

บทที่ 2

ทฤษฎี ผลงานวิจัยและงานเขียนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติกายภาพและเชิงกลของไผ่ช้างหม่น

ไผ่ช้างหม่น (*Dendrocalamus sericeus* Munro) พบมากในภาคเหนือ ลักษณะทั่วไปขึ้นเป็นกอแน่น ลำสีเขียวหม่น ไม่มีหนาม มีผงสีขาวคล้ายแป้งติดอยู่เกือบตลอดทั้งลำ โดยเฉพาะบริเวณรอบๆ ข้อ ขนาดลำเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6-16 เซนติเมตร เนื้อหนาประมาณ 5-8 มิลลิเมตร ปล้องยาวประมาณ 25-40 เซนติเมตร สูงประมาณ 8-20 เมตร ลำต้นนิยมใช้ในการทำเครื่องเรือน และเครื่องจักรสาน (สำนักวิชาการป่าไม้, 2544, สุทัศน์, 2544)

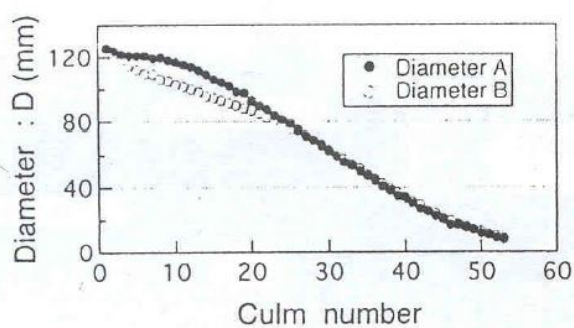
การทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ความหนาแน่น โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังอัด กำลังดึง และกำลังเฉือนขนานเส้นใยแบบไม่มีข้อ ของลำไม้ไผ่ช้างหม่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว 4 นิ้ว และ 5 นิ้ว อายุ 2-4 ปี เพื่อหาความเค้นที่ยอมให้ ดังนี้ ความเค้นอัด ดึงและเฉือน ที่ยอมให้ มีค่าเท่ากับ 54 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร 288 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 12 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่ากำลังอัดสูงสุดเฉลี่ยของ ไผ่ช้างหม่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว 4 นิ้ว และ 5 นิ้ว มีค่าเท่ากับ 544 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร 652 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 687 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่ากำลังดึงสูงสุดเฉลี่ยของไผ่ช้างหม่นมีค่าเท่ากับ 1,665 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และค่ากำลังเฉือนสูงสุดเฉลี่ย ไผ่ช้างหม่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว 4 นิ้ว และ 5 นิ้ว มีค่าเท่ากับ 92 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร 120 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 137 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ (นพพล, พิษณุตม์, วรุณ และพอหทัย, 2555)

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของไม้ไผ่

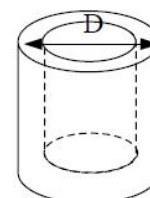
ไม้ไผ่เป็นพืชที่มีความสามารถในการปรับตัวได้ดีต่อสภาวะสภาวะแวดล้อมต่างๆ และมีความสามารถในการแพร่กระจายพันธุ์สูงกว่าพืชชนิดอื่น จึงมีการกระจายพันธุ์อย่างกว้างขวางไปทั่วโลก ไม้ไผ่เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดและการกระจายพันธุ์อย่างกว้างขวางในเขตร้อนและเขตกึ่งร้อนของโลก ไม้ไผ่อยู่ในตระกูลเดียวกับหญ้า และขึ้นได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 8-36 เซลเซียส ปริมาณน้ำฝนที่ต้องการโดยทั่วไปประมาณ 1,270-4,050 มิลลิเมตรต่อปี (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2544) เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนจึงมีสภาพภูมิอากาศภูมิประเทศ และปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ที่เอื้ออำนวยให้เกิดความหลากหลายของสังคมพืช ชนิดป่าในประเทศมีทั้งป่าผลัดใบและป่าไม่ผลัดใบ ในสภาพป่าธรรมชาติจะพบไม้ไผ่ขึ้นเป็นไม้ชั้นล่างในป่าชนิดต่างๆ เช่น ป่าเบญจพรรณ ป่าดิบชื้น และป่าดิบเขา จากการที่ป่าเบญจพรรณและป่าดงดิบเป็นป่าผืนใหญ่ที่สุดในประเทศ ครอบคลุมพื้นที่มากถึง 60% ของพื้นที่ป่าทั่วประเทศ ไม้ไผ่จึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของทรัพยากรป่าไม้ ที่พบได้ในทุกภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติของไม้ไผ่ชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับการปรับตัวของไม้ไผ่ชนิดนั้นๆ ให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่ขึ้นด้วย (สำนักวิชาการป่าไม้, 2544) ไม้ไผ่เป็นพืชกอ ส่วนมากมีลำต้นกลมและตรงกลางกลวง ประกอบด้วยส่วนปล้อง (internode) และส่วนข้อ (node) เพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่ลำต้นด้านนอกเป็นเซลล์มีความแข็งแรงเคลือบด้วยสารกันน้ำ ลำต้นเป็นแบบทรงกระบอกกลวงและหุ้มด้วยเยื่อบางที่กันน้ำได้ เส้นใยในของลำไม้ไผ่จะประสานกันแน่น มีทั้งความเหนียว และยืดหยุ่น ทำให้สามารถโค้งงอหรือดัดได้ตามต้องการ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของปล้องมีค่าน้อยลงจากโคนถึงปลาย ความยาวของปล้องมีค่ามากที่สุดบริเวณกึ่งกลางลำต้นและน้อยลงบริเวณโคนและปลาย ดังภาพที่ 2.1 (Amada et al., 1995, สำนักวิชาการป่าไม้, 2544)

ภาพที่ 2.1

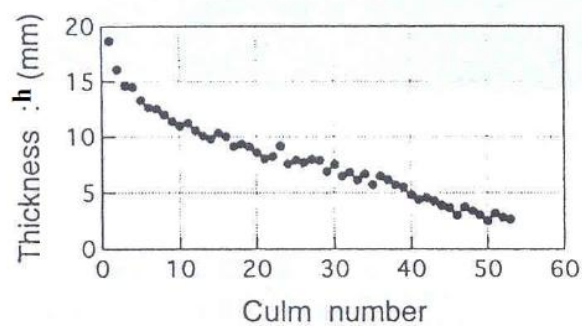
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (1) เส้นผ่านศูนย์กลาง (2) ความหนา และ (3) ความยาวปล้อง กับตำแหน่งของปล้อง (culm number: n) จากโคนถึงปลายของลำไม้ไผ่ *Phyllostachys edulis* Riv.



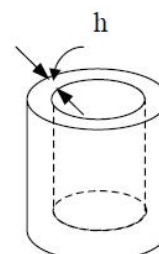
(1)



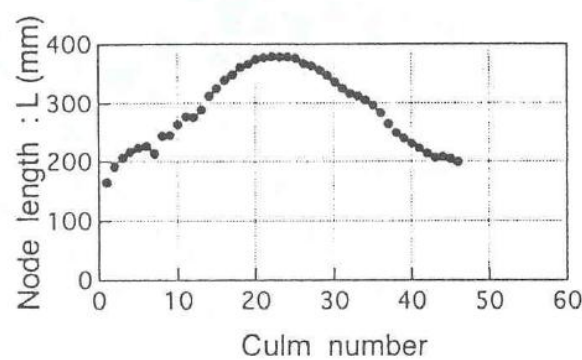
ปล้องไม้ไผ่



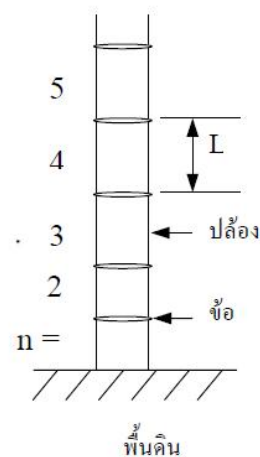
(2)



ปล้องไม้ไผ่



(3)



ที่มา; Amada et al., 1995

ปริมาณความชื้นในไม้ไม่มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางกลของลำ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในลำไม้ไม่ขึ้นอยู่กับอายุและตำแหน่งของลำ (โคนถึงปลาย) นอกจากนี้ความชื้นของลำมีปริมาณสูงในช่วงฤดูฝนเมื่อเทียบกับฤดูแล้ง ปริมาณความชื้นของไม้ไผ่ที่โตเต็มวัยอยู่ระหว่าง 50-99% ลำอ่อนมีความชื้น 80-150% ลำแห้งมีความชื้นอยู่ระหว่าง 12-18% ความหนาแน่นของไม้ไผ่อ่อนและไม้ไผ่โตเต็มวัย มีค่าเฉลี่ยประมาณ 500 และ 800 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ (ที่ระดับความชื้น 12%) และจุดอิ่มตัวของเส้นใย (fiber saturation point) มีค่าเท่ากับ 20% ทั้งนี้ส่วนของเส้นใยและเนื้อเยื่อเซลล์ผนังบางมีจุดอิ่มตัวที่แตกต่างกันออกไป การหดตัวไม่สม่ำเสมอและมีผลต่อความหนาของผนังและขนาดของลำ เมื่อปริมาณความชื้นในไม้ไผ่ลดลง 20% ทำให้ความหนาของลำลดลง 4-14% และขนาดของลำลดลง 3-12% (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2544; Chapman, 1997)

