



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง พฤติกรรมการรับแรงคดของลำไม้ไผ่ตง

Bending Behavior of Pai Tong (*Dendrocalamus asper* Backer) Bamboo Culms

นามผู้วิจัย นายเอกลักษณ์ คงชนะ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์เบญจพล เวทย์วิวัฒน์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ โชติโกกร, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

สิงสิงห์ มทวีสายเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

พฤติกรรมการรับแรงดัดของลำไม้ไผ่ตง

Bending Behavior of Pai Tong (*Dendrocalamus asper Backer*) Bamboo Culms

โดย

นายเอกลักษณ์ กองจันทร์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกลักษณ์ คงยงค์ 2554: พฤติกรรมการรับแรงดัดของลำไม้ไผ่ตง ปริญญาวิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์เบญจพล เวทย์วิวัฒน์, Ph.D.  
97 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดและลักษณะการวิบัติของลำไม้ไผ่ตง  
(*Dendrocalamus asper* Backer) อายุประมาณ 2-3 ปี เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกายภาพ  
และคุณสมบัติทางกลของไม้ไผ่ที่หาได้จากค่ามาตรฐานสากล (ISO 22157-1) โดยทำการทดสอบ  
การดัดของลำไม้ไผ่ที่ช่วงความยาว 2.50 ม., 3.00 ม. และ 3.60 ม. และทำการทดสอบแรงดัดงอ  
เสี้ยน แรงอัดงอเสี้ยน และแรงเฉือนงอเสี้ยนตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) จากผล  
การศึกษาพบว่าลำไม้ไผ่ที่มีช่วงความยาวน้อยกว่า 40D จะวิบัติโดยหน่วยแรงเฉือน ส่วนลำไม้ไผ่ที่  
มีช่วงความยาวมากกว่า 40D จะวิบัติโดยหน่วยแรงดัด สำหรับคุณสมบัติทางกลของไม้ไผ่ตงมีค่า  
ต่างๆ ดังนี้ โมดูลัสของการยืดหยุ่น หน่วยแรงดัด หน่วยแรงดัดงอเสี้ยน หน่วยแรงอัดงอ  
เสี้ยนและหน่วยแรงเฉือนงอเสี้ยนทั้งที่มีข้อและไม่มีข้อ มีค่าเท่ากับ 160,291-205,781 กก./ตร.ซม.,  
773-1,107 กก./ตร.ซม., 316-976 กก./ตร.ซม., 444-728 กก./ตร.ซม., 79-140 กก./ตร.ซม. และ  
36-136 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Aekkalak Khongyon 2011: Bending Behavior of Pai Tong (*Dendrocalamus asper Backer*) Bamboo Culms. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Benjapon Wethyavivorn, Ph.D. 97 pages.

This research studied the bending and failure characteristics of Pai Tong (*Dendrocalamus asper Backer*) culms, 2-3 years age. The physical and mechanical properties were compared to those obtained from ISO 22157-1. Bamboo culms of 2.50 m., 3.00 m. and 3.60 m. were loaded under bending. Tension tests parallel to fibers, compression tests parallel to fibers and shear tests parallel to fibers according to ISO 22157-1, have also been performed. It was founded that Pai Tong culms with less than 40D in length failed in shear, while those with more than 40D failed in bending. The flexural modulus of elasticity, bending stress, tensile stress parallel to fibers, compressive stress parallel to fibers, shearing stress parallel to fibers with and without node are 160,291-205,781 ksc., 773-1,107 ksc., 316-976 ksc., 444-728 ksc., 79-140 ksc. and 36-136 ksc., respectively.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีได้เลยถ้าขาดบุคคลอันเป็นที่เคารพรัก  
เหล่านี้ รองศาสตราจารย์เบญจพล เวทย์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำปรึกษา  
แนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือดูแลข้าพเจ้าในทุกๆ  
ด้านตลอดระยะเวลาของการเป็นนิสิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อีกทั้งยังได้ปลูกฝังแนวความคิด  
ทางด้านวิศวกรรม และหลักการทำงานที่มีส่วนช่วยส่งเสริมการพัฒนาศักยภาพของข้าพเจ้า ผู้ช่วย  
ศาสตราจารย์ปิยะ โชติโกกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาแนะนำสิ่งที่เป็น  
ประโยชน์ต่อการดำเนินงาน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ อาจารย์ชาญณรงค์  
ไวยพงษ์และเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษา  
แนะนำวิธีการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำการวิจัย เพื่อนๆ พี่ๆ ปริญญาโท วิศวกรรม  
โยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือทางด้านร่างกาย  
และแรงใจจนทำให้การดำเนินงานผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ  
วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยทำการทดสอบหน่วยแรงดึง  
ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ นอกจากบุคคลดังกล่าวข้างต้น ข้าพเจ้า  
ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อย่างสูงที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนให้การศึกษาแก่ข้าพเจ้า  
ตลอดมา

เอกลักษณ์ คงยন্ত্রী

พฤษภาคม 2554

## สารบัญ

## หน้า

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| สารบัญ                      | (1) |
| สารบัญตาราง                 | (2) |
| สารบัญภาพ                   | (4) |
| คำนำ                        | 1   |
| วัตถุประสงค์                | 3   |
| การตรวจเอกสาร               | 4   |
| อุปกรณ์และวิธีการ           | 19  |
| อุปกรณ์                     | 19  |
| วิธีการ                     | 19  |
| ผลและวิจารณ์                | 32  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ           | 53  |
| สรุป                        | 53  |
| ข้อเสนอแนะ                  | 57  |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง        | 58  |
| ภาคผนวก                     | 61  |
| ประวัติการศึกษา และการทำงาน | 97  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่     |                                                                               | หน้า |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1            | ค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพของไผ่ตง ( <i>Dendrocalamus asper</i> Backer)         | 7    |
| 2            | ค่าเฉลี่ยสมบัติทางกลศาสตร์ของไผ่ตง ( <i>Dendrocalamus asper</i> Backer)       | 9    |
| 3            | สมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ไผ่ประกับกาว, (MPa.)                                   | 12   |
| 4            | ส่วนปลอดภัยของไม้                                                             | 13   |
| 5            | หน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้                                                       | 13   |
| 6            | เปรียบเทียบความถ่วงจำเพาะและคุณสมบัติในการรับแรงดัดของไม้ไผ่ตามตำแหน่งและอายุ | 16   |
| 7            | ขนาดและมิติต่างๆ ของคานไม้ไผ่                                                 | 36   |
| 8            | ผลการทดสอบแรงดัด                                                              | 37   |
| 9            | เปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานไม้ไผ่กับค่าทางทฤษฎี                 | 40   |
| 10           | คุณสมบัติของวัสดุสำหรับวิเคราะห์แบบจำลอง FEM                                  | 43   |
| 11           | หน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ไผ่ตง (กก./ตร.ซม.)                                     | 55   |
| ตารางผนวกที่ |                                                                               |      |
| 1            | ผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนบน                                   | 78   |
| 2            | ผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนกลาง                                 | 79   |
| 3            | ผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนล่าง                                 | 80   |
| 4            | ผลการทดสอบแรงอัดขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนบน                                   | 81   |
| 5            | ผลการทดสอบแรงอัดขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนกลาง                                 | 82   |
| 6            | ผลการทดสอบแรงอัดขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนล่าง                                 | 83   |
| 7            | ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนบน                                 | 84   |
| 8            | ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนกลาง                               | 86   |
| 9            | ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนล่าง                               | 88   |
| 10           | ผลการทดสอบแรงดัดของลำไม้ไผ่ตง                                                 | 90   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ |                                                                       | หน้า |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------|------|
| 11           | ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงดึงขนานเส้น                           | 91   |
| 12           | ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงอัดขนานเส้น                           | 91   |
| 13           | ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นกรณีมีข้อ                | 92   |
| 14           | ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นกรณีไม่มีข้อ             | 92   |
| 15           | ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงดัด ( $L < 30D$ )                     | 93   |
| 16           | ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงดัด ( $L > 30D$ )                     | 93   |
| 17           | ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล FEM กับผลการทดสอบ<br>ในช่วง 0-50% | 94   |
| 18           | ค่ากลสมบัติของไม้ชนิดต่างๆ                                            | 95   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                                                                                                                                  | หน้า |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1      | ลักษณะทางกายภาพของไม้ไฟ                                                                                                                                                          | 6    |
| 2      | ลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามความยาวของลำไฟตรงกับ เส้นผ่าศูนย์กลาง<br>ภายนอก(a), ความหนาผนังปล้อง(b), ความยาวปล้อง(c)                                                                  | 8    |
| 3      | คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของไฟตรงเปรียบเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะ<br>กับ โมดูลัสของการแตกร้าว(a), โมดูลัสของการยืดหยุ่น(b), หน่วย<br>แรงอัดตั้งฉากกับเส้น(c), หน่วยแรงเฉือนขนานเส้น(d) | 10   |
| 4      | การวิบัติแบบ Local Crushing (1), Splitting (2)                                                                                                                                   | 15   |
| 5      | การทดสอบแรงกดกระทำขวางและลักษณะการวิบัติ                                                                                                                                         | 17   |
| 6      | แบบจำลอง FEM และการกระจายหน่วยแรงจากแรงกระทำขวาง                                                                                                                                 | 18   |
| 7      | ขนาดและมิติต่างๆ ของตัวอย่างการทดสอบแรงดึง                                                                                                                                       | 21   |
| 8      | การทดสอบกำลังรับแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 22157-1                                                                                                                                     | 22   |
| 9      | การทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ISO 22157-1                                                                                                                                     | 23   |
| 10     | การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน ISO 22157-1                                                                                                                                   | 24   |
| 11     | การทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ISO 22157-1                                                                                                                                     | 25   |
| 12     | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด กรณีที่ 1                                                                                                                                 | 27   |
| 13     | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด กรณีที่ 2                                                                                                                                 | 28   |
| 14     | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด กรณีที่ 3                                                                                                                                 | 29   |
| 15     | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด กรณีที่ 4                                                                                                                                 | 30   |
| 16     | ขนาดและการสร้างแบบจำลอง FEM บริเวณผนังปล้อง                                                                                                                                      | 31   |
| 17     | ผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้น (MC=6.1-15.9 %, $\rho = 534-915$<br>กก./ลบ.ม.)                                                                                                          | 32   |
| 18     | ผลการทดสอบแรงอัดขนานเส้น (MC =6.3-28.2 %, $\rho = 618-1,016$<br>กก./ลบ.ม.)                                                                                                       | 33   |
| 19     | ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นกรณีมีข้อ (MC = 10.6-15.7 %, $\rho = 634-928$ กก./ลบ.ม.)                                                                                               | 34   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                            | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 20     | ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นกรณีนไม่มีข้อ ( $MC = 8.5-19.5 \%$ ,<br>$\rho = 615-918$ กก./ลบ.ม.)              | 35   |
| 21     | การวัดตัวของคานไม้ไผ่โดยแรงเฉือน                                                                           | 37   |
| 22     | การวัดตัวของคานไม้ไผ่โดยแรงดัด                                                                             | 38   |
| 23     | การวัดตัวของคานไม้ไผ่โดยแรงดัดผสมแรงเฉือน                                                                  | 38   |
| 24     | การวัดตัวของคานไม้ไผ่เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของเนื้อไม้                                                    | 38   |
| 25     | ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและความถี่ ( $MC = 10.3-13.7 \%$ ,<br>$\rho = 403-1,392$ กก./ลบ.ม.)      | 39   |
| 26     | ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของการแตกร้าวและความถี่<br>( $MC = 10.3-13.7 \%$ , $\rho = 403-1,392$ กก./ลบ.ม.) | 39   |
| 27     | ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ( $MC = 9.1-12.7 \%$ ,<br>$\rho = 699-786$ กก./ลบ.ม.)               | 41   |
| 28     | การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของการ<br>ทดสอบแรงดึง                                     | 42   |
| 29     | การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของการ<br>ทดสอบแรงอัด                                     | 43   |
| 30     | การแบ่งจุดต่อ (Node) และการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh) บริเวณปล้องและ<br>บริเวณข้อ                                | 44   |
| 31     | Brick เอลิเมนต์ที่ใช้ใน โปรแกรม MSC.Nastran V4.5                                                           | 44   |
| 32     | แบบจำลองคานไม้ไผ่สำหรับวิเคราะห์ FEM                                                                       | 45   |
| 33     | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-1                                                      | 45   |
| 34     | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-2                                                      | 46   |
| 35     | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-3                                                      | 46   |
| 36     | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-4                                                      | 47   |
| 37     | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-5                                                      | 47   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่     |                                                                           | หน้า |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|------|
| 38         | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-6                     | 48   |
| 39         | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-7                     | 48   |
| 40         | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-8                     | 49   |
| 41         | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-9                     | 49   |
| 42         | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-10                    | 50   |
| 43         | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-11                    | 50   |
| 44         | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-12                    | 51   |
| 45         | แบบจำลอง FEM ตัวอย่างคาน B-1 กรณีที่ 2 ที่แรงกระทำ 500 กก.                | 52   |
| 46         | แบบจำลอง FEM ตัวอย่างคาน B-1 กรณีที่ 4 ที่แรงกระทำ 900 กก.                | 52   |
| <br>       |                                                                           |      |
| ภาพผนวกที่ |                                                                           |      |
| 1          | อุปกรณ์การทดสอบแรงอัดขนานเลื่อนตามมาตรฐาน ISO22157-1                      | 62   |
| 2          | อุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือนขนานเลื่อนตามมาตรฐาน ISO22157-1                    | 62   |
| 3          | อุปกรณ์การทดสอบแรงดัดตามมาตรฐาน ISO22157-1                                | 63   |
| 4          | ชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง<br>ความเค้น-ความเครียด | 63   |
| 5          | การทดสอบแรงดึงขนานเลื่อนหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง<br>ความเค้น-ความเครียด   | 64   |
| 6          | การทดสอบแรงอัดขนานเลื่อนหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง<br>ความเค้น-ความเครียด   | 64   |
| 7          | ตัวอย่างการวิบัติจากการทดสอบแรงดึงขนานเลื่อน                              | 65   |
| 8          | ตัวอย่างการวิบัติจากการทดสอบแรงอัดขนานเลื่อน                              | 65   |
| 9          | ตัวอย่างการวิบัติจากการทดสอบแรงเฉือนขนานเลื่อนกรณีมีข้อ                   | 66   |
| 10         | ตัวอย่างการวิบัติจากการทดสอบแรงเฉือนขนานเลื่อนกรณีไม่มีข้อ                | 66   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ |                            | หน้า |
|------------|----------------------------|------|
| 11         | การวิบัติของคานไม้ไผ่ B-1  | 67   |
| 12         | การวิบัติของคานไม้ไผ่ B-2  | 67   |
| 13         | การวิบัติของคานไม้ไผ่ B-3  | 68   |
| 14         | การวิบัติของคานไม้ไผ่ B-4  | 68   |
| 15         | การวิบัติของคานไม้ไผ่ B-5  | 69   |
| 16         | การวิบัติของคานไม้ไผ่ B-6  | 69   |
| 17         | การวิบัติของคานไม้ไผ่ B-8  | 70   |
| 18         | การวิบัติของคานไม้ไผ่ B-10 | 70   |
| 19         | การวิบัติของคานไม้ไผ่ B-11 | 71   |
| 20         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-1    | 71   |
| 21         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-2    | 72   |
| 22         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-3    | 72   |
| 23         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-4    | 73   |
| 24         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-5    | 73   |
| 25         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-6    | 74   |
| 26         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-7    | 74   |
| 27         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-8    | 75   |
| 28         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-9    | 75   |
| 29         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-10   | 76   |
| 30         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-11   | 76   |
| 31         | แบบจำลอง FEM ของคาน B-12   | 77   |

## พฤติกรรมการรับแรงคดของลำไม้ไผ่ตง

### Bending Behavior of Pai Tong (*Dendrocalamus asper* Backer) Bamboo Culms

#### คำนำ

จากปัญหาเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ตลอดจนการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงในปัจจุบัน และจากการเกิดคลื่นสึนามิพัดเข้าทางชายฝั่งทะเลอันดามันในภาคใต้ของประเทศไทย ทำให้เกิดความเสียหายเป็นวงกว้าง บ้านเรือนพังเสียหายจำนวนมาก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงคิดจะสร้างบ้านสำหรับผู้ประสบภัยจากวัสดุที่มีราคาถูกและมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์

“ไม้ไผ่” ถือเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความเหมาะสมต่อการศึกษาและพัฒนาให้เป็นที่ยอมรับและนำไปใช้อย่างแพร่หลายต่อไป ด้วยลักษณะเด่นที่มีน้ำหนักเบาสะดวกต่อการขนส่งและก่อสร้าง มีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วและมีการกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติอย่างกว้างขวางครอบคลุมเกือบทุกส่วนทั่วโลก

จากประวัติศาสตร์พบว่าชาวจีนมีการนำเอาไม้ไผ่มาใช้ประโยชน์ตั้งแต่สมัยโบราณแล้ว โดยนำไม้ไผ่มาทำเป็นนั่งร้านเพื่อการก่อสร้างครั้งแรกประมาณ 5,000 ปีมาแล้ว (Chung and Yu, 2002) และมีการนำไม้ไผ่มาทำเป็นที่อยู่อาศัยในหลายๆ พื้นที่ ซึ่งในประเทศไทยเองก็มักพบที่อยู่อาศัยที่ทำมาจากไม้ไผ่ได้ตามชนบท แต่สาเหตุสำคัญที่ทำให้การนำไม้ไผ่มาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างยังไม่เป็นที่นิยมนัก เพราะยังไม่มีมาตรฐานรองรับเหมือนกับวัสดุก่อสร้างอื่น ประกอบกับลักษณะทางกายภาพของไม้ไผ่ที่มีการแบ่งเป็นปล้องกลวง (Internode) มีข้อ (Node) ออกมาเป็นระยะและมักมีรอยแตกเกิดขึ้นตามแนวยาวเมื่อนำไปใช้งาน ทำให้ไม่เป็นที่นิยมต่อการนำไปใช้งานเป็นโครงสร้างถาวร

ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของไม้ไผ่เพื่อให้เกิดความมั่นใจและปลอดภัยต่อวิศวกรผู้ออกแบบและผู้พักอาศัย โดยการศึกษานี้จะพิจารณาพฤติกรรมการรับแรงคดของลำไม้ไผ่เป็นสำคัญ เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่จะรับแรงคด แม้กระทั่งเสา ซึ่ง

หน้าที่หลักจะรับแรงอัด แต่ในบางครั้งก็อาจจะต้องรับแรงดัดด้วยเช่นกัน โดยมีวัตถุประสงค์ในการวิจัยดังนี้



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงเฉือน และกำลังรับแรงดัดของลำไม้ไผ่ตงและประมาณกำลังรับน้ำหนักได้อย่างเหมาะสม

2. เพื่อศึกษาลักษณะการวิบัติ (Mode of Failure) ของลำไม้ไผ่ตงในช่วงความยาวที่เปลี่ยนแปลง

## ขอบเขตของการวิจัย

ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงดัดของลำไม้ไผ่ตง ตามมาตรฐาน ISO 22157-1 บันทึกพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของลำไม้ไผ่ตงเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่เกิดจากความเค้นดัด (Bending Stress) และความเค้นเฉือน (Shearing Stress) เพื่อประมาณกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของลำไม้ไผ่ตงในช่วงความยาวที่เปลี่ยนแปลงและทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยหลักการและกรรมวิธีขึ้นประกอบอันตะ (Finite Element Method) เพื่อตรวจสอบค่าที่ได้จากการทดสอบกับค่าทางทฤษฎี โดยไม้ไผ่ที่ใช้ทดสอบเป็นไม้ไผ่ตง (*Dendrocalamus asper* Backer) จากจังหวัดปราจีนบุรี อายุประมาณ 3-4 ปี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-10 ซม. ทำการทดสอบที่สภาพแห้งในอากาศประมาณ 2 เดือน

## การตรวจเอกสาร

ไม้ไผ่ (Bamboo) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีวิวัฒนาการมาจากพืชตระกูลหญ้า ซึ่งจัดเป็นหญ้าที่มีอายุยืนยาวที่สุด บางชนิดมีอายุยืนยาวเป็นร้อยปี มีถิ่นกำเนิดและการกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติอย่างกว้างขวาง ครอบคลุมเกือบทุกส่วนของโลก ทั้งในเขตนาน ทวีปยุโรป การกระจายพันธุ์ของไม้ไผ่ทั่วโลกที่มีลักษณะยืนต้นมีประมาณ 77 สกุล 1,030 ชนิด มีการกระจายพันธุ์มากสุดในแถบร้อนทางตอนใต้และตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชียถึง 45 สกุล 750 ชนิด โดยไม้ไผ่ที่พบในประเทศไทยมีประมาณ 15 สกุล 82 ชนิด ขึ้นกระจายอยู่ทั่วไปตั้งแต่เหนือสุดจรดใต้สุดของประเทศ (รุ่งนภา และคณะ, 2544) และด้วยคุณสมบัติที่พิเศษหลายประการของไม้ไผ่ จึงทำให้มีการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของไม้ไผ่มาบ้างแล้ว แต่ยังไม่แพร่หลายมากนัก

โดยพันธุ์ไผ่ในประเทศไทยที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในงานก่อสร้าง คือ ไผ่เลี้ยงและไผ่ตง ซึ่งโดยทั่วไปถ้าใช้งานไม้ไผ่ในสภาพสดจะมีอายุประมาณ 1-3 ปี แต่ถ้าอยู่ในสภาพแห้งแล้วจะมีอายุการใช้งานประมาณ 10-15 ปี (Thaipetch, 2004)

### 1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไม้ไผ่ตง

ไผ่ตงมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Dendrocalamus asper* Backer ชื่อสามัญ Sweet Bamboo เป็นไม้อยู่ในวงศ์ Gramineae วงศ์เดียวกับหญ้า ในประเทศไทยเรียกว่า “ไผ่ตง” แต่มีบางพื้นที่เรียกไผ่ตงว่า ไผ่บ้านหรือไผ่หวาน

ไผ่ตงเป็นไผ่ที่มีลำใหญ่และสูง โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8-18 ซม. สูงราว 20 ม. ลำปล้องยาวประมาณ 40-50 ซม. ลักษณะข้อนูนเห็นได้ชัด ใบเป็นรูปหอกปลายใบเรียวแหลมโคนใบป้าน ขอบใบสากและคม หลังใบไม่มีขน แต่อาจมีขนอ่อนอยู่ทั่วไปตามท้องใบ โดยขนาดของใบจะมีความยาวประมาณ 20-30 ซม. และกว้างประมาณ 1-3.5 ซม.

ในประเทศไทยกรมส่งเสริมการเกษตรและกรมป่าไม้ ได้จำแนกไผ่ตงออกเป็น 4 พันธุ์ด้วยกันคือ

1) ไผ่ตงดำหรือไผ่ตงจีน เป็นไผ่ตงที่นิยมปลูกกันมากที่สุดในจังหวัดปราจีนบุรี และจังหวัดอื่นๆ เกือบทั่วทุกภาคของประเทศ ทรงพุ่มปานกลาง เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9-12 ซม. หรือมีเส้นรอบวงประมาณ 30-40 ซม. ลำต้นสูงไม่เกิน 10 ม. มีสีเขียวเข้มอมดำจับแล้วไม่สากมือ

2) ไผ่ตงหม้อหรือไผ่ตงใหญ่ ลำต้นมีขนาดใหญ่ที่สุดแต่นิยมปลูกกันน้อย โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 16 ซม. หรือมีเส้นรอบวงประมาณ 52 ซม. ลำต้นตรงสูงตั้งแต่ 10 ม. ขึ้นไป ทรงพุ่มโปร่งบริเวณลำต้นตามข้อจะมีกิ่งแขนงตั้งแต่ระดับ 2 ม. ขึ้นไป และกิ่งแขนงที่เกิดส่วนมากเป็นแขนงเดี่ยว

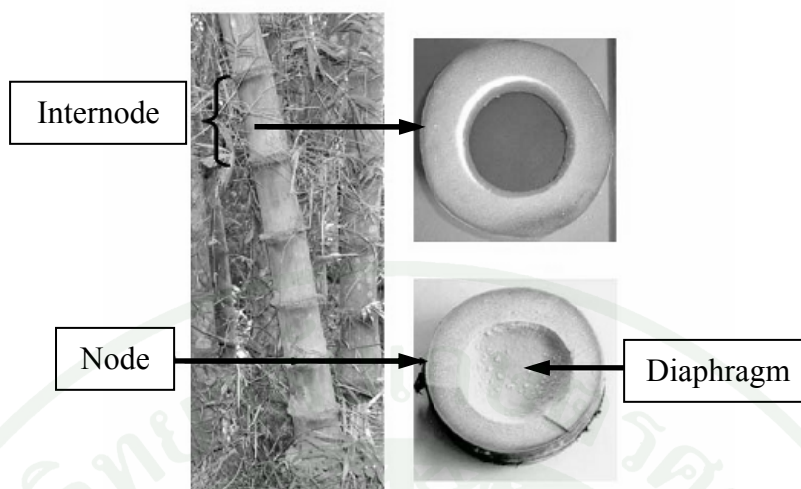
3) ไผ่ตงเขียวเป็นไผ่ขนาดกลางมีลำต้นเล็กสูงน้อยกว่าตงดำ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-12 ซม. เส้นรอบวงประมาณ 15-20 ซม. สีของลำเป็นสีเขียวเข้มจัด

4) ไผ่ตงหนูหรือไผ่ตงเล็กมีขนาดลำต้นเล็กที่สุดในบรรดาไผ่ตงที่ปลูกกัน โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-6 ซม. และเส้นรอบวงประมาณ 12-20 ซม. ลักษณะอื่นๆ เหมือนไผ่ตงดำแต่จะมีทรงพุ่มเตี้ยกว่าและมีขนาดเล็กกว่า

## 2. คุณสมบัติเบื้องต้นของไผ่ตง

### 2.1. คุณสมบัติทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของไม้ไผ่ จะมีลักษณะกลมกลวงเรียวแหลม (Taper) ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางจะลดลงจากโคนลำถึงปลายลำและมีข้อนูนเป็นระยะตลอดความยาวของลำไม้ไผ่ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของไม้ไผ่ตง

ที่มา: Malanit (2009a)

คุณสมบัติทางกายภาพของไม้ที่สำคัญประกอบด้วย ความชื้นสัมพัทธ์ (Moisture Content) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) การหดตัว (Shrinkage) ความทนทาน (Durability) และความหนาแน่น (Density) ฯลฯ โดยทั่วไปไม้ไผ่จะมีความหนาแน่นประมาณ 700-800 กก./ลบ.ม. ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของไม้ไผ่ สภาพพื้นที่และตำแหน่งของปล้องและมีค่า Poisson's Coefficient ทางยาวเท่ากับ 0.3 (Janssen, 2000) แต่สมบัติทางกายภาพที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกลคือ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และความถ่วงจำเพาะ จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของไผ่ตงเท่าที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

Malanit et al. (2008) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของไม้ไผ่ตงจากจังหวัดนครศรีธรรมราช อายุ 3 ปี ทำการทดสอบในสภาพแห้งในอากาศประมาณ 2 เดือน ตามมาตรฐานสากล ASTM D143-94 พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความหนาผนังปล้องของไผ่ตงจะลดลงจากโคนลำ (Bottom) ถึงปลายลำ (Top) และความยาวปล้อง (Internode) จะเพิ่มขึ้นจากโคนลำถึงกลางลำและจะลดลงจากกลางลำถึงปลายลำ ตามภาพที่ 2 และค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของไผ่ตงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 12% มีค่าระหว่าง 0.55-0.90 โดยจะเพิ่มขึ้นจากโคนลำถึงปลายลำ ส่วนค่าการหดตัว (Shrinkage) และการบวมตัว (Swelling) ตามแนวยาวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการหดตัวและการบวมตัวในแนวรัศมีและแนวสัมผัส

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพของไผ่ตง (*Dendrocalamus asper* Backer)

| สมบัติทางกายภาพ                   |            | 1           | 2    | 3         | 4      | 5        |
|-----------------------------------|------------|-------------|------|-----------|--------|----------|
| เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอก, (มม.) |            | 113.2       | 92.5 | -         | -      | -        |
| ความหนาผนังปล้อง, (มม.)           |            | 12.2        | 11.1 | -         | -      | 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, (กก./ลบ.ม.)          |            | -           | 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    | -           | -    | -         | -      | -        |

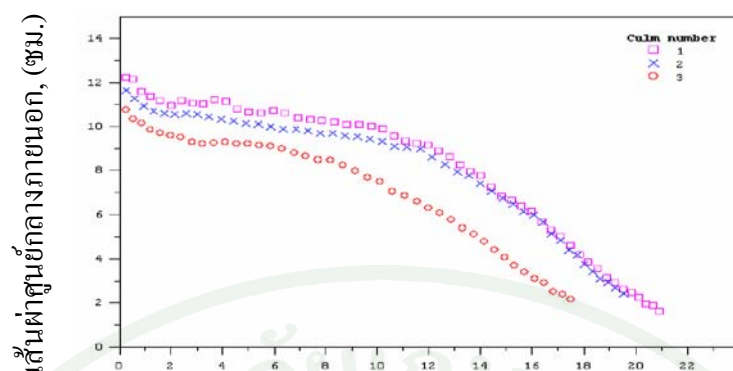
ที่มา: 1. ฐิติกุล (2540)

2. Thaipetch (2004)

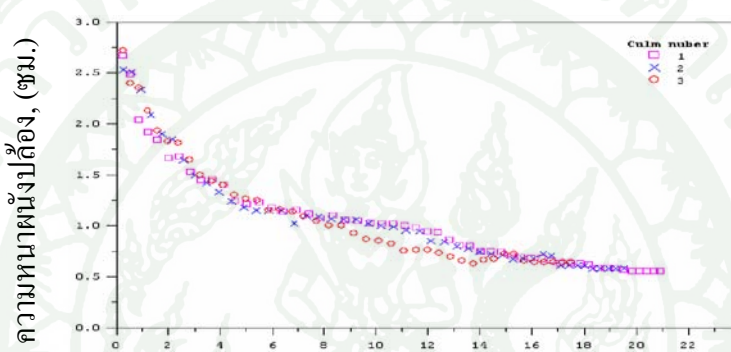
3. Malanit et al. (2008)

4. Malanit (2009b); Cited Dransfield and Widjaja (1995)

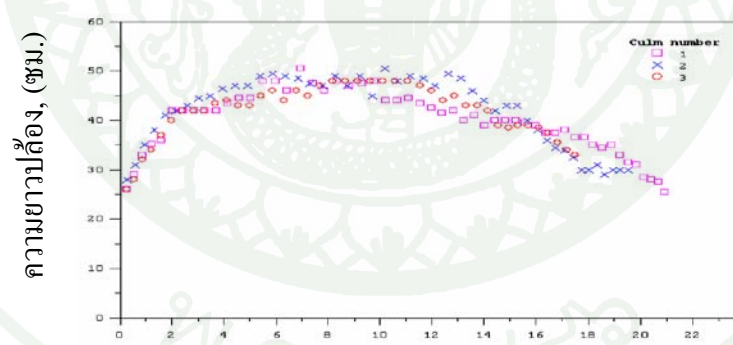
5. Malanit (2009c); Cited Othman and et al. (1995)



(a) ตำแหน่งตามยาว, (ม.)



