บทที่ 2
ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างไม้

2.1 โครงสร้างรับแรงดึง

การออกแบบส่วนของโครงสร้างรับแรงดึงเราต้องพิจารณาตรง หน้าตัดวิกฤต (critical section) ของไม้ที่นำมาใช้รับแรงดึงเพราะการทำรอยต่อที่ปลายของส่วนโครงสร้างรับแรงดึงด้วยอุปกรณ์ยึดไม้ เช่น ตะปู สลักเกลียวแหวนยึดไม้ทำให้เนื้อที่ของหน้าตัดไม้ที่จะใช้ในการรับแรงดึงลดลง ซึ่ง มีสูตรคำนวณหาหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น ดังนี้

$$\text{หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น} : f_t = \frac{P}{A_n} \qquad (2.1)$$

ในที่นี้ A_n = เนื้อที่หน้าตัดสุทธิ (net cross - sectional area) ตรงหน้าตัดวิกฤต

$= A_g - \sum A_h$

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดตรงหน้าตัดวิกฤตที่ตั้งฉากกับแรงดึงที่กระทำ

$\sum A_h$ = ผลรวมของเนื้อที่หน้าตัดของรูเจาะ (hole area) ตรงหน้าตัดวิกฤต

P = แรงดึงใช้งานทั้งหมดที่กระทำตั้งฉากและผ่านศูนย์ถ่วงของหน้าตัดไม้

จากหลักเกณฑ์การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน : หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น (f_t) ต้องมีค่าไม่มากเกินกว่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ (F_t) ซึ่งตามปกติให้มีค่าเท่ากับหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ตามชนิดของกลุ่มไม้ภายหลังที่ปรับค่าตามสภาวะใช้งานแล้ว นั่นคือ $f_t \le F_t$

สำหรับการออกแบบเพื่อหาขนาดหน้าตัดของไม้ที่ต้องการใช้สำหรับรับแรงดึงใช้งาน P ที่กระทำ จะพิจารณาได้จากสมการข้างต้นและเพื่อความประหยัดจึงพิจารณาให้หน่วยแรงดึงที่จะเกิดขึ้นบนเนื้อที่หน้าตัดสุทธิตรงหน้าตัดวิกฤต มีค่าเท่ากับหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ (F_t) ดังนั้น จากสมการ (2.1) จะได้ว่า

$$\text{เนื้อที่หน้าตัดสุทธิที่ต้องการ} : A_n = \frac{P}{F_t} \qquad (2.2)$$

$$\text{นั่นคือต้องการเนื้อที่หน้าตัดไม้ทั้งหมด} : A_g = A_n + \sum A_h \qquad (2.3)$$

เมื่อเลือกใช้ขนาดของหน้าตัดไม้ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด รวมถึงการออกแบบรอยต่อเพื่อหาจำนวนอุปกรณ์ยึดไม้ที่ต้องการและพิจารณาจัดเรียงตัวยึดนั่นให้เป็นไปตามข้อกำหนด ให้ตรวจสอบขั้นสุดท้ายว่าขนาดหน้าตัดของไม้ที่เลือกใช้ไม่ทำให้หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นตรงหน้าตัดวิกฤตมีค่าเกินกว่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ตามชนิดของกลุ่มไม้นั้น นั่นคือเนื้อที่หน้าตัดสุทธิจริงตรงหน้าตัดวิกฤตต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเนื้อที่หน้าตัดสุทธิที่ต้องการ

เนื้อที่หน้าตัดสุทธิ (net cross-sectional area) จากที่กล่าวข้างต้นเนื้อที่หน้าตัดสุทธิตรงหน้าตัดวิกฤต : $A_n = A_g - \sum A_h$ ทั้งนี้ค่าของ $\sum A_h$ เป็นผลรวมของเนื้อที่หน้าตัดของรูเจาะตรงหน้าตัดวิกฤตนั้นการหาเนื้อที่หน้าตัดของรูเจาะในส่วนของโครงสร้างรับแรงดึง ให้พิจารณาดังนี้ถ้าทำรอยต่อด้วยตะปูให้ถือว่าว่าค่า $\sum A_h = 0$ ถ้าทำรอยต่อด้วยสลักเกลียวให้แบ่งการพิจารนาออกเป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีที่ใช้สลักเกลียวหลายแถวแต่ไม่มีการเยื้องหรือสลับกัน (zig–zag)ให้ถือว่าหน้าตัดวิกฤตค่าของ $\sum A_h$ มีค่าเท่ากับ $\sum td$ ซึ่งเป็นผลรวมของจำนวนรูเจาะในแถวที่ตั้งฉากกับแรงดึงที่กระทำ โดยที่ t คือ ความหนาของเนื้อไม้ และ dh คือขนาดรูเจาะของสลักเกลียวซึ่งมีขนาดโตกว่าขนาดของสลักเกลียวที่ใช้ประมาณ 1/6 นิ้ว (2 มม.)