คุณสมบัติทางกายภาพของไผ่ตง ประกอบด้วยความชื้นสัมพัทธ์ (moisture content), ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity), ความทนทาน (durability) และความหนาแน่น (density) ฯลฯ แต่สมบัติทางกายภาพที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกลศาสตร์คือ ความชื้นสัมพัทธ์และความถ่วงจำเพาะ จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของไผ่ตง มีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1
ค่าเฉลี่ยทางกายภาพของไผ่ตง (Dendrocalamus asper Backer)

สมบัติทางกายภาพ		1	2	3	4	5
เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก, (mm.)		113.2	92.5	-	-	-
ความหนาผนังปล้อง, (mm.)		12.20	11.10	-	-	10-14
ความชื้นสัมพัทธ์, (%)		11.0(46.0)	11.0	12.0	-(55)	-(66.5)
ความถ่วงจำเพาะ		0.77(0.73)	0.69	0.55-0.90	0.70	0.67
ความหนาแน่น, (kg/m ³)		-	767	-	-	-
การหดตัว, (%)	ด้านสัมผัส	2.53	-	2.57	4.50	8.50
	ด้านรัศมี	1.35	4.50	1.84	5.00	6.50
	ตามยาว	0.21	0.10	0.21	-	-
	ความหนา	-	4.20	-	-	-
การบวมตัว, (%)	ด้านสัมผัส	-	-	4.73	-	-
	ด้านรัศมี	-	-	5.80	-	-
	ตามยาว	-	-	0.40	-	-
	ความหนา	-	-	-	-	-

* ที่สภาพสด (ความชื้น 38-60%)

- ที่มา: 1. จูติกุล, 2540
2. Thaipetch, 2004
3. Malanit et al., 2008
4. Cited Dransfield and Widjaja, 1995
5. Cited Othman and et al, 1995

2.3 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่

คุณสมบัติเชิงกล ประกอบด้วย หน่วยแรงดัด (bending stress) โมดูลัสของการแตกหัก (modulus of rupture) โมดูลัสของการยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หน่วยแรงอัดขนานเส้น (compressive stress parallel to grain) หน่วยแรงอัดตั้งฉากเส้น (tensile stress parallel to grain) หน่วยแรงเฉือนขนานเส้น (shearing stress parallel to grain) ความแข็งแรง (hardness) มีความสำคัญต่อการคำนวณและออกแบบโครงสร้างให้มั่นคงแข็งแรงเพียงพอต่อ

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด โดยจากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของไผ่ตง ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2
ค่าเฉลี่ยสมบัติเชิงกลของไผ่ตง (Dendrocalamus asper Backer)

สมบัติเชิงกล	1	2	3	4	5	6	7
โมดูลัสของการยืดหยุ่น, (MPa.)	12,530(12,038)*	59,500	15,363	-	63,000	16,029-20,578	22,413
โมดูลัสของการแตกร้าว, (MPa.)	132(109)*	-	199	92.5	85.65	-	-
ค่าความเหนียว, (kPa.)	438(381)*	-	-	-	-	-	-
หน่วยแรงดัด, (MPa.)	-	84	-	-	-	77.3-110.7	-
หน่วยแรงอัดขนานเสี้ยน, (MPa.)	67(54)*	68.5	-	27.1	31.45	44.4-72.8	-
หน่วยแรงอัดตั้งฉากเสี้ยน, (MPa.)	-	-	14.4	-	-	-	-
หน่วยแรงเฉือน	ไม่มีข้อ	14(9)*	9.4	11.9	7.15	5.35	3.6-13.6
ขนานเสี้ยน (MPa.)	มีข้อ	-	9.8	-	-	-	7.9-14.0
หน่วยแรงดึง	ไม่มีข้อ	274(250)*	359	-	-	-	-
ขนานเสี้ยน, (MPa.)	มีข้อ	-	96	-	-	-	31.6-97.6
* ที่สภาพสด (ความชื้น 38-60%)							

- ที่มา: 1. จูติกุล, 2540
2. Thaipetch, 2004
3. Malanit et al., 2008
4. Cited Dransfield and Widjaja, 1995
5. Cited Othman and et al, 1995
6. เอกลักษณ์, 2554
7. พัชริกา, 2554

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไผ่ไผ่ตงเขียวสรุปได้ว่า ไผ่ไผ่ตงมีความชื้นตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำ มีความถ่วงจำเพาะปานกลาง มีความหดรัดค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับไม้ทั่วๆ ไป แต่คุณสมบัติเชิงกลสูงมาก โดยเฉพาะความแข็งแรงในการต้านแรงดึงขนานเสี้ยนมีค่าสูงกว่าไม้ชนิดอื่นทุกชนิด และสมบัติเชิงกลต่างๆ ยังสม่ำเสมอตั้งแต่ส่วนโคนถึงส่วน

ปลาย ซึ่งชี้ให้ทราบว่าสามารถนำไม้ไผ่ตงไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งลำโดยไม่ตัดปลายทิ้งเช่นไม้อื่นๆ (ฐิติกุล, 2540)

การศึกษาสมบัติบางประการและเชิงกลของไผ่รวก (*Thyrsostachy siamensis* Gamble.) ความแข็งแรงของไม้ไผ่รวกที่สภาวะสดและสภาวะแห้งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ทั้งไม้ไผ่ในสภาวะสดและแห้งนั้นในส่วนของโคนมีความแข็งแรงมากกว่าท่อนกลางและท่อนกลางมีความแข็งแรงมากกว่าท่อนปลาย นอกจากค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่านั้นที่ท่อนปลายมีค่ามากกว่าท่อนกลางและท่อนโคน (สำราญ, 2503)

การศึกษาเชิงกลของไม้ไผ่เพื่อหาค่าเฉลี่ยไปวิเคราะห์หากำลังรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมไม้ไผ่รวก อายุ 1-1.5 ปี การทดสอบหาความต้านทานต่อแรงอัดและแรงดึงของไม้ไผ่ทั้งที่มีข้อและไม่มีข้อ สรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดหรือแรงดึงกับการยืดตัวของไม้ไผ่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดประลัย ค่าเฉลี่ยความต้านทานต่อแรงอัดของไม้ไผ่ทั้งที่มีข้อและไม่มีข้อ 530.84 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 70.50 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 13.28% ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยโมดูลัสยืดหยุ่นในด้านรับแรงอัด 2.28×10^5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 264.35 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 16.18% ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสยืดหยุ่นในด้านแรงดึง 2.33×10^5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและสัมประสิทธิ์การแปรผันเท่ากับ 4.8×10^5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และ 20.60% ตามลำดับ (วินิต, 2525)

การศึกษาคูณสมบัติเชิงกลของวัสดุไผ่ประเภทที่ทำจากพันธุ์ไผ่ไทยเพื่อใช้ออกแบบคานไม้สำหรับอาคารสาธารณะขนาดเล็กศึกษาการใช้วัสดุไผ่ประเภทที่ทำมาจากพันธุ์ไผ่ไทยทั้ง 4 พันธุ์ ได้แก่ ไผ่ตง ไผ่ชางหม่น ไผ่เลี้ยง และไผ่สีสุก มาทำเป็นคานไม้โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-143D ผลการทดสอบพบว่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุไผ่ประเภทที่มีค่าที่ต่ำกว่าไม้เนื้อแข็งเล็กน้อยแต่มีค่าสูงกว่าไม้เนื้ออ่อนและไม่ประกอบเชิงวิศวกรรมบางชนิด เช่น ไม้ PSL ไม้ OSL แต่ไม้ไผ่ประเภทยังคงมีค่าคุณสมบัติเชิงกลบางประการที่ต่ำกว่าไม้เนื้อแข็งเล็กน้อย แต่มีความต้านทานแรงดึงและความยืดหยุ่นที่ไม้ไผ่ประเภทยังคงมีค่าที่สูงกว่าไม้เนื้อแข็ง จากการทดสอบคุณสมบัติแรงดัดพบว่าไม้ไผ่ประเภทยังคงมีค่าคุณสมบัติเชิงกลที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์อื่นๆ ที่ได้ทำการทดสอบโดยมีค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงดัดเท่ากับ 529 กก./ตร.ซม. สามารถนำไปใช้เป็นคานอ่อนตัวและคานแข็งตัว สำหรับไผ่ชางหม่นเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นคานอ่อนตัว เพราะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ส่วนไผ่เลี้ยงสามารถนำไปใช้ทำคานแข็งตัวได้ เพราะมีค่าเฉลี่ยกำลัง

ต้านทานแรงดัดเท่ากับ 520 กก./ตร.ซม. สุดท้ายไม้สี่สุมมีค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงดัดน้อยที่สุดเท่ากับ 396 กก./ตร.ซม. จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานจริงอีกทั้งรูปทรงดั้งเดิมของลำไม้สี่สุมมีลักษณะคดโค้ง ไม่เรียบสม่ำเสมอ ยากต่อการนำมาผลิตเป็นไม้ประกับ (ชุตินพนธ์, 2556)

ตารางที่ 2.3
ตารางเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสมบัติเชิงกลของไม้ประกับ

