})$  ตามวิธี LRFD ซึ่ง  $A_{BM}$  เป็นเนื้อที่ของเหล็กแผ่นที่รับแรงเฉือน ค่ากำลังรับแรงที่น้อยที่สุดจะนำไปใช้ในการออกแบบรอยต่อเชื่อม

### 2.10.3.1.1 มาตรฐาน LRFD ให้ข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับการเชื่อมแบบต่อทาบ ดังนี้

2.10.3.1.1.1 ขนาดเล็กสุดของขาเชื่อม ขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นเหล็กส่วนที่หนากว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.4 (แต่ขนาดขาเชื่อมต้องไม่เกินกว่าความหนาของส่วนที่บางกว่า)

ความหนาของแผ่นเหล็กส่วนที่หนากว่า มม.	ขนาดเล็กที่สุดของขาเชื่อม มม.
ไม่เกินหรือเท่ากับ 6 มม.	3
เกินกว่า 6 ถึง 13 มม.	5
เกินกว่า 13 ถึง 19 มม.	6
เกินกว่า 19 มม.	8

ตารางที่ 2.4 ขนาดเล็กที่สุดของขาเชื่อม

2.10.3.1.1.2 ขนาดใหญ่ที่สุดของขาเชื่อมแบบต่อทาบ เท่ากับความหนาของแผ่นเหล็กที่หนาไม่เกิน 6 มม. สำหรับแผ่นเหล็กที่หนาเท่ากับ 6 มม. หรือมากกว่า ขนาดของขาเชื่อมจะเท่ากับ ความหนาของแผ่นเหล็ก ลบด้วย 2 มม.

2.10.3.1.1.3 ความยาวของการเชื่อมแบบต่อทาบ ต้องไม่น้อยกว่า 4 เท่าของขนาดขาเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวของการเชื่อมตามแนวยาวที่ปลายแผ่นเหล็กแบน (Flat bar) ที่รับแรงดึง ต้องไม่น้อยกว่าระยะห่างตั้งฉากระหว่างแนวเชื่อม ซึ่งระยะห่างแนวเชื่อมก็ไม่ควรเกิน 20 ซม. เว้นแต่ได้มีการพิจารณาถึงเนื้อที่หน้าตัดสุทธิประสิทธิผล

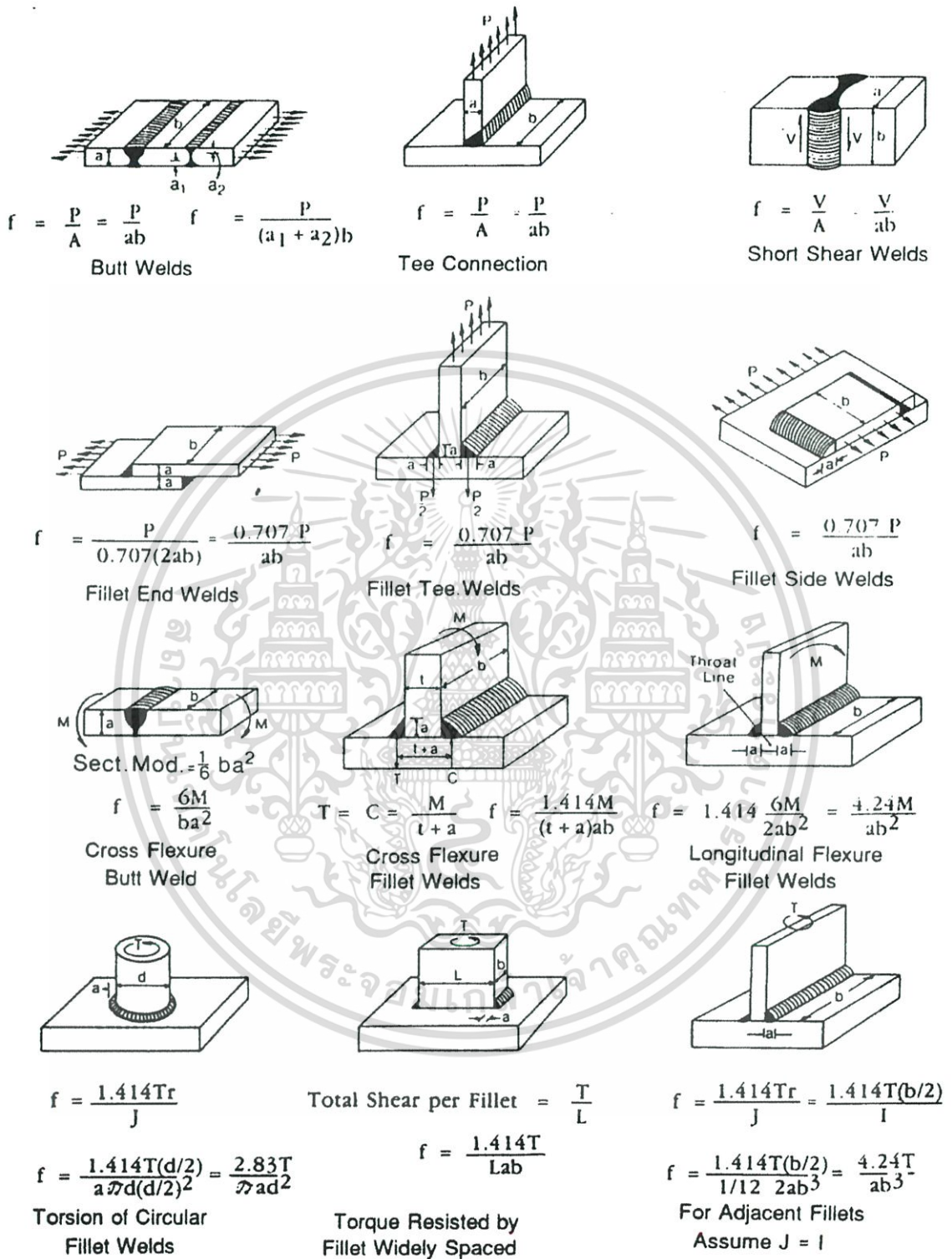
2.10.3.1.1.4 ควรมีการเชื่อมอ้อมปลาย (end return) โดยมีความยาวไม่น้อยกว่า 2 เท่าของขนาดขาเชื่อม ทั้งนี้ เพื่อช่วยการลดจุดแรงวิกฤต (high stress concentration) และในการคำนวณก็อาจพิจารณาให้รอยเชื่อมอ้อมปลายรับแรงกระทำด้วยก็ได้

2.10.3.1.1.5 ระยะทาบของแผ่นเหล็กที่นำมาต่อ อย่างน้อยเท่ากับ 5 เท่าของความหนาของแผ่นเหล็กที่บางกว่า แต่ต้องไม่น้อยกว่า 25 มม.

2.10.3.1.1.6 ความยาวของรอยเชื่อมแบบเว้นระยะ ต้องไม่น้อยกว่า 4 เท่าของขนาดขาเชื่อม หรือ 38 มม.