2. กรณีที่ใช้สลักเกลียวหลายแถวแต่เรียงเยื้องสลับกัน (zig – zag) ถ้าระยะห่างในแนวขนานเสี้ยนจากรูเจาะในแถวหนึ่งกับรูเจาะเยื้องในอีกแถวหนึ่ง มีค่าน้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของสลักเกลียวให้นับรวมเนื้อที่หน้าตัดรูเจาะที่เยื้องนั้นด้วย หรือ อาจพิจารณาว่าถ้ามุมระหว่างแนวเยื้อง (จากรูเจาะในแถวหนึ่งกับรูเจาะในอีกแถวหนึ่ง) กับแนวแรงมีค่าเกินกว่า 45 องศาให้นับรวมเนื้อที่หน้าตัดรูเจาะที่เยื้องนั้นด้วย

เมื่อทำรอยต่อด้วยสลักเกลียว เนื้อที่หน้าตัดสุทธิสำหรับไม้เนื้อแข็งที่ผึ่งหรืออบแห้งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดที่รับแรงกด (bearing area) ของสลักเกลียวทุกตัวที่รอยต่อนั้น ส่วนเนื้อที่หน้าตัดสุทธิสำหรับไม้เนื้ออ่อนที่ผึ่งหรืออบแห้งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดที่รับแรงกดของสลักเกลียวทุกตัว แต่ในกรณีที่ใช้ไม้สดและปล่อยให้ผึ่งแห้งขณะที่รับน้ำหนักให้พิจารณาว่า เนื้อที่หน้าตัดสุทธิสำหรับไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนจะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 42 และร้อยละ 33 ของเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดที่รับแรงกดของสลักเกลียว ทุกตัวตามลำดับ

ถ้าทำรอยต่อด้วยแหวนยึด หน่วยแรงดึงที่เกิดบนหน้าตัดสุทธิต้องมีค่าไม่เกิน 7/8 ของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ทั้งนี้เนื้อที่หน้าตัดของร่องแหวนยึดและสลักเกลียวประกอบด้วย ความลึกของร่องแหวนในเนื้อไม้คูณด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของร่องแหวน บวกด้วยเนื้อที่หน้าตัดของรูเจาะสลักเกลียวที่เลยออกมาจากความลึกของแหวนยึด

หากเรียงแหวนยึดเยื้องกัน (zig-zag) ถ้าระยะเรียงในแถวขนานเสี้ยนระหว่างแหวนยึดตัวหนึ่งที่หน้าตัดวิกฤตกับแหวนยึดอีกตัวหนึ่งที่เยื้องกัน มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแหวนยึด ให้นับรวมเนื้อที่หน้าตัดของร่องแหวนตัวที่เยื้องนั้นด้วย

ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบส่วนโครงสร้างที่รับแรงดึง คือ ตำหนิของไม้ตลอดความยาวซึ่งเป็นตัวทอนกำลังของไม้ เช่น ตาไม้ (knot) เป็นต้น ถ้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาตำหนิของไม้ ให้ลดค่าของหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ลง หรือนำเอาเนื้อที่หน้าตัดของตาไม้ไปลบออกจากเนื้อที่หน้าตัดสุทธิที่คำนวณได้

2.2 โครงสร้างรับแรงอัด

ส่วนของโครงสร้างที่รับแรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียวที่พบเห็นทั่วไป คือ เสา (column) ภายในของอาคาร แบบอื่นได้แก่ จันทัน (top chord) ของโครงหลังคา หรือโครงสะพาน ค้ำยัน เป็นต้น การพิจารณาออกแบบส่วนโครงสร้างที่รับแรงอัดจะซับซ้อนกว่าโครงสร้างรับแรงดึง เนื่องจากส่วนโครงสร้างที่รับแรงอัดที่ยาวมีแนวโน้มที่จะแอ่นหรือโค้งโก่งตัวออกทางข้างซึ่งเป็นผลจากแรงดัดที่แฝงมากับแรงอัดตามแนวแกน การโก่งดังกล่าวเรียกว่าการโก่งเดาะของเสา (flexural buckling)โดยมีปัจจัยสำคัญคือ ช่วงความยาวของเสาที่ปราศจากการค้ำยัน (unsupported length) ซึ่งทำให้หน่วยแรงอัดสูงสุดของส่วนโครงสร้างที่รับแรงอัดนั่นมีค่าต่ำกว่าหน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนสูงสุดตามชนิดของกลุ่มไม้และไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับช่วงความยาวซึ่งปราศจากการค้ำยันที่มีค่าเพิ่มขึ้น

2.2.1 กำลังรับน้ำหนักของเสา

เสาจำแนกประเภทตามความยาวของเสาออกเป็น เสาสั้น (shot column) และเสายาว (long column) ซึ่งกำลังรับน้ำหนักและลักษณะการวิบัติของเสาจะต่างกันการเปรียบเทียบว่าเป็นเสาสั้นหรือเสายาวพิจารณาได้จากอัตราส่วนความชะลูดของเสา (slenderness ratio) ซึ่งปกติคืออัตราส่วนระหว่างช่วงความยาวของเสาที่ปราศจากการค้ำยัน (unsupported length) ต่อรัศมีไจเรชันที่น้อยที่สุด (least radius of gyration)

การพิจารณาหาน้ำหนักวิกฤต (critical load) ตามแนวแกนที่ไม่เยื้องศูนย์ (axially loaded column) ของเสาโดดๆที่ยาวและทำด้วยวัสดุเนื้อเดียวกันตลอดความยาวของเสาซึ่งมีหน้าตัดสม่ำเสมอและปลายทั้งสองข้างเป็นแบบยึดหมุน (pin-ended) กระทำได้ตามที่ Leonhard Euler ได้เสนอไว้ในปี ค.ศ. 1757 ซึ่งพบว่าน้ำหนักวิกฤตหรือน้ำหนักของออยเลอร์มีค่าดังสมการ

$$\text{น้ำหนักวิกฤต } P_e = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \qquad (2.4)$$