(b) ตำแหน่งตามยาว, (ม.)



(c) ตำแหน่งตามยาว, (ม.)

ภาพที่ 2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามความยาวของลำไผ่ตรงกับ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก(a), ความหนาผนังปล้อง(b), ความยาวปล้อง(c)

ที่มา: Malanit (2008)

## 2.2. คุณสมบัติทางกลศาสตร์

สมบัติทางกลศาสตร์ของไม้มีความสำคัญต่อการคำนวณและออกแบบโครงสร้างให้มั่นคงแข็งแรงเพียงพอต่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกทุกทั้งหมด โดยคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่สำคัญประกอบด้วย หน่วยแรงดัด (Bending Stress) โมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture) โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) หน่วยแรงอัดขนานเส้น (Compressive Stress Parallel to Grain) หน่วยแรงอัดตั้งฉากกับเส้น (Compressive Stress Perpendicular to Grain) หน่วยแรงดึงขนานเส้น (Tensile Stress Parallel to Grain) หน่วยแรงเฉือนขนานเส้น (Shearing Stress Parallel to Grain) และความแข็ง (Hardness) จากการศึกษาสมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ต่งเท่าที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยสมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ต่ง (*Dendrocalamus asper* Backer)

| สมบัติทางกลศาสตร์                 | 1                | 2          | 3      | 4    | 5      |
|-----------------------------------|------------------|------------|--------|------|--------|
| โมดูลัสของการยืดหยุ่น, (MPa.)     | 12,530 (12,038)* | 59,500     | 15,363 | -    | 63,000 |
| โมดูลัสของการแตกหัก, (MPa.)       | 132 (109)*       | -          | 199    | 92.5 | 85.65  |
| ค่าความเหนียว, (kPa)              | 438 (381)*       | -          | -      | -    | -      |
| หน่วยแรงดัด, (MPa.)               | -                | 84         | -      | -    | -      |
| หน่วยแรงอัดขนานเส้น, (MPa.)       | 67 (54)*         | 68.5       | -      | 27.1 | 31.45  |
| หน่วยแรงอัดตั้งฉากกับเส้น, (MPa.) | -                | -          | 14.4   | -    | -      |
| หน่วยแรงเฉือนขนานเส้น, (MPa.)     | ไม่มีข้อ         | 14 (9)*    | 9.4    | 11.9 | 7.15   |
|                                   | มีข้อ            | -          | 9.8    | -    | -      |
| หน่วยแรงดึงขนานเส้น, (MPa.)       | ไม่มีข้อ         | 274 (250)* | 359    | -    | -      |
|                                   | มีข้อ            | -          | 96     | -    | -      |

ที่มา: 1. จูติกุล (2540)

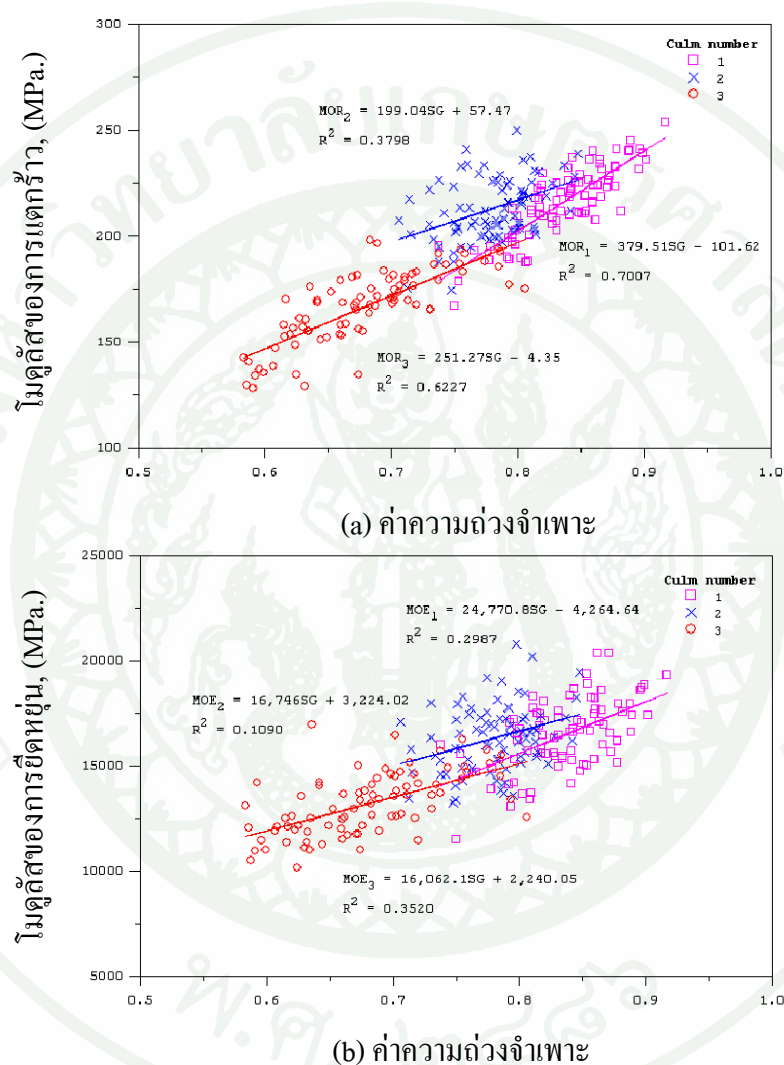
2. Thaipetch (2004)

3. Malanit and et al. (2008)

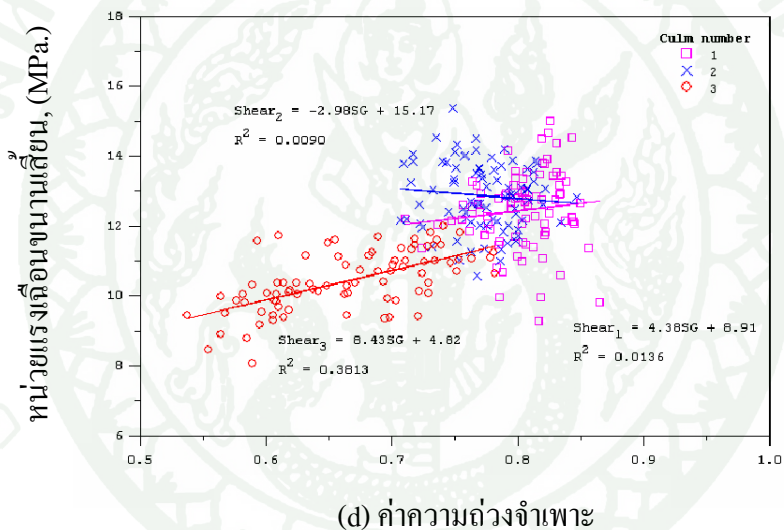
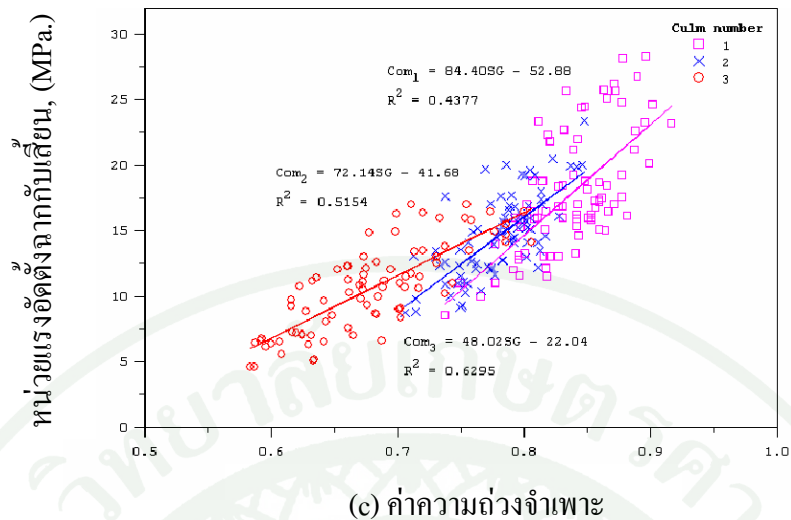
4. Malanit (2009b); Cited Dransfield and Widjaja (1995)

5. Malanit (2009c); Cited Othman and et al. (1995)

จากการศึกษาของ Malanit and et al. (2009d) พบว่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ไผ่ตง ประกอบด้วย โมดูลัสของการแตกร้าว, โมดูลัสของการยืดหยุ่นและหน่วยแรงอัดขนานเปลี่ยนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มสูงขึ้นจากโคนลำถึงปลายลำอย่างมีนัยสำคัญ แต่หน่วยแรงเฉือนขนานเปลี่ยนมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่ขึ้นกับความถ่วงจำเพาะ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 คุณสมบัตินทางกลศาสตร์ของไม้ไผ่ตงเปรียบเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะกับ โมดูลัสของการแตกร้าว(a), โมดูลัสของการยืดหยุ่น(b), หน่วยแรงอัดตั้งฉากกับเส้น(c), หน่วยแรงเฉือนขนานเส้น(d)



ภาพที่ 3 (ต่อ)

ที่มา: Malanit (2009d)

และจากการศึกษาคุณสมบัติการตัดของไม้ไผ่ประกับกาว (อิทธิพงษ์, 2540) โดยใช้ไม้ตงคำจากจังหวัดปราจีนบุรี อายุประมาณ 2-3 ปี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 7-10 ซม. อัดกาวด้วยเครื่องอัดขนาดแรงอัด 15 กก./ตร.ซม. และทำการทดสอบตามมาตรฐาน B.S. 373:1957 พบว่ามีค่าสมบัติทางกลศาสตร์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ไฟประทับกาว, (MPa.)

| สมบัติทางกลศาสตร์                     |                       | ค่า             |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------|
| หน่วยแรงคัดที่จุด P.L.                | ด้านขนานระนาบกาว      | 30.4-58.4       |
|                                       | โมดูลัสของการยืดหยุ่น | 7,972-15,067    |
|                                       | โมดูลัสของการแตกร้าว  | 58.9-135.2      |
| หน่วยแรงคัดที่จุด P.L.                | ด้านตั้งฉากระนาบกาว   | 20.6-55.5       |
|                                       | โมดูลัสของการยืดหยุ่น | 5,472-15,463    |
|                                       | โมดูลัสของการแตกร้าว  | 35.2-118        |
| หน่วยแรงเฉือนตั้งฉากระนาบกาว          |                       | 22-28           |
| หน่วยแรงเฉือนขนานระนาบกาว             |                       | 5.3-9.7         |
| หน่วยแรงเฉือนขนานชั้นทาขาวที่จุด P.L. |                       | 1.6-5.2         |
| หน่วยแรงเฉือนประลักษ์ขนานชั้นทาขาว    |                       | 3.4-10          |
| หน่วยแรงดึงขนานเส้นที่จุด P.L.        |                       | 19.6-45.2       |
| หน่วยแรงดึงขนานเส้นสูงสุด             |                       | 68.3-177.5      |
| โมดูลัสของการยืดหยุ่น                 |                       | 2,899.9-3,922.7 |

ที่มา: อธิพิงษ์ (2540)

### 3. มาตรฐาน ว.ส.ท.

มาตรฐาน ว.ส.ท. ได้แบ่งชนิดของไม้และกำหนดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้เป็น 5 ประเภท คือ ไม้เนื้ออ่อนมาก ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อปานกลาง ไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้อแข็งมาก โดยชื่อและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ทั้ง 5 ประเภท ได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ 18 ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ได้มาจากค่าของผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ตามวิธีการทดสอบไม้ตามมาตรฐานสากล หากด้วยค่าส่วนปลอดภัยในตารางที่ 4 จะได้ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ที่ภาวรับน้ำหนักบรรทุกปกติและมีการใช้งานที่สภาวะแห้งตลอดเวลาดังตารางที่ 5

#### ตารางที่ 4 ส่วนปลอดภัยของไม้

| ชนิดหน่วยแรงที่ยอมให้          | ส่วนปลอดภัย สำหรับไม้ก่อสร้างชั้น 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              |

หมายเหตุ ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ทุกชนิดของไม้ก่อสร้างชั้น 1 ชั้น 3 และไม้ด้อยคุณภาพให้คุณด้วย 1.17, 0.83, 0.75 ตามลำดับ กับค่าที่ได้จากไม้ก่อสร้างชั้น 2

ที่มา: ตระกูล (2526)

#### ตารางที่ 5 หน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้

| ประเภทของไม้    | หน่วยแรงดัดหรือแรงดึงขนานเสี้ยน<br>(กก./ตร.ซม.) | โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่นโดยประมาณ<br>(กก./ตร.ซม.) | หน่วยแรงอัด                |                               | หน่วยแรงเฉือนขนานเสี้ยน<br>(กก./ตร.ซม.) |
|-----------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
|                 |                                                 |                                                  | ขนานเสี้ยน<br>(กก./ตร.ซม.) | ตั้งฉากเสี้ยน<br>(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                                      |

ที่มา: ตระกูล (2526)

#### 4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fan and Fan (n.d.) ทำการศึกษาวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลของไม้ไผ่ พบว่ากำลังรับแรงดัดของไม้ไผ่จะค่อยๆ ลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น แต่สำหรับชิ้นตัวอย่างที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 20% ค่ากำลังรับแรงดัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการทดสอบกำลังรับแรงดัดจะใช้ชิ้นทดสอบขนาดเท่ากับ ความหนา ( $\delta$ )x1.5x20 ซม. ทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (Four-Point Load) เนื่องจากในช่วงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 5-20% กำลังรับแรงดัดยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 20-30% ทั้งกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดต่างมีค่าลดลง จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น

มนตรีและศักดิ์พิชิต (2528) ได้ศึกษาถึงความแข็งแรงดัดโดยทดสอบความแข็งแรงบริเวณข้อและปล้องของลำไม้ไผ่ป่าและไผ่ชางนวล อายุ 3-4 ปี พบว่าค่าความแข็งแรงในการดัดของลำไม้ไผ่ทั้งสองชนิดบริเวณปล้องอยู่ในระดับเดียวกับไม้เนื้ออ่อน (ต่ำกว่า 600 กก./ตร.ซม.) แต่ความแข็งแรงในการดัดบริเวณข้ออยู่ในระดับเดียวกับไม้เนื้อแข็งปานกลาง (ระหว่าง 600-1,000 กก./ตร.ซม.) ทำให้ทราบว่าข้อของไม้ไผ่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดัดของลำไม้ไผ่ ไม้ไผ่ทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นสูงเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ทั่วไปที่มีความแข็งแรงดัดในระดับเดียวกัน โดยไม้ไผ่ทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์ของการยืดหยุ่นสูงกว่า 2-3 เท่า

Vaessen and Janssen (1997) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความยาววิกฤตสำหรับไม้ไผ่ที่จะวิบัติโดยหน่วยแรงดัดเพียงอย่างเดียว โดยทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแบบแรงกระทำ 4 จุด (Four-Point Load) พบว่าชิ้นตัวอย่างที่เป็นคานสั้นจะวิบัติโดยหน่วยแรงเฉือน และสำหรับคานช่วงยาวจะวิบัติโดยหน่วยแรงดัด สำหรับความยาววิกฤตสามารถคำนวณโดยให้แรงสูงสุดที่วิบัติด้วยหน่วยแรงดัด ( $F_{\max,b}$ ) เท่ากับแรงสูงสุดที่วิบัติด้วยหน่วยแรงเฉือน ( $F_{\max,s}$ ) จะได้ดังสมการ

$$l_c = \frac{R\epsilon_{\max}E_R}{\tau_{\max}} \left[ \frac{14x^3 - 60x^2 + 100x - 80}{20(x-2)} \right] \quad (1)$$

เมื่อ  $l_c$  = ความยาววิกฤต, มม.

$R$  = รัศมีภายนอก, มม.

$\epsilon_{\max}$  = ความเครียดตามยาวสูงสุด

$E_R$  = โมดูลัสของการยืดหยุ่นผิวนอก, นิวตัน/ตร.มม.

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

X = อัตราส่วนความหนา (t) ต่อรัศมีภายนอก (R)

Janssen (2000) พบว่าความยาววิกฤตมีค่าเท่ากับ 26 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (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 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (30D)

Chung and Yu (2002) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของไม้ไผ่ 2 ชนิด ได้แก่ Kao Jue (*Bambusa pervariabilis*) และ Mao Jue (*Phyllostachys pubescens*) ที่มีอายุอย่างน้อย 3 ปี มีการทดสอบแรงดัดกระทำที่กึ่งกลางคานขนาดความยาว 1,200 มม. พบว่าลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะ คือ การวิบัติที่มีการหักหรือแตกเฉพาะบริเวณที่มีแรงกระทำ (Local Crushing) มักเกิดการวิบัติลักษณะนี้ในชิ้นส่วนที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง และการวิบัติที่มีรอยแตกฉีกออกตามยาวตลอดความยาวคาน (Splitting) มักเกิดในชิ้นส่วนที่มีความชื้นสัมพัทธ์น้อยๆ ดังภาพที่ 4



Local Crushing (1)



Splitting (2)

ภาพที่ 4 การวิบัติแบบ Local Crushing (1), Splitting (2)

ที่มา: Chung and Yu (2002)

Li (2004) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ไผ่อายุ 1 ปี 3 ปี และ 5 ปี ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1037-94 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ไผ่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อไม้ไผ่มีอายุมากขึ้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากผิวในไปผิวนอกและจากล่างขึ้นบนตามความยาวของลำไม้ไผ่ สำหรับโมดูลัสของการแตกหักและโมดูลัสของการยืดหยุ่นของไม้ไผ่ในการรับแรงคดพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของไม้ไผ่และตำแหน่งตามความยาวจากล่างขึ้นบนดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความถ่วงจำเพาะและคุณสมบัติในการรับแรงคดของไม้ไผ่ตามตำแหน่งและอายุ

| อายุ | ตำแหน่ง | ความถ่วงจำเพาะ | โมดูลัสของการแตกหัก<br>(MPa.) | โมดูลัสของการยืดหยุ่น<br>(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                          |

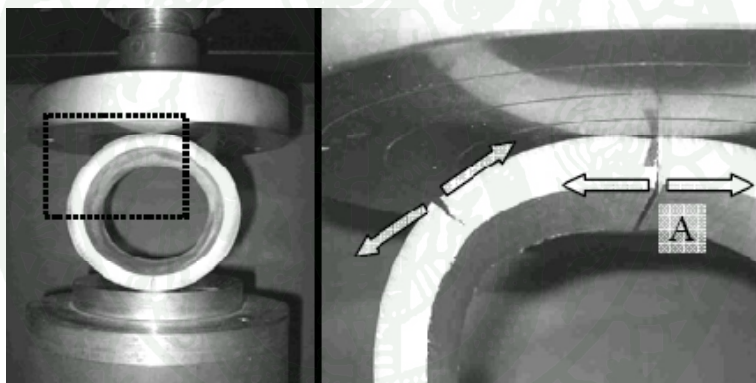
ที่มา: Li (2004)

Torres and et al. (2007) ได้ทำการศึกษาหาค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นตามแนวสัมผัส (Circumferential Young's Modulus,  $E_p$ ) โดยแรงกดกระทำขวางดังภาพที่ 5 ของไม้ไผ่ 2 ชนิด คือ *Guadua angustifolia* และ *Phyllostachys pubescens* เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยหลักการและกรรมวิธีขึ้นประกอบอันตะ (Finite Element Method, FEM) ดังภาพที่ 6 โดยค่าที่ได้จากการทดลองสามารถประมาณค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นตามแนวสัมผัส ได้ดังสมการ

$$E_{\phi} = \left[ \frac{\pi R}{4A} + \frac{R^3}{I} \left[ \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right] \right] S \quad (2)$$

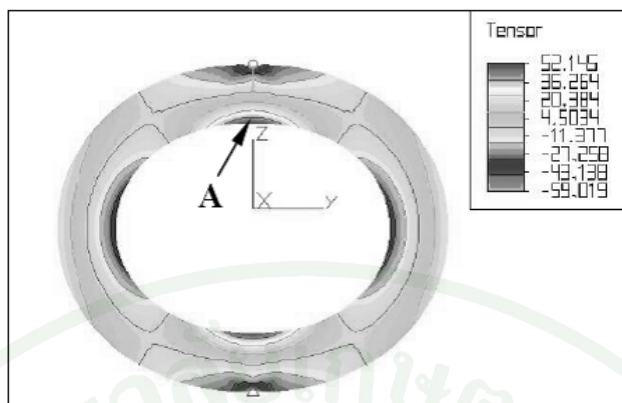
- เมื่อ  $E_{\phi}$  = โมดูลัสของการยืดหยุ่นตามแนวสัมผัส, นิวตัน/ตร.มม.  
 $R$  = รัศมีภายนอก, มม.  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัด, ตร.มม.  
 $I$  = โมเมนต์อินเนอร์เชีย, มม.<sup>4</sup>  
 $S$  = ความชันจากกราฟระหว่างแรงกับการโก่งตัว, นิวตัน/มม.

จากการทดลองพบว่าค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นตามแนวสัมผัสของ *Guadua angustifolia* และ *Phyllostachys pubescens* เปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นตามแนวแกน (Longitudinal Young's Modulus,  $E_z$ ) มีค่าเท่ากับ  $0.035E_z$  และ  $0.122E_z$  ตามลำดับ



ภาพที่ 5 การทดสอบแรงกดกระทำขวางและลักษณะการวิบัติ

ที่มา: Torres et al. (2007)



ภาพที่ 6 แบบจำลอง FEM และการกระจายหน่วยแรงจากแรงกระทำขวาง

ที่มา: Torres et al. (2007)

Kamruzzaman and et al. (2008) ศึกษาผลกระทบของอายุและตำแหน่งตามความยาวต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของไม้ไผ่ 4 ชนิดประกอบด้วย *Bambusa balcooa*, *B. tulda*, *B. salarkhanii* และ *Melocanna baccifera* โดยทำการทดลอง 20 ตัวอย่างในสภาพสด (Green Condition) ที่กลุ่มอายุ 2, 3 และ 4 ปี จากผลการทดลองพบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงเมื่อไม้ไผ่มีอายุมากขึ้น และตำแหน่งที่สูงขึ้นไปในทุกประเภทโดยมีนัยสำคัญ โดยไม้ไผ่ทั้ง 4 ชนิดมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 595-870 กก./ลบ.ม. และค่าโมดูลัสของการแตกหักของไม้ไผ่ทั้ง 4 ชนิดมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับอายุและตำแหน่ง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1,400-2,400 กก./ตร.ซม.

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine
2. เครื่องทดสอบ Versa Tester
3. Vernier Caliper ที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.05 มม.
4. เครื่องวัดการโก่งตัว (Dial Gauge)
5. เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียด 0.1 กรัม
6. ตลับเมตร
7. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ
8. อุปกรณ์การทดสอบตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1)
9. เครื่องเลื่อยตัด

### วิธีการ

เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงเหวี่ยงอย่างละ 36 ชิ้น ตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) และตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัด โดยมีความยาว 2.50 ม. จำนวน 6 คาน 3.00 ม. และ 3.60 ม. อย่างละ 3 คาน รวมเป็นจำนวน 12 คาน และทำการเปรียบเทียบลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นกับค่าความยาววิกฤตของคานตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำการทดสอบตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) ประกอบด้วยการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ค่าความหนาแน่น และลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น การทดสอบคุณสมบัติทางกล คือ การทดสอบแรงดึงขนานเส้น การทดสอบแรงอัดขนานเส้น การทดสอบแรงเหวี่ยงขนานเส้นและการทดสอบแรงดัด

### 1.1 การทดสอบปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (Moisture Content)

เตรียมตัวอย่างขนาด 25 มม. x 25 มม. ความหนาเท่ากับความหนาของชั้นทดสอบ หลังจากทดสอบแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ  $103 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการอบ และวัดขนาดชั้นทดสอบด้วย Vernier Caliper ก่อนการอบแห้งเพื่อคำนวณหาปริมาตรต่อไป

การคำนวณ

$$MC = \left( \frac{m - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ  $MC$  = ความชื้นสัมพัทธ์, %  
 $m$  = มวลก่อนการอบแห้ง, กรัม  
 $m_0$  = มวลหลังการอบแห้ง, กรัม

### 1.2 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

นำชั้นตัวอย่างที่ทำการอบแห้งแล้วไปชั่งน้ำหนัก แล้วเทียบกับปริมาตรก่อนการอบแห้งโดยวัดความละเอียดของขนาดชั้นตัวอย่างที่ 0.1 มม.

การคำนวณ

$$\rho_0 = \left( \frac{m_0}{V} \right) \times 10^6 \quad (4)$$

เมื่อ  $\rho_0$  = ความหนาแน่น, กก./ลบ.ม.  
 $m_0$  = มวลหลังการอบแห้ง, กรัม  
 $V$  = ปริมาตรของชั้นทดสอบก่อนการอบแห้ง, ลบ.มม.

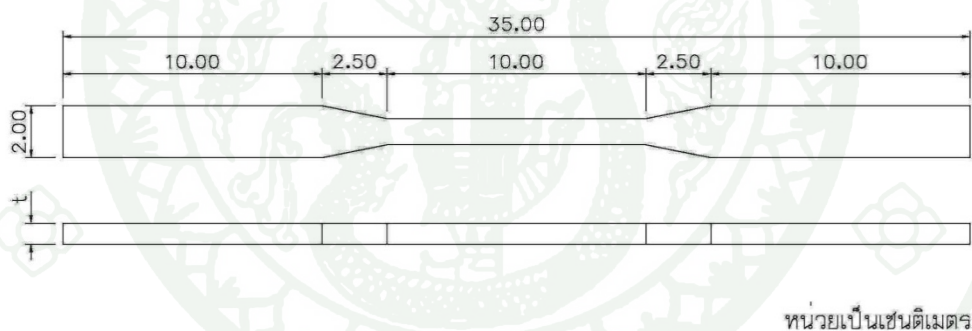
### 1.3 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบโดยมีขนาด ดังภาพที่ 7 จำนวน 36 ชิ้น แบ่งเป็นส่วนบน (Top Part) ส่วนกลาง (Middle Part) และส่วนล่าง (Bottom Part) อย่างละ 12 ชิ้น ทดสอบตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) ตามภาพที่ 8 เพื่อหาค่าความเค้นดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Stress)

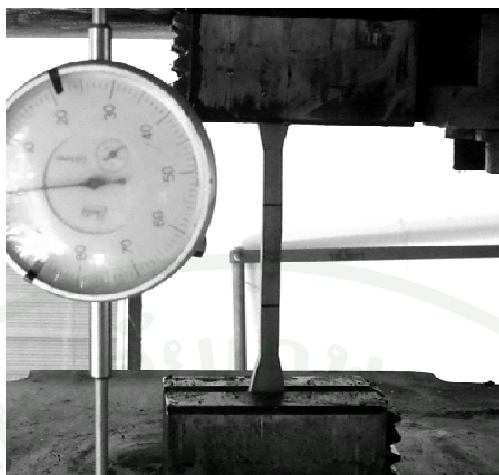
การคำนวณ

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A} \quad (5)$$

เมื่อ  $\sigma_{ult}$  = ความเค้นดึงสูงสุด, กก./ตร.ซม.  
 $F_{ult}$  = แรงดึงสูงสุด, กก.  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดส่วนมาตรวัด, ตร.ซม.



ภาพที่ 7 ขนาดและมิติต่างๆ ของตัวอย่างการทดสอบแรงดึง



ภาพที่ 8 การทดสอบกำลังรับแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 22157-1

#### 1.4 การทดสอบแรงอัด (Compression Test)

เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบโดยมีขนาดความสูงเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) โดยประมาณจำนวน 36 ชิ้น แบ่งเป็นส่วนบน (Top Part) ส่วนกลาง (Middle Part) และส่วนล่าง (Bottom Part) อย่างละ 12 ชิ้น ทดสอบตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) ตามภาพที่ 9 เพื่อหาค่าความเค้นอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Stress) โดยอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงอัดขนานเปลี่ยนตามมาตรฐานสากล แสดงไว้ในภาพผนวกที่ 1 ใช้ร่องไว้ด้านบนและด้านล่างทาผิวหน้าด้วยจารบีเพื่อลดแรงเสียดทานที่ผิว

การคำนวณ

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A} \quad (6)$$

เมื่อ  $\sigma_{ult}$  = ความเค้นอัดสูงสุด, กก./ตร.ซม.

$F_{ult}$  = แรงอัดสูงสุด, กก.

$A$  = พื้นที่หน้าตัด, ตร.ซม.



ภาพที่ 9 การทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ISO 22157-1

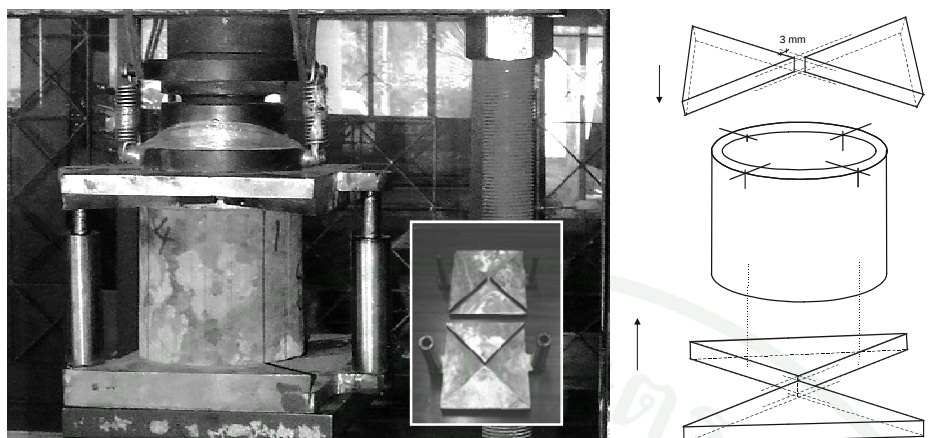
### 1.5 การทดสอบแรงเฉือน (Shear Test)

เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบโดยมีขนาดความสูงเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) โดยประมาณจำนวน 36 ชิ้น แบ่งเป็นส่วนบน (Top Part) ส่วนกลาง (Middle Part) และส่วนล่าง (Bottom Part) อย่างละ 12 ชิ้น ตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) ตามภาพที่ 10 เพื่อหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Ultimate Shear Stress) โดยอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนขนานเลื่อนตามมาตรฐานสากล แสดงไว้ในภาพผนวกที่ 2

การคำนวณ

$$\tau_{ult} = \frac{F_{ult}}{\sum(t \times L)} \quad (7)$$

เมื่อ  $\tau_{ult}$  = ความเค้นเฉือนสูงสุด, กก./ตร.ซม.  
 $F_{ult}$  = แรงเฉือนสูงสุด, กก.  
 $t$  = ความหนาของชิ้นทดสอบแต่ละระนาบ, ซม.  
 $L$  = ความสูงชิ้นทดสอบแต่ละระนาบ, ซม.