สมบัติเชิงกล	ไม้ตง	ไม้ซางหม่น	ไม้สี่สุม	ไม้เลียง
โมดูลัสของการยืดหยุ่น, (กก./ตร.ซม.)	99,519.93	109,421.94	85,305.83	108,227.89
โมดูลัสแตกร้าว, (กก./ตร.ซม.)	744	643	614	802
ค่าหน่วยแรง ณ ชีดปฏิกิริยา, (กก./ตร.ซม.)	529.29	395.53	414.51	520.04
หน่วยแรงดัดที่จุดปฏิกิริยา, (กก./ตร.ซม.)	354	396	414	520
แรงอัดขนานเส้น ณ ชีดปฏิกิริยา, (กก./ตร.ซม.)	219.98	219.20	227.37	282.83
แรงอัดตั้งฉากเส้น ณ ชีดปฏิกิริยา, (กก./ตร.ซม.)	92.60	85.50	80.63	100.25
กำลังต้านทานแรงดึงของ, (กก./ตร.ซม.)	72.86	81.55	76.66	87.77
ความถ่วงจำเพาะ	0.75	0.74	0.77	0.77

ที่มา: ชุตินพนธ์, 2556

2.3.1 ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของไม้ไผ่

คุณสมบัติทางกลของโครงสร้างไม้ไผ่ โดยศึกษาไม้ไผ่ 2 ชนิด ได้แก่ *Bamusa pervariabilis* หรือ Kao Jue กับ *Phyllostachys pubescens* หรือ Mao Jue ที่มีอายุ 3 ปี โดยในการทดสอบกำลังรับแรงอัดนั้นจะใช้ส่วนไม้ไผ่ความยาว 750 มิลลิเมตร ที่มีความสูงจากโคนต้นระดับต่างๆ กันมาทดสอบ พบว่าในการทดสอบกำลังรับแรงอัดมีลักษณะการวิบัติ 2 ลักษณะ คือ แบบ End Bearing ซึ่งมักจะพบการวิบัติเช่นนี้ในชิ้นส่วนที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง และการวิบัติแบบ Splitting มักเกิดในชิ้นส่วนที่มีรอยร้าวตามแนวยาวของเส้นใย และชิ้นส่วนที่มีความชื้นสัมพัทธ์น้อยๆ (Chang and Yu, 2002) การศึกษาการโก่งเดาะของเสาในโครงสร้างไม้ไผ่ทั้ง 2 ชนิด ที่มีความยาว 4 6 8 10 15 และ 20 เมตร พบว่าลักษณะการโก่งเดาะของไม้ไผ่ที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ การวิบัติแบบ Overall Buckling จะเกิดการวิบัติลักษณะนี้มักเกิดขึ้นกับเสายาวที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูง ซึ่งส่วนใหญ่ไม้ไผ่ชนิด *Phyllostachys pubescens* หรือ Mao Jue มักจะมีการวิบัติแบบนี้ ส่วนไม้ไผ่ชนิด *Bamusa pervariabilis* หรือ Kao Jue มักจะมีการวิบัติแบบ Local

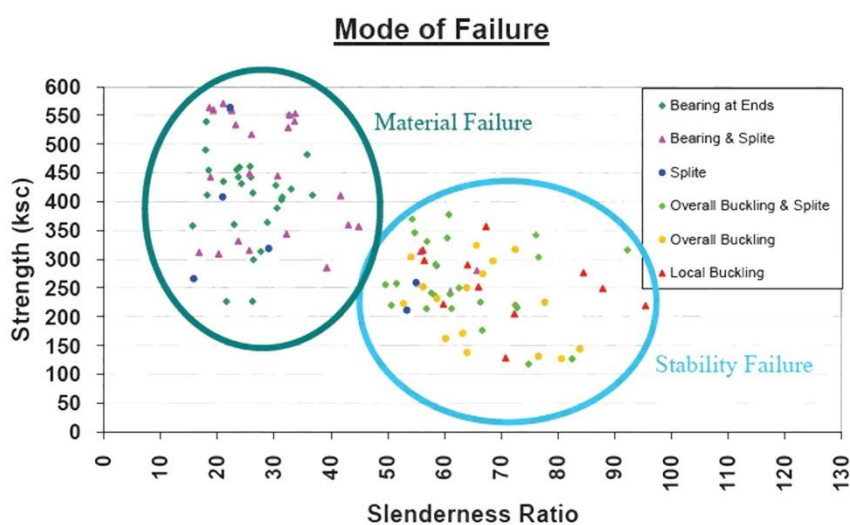
Buckling การวิบัติของไม้ไผ่จะเกิดเฉพาะจุด รอยแตกจะไม่เคลื่อนตัวไปตามแนวแกนลำไผ่ และมักเกิดขึ้นกับเสาที่สั้นกว่า (Yu et al., 2003)

การศึกษาการโก่งเดาะของไม้ไผ่ที่พิจารณาถึงความไม่สมบูรณ์เริ่มแรก (Initial Imperfection) โดยไม้ไผ่ที่ศึกษา ได้แก่ *Dendrocalamus giganteus* ที่มีความยาว 2 เมตร นำมาทดสอบหาน้ำหนักที่รับได้ รวมไปถึงการโก่งเดาะทางด้านข้างด้วย ซึ่งในการหาค่าบรรทุกจรจำกัด (P_{lim}) นั้น ได้นำทฤษฎีของออยเลอร์มาประยุกต์ใช้โดยพิจารณาความไม่สมบูรณ์เริ่มแรกที่เกิดความไม่สม่ำเสมอของเนื้อไม้ไผ่ (density gradient imperfection) (Moreira and Ghavami, 2002)

การศึกษาพฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาไม้ไผ่ตง (*Dendrocalamus asper* Backer.) โดยใช้ไผ่อายุประมาณ 2-3 ปี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.07-0.15 เมตร ที่มีความยาว 0.50-2.00 เมตร ที่มีความชื้นเฉลี่ย 19.98% โดยปลายโครงสร้างมีจุดรองรับเป็นแบบยึดหมุดทั้งสองด้าน ช่วงอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratios) 16-45 ลำไผ่ตงมีลักษณะการวิบัติจากเนื้อวัสดุ (material failure) และ ช่วงอัตราส่วนความชะลูด 49-95 ลำไผ่ตงมีลักษณะการวิบัติเป็นแบบการสูญเสียเสถียรภาพ (stability failure) และสามารถคำนวณค่าความเค้นอัดที่ยอมให้ (compressive allowable stress) ของไม้ไผ่ตง ที่มีค่าเท่ากับ 24.61 กก./ตร.ซม. โดยเมื่อนำผลการทดสอบที่ได้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณตามทฤษฎีต่างๆ พบว่าทฤษฎีของ Rankine มากที่สุด และสามารถใช้ได้ในทุกช่วงอัตราส่วนความชะลูด ผลการทดสอบได้ค่าความเค้นอัดเท่ากับ 117.96-607.18 กก./ตร.ซม. ซึ่งใกล้เคียงกับทฤษฎีของ Rankine มากที่สุด โดยค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าทฤษฎีของ Rankine อยู่ 2-11% ตามอัตราส่วนความชะลูดที่ลดลง

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างที่มีอัตราสูงตั้งแต่ 16-45 จะมีลักษณะการวิบัติจากวัสดุ (material failure) ส่วนอัตราส่วนความชะลูดตั้งแต่ 49-95 จะมีลักษณะการวิบัติเป็นแบบการสูญเสียเสถียรภาพ (stability failure)

ภาพที่ 2.2
ลักษณะการวิบัติกับอัตราส่วนความชะลูด



ที่มา; พัชรวิภา, 2554

โดยค่าความเค้นอัด (compression stress) หาได้จาก

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

และค่าอัตราส่วนความสูงชะลูด (slenderness ratios) หาได้จาก

$$\lambda = \frac{KL}{r}$$

ส่วนค่าความเค้นอัดที่ยอมรับให้ได้ (allowable stress) ของไม้ไผ่ตง ที่อยู่ในช่วงอัตราส่วนความชะลูดไม่เกิน 95 มีค่า

$$y = -0.8345x + 106.58 \quad (\text{EIT, F.S.} = 5.75)$$

$$y = -0.7257x + 92.682 \quad (\text{ISO, F.S.} = 5.00)$$

โดยค่า

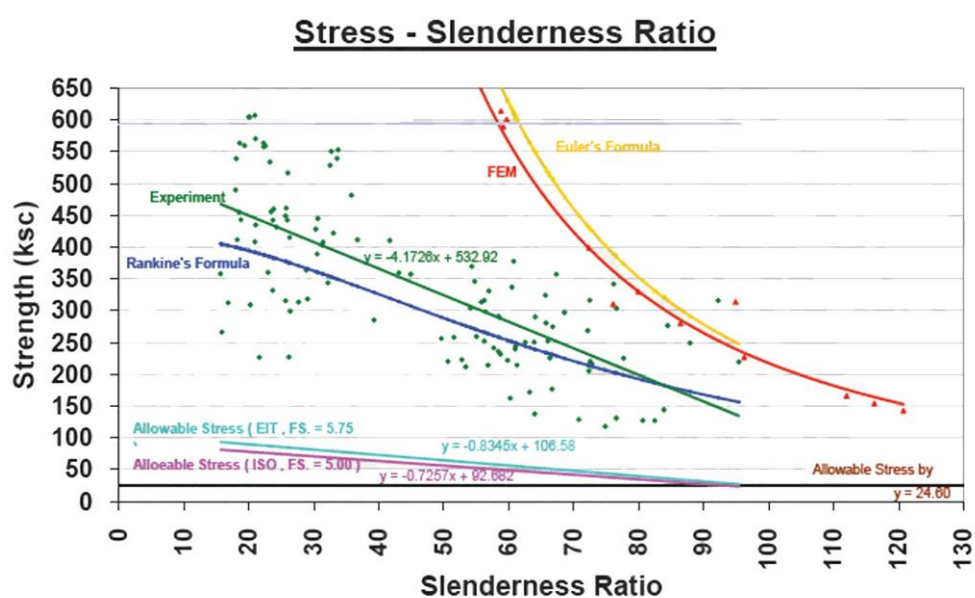
$$y = \text{ค่าความเค้นอัดที่ยอมรับได้}$$

$$x = \text{ค่าอัตราส่วนความสูงชะลูด มีค่าอยู่ในช่วง 16-95}$$

และค่าความเค้นอัดที่ยอมรับให้ได้ (allowable stress) ตามมาตรฐาน ISO มีค่าเท่ากับ 24.61 กก./ตร.ซม. โดยมีอัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety) รวมกับค่าปรับแก้ความ