#### 2.10.4 หน่วยแรงบนรอยเชื่อม

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อมเมื่อต้องรับแรงกระทำในลักษณะต่างๆ สามารถหาได้จากสูตรแรงในแนวแกน  $f = P/A$  สูตรแรงดัด  $f = Mc/I$  สูตรแรงบิด  $f = Td/J$  สูตรแรงเฉือนในคาน  $f = VQ/It$  ดังแสดงในรูปที่ 2.12



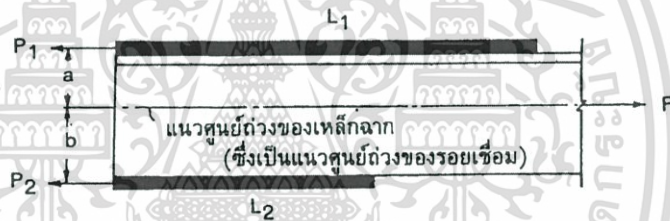
รูปที่ 2.12 หน่วยแรงบนรอยเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.5 วิธีออกแบบรอยต่อเชื่อมเพื่อรับแรงร่วมศูนย์

รอยต่อที่รับแรงกระทำผ่านจุดศูนย์ถ่วงของรอยต่อเชื่อมเรียกว่า รอยต่อเชื่อมกับแรงร่วมศูนย์ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อมจะสมมุติให้แผ่นกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยรอยเชื่อมจะรับแรงกระทำเท่าๆกัน หน่วยแรงที่เกิดขึ้นอาจเป็นหน่วยแรงดึง หน่วยแรงอัด หรือหน่วยแรงเฉือน แต่สำหรับการคำนวณออกแบบรอยเชื่อมแบบต่อท้ายจะพิจารณาให้หน่วยแรงนั้นๆ กระทำบนเนื้อที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อมเสมอ ซึ่งหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อมหรือบนชิ้นส่วนที่นำมาต่อต้องมีความไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่กำหนดตามมาตรฐาน

ในการออกแบบรอยต่อเชื่อมของเหล็กฉากเพื่อรับแรงร่วมศูนย์ ต้องพิจารณาจัดให้แนวศูนย์ถ่วงของรอยเชื่อมอยู่ในแนวเดียวกับแนวศูนย์ถ่วงของเหล็กฉากที่รับแรงกระทำในแนวนั้น ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งพิจารณาหาความยาวของรอยเชื่อมได้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.13 การรับแรงกระทำในแนวตั้งฉาก

ให้  $P$  เป็นแรงที่กระทำผ่านแนวศูนย์ถ่วงของเหล็กฉาก ซึ่งรอยเชื่อมต้องรับแรงนี้

ถ้า  $P_1$  และ  $P_2$  เป็นแรงต้านทานของรอยเชื่อมที่เชื่อมยาวเท่ากับ  $L_1$  และ  $L_2$  ตามลำดับ

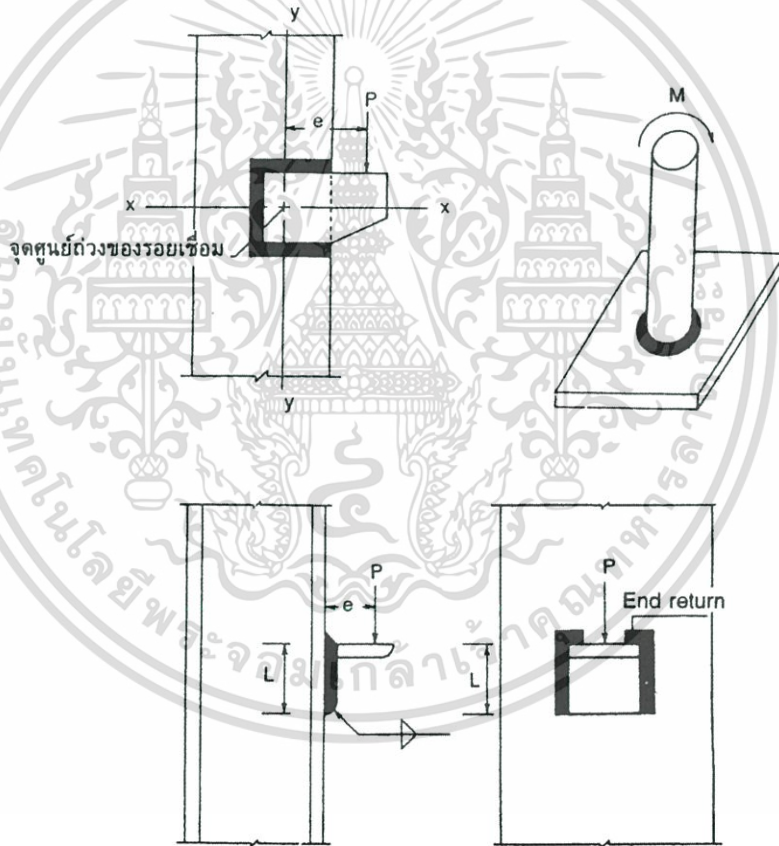
$$\text{ดังนั้นเมื่อพิจารณาหาโมเมนต์รอบแนวเชื่อม } L_2 \text{ จะได้ } P_1 = \frac{(P)(b)}{(a+b)}$$

$$\text{ถ้าให้ } P_w \text{ เป็นกำลังรับแรงของรอยเชื่อมต่อหน่วยความยาว ดังนั้น ระยะ } L_1 = \frac{P_1}{P_w}$$

$$\text{ในทำนองเดียวกันจะได้ } P_2 = \frac{(P)(a)}{(a+b)} \text{ และระยะ } L_2 = \frac{P_2}{P_w}$$

## 2.10.6 วิธีออกแบบรอยเชื่อมต่อรับแรงเยื้องศูนย์กลาง

รอยต่อที่รับแรงกระทำไม่ผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงของรอยเชื่อมต่อเรียกว่า รอยเชื่อมต่อรับแรงเยื้องศูนย์กลาง ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.15 เมื่อพิจารณาย้ายแรงให้กระทำผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงของรอยเชื่อมต่อ จะเห็นว่ารอยเชื่อมต่อนั้นต้องรับ โมเมนต์คดหรือ โมเมนต์บิดด้วยแล้วแต่กรณี นั่นคือ รอยเชื่อมต้องรับทั้งแรงดึงหรือแรงอัดซึ่งเกิดจาโมเมนต์คดหรือ โมเมนต์บิด และแรงเฉือนร่วมกัน โดยที่ รอยเชื่อมจะรับแรงเฉือนเท่าๆกันตลอดความยาวที่เชื่อม ส่วนแรงดึงหรือแรงอัดที่รอยเชื่อมต้องรับ คำนวณหาได้จากสูตรแรงคด หรือสูตรแรงบิดแล้วแต่กรณี รอยเชื่อมที่อยู่ห่างจากศูนย์กลางถ่วงของรอยเชื่อมต่อมากที่สุดจะรับแรงดึงหรือแรงอัดมากที่สุด แรงลัพธ์ที่ได้จากการรวมแรงที่กระทำร่วมกัน จะเป็นแรงเฉือนที่รอยเชื่อมต้องรับ ซึ่งต้องมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานกำหนด



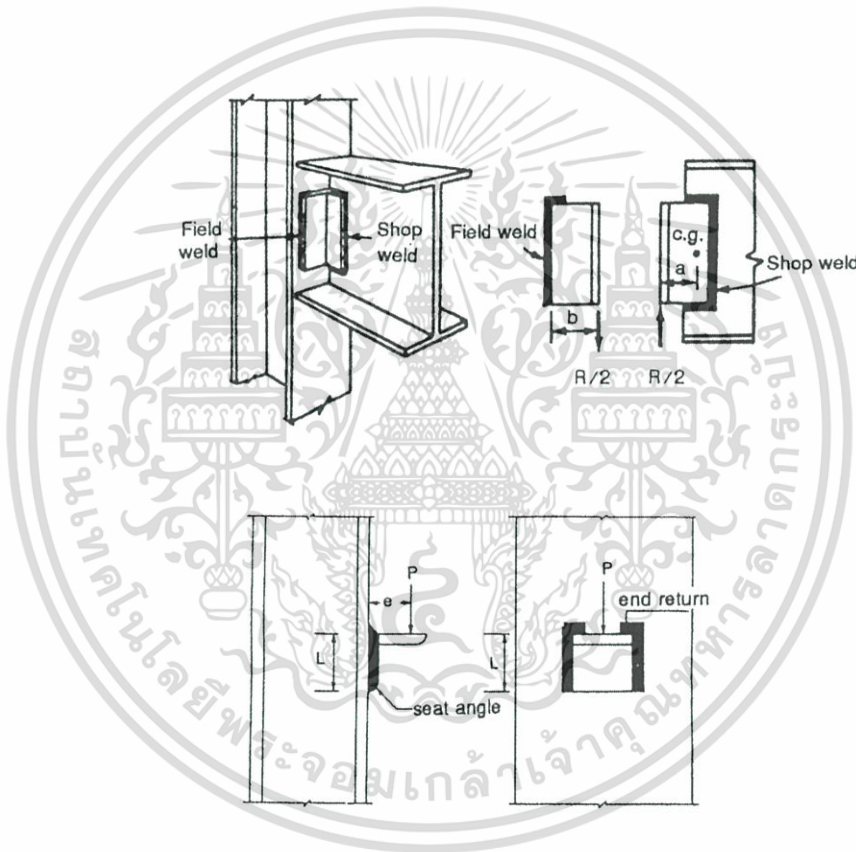
รูปที่ 2.14 รอยต่อเชื่อมรับแรงเยื้องศูนย์กลาง

## 2.10.7 การต่อปลายคาน

การทำรอยเชื่อมต่อระหว่างคานกับคาน หรือคานกับเสา โดยใช้การเชื่อมแสดงไว้ในรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อปลายคานสำหรับคานช่วงเดียว เพื่อให้รับเฉพาะแรงเฉือน ( หรือแรงปฏิกิริยา ) เพียงอย่างเดียว อาจพิจารณาใช้เหล็กฉากเพียง 1 คู่ ดังรูปที่ 2.16 โดยเชื่อมขาข้างหนึ่งของเหล็กฉากต่อกับเหล็กแผ่นตั้งของตัวคาน ซึ่งอาจทำการเชื่อมมาจากโรงงาน ( เรียกว่า shop weld ) และเชื่อมขาอีกข้างหนึ่งของเหล็กฉากต่อกับแผ่นปีกของเสา โดยทำการเชื่อมในที่ก่อสร้าง ( เรียกว่า field weld ) ลักษณะการต่อแบบนี้เรียกว่า framed beam connection ขนาดเหล็กฉากที่นิยมใช้สำหรับการต่อแบบนี้คือ ความกว้างของขาเหล็กฉากเท่ากับ 3-4 นิ้ว ความยาวของเหล็กฉากที่ใช้ประมาณ  $\frac{1}{2}$  -  $\frac{2}{3}$  ของความลึกของคานเหล็กรูป ส่วนความหนาของขาเหล็กฉากประมาณ  $\frac{5}{16}$  นิ้ว หนึ่ง มักเว้นระยะระหว่างปลายคานกับเสา ประมาณ  $\frac{1}{2}$  -  $\frac{3}{4}$  นิ้วซึ่งเพื่อไว้สำหรับการยึดติดตั้ง



รูปที่ 2.15 รอยต่อเชื่อมปลายคานช่วงเดียว

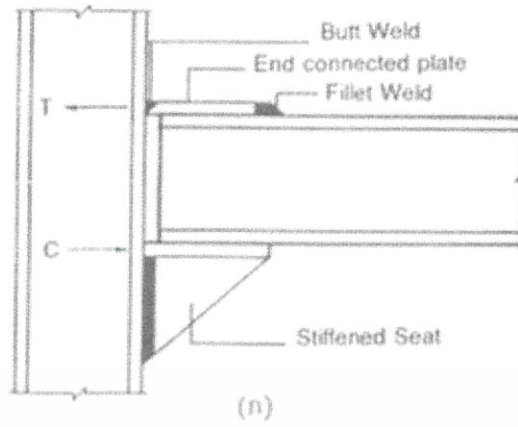
นอกจากนี้ อาจพิจารณาใช้เหล็กฉากรองใต้คาน ( เรียกว่า beam seat ) ดังรูปที่ 2.16 เพื่อให้รับเฉพาะ แรงปฏิกิริยาดังกล่าวก็ได้ โดยเชื่อมขาด้านยาวของเหล็กฉากติดกับแผ่นปีกของเสา ทั้งนี้ขา ด้านสั้นของเหล็กฉากจะเป็นตัวรองรับคาน และมีความยาวพอที่จะไม่ทำให้เกิดการคลาก หรือการยุบของเหล็กแผ่นตั้งในคาน ตลอดจนมีความหนาพอที่จะรับและถ่ายแรงเฉือนที่กระทำ ลักษณะการต่อแบบนี้เรียกว่า unstiffened (flexible) beam-seat connection ซึ่งใช้ในกรณีที่แรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกริยามีค่าไม่มาก ( ประมาณ 20 ตัน ) แต่ในกรณีที่แรงปฏิกริยามีค่ามากต้องพิจารณาเสริมเหล็กฉากให้มีกำลังรับแรงได้มากขึ้น ซึ่งลักษณะการต่อแบบนี้จะเรียกว่า stiffened beam-seat connection โดยอาจเปลี่ยนไปใช้เหล็กรูปตัดตัวที หรือนำแผ่นเหล็กมาประกบกันเป็นรูปตัวทีก็ได้ ในทั้งสองกรณีที่กล่าวมามักจะใช้เหล็กฉากต่อติดที่ด้านบนของปีกคานอีกหนึ่งตัว หรือใช้เหล็กฉากเชื่อมติดกับเหล็กแผ่นตั้งของคาน เพื่อยึดให้คานอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและเป็นค้ำยันทางข้างกันการบิดที่ปลายคาน ขนาดความหนาของเหล็กฉากปิดบนต้องไม่น้อยเกินไปปกติใช้ประมาณ  $\frac{1}{4}$  นิ้ว เพื่อให้ปลายคานสามารถหมุนได้ ( โมเมนต์ที่ปลายคานเป็นศูนย์ ) ตามข้อสมมุติฐานของคานช่วงเดียว

ส่วนกรณีที่ปลายคานต้องรับ โมเมนต์คัตด้วย ซึ่งเป็นกรณีของคานในโครงเฟรม หาก โมเมนต์คัตที่ปลายคานมีไม่มากนัก ก็อาจพิจารณาใช้เหล็กฉากรองใต้คานร่วมกับแผ่นเหล็กที่ปิดด้านบนเหนือคาน ดังรูปที่ 2.17 โดยออกแบบให้เหล็กฉากรองใต้คานรับได้ทั้งแรงปฏิกริยาและแรงอัดเนื่องจาก โมเมนต์คัตที่กระทำ ส่วนแผ่นเหล็กที่ปิดด้านบนเหนือคานก็พิจารณาให้รับเฉพาะแรงดึงที่เกิดจาก โมเมนต์คัตที่กระทำ ซึ่งแรงดึงที่ปีกด้านบนของคาน จะถูกส่งถ่ายผ่านรอยเชื่อมแบบต่อทาบ (fillet weld) ไปยังเหล็กแผ่นปิดบน และถ่ายแรงผ่านรอยเชื่อมแบบต่อชน (butt weld) ไปยังแผ่นเหล็กตั้งหรือแผ่นปีกของเสา หากจะให้การต่อเชื่อมง่ายขึ้นก็อาจจะตัดแผ่นเหล็กปิดบนให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังแสดงในรูปที่ 2.17 การหาขนาดของรอยเชื่อให้พิจารณาจากแรงดึงและแรงอัดที่กระทำเนื่องจาก โมเมนต์คัตและจากแรงเฉือนที่กระทำ อย่างไรก็ตามก็อาจจะพิจารณาเชื่อมต่อคานเหล็กกับเสาได้โดยเมื่อ โมเมนต์คัตที่ปลายคานมีค่าไม่มากนัก