ภาพที่ 10 การทดสอบกำลังรับแรงเหวี่ยงตามมาตรฐาน ISO 22157-1

#### 1.6 การทดสอบแรงดัด (Bending Test หรือ Flexural Test)

เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบโดยมีความยาว 2.50 ม. จำนวน 6 คาน 3.00 ม. และ 3.60 ม. อย่างละ 3 คาน รวมเป็นจำนวน 12 คาน ทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (Four-Point Load) ดังภาพที่ 11 โดยให้แรงกระทำต่อเนื่องด้วยอัตราคงที่ พร้อมกับวัดค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด (Ultimate Bending Stress) และโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) พร้อมกับบันทึกลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น โดยอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงดัดตามมาตรฐานสากล แสดงไว้ในภาพผนวกที่ 3

การคำนวณ

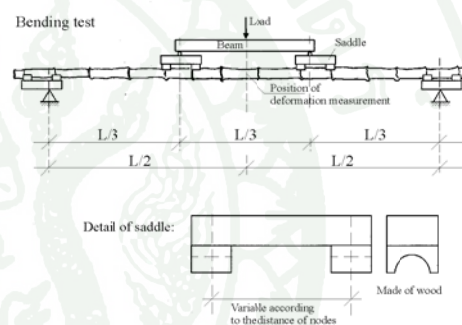
$$\sigma_{ult} = \frac{PLD}{12I_B} \quad (8)$$

- เมื่อ
- $\sigma_{ult}$  = ความเค้นดัดสูงสุด, กก./ตร.ซม.
  - $P$  = แรงดัดสูงสุด, กก.
  - $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอก, ซม.
  - $I_B$  = โมเมนต์อินเนอร์เทีย, ซม.<sup>4</sup>
  - $L$  = ความยาวคาน, ซม.

การคำนวณโมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

$$E = \frac{23FL^3}{1,296\delta I_B} \quad (9)$$

เมื่อ  $E$  = โมดูลัสของการยืดหยุ่น, MPa.  
 $F$  = แรงคัตสูงสุดที่วัดได้, นิวตัน  
 $L$  = ความยาวคาน, มม.  
 $\delta$  = ค่าการโก่งตัวที่กลางคาน, มม.  
 $I_B$  = โมเมนต์อินเนอร์เชีย, มม.<sup>4</sup>



ภาพที่ 11 การทดสอบกำลังรับแรงคัตตามมาตรฐาน ISO 22157-1

2. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี เพื่อวิเคราะห์และตรวจสอบช่วงความยาวสำหรับประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1)

การคำนวณความเค้นเฉือนสูงสุด ของวัสดุวงกลมกลวง (Maximum Shear Stress)

$$\tau_{\max} = \frac{2V}{A} \quad (10)$$

เมื่อ  $\tau_{\max}$  = ความเค้นเฉือนสูงสุด, กก./ตร.ซม.  
 $V$  = แรงเฉือนสูงสุด, กก.  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัด, ตร.ซม.

การคำนวณกำลังรับแรงดัดสูงสุด (Maximum Bending Stress)

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc}{I} \quad (11)$$

เมื่อ  $\sigma_{\max}$  = ความเค้นดัดสูงสุด, กก./ตร.ซม.  
 $M$  = โมเมนต์สูงสุด, กก.-ซม.  
 $C$  = ระยะเยื้องจากจุดศูนย์กลาง, ซม.  
 $I$  = โมเมนต์อินเนอร์เทีย, ซม.<sup>4</sup>

3. ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยหลักการและกรรมวิธีขึ้นประกอบอันตะ (Finite Element Method, FEM) เพื่อตรวจสอบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี เพื่อศึกษาพฤติกรรม โดยใช้โปรแกรม MSC.Nastran V4.5 ในการวิเคราะห์

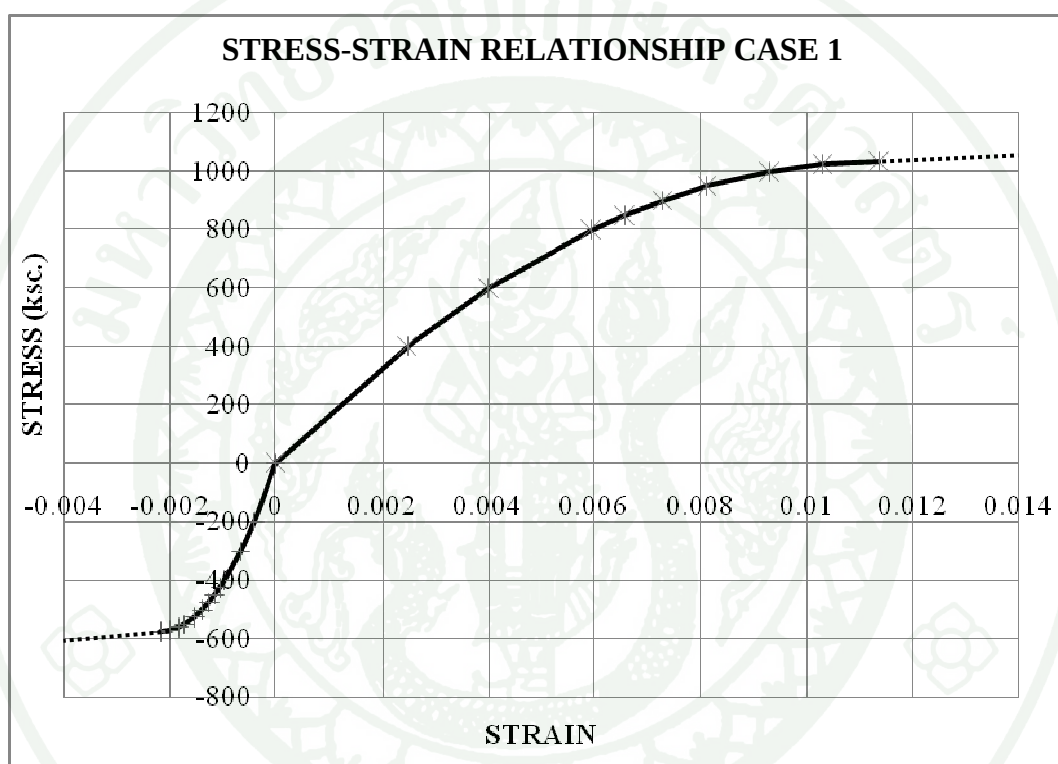
### 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียด

ทำการทดสอบแรงอัดขนานเสี้ยนและแรงดึงขนานเสี้ยนของชิ้นตัวอย่างจำนวน 12 ชิ้น แบ่งเป็นการทดสอบแรงอัดขนานเสี้ยนกรณีมีข้อและไม่มีข้ออย่างละ 3 ชิ้น และการทดสอบแรงดึงขนานเสี้ยนกรณีมีข้อและกรณีไม่มีข้ออย่างละ 3 ชิ้น ดังภาพผนวกที่ 4 ถึงภาพผนวกที่ 6 โดยขนาดของชิ้นทดสอบแรงอัดและชิ้นทดสอบแรงดึง มีขนาดดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด เพื่อใช้เป็นข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุในการวิเคราะห์ต่อไป

จากการทดสอบจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของการทดสอบแรงอัดและการทดสอบแรงดึงอย่างละ 6 ข้อมูล นำมาทำการพล็อตกระจาย (Scatter Plot) และทำการปรับค่าข้อมูลด้วยการถดถอยแบบพหุนามเหมาะสม (Polynomial Regression Model Fitting) ดักร 2 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด สำหรับวิเคราะห์แบบ จำลอง FEM จำนวน 2 สมการ คือสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดึงขนานเสี้ยนและ สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงอัดขนานเสี้ยน โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่ได้นี้จะอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) ไปถึงจุดที่วัสดุเกิดการเสียรูปเท่านั้น ไม่สามารถอธิบายช่วงอัตราการลดลงของความเค้น-ความเครียดของวัสดุหลังการเสียรูปได้ (Softening) การศึกษานี้จึง

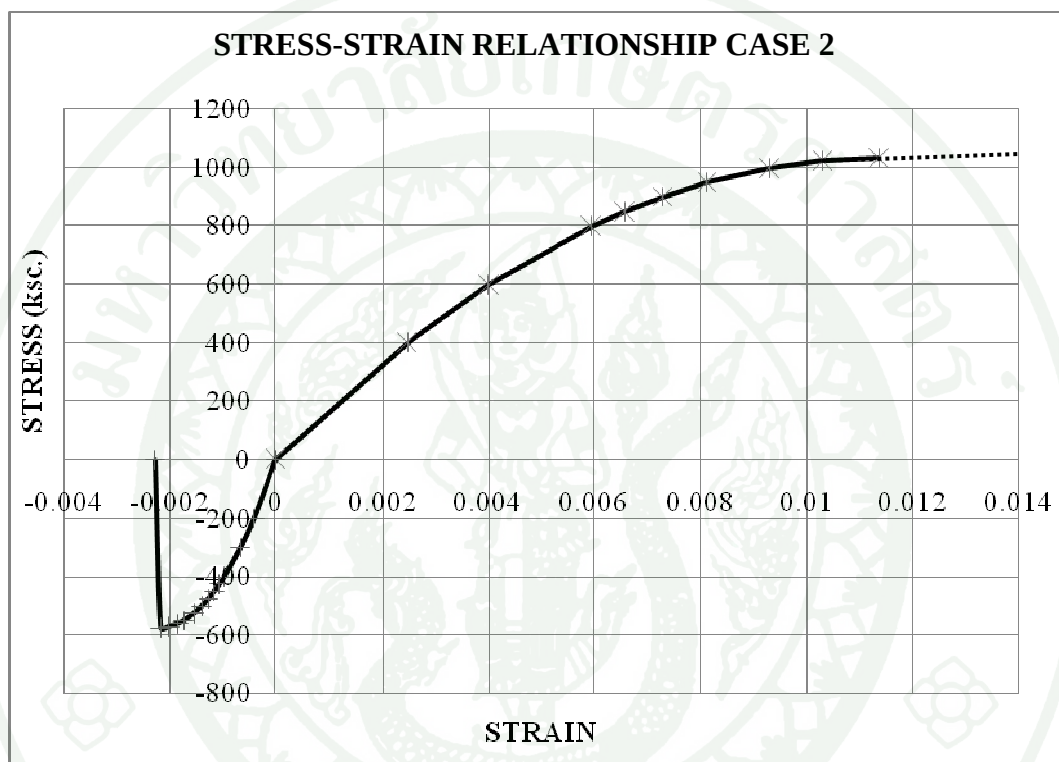
ตั้งสมมติฐานสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง FEM เป็น 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเป็นแบบปลายเปิดโดยค่าความชันไม่เท่ากับศูนย์ ( $E \neq 0$ ) ทั้งสองข้าง นั่นคือ ทั้งหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดที่มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ยังคงสามารถรับแรงกระทำต่อไปได้ ดังภาพที่ 12



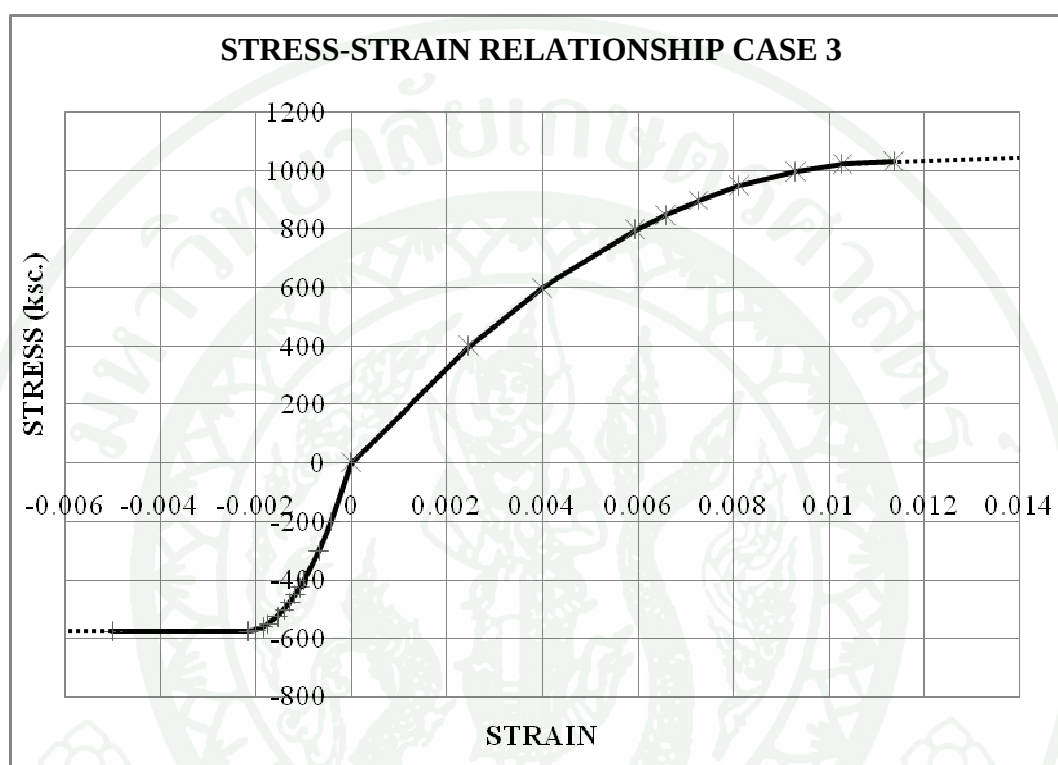
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด กรณีที่ 1

กรณีที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเป็นแบบปลายเปิดโดยค่าความชันไม่เท่ากับศูนย์ ( $E \neq 0$ ) ที่หน่วยแรงดึงและเป็นแบบปลายปิดที่หน่วยแรงอัด นั่นคือที่หน่วยแรงดึงที่มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ยังคงสามารถรับแรงกระทำต่อไปได้ ส่วนหน่วยแรงอัดกำหนดให้มีขีดจำกัดเนื่องจากการเสียรูปให้ไม่สามารถรับแรงกระทำใดๆ ได้อีกต่อไปเมื่อหน่วยแรงอัดมีค่ามากกว่าที่กำหนด ดังภาพที่ 13



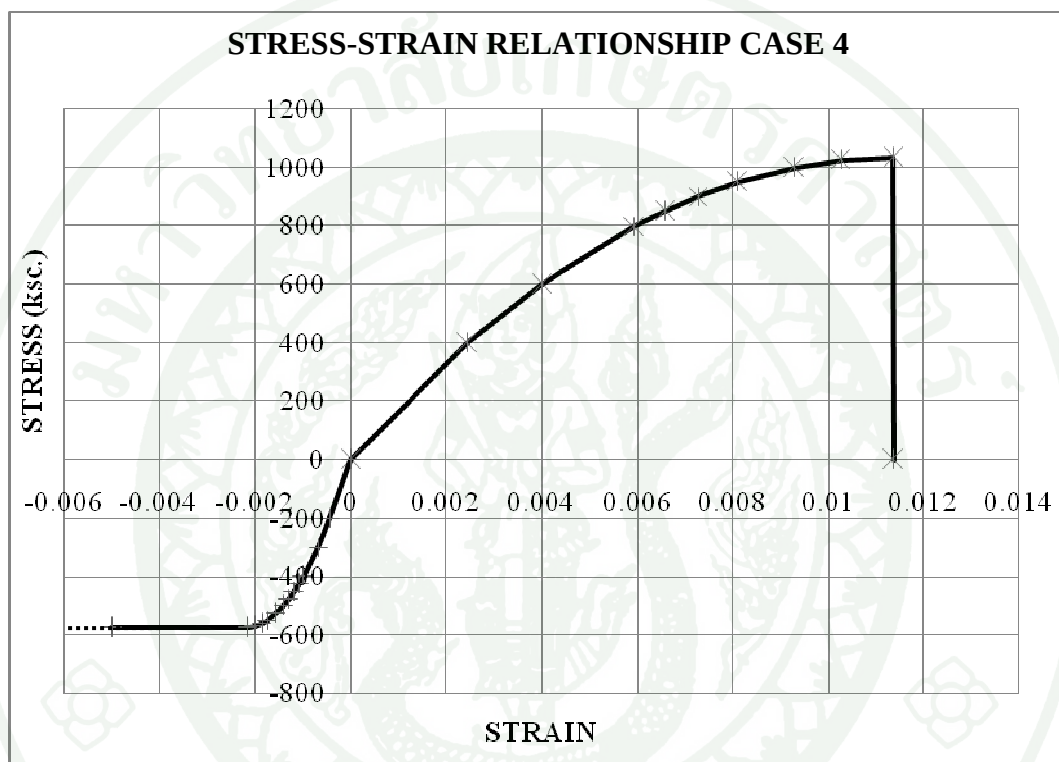
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด กรณีที่ 2

กรณีที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเป็นแบบปลายเปิดโดยค่าความชันไม่เท่ากับศูนย์ ( $E \neq 0$ ) ที่หน่วยแรงดึงและเป็นแบบปลายเปิดโดยค่าความชันเท่ากับศูนย์ ( $E = 0$ ) ที่หน่วยแรงอัด นั่นคือ ที่หน่วยแรงดึงที่มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ยังคงสามารถรับแรงกระทำต่อไปได้ ส่วนหน่วยแรงอัดกำหนดให้มีขีดจำกัดเนื่องจากการเสียรูปให้มีค่าคงที่ ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด กรณีที่ 3

กรณีที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดเป็นแบบปลายปิด ที่หน่วยแรงดึงและเป็นแบบปลายเปิดโดยค่าความชันเท่ากับศูนย์ ( $E = 0$ ) ที่หน่วยแรงอัด นั่นคือ ที่หน่วยแรงดึงกำหนดให้มีขีดจำกัดเนื่องจากการเสียรูปให้ไม่สามารถรับแรงกระทำใดๆ ได้อีกต่อไปเมื่อหน่วยแรงดึงมีค่ามากกว่าที่กำหนด ส่วนหน่วยแรงอัดกำหนดให้มีขีดจำกัดเนื่องจากการเสียรูปให้มีค่าคงที่ ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด กรณีที่ 4

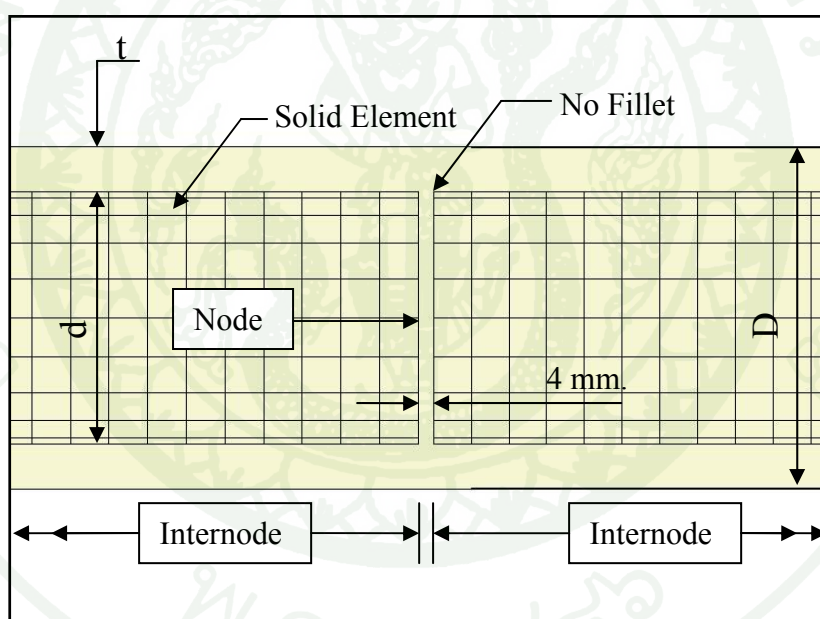
### 3.2 สมมติฐานสำหรับการสร้างแบบจำลอง FEM

3.2.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของลำไม้ไผ่มีขนาดคงที่ตลอดความยาวคาน โดยใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบแรงดัดของแต่ละคาน

3.2.2 ผนังปล้องของลำไม้ไผ่กำหนดให้มีลักษณะแบนราบไม่โค้งนูน โดยกำหนดให้มีความหนาเท่ากับ 4 มม. ดังภาพที่ 16

3.2.3 หน้าตัดก่อนและหลังการดัดยังคงเดิม (Plane remains Plane)

3.2.4 ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นมีค่าเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดและตลอดความยาวคาน



ภาพที่ 16 ขนาดและการสร้างแบบจำลอง FEM บริเวณผนังปล้อง

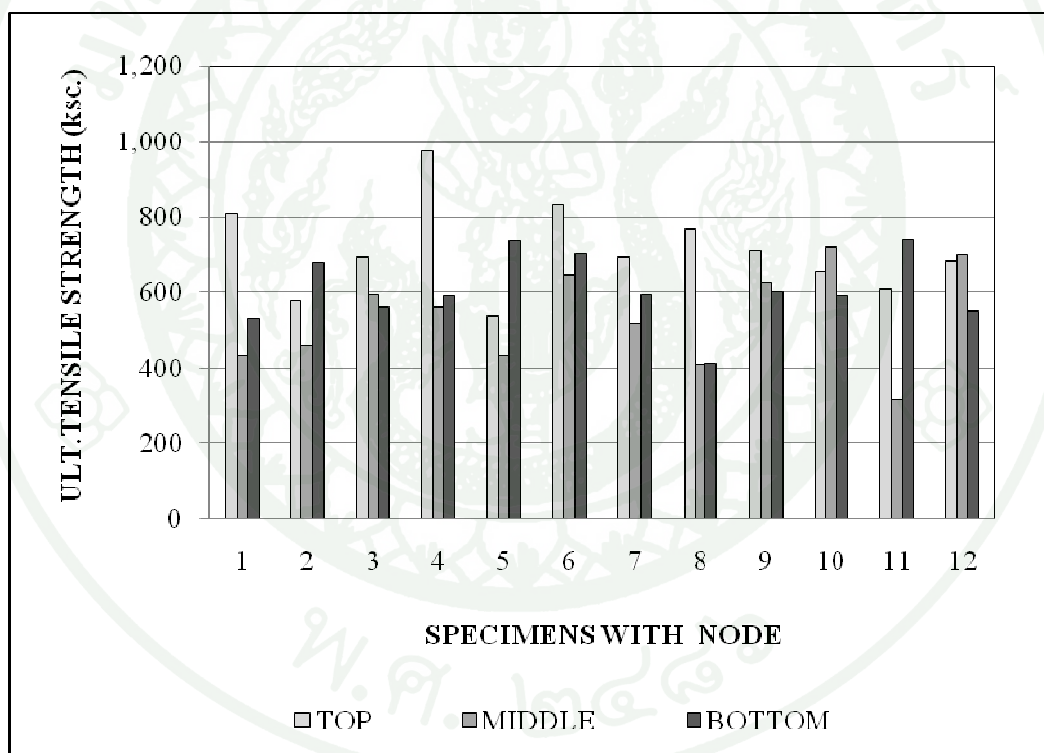
4. สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบกับค่าทางทฤษฎี

5. รวบรวมข้อมูลและสรุปผลงานวิจัย

## ผลและวิจารณ์

### 1. ผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้น

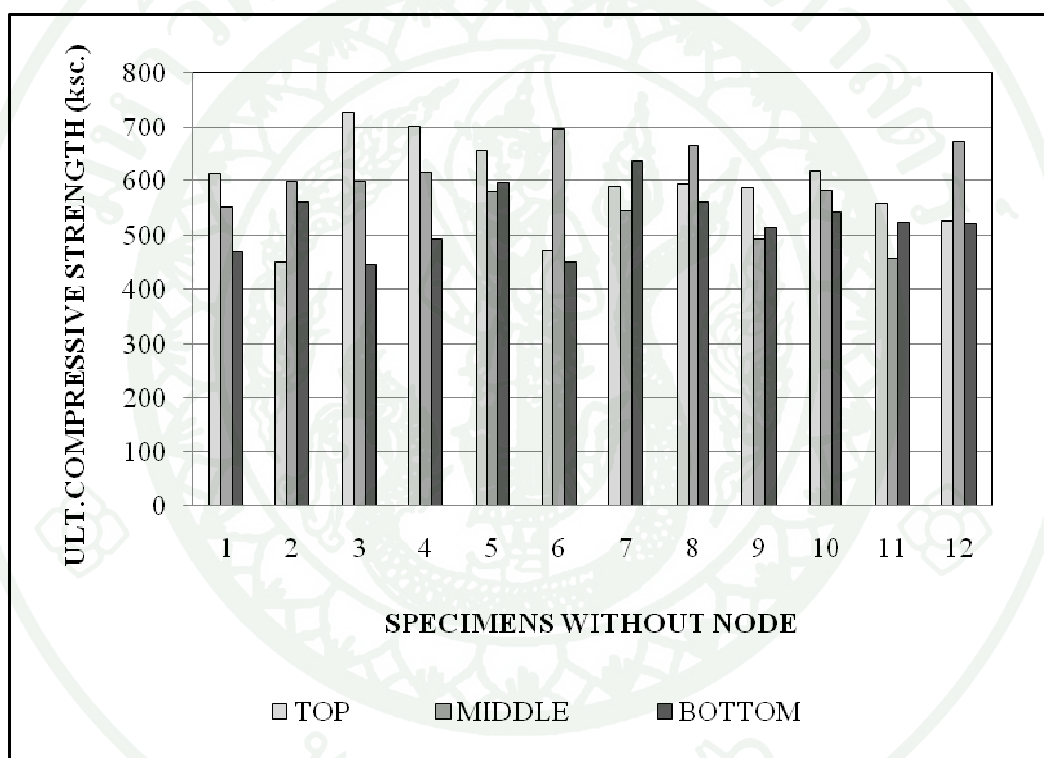
จากการทดสอบแรงดึงขนานเส้นของไม้ไผ่ตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) จำนวนทั้งหมด 36 ตัวอย่าง แบ่งขึ้นตัวอย่างเป็น ช่วงบน กลาง และล่างของลำไม้ไผ่อย่างละ 12 ตัวอย่าง พบว่าหน่วยแรงดึงขนานเส้นมีค่าอยู่ระหว่าง 316-976 กก./ตร.ซม. ดังภาพที่ 17 และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 618 กก./ตร.ซม. โดยลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นแสดงดังตัวอย่างในภาพผนวกที่ 7 รายละเอียดผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้นของไม้ไผ่สามารถดูได้จากตารางผนวกที่ 1 ถึงตารางผนวกที่ 3 และการคำนวณทางสถิติแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 11



ภาพที่ 17 ผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้น (MC =6.1-15.9 %,  $\rho$  = 534-915 กก./ลบ.ม.)

## 2. ผลการทดสอบแรงอัดขนานเส้น

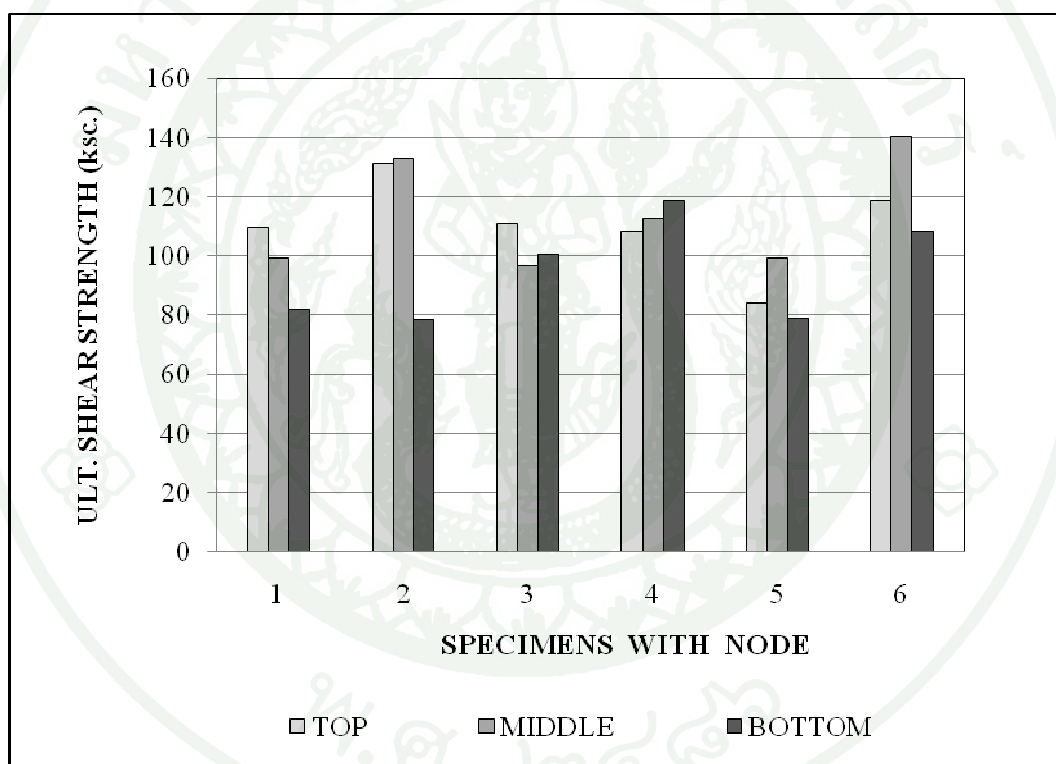
จากการทดสอบแรงอัดขนานเส้นของไม้ไผ่ดงตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) จำนวนทั้งหมด 36 ตัวอย่าง แบ่งขึ้นตัวอย่างเป็น ช่วงบน กลาง และล่างของลำไม้ไผ่อย่างละ 12 ตัวอย่าง พบว่าหน่วยแรงอัดขนานเส้นมีค่าอยู่ระหว่าง 444-728 กก./ตร.ซม. ดังภาพที่ 18 และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 568 กก./ตร.ซม. โดยลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นแสดงดังตัวอย่างในภาพผนวกที่ 8 รายละเอียดผลการทดสอบแรงอัดขนานเส้นของไม้ไผ่ดงสามารถดูได้จากตารางผนวกที่ 4 ถึงตารางผนวกที่ 6 และการคำนวณทางสถิติแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 12



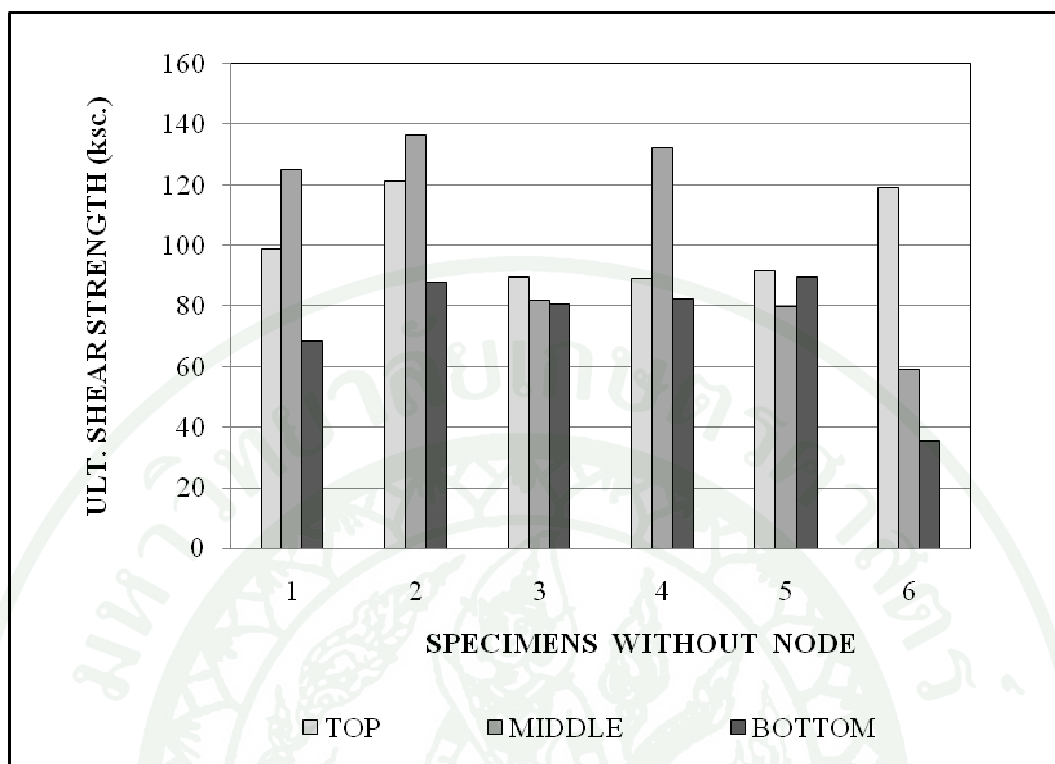
ภาพที่ 18 ผลการทดสอบแรงอัดขนานเส้น (MC = 6.3-28.2 %,  $\rho = 618-1,016$  กก./ลบ.ม.)