โดยที่ E เป็นโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ของวัสดุ I เป็นโมเมนต์อินเนอร์เชีย (moment of inertia) ของรูปตัดรอบแกนที่เกิดการโก่งเดาะ และ L เป็นช่วงความยาวของเสาที่ปราศจากการค้ำยัน (ดังรูปที่2.1)

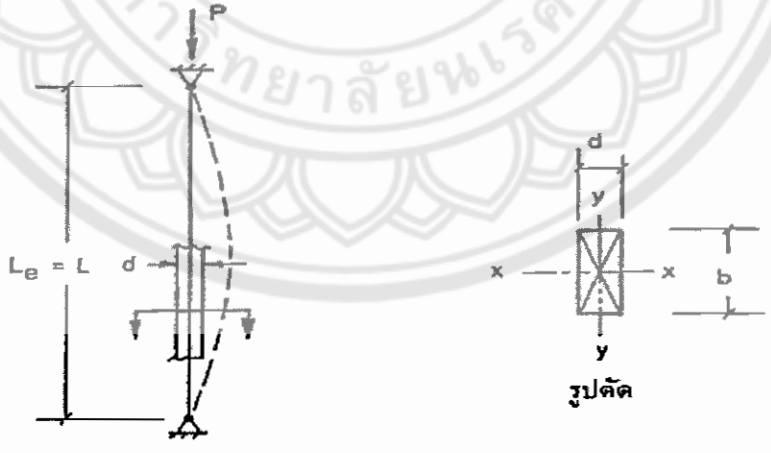
ถ้าเสามีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ A ซึ่งค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียของรูปตัด I เท่ากับ Ar^2 ในเมื่อ r เป็นรัศมีไจเรชัน

ดังนั้น หน่วยแรงอัดวิกฤตเฉลี่ย $P_e / A = \pi^2 E / (L/r)^2$ (2.5)

ค่าของ L/r เรียกว่า อัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) ของเสา ซึ่งเสาจะโก่งเดาะรอบแกนที่ให้ค่าของ L/r มากที่สุด

สำหรับเสาไม้ที่มีรูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง b และหนา d (ด้านแคบที่สุดของเสา) เสาจะโก่งเดาะรอบแกนที่ตั้งฉากกับด้านแคบ ซึ่งรัศมีไจเรชัน $r = d/\sqrt{12}$ ดังนั้น จากสมการ (2.5)จะได้

หน่วยแรงอัดวิกฤตเฉลี่ย $P_e / A = \pi^2 E / 12(L/d)^2$ (2.6)



รูปที่ 2.1 การโก่งเดาะของเสารูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

2.2.2 ผลของการยึดปลายเสาที่มีต่อกำลังรับน้ำหนักของเสา

กำลังรับน้ำหนักของเสาเดี่ยวโดด ๆที่ยาวและมีการยึดปลายแบบต่าง ๆสามารถวิเคราะห์ได้ตามแนวทางที่ Leonhard Euler ได้เสนอไว้ พบว่าน้ำหนักวิกฤตของเสายาวมีค่าดังสมการ (2.7) ซึ่งเขียนอยู่ในเทอมของช่วงความยาวประสิทธิผลของเสา (effective leagth : L_e) ดังนี้ คือ เสายาวที่โก่งเดาะในช่วงอิลาสติก : $P_{cr} = \pi^2 EI / (L_e)^2$ (2.7)

โดยที่ L_e = ช่วงความยาวประสิทธิผลของเสา $=K_eL$

L = ช่วงความยาวของเสาที่ปราศจากการค้ำยัน

K_e = ตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล (effective length factor) มีค่าคงที่ตามสภาพของการยึดปลายเสาแต่ละแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

อย่างไรก็ดี ในโครงสร้างจริงไม่สามารถยึดปลายเสาให้เป็นไปตามข้อสมมติฐานทางทฤษฎีได้ ดังนั้น ในการออกแบบโครงสร้างไม้จึงต้องพิจารณาใช้ค่าตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล (K_e) (ดังรูปที่ 2.2)

	(ก)	(ข)	(ค)	(ง)	(จ)	(ฉ)
ลักษณะการโค้งงอของเสา แสดงโดยเส้นประ						
ค่า K_e ตามทฤษฎี	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
ค่า K_e ที่ใช้ในการออกแบบ	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.4
		การหมุนที่ปลายเสา		การเคลื่อนที่ของปลายเสา		
สัญลักษณ์ของการยึดปลาย		ไม่มี		ไม่มี		
		มี		ไม่มี		
		ไม่มี		มี		
		มี		มี		