ส่วนในกรณีที่ปลายคานใน โครงเฟรม ต้องรับ โมเมนต์คัตที่ปลายคานและมีค่ามาก (fully restrained) เกือบเท่าหรือเท่ากับความสามารถต้านทาน โมเมนต์ของคานนั้น โดยเฉพาะที่มุมของอาคาร แรงดึงและแรงอัดที่กระทำต่อเสาอันเนื่องมาจาก โมเมนต์คัตในปีกคานจะมีค่าสูงมาก ซึ่งสามารถทำให้เหล็กแผ่นตั้งของเสาเกิดการคลากหรืออยู่เนื่องจากแรงอัดที่ส่งถ่ายจากปีกคาน หรือทำให้แผ่นเหล็กส่วนที่เป็นปีกของเสาเกิดการบิดตัวและแยกฉีกออกเนื่องจากแรงดึงในปีกคานที่กระทำตรงรอยต่อกับปีกเสา ในลักษณะนี้ต้องพิจารณาเสริมเหล็กเสริมข้างเสา ( เรียกว่า column stiffener ) โดยใช้เหล็กแผ่นในแนวเดียวกันกับคานหรือเหล็กแผ่นทแยงระหว่างเสากับคาน เพื่อให้สามารถถ่ายแรงกระทำดังกล่าวได้ ซึ่งในบทนี้จะไม่พิจารณาผลของการกระทำเมื่อ โมเมนต์คัตในคานมีค่าสูงมาก อย่างไรก็ตามหากทราบพฤติกรรมของการรับและถ่ายแรงที่กระทำ ก็จะสามารถออกแบบรอยต่อลักษณะนี้ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการทดสอบ

จากการศึกษาข้อมูลและรายละเอียดที่เกี่ยวข้องและได้คำนวณออกแบบ จำเป็นต้องทำการทดลองจริงเพื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี และยังสามารถสังเกตพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้น นอกเหนือจากการวิเคราะห์ตามทฤษฎีได้อีกด้วย ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการต่างๆดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการออกแบบ (ใช้มาตรฐาน AISC/LRFD ในการออกแบบ )

##### 3.1.1 กำหนดขนาดของคาน

3.1.1.1 หาค่าความกว้างของปีกคาน (Flange) โดยใช้ความหนา 0.6 mm กำหนดให้ปีกคานเป็นแบบ Compact

$$\frac{bf}{2tf} (\lambda) \leq 0.38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\frac{bf}{2(0.6)} \leq 0.38 \sqrt{\frac{2 \times 10^6}{2500}}$$

$$bf \leq 12.89 \approx 13 \text{ cm}$$

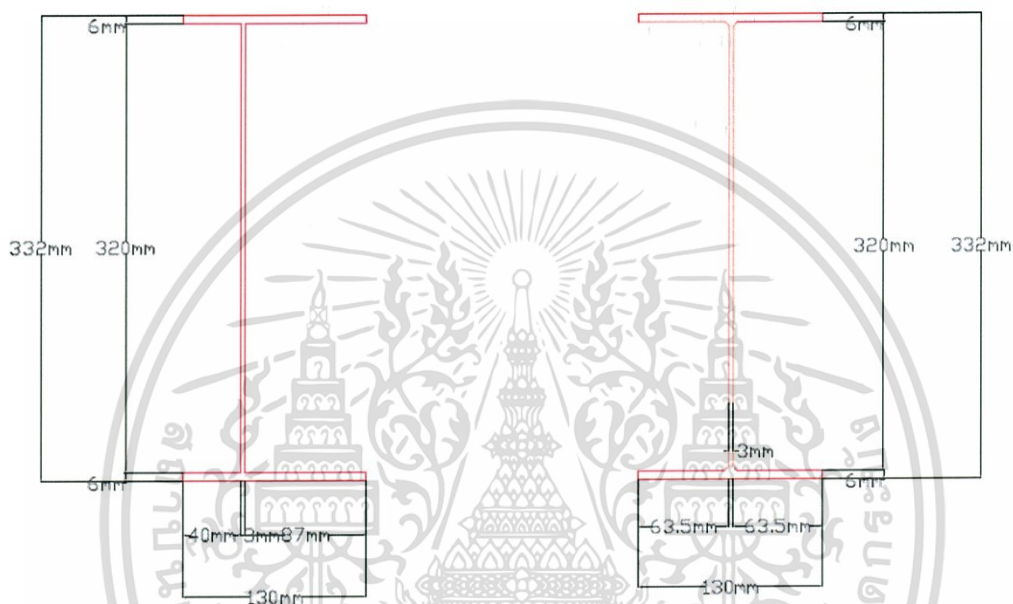
3.1.1.2 หาค่าความสูงของแผ่นตั้ง (Web) โดยใช้ความหนา 0.3 mm กำหนดให้แผ่นตั้งเป็นแบบ Uncompact

$$\frac{h}{tw} > 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{h}{0.3} > 3.76 \sqrt{\frac{2 \times 10^6}{2500}}$$

$$h > 31.9 \approx 32 \text{ cm}$$



รูปที่ 3.1 หน้าตัดแผ่นเหล็กที่ออกแบบ

3.1.2 หากำลังรับแรงเฉือนของรอยเชื่อมบนเนื้อที่ประสิทธิผลแบบ Flat fillet (ใช้ลวดเชื่อม E70F<sub>Exx</sub> = 4900 ksc , Ø = 0.75 )

3.1.2.1. รอยเชื่อมระหว่างแผ่นตั้งของกานที่ตัดแปลง

$$F_w = 0.6F_{Exx} = 0.6(4900) = 2940 \text{ ksc}$$

$$A_w = 0.707 \times 0.5 \times 33 = 11.66 \text{ cm}^2$$

$$P_w = \phi F_w A_w = (0.75)(2940)(11.66) = 25722 \text{ kg}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2. รอยเชื่อมระหว่างปีกคานกับแผ่นตั้งในคานที่ยังไม่ตัดแปลง

$$F_w = 0.6F_{E_{xx}} = 0.6(4900) = 2940 \text{ ksc}$$

$$A_w = 0.707 \times 0.5 \times 185.2 = 65.47 \text{ cm}^2$$

$$P_w = \phi F_w A_w = (0.75)(2940)(65.47) = 144361 \text{ kg}$$

3.1.2.3. รอยเชื่อมระหว่างปีกคานกับแผ่นตั้งในคานที่ตัดแปลงแล้ว

$$F_w = 0.6F_{E_{xx}} = 0.6(4900) = 2940 \text{ ksc}$$

$$A_w = 0.707 \times 0.5 \times 216.36 = 76.48 \text{ cm}^2$$

$$P_w = \phi F_w A_w = (0.75)(2940)(76.48) = 168638 \text{ kg}$$

∴ สรุปได้ว่าคานไม่มีการวิบัติที่รอยเชื่อม

3.1.3. หาค่าแรงเฉือนประลัยของหน้าตัดที่ยังไม่ได้ตัดแปลง

$$\frac{h}{t_w} = \frac{32}{0.3} = 106.67$$

$$1.37 \sqrt{\frac{5E}{f_y}} = 1.37 \sqrt{\frac{5 \times 2 \times 10^6}{2500}} = 86.64$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1.37 \sqrt{\frac{5E}{f_y}} (86.64) < \frac{h}{tw} \leq 260$$

$$\therefore V_n = A_w \frac{4.55E}{\left(\frac{h}{tw}\right)^2}$$

$$A_w = (32 + 2(0.5)) \times 0.3 = 9.9 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 9.9 \times \frac{4.55 \times 2 \times 10^6}{\left(\frac{32}{0.3}\right)^2}$$

$$V_n = 7918 \text{ kg}$$

$$\phi V_n = 0.9 \times 7918 = 7126.2 \text{ Kg}$$

3.1.4. ตรวจสอบเหล็กแผ่นตั้งของคานที่ยังไม่ได้ตัดแปลงเมื่อรับน้ำหนักแบบจุดกำหนดค่าความยาวของแผ่นเหล็กรับแรงกด (N) = 2.5 cm ระยะจากผิวนอกของปีกคานถึงรอยพอกที่เหล็กแผ่นตั้ง (k = tf + r) = 1.0 cm