### 3. ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเสี้ยน

จากการทดสอบแรงเฉือนขนานเสี้ยนของไม้ไผ่ตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) จำนวนทั้งหมด 36 ตัวอย่าง แบ่งขึ้นตัวอย่างเป็น ช่วงบน กลาง และล่างของลำไม้ไผ่อย่างละ 12 ตัวอย่าง พบว่าหน่วยแรงเฉือนขนานเสี้ยนกรณีมีข้อและไม่มีข้อมีค่าระหว่าง 79-140 กก./ตร.ซม. และ 36-136 กก./ตร.ซม. ดังภาพที่ 19 และ ภาพที่ 20 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 106 กก./ตร.ซม. และ 93 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ โดยลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นแสดงดังตัวอย่างในภาพผนวกที่ 9 และภาพผนวกที่ 10 รายละเอียดผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเสี้ยนของไม้ไผ่สามารถดูได้จากตารางผนวกที่ 7 ถึง ตารางผนวกที่ 9 และการคำนวณทางสถิติแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 13 และตารางผนวกที่ 14



ภาพที่ 19 ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเสี้ยนกรณีมีข้อ (MC = 10.6-15.7 %,  $p = 634-928$  กก./ลบ.ม.)



ภาพที่ 20 ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นกรณีนไม่มีข้อ (MC = 8.5-19.5 %,  $\rho$  = 615-918 กก./ลบ.ม.)

#### 4. ผลการทดสอบแรงดัด

จากการทดสอบแรงดัดในช่วงความยาวต่างๆ จำนวนทั้งหมด 12 ลำ โดยขนาดและมิติต่างๆ ของคานไม้ไผ่ แสดงตามตารางที่ 7 พบว่าค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นและหน่วยแรงดัด มีค่าระหว่าง 160,291-205,781 กก./ตร.ซม. 773-1,107 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ รายละเอียดตามตารางที่ 8 และผลการทดสอบแรงดัดสามารถดูได้จากตารางผนวกที่ 10

พบว่าลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นทั้งหมด มีดังนี้คือ การวิบัติโดยแรงเฉือน ภาพที่ 21 จำนวน 4 ลำ เป็นคานที่มีความยาว 2.5 ม. และ 3.0 ม. อย่างละ 3 ลำและ 1 ลำ ตามลำดับ การวิบัติโดยแรงดัด ภาพที่ 22 จำนวน 3 ลำ เป็นคานที่มีความยาว 2.5 ม. และ 3.6 ม. อย่างละ 1 ลำและ 2 ลำ ตามลำดับ การวิบัติโดยแรงดัดผสมแรงเฉือน ภาพที่ 23 จำนวน 1 ลำ เป็นคานที่มีความยาว 2.5 ม. การวิบัติเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของเนื้อไม้ไผ่ 1 ลำ ภาพที่ 24 และไม่เกิดการวิบัติ 3 ลำ เนื่องจากเกิดการโก่งตัวมาก นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วความไม่สมบูรณ์ของรูปทรงของลำไม้ไผ่ยังมีอิทธิพลต่อการวิบัติที่เกิดขึ้นด้วย จากตัวอย่างคาน B-8 ที่วิบัติด้วยแรงเฉือนเนื่องจากลำไม้ไผ่ไม่เป็นวงกลมอย่างสมบูรณ์

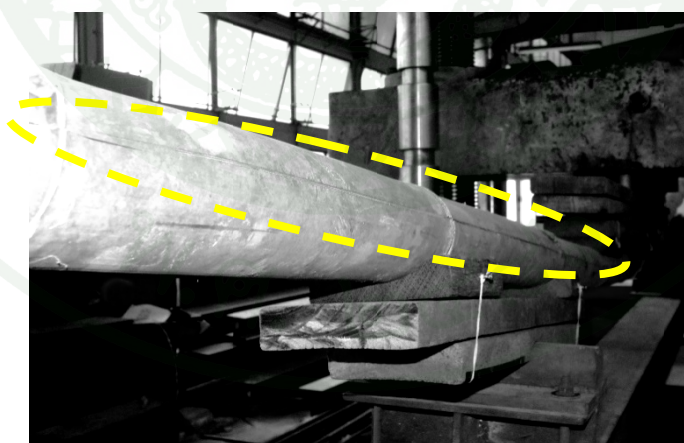
มีร่องบากตามยาวตลอดความยาวคาน โดยการวิบัติที่เกิดขึ้นในแต่ละคานได้แสดงไว้ดังภาพผนวกที่ 11 ถึงภาพผนวกที่ 19 และการคำนวณทางสถิติแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 15 และตารางผนวกที่ 16

ตารางที่ 7 ขนาดและมิติต่างๆ ของคานไม้ไผ่

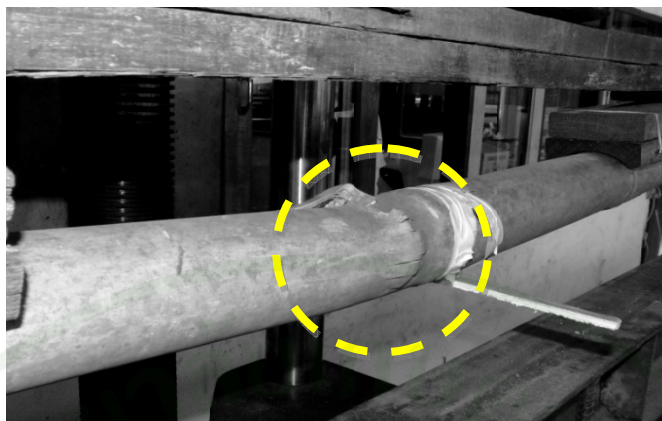
| ลำดับ<br>ที่ | ความยาว<br>(ซม.) | เส้นผ่าน<br>ศูนย์กลาง<br>ภายนอก<br>(ซม.) | เส้นผ่าน<br>ศูนย์กลาง<br>ภายใน<br>(ซม.) | ความหนา<br>(ซม.) | พื้นที่หน้าตัด<br>(ตร.ซม.) | โมเมนต์<br>อินเนอร์<br>(ซม. <sup>4</sup> ) |
|--------------|------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------------|
| B-1          | 250              | 8.963                                    | 6.625                                   | 1.169            | 28.62                      | 222                                        |
| B-2          | 250              | 9.268                                    | 6.773                                   | 1.245            | 31.38                      | 258                                        |
| B-3          | 250              | 9.043                                    | 6.170                                   | 1.421            | 34.02                      | 255                                        |
| B-4          | 250              | 7.991                                    | 5.470                                   | 1.268            | 26.77                      | 157                                        |
| B-5          | 250              | 9.135                                    | 6.269                                   | 1.406            | 34.13                      | 263                                        |
| B-6          | 250              | 8.578                                    | 5.628                                   | 1.465            | 32.73                      | 217                                        |
| B-7          | 300              | 7.825                                    | 5.098                                   | 1.358            | 27.59                      | 151                                        |
| B-8          | 300              | 8.273                                    | 5.728                                   | 1.239            | 27.38                      | 174                                        |
| B-9          | 300              | 8.276                                    | 5.628                                   | 1.317            | 28.79                      | 180                                        |
| B-10         | 360              | 8.630                                    | 6.209                                   | 1.216            | 28.33                      | 200                                        |
| B-11         | 360              | 8.738                                    | 6.706                                   | 1.019            | 24.70                      | 187                                        |
| B-12         | 360              | 7.646                                    | 5.378                                   | 1.141            | 23.31                      | 127                                        |

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบแรงค้ำ

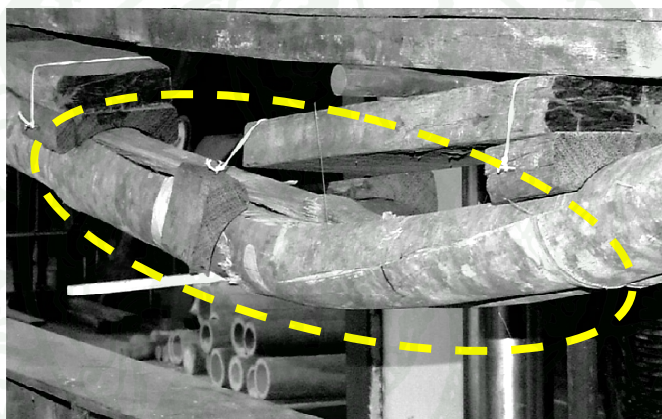
| ลำดับ<br>ที่ | ความยาว<br>(ซม.) | แรงค้ำ<br>สูงสุด<br>(กก.) | ความเค้นค้ำ<br>สูงสุด<br>(กก./ตร.ซม.) | โมดูลัสของ<br>การยืดหยุ่น<br>(กก./ตร.ซม.) | ความขึ้น<br>สัมผัส<br>% | ความหนาแน่น<br>(กก./ลบ.ม.) |
|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| B-1          | 250              | 1,297                     | 1,091                                 | 205,781                                   | 10.9                    | 770                        |
| B-2          | 250              | 1,324                     | 989                                   | 182,206                                   | 11.5                    | 740                        |
| B-3          | 250              | 1,470                     | 1,084                                 | 172,114                                   | 12.0                    | 743                        |
| B-4          | 250              | 939                       | 998                                   | 171,357                                   | 11.3                    | 847                        |
| B-5          | 250              | 1,087                     | 786                                   | 177,194                                   | 12.1                    | 815                        |
| B-6          | 250              | 1,336                     | 1,107                                 | 171,491                                   | 12.6                    | 1,392                      |
| B-7          | 300              | 624                       | 811                                   | 160,291                                   | 10.3                    | 749                        |
| B-8          | 300              | 699                       | 828                                   | 160,931                                   | 13.7                    | 712                        |
| B-9          | 300              | 829                       | 951                                   | 180,086                                   | 11.7                    | 819                        |
| B-10         | 360              | 613                       | 794                                   | 181,705                                   | 13.0                    | 788                        |
| B-11         | 360              | 552                       | 773                                   | 195,185                                   | 11.1                    | 797                        |
| B-12         | 360              | 446                       | 805                                   | 183,409                                   | 10.6                    | 403                        |



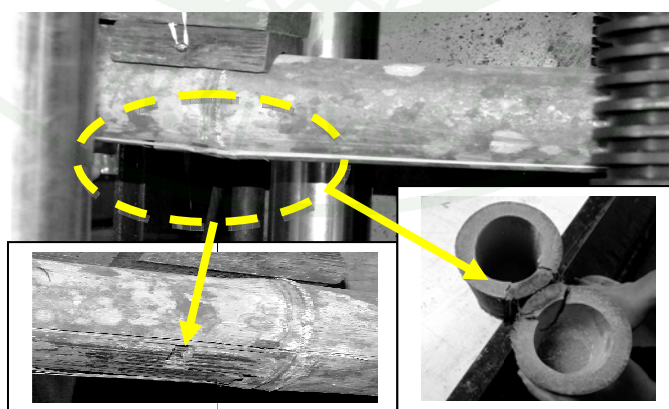
ภาพที่ 21 การวัดของคานไม้ไผ่โดยแรงเฉือน



ภาพที่ 22 การวัดตัวของคานไม้ไผ่โดยแรงตัด

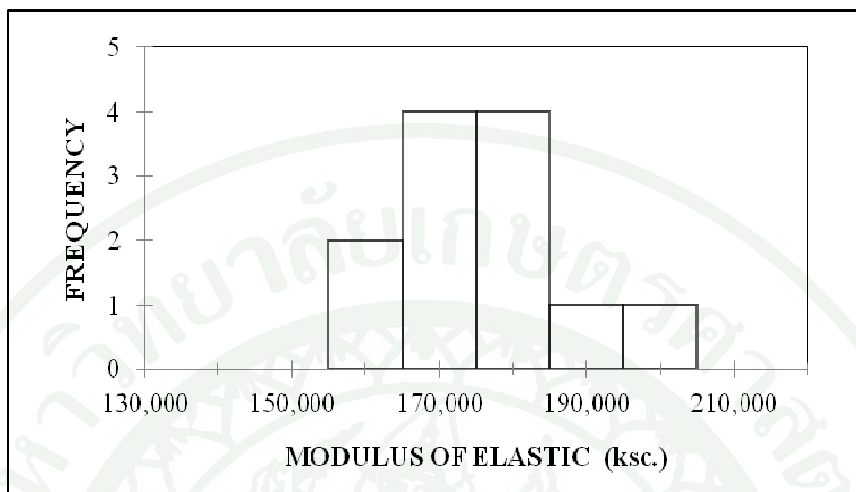


ภาพที่ 23 การวัดตัวของคานไม้ไผ่โดยแรงตัดผสมแรงเหวี่ยง

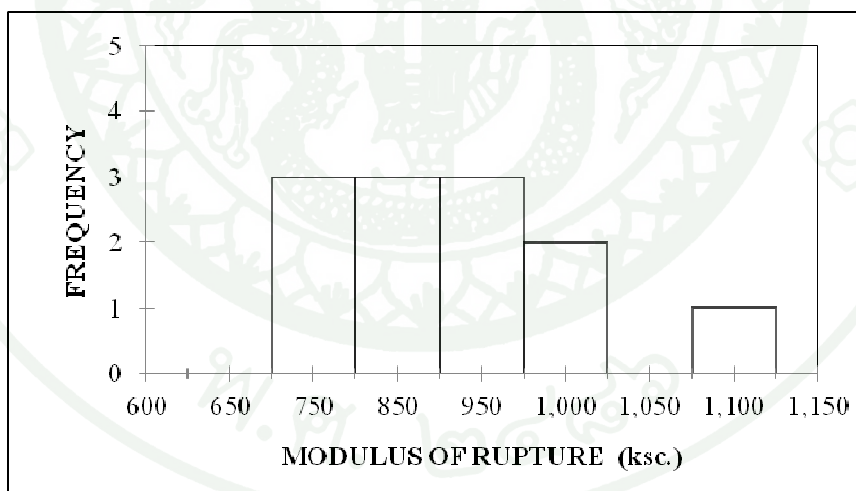


ภาพที่ 24 การวัดตัวของคานไม้ไผ่เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของเนื้อไม้

ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นเฉลี่ยและหน่วยแรงดัดเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 178,479 กก./ตร.ซม. และ 930 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ดังภาพที่ 25 และ ภาพที่ 26 ตามลำดับ



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและความถี่ (MC = 10.3-13.7 %,  $\rho = 403-1,392$  กก./ลบ.ม.)



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของการแตกร้าวและความถี่ (MC = 10.3-13.7 %,  $\rho = 403-1,392$  กก./ลบ.ม.)

และจากผลการทดสอบข้างต้นสามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีได้ดังตารางที่ 9 พบว่าลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีและข้อกำหนดตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) โดยลักษณะการวิบัติแบบแรงเฉือนส่วนใหญ่มีขนาดความยาวตามโดยประมาณน้อยกว่า 30D และการวิบัติเนื่องจากแรงค้ำส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับคานไม้ไผ่ที่มีความยาวตามมากกว่า 30D โดยในที่นี้ควรมีค่ามากกว่า 40D จะให้ค่าที่สอดคล้องกับค่าแรงค้ำสูงสุดทางทฤษฎีที่จะไม่มีอิทธิพลของแรงเฉือนหรือไม่นำมาพิจารณาได้

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของคานไม้ไผ่กับค่าทางทฤษฎี

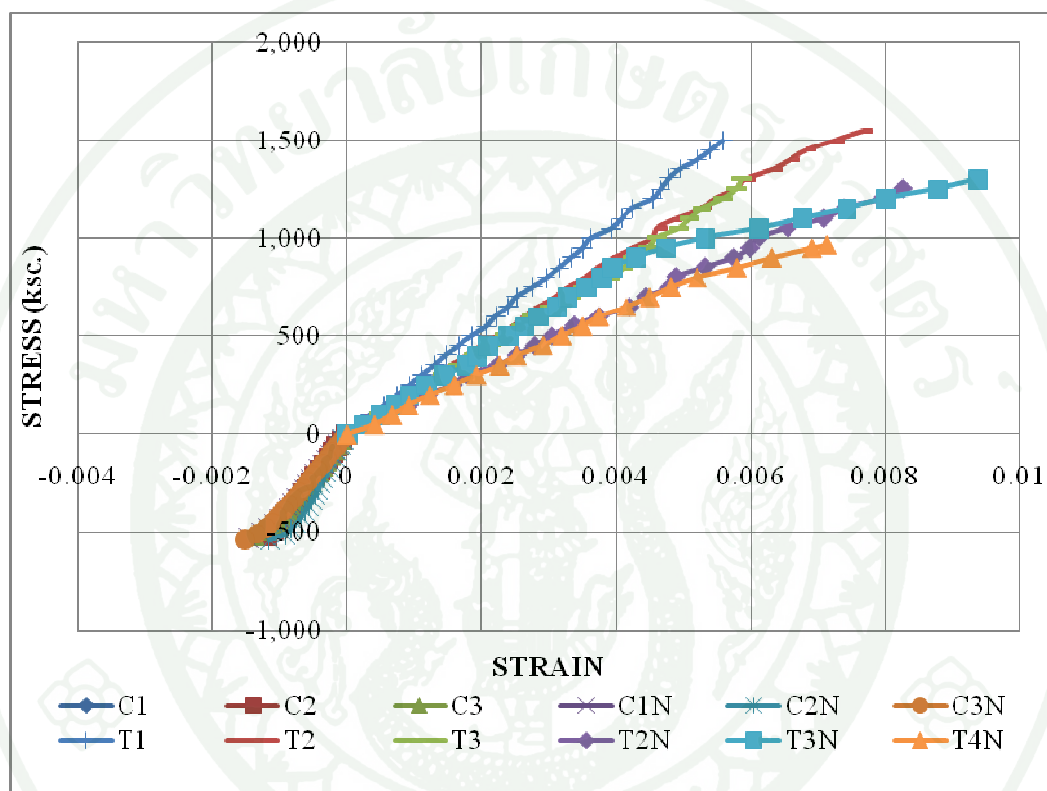
| ลำดับ<br>ที่ | แรงค้ำ<br>สูงสุด<br>(กก.) | แรงค้ำสูงสุด<br>ทางทฤษฎี<br>(กก.) | แรงเฉือนสูงสุด<br>ทางทฤษฎี<br>(กก.) | ลักษณะการวิบัติ | ความยาว<br>โดยประมาณ |
|--------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|----------------------|
| B-1          | 1,297                     | 1,019                             | 1,423                               | แรงเฉือน        | 28D                  |
| B-2          | 1,324                     | 1,146                             | 1,560                               | แรงค้ำ          | 27D                  |
| B-3          | 1,470                     | 1,162                             | 1,691                               | แรงเฉือน        | 28D                  |
| B-4          | 939                       | 806                               | 1,331                               | แรงเฉือน        | 31D                  |
| B-5          | 1,087                     | 1,185                             | 1,697                               | ความไม่สมบูรณ์  | 27D                  |
| B-6          | 1,336                     | 1,034                             | 1,627                               | แรงเฉือน+แรงค้ำ | 29D                  |
| B-7          | 624                       | 659                               | 1,372                               | *               | 38D                  |
| B-8          | 699                       | 723                               | 1,361                               | แรงเฉือน        | 36D                  |
| B-9          | 829                       | 747                               | 1,431                               | *               | 36D                  |
| B-10         | 613                       | 661                               | 1,408                               | แรงค้ำ          | 42D                  |
| B-11         | 552                       | 611                               | 1,228                               | แรงค้ำ          | 41D                  |
| B-12         | 446                       | 474                               | 1,159                               | *               | 47D                  |

หมายเหตุ D เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

\* เครื่องทดสอบ UTM หยุดเนื่องจากเกิดการโก่งตัวมาก

## 5. ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง FEM

จากการทดสอบแรงอัดขนานเสี้ยนและแรงดึงขนานเสี้ยนของลำไม้ไผ่ อย่างละ 6 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 12 ตัวอย่าง นำมาพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Relationship) ได้ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (MC = 9.1-12.7 %,  $\rho$  = 699-786 กก./ลบ.ม.)

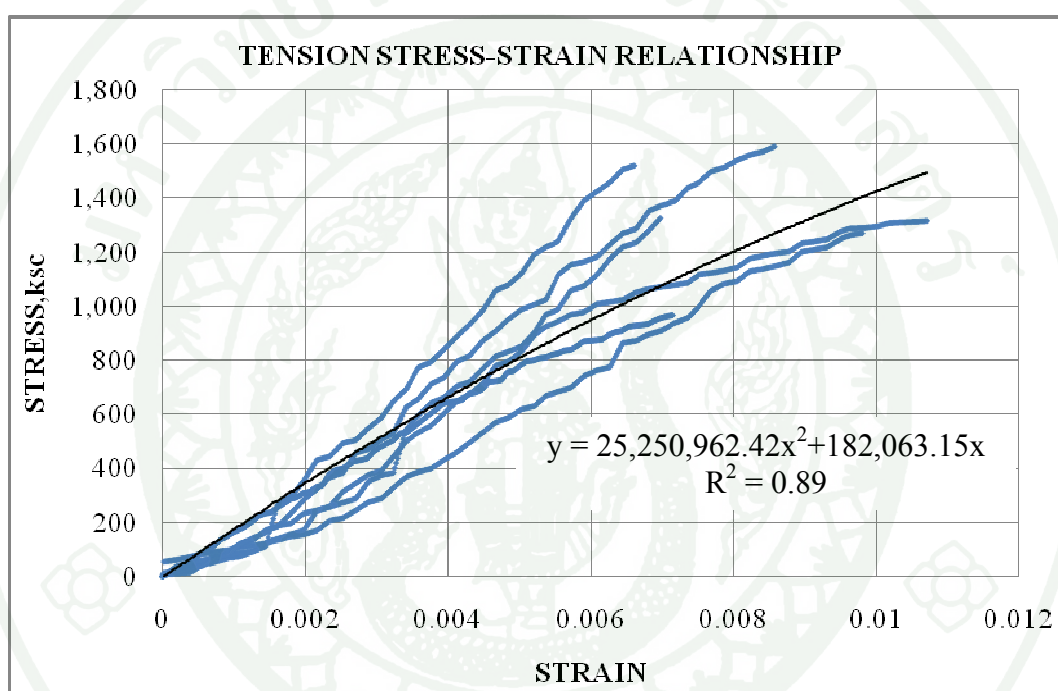
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด พบว่าค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นเฉลี่ยของการทดสอบแรงอัดขนานเสี้ยนกรณีมีข้อและกรณีไม่มีข้อมีค่าเท่ากับ 448,062 กก./ตร.ซม. และ 477,387 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นเฉลี่ยของการทดสอบแรงดึงขนานเสี้ยนกรณีมีข้อและกรณีไม่มีข้อมีค่าเท่ากับ 175,499 กก./ตร.ซม. และ 225,793 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นเมื่อนำมาพล็อตกระจายและทำการปรับค่าข้อมูลด้วยการถดถอยแบบพหุนามเหมาะสม (Polynomial Regression Model Fitting) ดีกรี 2 ดังภาพที่ 28 และภาพที่ 29 จะได้ความสัมพันธ์ของค่าความเค้น-ความเครียดที่จะนำไปใช้เป็นคุณสมบัติของวัสดุในการวิเคราะห์แบบจำลอง FEM ได้ดังสมการต่อไปนี้

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของการทดสอบแรงดึง ( $R^2 = 0.89$ )

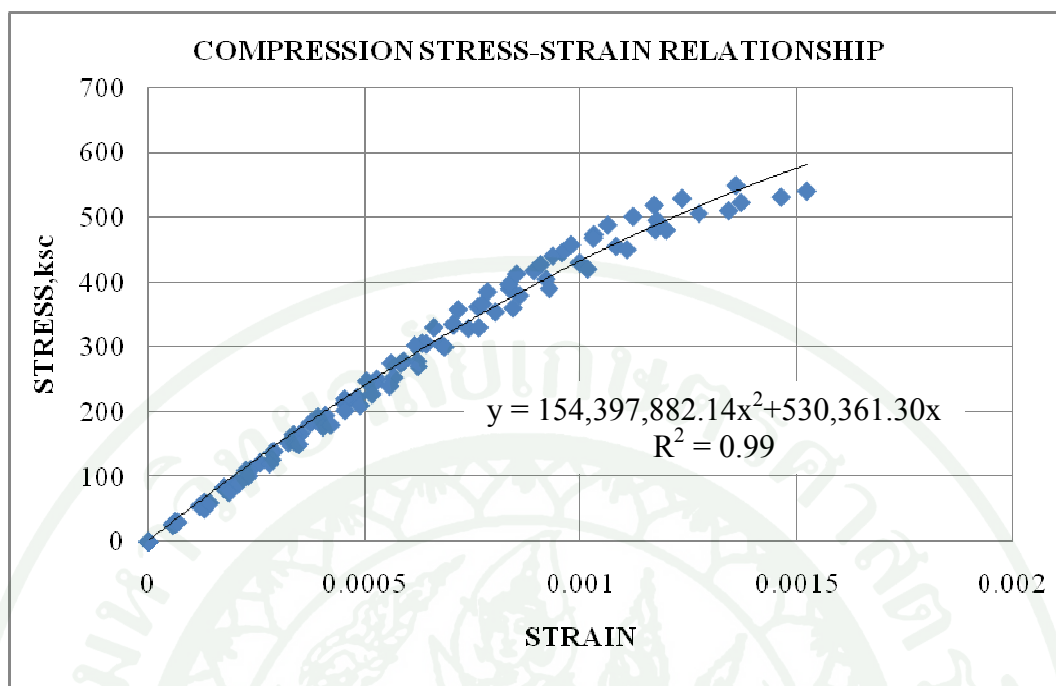
$$\sigma = 25,250,962.42\varepsilon^2 + 182,063.15\varepsilon \quad (12)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของการทดสอบแรงอัด ( $R^2 = 0.99$ )

$$\sigma = 154,397,882.14\varepsilon^2 + 530,361.30\varepsilon \quad (13)$$



ภาพที่ 28 การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของการทดสอบแรงดึง



ภาพที่ 29 การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของการทดสอบแรงอัด

การวิเคราะห์แบบจำลอง FEM ด้วยโปรแกรม MSC.Nastran V4.5 โดยสร้างแบบจำลองคานไม้ไผ่ตามความยาวและสมมติฐานที่กำหนด และระยะห่างหรือความยาวปล้องเปลี่ยนแปลงตามขนาดจริงโดยประมาณ รับแรงกระทำ 4 จุด ดังภาพที่ 30 โดยรายละเอียดของแต่ละแบบจำลองสามารถดูได้จากภาพผนวกที่ 20 ถึง 31 คุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่นไม่เชิงเส้น (Nonlinear Elastic) ทำการวิเคราะห์เป็น 4 กรณี ตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วนั้น โดยคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ สำหรับวิเคราะห์แบบจำลอง FEM แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับวิเคราะห์แบบจำลอง FEM

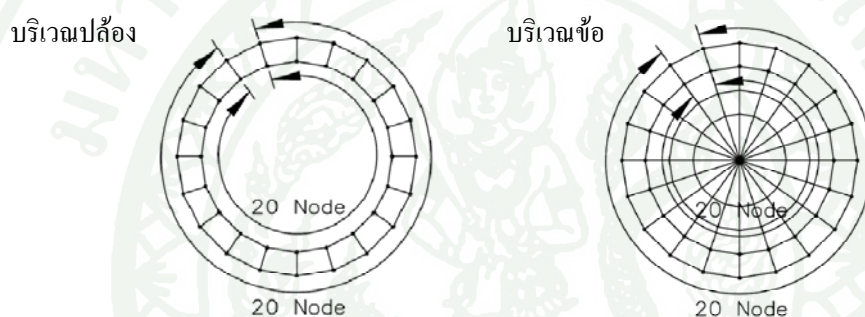
| Modulus of Elasticity | Poisson's Ratio | Density    | Function          | Element        |
|-----------------------|-----------------|------------|-------------------|----------------|
| กก./ตร.ซม.            | -               | กก./ลบ.ซม. | -                 | -              |
| 178,479               | 0.3             | 0.000798   | Nonlinear Elastic | Brick (8-Node) |