แตกต่างระหว่างทฤษฎีกับการทดสอบ เท่ากับ 5.00 โดยสามารถนำค่าความเค้นอัดสูงสุดที่แปรผันตามอัตราส่วนการชะลูด และค่าความเค้นอัดที่ยอมให้ (allowable stress) นี้มาช่วยในการออกแบบโครงสร้างไม้ไผ่ เพื่อใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างปลอดภัย

ภาพที่ 2.3
กราฟแสดงค่าความเค้นอัดตามทฤษฎีต่างๆ



ที่มา; พัชริกา, 2554

ตารางที่ 2.4
ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของการทดสอบต่างๆ

			Mean Strength (ksc.)	Allowable Stress (ksc.)	Count
Tension	EIT , F.S. = 6.50		618.41	103.07	36
	Node	EIT , F.S. = 6.50	341.96	38.00	18
Shear	Without	EIT , F.S. = 9.00	341.96	38.00	18
	Node				
	Total	EIT , F.S. = 9.00	346.77	38.53	36

ที่มา; พัชริกา, 2554

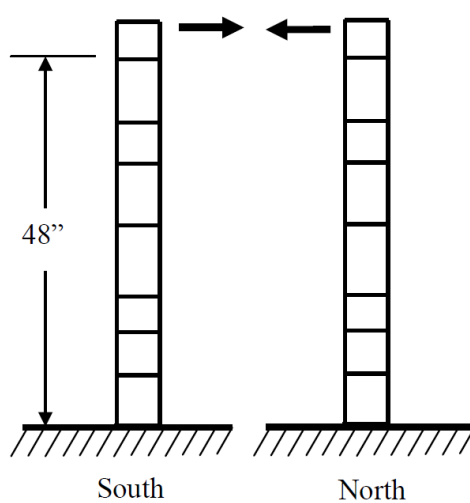
ตารางที่ 2.5
การคำนวณทางสถิติของการทดสอบต่างๆ

		Max.	Min.	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Varoation	Count
Buckling							
	Strength (ksc.)	607.18	117.96	340.15	570.48	0.37	114
	Moisture Content (%)	30.85	9.09	19.98	6.10	0.31	
Tension							
	Strength (ksc.)	976.46	316.18	618.41	618.41	0.21	36
	Moisture Content (%)	15.87	6.12	10.78	10.78	0.22	
Shear							
Node	Strength (ksc.)	500.38	186.94	341.96	106.08	0.31	18
	Moisture Content (%)	15.74	10.64	12.71	1.44	0.11	
Without	Strength (ksc.)	562.59	132.21	351.57	114.98	0.33	2
Node	Moisture Content (%)	19.48	7.69	11.86	3.03	0.26	
Modulus of Elasticity							
	E (ksc.)	278,110.00	178,985.00	228,547.50	49,562.50	0.22	2
	Moisture Content (%)	14.78	11.16	12.97	1.81	7.17	

ที่มา; พัชริกา, 2554

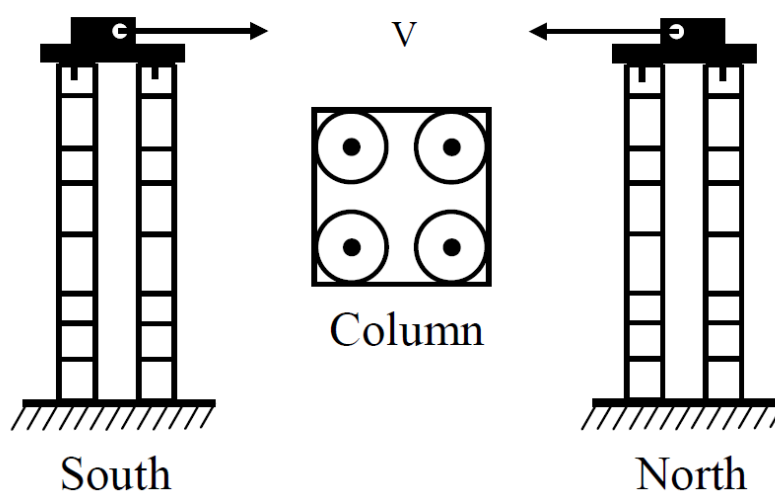
การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเสาของลำไ้โดยวิธีการเชื่อมด้วยฐานคอนกรีต ใช้ ไม้ ทวีโก (Bambusa Stenostachya) ทดสอบเสา 1 และ 4 ลำ ลักษณะการวิบัติของเสา 1 และ 4 ลำ มีลักษณะที่คล้ายกัน คุณสมบัติการทดสอบที่มีผลต่อค่าการรับน้ำหนักของเสาคือ ขนาดความ ลึกที่ฝังในฐานเสา และ จำนวนข้อต่อของลำไ้ ซึ่งมีค่าความแตกต่างกันอยู่ที่ 5-10 เท่า (Mitch, 2010)

ภาพที่ 2.4
การทดสอบเสาไม้ 1 ลำ



ที่มา; Mitch, 2010

ภาพที่ 2.5
การทดสอบเสาไม้ 4 ลำ



ที่มา; Mitch, 2010

ตารางที่ 2.6
ความแตกต่างของค่าการทดสอบระหว่างเสา 1 และ 4 ลำ

Test series	Single culm column			Four-culm column			Ratio of four-culm to single culm normalized values
	Average moment capacity	Average I_{culm}	Moment I_{culm}	Average moment capacity	Average I_{culm}	Moment I_{culm}	
	ft-lb	in ⁴	(ft-lb)/in ⁴	ft-lb	in ⁴	(ft-lb)/in ⁴	
A	868	6.60	132	1802	2.83	637	4.8
B	894	4.99	179	3700	2.53	1465	8.2
C	552	4.38	126	3256	2.54	1283	10.2
D	1352	4.95	273	4244	2.38	1787	6.5

ที่มา; Mitch, 2010

2.3.2 ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของไม้ไผ่

การศึกษาคูณสมบัติทางกลของไม้ไผ่พบว่ากำลังดัดของไม้ไผ่จะค่อยๆ ลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น แต่สำหรับชิ้นตัวอย่างที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 20% ค่ากำลังรับแรงดัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการทดสอบกำลังรับแรงดัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการทดสอบกำลังรับแรงดัดจะใช้ชิ้นทดสอบในช่วงที่มีความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 5-20% กำลังรับแรงดัดยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 20-30% ทั้งกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดต่างมีค่าลดลง จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น (Fan and Fan, n.d.) การศึกษาความแข็งแรงดัดโค้งและอิทธิพลของข้อและปล้องของลำไม้ไผ่ป่า (Banbusa arundinacea, Willd.) เปรียบเทียบกับไผ่ขางนวล (Dendrocalamus strictus Nees.) อายุ 3-4 ปี โดยทดสอบไม้ไผ่ตัวอย่างกับเครื่องทดสอบซึ่งตั้งอยู่ห่างกันในอัตราส่วนของความยาวไม้ไผ่ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 ต่อ 1 แล้วกदन้าหนักลงกึ่งกลางของคานไม้ซึ่งในแนวราบบนฐานรองคานไม้ ตัวอย่างตัดจากบริเวณปล้องและบริเวณข้อของลำไม้ไผ่ โดยทดสอบอย่างละ 9 ลำ ซึ่งสรุปได้ดังนี้ ค่าความแข็งแรงในการดัดของลำไม้ไผ่ทั้งสองชนิดที่บริเวณปล้องอยู่ในระดับไม้เนื้ออ่อนจนทั่วไปคือ ต่ำกว่า 600 กก./ตร.ซม. แต่ค่าความแข็งแรงในการดัดที่บริเวณข้ออยู่ในระดับไม้เนื้อแข็งปานกลางคือ อยู่ในช่วง 600-1,000 กก./ตร.ซม. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อของไม้ไผ่มีอิทธิพลมากในการเพิ่มค่าความแข็งแรงดัดของ

ลำไม้ไผ่ แต่ข้อของไม้ไผ่ทั้งสองชนิดไม่มีอิทธิพลในการทำให้เกิดความแตกต่างทางสถิติของสัมประสิทธิ์ ไม้ไผ่ป่าและไผ่ชางนวลมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นสูงเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ทั่วไปที่มีความแข็งแรงดัดในระดับเดียวกัน โดยไม้ไผ่ทั้งสองมีสัมประสิทธิ์ของการยืดหยุ่นสูงกว่าถึงสองถึงสามเท่า (มนตรีและศักดิ์พิชิต, 2528)

การศึกษาเกี่ยวกับความยาววิกฤตสำหรับไม้ไผ่ที่จะวิบัติโดยหน่วยแรงดัดเพียงอย่างเดียว โดยการนำการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแรงกระทำ 4 จุด (four-point load) พบว่าขึ้นตัวอย่างที่เป็นคานสั้นจะวิบัติโดยหน่วยแรงเฉือน และสำหรับคานช่วงยาวจะวิบัติด้วยหน่วยแรงดัด สำหรับความยาววิกฤตสามารถคำนวณโดยให้แรงสูงสุดที่วิบัติด้วยหน่วยแรงดัด ($F_{\max,b}$) เท่ากับแรงสูงสุดที่วิบัติด้วยหน่วยแรงเฉือน ($F_{\max,s}$) (Vaessen and Janssen, 1997)

$$l_c = \frac{R\epsilon_{\max}E_R}{\tau_{\max}} \left[\frac{14x^3 - 60x^2 + 100x - 80}{20(x-2)} \right]$$

เมื่อ l_c = ความยาววิกฤต, มม.