3.1.4.1. ค่าแรงอัดที่ทำให้เกิดการครากของเหล็กแผ่นตั้ง (Web yielding)

$$\phi R_n = \phi(5k + N)f_y t_w = (1)((5 \times 1.0) + 2.5)(2500)(0.3)$$

$$\phi R_n = 5625 \text{ kg}$$

3.1.4.2. ค่าแรงอัดที่ทำให้เกิดการโก่งที่เหล็กแผ่นตั้ง (Web crippling)

$$\phi R_n = (0.75)0.8t_w^2 \left[ 1 + 3 \left(\frac{N}{d}\right) \left(\frac{t_w}{t_f}\right)^{1.5} \right] \sqrt{E f_y \left(\frac{t_f}{t_w}\right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi R_n = (0.75)(0.8)(0.3)^2 \left[ 1 + 3 \left( \frac{0}{33} \right) \left( \frac{0.3}{0.6} \right)^{1.5} \right] \sqrt{2 \times 10^6 \times 2500 \left( \frac{0.6}{0.3} \right)}$$

$$\phi R_n = 5839 \text{ kg}$$

3.1.4.3.ค่าแรงอัดที่ทำให้เกิดการเซออกทางข้างของแผ่นดั่ง (Sidesway web buckling)

เนื่องจาก

$$\frac{(d_c/t_w)}{(l/b_f)} = \frac{(31/0.3)}{(183/13)} = 7.34 > 1.7$$

แสดงว่าไม่มีการเซออกทางข้างที่เหล็กแผ่นดั่ง

จะสังเกตได้ว่าเหล็กจะมีการวิบัติที่แผ่นดั่งก่อนเกิดการเฉือนประลัยของหน้าตัด

### 3.2 ขั้นตอนการทำงานทดสอบ

3.2.1. จัดซื้อแผ่นเหล็กที่มีคุณสมบัติ SS400 ( $F_y$  2500 ksc) ตามรายการคำนวณ

3.2.2. ตัดและพับแผ่นเหล็กให้ได้ขนาดและความยาวตามที่ออกแบบไว้ทั้งแผ่นดั่งและแผ่น

นอน



รูปที่ 3.2 ตัดแผ่นเหล็กให้ได้ขนาดและความยาวตามที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 พับแผ่นเหล็กให้ได้ขนาด

3.2.3. นำชิ้นส่วนแผ่นตั้งและแผ่นนอนมาเชื่อมติดกันให้ได้ตามแบบที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.4 นำชิ้นส่วนแผ่นตั้งและแผ่นนอนมาเชื่อมติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดสอบการรับแรงของชิ้นงานตัวอย่าง

#### 3.3.1. เตรียมโครงรับแรงทดสอบ เตรียมติดตั้งsupport



รูปที่ 3.6 โครงรับแรงทดสอบ

#### 3.3.2. เตรียมอุปกรณ์ต่างๆ

##### 3.3.2.1 เครื่องอัดไฮดรอลิก Hydraulic jack



รูปที่ 3.7 Hydraulic jack

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.2 คานถ่ายแรงแบบแรงกระทำสองจุด



รูปที่ 3.8 คานถ่ายแรงแบบแรงกระทำสองจุด

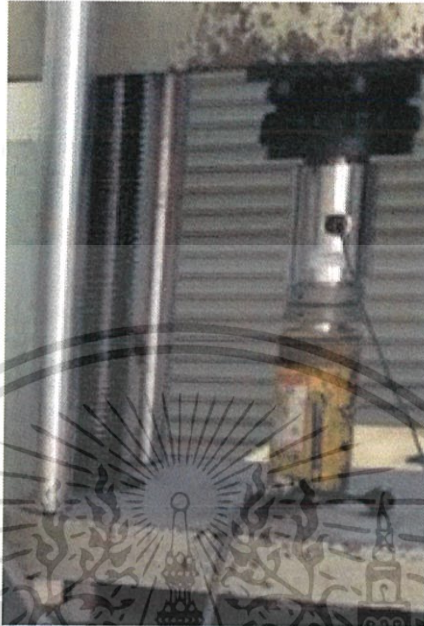
### 3.3.2.3 Dial gauge



รูปที่ 3.9 Dial gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.4 Load cell



รูปที่ 3.10 Load cell

### 3.3.2.5 Data logger



รูปที่ 3.11 Data logger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3. ตั้งคานขึ้นแท่นsupport และปรับระดับของคาน ปรับระยะให้ ได้กึ่งกลางคาน



รูปที่ 3.12 ติดตั้งคานขึ้นแท่นsupport

### 3.3.4. ตั้งคานถ่ายแรงแบบ Middle Third และวางเครื่องอัดไฮดรอลิก Hydraulic jack ให้พร้อม



รูปที่ 3.13 ติดตั้งคานถ่ายแรงแบบ Middle Third

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 วางเครื่องอัดไฮดรอลิก Hydraulic jack ให้พร้อม

3.3.5. ติดตั้งDial gauge เพื่อวัดระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน



รูปที่ 3.15 ติดตั้งDial gauge ที่กึ่งกลางคาน

3.3.6. บันทึกผล โดยจะบันทึกโดยขีดแรงกระทำเป็นเกณฑ์

3.3.7. นำเครื่องอัดไฮดรอลิก Hydraulic jack ไปปรับแก้ค่าด้วย Load cell และData logger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ปรับแก้ค่า Hydraulic jack กับ Load cell



รูปที่ 3.17 อ่านค่าจาก Data logger

## 8. นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากการทดลอง ซึ่งการเก็บผลการทดลองที่สำคัญต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และสังเกตผลที่เกิดขึ้นต่างๆดังนี้