โดยทำการขึ้นรูป (Geometry) ในโปรแกรมสามารถขึ้นรูป 3 มิติ ได้ 2 แบบคือ

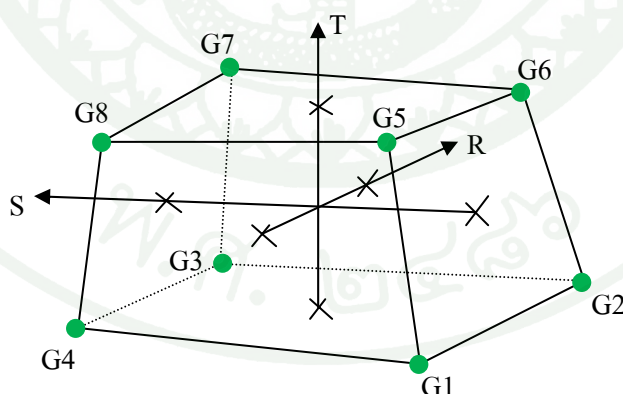
1) แบบ Volume

2) แบบ Solid

ทั้ง 2 แบบมีความแตกต่างกันคือ แบบ Volume ไม่สามารถเพิ่มหรือมีรูโพรงในชิ้นงานที่สร้างขึ้นได้ และมีการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh) เป็น Tetra, Wedge และ Brick ส่วนแบบ Solid ชิ้นงานสามารถเพิ่มหรือมีรูโพรงได้ และมีการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh) เป็น Tetra และ Hexa การศึกษานี้เลือกใช้แบบ Volume เพราะมีรูปแบบเหมาะสมกับโครงสร้างที่จะขึ้นรูป หลังจากขึ้นรูปแล้วทำการแบ่งจุดต่อ (Node) ในหน้าตัดให้มีจำนวน 20 จุดต่อทั้งภายนอกและภายในแล้วแบ่งเอลิเมนต์แบบอัตโนมัติ ดังภาพที่ 30 โดยเอลิเมนต์ที่ใช้เป็น Brick (CHEXA 8-Node) ดังภาพที่ 31



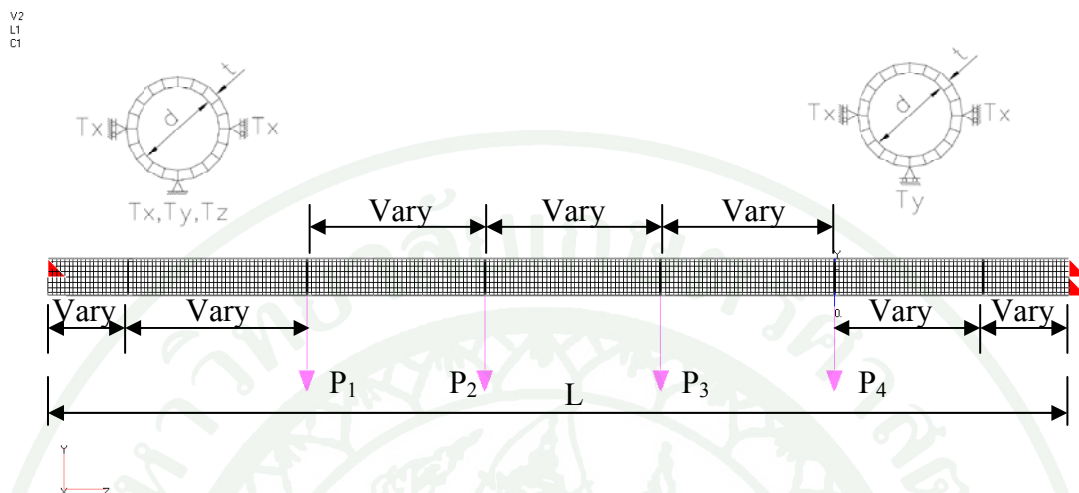
ภาพที่ 30 การแบ่งจุดต่อ (Node) และการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh) บริเวณปล้องและบริเวณข้อ



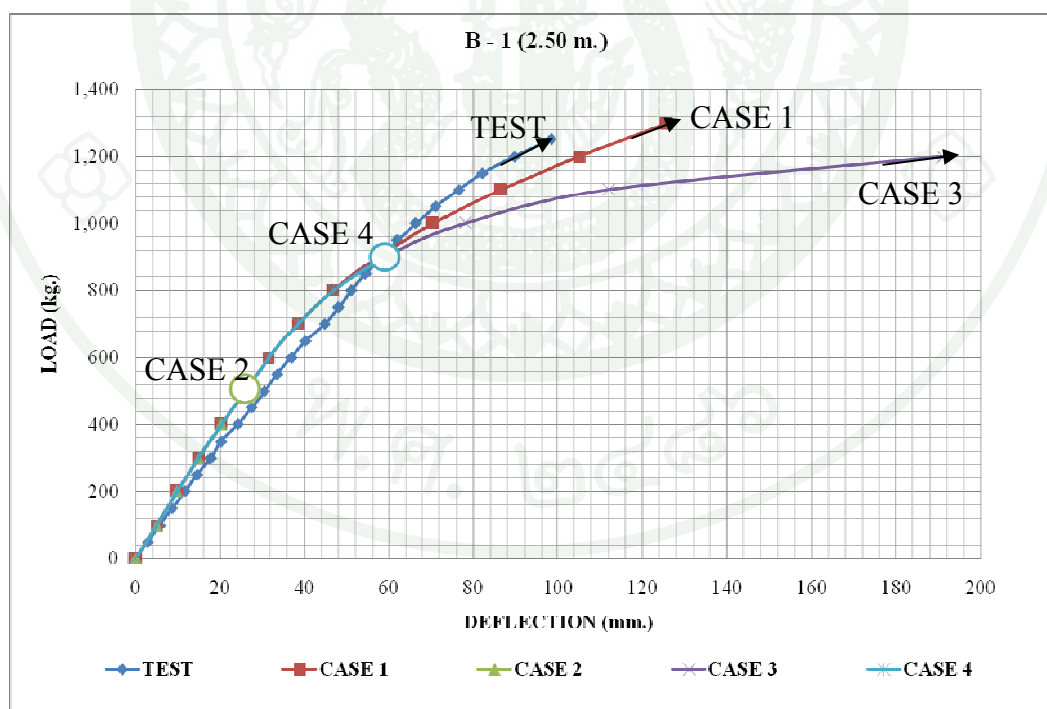
ภาพที่ 31 Brick เอลิเมนต์ที่ใช้ในโปรแกรม MSC.Nastran V4.5

เมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลอง FEM ด้วยโปรแกรม MSC.Nastran V4.5 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัว (Load-Deflection Relationship) จากแบบจำลองทั้ง 4 กรณีเปรียบเทียบกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวที่วัดได้จากการทดสอบดังภาพ

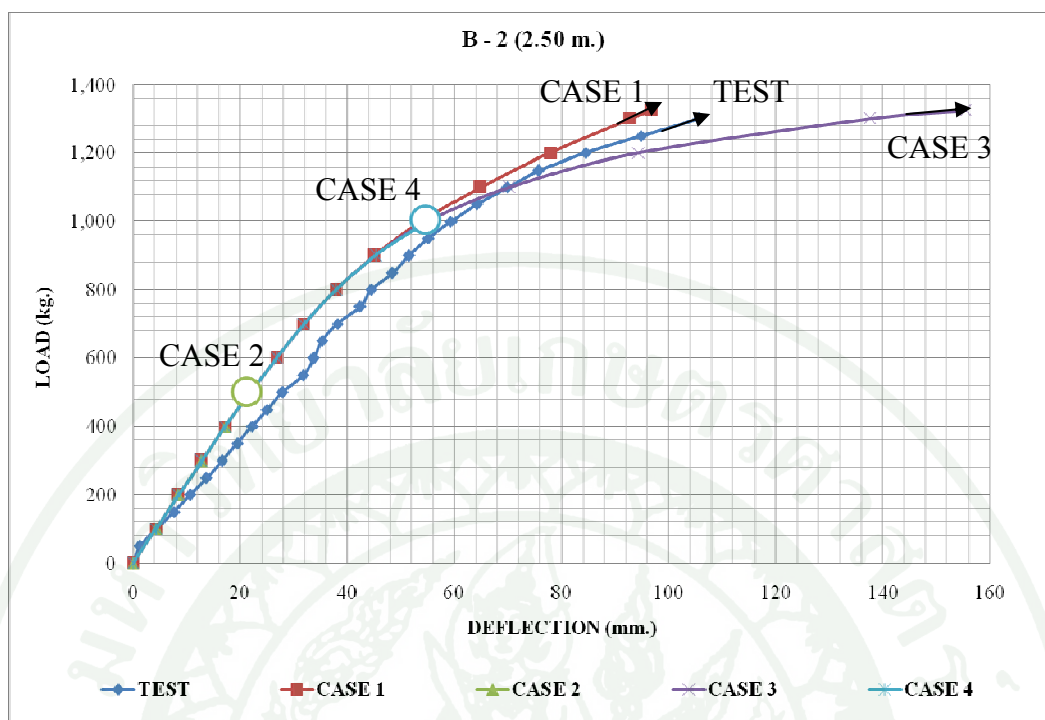
ที่ 33 ถึงภาพที่ 44 โดยวงกลมที่ปลายเส้นแสดงให้ทราบว่าแรงกระทำไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก และ ลูกศรที่ปลายเส้นแสดงให้ทราบว่าแรงกระทำสามารถเพิ่มขึ้นได้อีก



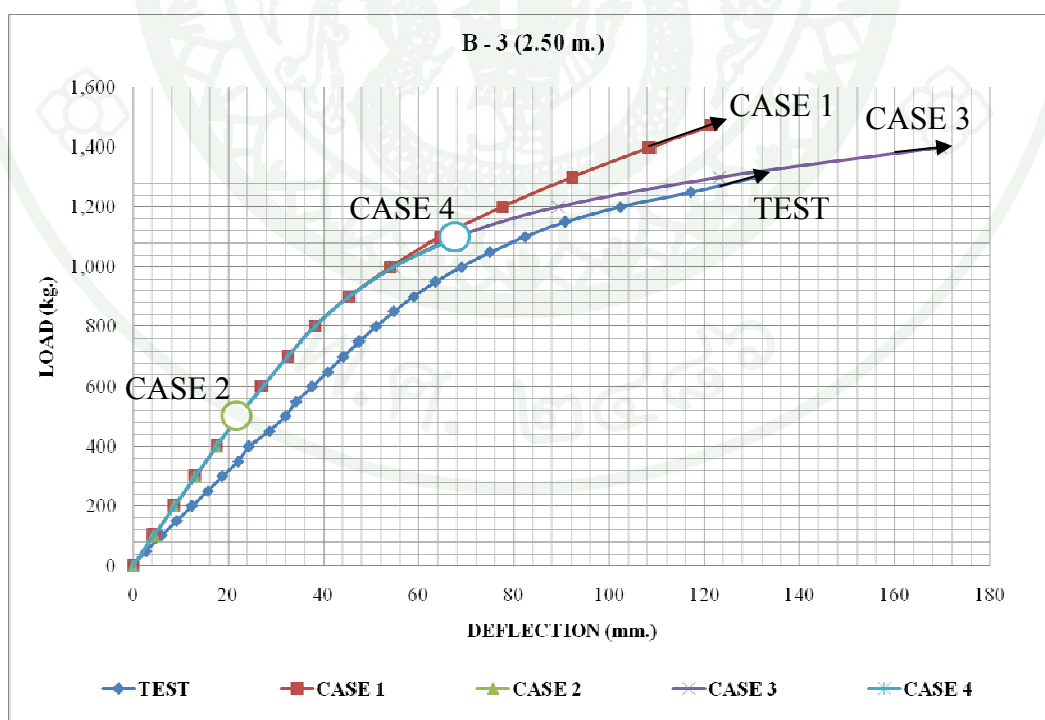
ภาพที่ 32 แบบจำลองคานไม้ไผ่สำหรับวิเคราะห์ FEM



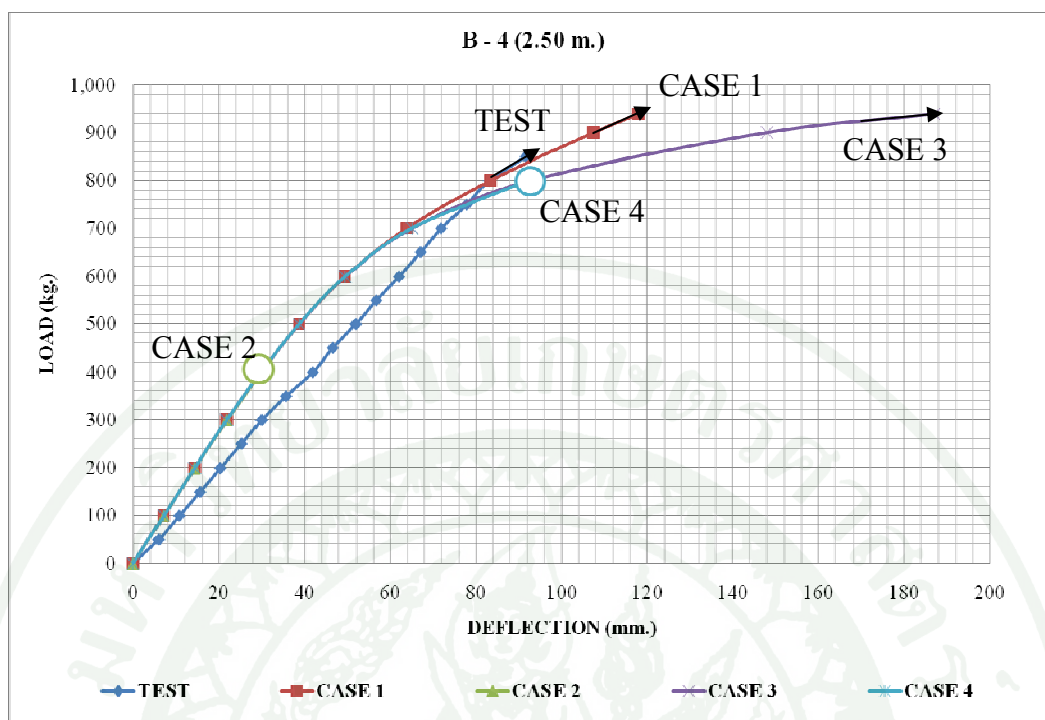
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-1



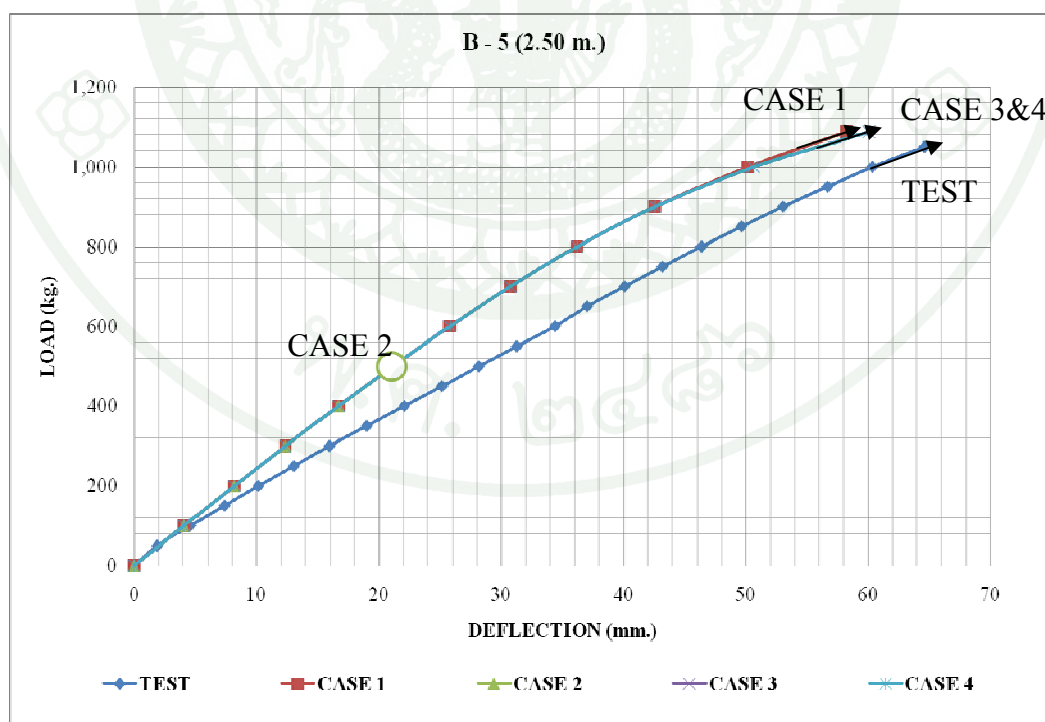
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-2



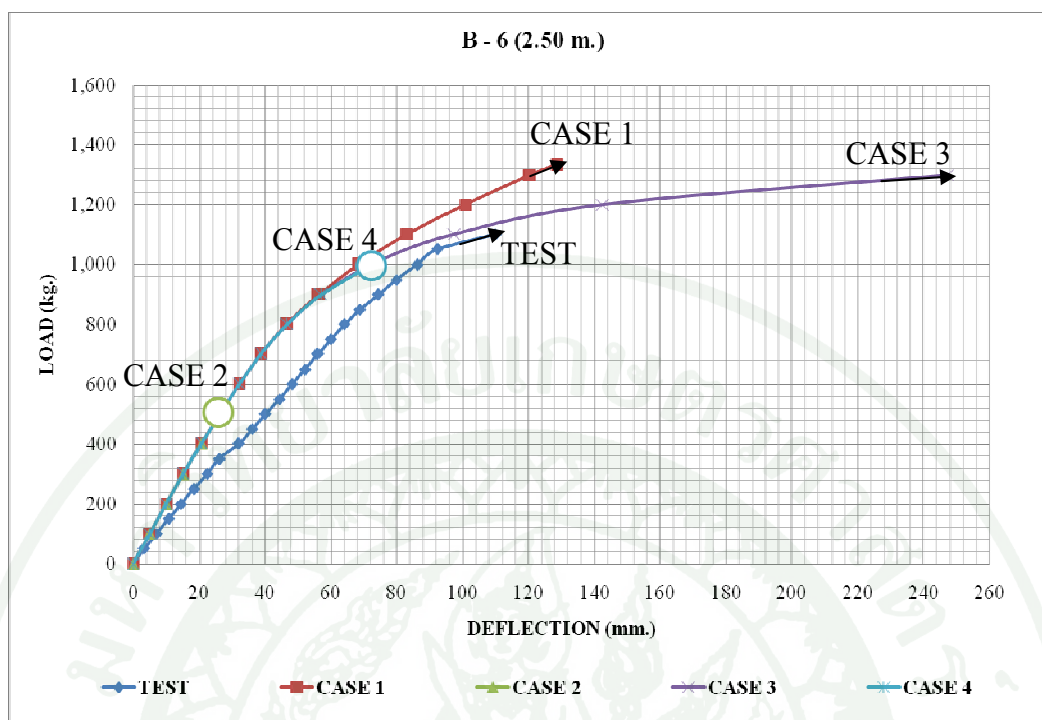
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-3



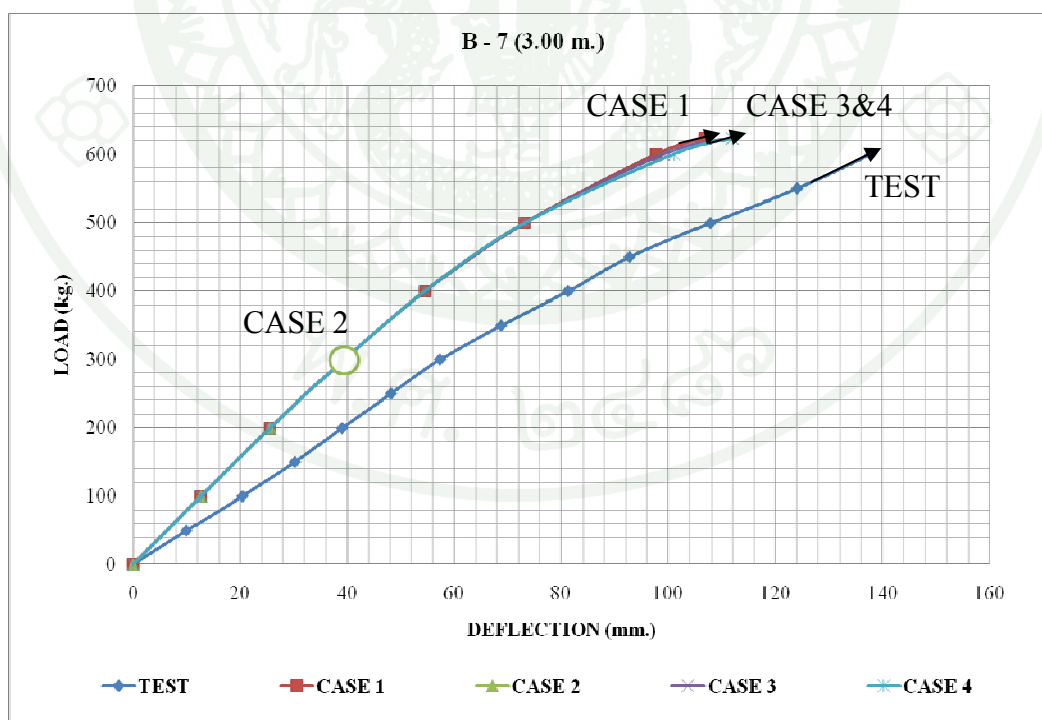
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-4



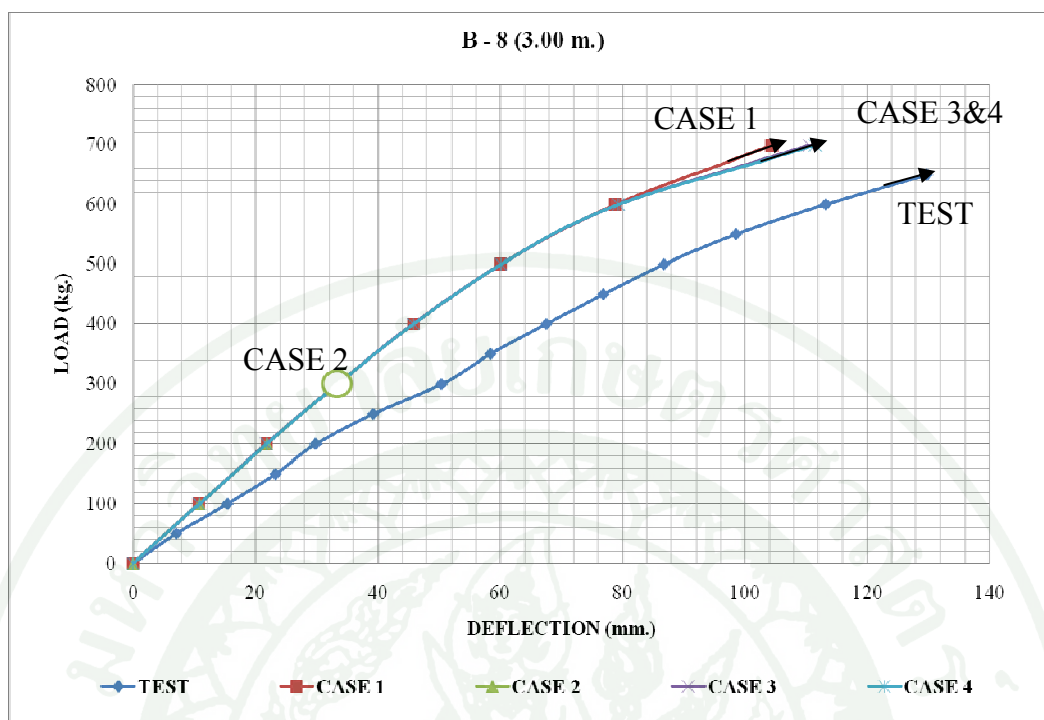
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-5



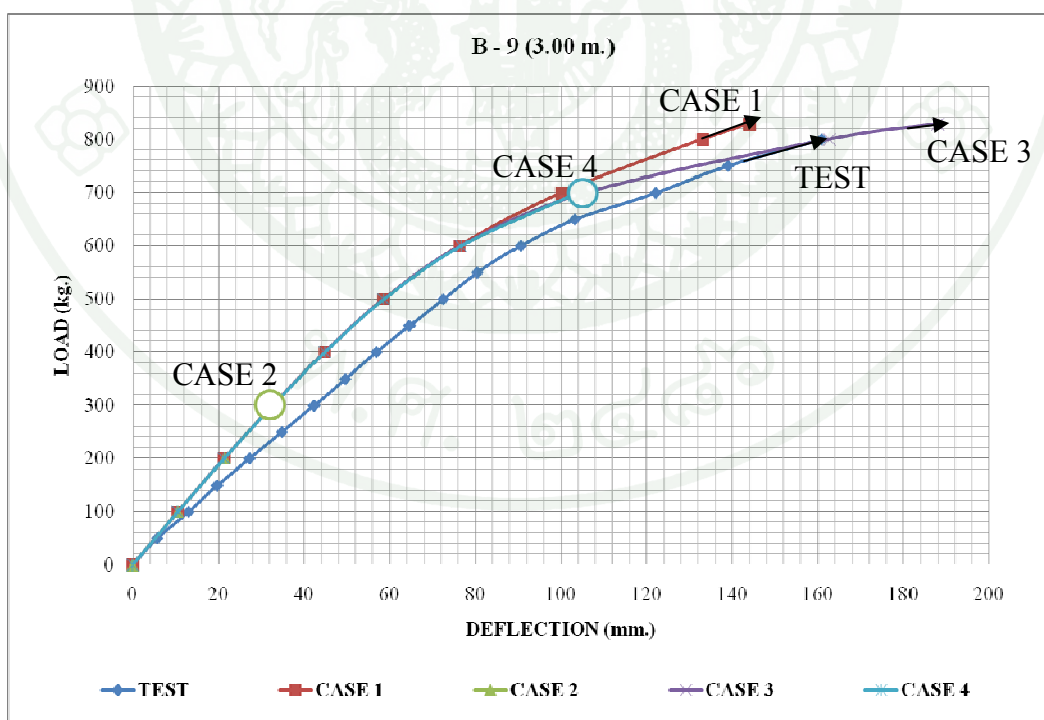
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-6



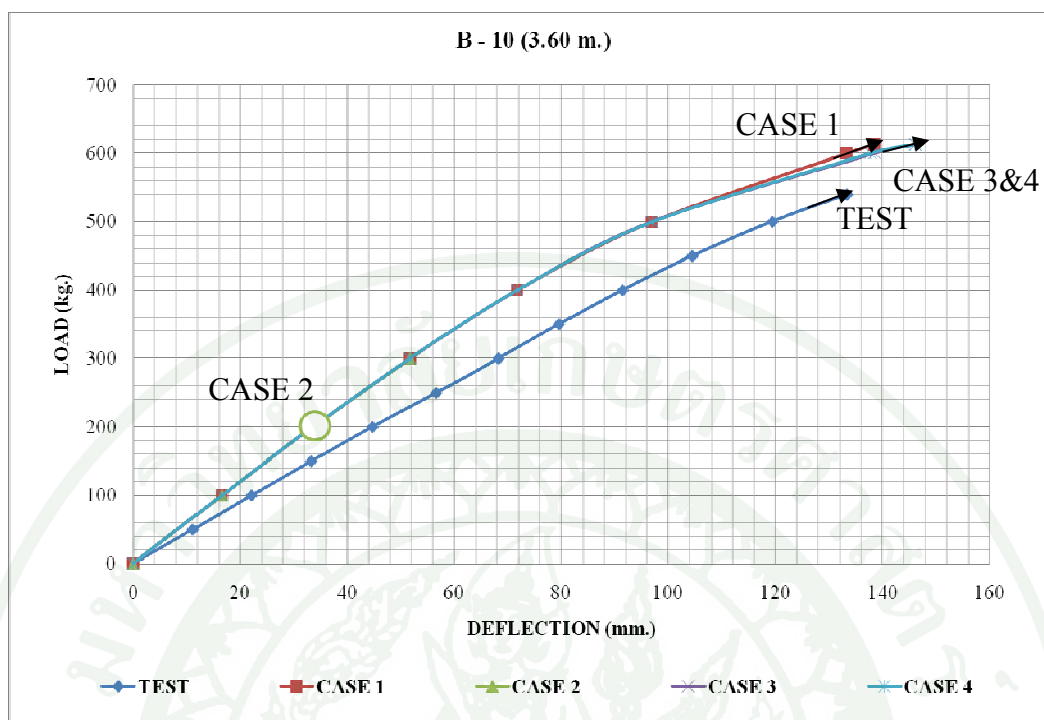
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-7



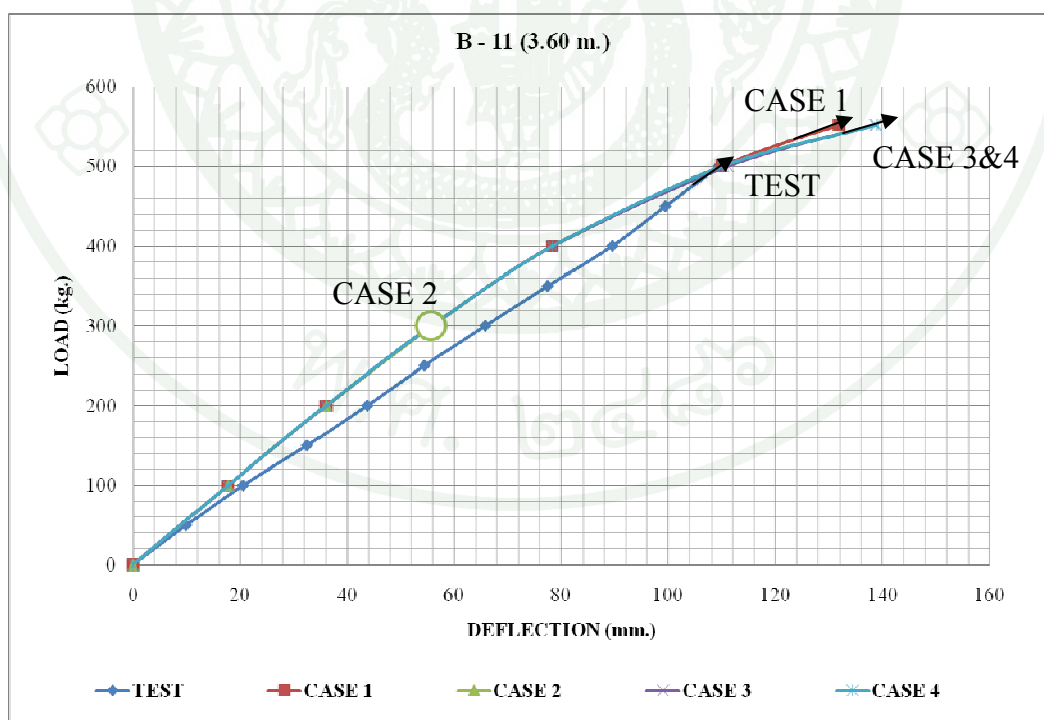
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-8