R = รัศมีภายนอก, มม.

$\epsilon_{\max}$ = ความเครียดตามยาวสูงสุด

E_R = โมดูลัสของการยืดหยุ่นพิกวนอก, นิวตัน/ตร.มม.

$\tau_{\max}$ = ความเค้นเฉือนสูงสุด, นิวตัน/ตร.มม.

X = อัตราส่วนความหนา (x) ต่อรัศมีภายนอก (R)

ความยาววิกฤตมีค่าเท่ากับ 26 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (26D) และสามารถประมาณกำลังรับแรงดัด แรงเฉือนและค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (นิวตัน/ตร.มม.) ในสภาพแห้งในอากาศ เท่ากับ 0.14 0.021 และ 24 เท่าของความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.) ตามลำดับ หลังจากนั้น มาตรฐานสากล (ISO) ได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการทดสอบแรงดัดของไม้ไผ่ โดยให้ใช้ค่าความยาวคานสำหรับการทดสอบแรงดัดแบบแรงกระทำ 4 จุด (four-point load) ไม่น้อยกว่า 30 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (30D) (Janssen, 2000)

การศึกษาคุนสมบัติทางกลและทางกายภาพของไม้ไผ่ 2 ชนิด ได้แก่ *Bamusa pervariabilis* หรือ Kao Jue กับ *Phyllostachys pubescens* หรือ Mao Jue ที่มีอายุน้อยกว่า 3 ปี มีการทดสอบแรงดัดกระทำที่กึ่งกลางคานขนาดความยาว 1,200 มม. พบว่าลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ การวิบัติที่มีการหักหรือแตกเฉพาะบริเวณที่มีแรงกระทำ (loading crushing) มักเกิดการวิบัติลักษณะนี้ในชิ้นส่วนที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง และการวิบัติที่มีรอยแตก

ฉีกออกตามความยาวตลอดความยาวคาน (splitting) มักเกิดในชั้นส่วนที่มีความชื้นสัมพัทธ์น้อยๆ ดังภาพที่ 2.6

ภาพที่ 2.6

การวิบัติแบบ Local Crushing และ Splitting



(1) Local Crushing



(2) Splitting

ที่มา; Chung and Yu, 2002

การศึกษาคูณสมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ไผ่อายุ 1 3 และ 5 ปี ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1037-94 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ไผ่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อไม้ไผ่มีอายุมากขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากผิวในไปผิวนอกและจากล่างขึ้นบนตามความยาวของลำไม้ไผ่ สำหรับโมดูลัสของการแตกหักและโมดูลัสการยืดหยุ่นของไม้ไผ่ในการรับแรงดัดพบว่ามีการเพิ่มขึ้นตามอายุของไม้ไผ่และตำแหน่งตามความยาวจากล่างขึ้นบน ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7
ความถ่วงจำเพาะและคุณสมบัติในการรับแรงดัดของไม้ไผ่ตามตำแหน่งและอายุ

อายุ	ตำแหน่ง	ความถ่วงจำเพาะ	โมดูลัสของการแตกกร้าว (MPa.)	โมดูลัสของการยืดหยุ่น (MPa.)
1	ล่าง	0.49	110.3	7,770
	กลาง	0.53	119.3	8,680
	บน	0.54	117.2	8,929
3	ล่าง	0.70	151.0	10,039
	กลาง	0.71	151.7	10,122
	บน	0.72	160.6	10,397
5	ล่าง	0.75	186.2	13,162
	กลาง	0.78	184.8	13,410
	บน	0.76	183.4	13,307

ที่มา; Li, 2004

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดและลักษณะการวิบัติของลำไม้ไผ่ตง (*Dendrocalamus asper* Backer) อายุประมาณ 2-3 ปี เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของไม้ไผ่ที่ได้จากค่ามาตรฐานสากล (ISO 22157-1) โดยทำการทดสอบการดัดของลำไม้ไผ่ในช่วงความยาว 2.50 3.00 และ 3.60 ม. ทำการทดสอบแรงดึงขนานเส้น แรงแดขนานเส้น และแรงเฉือนขนานเส้นตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) จากผลการศึกษาพบว่าลำไม้ไผ่ที่มีช่วงความยาวน้อยกว่า 40D จะวิบัติโดยหน่วยแรงเฉือน ส่วนลำไม้ไผ่ที่มีช่วงยาวมากกว่า 40D จะวิบัติโดยหน่วยแรงดัด

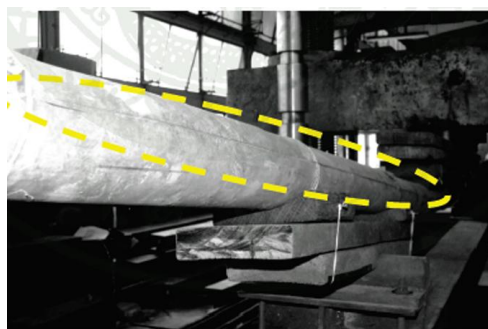
ความยาวคานน้อยกว่า 30 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ($L < 30D$) หน่วยแรงดัดสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 989-1,107 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $1,086 \pm 53$ กก./ตร.ซม. โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 171,491-205,781 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $181,757 \pm 14,112$ กก./ตร.ซม. ความยาวคานมากกว่า 30 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ($L > 30D$) หน่วยแรงดัดสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 773-998 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 851 ± 867 กก./ตร.ซม. โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 160,291-195,185 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $176,13 \pm 12,698$ กก./ตร.ซม. ลักษณะการวิบัติแบบแรงเฉือนส่วนใหญ่มีขนาดความ

ยาวคานโดยประมาณน้อยกว่า 30D และการวิบัติเนื่องจากแรงดัดส่วนใหญ่จะเกิดกับคานไม้ไผ่ที่มีความยาวคานมากกว่า 30D

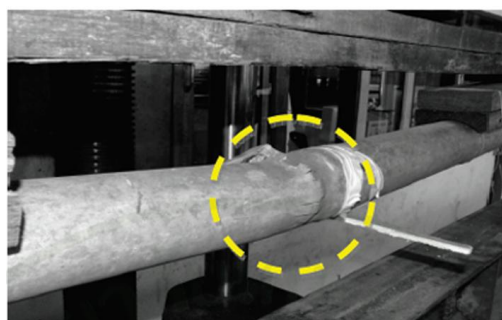
นอกจากความยาวคานแล้วลักษณะทางกายภาพของไม้ไผ่ยังมีผลต่อการเกิดการวิบัติที่เกิดขึ้น เช่น การวางตัวของเส้นไม้และรอยแตกตามยาวที่มักเกิดขึ้นตามธรรมชาติเมื่อไม้ไผ่มีความชื้นน้อยลง ตลอดจนความไม่สมบูรณ์ของเนื้อไม้หรือไม่สมบูรณ์ของรูปทรงเช่นเดียวกับไม้โดยทั่วไป นอกจากนี้แล้วยังพบว่าการวิบัติของไม้ไผ่จะเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด (เอกลักษณะ, 2554)

ภาพที่ 2.7

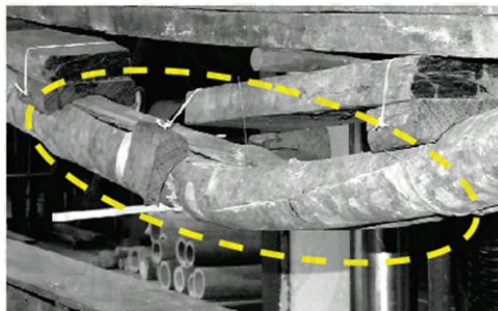
ลักษณะการวิบัติของคานไม้



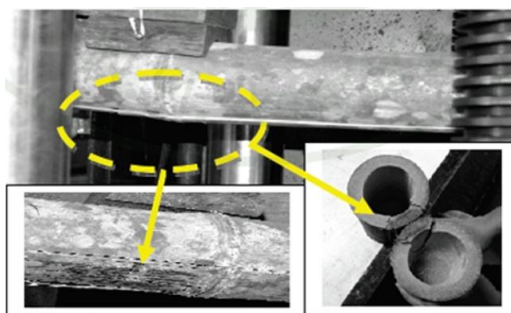
(1) การวิบัติของคานไม้โดยแรงเฉือน



(2) การวิบัติของคานไม้โดยแรงดัด



(3) การวิบัติของคานไม้โดยแรงดัดผสมแรงแรงเฉือน



(4) การวิบัติของคานไม้ไม้เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ในเนื้อไม้