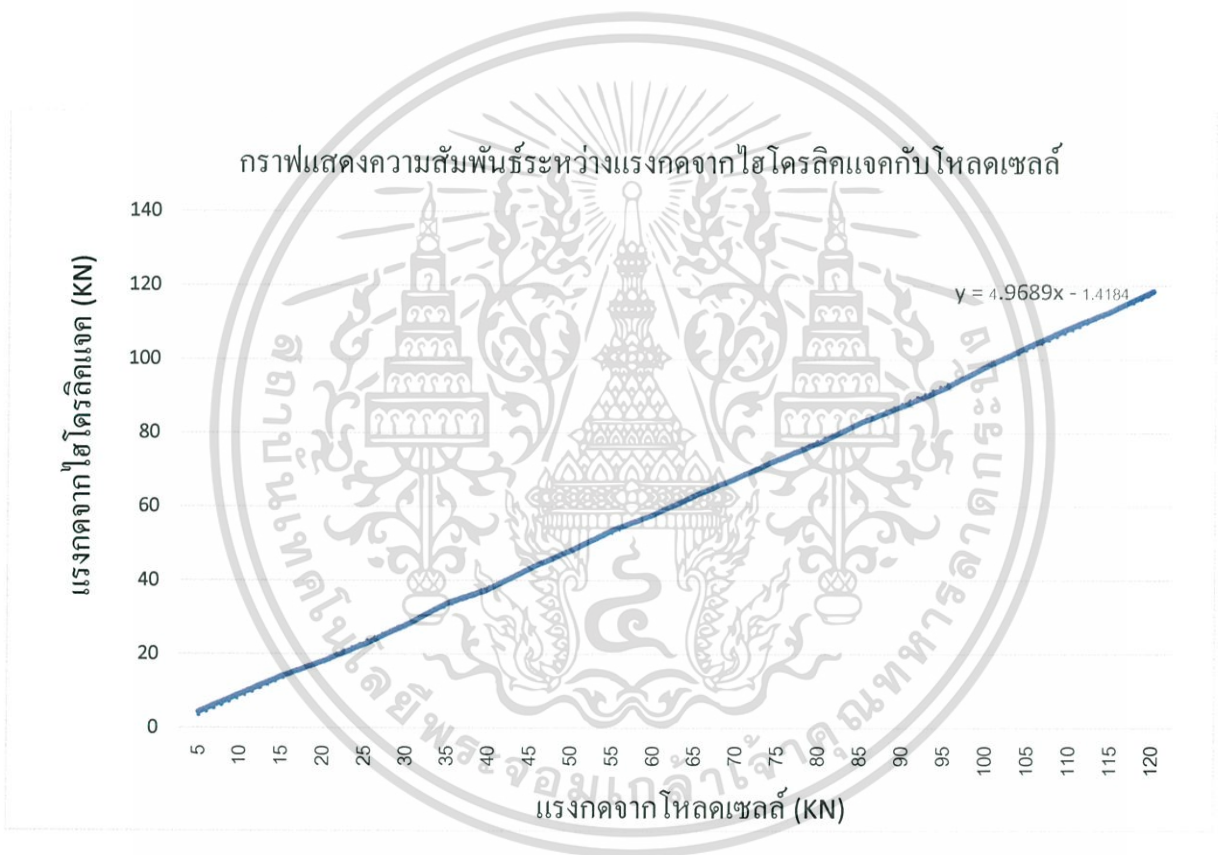
#### 4.1 การปรับเทียบค่าของอุปกรณ์ โดยเทียบระหว่างไฮโดรลิกแจค กับ โหลดเซล

ตาราง 4.1 ตารางปรับเทียบค่าแรงกด

Calibrate				
Hydraulic jack (KN)	Load cell 1 (KN)	Load cell 2 (KN)	Load cell 3 (KN)	Load cell (KN)
5	4.91	3.93	4.12	4.32
10	9.38	8.93	9.11	9.14
15	14.9	13.79	13.19	13.96
20	18.64	17.79	17.84	18.09
25	23.45	22.79	22.01	22.75
30	28.66	27.81	27.47	27.98
35	34.48	33.13	34.21	33.94
40	37.7	37.52	37.63	37.61667
45	43.52	43.25	43.31	43.36
50	48.75	49.02	46.95	48.24
55	53.65	53.64	53.91	53.73333
60	58.23	57.45	58.08	57.92
65	63.72	63.57	62.17	63.15333
70	68.12	68.95	66.28	67.78333
75	72.68	73.28	72.51	72.82333
80	77.79	77.08	77.58	77.48333
85	83.36	82.67	82.88	82.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

90	88	87.21	86.96	87.39
95	92.32	92.07	92.08	92.15667
100	99.87	97.84	97.08	98.26333
105	104.3	104.03	102.24	103.5233
110	109.02	108.6	108.12	108.58
115	112.63	113.81	112.75	113.0633
120	118.61	117.96	118.61	118.3933



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการปรับค่าของอุปกรณ์ โดยเทียบระหว่างไฮโดรลิกแจค กับ โหลดเซลล์

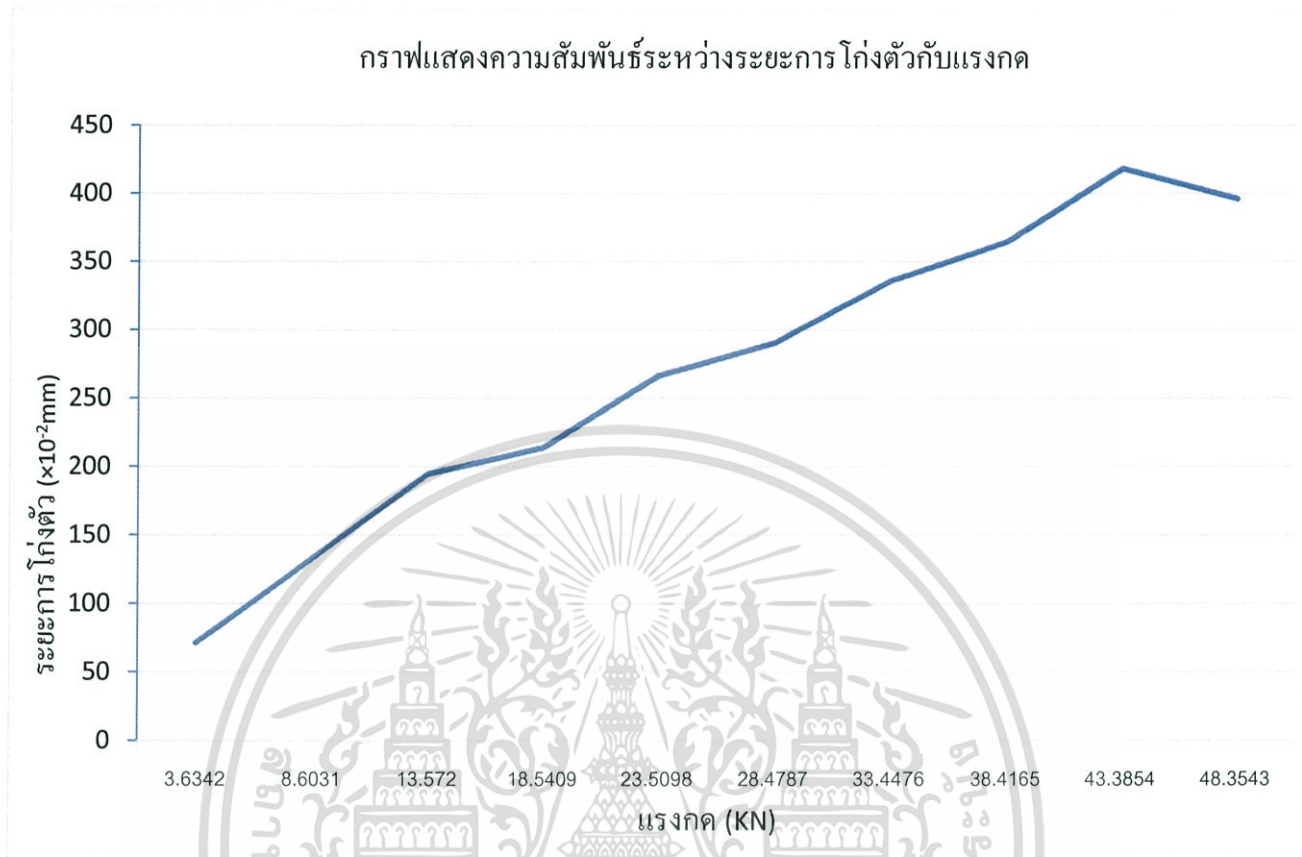
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 คานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งตรง รับน้ำหนักที่กระทำโดยแรงกระทำสองจุดและ  
วัดการแอ่นตัวกึ่งกลางคาน

