บทที่ 4

ผลและอภิปรายผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการดึง การอัด และการดัดสถิตย์เพื่อหาความแข็งแรงของโอเอสแอล ชิ้นทดสอบมีแบบการเรียง 3 แบบแความยาวแถบไม้ 3 ขนาด แบบการเรึง 3 แบบคือ แบบ 0 (Type 0) เรียงมุม 0° ทุกชั้นเป็นคอลโทรลทรีตเมนต์เพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบ แบบ I (Type I) เรียงแถบไม้ตลอดความหนา 20 ชั้น เรียงมุมตามที่ได้คำนวณทางทฤษฎีโยแบบการเรียงเป็นดังนี้คือ $[29°, 25°, 21°, 16°, 9°, 0°, -6°, -8°, -6°, -11°]_A$ และแบบ II (Type II) เรียงแถบไม้เฉพาะชั้นนอก 10 ชั้นส่วนแกนกลาง 10 ชั้นเรียงแถบไม้ตามแนวยาว (0°) เรียงมุมตามที่ได้คำนวณทางทฤษฎีเป็นดังนี้ [26°, 22°, 18°, 12°, 5°, 0°, 0°, 0°, 0°, 0°]A ความยาวแถบไม้ 3 ขนาดคือ 15 เซนติเมตร 10 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร การทดสอบการดึงและการอัดทำกับแบบการเรียงเพียงแบบเดียวคือ แบบ 0 แต่มีความยาวแถบไม่ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ส่วนการทดสอบการดัดสถิตย์จะเปรียบเทียบการเรียงใน 2 ลักษณธคือ ลักษณธแรกเปรียบเทียบ แบบ 0 แบ แบบ I และ แบบ II เพื่อดูว่าผลกาเรียงตามที่ได้ออกแบบไว้ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าหรือไม่ และลักษณธที่สองเปรียบเทียบ แบบ I และ แบบ II เพื่อดูว่าการเรียงในชั้นบริเวณกึ่งกลางมีผลต่อความแข็งแรงหรือไม่ นอกจากนั้นการทดสอบการดัดสถิตย์ยังมีปัจจัยที่ 2 นอกเหนือจากปัจจัยการเรียงแถบไม้อีกคือ ปัจจัยทางด้านความยาวแถบไม้ด้วย ความแข็งแรงของชิ้นทดสอบคิดเป็นความแข็งแรงจำเพาะเพื่อเปรียบเทียบชิ้นทดสอบที่มีความถ่วงจำเพาะแตกต่างกันได้ และการวิเคราะห์ความแหรหรวนนำมาใช้เพื่อทดสอบความแตกต่างของผลการทดสอบ

4.2 การคำนวณสมบัติต่าง ๆ

ค่าผลการทดสอบต่าง ๆ คำนวณโดยหลักการดังต่อไปนี้

4.2.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ความถ่วงจำเพาะคำนวณจากน้ำหนักอบแห้งหารด้วยปริมาตรหลังจากปรับสภาพในห้องควบคุมบรรยากาศที่อุณหภูมิ 20±1°C ความชื้นสัมพัทธ์ 65±1% และหารด้วยความหนาแน่นของน้ำ (1000 kg/m^3)

4.2.2 ความชื้น (Moisture content)

ความชื้นคำนวณจากผลต่างของน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างก่อนและหลังอบแห้งหารด้วยน้ำหนักชิ้นตัวอย่างหลังอบแห้ง ตามสมการ

$$\%MC = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \qquad \text{.....(4.1)}$$

เมื่อ %MC คือ ความชื้น มีหน่วยเป็น ร้อยละ

m_1 คือ น้ำหนักก่อนอบแห้ง มีหน่วยเป็น กรัม (g)

m_0 คือ น้ำหนักหลังอบแห้ง มีหน่วยเป็น กรัม (g)

ความถ่วงจำเพาะและความชื้นของชิ้นทดสอบได้จากชิ้นตัวอย่างที่ตัดจากชิ้นทดสอบบริเวณที่ใกล้กับจุดเสียหายมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ยกเว้นการทดสอบการอัดที่ใช้ชิ้นทดสอบทั้งชิ้น

4.2.3 <u>ความเค้นสูงสุด</u> (Maximum stress)