ที่มา; Sjoerd, 2012

การศึกษาส่วนประกอบของคานไม้โดยใช้วิธีการรวบไม้โดยรวบลำไม้ 2-3 ลำ โดยใช้การเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน คือ การเชื่อมต่อแบบลิ้มที่อยู่ภายในมีความแข็งแรงกว่าแบบเชื่อมต่อด้วยการนำลิ้มผ่านลำแล้วมัดด้วยลวดเหล็ก ทำให้ส่วนประกอบของคานแข็งแรงกว่าไม้ 2 หรือ 3 ลำที่ไม่มีการเชื่อมต่อ การเชื่อมต่อไม้สามลำทำให้คานมีช่วงพาดที่ยาวกว่าเดิม โดยกำหนดให้ส่วนประกอบของคานมีขนาดไม้เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร (Sjoerd, 2012)

ภาพที่ 2.8

การคำนวณโมเมนต์ Moment of Inertia และ Moment of Resistance ของลำไม้

TUBE SHAPE	Moment of Inertia	Moment of Resistance Statical Moment Area
	$I_y = I_z = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{64}$	$W_y = W_z = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{32d}$

ที่มา; Sjoerd, 2012

ตารางที่ 2.8

การคำนวณ Moment of Inertia และ Moment of Resistance ของลำไผ่

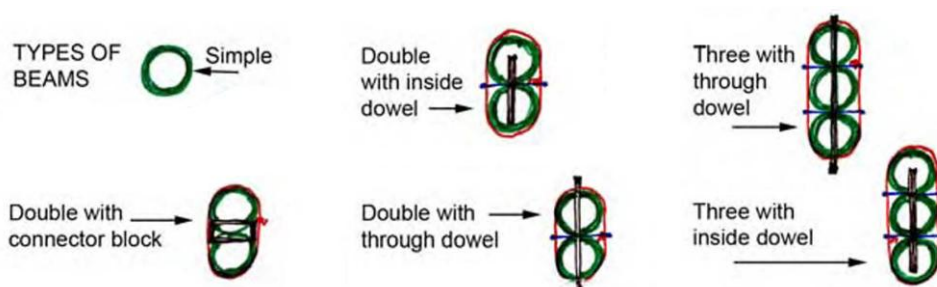
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก (d) (ซม.)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางภายใน (d _i) (ซม.)	ความหนาเนื้อ ไม้ (t) (ซม.)	พื้นที่ หน้าตัด (A) (ตร.ซม.)	$I_y = I_x$	$W_y = W_z$
1	4.0	3.2	0.50	4.5	7.4	3.7
2	4.5	3.6	0.45	5.7	11.9	5.3
3	5.0	4.0	0.50	7.1	18.1	7.2
4	5.5	4.4	0.55	8.6	26.5	9.6
5	6.0	4.8	0.60	10.2	37.5	12.5
6	6.5	5.2	0.65	12.0	51.7	15.9
7	7.0	5.6	0.70	13.9	69.6	19.9
8	7.5	6.0	0.75	15.9	91.7	24.5
9	8.0	6.4	0.80	18.2	118.7	29.7
10	8.5	6.8	0.85	20.4	151.3	35.6
11	9.0	7.2	0.90	22.9	190.1	42.3

ที่มา; Sjoerd, 2012

การรวมกันของลำไผ่ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แบบ 2 ลำ ที่เชื่อมด้วย ท่อนไม้ หรือ ลิ่มที่อยู่ภายในมีความแข็งแรงกว่าไผ่ 1 ลำ แบบ 2 ลำ ที่เชื่อมด้วย ท่อนไม้ หรือ ลิ่มที่อยู่ภายในมีความแข็งแรงกว่าแบบเชื่อมต่อด้วยการนำลิ่มผ่านลำทั้งสองด้านอยู่ 15-20% การเชื่อมต่อแบบลิ่มที่อยู่ภายในมีความแข็งแรงกว่าแบบเชื่อมต่อด้วยการนำลิ่มผ่านลำ

ภาพที่ 2.9

วิธีการเชื่อมต่อของคานไผ่



ที่มา; Sjoerd, 2012

ตารางที่ 2.9

การคำนวณ Moment of Resistance และค่าความแข็งแรงของลำไม้จำนวนต่างๆ

ค่าของลำไม้เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร	ความแข็งแรง
ไม้กลวง 1 ลำ	= 1
คาน 2 ลำ เชื่อมต่อด้วยท่อนไม้	x 4.2
คาน 2 ลำ ภายในเชื่อมต่อด้วยลิ้ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และ 1.6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของความยาวลิ้ม	x 4.5
คาน 2 ลำ เชื่อมต่อผ่านกลางลำด้วยลิ้ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร	x 3.7
คาน 3 ลำ เชื่อมต่อผ่านกลางลำด้วยลิ้ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร	x 7.9
คาน 3 ลำ ภายในเชื่อมต่อด้วยลิ้ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และ 2.6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของความยาวลิ้ม	x 10

ที่มา; Sjoerd, 2012

ตารางที่ 2.10

แนวทางสำหรับขนาดในการใช้งานด้วยวิธีการเชื่อมต่อแบบต่างๆ ของไม้ 3 ลำ

	ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคานไม้ 3 ลำ (ซม.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลิ้มต่อช่องเจาะ ประมาณเท่ากับผลรวมของความหนาของเนื้อไม้ (ซม.)	ความยาวของลิ้มเท่ากับ 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)	ระยะห่างจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของลิ้ม เท่ากับ 7 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)
1	4.0	1.0	16	28.0
2	4.5	1.1	18	31.5
3	5.0	1.2	20	35.0
4	5.5	1.3	22	38.5
5	6.0	1.4	24	42.0

ที่มา; Sjoerd, 2012

2.4 ศึกษาอาคารสถาปัตยกรรมไม้ไม้ที่ใช้การรวบลำเป็นโครงสร้างอาคาร

2.4.1 อาคารสถาปัตยกรรมไม้ไม้ในประเทศไทย

อาคาร Ecological Children Activity and Education Center สถานที่ เกาะกูด จังหวัดตราด ออกแบบโดย 24H > architecture พื้นที่ก่อสร้าง 165 ตารางเมตร แบ่งพื้นที่ใช้สอยเป็น หอประชุม โรงภาพยนตร์ ห้องสมุด ห้องศิลปะ ห้องดนตรี ห้องแพชั่น และพื้นที่ระเบียงนั่งเล่น วิธีการรวบลำไม้ประกอบด้วยการใช้นอตเกลียวและมัดด้วยหวาย

ภาพที่ 2.10

อาคาร Ecological Children Activity and Education Center

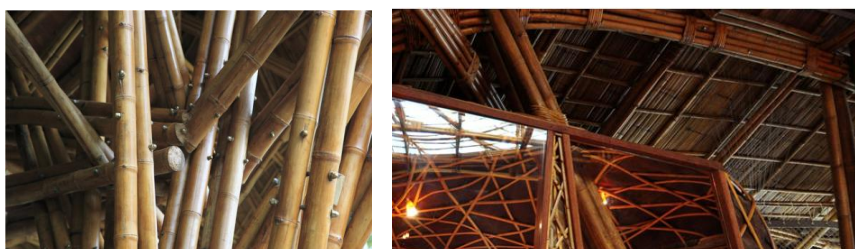


ที่มา; www.archdaily.com, 26 สิงหาคม 2556

ภาพที่ 2.11

วิธีการรวบลำไม้

อาคาร Ecological Children Activity and Education Center



ที่มา; www.archdaily.com, 26 สิงหาคม 2556

โรงเรียนปัญญาเด่น สถานที่ จังหวัดเชียงใหม่ ออกแบบโดย 24H > architecture
พื้นที่โครงการ 5,000 ตารางเมตร วิธีการรวบลำไ้ประกอบด้วยการใช้ลิ่มมัดด้วยเชือกไนลอนและ
เชือกมะนิลา

ภาพที่ 2.12
โรงเรียนปัญญาเด่น



ที่มา; www.archdaily.com, 26 สิงหาคม 2556

ภาพที่ 2.13
วิธีการรวบลำไ้
โรงเรียนปัญญาเด่น



ที่มา; www.archdaily.com, 26 สิงหาคม 2556

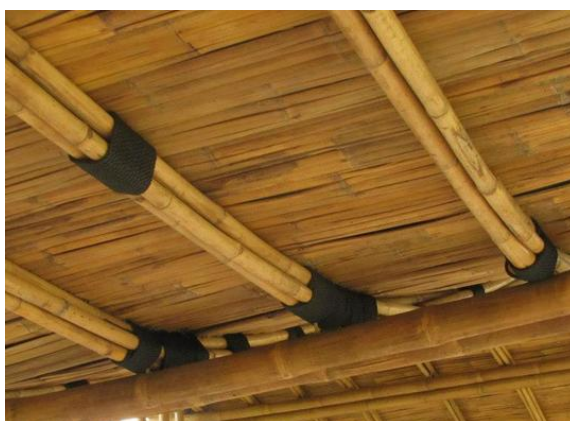
อาคารนิทรรศการไม้ไผ่ สถานที่ สวนรถไฟ กรุงเทพมหานคร วิธีการรวบลำไผ่ ประกอบด้วยการใช้ลิ้มมัดด้วยเชือกไนลอน

ภาพที่ 2.14
อาคารนิทรรศการไม้ไผ่



ที่มา; ถ่ายโดยผู้วิจัย, 19 มิถุนายน 2555

ภาพที่ 2.15
วิธีการรวบลำไผ่
อาคารนิทรรศการไม้ไผ่



ที่มา; ถ่ายโดยผู้วิจัย, 19 มิถุนายน 2555

อาคารหอศิลป์ไม้ไผ่ สถานที่ สถาบันอาศรมศิลป์ วิธีการรวบลำไผ่ประกอบด้วยการใช้ลิ้มมัดด้วยเชือกไนลอน