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งตรง โดยวัดการแอ่นตัว  
กึ่งกลางคาน 2 จุด

Calibrated load (KN)	Actuary load + Tool weight (KN)	Deflection ( $\times 10^{-2}$ mm)		
		1	2	adv.
3.5505	3.6342	71	72	71.5
8.5194	8.6031	124	142	133
13.4883	13.572	174	215	194.5
18.4572	18.5409	190	238	214
23.4261	23.5098	233	300	266.5
28.395	28.4787	253	328	290.5
33.3639	33.4476	290	382	336
38.3328	38.4165	312	418	365
43.3017	43.3854	352	485	418.5
48.2706	48.3543	370	422	396
52.24572	52.32942			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งตัวกับแรงกดของคานเหล็กรูป  
ตัวไอ แบบแผ่นตั้งตรง

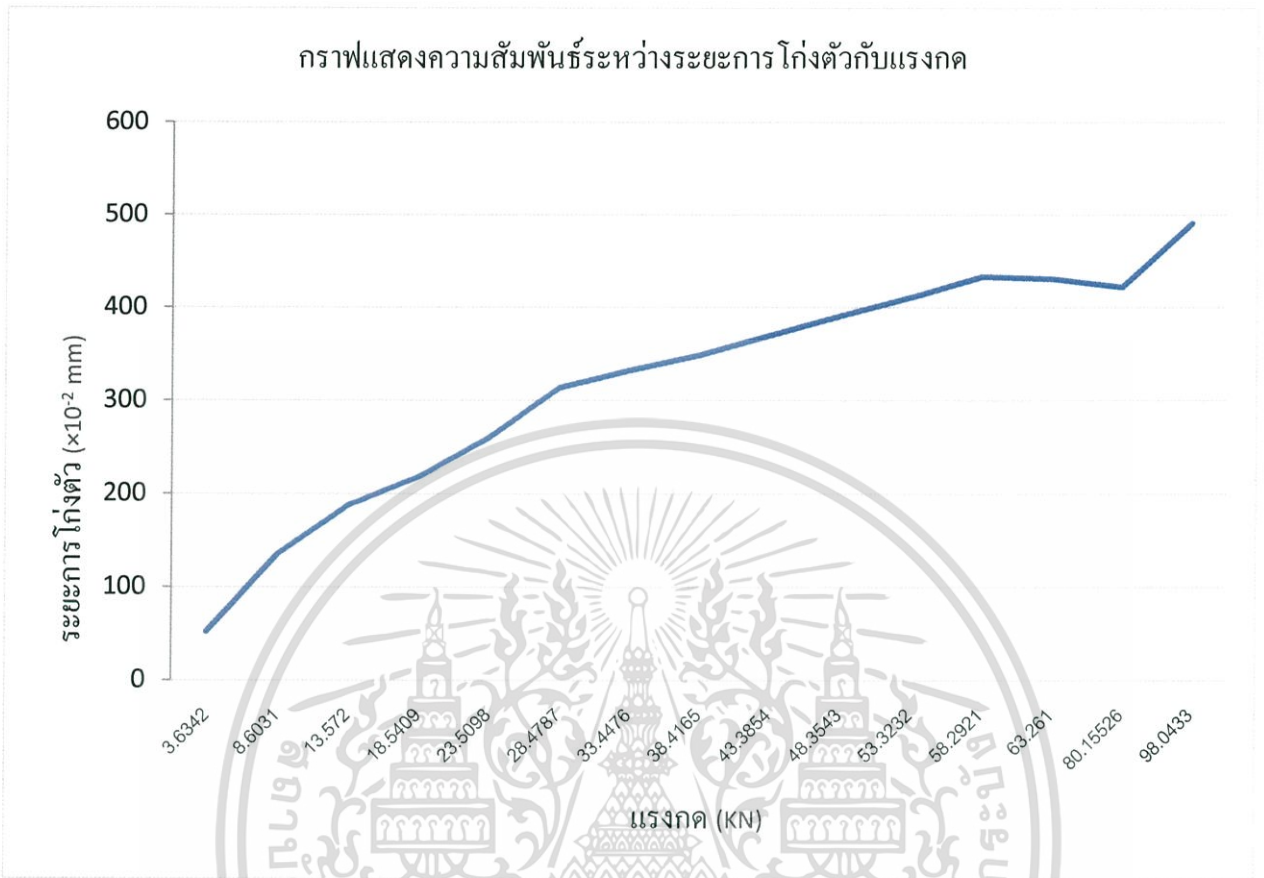
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 คานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งซิกแซก รับน้ำหนักที่กระทำโดยแรงกระทำสองจุด และวัดการแอ่นตัวกึ่งกลางคาน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งซิกแซก โดยวัดการแอ่นตัวกึ่งกลางคาน 2 จุด

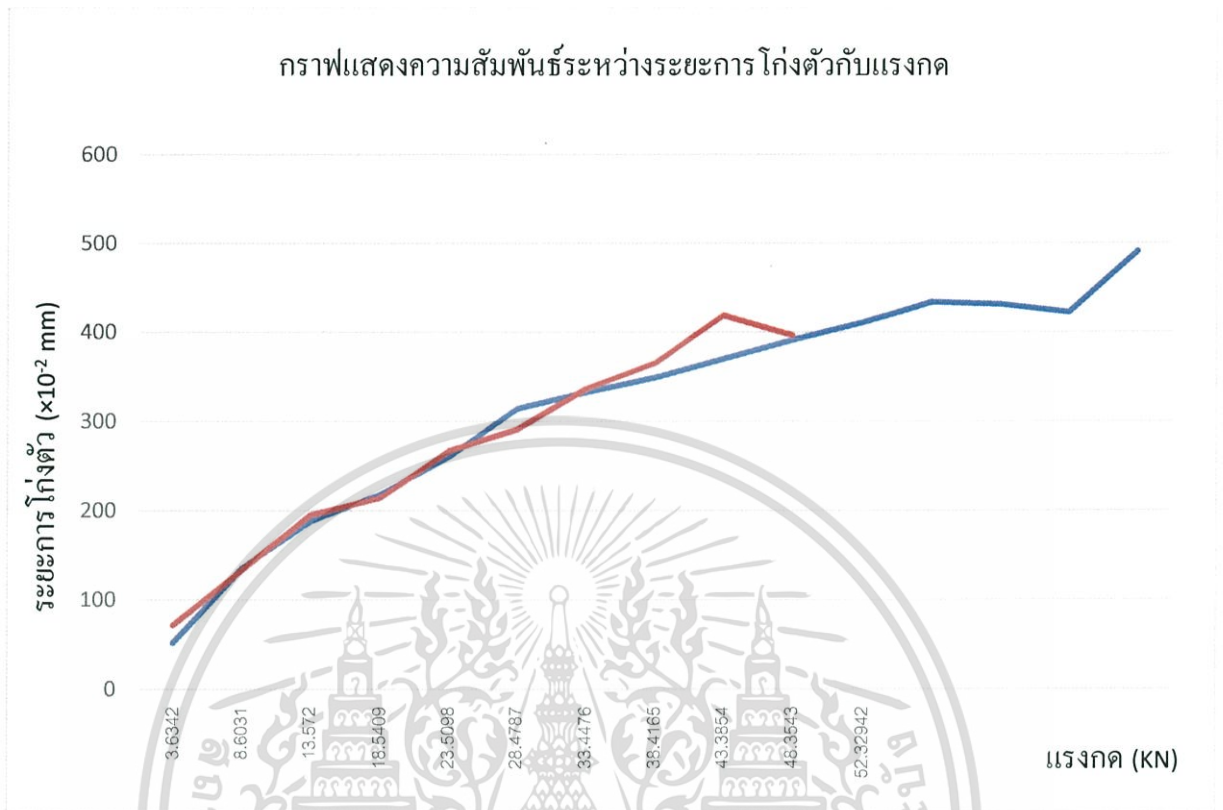
Calibrated load (KN)	Actuary load + Tool weight (KN)	Deflection ( $\times 10^{-2}$ mm)		
		1	2	adv.
3.5505	3.6342	59	45	52
8.5194	8.6031	140	130	135
13.4883	13.572	190	185	187.5
18.4572	18.5409	216	220	218
23.4261	23.5098	255	265	260
28.395	28.4787	323	305	314
33.3639	33.4476	325	340	332.5
38.3328	38.4165	343	355	349
43.3017	43.3854	367	373	370
48.2706	48.3543	390	392	391
53.2395	53.3232	410	412	411
58.2084	58.2921	433	434	433.5
63.1773	63.261	420	442	431
80.07156	80.15526	441	403	422
97.9596	98.0433	484	498	491