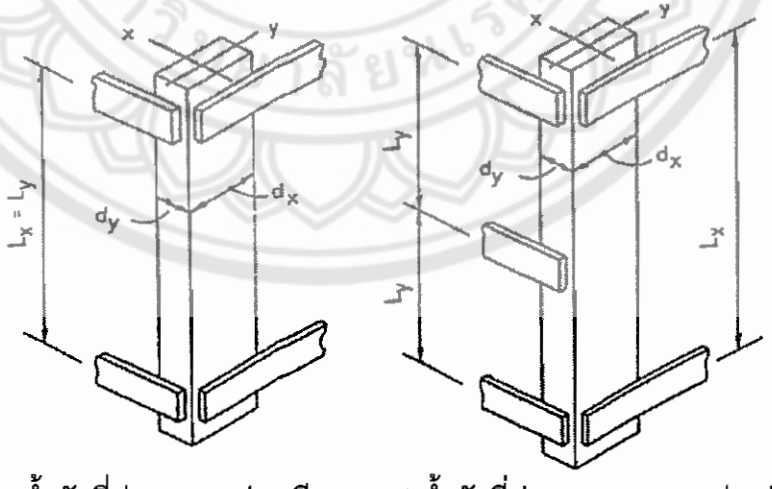
รูปที่ 2.2 ลักษณะการยึดปลายเสาและตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล

2.2.3 การทำค้ำยันข้างเสา

จากค่าของน้ำหนักวิกฤตที่ได้ของเสายาวในหัวข้อ 2.2.1 จะเห็นว่าเมื่อเสามีความยาวเท่ากัน กำลังรับน้ำหนักของเสาขึ้นอยู่กับความแข็งแกร่งของวัสดุ (EI) และถ้าใช้วัสดุอย่างเดียวกัน จะเห็นว่า กำลังรับน้ำหนักของเสาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของโมเมนต์อินเนอร์เชีย (I) ของรูปตัดเสา

เสารูปตัดหนึ่งๆจะมีค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียรอบแกนที่ตั้งฉากกันอยู่สองข้างเสมอ คือโมเมนต์อินเนอร์เชียรอบแกนหลัก x เรียกว่า I_xซึ่งมีค่ามากกว่า และรอบแกน y เรียกว่า I_y ซึ่งมีค่าน้อย ดังนั้น เสายาวที่ถูกยึดปลายทั้งสองข้างไม่ให้เซ การโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัดจะเกิดรอบแกน y เสมอ (คือโก่งออกไปตามแกน x) เพราะมีค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียน้อยที่สุดฉะนั้น กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาจะมีค่าเท่ากับ $\pi^2 EI_y/L^2$ นั่นคือต้องพิจารณากำลังรับน้ำหนักของเสาจากค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียที่น้อยที่สุดนั่นเอง อย่างไรก็ดี หากมีค้ำยันระหว่างช่วงเสาในทิศที่ตั้งฉากกับแกน y ซึ่งก็คือค้ำยันระหว่างช่วงเสาในทิศที่ขนานกับแกน x จะทำให้ช่วงความยาวของการโก่งเดาะทางแกน y ลดน้อยลง ซึ่งกำลังรับน้ำหนักของเสาที่จะทำให้เกิดการโก่งเดาะทางแกน y ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

ผู้ออกแบบสามารถเลือกค้ำยันข้างเสาให้เหมาะสมที่จะทำให้กำลังรับน้ำหนักของทั้งสองแกน (แกน x และแกน y) มีค่าเท่ากันได้



(ก) ค้ำยันที่ปลายเสาอย่างเดียว (ข) ค้ำยันที่ปลายเสาและระหว่างช่วงเสา

รูปที่ 2.3 ช่วงความยาวเสา

2.2.4 หลักการออกแบบเสาไม้

ให้ P เป็นแรงอัดทั้งหมดที่กระทำตั้งฉากบนหน้าตัดไม้ซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดวิกฤตเท่ากับ A และถ้าสมมติว่าหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น f_a แผ่กระจายสม่ำเสมอตลอดเนื้อที่หน้าตัดดังนั้น

หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น $f_a = \frac{P}{A}$ (2.8)

จากหลักเกณฑ์การออกแบบ : หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้น (f_a) ต้องมีค่าไม่มากเกินกว่าหน่วยหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (F_a) ของส่วนโครงสร้างนั่นคือ $f_a \leq F_a$

สำหรับการออกแบบเพื่อหาขนาดหน้าตัดของไม้ที่ต้องการใช้สำหรับรับแรงอัดใช้งาน P ที่กระทำ เมื่อคำนึงถึงความประหยัดจึงพิจารณาให้หน่วยแรงอัดที่จะเกิดขึ้นมีค่าเท่ากับหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของเสา F_a (ซึ่งขึ้นกับความยาวหรืออัตราส่วนความชะลูดของเสาที่จะแยกการพิจารณาเป็นกรณีไป) ดังนั่น จะหาได้ว่า

เนื้อที่หน้าตัดวิกฤตที่ต้องการ : $A = \frac{P}{F_a}$ (2.9)

การคำนวณตามสมการข้างต้นต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก โดยต้องสมมติค่าของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของเสา F_a ขึ้นมาก่อน เมื่อคำนวณได้เนื้อที่หน้าตัดวิกฤตที่ต้องการจึงไปเลือกใช้ขนาดของหน้าตัดเสาไม้ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ทำการตรวจสอบค่าแท้จริงของหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของเสานั้น F_a แล้วคูณด้วยเนื้อที่หน้าตัดของไม้ ก็จะได้กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสา ถ้าได้ค่ามากกว่าแรงอัดใช้งานที่กระทำ (แต่ไม่มากนัก) ก็แสดงว่าเลือกใช้ขนาดเสาไม้เหมาะสมแล้ว แต่ถ้าได้ค่ามากเกินไปแสดงว่าเลือกใช้ขนาดเสาไม้ใหญ่เกินไม่ประหยัด และหากได้ค่าน้อยกว่าแรงอัดใช้งานที่ต้องการก็ใช้ไม่ได้แสดงว่าเลือกใช้ขนาดเสาไม้เล็กเกินไป ต้องกลับไปหาเนื้อที่หน้าตัดวิกฤตที่ต้องการใหม่โดยอาจสมมุติใช้ค่าของ F_a ที่หาได้ครั้งหลังสุดเป็นตัวเริ่มพิจารณา