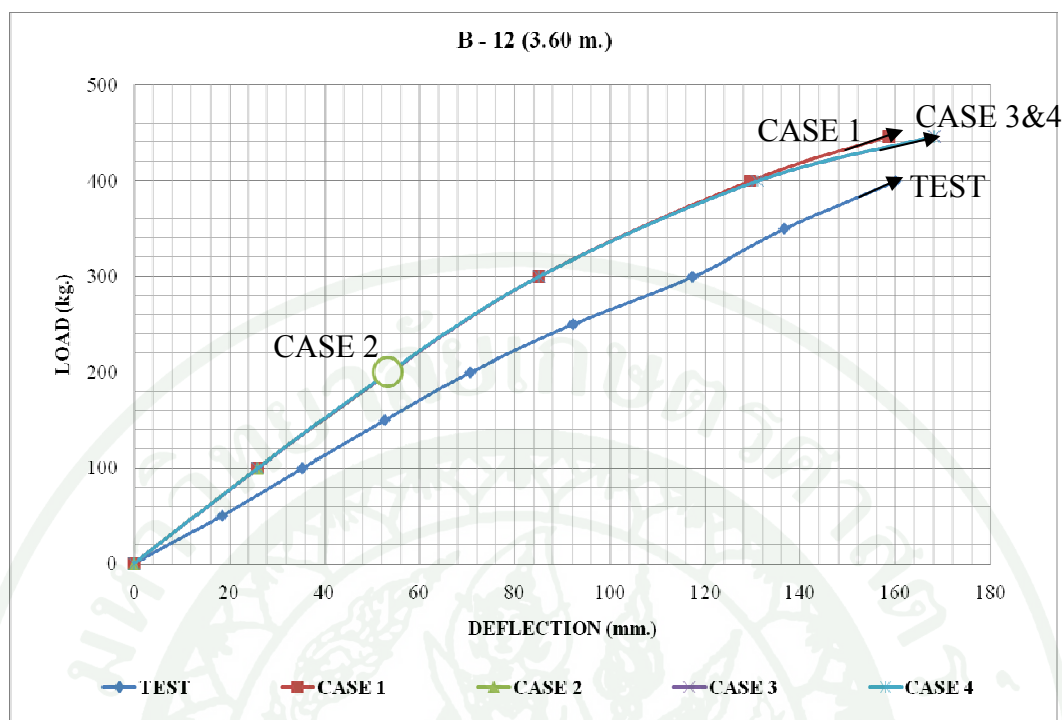
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-9



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-10



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-11

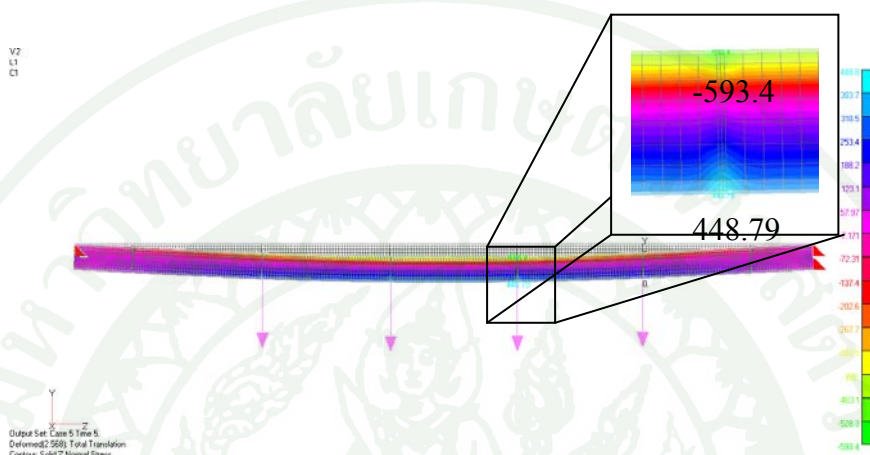


ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน B-12

เมื่อเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวของคานไม้ไผ่ จากแบบจำลองกับผลการทดสอบ พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 4 กรณี ให้ค่าที่แข็งแกร่งกว่าการทดสอบ นั่นคือที่แรงกระทำเท่ากันจะมีค่าการโก่งตัวที่น้อยกว่า ในช่วงที่คานยังไม่วิบัติด้วยหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่กำหนด และเมื่อทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของข้อมูลในช่วง 0-50% พบว่าคานที่มีความยาวมากกว่า 40 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (40D) ให้ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลใกล้เคียงที่สุด ดังตารางผนวกที่ 17

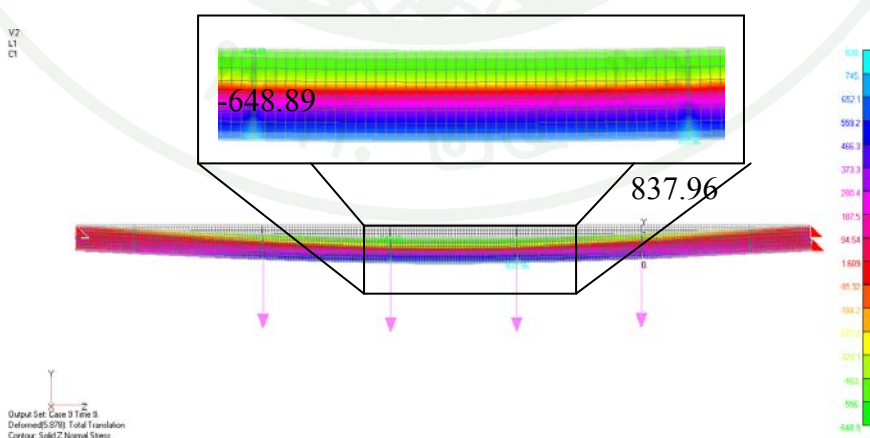
โดยกรณีที่ 1 แบบจำลองจะมีค่าที่แข็งแกร่งกว่าทุกกรณี เนื่องจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่เป็นแบบปลายเปิดทั้ง 2 ข้าง ทำให้เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองแล้วค่าความเค้นอัดหรือความเค้นดึงมีค่ามากกว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่กำหนดไว้ โดยโปรแกรม MSC.Nastran V4.5 จะทำการต่อค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดตามค่าความชันในช่วงสุดท้าย โดยจะเห็นได้ชัดเจนจากคาน B-1 และ B-3 มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวที่มีค่าความชันคงที่

กรณีที่ 2 พบว่ามีความเป็นไปได้น้อยที่สุดเนื่องจากแบบจำลองสามารถรับแรงกระทำได้น้อยมาก เนื่องจากค่าความเค้นอัดที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์แบบจำลองมีค่ามากกว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 45 แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมหลังการเปลี่ยนรูป (Softening) เนื่องจากความเค้นอัดมีอิทธิพลต่อการรับแรงของคานไม้ไผ่



ภาพที่ 45 แบบจำลอง FEM ตัวอย่างคาน B-1 กรณีที่ 2 ที่แรงกระทำ 500 กก.

กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 จะให้ค่าที่อ่อนกว่ากรณีที่ 1 หลังจากค่าหน่วยแรงอัดเกินขีดจำกัดการเสียดรูป และส่วนใหญ่ให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ แต่กรณีที่ 4 จะรับแรงกระทำได้น้อยกว่ากรณีที่ 3 เนื่องจากผลของหน่วยแรงดึงที่มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 แบบจำลอง FEM ตัวอย่างคาน B-1 กรณีที่ 4 ที่แรงกระทำ 900 กก.

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงค้ำของลำไม้ไผ่ตง สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลศาสตร์อื่นๆ พอสรุปได้ดังนี้

#### 1. สมบัติทางกายภาพของไม้ไผ่ตง

1.1 การทดสอบแรงดึงขนานเส้น ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 6.1-15.9 % โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $10.8 \pm 2.4$  % ความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 534-915 กก./ลบ.ม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $766 \pm 68$  กก./ลบ.ม.

1.2 การทดสอบแรงอัดขนานเส้น ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 6.3-28.2 % โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $12.9 \pm 5.2$  % ความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 618-1,016 กก./ลบ.ม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $813 \pm 71$  กก./ลบ.ม.

1.3 การทดสอบแรงเฉือนขนานเส้น ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 8.5-19.5 % โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $12.9 \pm 2.7$  % ความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 615-928 กก./ลบ.ม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $769 \pm 82$  กก./ลบ.ม.

1.4 การทดสอบแรงค้ำ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 10.3-13.7 % โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $11.7 \pm 1.0$  % ความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 403-1,392 กก./ลบ.ม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $798 \pm 219$  กก./ลบ.ม.

#### 2. สมบัติทางกลศาสตร์

2.1 การทดสอบแรงดึงขนานเส้น หน่วยแรงดึงสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 316-976 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $618 \pm 134$  กก./ตร.ซม.

2.2 การทดสอบแรงอัดขนานเสี้ยน หน่วยแรงอัดสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 444-728 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $568 \pm 76$  กก./ตร.ซม.

### 2.3 การทดสอบแรงเฉือนขนานเสี้ยน

2.3.1 กรณีมีข้อ หน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 79-140 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $106 \pm 18$  กก./ตร.ซม.

2.3.2 กรณีไม่มีข้อ หน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 36-136 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $93 \pm 26$  กก./ตร.ซม.

### 2.4 การทดสอบแรงดัด

2.4.1 ความยาวคานน้อยกว่า 30 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ( $L < 30D$ ) หน่วยแรงดัดสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 989-1,107 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $1,068 \pm 53$  กก./ตร.ซม. โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 171,491-205,781 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $181,757 \pm 14,112$  กก./ตร.ซม.

2.4.2. ความยาวคานมากกว่า 30 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ( $L > 30D$ ) หน่วยแรงดัดสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 773-998 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $851 \pm 87$  กก./ตร.ซม. โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 160,291-195,185 กก./ตร.ซม. โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $176,138 \pm 12,698$  กก./ตร.ซม.

จากสมบัติทางกลศาสตร์ข้างต้นนี้เมื่อนำมาลดค่าด้วยส่วนปลอดภัยของไม้ตามมาตรฐาน ว.ศ.ท. เปรียบได้กับไม้เนื้อปานกลางถึงไม้เนื้อแข็ง โดยมีหน่วยแรงที่ยอมให้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 หน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ไผ่ตง (กก./ตร.ชม.)

| ชนิดหน่วยแรงที่ยอมให้         | หน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ไผ่ตง |
|-------------------------------|------------------------------|
| แรงดึงขนานเส้น                | 95                           |
| แรงอัดขนานเส้น                | 99                           |
| แรงเฉือนขนานเส้น              | 11                           |
| แรงดัดในคานสั้น ( $L < 30D$ ) | 164                          |
| แรงดัดในคานยาว ( $L > 30D$ )  | 131                          |
| โมดูลัสของความยืดหยุ่น        | 178,479                      |

### 3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

#### 3.1 การทดสอบแรงดึงขนานเส้น

3.1.1 กรณีมีข้อ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 9.1-9.5 % ความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 710-751 กก./ลบ.ม. หน่วยแรงดึงสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 966-1,315 กก./ตร.ชม. โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 153,848-212,262 กก./ตร.ชม.

3.1.2 กรณีไม่มีข้อ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 9.2-10.3% ความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 727-751 กก./ลบ.ม. หน่วยแรงดึงสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 1,326-1,591 กก./ตร.ชม. โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 205,518-243,262 กก./ตร.ชม.

#### 3.2 การทดสอบแรงอัดขนานเส้น

3.1.1 กรณีมีข้อ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 11.8-12.7 % ความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 759-774 กก./ลบ.ม. หน่วยแรงอัดสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 570-596 กก./ตร.ชม. โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 445,130-450,994 กก./ตร.ชม.

3.1.2 กรณีไม่มีข้อ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 11.1-11.9% ความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 737-786 กก./ลบ.ม. หน่วยแรงอัดสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 559-582 กก./ตร.ชม. โมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 469,379-493,313 กก./ตร.ชม.

จากการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของไม้ไผ่พบว่าค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ได้มีค่าสูงกว่าผลการทดสอบสมบัติทางกลศาสตร์เนื่องจากไม้ไผ่ที่นำมาใช้ทดสอบมาจากต่างสถานที่ต่างช่วงเวลา และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่ต่างกัน

#### 4. ลักษณะการวิบัติของลำไม้ไผ่ตง

พบว่านอกจากความยาวคานแล้ว ลักษณะทางกายภาพของไม้ไผ่ยังมีผลต่อการวิบัติที่เกิดขึ้น เช่นการวางตัวของเส้นไม้และรอยแตกตามยาวที่มักเกิดขึ้นตามธรรมชาติเมื่อไม้ไผ่มีความชื้นน้อยลง ตลอดจนความไม่สมบูรณ์ของเนื้อไม้หรือความไม่สมบูรณ์ของรูปทรง เช่นเดียวกับไม้โดยทั่วไป นอกจากนี้แล้วยังพบว่าการวิบัติของไม้ไผ่จะเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด ซึ่งเป็นอันตรายต่อการนำไปใช้งานจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมอีกมาก เพื่อหาค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่นและกำลังรับน้ำหนักของไม้ไผ่ที่ยอมรับได้ สำหรับคำนวณและออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยและประหยัดต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับข้อกำหนดตามมาตรฐานสากล (ISO 22157-1) พบว่าค่าความยาวคานที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 30D นั้น อาจจะไม่เพียงพอสำหรับไม้ไผ่ตง เนื่องจากคานตัวอย่างที่มีความยาวมากกว่า 30D ยังเกิดการวิบัติโดยแรงเฉือนถึงแม้ว่าคานนั้นจะมีรูปทรงที่ไม่เป็นวงกลมโดยสมบูรณ์ก็ตาม จากการศึกษาจึงแนะนำให้ใช้ความยาวคานในการทดสอบไม่น้อยกว่า 40D

#### 5. การวิเคราะห์แบบจำลอง FEM

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการโก่งตัวที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง FEM กับค่าที่วัดได้จากการทดสอบพบว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง FEM ทั้ง 4 กรณี มีความแข็งแรงกว่าผลการทดสอบ โดยคานยาว ( $L > 40D$ ) สามารถใช้วิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมเพื่อประมาณค่าการโก่งตัวในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ดีกว่าคานสั้น ( $L < 40D$ ) แต่การวิเคราะห์นี้ยังไม่ชัดเจนถึงพฤติกรรมหลังการเสียรูป เนื่องจากอัตราการลดลงของค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดหลังการเสียรูป (Softening) ในช่วงนี้ไม่สามารถวัดค่าได้จากการศึกษาครั้งนี้ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาในรายละเอียดนี้ต่อไป

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดหลังการเสีรูป (Softening) ของไม้ไผ่ว่าเป็นอย่างไร
2. ควรศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของไม้ไผ่ชนิดอื่นๆ ที่ผ่านการบำรุงรักษาและในสภาพสด เพื่อหาค่าที่ยอมรับสำหรับการออกแบบให้ครอบคลุมกับการนำไปใช้งาน
3. ควรศึกษาเกี่ยวกับค่าการโก่งตัวของคานไม้ไผ่สำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากคานไม้ไผ่มีการโก่งตัวค่อนข้างมาก

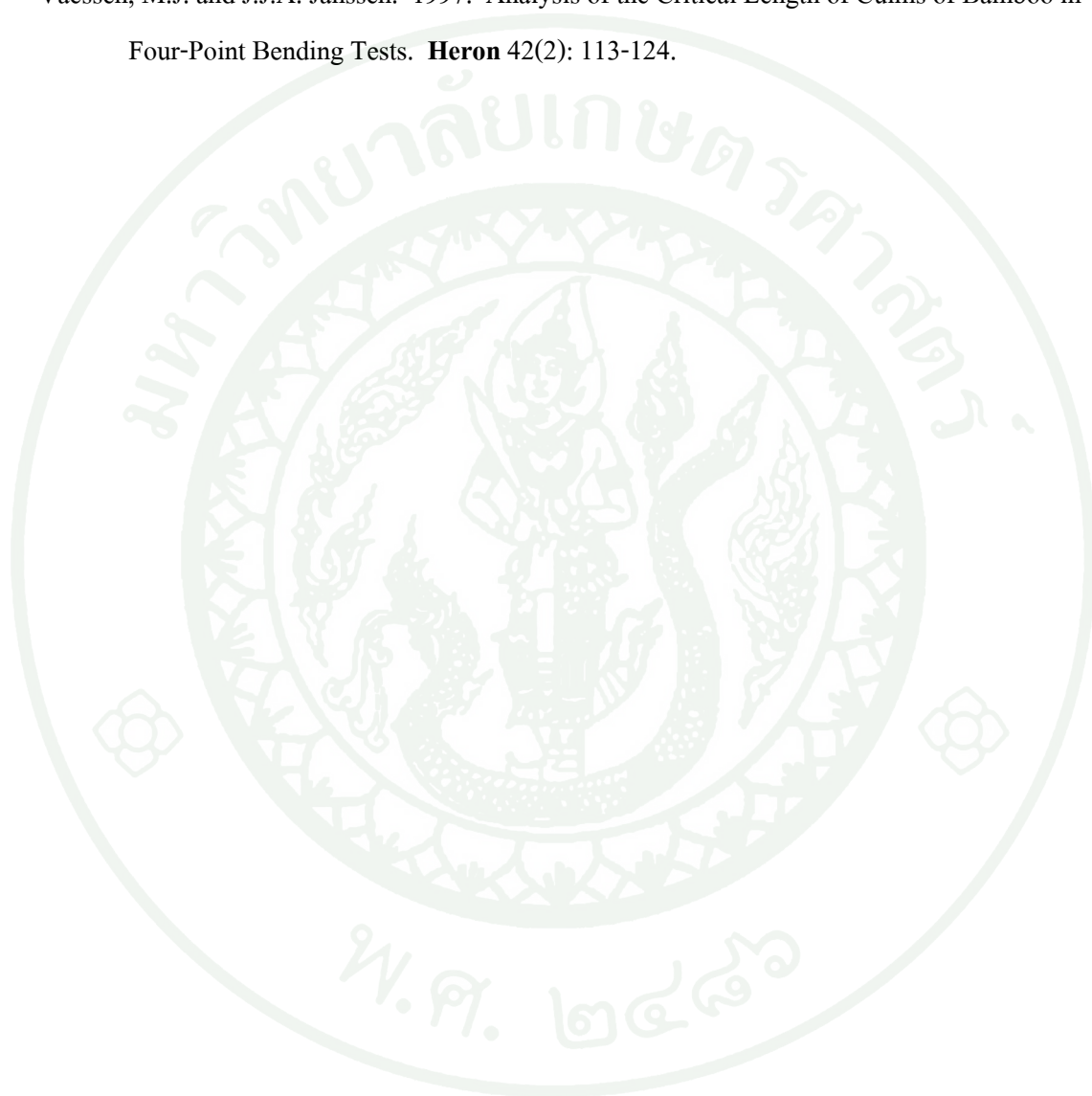
## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จิตติกุล ภาคศิริ. 2540. สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไม้ไผ่ตง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ตระกูล อร่ามรักษ์. 2526. การออกแบบโครงสร้างไม้. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- มนตรี พรหมโชติกุล และ ศักดิ์พิชิต จุลฤกษ์. 2528. ความแข็งแรงดัดของไม้ไผ่, น. 199-205. เอกสารการสัมมนาเรื่องไม้ไผ่ ครั้งที่ 1. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รุ่งนภา พัฒนวิบูลย์, บุญฤทธิ์ ฐิริยากร และ วลัยพร สถิตวิบูลย์. 2544. ไม้ไผ่ในประเทศไทย. สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้. กรุงเทพฯ.
- อิทธิพงษ์ อินพล. 2540. คุณสมบัติการดัดของไม้ไผ่ประกับกาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Chung, K.F. and W.K. Yu. 2002. Mechanical Properties of Structure Bamboo for Bamboo Scaffoldings. **Journal of Engineering Structure** 24(4): 429-442.
- Fan H. and C. Fan. n.d. **Test Method for Determination of Mechanical Properties of Bamboo**. Civil Engineering and Architecture. Harbin University, Harbin.
- ISO. 2004. **Bamboo-Determination of Physical and Mechanical Properties**. ISO 22157-1:2004(E). International Organization for Standardization, Switzerland.
- Janssen, J.J.A. 2000. Designing and Building with Bamboo. **INBAR Technical Report 20**.

- Kamruzzaman, M., S.K. Saha, A.K. Bose and M.N. Islam. 2008. Effects of Age and Height on Physical and Mechanical Properties of Bamboo. **Journal of Tropical Forest Science** 20(3): 211-217.
- Li, X. 2004. **Physical, Chemical and Mechanical Properties of Bamboo and Its Utilization Potential for Fiberboard Manufacturing.** M.S. Thesis, Louisiana State University.
- Malanit, P. 2009a. **The Suitability of *Dendrocalamus asper* Backer for Oriented Strand Lumber.** Ph.D. Thesis, University of Hamburg.
- Malanit, P. 2009b. **The Suitability of *Dendrocalamus asper* Backer for Oriented Strand Lumber.** Ph.D. Thesis, University of Hamburg. Cited Dransfield, S. and Widjaja, E.A. 1995. **Plant Resources of South-East Asia No. 7: Bamboos.** Leiden, Netherlands.
- Malanit, P. 2009c. **The Suitability of *Dendrocalamus asper* Backer for Oriented Strand Lumber.** Ph.D. Thesis, University of Hamburg. Cited Othman, A.R., Mohmod, A.L., Liese, W. and Haron, N. 1995. **Research Pamphlet No. 118: Planting and Utilization of Bamboo in Peninsular Malaysia.** Forest Research Institute Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Malanit, P., M.C. Barbu, W. Liese and A. Fruhwald. 2008. Macroscopic Aspects and Physical Properties of an Asian Bamboo (*Dendrocalamus asper* Backer) for Composite Boards. **Journal of Bamboo and Rattan** 7(3/4): 151-163.
- Malanit, P., M.C. Barbu and A. Fruhwald. 2009d. Mechanical Properties of Sweet Bamboo *Dendrocalamus asper*. **Journal of Bamboo and Rattan** 8(3/4): 151-160.
- Thaipetch, S. 2004. Physical and Mechanical Properties of Five Bamboo Species in Thailand. pp. 41-45. In Royal Forest Department, comps. **Sustainable Management and Utilization from Bamboo.** Bangkok, Thailand.

Torres, L.A., K. Ghavami and J.J. Garcia. 2007. A Transversely Isotropic Law for the Determination of the Circumferential Young's Modulus of Bamboo with Diametric Compression Tests. **Latin American Applied Research** 37(4): 255-260.

Vaessen, M.J. and J.J.A. Janssen. 1997. Analysis of the Critical Length of Culms of Bamboo in Four-Point Bending Tests. **Heron** 42(2): 113-124.







ภาพผนวกที่ 1 อุปกรณ์การทดสอบแรงอัดขนานเส้นตามมาตรฐาน ISO22157-1



ภาพผนวกที่ 2 อุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นตามมาตรฐาน ISO22157-1



ภาพผนวกที่ 3 อุปกรณ์การทดสอบแรงคัดตามมาตรฐาน ISO22157-1



ภาพผนวกที่ 4 ชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด



ภาพผนวกที่ 5 การทดสอบแรงดึงขนานเส้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด



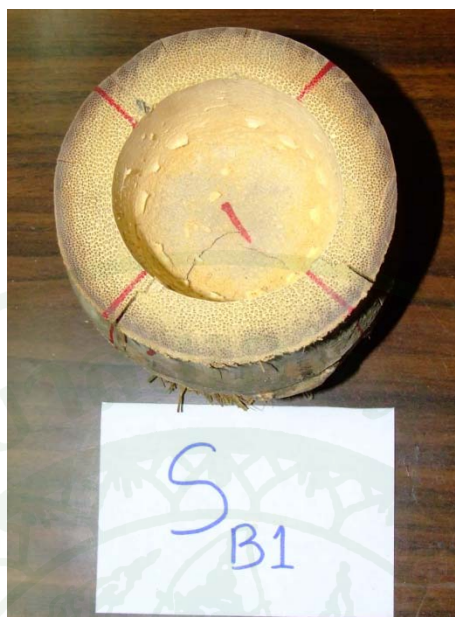
ภาพผนวกที่ 6 การทดสอบแรงอัดขนานเส้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด



ภาพผนวกที่ 7 ตัวอย่างการวินิจฉัยจากการทดสอบแรงดึงขนานเส้น



ภาพผนวกที่ 8 ตัวอย่างการวินิจฉัยจากการทดสอบแรงอัดขนานเส้น



ภาพผนวกที่ 9 ตัวอย่างการวินิจฉัยจากการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นกรณีมีข้อ



ภาพผนวกที่ 10 ตัวอย่างการวินิจฉัยจากการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นกรณีไม่มีข้อ