ภาพที่ 2.16
อาคารหอศิลป์ไม้ไผ่



ที่มา; www.arsomsilp.ac.th, 26 สิงหาคม 2556

ภาพที่ 2.17
วิธีการรวบลำไผ่
อาคารหอศิลป์ไม้ไผ่



ที่มา; www.arsomsilp.ac.th, 26 สิงหาคม 2556

2.4.2 อาคารสถาปัตยกรรมไม้ไม้ในต่างประเทศ

อาคาร Bamboo Wing สถานที่รีสอร์ท Flamingo Dai Lai ประเทศเวียดนาม ออกแบบโดย Vo Trong Nghia พื้นที่ก่อสร้าง 1,600 ตารางเมตร แบ่งพื้นที่ใช้สอยเป็น ร้านอาหาร สถานที่จัดงานแต่งงาน แสดงดนตรี และงานแสดงต่างๆ โครงสร้างช่วงพาดยาว 12 เมตร วิธีการรวบลำไม้ประกอบด้วยการใช้นอตเกลียวและมัดด้วยหวาย

ภาพที่ 2.18

อาคาร Bamboo Wing



ที่มา; www.archdaily.com, 26 สิงหาคม 2556

ภาพที่ 2.19

วิธีการรวบลำไม้

อาคาร Bamboo Wing



ที่มา; www.archdaily.com, 26 สิงหาคม 2556

อาคาร Zeri Pavilion สถานที่ World Expo 2000 ประเทศ เยอรมัน ออกแบบโดย Simon Vélez พื้นที่ก่อสร้าง 2,150 ตารางเมตร วิธีการรวบลำไผ่ประกอบด้วยการใช้นอตเกลียว และเข็มขัดรัดท่อ

ภาพที่ 2.20

อาคาร Zeri Pavilion



ที่มา; www.bambus.rwth-aachen.de, 26 สิงหาคม 2556

ภาพที่ 2.21

วิธีการรวบลำไผ่

อาคาร Zeri Pavilion



ที่มา; www.bambus.rwth-aachen.de, 26 สิงหาคม 2556

อาคาร Big Tree Farms Chocolate Factory สถานที่ บาห์ลี ประเทศ อินโดนีเซีย แบ่งพื้นที่ใช้สอยเป็นสำนักงาน ร้านค้า ร้านอาหาร คลังสินค้า ห้องประชุม และจัดงานต่างๆ พื้นที่ก่อสร้าง 2,550 ตารางเมตร วิธีการรวบลำไผ่ประกอบด้วยการใช้นอตเกลียว

ภาพที่ 2.22

อาคาร Big Tree Farms Chocolate Factory



ที่มา; www.designbuildsource.com, 26 สิงหาคม 2556

ภาพที่ 2.23

วิธีการรวบลำไผ่

อาคาร Big Tree Farms Chocolate Factory



ที่มา; www.designbuildsource.com, 26 สิงหาคม 2556

อาคาร The Timarai Bamboo Beach Resort ประเทศ คอสตาริกา ออกแบบโดย Esperanza Callego แบ่งพื้นที่ใช้สอยเป็น ร้านอาหาร และจัดงานต่างๆ วิธีการรวบลำไผ่ ประกอบด้วยการใช้รถเกี่ยวและเข็มขัดรัดท่อ

ภาพที่ 2.24

อาคาร The Timarai Bamboo Beach Resort



ที่มา; <http://www.guaduabamboo.com>, 26 สิงหาคม 2556

ภาพที่ 2.25

วิธีการรวบลำไผ่

อาคาร The Timarai Bamboo Beach Resort



ที่มา; <http://www.guaduabamboo.com>, 26 สิงหาคม 2556

อาคาร PANACA Theme Park ประเทศ คอสตาริกา แบ่งพื้นที่ใช้สอยเป็น ศูนย์การ
เรียนรู้การเกษตร วิธีการรวบลำไผ่ประกอบด้วยการใช้นอตเกลียว

ภาพที่ 2.26

อาคาร PANACA Theme Park



ที่มา; <http://www.guaduabamboo.com>, 26 สิงหาคม 2556

ภาพที่ 2.27

วิธีการรวบลำไผ่

อาคาร PANACA Theme Park



ที่มา; <http://www.guaduabamboo.com>, 26 สิงหาคม 2556

2.5 ทฤษฎีการออกแบบการรับแรงอัดตามแนวแกน

เสาเป็นส่วนประกอบของอาคารที่เป็นที่รู้จักในการรับแรงอัดที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด เนื่องจากเสามักจะถูกคิดว่าเป็นส่วนประกอบของอาคารในแนวดิ่งซึ่งมีความยาวมากกว่าความหนาแน่น ความแตกต่างระหว่างส่วนประกอบของอาคารรับแรงดิ่งและแรงอัด 2 ประการ คือ

1. แรงดิ่งจะพยายามจับอาคารให้อยู่ในเส้นตรง ในขณะที่แรงอัดจะพยายามดันอาคารให้ออกจากระนาบรับแรง
2. การมีรูเจาะของนอตเกลียวหรือหมุดย้ำในส่วนประกอบของอาคารรับแรงดิ่งจะลดพื้นที่ในการรับแรง แต่ในส่วนประกอบของอาคารรับแรงอัด นอตเกลียวหรือหมุดย้ำจะถูกสมมติให้เต็มเต็มรูเจาะ

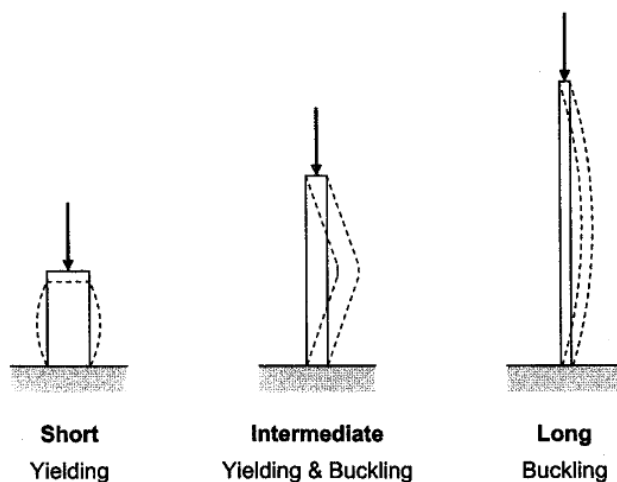
จากการทดสอบพบว่าเสามักจะวิบัติที่หน่วยแรงต่ำกว่าขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุ เนื่องจากเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ทางด้านข้าง ดังนั้นหน่วยแรงที่ใช้ในการออกแบบจึงลดลง โดยมีความสัมพันธ์กับอันตรายจากการโก่งเดาะ สำหรับหน้าตัดเดียวกัน เสาที่ยาวจะมีแนวโน้มที่จะโก่งเดาะได้ง่ายและรับน้ำหนักได้น้อยลง แนวโน้มของการโก่งเดาะมักวัดโดย อัตราส่วนความชะลูด ซึ่งก่อนหน้านี้ได้ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของความยาวต่อรัศมีไจเรชันที่น้อยที่สุด แนวโน้มของการโก่งเดาะยังมีผลมาจากปัจจัยอื่นเช่น ชนิดของการยึดปลาย การเยื้องศูนย์ของน้ำหนักบรรทุก ความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ

สูตรออยเลอร์สำหรับเสาอิลาสติก

การวิเคราะห์และออกแบบเสาชะลูด ลักษณะการวิบัติที่สำคัญที่ต้องพิจารณาเมื่อส่วนประกอบของอาคารรับแรงอัด คือ การโก่งเดาะ (buckling) ซึ่งทำให้เสาเสียเสถียรภาพเกิดการโก่งตัวออกนอกแนวแกนจนวิบัติเมื่อน้ำหนักบรรทุกเกิดการวิกฤตค่าหนึ่ง

อีกรูปแบบหนึ่งของการวิบัติคือ การคราก (yielding) หรือการบดทลาย (crushing) ของวัสดุ เนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในส่วนประกอบของอาคารเกินค่ากำลังครากของวัสดุ การที่เสาจะวิบัติในรูปแบบใดนั้นจะขึ้นกับความชะลูดของเสา เสาสั้นจะวิบัติโดยการคราก เสายาวจะวิบัติโดยการโก่งเดาะ และเสาปานกลางจะมีการวิบัติแบบผสมระหว่างการครากและการโก่งเดาะ

ภาพที่ 2.28
รูปแบบการวิบัติของเสาที่มีความขะลุ่ดต่างกัน



สูตรของออยเลอร์ใช้สำหรับเสาตรง รับแรงตามแนวแกน ทำจากวัสดุเนื้อเดียวกัน ปลายทั้งสองข้างยึดแบบจุดหมุน และเป็นเสาขะลุ่ด เมื่อแรงอัดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤต (critical load, P_{cr}) เสาจะเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้าง

โดยสมการ คำนำน้หนักบรรทุกวิกฤต (critical load, P_{cr}) คือ

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

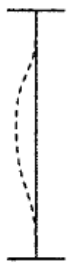
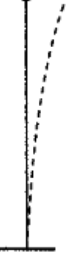
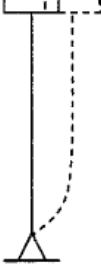
เนื่องจาก $r = \sqrt{I/A}$ สูตรของออยเลอร์จึงเขียนในรูปของหน่วยแรง