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งตัวกับแรงกดของคานเหล็กรูป  
ตัวไอแบบแผ่นตั้งซิกแซก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งตัวกับแรงกดของคานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งซิกแซกเปรียบเทียบกับคานเหล็กรูปตัวไอแบบแผ่นตั้งตรง

น้ำหนักที่รับได้ก่อนเกิดการวิบัติในเหล็กรูปพรรณแบบแผ่นตั้งตรง = 5.233 ตัน

น้ำหนักที่รับได้ก่อนเกิดการวิบัติในเหล็กรูปพรรณแบบแผ่นตั้งซิกแซก = 9.804 ตัน

$$\text{น้ำหนักที่รับได้เพิ่มขึ้นจากการดัดแปลง} = \frac{(9.804 - 5.233)}{5.233} \times 100 = 84.48 \%$$

น้ำหนักเหล็กรูปพรรณแบบแผ่นตั้งตรง = 36.2 กก.

น้ำหนักเหล็กรูปพรรณแบบแผ่นตั้งซิกแซก = 37.5 กก.

$$\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากการดัดแปลง} = \frac{(37.5 - 36.2)}{36.2} \times 100 = 3.59 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผล

คานเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอที่ดัดแปลงแล้วสามารถรับแรงกดแบบแรงกระทำสองจุด ได้มากกว่า 87.48% ก่อนเทียบกับแบบปกติ และในการทดสอบพบว่าการวิบัติของคานเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอแบบปกติเป็นการวิบัติแบบ Web crippling และสามารถรับแรงกดได้ 5.233 ตัน ในขณะที่คานเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอที่มีการดัดแปลงแล้วสามารถรับน้ำหนักได้ถึง 9.804 ตัน ก่อนจะหยุดทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบการแอ่นตัวของชิ้นงานทั้งสองชิ้นแล้วพบว่ามีการแอ่นตัวไม่แตกต่างกันมากที่ค่าแรงกดเท่ากัน อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อมีการดัดแปลงคานเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอแล้วจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากเดิม ซึ่งในคานเหล็กแบบปกติ มีน้ำหนัก 36.2 กิโลกรัม และในรูปแบบที่ดัดแปลงแล้วมีน้ำหนัก 37.5 กิโลกรัม น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคิดเป็น 3.59% ของน้ำหนักคานเหล็กแบบปกติพบว่าน้ำหนักที่ใช้ต่างกันไม่มาก ซึ่งถือว่าคุ้มค่ากับผลที่ได้รับ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบพบว่าคานเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอที่มีการดัดแปลงสามารถรับแรงกระทำได้มากกว่าแบบปกติ แต่พบว่าข้อเสียของคานเหล็กที่ดัดแปลงแล้วคือน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น หากในอนาคตมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบให้คานที่ดัดแปลงแล้วให้มีน้ำหนักเท่ากับหรือน้อยกว่าคานเหล็กแบบปกติ ในขณะที่สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าเดิม จะสามารถพัฒนาคุณภาพและลดต้นทุนในการผลิตได้ดียิ่งขึ้น ประการสุดท้ายคือขั้นตอนการผลิต ในรูปแบบคานเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอรูปแบบปกติจะผลิตขึ้นโดยการรีดร้อน ซึ่งในคานเหล็กรูปพรรณที่ปรับปรุงแล้วไม่สามารถผลิตโดยการรีดร้อนได้ เนื่องจากรูปแบบของแผ่นดัดที่ซับซ้อน ถือเป็นจุดด้อยของเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอที่ดัดแปลงแล้ว หากในอนาคตมีการพัฒนากรรมวิธีการผลิตของเหล็กรูปพรรณแบบนี้ให้ดียิ่งขึ้น จะส่งผลดีเป็นอย่างยิ่ง

เมื่อเปรียบเทียบในรายละเอียด จะเห็นชัดเจนว่าส่วนประกอบทางเคมีของเกรด SS400 ควบคุมเพียงค่า P (Phosphorus), และ S (Sulfur) ซึ่งหากมีปริมาณมากทำให้เหล็กเปราะ และเกรดนี้ไม่ได้ควบคุมค่า Carbon ซึ่งเป็นธาตุที่เพิ่มความแข็งแรงของเหล็ก แต่หากมีมากเกินไปทำให้เหล็กมีความเปราะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ SM400 ควบคุมปริมาณ Carbon, Silicon, Manganese ในระดับที่เหมาะสม และมีธาตุ Phosphorus, Sulfur ในระดับต่ำ ทำให้เหล็กมีความเปราะต่ำ มีความเหนียวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลด้านความยืด (Elongation) และความทนต่อแรงกระแทก (Impact) ดีขึ้น

ดังนั้นเกรด SS400 จึงใช้ในงานโครงสร้างทั่วไปที่มีการตัด เจาะรูขันน็อต และเชื่อมได้แต่ควรควบคุมการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม ส่วนเกรด SM400 มีคุณสมบัติต่างๆ ดีขึ้น โอกาสแตกร้าวจากรอยเชื่อมต่ำลง มีความเหนียว และมีคุณสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิ 0°C จึงเป็นเกรดที่เหมาะสมกับงานเชื่อม งานเจาะรูขันน็อต รวมถึงงานตัดโค้ง ซึ่งโครงการส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้งานได้เป็นอย่างดี

### ก.3 การระบุ Specification ของเหล็กรูปพรรณ

ในการระบุรายละเอียดของวัสดุในแบบก่อสร้างหรือรายการวัสดุสำหรับเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน เริ่มจากระบุมาตรฐานเกรด ชนิดหน้าตัด เช่น H-beam ต่อด้วยขนาดของหน้าตัด นอกจากนี้ จะระบุความยาวที่ต้องการและปริมาณที่จะใช้เป็นหน่วยน้ำหนัก

ปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อนได้ถึงขนาด H 900x300 มม. และผลิตในเกรดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเกรดของต่างประเทศเพื่อส่งออกและเกรดในประเทศ ส่วนใหญ่ผู้ใช้งานในประเทศไทยใช้เกรด SM400 ของมาตรฐาน TIS 1227-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับงานโครงสร้างเหล็กสำหรับอาคารทุกประเภท

เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน เป็นวัสดุโครงสร้างที่นับวันจะนำไปใช้งานมากขึ้น เนื่องจากการก่อสร้างที่ต้องการความแข็งแรง ความสวยงาม และความรวดเร็ว เพื่อตอบสนองให้ผู้ใช้งานได้รับประโยชน์สูงสุด