ความเค้นสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถรับได้หรือโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture : MOR) สำหรับการดัดสถิตย์จะเป็นค่าความแข็งแรงของโอเอสแอล (strength of OSL) และสามารถอ่านค่าได้จากเครื่องทดสอบโดยเครื่องทดสอบอ่านค่าแรงกดจาก load cell แล้วนำข้อมูลที่ได้คำนวณเป็นความเค้น โดยต้องป้อนค่าความยาวช่วงพาด (span) และขนาดของชิ้นทดสอบให้แก่หน่วยประมวลผลของเครื่องทดสอบ การคำนวณความเค้นสำหรับการดัดสถิตย์เมื่อแกนสะเทิน (neutral axis) อยู่กึ่งกลางหน้าตัด ค่าความเค้นสูงสุดจากการทดสอบได้จากสมการ

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \qquad \text{.....(4.2)}$$

เมื่อ σ_{max} คือ ความเค้นสูงสุด มีหน่วยเป็น พาสคาล (Pa)

M คือ โมเมนต์ดัด มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร (N·m) ได้จากสมการ

$$M = \frac{F_{max}L}{4} \qquad \text{.....(4.3)}$$

เมื่อ F_{max} คือ แรงกดสูงสุด (maximum load) มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

L คือ ความยาวช่วงพาดมีหน่วยเป็น เมตร (m)

c คือ ระยะห่างมากสุดจากแกนสะเทินซึ่งมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความหนา มีหน่วยเป็น เมตร (m)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) มีหน่วยเป็น เมตร^4 (m^4)

คำนวณจากสมการ

$$I = \frac{bd^3}{12} \qquad \text{.....(4.4)}$$

เมื่อ b คือ ความกว้างชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

d คือ ความหนาชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

4.2.4 <u>โมดูลัสยืดหยุ่น</u> (Modulus of Elasticity)

โมดูลัสยืดหยุ่นสำหรับการดัดสถิตย์ คำนวณจากสมการ

$$MOE = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(d_2 - d_1)} \qquad \text{.....(4.5)}$$

เมื่อ MOE คือ โมดูลัสยืดหยุ่น มีหน่วยเป็น พาสคาล (Pa)

L คือ ความยาวช่วงพาด มีหน่วยเป็น เมตร (m)

b คือ ความกว้างชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

t คือ ความหนาชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

$F_2 - F_1$ คือ น้ำหนักบรรทุก (load) ที่เพิ่มขึ้นในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งจากการทดสอบโดย F_1เท่ากับ 10% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและ F_2 เท่ากับ 40 % ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด F_{max} (EN 310 : 1993)มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

$d_2 - d_1$ คือ ระยะโก่ง (deflection) ที่เพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นทดสอบที่ตรงกับน้ำหนักบรรทุก $F_2 - F_1$ แสดงดังรูปที่ 1 มีหน่วยเป็น เมตร (m)

4.2.5 <u>ความเค้นสูงสุดจำเพาะ</u> (Specific maximum stress)

ความเค้นสูงสุดจำเพาะหรือความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นสูงสุดต่อความถ่วงจำเพาะ

4.2.6 <u>โมดูลัสยืดหยุ่นจำเพาะ</u> (Specific MOE)

โมดูลัสยืดหยุ่นจำเพาะคืออัตราส่วนระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น (MOE) ต่อความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