ภาพผนวกที่ 11 การวัดตัวของคานไม้ไผ่ B-1



ภาพผนวกที่ 12 การวัดตัวของคานไม้ไผ่ B-2



ภาพผนวกที่ 13 การวัดตัวของคานไม้ไผ่ B-3



ภาพผนวกที่ 14 การวัดตัวของคานไม้ไผ่ B-4



ภาพผนวกที่ 15 การวัดตัวของคานไม้ไผ่ B-5



ภาพผนวกที่ 16 การวัดตัวของคานไม้ไผ่ B-6



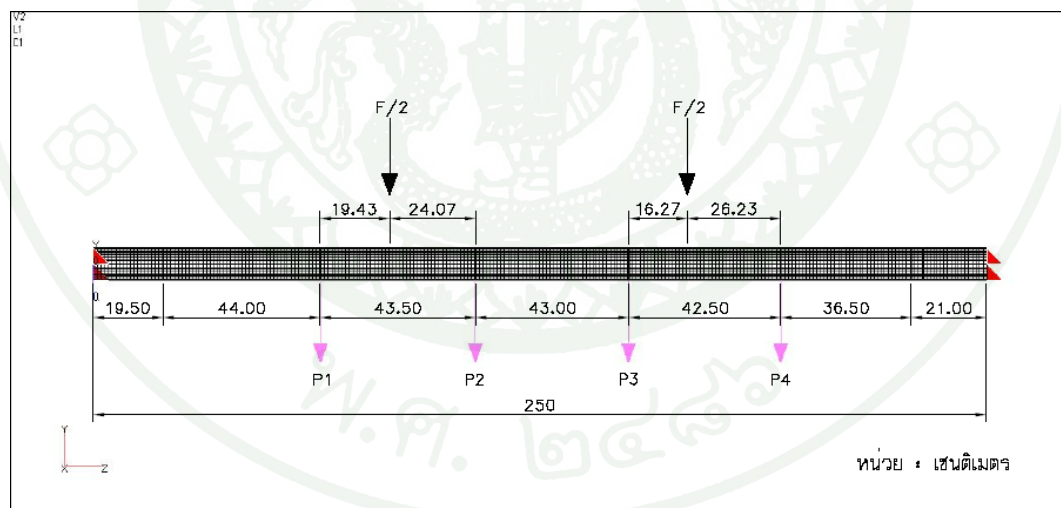
ภาพผนวกที่ 17 การวัดของคานไม้ไผ่ B-8



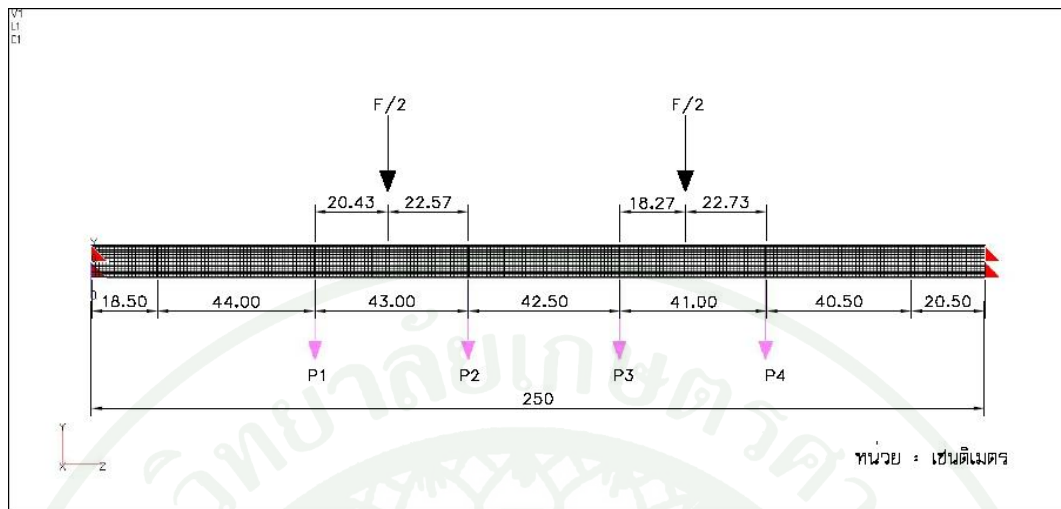
ภาพผนวกที่ 18 การวัดของคานไม้ไผ่ B-10



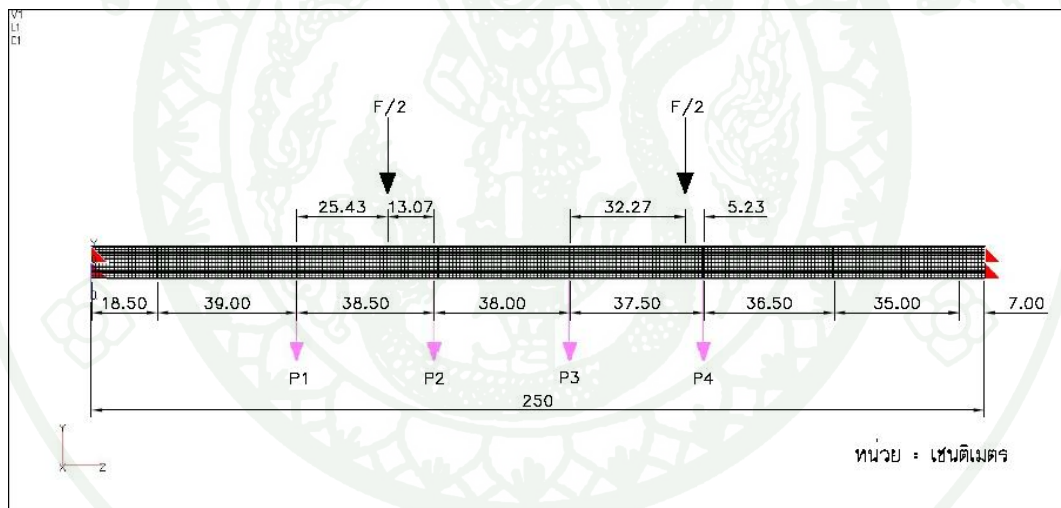
ภาพผนวกที่ 19 การวัดของคานไม้ไผ่ B-11



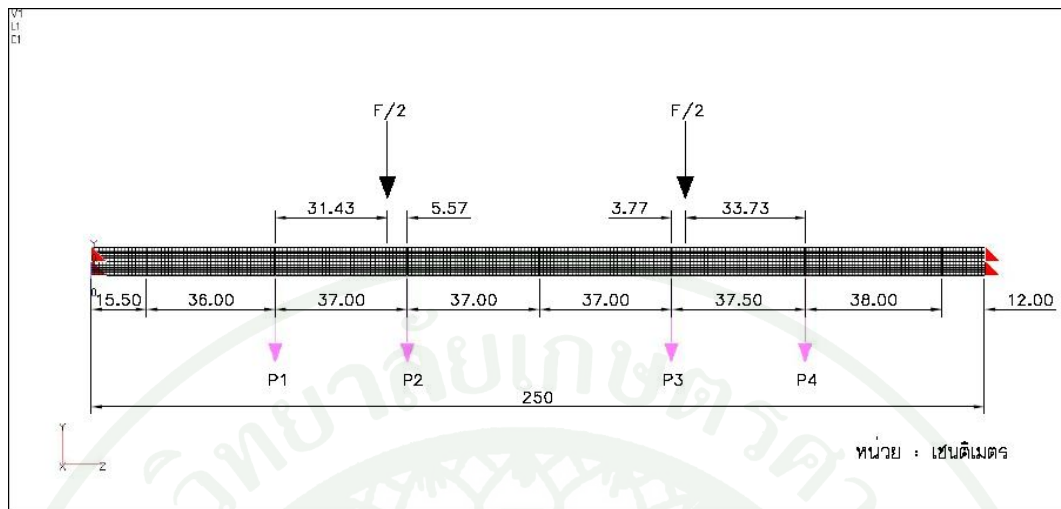
ภาพผนวกที่ 20 แบบจำลอง FEM ของคาน B-1



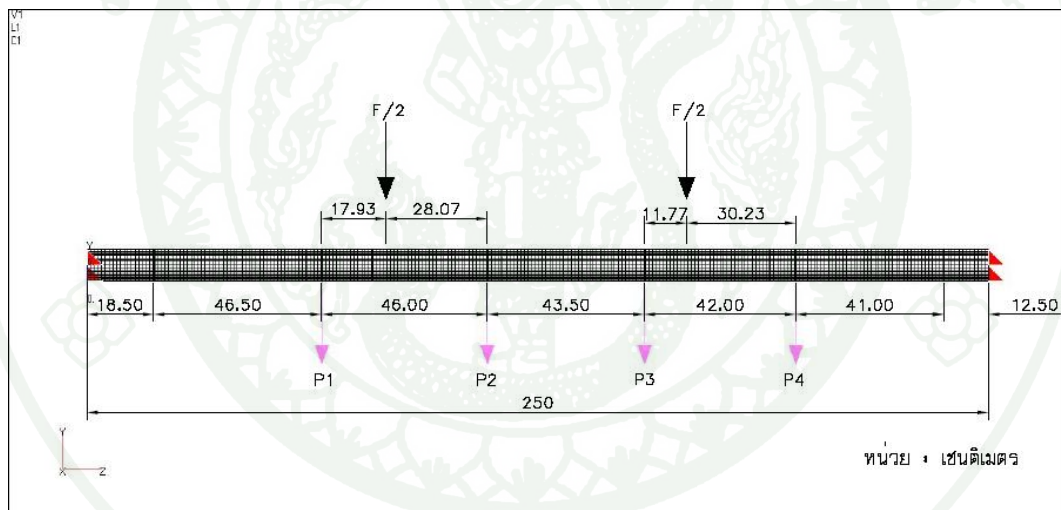
ภาพผนวกที่ 21 แบบจำลอง FEM ของคาน B-2



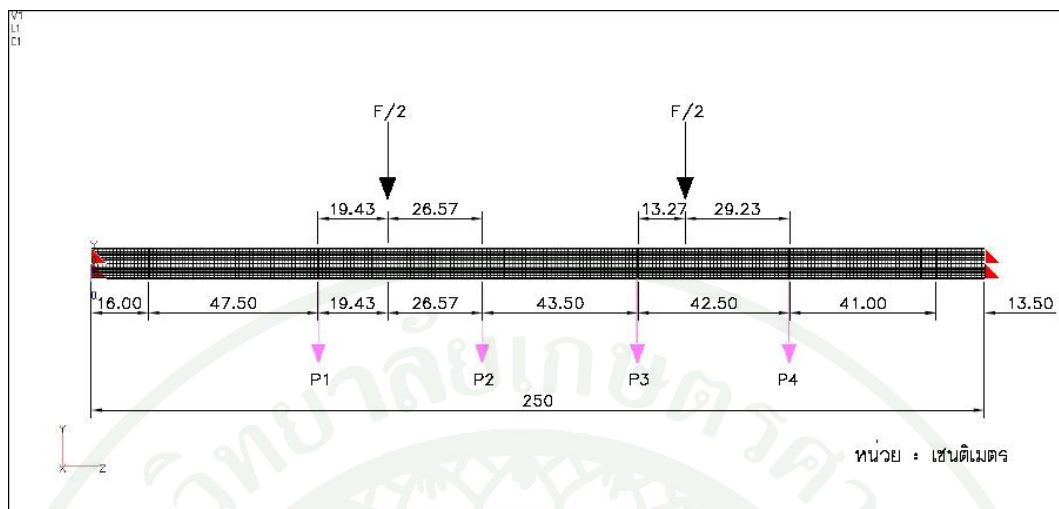
ภาพผนวกที่ 22 แบบจำลอง FEM ของคาน B-3



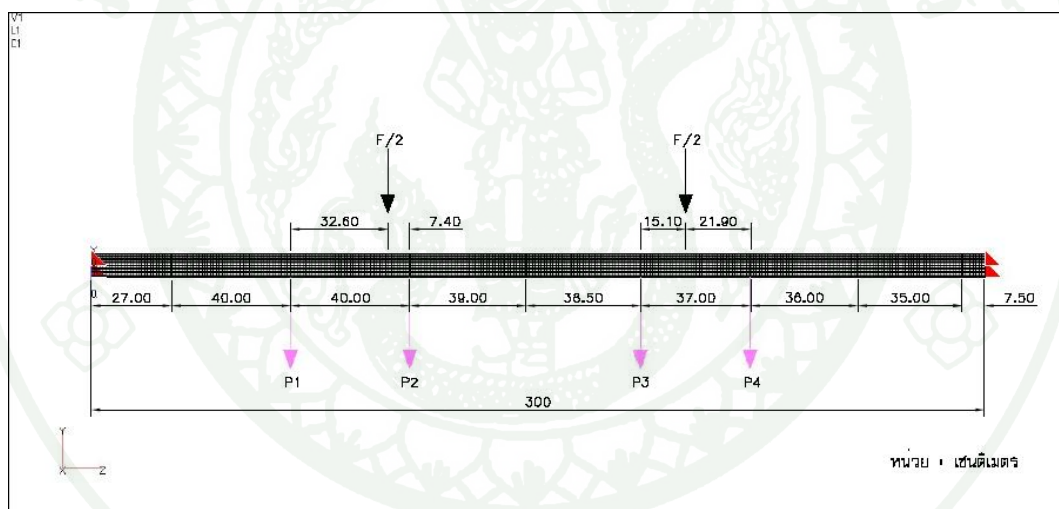
ภาพผนวกที่ 23 แบบจำลอง FEM ของคาน B-4



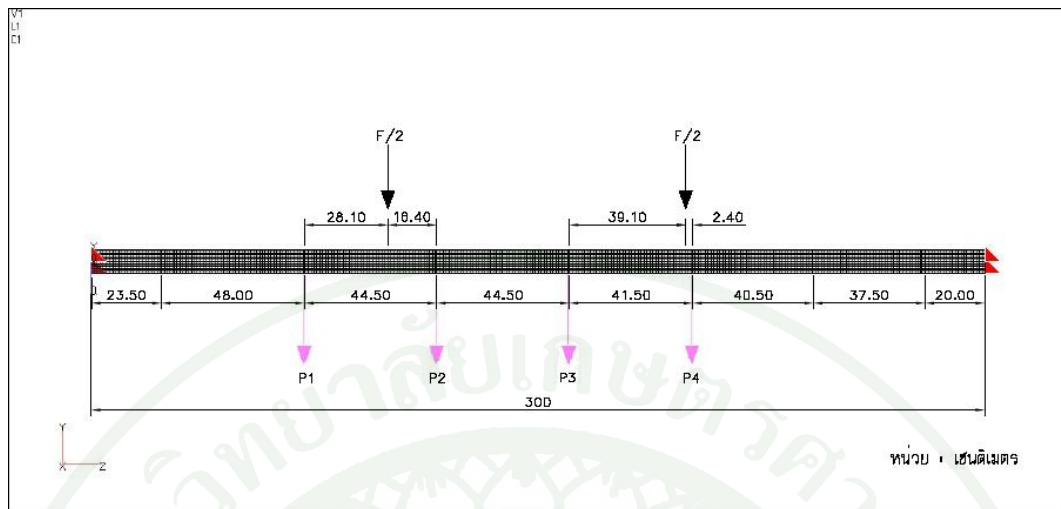
ภาพผนวกที่ 24 แบบจำลอง FEM ของคาน B-5



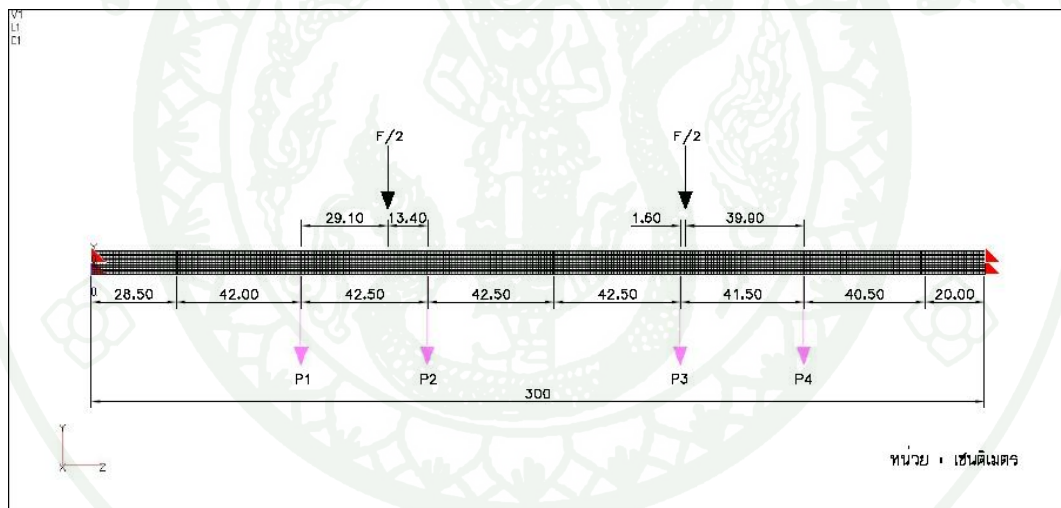
ภาพผนวกที่ 25 แบบจำลอง FEM ของคาน B-6



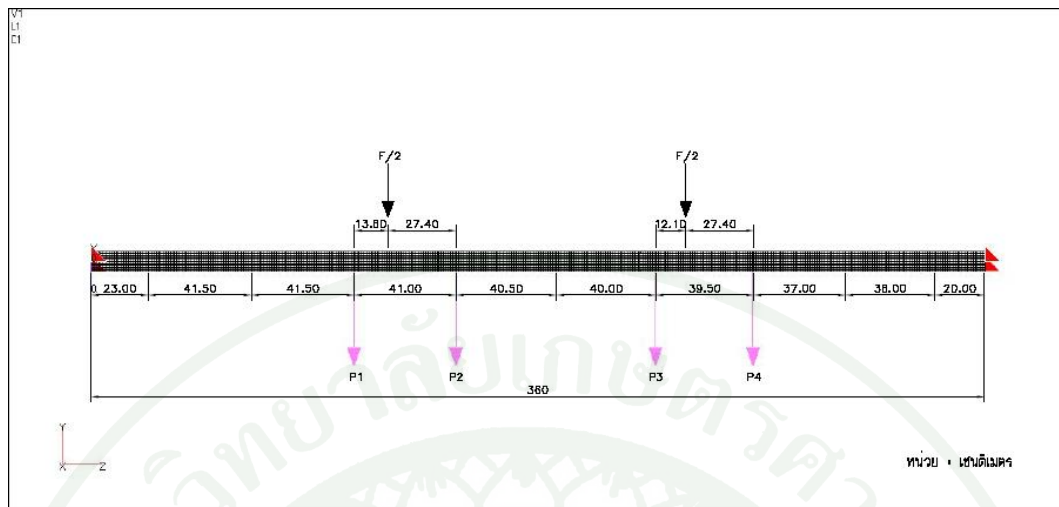
ภาพผนวกที่ 26 แบบจำลอง FEM ของคาน B-7



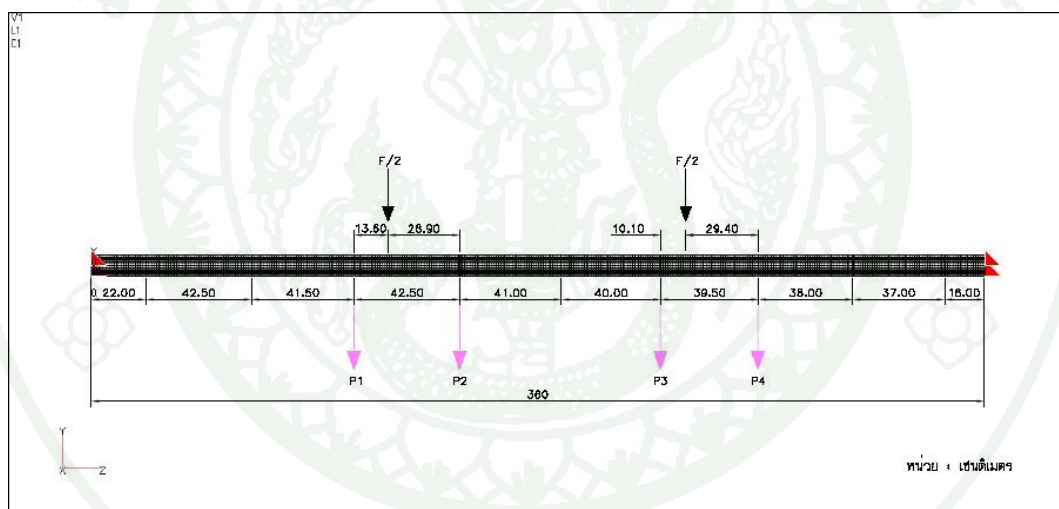
ภาพผนวกที่ 27 แบบจำลอง FEM ของคาน B-8



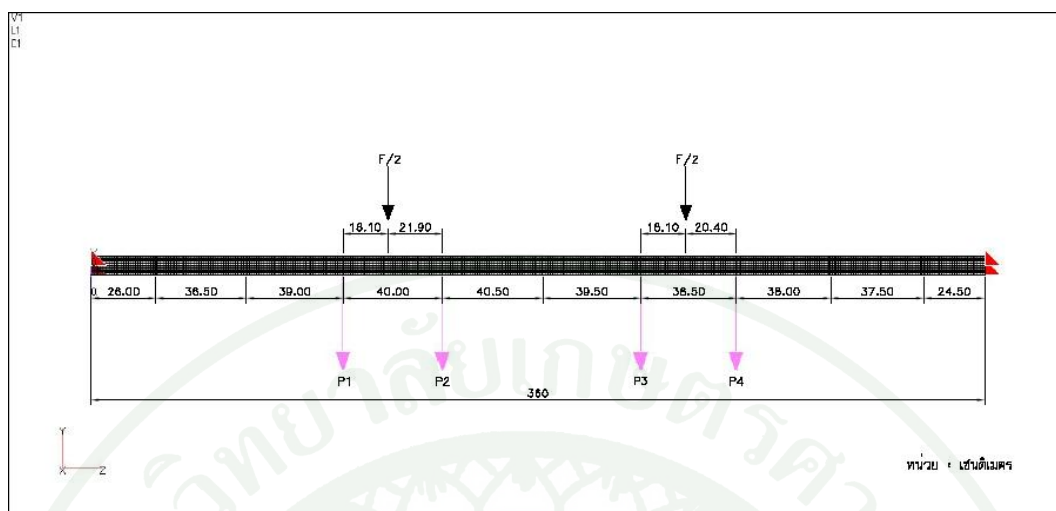
ภาพผนวกที่ 28 แบบจำลอง FEM ของคาน B-9



ภาพผนวกที่ 29 แบบจำลอง FEM ของคาน B-10



ภาพผนวกที่ 30 แบบจำลอง FEM ของคาน B-11



ภาพผนวกที่ 31 แบบจำลอง FEM ของคาน B-12

**ตารางผนวกที่ 1** ผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนบน

| No.              | B <sub>avg</sub> | t <sub>avg</sub> | A        | Pu       | Pu/A         | MC   | ρ           |
|------------------|------------------|------------------|----------|----------|--------------|------|-------------|
|                  |                  |                  | (ตร.ซม.) | (กก.)    | (กก./ตร.ซม.) | %    | (กก./ลบ.ม.) |
| T <sub>T1</sub>  | 0.860            | 1.535            | 1.320    | 1,070.00 | 810.54       | 9.3  | 807         |
| T <sub>T2</sub>  | 0.755            | 1.480            | 1.117    | 644.18   | 576.50       | 10.5 | 761         |
| T <sub>T3</sub>  | 0.940            | 1.360            | 1.278    | 885.04   | 692.30       | 12.5 | 782         |
| T <sub>T4</sub>  | 0.970            | 1.130            | 1.096    | 1,070.30 | 976.46       | 11.1 | 796         |
| T <sub>T5</sub>  | 0.975            | 1.285            | 1.253    | 672.76   | 536.97       | 8.0  | 785         |
| T <sub>T6</sub>  | 0.830            | 1.340            | 1.112    | 926.67   | 833.19       | 8.3  | 799         |
| T <sub>T7</sub>  | 1.000            | 1.270            | 1.270    | 878.91   | 692.06       | 7.1  | 785         |
| T <sub>T8</sub>  | 0.840            | 1.400            | 1.176    | 906.00   | 770.41       | 12.2 | 736         |
| T <sub>T9</sub>  | 1.010            | 1.510            | 1.525    | 1,086.70 | 712.54       | 11.5 | 863         |
| T <sub>T10</sub> | 0.975            | 1.455            | 1.419    | 929.12   | 654.94       | 11.5 | 783         |
| T <sub>T11</sub> | 0.845            | 1.370            | 1.158    | 704.19   | 608.29       | 7.7  | 849         |
| T <sub>T12</sub> | 0.945            | 1.315            | 1.243    | 847.89   | 682.31       | 6.5  | 891         |

**ตารางผนวกที่ 2** ผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตรงส่วนกลาง

| No.              | B <sub>avg</sub> | t <sub>avg</sub> | A<br>(ตร.ซม.) | Pu<br>(กก.) | Pu/A<br>(กก./ตร.ซม.) | MC<br>% | ρ<br>(กก./ลบ.ม.) |
|------------------|------------------|------------------|---------------|-------------|----------------------|---------|------------------|
| T <sub>M1</sub>  | 0.945            | 1.990            | 1.881         | 812.78      | 432.20               | 10.8    | 834              |
| T <sub>M2</sub>  | 0.950            | 2.270            | 2.157         | 990.36      | 459.24               | 10.6    | 779              |
| T <sub>M3</sub>  | 0.900            | 1.920            | 1.728         | 1,028.30    | 595.08               | 7.6     | 915              |
| T <sub>M4</sub>  | 0.795            | 1.845            | 1.467         | 825.00      | 562.46               | 8.7     | 781              |
| T <sub>M5</sub>  | 0.970            | 1.710            | 1.659         | 719.29      | 433.65               | 12.8    | 643              |
| T <sub>M6</sub>  | 0.880            | 1.505            | 1.324         | 853.60      | 644.52               | 8.3     | 776              |
| T <sub>M7</sub>  | 0.930            | 1.950            | 1.814         | 939.33      | 517.97               | 11.8    | 758              |
| T <sub>M8</sub>  | 0.875            | 1.770            | 1.549         | 634.79      | 409.87               | 10.2    | 738              |
| T <sub>M9</sub>  | 0.740            | 1.425            | 1.055         | 658.88      | 624.83               | 10.0    | 746              |
| T <sub>M10</sub> | 0.995            | 1.725            | 1.716         | 1,240.60    | 722.80               | 11.1    | 759              |
| T <sub>M11</sub> | 0.960            | 1.700            | 1.632         | 516.00      | 316.18               | 11.5    | 765              |
| T <sub>M12</sub> | 0.915            | 1.635            | 1.496         | 1,044.20    | 697.98               | 10.2    | 813              |

**ตารางผนวกที่ 3** ผลการทดสอบแรงดึงขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนล่าง

| No.              | B <sub>avg</sub> | t <sub>avg</sub> | A<br>(ตร.ซม.) | Pu<br>(กก.) | Pu/A<br>(กก./ตร.ซม.) | MC<br>% | ρ<br>(กก./ลบ.ม.) |
|------------------|------------------|------------------|---------------|-------------|----------------------|---------|------------------|
| T <sub>B1</sub>  | 0.940            | 2.125            | 1.998         | 1,059.30    | 530.31               | 11.0    | 782              |
| T <sub>B2</sub>  | 0.855            | 1.855            | 1.586         | 1,077.00    | 679.06               | 13.0    | 721              |
| T <sub>B3</sub>  | 0.960            | 2.100            | 2.016         | 1,132.00    | 561.51               | 15.2    | 719              |
| T <sub>B4</sub>  | 1.050            | 2.320            | 2.436         | 1,437.30    | 590.02               | 11.8    | 781              |
| T <sub>B5</sub>  | 0.910            | 2.095            | 1.906         | 1,408.30    | 738.70               | 9.3     | 641              |
| T <sub>B6</sub>  | 0.900            | 2.175            | 1.958         | 1,383.40    | 706.72               | 6.1     | 534              |
| T <sub>B7</sub>  | 0.985            | 1.980            | 1.950         | 1,161.00    | 595.29               | 13.7    | 745              |
| T <sub>B8</sub>  | 0.900            | 1.970            | 1.773         | 731.13      | 412.37               | 15.9    | 745              |
| T <sub>B9</sub>  | 0.945            | 2.115            | 1.999         | 1,199.70    | 600.25               | 13.2    | 770              |
| T <sub>B10</sub> | 0.915            | 1.750            | 1.601         | 947.90      | 591.98               | 12.1    | 754              |
| T <sub>B11</sub> | 1.100            | 2.420            | 2.662         | 1,978.60    | 743.28               | 15.5    | 730              |
| T <sub>B12</sub> | 0.895            | 2.170            | 1.942         | 1,068.30    | 550.06               | 11.5    | 704              |

ตารางผนวกที่ 4 ผลการทดสอบแรงอัดขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนบน

| No.              | D     | d     | t     | L     | A        | Pu     | Pu/A         | MC   | $\rho$      |
|------------------|-------|-------|-------|-------|----------|--------|--------------|------|-------------|
|                  | (ซม.) | (ซม.) | (ซม.) | (ซม.) | (ตร.ซม.) | (กก.)  | (กก./ตร.ซม.) | %    | (กก./ลบ.ม.) |
| C <sub>T1</sub>  | 9.245 | 7.254 | 1.001 | 9.384 | 25.904   | 15,861 | 612.31       | 9.0  | 936         |
| C <sub>T2</sub>  | 9.140 | 6.649 | 1.230 | 9.479 | 30.550   | 13,750 | 450.08       | 9.7  | 752         |
| C <sub>T3</sub>  | 7.553 | 5.533 | 1.009 | 8.086 | 20.738   | 15,097 | 727.99       | 8.7  | 1,016       |
| C <sub>T4</sub>  | 8.313 | 6.329 | 0.991 | 7.910 | 22.775   | 15,998 | 702.43       | 8.1  | 885         |
| C <sub>T5</sub>  | 9.273 | 6.885 | 1.213 | 9.860 | 30.686   | 20,086 | 654.56       | 11.6 | 843         |
| C <sub>T6</sub>  | 8.173 | 6.125 | 1.018 | 8.040 | 22.860   | 10,738 | 469.73       | 11.3 | 777         |
| C <sub>T7</sub>  | 8.168 | 5.988 | 1.083 | 8.296 | 24.094   | 14,207 | 589.65       | 8.2  | 744         |
| C <sub>T8</sub>  | 9.758 | 7.630 | 1.058 | 9.771 | 28.904   | 17,161 | 593.73       | 7.9  | 881         |
| C <sub>T9</sub>  | 7.941 | 5.650 | 1.145 | 8.159 | 24.435   | 14,353 | 587.41       | 7.3  | 618         |
| C <sub>T10</sub> | 9.730 | 7.844 | 0.944 | 9.566 | 26.052   | 16,110 | 618.37       | 8.6  | 820         |
| C <sub>T11</sub> | 7.871 | 5.750 | 1.101 | 7.639 | 23.399   | 13,104 | 560.02       | 10.2 | 836         |
| C <sub>T12</sub> | 7.966 | 5.493 | 1.234 | 8.016 | 26.082   | 13,710 | 525.66       | 8.0  | 879         |

ตารางผนวกที่ 5 ผลการทดสอบแรงอัดขนานเสี้ยนของลำไม้ไผ่ดงส่วนกลาง

| No.              | D      | d     | t     | L      | A        | Pu     | Pu/A         | MC   | $\rho$      |
|------------------|--------|-------|-------|--------|----------|--------|--------------|------|-------------|
|                  | (ซม.)  | (ซม.) | (ซม.) | (ซม.)  | (ตร.ซม.) | (กก.)  | (กก./ตร.ซม.) | %    | (กก./ลบ.ม.) |
| C <sub>M1</sub>  | 7.945  | 6.513 | 1.241 | 7.974  | 26.117   | 14,423 | 552.24       | 9.4  | 743         |
| C <sub>M2</sub>  | 10.164 | 7.676 | 1.226 | 10.494 | 34.413   | 20,613 | 598.99       | 15.9 | 818         |
| C <sub>M3</sub>  | 8.831  | 7.759 | 1.516 | 8.844  | 34.827   | 20,821 | 597.83       | 11.5 | 824         |
| C <sub>M4</sub>  | 7.748  | 5.469 | 1.139 | 7.709  | 23.631   | 14,524 | 614.62       | 6.3  | 806         |
| C <sub>M5</sub>  | 9.564  | 6.424 | 1.568 | 10.109 | 39.370   | 22,807 | 579.30       | 12.0 | 838         |
| C <sub>M6</sub>  | 7.993  | 5.074 | 1.451 | 7.480  | 29.808   | 20,748 | 696.06       | 9.9  | 829         |
| C <sub>M7</sub>  | 10.123 | 6.910 | 1.601 | 9.225  | 42.844   | 23,307 | 543.99       | 13.7 | 872         |
| C <sub>M8</sub>  | 8.811  | 6.459 | 1.158 | 9.005  | 27.831   | 18,489 | 664.34       | 11.8 | 809         |
| C <sub>M9</sub>  | 10.170 | 7.808 | 1.178 | 8.938  | 33.267   | 16,450 | 494.49       | 9.8  | 715         |
| C <sub>M10</sub> | 10.740 | 8.289 | 1.206 | 10.764 | 36.094   | 21,005 | 581.95       | 11.8 | 795         |
| C <sub>M11</sub> | 8.280  | 5.859 | 1.218 | 8.168  | 27.011   | 12,291 | 455.04       | 11.6 | 742         |
| C <sub>M12</sub> | 7.958  | 5.266 | 1.355 | 8.098  | 28.092   | 18,881 | 672.12       | 11.1 | 887         |

ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดสอบแรงอัดขนานเสี้ยนของลำไม้ไผ่ดงส่วนล่าง

| No.              | D      | d     | t     | L      | A        | Pu     | Pu/A         | MC   | $\rho$      |
|------------------|--------|-------|-------|--------|----------|--------|--------------|------|-------------|
|                  | (ซม.)  | (ซม.) | (ซม.) | (ซม.)  | (ตร.ซม.) | (กก.)  | (กก./ตร.ซม.) | %    | (กก./ลบ.ม.) |
| C <sub>B1</sub>  | 7.743  | 4.438 | 1.665 | 7.494  | 31.774   | 14,866 | 467.87       | 12.1 | 772         |
| C <sub>B2</sub>  | 8.621  | 5.004 | 1.800 | 7.901  | 38.554   | 21,685 | 562.46       | 19.1 | 783         |
| C <sub>B3</sub>  | 10.700 | 6.075 | 2.330 | 10.153 | 61.237   | 27,200 | 444.18       | 28.2 | 709         |
| C <sub>B4</sub>  | 10.650 | 6.875 | 1.875 | 10.220 | 51.663   | 25,491 | 493.41       | 16.0 | 875         |
| C <sub>B5</sub>  | 9.623  | 6.970 | 1.365 | 8.685  | 35.392   | 21,070 | 595.32       | 15.6 | 793         |
| C <sub>B6</sub>  | 10.496 | 6.188 | 2.139 | 10.363 | 56.126   | 25,159 | 448.26       | 16.9 | 740         |
| C <sub>B7</sub>  | 8.000  | 4.118 | 2.018 | 8.231  | 37.899   | 24,085 | 635.51       | 21.8 | 831         |
| C <sub>B8</sub>  | 10.433 | 6.915 | 1.754 | 9.063  | 47.792   | 26,808 | 560.93       | 19.6 | 800         |
| C <sub>B9</sub>  | 10.168 | 5.960 | 2.116 | 9.313  | 53.501   | 27,565 | 515.23       | 11.4 | 794         |
| C <sub>B10</sub> | 10.283 | 6.765 | 1.759 | 9.313  | 47.072   | 25,513 | 542.00       | 15.9 | 860         |
| C <sub>B11</sub> | 10.661 | 6.513 | 2.072 | 10.350 | 55.880   | 29,257 | 523.57       | 17.4 | 833         |
| C <sub>B12</sub> | 8.723  | 4.225 | 2.201 | 8.768  | 45.074   | 23,530 | 522.03       | 26.3 | 802         |