การคำนวณออกแบบส่วนของโครงสร้างที่รับแรงอัด จะพิจารณาใช้เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของรูปตัด (A_g) ในช่วงที่อยู่ระหว่างรอยต่อยึดเพราะในช่วงนั้นต้องรับน้ำหนักวิกฤตและไม่มีการทำรูเจาะแต่อย่างใด แต่เมื่อมีรูเจาะหรือที่บริเวณปลายเสาซึ่งทำรอยต่อให้พิจารณาใช้เนื้อที่หน้าตัดสุทธิ (A_n)เพื่อคำนวณหากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาโดยใช้ค่าหน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนที่ยอมให้ซึ่งไม่ขึ้นกับอัตราส่วนความชะลูด

2.3 การออกแบบเสาไม้ตันธรรมดา

การคำนวณออกแบบเพื่อหาเนื้อที่หน้าตัดของเสาไม้ที่ต้องการใช้เพื่อรับแรงอัดใช้งาน P ที่กระทำพิจารณาจากสมการ 2.9

เนื้อที่หน้าตัดที่ต้องการ : $A = \frac{P}{F_a}$

โดยที่ F_a = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของเสา มีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความชะลูด L_e/d

L_e = ช่วงความยาวประสิทธิผลของเสา $= K_e L$

K_e = ตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล

L = ช่วงความยาวของเสาที่ปราศจากการค้ำยัน

R = รัศมีไจเรชันที่น้อยที่สุดของเสา

d = ขนาดด้านแคบสุดของเสา

2.3.1 สูตรคำนวณหาหน่วยแรงอัดที่ยอมให้สำหรับเสาตันรูปตัดสี่เหลี่ยม

1. สูตรที่ไม่แบ่งประเภทของเสาสั้นหรือเสายาว

หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ $F_a = \frac{0.3E}{(Le/d)^2}$ (2.10)

2. สูตรที่ไม่ต้องใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E)

เสาสั้น (เมื่อ $\frac{L_e}{d} \leq 12$) ; $F_a = F_c$ (2.11)

เสายาว (เมื่อ $\frac{L_e}{d} > 12$) ; $F_a = F_c(1.33 - \frac{L_e}{35d})$ (2.12)

3. สูตรพาราโบลากำลังสี่

เสาสั้น (เมื่อ $\frac{L_e}{d} \leq 11$) ; $F_a = F_c$ (2.13)

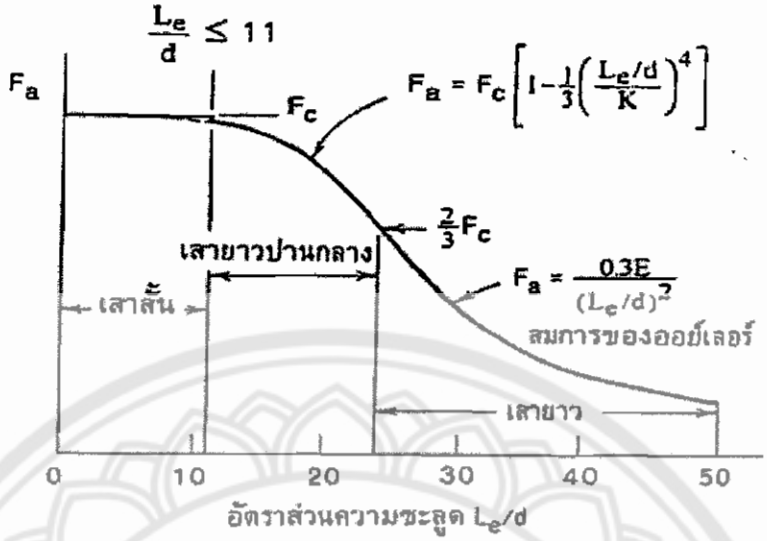
เสายาวปานกลาง (เมื่อ $11 < \frac{L_e}{d} \leq K$) ; $F_a = F_c(1 - \frac{1}{3}(\frac{Le/d}{K})^4$ (2.14)

เสายาว (เมื่อ $K < L_e/d \leq 50$) ; $F_a = \frac{0.3E}{(L_e/d)^2}$ (2.15)

ซึ่ง F_c = หน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนของไม้ กก. ต่อ ซม^2

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของไม้ ไม้ กก. ต่อ ซม^2

$K = 0.671\sqrt{E/F_c}$ เป็นอัตราส่วนความชะลูดที่หน่วยแรงอัดยอมให้ของเสามีค่า 2/3 ของหน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนที่ยอมให้ของไม้นั้น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ F_a กับอัตราส่วน L_e/d