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2}$$

ค่า L ควรจะเป็นระยะระหว่างจุดดัดกลับของรูปทรงการโก่งเดาะ โดยเรียกระยะนี้ว่า ความยาวประสิทธิผล (effective length) ของเสา สำหรับปลายที่เป็นจุดหมุนทั้งคู่ จุดดัดกลับหรือจุดที่ไม่มีโมเมนต์เป็นศูนย์จะอยู่ที่ปลายซึ่งห่างกัน L สำหรับเสาที่มีการยึดปลายต่างกันจะมีความยาวประสิทธิผลต่างกัน

ความยาวประสิทธิผล คือ ระยะระหว่าง จุดดัดกลับ (inflection point) ซึ่งมีโมเมนต์เป็นศูนย์ มีค่าเท่ากับ KL โดยที่ K คือตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล ค่าของ K ขึ้นกับความต้านทานการหมุนและการเคลื่อนที่ด้านข้างที่ปลายเสา

ตารางที่ 2.11
ตัวคูณประกอบความยาวประสิทธิผล

ชนิดของเสา	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
รูปแบบการโก่งเคาะ						
ค่า K ทางทฤษฎี	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
ค่า K ในการออกแบบ	0.65	0.8	1.2	1.0	2.1	2.0
สัญลักษณ์การยึดปลาย		ไม่มีการหมุน และ ไม่มีการเคลื่อนที่				
		มีการหมุน และ ไม่มีการเคลื่อนที่				
		ไม่มีการหมุน และ มีการเคลื่อนที่				
		มีการหมุน และ มีการเคลื่อนที่				

2.6 ทฤษฎีการออกแบบการรับแรงดัด

การรับแรงดัดเป็นการรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งฉากกับแกนของอาคารจึงรับแรงดัดเป็นหลัก

หน่วยแรงดัดในคาน เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกที่หน้าตัด ณ ตำแหน่งใดๆ กลางช่วงคานจะเกิดแรงภายใน คือ แรงเฉือน (V) และโมเมนต์ (M)

หน่วยแรงดัด f_b คำนวณได้ตามสูตร

$$f_b = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S}$$

เมื่อ c = ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวนอกสุดของหน้าตัด
 I = โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนสะเทิน
 $S = I/c$ = โมเมนต์หน้าตัดรอบแกนสะเทิน

หน่วยแรงเฉือน f_v คำนวณได้ตามสูตร

$$f_v = \frac{VQ}{Ib}$$

เมื่อ f_v = หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น
 V = แรงเฉือนภายนอกที่หน้าตัด
 I = โมเมนต์หน้าตัดของทั้งหน้าตัดรอบแกนสะเทิน
 b = ความกว้างหน้าตัดที่ระดับที่ต้องการหาหน่วยแรงเฉือน
 Q = โมเมนต์ของส่วนหน้าตัดที่อยู่บนระดับที่ต้องการหาหน่วยแรงรอบแกนสะเทิน

2.7 ข้อกำหนดและมาตรฐานน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างอาคาร

มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) ได้แบ่งชนิดไม้และกำหนดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้เป็น 5 ประเภท คือ ไม้เนื้ออ่อนมาก ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อปานกลาง ไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้อแข็งมาก โดยชื่อและคุณสมบัติเชิงกลของไม้ทั้ง 5 ประเภท ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ได้มาจากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของไม้ตามมาตรฐานสากล หารด้วยค่าส่วนปลอดภัยในตารางที่ 2.11 และ 2.12 จะได้ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ที่ภาวะรับน้ำหนักบรรทุกปกติและมีการใช้งานที่สภาวะแห่งตลอดเวลา ดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.12
ส่วนปลอดภัยของไม้ชั้น 1

ชนิดหน่วยแรงที่ยอมให้	ส่วนปลอดภัยสำหรับไม้ก่อสร้างชั้น 1		
	งานในร่ม	งานกลางแจ้ง	งานในที่เปียกชื้น
แรงดัดในคานและแรงดึงขนานเสี้ยน	7.6	9.36	10.53
แรงเฉือนตามเสี้ยน	10.53	10.53	10.53
แรงเฉือนตามแนวนอนในคาน	15.21	115.21	15.21
แรงอัดขนานเสี้ยน	6.72	7.60	9.08
แรงอัดตั้งฉากเสี้ยน	2.93	4.09	4.39

ตารางที่ 2.13
ส่วนปลอดภัยของไม้ชั้น 2

ชนิดหน่วยแรงที่ยอมให้	ส่วนปลอดภัยสำหรับไม้ก่อสร้างชั้น 2		
	งานในร่ม	งานกลางแจ้ง	งานในที่เปียกชื้น
แรงดัดในคานและแรงดึงขนานเสี้ยน	6.5	8	9
แรงเฉือนตามเสี้ยน	9	9	9
แรงเฉือนตามแนวนอนในคาน	13	13	13
แรงอัดขนานเสี้ยน	5.75	6.5	7.75
แรงอัดตั้งฉากเสี้ยน	2.5	3.5	3.75

ตารางที่ 2.14
หน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้

ประเภท ของไม้	หน่วยแรงดัด หรือแรงดึง ขนานเสี้ยน (กก./ตร.ซม.)	โมดูลัสแห่ง ความยืดหยุ่น โดยประมาณ (กก./ตร.ซม.)	หน่วยแรงอัด		หน่วยแรงเฉือน ขนานเสี้ยน (กก./ตร.ซม.)
			ขนานเสี้ยน (กก./ตร.ซม.)	ตั้งฉากเสี้ยน (กก./ตร.ซม.)	
ไม้เนื้ออ่อนมาก	60	78,900	45	12	6
ไม้เนื้ออ่อน	80	94,100	60	16	8
ไม้เนื้อปานกลาง	100	112,300	75	22	10
ไม้เนื้อแข็ง	120	136,300	90	30	12
ไม้เนื้อแข็งมาก	150	189,000	110	40	15

แรงกระแทก (impact load) สำหรับโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกจรที่ทำให้เกิดแรงกระแทกจะต้องเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกจรให้เพียงพอที่จะรับแรงกระแทก ซึ่งมาตรฐาน ว.ส.ท. ได้กำหนดค่าที่เพิ่มสำหรับแรงกระแทกไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.15
น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่

ชนิดของวัสดุ	น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่
1. วัสดุทั่วไป	kg/m ³
คอนกรีตเสริมเหล็ก	2,400
คอนกรีตล้วน	2,320
ไม้สัก	630
ไม้เนื้ออ่อน	500-1,000
ไม้เนื้อแข็ง	700-1,200
เหล็ก	7,850
2. วัสดุผนังหลังคา	kg/m ²
กระเบื้องลอนคู่	14
กระเบื้องลูกฟูกลอนเล็ก	12
กระเบื้องลูกฟูกลอนใหญ่	17
กระเบื้องราง	12
กระเบื้องซีแพคโมเนีย	50
สังกะสี	5
3. โครงหลังคา	10-30
4. แป้ไม้	5
5. พื้นไม้ 1" รวมตง	30-50
6. ฝ้า ฝา กำแพง	kg/m ²
คร่าวไม้ 1 ½." X @ 0.40	15
คร่าวไม้ 1 ½." X @ 0.60	10
กระเบื้องแผ่นเรียบหนา 4 mm	7
กระเบื้องแผ่นเรียบหนา 8 mm	14
แผ่นแอสเบสโตไลท์	4
ไม้อัดหนา 4 mm	4
ฝาไม้ ½" รวมคร่าว	20
อิฐมอญหนา 10 cm	180
อิฐบล็อกหนา 10 cm	100
คอนกรีตบล็อกหนา 10 cm	100-150
คอนกรีตบล็อกหนา 15 cm	170-180
คอนกรีตบล็อกหนา 20 cm	220-240

ที่มา; กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ข้อ 15 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

ตารางที่ 2.16
น้ำหนักบรรทุกจร

ประเภทและส่วนต่างๆ ของอาคาร	หน่วยน้ำหนักบรรทุกจร (kg/m ²)
1. หลังคา	30
2. กันสาดหรือหลังคาคาคอนกรีต	100
3. ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ ห้องส้วม	150
4. ห้องแถว ตึกแถวที่พักอาศัย อาคารชุด หอพัก โรงแรม และที่พักคนไข้พิเศษของโรงพยาบาล	200
5. สำนักงาน ธนาคาร	250
6. (ก) อาคารพาณิชย์ ส่วนของห้องแถว ตึกแถวที่ใช้เพื่อ อาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย โรงเรียน และ โรงพยาบาล	300
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินทางของอาคารพาณิชย์ โรงแรม สำนักงาน และธนาคาร	300
7. (ก) ตลาด อาคารสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องประชุม ห้องสมุดในห้องสมุด หรือหอสมุด ที่จอดรถหรือเก็บรถยนต์นั่งหรือจอดรถจักรยานยนต์	400
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางทางเดินของอาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย และโรงเรียน	400
8. (ก) คลังสินค้า โรงไฟฟ้า พิพิธภัณฑ์ อัฒจันทร์ โรงงาน อุตสาหกรรม โรงพิมพ์ ห้องถ่ายเอกสาร และพัสดุ	500
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของตลาด อาคารสรรพสินค้า ห้องประชุม หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องสมุด และหอสมุด	500
9. ห้องเก็บหนังสือของห้องสมุดหรือหอสมุด	600
10. ที่จอดรถหรือเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่า	800

ที่มา; กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ข้อ 15 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522