ตารางผนวกที่ 7 ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนบน

| No.                            | D<br>(ซม.) | Plane | t<br>(ซม.) | L<br>(ซม.) | Pu<br>(กก.) | $Pu/\Sigma(t \times L)$<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | MC<br>(%) | $\rho$<br>(กก./ม. <sup>3</sup> ) | Plane<br>of Failure |
|--------------------------------|------------|-------|------------|------------|-------------|----------------------------------------------------|-----------|----------------------------------|---------------------|
| S <sub>T1</sub><br>(With node) | 9.098      | 1     | 1.020      | 10.090     | 4,375.00    | 109.79                                             | 10.6      | 822                              | -                   |
|                                |            | 2     | 1.005      | 10.070     |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                |            | 3     | 0.920      | 10.120     |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                |            | 4     | 0.998      | 10.150     |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T2</sub><br>(With node) | 7.651      | 1     | 1.028      | 7.965      | 4,475.00    | 131.15                                             | 11.9      | 757                              | -                   |
|                                |            | 2     | 1.083      | 8.000      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                |            | 3     | 1.120      | 7.985      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                |            | 4     | 1.048      | 7.955      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T3</sub><br>(With node) | 8.249      | 1     | 1.018      | 7.870      | 3,500.00    | 110.98                                             | 11.8      | 816                              | -                   |
|                                |            | 2     | 1.050      | 7.920      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                |            | 3     | 0.975      | 7.900      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                |            | 4     | 0.950      | 7.905      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T4</sub><br>(With node) | 8.47       | 1     | 1.203      | 8.620      | 4,437.50    | 108.42                                             | 11.9      | 691                              | -                   |
|                                |            | 2     | 1.168      | 8.670      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                |            | 3     | 1.125      | 8.670      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                |            | 4     | 1.230      | 8.690      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T5</sub><br>(With node) | 8.321      | 1     | 1.225      | 8.040      | 3,311.50    | 84.04                                              | 15.5      | 686                              | -                   |
|                                |            | 2     | 1.205      | 8.210      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                |            | 3     | 1.223      | 8.280      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                |            | 4     | 1.170      | 8.165      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T6</sub><br>(With node) | 7.921      | 1     | 1.220      | 8.150      | 4,625.00    | 119.00                                             | 11.3      | 634                              | /                   |
|                                |            | 2     | 1.155      | 8.235      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                |            | 3     | 1.143      | 8.240      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                |            | 4     | 1.213      | 8.245      |             |                                                    |           |                                  | -                   |

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

| No.                                 | D<br>(ซม.) | Plane | t<br>(ซม.) | L<br>(ซม.) | Pu<br>(กก.) | $Pu/\Sigma(t \times L)$<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | MC<br>(%) | $\rho$<br>(กก./ม. <sup>3</sup> ) | Plane<br>of Failure |
|-------------------------------------|------------|-------|------------|------------|-------------|----------------------------------------------------|-----------|----------------------------------|---------------------|
| S <sub>T-1</sub><br>(With out node) | 9.140      | 1     | 1.025      | 9.355      | 3,750.00    | 98.83                                              | 8.5       | 760                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.053      | 9.200      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 0.953      | 9.300      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.043      | 9.415      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T-2</sub><br>(With out node) | 7.660      | 1     | 0.965      | 8.090      | 4,000.00    | 121.12                                             | 9.1       | 766                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.078      | 7.990      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 3     | 1.075      | 7.900      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.010      | 8.035      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T-3</sub><br>(With out node) | 8.136      | 1     | 1.000      | 7.930      | 2,700.00    | 89.29                                              | 10.0      | 859                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 0.935      | 8.060      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 3     | 0.908      | 7.990      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 4     | 0.943      | 7.980      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T-4</sub><br>(With out node) | 8.468      | 1     | 1.028      | 8.555      | 3,500.00    | 89.16                                              | 11.1      | 664                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.175      | 8.585      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 1.138      | 8.550      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.248      | 8.540      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T-5</sub><br>(With out node) | 8.146      | 1     | 1.170      | 8.535      | 3,625.00    | 91.68                                              | 9.5       | 741                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.185      | 8.510      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 1.118      | 8.610      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.145      | 8.600      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>T-6</sub><br>(With out node) | 7.975      | 1     | 1.080      | 8.000      | 4,500.00    | 118.90                                             | 11.6      | 729                              | /                   |
|                                     |            | 2     | 1.315      | 7.980      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 1.138      | 7.980      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 4     | 1.200      | 8.030      |             |                                                    |           |                                  | -                   |

ตารางผนวกที่ 8 ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนกลาง

| No.         | D      | Plane | t     | L      | Pu       | $Pu/\Sigma(t \times L)$ | MC   | $\rho$                 | Plane      |
|-------------|--------|-------|-------|--------|----------|-------------------------|------|------------------------|------------|
|             | (ซม.)  |       | (ซม.) | (ซม.)  | (กก.)    | (กก./ซม. <sup>2</sup> ) | (%)  | (กก./ม. <sup>3</sup> ) | of Failure |
| $S_{M1}$    | 10.109 | 1     | 1.375 | 10.580 | 5,250.00 | 99.07                   | 12.9 | 776                    | /          |
| (With node) |        | 2     | 1.243 | 10.400 |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 3     | 1.255 | 10.400 |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 4     | 1.180 | 10.570 |          |                         |      |                        | -          |
| $S_{M2}$    | 7.824  | 1     | 1.110 | 8.085  | 4,925.00 | 133.16                  | 12.1 | 680                    | -          |
| (With node) |        | 2     | 1.135 | 8.020  |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 3     | 1.230 | 8.040  |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 4     | 1.115 | 8.090  |          |                         |      |                        | -          |
| $S_{M3}$    | 8.116  | 1     | 1.500 | 7.700  | 4,500.00 | 96.87                   | 13.9 | 816                    | -          |
| (With node) |        | 2     | 1.555 | 7.740  |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 3     | 1.510 | 7.850  |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 4     | 1.418 | 7.770  |          |                         |      |                        | -          |
| $S_{M4}$    | 8.774  | 1     | 1.130 | 8.845  | 4,750.00 | 112.70                  | 12.5 | 787                    | -          |
| (With node) |        | 2     | 1.250 | 8.815  |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 3     | 1.178 | 8.885  |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 4     | 1.205 | 8.855  |          |                         |      |                        | /          |
| $S_{M5}$    | 8.398  | 1     | 1.310 | 8.280  | 4,250.00 | 99.37                   | 13.8 | 782                    | -          |
| (With node) |        | 2     | 1.270 | 8.330  |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 3     | 1.290 | 8.230  |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 4     | 1.305 | 8.220  |          |                         |      |                        | -          |
| $S_{M6}$    | 8.024  | 1     | 1.420 | 7.970  | 6,250.00 | 140.35                  | 12.7 | 640                    | /          |
| (With node) |        | 2     | 1.373 | 7.900  |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 3     | 1.435 | 7.800  |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 4     | 1.415 | 7.900  |          |                         |      |                        | -          |

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

| No.                                 | D<br>(ซม.) | Plane | t<br>(ซม.) | L<br>(ซม.) | Pu<br>(กก.) | $Pu/\Sigma(t \times L)$<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | MC<br>(%) | $\rho$<br>(กก./ม. <sup>3</sup> ) | Plane<br>of Failure |
|-------------------------------------|------------|-------|------------|------------|-------------|----------------------------------------------------|-----------|----------------------------------|---------------------|
| S <sub>M-1</sub><br>(With out node) | 10.863     | 1     | 1.150      | 10.300     | 6,125.00    | 124.90                                             | 14.7      | 746                              | /                   |
|                                     |            | 2     | 1.243      | 10.190     |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 1.145      | 10.250     |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 4     | 1.225      | 10.445     |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>M-2</sub><br>(With out node) | 7.688      | 1     | 1.105      | 7.770      | 4,675.00    | 136.50                                             | 8.9       | 849                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.080      | 7.820      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 3     | 1.075      | 7.730      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 4     | 1.145      | 7.780      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>M-3</sub><br>(With out node) | 7.833      | 1     | 1.435      | 7.540      | 3,550.00    | 81.92                                              | 12.0      | 657                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.520      | 7.610      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 1.380      | 7.680      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.360      | 7.610      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>M-4</sub><br>(With out node) | 8.628      | 1     | 1.085      | 8.870      | 5,275.00    | 132.01                                             | 10.1      | 843                              | /                   |
|                                     |            | 2     | 1.115      | 8.800      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 1.115      | 8.830      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 4     | 1.205      | 8.860      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>M-5</sub><br>(With out node) | 8.211      | 1     | 1.178      | 7.995      | 3,125.00    | 79.66                                              | 11.8      | 718                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.218      | 7.960      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 1.275      | 8.000      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.230      | 8.070      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>M-6</sub><br>(With out node) | 7.818      | 1     | 1.403      | 8.220      | 2,625.00    | 59.12                                              | 9.4       | 723                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.283      | 8.240      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 1.345      | 8.360      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.338      | 8.270      |             |                                                    |           |                                  | -                   |

ตารางผนวกที่ 9 ผลการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นของลำไม้ไผ่ตงส่วนล่าง

| No.         | D      | Plane | t     | L      | Pu       | $Pu/\Sigma(t \times L)$ | MC   | $\rho$                 | Plane      |
|-------------|--------|-------|-------|--------|----------|-------------------------|------|------------------------|------------|
|             | (ซม.)  |       | (ซม.) | (ซม.)  | (กก.)    | (กก./ซม. <sup>2</sup> ) | (%)  | (กก./ม. <sup>3</sup> ) | of Failure |
| $S_{B1}$    | 10.263 | 1     | 1.790 | 9.100  | 5,150.00 | 81.76                   | 14.0 | 784                    | /          |
| (With node) |        | 2     | 1.715 | 9.080  |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 3     | 1.635 | 9.160  |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 4     | 1.765 | 9.150  |          |                         |      |                        | -          |
| $S_{B2}$    | 8.654  | 1     | 1.905 | 8.285  | 4,800.00 | 78.56                   | 14.1 | 776                    | -          |
| (With node) |        | 2     | 1.865 | 8.140  |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 3     | 1.865 | 8.355  |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 4     | 1.725 | 8.435  |          |                         |      |                        | /          |
| $S_{B3}$    | 10.168 | 1     | 1.525 | 8.950  | 5,900.00 | 100.84                  | 14.5 | 871                    | -          |
| (With node) |        | 2     | 1.700 | 8.830  |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 3     | 1.705 | 8.880  |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 4     | 1.645 | 8.940  |          |                         |      |                        | -          |
| $S_{B4}$    | 10.316 | 1     | 2.103 | 7.490  | 7,425.00 | 118.58                  | 12.8 | 812                    | -          |
| (With node) |        | 2     | 1.948 | 7.620  |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 3     | 2.088 | 7.710  |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 4     | 2.105 | 7.570  |          |                         |      |                        | -          |
| $S_{B5}$    | 8.265  | 1     | 1.930 | 10.480 | 6,800.00 | 78.77                   | 12.7 | 928                    | -          |
| (With node) |        | 2     | 2.155 | 10.430 |          |                         |      |                        | /          |
|             |        | 3     | 2.130 | 10.470 |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 4     | 2.025 | 10.530 |          |                         |      |                        | -          |
| $S_{B6}$    | 10.408 | 1     | 2.010 | 10.350 | 9,000.00 | 108.40                  | 15.7 | 865                    | -          |
| (With node) |        | 2     | 2.030 | 10.330 |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 3     | 1.980 | 10.440 |          |                         |      |                        | -          |
|             |        | 4     | 1.975 | 10.420 |          |                         |      |                        | /          |

ตารางผนวกที่ 9 (ต่อ)

| No.                                 | D<br>(ซม.) | Plane | t<br>(ซม.) | L<br>(ซม.) | Pu<br>(กก.) | $Pu/\Sigma(t \times L)$<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | MC<br>(%) | $\rho$<br>(กก./ม. <sup>3</sup> ) | Plane<br>of Failure |
|-------------------------------------|------------|-------|------------|------------|-------------|----------------------------------------------------|-----------|----------------------------------|---------------------|
| S <sub>B-1</sub><br>(With out node) | 9.910      | 1     | 1.510      | 9.110      | 3,875.00    | 68.15                                              | 19.0      | 812                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.490      | 9.080      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 3     | 1.620      | 9.170      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.595      | 9.230      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>B-2</sub><br>(With out node) | 8.828      | 1     | 1.818      | 8.170      | 5,375.00    | 88.04                                              | 19.5      | 791                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.835      | 8.120      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 1.853      | 8.155      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.968      | 8.230      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>B-3</sub><br>(With out node) | 10.343     | 1     | 1.550      | 9.180      | 4,875.00    | 80.61                                              | 16.5      | 615                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.690      | 9.110      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 3     | 1.770      | 9.140      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 4     | 1.590      | 9.230      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>B-4</sub><br>(With out node) | 10.008     | 1     | 1.735      | 8.680      | 4,725.00    | 82.16                                              | 16.1      | 677                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 1.765      | 8.730      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 3     | 1.645      | 8.830      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.555      | 8.050      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
| S <sub>B-5</sub><br>(With out node) | 7.995      | 1     | 2.010      | 7.660      | 5,500.00    | 89.61                                              | 14.4      | 918                              | -                   |
|                                     |            | 2     | 2.050      | 7.670      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 2.000      | 7.630      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
|                                     |            | 4     | 1.960      | 7.650      |             |                                                    |           |                                  | /                   |
| S <sub>B-6</sub><br>(With out node) | 10.380     | 1     | 1.983      | 10.215     | 2,900.00    | 35.51                                              | 16.0      | 899                              | /                   |
|                                     |            | 2     | 1.895      | 9.975      |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 3     | 2.056      | 10.010     |             |                                                    |           |                                  | -                   |
|                                     |            | 4     | 2.153      | 10.190     |             |                                                    |           |                                  | -                   |

ตารางผนวกที่ 10 ผลการทดสอบแรงค้ำของลำไม้ไผ่ตง

| No.  | L<br>(มม.) | D<br>(มม.) | d<br>(มม.) | t<br>(มม.) | A<br>(มม. <sup>2</sup> ) | I <sub>B</sub><br>(มม. <sup>4</sup> ) | F <sub>ult</sub><br>(กก.) | $\sigma_{ult}$<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | E<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | MC<br>% | $\rho$<br>(กก./ม. <sup>3</sup> ) | Mode of Failure |
|------|------------|------------|------------|------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------|----------------------------------|-----------------|
| B-1  | 2,500      | 89.63      | 66.25      | 11.69      | 2,862                    | 2,220,542                             | 1,297                     | 1,091                                     | 205,781                      | 10.9    | 770                              | Shear           |
| B-2  | 2,500      | 92.68      | 67.73      | 12.45      | 3,138                    | 2,583,887                             | 1,324                     | 989                                       | 182,206                      | 11.5    | 740                              | Bending         |
| B-3  | 2,500      | 90.43      | 61.70      | 14.21      | 3,402                    | 2,554,677                             | 1,470                     | 1,084                                     | 172,114                      | 12.0    | 743                              | Shear           |
| B-4  | 2,500      | 79.91      | 54.70      | 12.68      | 2,677                    | 1,565,985                             | 939                       | 998                                       | 171,357                      | 11.3    | 847                              | Shear           |
| B-5  | 2,500      | 91.35      | 62.69      | 14.06      | 3,413                    | 2,631,919                             | 1,087                     | 786                                       | 177,194                      | 12.1    | 815                              | Weak Plane      |
| B-6  | 2,500      | 85.78      | 56.28      | 14.65      | 3,273                    | 2,156,698                             | 1,336                     | 1,107                                     | 171,491                      | 12.6    | 1,392                            | Bending+Shear   |
| B-7  | 3,000      | 78.25      | 50.98      | 13.58      | 2,759                    | 1,505,245                             | 624                       | 811                                       | 160,291                      | 10.3    | 749                              | *               |
| B-8  | 3,000      | 82.73      | 57.28      | 12.39      | 2,738                    | 1,744,892                             | 698                       | 828                                       | 160,931                      | 13.7    | 712                              | Shear           |
| B-9  | 3,000      | 82.76      | 56.28      | 13.17      | 2,879                    | 1,804,567                             | 829                       | 951                                       | 180,086                      | 11.7    | 819                              | *               |
| B-10 | 3,600      | 86.30      | 62.09      | 12.16      | 2,833                    | 1,997,608                             | 613                       | 794                                       | 181,705                      | 13.0    | 788                              | Bending         |
| B-11 | 3,600      | 87.38      | 67.06      | 10.19      | 2,470                    | 1,870,890                             | 552                       | 773                                       | 195,185                      | 11.1    | 797                              | Bending         |
| B-12 | 3,600      | 76.46      | 53.78      | 11.41      | 2,331                    | 1,270,571                             | 446                       | 805                                       | 183,409                      | 10.6    | 403                              | *               |

หมายเหตุ \* เครื่องทดสอบ UTM หยุดเนื่องจากเกิดการโก่งตัวมาก

**ตารางผนวกที่ 11** ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงดึงขนานเส้น

|                             | หน่วยแรงดึงสูงสุด<br>(กก./ตร.ซม.) | % ความชื้น | ความหนาแน่น<br>(กก./ลบ.ม.) |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------|----------------------------|
| Maximum                     | 976                               | 15.9       | 915                        |
| Minimum                     | 316                               | 6.1        | 534                        |
| Mean                        | 618                               | 10.8       | 766                        |
| Standard Deviation          | 134.24                            | 2.42       | 68.43                      |
| Relative Standard Deviation | 21.71                             | 22.44      | 8.94                       |
| Count                       | 36                                | 36         | 36                         |

**ตารางผนวกที่ 12** ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงอัดขนานเส้น

|                             | หน่วยแรงอัดสูงสุด<br>(กก./ตร.ซม.) | % ความชื้น | ความหนาแน่น<br>(กก./ลบ.ม.) |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------|----------------------------|
| Maximum                     | 728                               | 28.2       | 1,016                      |
| Minimum                     | 444                               | 6.3        | 618                        |
| Mean                        | 568                               | 12.9       | 813                        |
| Standard Deviation          | 75.71                             | 5.17       | 71.00                      |
| Relative Standard Deviation | 13.33                             | 40.12      | 8.74                       |
| Count                       | 36                                | 36         | 36                         |

**ตารางผนวกที่ 13** ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นกรีนี่มีข้อ

|                             | หน่วยแรงเฉือนสูงสุด<br>(กก./ตร.ซม.) | % ความชื้น | ความหนาแน่น<br>(กก./ลบ.ม.) |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------|----------------------------|
| Maximum                     | 140                                 | 15.7       | 928                        |
| Minimum                     | 79                                  | 10.6       | 634                        |
| Mean                        | 106                                 | 13.0       | 774                        |
| Standard Deviation          | 18.37                               | 1.40       | 80.56                      |
| Relative Standard Deviation | 17.30                               | 10.72      | 10.42                      |
| Count                       | 18                                  | 18         | 18                         |

**ตารางผนวกที่ 14** ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงเฉือนขนานเส้นกรีนี่ไม่มีข้อ

|                             | หน่วยแรงเฉือนสูงสุด<br>(กก./ตร.ซม.) | % ความชื้น | ความหนาแน่น<br>(กก./ลบ.ม.) |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------|----------------------------|
| Maximum                     | 136                                 | 19.5       | 918                        |
| Minimum                     | 36                                  | 8.5        | 615                        |
| Mean                        | 93                                  | 12.68      | 765                        |
| Standard Deviation          | 26.16                               | 3.56       | 85.60                      |
| Relative Standard Deviation | 28.24                               | 28.05      | 11.19                      |
| Count                       | 18                                  | 18         | 18                         |

**ตารางผนวกที่ 15** ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงดัด (L<30D)

|                             | หน่วยแรงดัด<br>สูงสุด<br>(กก./ตร.ซม.) | โมดูลัสของ<br>ความยืดหยุ่น<br>(กก./ตร.ซม.) | % ความชื้น | ความหนาแน่น<br>(กก./ลบ.ม.) |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|------------|----------------------------|
| Maximum                     | 1,107                                 | 205,781                                    | 12.6       | 1,392                      |
| Minimum                     | 989                                   | 171,491                                    | 10.9       | 740                        |
| Mean                        | 1,068                                 | 181,757                                    | 11.8       | 892                        |
| Standard Deviation          | 53.23                                 | 14,112                                     | 0.64       | 281                        |
| Relative Standard Deviation | 4.99                                  | 7.76                                       | 5.45       | 31.51                      |
| Count                       | 5                                     | 5                                          | 5          | 5                          |

**ตารางผนวกที่ 16** ผลการคำนวณทางสถิติของการทดสอบแรงดัด (L>30D)

|                             | หน่วยแรงดัด<br>สูงสุด<br>(กก./ตร.ซม.) | โมดูลัสของ<br>ความยืดหยุ่น<br>(กก./ตร.ซม.) | % ความชื้น | ความหนาแน่น<br>(กก./ลบ.ม.) |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|------------|----------------------------|
| Maximum                     | 998                                   | 195,185                                    | 13.7       | 847                        |
| Minimum                     | 773                                   | 160,291                                    | 10.3       | 403                        |
| Mean                        | 851                                   | 176,138                                    | 11.7       | 731                        |
| Standard Deviation          | 86.70                                 | 12,698                                     | 1.26       | 151.10                     |
| Relative Standard Deviation | 10.18                                 | 7.21                                       | 10.78      | 20.68                      |
| Count                       | 7                                     | 7                                          | 7          | 7                          |

ตารางผนวกที่ 17 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล FEM กับผลการทดสอบที่ช่วง 0-50%

| No.  | L<br>(มม.) | D<br>(มม.) | L/D | $R^2_{50\%}$ | $R^2_{50\%avg}$ |
|------|------------|------------|-----|--------------|-----------------|
| B-1  | 2,500      | 89.63      | 28  | 0.979        | 0.94            |
| B-2  | 2,500      | 92.68      | 27  | 0.953        |                 |
| B-3  | 2,500      | 90.43      | 28  | 0.921        |                 |
| B-5  | 2,500      | 91.35      | 27  | 0.957        |                 |
| B-6  | 2,500      | 85.78      | 29  | 0.884        |                 |
| B-4  | 2,500      | 79.91      | 31  | 0.930        |                 |
| B-7  | 3,000      | 78.25      | 38  | 0.900        | 0.93            |
| B-8  | 3,000      | 82.73      | 36  | 0.930        |                 |
| B-9  | 3,000      | 82.76      | 36  | 0.957        |                 |
| B-10 | 3,600      | 86.30      | 42  | 0.948        | 0.96            |
| B-11 | 3,600      | 87.38      | 41  | 0.979        |                 |
| B-12 | 3,600      | 76.46      | 47  | 0.954        |                 |

ตารางผนวกที่ 18 ค่ากลสมบัติของไม้ชนิดต่างๆ

| ชื่อ       | ความกว้าง<br>จำเพาะ | น้ำหนัก     | หน่วยแรงดัด<br>หรือหน่วยแรง<br>ดึงขนานเส้น<br>ยัดหยุ่น | โมดูลัส<br>แห่งความ<br>ยัดหยุ่น | หน่วยแรงอัด<br>ขนานเส้น<br>ขวางเส้น | หน่วยแรงเฉือน<br>ขนานเส้น | ชนิดของไม้<br>ตามมาตรฐาน<br>ว.ส.ท. |
|------------|---------------------|-------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
|            |                     | (กก./ลบ.ม.) | (กก./ซม. <sup>2</sup> )                                | (กก./ซม. <sup>2</sup> )         | (กก./ซม. <sup>2</sup> )             | (กก./ซม. <sup>2</sup> )   |                                    |
| กะท้อน     | 0.57                | 580         | 485                                                    | 74,927                          | 194                                 | 77                        | ไม้เนื้ออ่อนมาก                    |
| จำปาป่า    | 0.51                | 500         | 553                                                    | 76,102                          | 279                                 | 71                        | ไม้เนื้ออ่อนมาก                    |
| จิกนม      | 0.65                | 630         | 463                                                    | 64,644                          | 210                                 | 87                        | ไม้เนื้ออ่อนมาก                    |
| เฟิง       | 0.53                | 531         | 581                                                    | 89,542                          | 332                                 | 55                        | ไม้เนื้ออ่อนมาก                    |
| ชมหมอม     | 0.53                | 530         | 605                                                    | 83,864                          | 230                                 | 58                        | ไม้เนื้ออ่อนมาก                    |
| ยางขาว     | 0.70                | 690         | 612                                                    | 89,929                          | 312                                 | 65                        | ไม้เนื้ออ่อนมาก                    |
| สองสลิ้ง   | 0.44                | 450         | 467                                                    | 73,481                          | 105                                 | 60                        | ไม้เนื้ออ่อนมาก                    |
| กรวด       | 0.87                | 870         | 656                                                    | 92,563                          | 296                                 | 105                       | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| กระเจา     | 0.71                | 700         | 648                                                    | 88,956                          | 246                                 | 104                       | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| กะบาก      | 0.74                | 740         | 770                                                    | 105,017                         | 217                                 | 62                        | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| ตะบูนขาว   | -                   | 590         | 649                                                    | 89,438                          | 365                                 | 99                        | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| ทำม้ง      | 0.56                | 550         | 662                                                    | 95,374                          | -                                   | 42                        | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| พญาไม้     | 0.67                | 570         | 645                                                    | 87,152                          | 310                                 | 63                        | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| พะยอม      | 0.82                | 730         | 717                                                    | 94,099                          | 340                                 | 97                        | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| ยางแดง     | -                   | 760         | 739                                                    | 113,651                         | 367                                 | 65                        | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| สัก        | 0.62                | 630         | 641                                                    | 81,573                          | 327                                 | 80                        | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| อินทนิล    | 0.65                | 640         | 697                                                    | 92,720                          | 340                                 | 77                        | ไม้เนื้ออ่อน                       |
| ก๊วว       | 0.69                | 690         | 806                                                    | 97,770                          | 378                                 | 120                       | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| ตะเคียนทอง | 0.77                | 760         | 816                                                    | 104,940                         | 354                                 | 116                       | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| ตะเคียนหนู | 0.86                | 860         | 841                                                    | 94,503                          | 288                                 | 170                       | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| ตะแบก      | 0.72                | 720         | 808                                                    | 112,556                         | 374                                 | 105                       | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| ดาเสื่อ    | 0.74                | 750         | 867                                                    | 124,100                         | 500                                 | 102                       | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| นนทรี      | 0.82                | 810         | 813                                                    | 107,931                         | 346                                 | 113                       | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| พลวง       | 0.94                | 940         | 939                                                    | 129,683                         | 351                                 | 99                        | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| มะค่าแต้   | 0.99                | 990         | 954                                                    | 125,800                         | 357                                 | 231                       | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| ยูง        | 0.75                | 720         | 806                                                    | 120,586                         | 364                                 | 68                        | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| รกฟ้า      | 1.14                | 1,130       | 854                                                    | 111,315                         | 334                                 | 155                       | ไม้เนื้อปานกลาง                    |
| เหียง      | 0.90                | 900         | 816                                                    | 102,754                         | 358                                 | 119                       | ไม้เนื้อปานกลาง                    |

### ตารางผนวกที่ 18 (ต่อ)

| ชื่อ         | ความกว้าง<br>จำเพาะ | น้ำหนัก     | หน่วยแรงคัต<br>หรือหน่วยแรง<br>ดึงขนานเส้น<br>คัตหุ่น | โมดูลัส<br>แห่งความ<br>ยืดหยุ่น | หน่วยแรงอัด<br>ขนานเส้น<br>ขวางเส้น | หน่วยแรงเฉือน<br>ขนานเส้น | ชนิดของไม้<br>ตามมาตรฐาน<br>ว.ส.ท. |
|--------------|---------------------|-------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
|              |                     | (กก./ลบ.ม.) | (กก./ซม. <sup>2</sup> )                               | (กก./ซม. <sup>2</sup> )         | (กก./ซม. <sup>2</sup> )             | (กก./ซม. <sup>2</sup> )   |                                    |
| กันเกรา      | 0.93                | 920         | 999                                                   | 154,865                         | 388                                 | 125                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| แดง          | 1.05                | 1,050       | 1,193                                                 | 153,129                         | 538                                 | 219                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| ตะคร้อไข่    | 1.11                | 1,080       | 1,189                                                 | 148,141                         | 442                                 | 232                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| ตะคร้อหนาม   | 1.11                | 1,110       | 960                                                   | 138,533                         | 350                                 | 230                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| ตะบูนดำ      | -                   | 880         | 1,038                                                 | 114,880                         | 494                                 | 154                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| เต็ง         | 1.07                | 1,070       | 924                                                   | 115,464                         | 443                                 | 184                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| ประดู่       | 0.82                | 840         | 1,163                                                 | 128,448                         | 495                                 | 201                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| มะเกลือเลือด | 1.02                | 1,020       | 1,131                                                 | 137,613                         | 425                                 | 235                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| มะค่าโมง     | 0.85                | 850         | 996                                                   | 101,721                         | 463                                 | 121                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| ขมหิน        | 0.86                | 870         | 1,088                                                 | 131,629                         | 350                                 | 174                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| รัง          | 1.15                | 1,060       | 1,108                                                 | 153,607                         | 496                                 | 182                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| เลียงมัน     | 0.98                | 990         | 1,155                                                 | 161,506                         | 463                                 | 172                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| สักขี้ควาย   | 0.88                | 880         | 1,063                                                 | 131,968                         | 467                                 | 184                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| เสลา         | 0.72                | 720         | 966                                                   | 113,791                         | 450                                 | 118                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| หลุมพอ       | -                   | 850         | 1,070                                                 | 137,543                         | 569                                 | 103                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| แอ็ก         | 0.78                | 870         | 1,060                                                 | 136,953                         | 388                                 | 136                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| เกี่ยม       | 0.91                | 960         | 1,489                                                 | 148,900                         | 576                                 | 157                       | ไม้เนื้อแข็ง                       |
| กะพี้เขาคาว  | 1.09                | 1,090       | 1,357                                                 | 145,380                         | 500                                 | 217                       | ไม้เนื้อแข็งมาก                    |
| เขลียง       | 1.10                | 1,100       | 1,206                                                 | 197,795                         | 725                                 | 267                       | ไม้เนื้อแข็งมาก                    |
| ซาก          | 1.09                | 1,120       | 1,463                                                 | 189,947                         | 551                                 | 306                       | ไม้เนื้อแข็งมาก                    |
| ตีนนก        | 0.99                | 990         | 1,283                                                 | 181,021                         | 482                                 | 225                       | ไม้เนื้อแข็งมาก                    |
| นุนนาค       | 1.12                | 1,120       | 1,519                                                 | 230,689                         | 519                                 | 211                       | ไม้เนื้อแข็งมาก                    |

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

|                      |                                                                                             |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ – นามสกุล       | นายเอกลักษณ์ คงยงค์                                                                         |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด | 15 มิถุนายน พ.ศ. 2528                                                                       |
| สถานที่เกิด          | อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์                                                          |
| ประวัติการศึกษา      | วศ.บ. (โยธา-ชลประทาน) วิทยาลัยการชลประทาน<br>สถาบันสมทบมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2550          |
| ประวัติการทำงาน      | พ.ศ. 2552-ปัจจุบัน วิศวกรโยธาปฏิบัติการ<br>สำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม<br>กรมชลประทาน |