2.3.2 สูตรคำนวณหาหน่วยแรงอัดที่ยอมให้สำหรับเสาตันรูปตัดกลม

การพิจารณาหาหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของเสาไม้ตันธรรมดารูปตัดกลมต้องมีอัตราส่วน L_e/d ไม่น้อยกว่า 44

เสาสั้น (เมื่อ $\frac{L_e}{D} \leq 9.75$) ; $F_a = F_c$ (2.16)

เสายาวปานกลาง (เมื่อ $9.75 < \frac{L_e}{d} \leq K_R$) ; $F_a = F_c(1-\frac{1}{3}(\frac{Le/D}{K_R})^4)$ (2.17)

เสายาว ($K_R < \frac{L_e}{d} \leq 44$) ; $F_a = \frac{0.225E}{(Le/D)^2}$ (2.18)

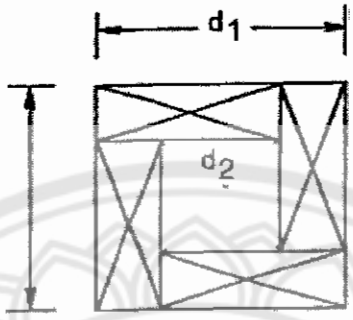
ซึ่ง F_c = หน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนของไม้ กก. ต่อ ซม^2

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของไม้ กก. ต่อ ซม^2

$K_R = 0.58\sqrt{E/F_c}$

2.4 เสาประกอบกลวงรูปตัดคล้ายกล่อง

เสาประกอบขึ้นจากไม้ 4 แผ่น ความกว้างของไม้ต้องกว้างไม่เกิน 10 เท่าของความหนาของไม้แผ่นนั้น (ดังรูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 เสาประกอบกลวง

กำลังรับน้ำหนักขึ้นกับอัตราส่วน L_e/d โดยที่ d มีค่าเท่ากับ $\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$ ซึ่ง d_1 เป็นความกว้างด้านนอก และ d_2 เป็นความกว้างด้านใน

เสาสั้น (เมื่อ $\frac{L_e}{d} \leq 8$) หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ $F_a = qF_c$ (2.19)

เสายาวปานกลาง (เมื่อ $8 < \frac{L_e}{d} \leq K_B$) ; $F_a = qF_c(1-\frac{1}{3}(\frac{Le/d}{K_B})^4)$ (2.20)

เสายาว (เมื่อ $K_B < \frac{L_e}{d} \leq 50$); $F_a = \frac{0.3uE}{(Le/d)^2}$ (2.21)

ซึ่ง F_c = หน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนที่ยอมให้ของไม้ กก.ต่อ ซม^2

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของไม้ กก.ต่อ ซม^2

$K_B = 0.671\sqrt{UE/qFc}$

ค่าของ U และ q ขึ้นกับความหนา t ของไม้ ดังนี้

เมื่อ t = 1" ค่า U = 0.80 และ q = 1.0

เมื่อ t = 2" ค่า U = 0.60 และ q = 1.0

2.5 ส่วนโครงสร้างรับแรงดัด

ค่าของแรงดัดที่เกิดขึ้น (f_b) ที่ระยะใดๆที่ห่างจากแกนสะเทินภายใต้การกระทำของโมเมนต์ดัด M คำนวณได้จากสูตรแรงดัดดังนี้

$$f_b = Mc/I = M/S \qquad (2.22)$$

โดยที่ c เป็นระยะห่างจากแกนสะเทิน

I เป็นโมเมนต์อินเนอร์เชีย $=\frac{1}{12}bh^3$

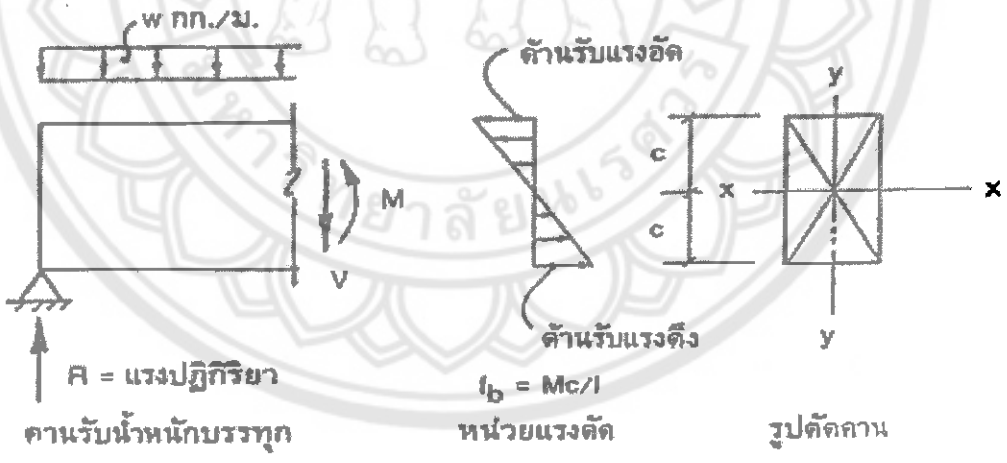
S เป็นโมดูลัสอิลาสติกของรูปตัด=I/c

หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดที่หลังคานและท้องคาน (ดังรูปที่ 2.6)

$$f_b=\frac{6M}{bh^2} \text{ หรือ } M/S \leq F_b$$

$$h = \sqrt{\frac{6M}{bF_b}}$$

อัตราส่วนความลึกต่อความหนา(h/b)ของตงไม้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 3 ถึง 6 และควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 สำหรับคานไม้



รูปที่ 2.6 หน่วยแรงดัดขนานเสี้ยนในคานไม้

2.5.1 ผลกระทบของความลึก

เมื่อคานไม้มีความลึกมากกว่า 30 ซม. ค่าของโมดูลัสแตกหักมีค่าลดน้อย ลงทำให้กำลังต้านทานแรงดัดหรือหน่วยแรงดัดที่ยอมให้มีค่าลดลงตามค่าความลึกของคานไม้ที่มากขึ้น ดังนั้น จึงให้คูณค่าหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ด้วยตัวคูณประกอบความลึก (C_d) มีค่าดังนี้

$$C_d = 0.81\left(\frac{h^2+894}{h^2+550}\right) \leq 1 \qquad (2.23)$$

โดยที่ h เป็นความลึกของคาน หน่วยเป็น ซม.

2.5.2 ผลกระทบของรูปร่างหน้าตัด

คานไม้ที่มีรูปตัดกลม รูปตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแต่วางเส้นทแยงมุมอยู่ในแนวดิ่ง**รวมถึง**รูปตัดตัวไอ หรือ สี่เหลี่ยมกลวงมีผลต่อกำลังต้านทานแรงดัด (C_f)มีค่าดังนี้

เมื่อรูปตัดคานเป็นวงกลม : C_f=1.18

เมื่อรูปตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส: C_f=1.414

เมื่อรูปตัดเป็นตัวไอ หรือ สี่เหลี่ยมกลวง

$$C_d = 0.81\left(1+\left(\frac{h^2+894}{h^2+550}-1\right)C\right) \qquad (2.24)$$

โดย $C = p^2(6-8p+3p^2)(1-q)+q$ (2.25)

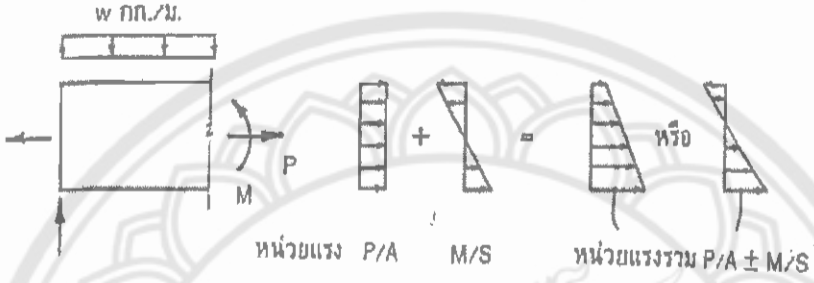
P = อัตราส่วนระหว่างความหนาของปีกคานที่รับแรงอัดต่อความลึกทั้งหมดของคาน

q = อัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นตั้งต่อความกว้างทั้งหมดของคาน

2.6 ส่วนโครงสร้างรับแรงตามแกนและแรงดัดร่วมกัน

เมื่อส่วนของโครงสร้างมีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ A ต้องรับแรงดึงหรือแรงอัดตามแกนซึ่งมีค่าเท่ากับ P และแรงดัดหรือโมเมนต์ M รอบแกนใดแกนหนึ่งถ้าส่วนโครงสร้างนี้มีโมดูลัสอิลาสติกรอบแกนนั้นเท่ากับ S จะหาหน่วยแรงรวมที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานได้จากสมการ

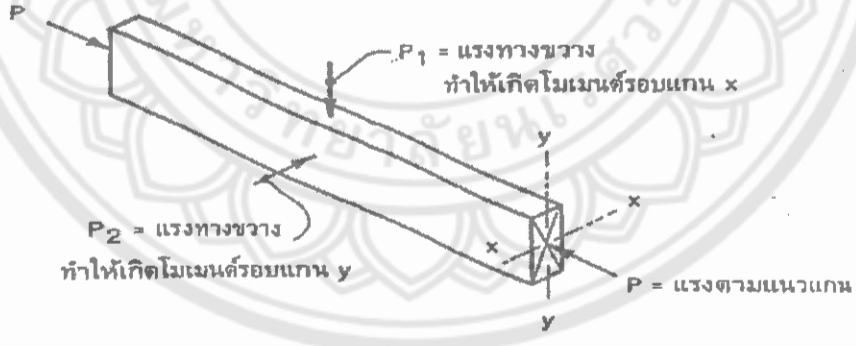
$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I} = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{S}$$



รูปที่ 2.7 หน่วยแรงรวมจากแรงตามแกนและแรงดัด

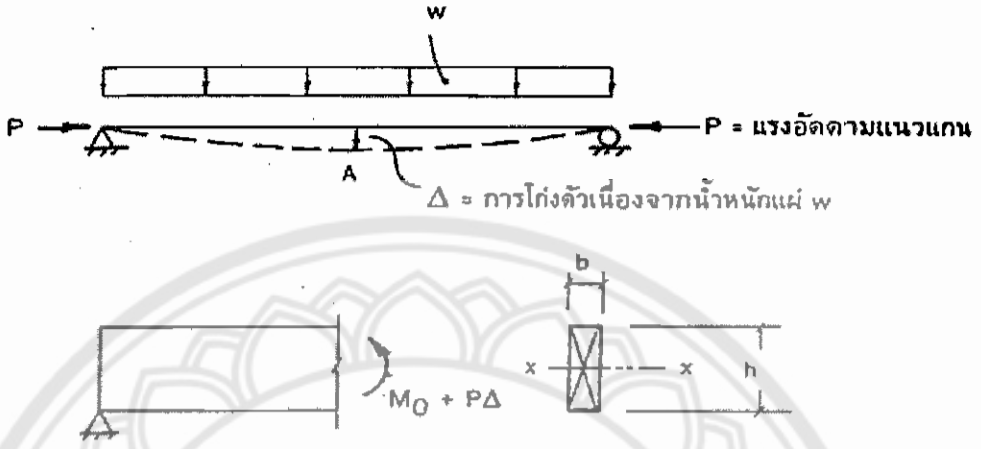
ส่วนในกรณีที่โมเมนต์ดัดกระทำรอบแกน X และแกน Y กระทำร่วมกับแรงตามแนวแกน จะหาหน่วยแรงรวมได้จากสมการ

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{M_X y}{I_x} + \frac{M_y X}{I_y} = \frac{P}{A} \pm \frac{M_x}{S_x} + \frac{M_y}{S_y}$$



รูปที่ 2.8 ส่วนโครงสร้างรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัด 2 ทาง

หากเป็นเสายาวอัตราส่วนความชะลูดมีค่ามาก ซึ่งมีผลทำให้ส่วนของโครงสร้างนั้นต้องรับโมเมนต์ดัดมากขึ้นกว่าปกติเรียกว่าผลของ P-Δ (ดังรูปที่2.9)



รูปที่ 2.9 ส่วนโครงสร้างรับแรงอัดและโมเมนต์ดัด

การออกแบบส่วนโครงสร้าง คาน-เสา จะพิจารณาความต้านทานปลอดภัยของส่วนโครงสร้างตรงด้านที่รับหน่วยแรงรวมมากที่สุด โดยใช้สมการที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของหน่วยแรงตามแนวแกนกับอัตราส่วนแรงดัด

จากหลักเกณฑ์การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน $\sum(f/F) \leq 1.0$

โดยที่ f เป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง และ F เป็นหน่วยแรงที่ยอมให้

f_a เป็นหน่วยแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นจริง(P/A)

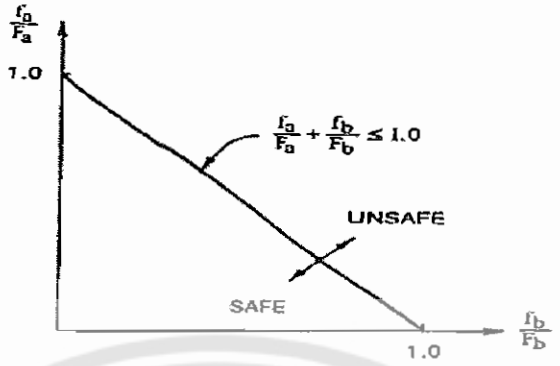
F_a เป็นหน่วยแรงตามแกนที่ยอมให้

f_b เป็นหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจริง(Mc/I=M/S)

F_b เป็นหน่วยแรงดัดของส่วนโครงสร้างที่ยอมให้รอบแกนที่รับโมเมนต์ดัด

ดังนั้น จะได้สมการสำหรับการคำนวณออกแบบ คาน-เสา คือ

$$\frac{f_a}{F_a} = \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0 \qquad (2.26)$$



รูปที่ 2.10 Interaction Curve

2.6.1 การออกแบบส่วนโครงสร้างรับแรงดึงและแรงดัดร่วมกัน

การออกแบบส่วนโครงสร้างรับแรงดึงและแรงดัดรวมกันไม่ต้องคิดผลของ P-Δ เนื่องจากส่วนโครงสร้างถูกดึงให้เหยียดตรงเสมอ จึงไม่มีปัญหาการโก่งเดาะมาเกี่ยวข้องกำลังต้านทานของโครงสร้างแบบนี้ได้จากการตรวจสอบหน่วยแรงรวมด้านรับแรงดึงมีค่ามากที่สุด

$$\frac{f_t}{F_t} = \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0 \qquad (2.27)$$

$$\frac{f_t}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \qquad (2.28)$$

f_t, f_b เป็นหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงดัดที่กระทำ ตามลำดับ

F_t เป็นหน่วยแรงดึงที่ยอมให้เมื่อปรับค่าตามสภาวะการใช้งานแล้ว

F_b เป็นหน่วยแรงดัดที่ยอมให้เมื่อปรับค่าตามสภาวะการใช้งานแล้ว

2.6.2 การออกแบบส่วนโครงสร้างรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน

เป็นการตรวจสอบหน่วยแรงรวมด้านรับแรงอัดของคานที่มีหน่วยแรงอัดรวมกระทำมากที่สุด

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{1}{1 - J_x \frac{f_a}{F_x}} \frac{f_{bx}}{F_{bx}} \leq 1.0 \qquad (2.29)$$

f_a, f_b เป็นหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดัดที่กระทำตามลำดับ

F_a เป็นหน่วยแรงอัดของเสาที่ยอมให้

F_b เป็นหน่วยแรงดัดของคานที่ยอมให้

$\frac{1}{1 - J_x \frac{f_a}{F_x}}$ เป็นตัวคูณประกอบขยายค่าโมเมนต์ดัด