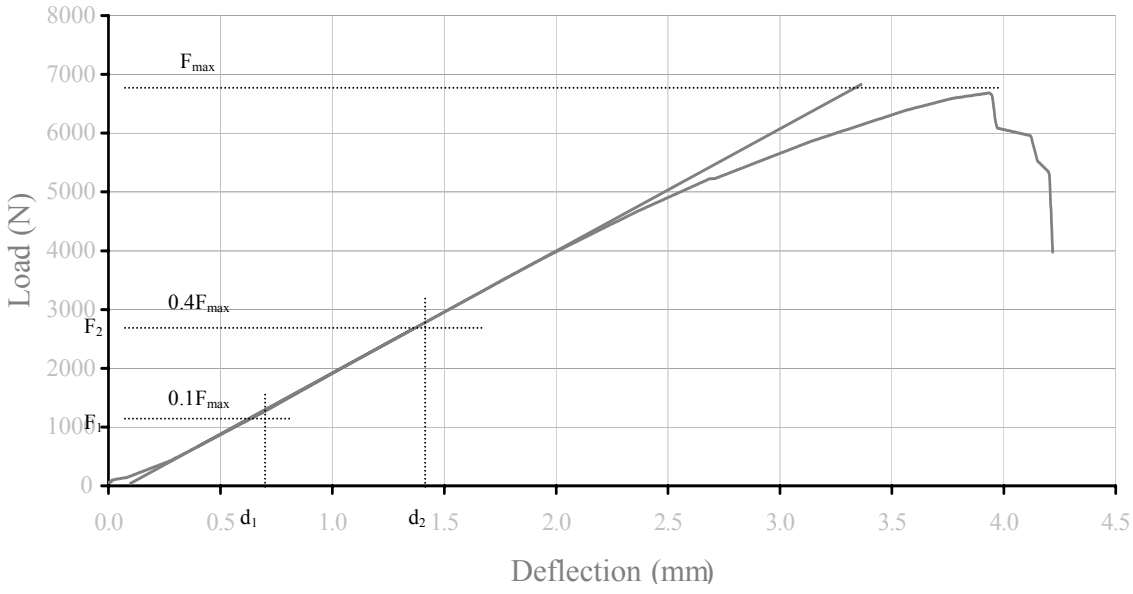


Fig. 4.1 Typical load-deflection curve.

4.2.7 <u>สัมประสิทธิ์ความผันแปร</u> (Coefficient of variation : %CV)

สัมประสิทธิ์ความแปรผันคำนวณได้จากสมการ

$$\%CV = \frac{S.D.}{Mean} \times 100 \qquad \text{……..(4.6)}$$

เมื่อ S.D. คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

Mean คือ ค่าเฉลี่ย

โดยปกติ %CV จะมีค่าคงที่หรือมีช่วงที่แน่นอนเป็นค่าที่แสดงถึงธรรมชาติของสิ่งที่ทดลอง หากผลการทดสอบมีค่า %CV น้อยกว่าตามธรรมชาติก็จะหมายความว่าผลการทดสอบนั้นมีความน่าเชื่อถือสูง ดังนั้นเราอาจใช้ %CV เป็นตัววัดชี้ความถูกต้องเที่ยงตรงของแต่ละการทดสอบได้อีกทางหนึ่ง ตัวอย่างสำหรับ %CV ของสมบัติเชิงกลบางอย่างของไม้จริงแสดงไว้ดัง Table 4.1

Table 4.1 Average coefficients of variation for some properties of clear wood

Mechanical Property	Coefficient of variation (%)
Static Bending	
Modulus of rupture	16
Modulus of elasticity	22
Compression parallel to grain	18
Compressive perpendicular to grain	28
Tension parallel to grain	25
Specific gravity	10

Source : Wood Handbook USDA, 1999 : Chapter 4, page 4-23

4.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแสดงค่าเฉลี่ยและร้อยละความผันแปรจากจำนวนชิ้นทดสอบ 3 ซ้ำ แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 การทดสอบคือ การทดสอบการดึง การทดสอบการอัด และการทดสอบการดัดสถิตย์ ส่วนผลการทดสอบเบื้องต้นแสดงไว้ใน Appendix E

การทดสอบการดึงและการอัดมีแบบการเรียงโอเอสแอลแบบเดียวเท่านั้นคือ แบบ 0 (Type 0) เรียงมุม 0° ทุกชั้น แต่ละชิ้นทดสอบจะถูกทดสอบใน 2 ทิศทางคือ

- ทิศทางตามเสี้ยน (Parallel to grain direction) ใช้สัญลักษณ์ Pa
- ทิศทางตั้งฉากกับเสี้ยน (Perpendicular to grain direction) ใช้สัญลักษณ์ Pe

การทดสอบการดัดสถิตย์มีแบบการเรียง 3 แบบและขนาดแถบไม้ 3 ขนาดคือ

แบบ 0 (Type 0) เป็นคอนโทรลทรีตเมนต์ เพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบ

แบบ I (Type I)การเรียงแถบไม้ตลอดความหนา 20 ชั้น เรียงมุมตามที่ได้คำนวณทางทฤษฎี แบบการเรียงเป็นดังนี้ $[\ 29^o, 25^o, 21^o, 16^o, 9^o, 0^o, -6^o, -8^o, -6^o, -11^o]_A$

แบบ II (Type II) การเรียงแถบไม้เฉพาะที่ผิวด้านนอก 10 ชั้นส่วนแกนกลาง 10 ชั้นเรียงแถบไม้ตามแนวยาวของคาน (0°) เรียงมุมตามที่ได้คำนวณทางทฤษฎี แบบการเรียงเป็นดังนี้ $[\ 26^o, 22^o, 18^o, 12^o, 5^o, 0^o, 0^o, 0^o, 0^o, 0^o]_A$

ความยาวแถบไม้ 3 ขนาดคือ

- ความยาวแถบไม้ 5 เซนติเมตร ใช้สัญลักษณ์ V
- ความยาวแถบไม้ 10 เซนติเมตร ใช้สัญลักษณ์ X
- ความยาวแถบไม้ 15 เซนติเมตร ใช้สัญลักษณ์ XV

4.3.1 <u>การทดสอบการดึง</u>

ชิ้นทดสอบเรียงแถบไม้เป็นมุม 0° (Type 0) ทดสอบนทิศทางตามเสี้ยนและตั้งฉากเสี้ยนที่ความยาวต่างๆ กัน 3 ระดับ ความถ่วงจำเพาะชิ้นทดสอบโยเฉลี่ยเท่ากับ 0.76 ปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 8.45% สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าของไม้จริงจาก Table 4.1 (25%) ผลการทดสอบการดึงแสดงใน Table 4.2

Table 4.2 Results of OSL Type 0 in tension test

Specimen	SG	MC (%)	Tensile Strength (MPa)	MOE (GPa)	Specific Tensile Strength (MPa)	Specific MOE (MPa)
Parallel to grain						
Type 0 V-Pa	0.78	8.41	38.64	1619	49.58	2074
(%CV)	(2.46)	(0.49)	(11.60)	(3.01)	(13.56)	(4.39)
Type 0 X-Pa	0.74	8.53	41.60	1566	55.98	2117
(%CV)	(7.12)	(0.41)	(8.89)	(7.85)	(4.01)	(11.76)
Type 0 XV-Pa	0.73	8.65	56.22	1714	76.82	2340
(%CV)	(11.21)	(2.94)	(9.14)	(19.89)	(2.37)	(16.27)
Perpendicular to grain						
Type 0 V-Pe	0.84	8.38	2.22	322	2.65	386
(%CV)	(7.22)	(1.77)	(6.43)	(10.51)	(13.06)	(15.17)
Type 0 X-Pe	0.72	8.41	0.81	200	1.12	271
(%CV)	(6.48)	(3.80)	(5.14)	(16.60)	(1.71)	(15.68)
Type 0 XV-Pe	0.74	8.32	1.11	267	1.50	352
(%CV)	(14.50)	(2.66)	(22.70)	(45.77)	(14.10)	(35.36)

ความแข็งแรงดึงจำเพาะในทิศทางตามเสี้ยน (specific tensile strength parallel to grain) มีค่ามากกว่าในทิศทางตั้งฉากกับเสี้ยน (perpendicular to grain) โดยเฉลี่ยประมาณ 35 เท่า โมดูลัสยืดหยุ่นการดึงจำเพาะในทิศทางตามเสี้ยน (specific tensile modulus of elasticity parallel to grain) มีค่ามากกว่าในทิศทางตั้งฉากเสี้ยนโดยเฉลี่ยประมาณ 6.5เท่า

จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนตาม Table 4.3 แสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของความยาวแถบไม้มีผลต่อความแข็งแรงดึงตามเสี้ยนและตั้งฉากเสี้ยนอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (α = 0.01) โมดูลัสยืดหยุ่นการดึงจำเพาะตามแนวเสี้ยนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้นแต่ความยาวแถบไม้ไม่มีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นตามเสี้ยนและตั้งฉากเสี้ยนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การดึงตามแนวเสี้ยนความแข็งแรงที่ความยาวแถบไม้ต่าง ๆกัน มีความแตกต่างกันโดย กลุ่มที่ 1 ความยาวแถบไม้ 15 เซนติเมตรมีค่ามากที่สุด และมากกว่ากลุ่มที่ 2 ที่ความยาวแถบไม้ 10 เซนติเมตรและ 5 เซนติเมตร สำหรับการดึงตั้งฉากเสี้ยนมีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มที่ 1 ความยาวแถบไม้ 5 เซนติเมตร กับ กลุ่มที่ 2 ความยาวแถบไม้ 15 เซนติเมตรและ 10 เซนติเมตร

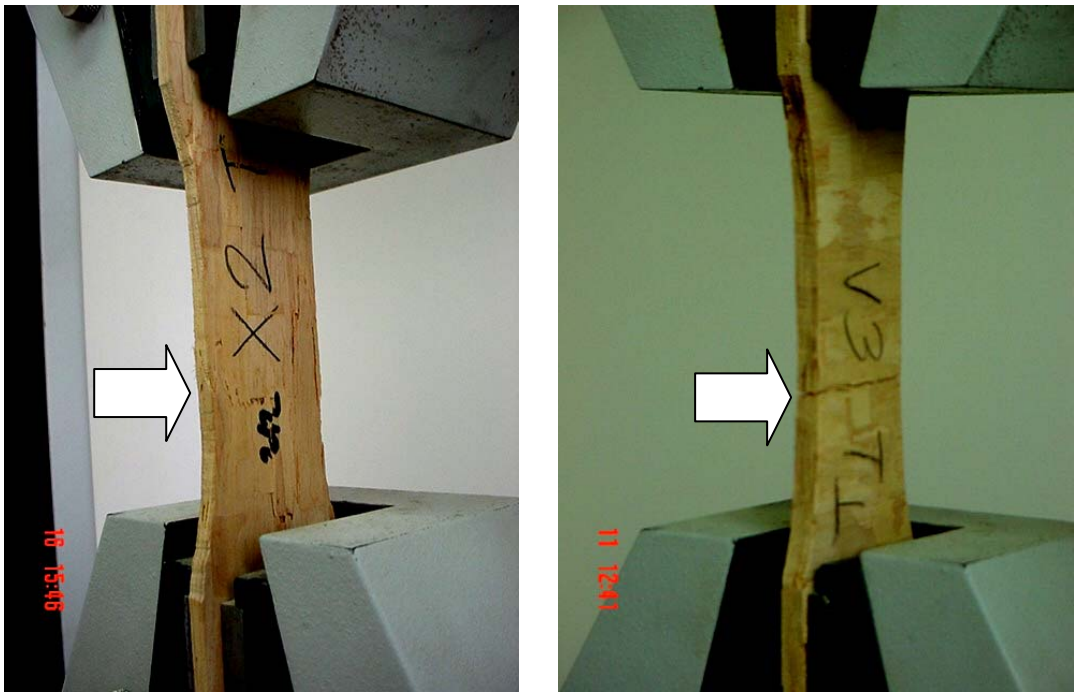
Table 4.3 ANOVA of tension test

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F-ratio
Specific tensile strength parallel to grain : sT_1				
SSTr (Strand Length)	2	1217	608.50	34.10**
SSE	6	107	17.85	
SST	8	1324		
Grouping by DMRT[1] XV^a X^b V^b				
Specific tensile strength perpendicular to grain : sT_2				
SSTr (Strand Length)	2	2.50	1.25	11.46**
SSE	6	0.65	0.11	
SST	8	3.15		
Grouping by DMRT V^a X^b XV^b				
Specific tensile MOE parallel to grain : sE_1^T				
SSTr (Strand Length)	2	122923	61461	0.850
SSE	6	433728	72288	
SST	8	556651		
Grouping by DMRT[1] ----------				
Specific tensile MOE perpendicular to grain : sE_2^T				
SSTr (Strand Length)	2	20990.8	10495.4	1.180
SSE	6	53387.5	8897.9	
SST	8	74378.3		
Grouping by DMRT[1] ----------				

**Highly significant (α = 0.01)

[1] The same letter (a or b) is the same group (α = 0.05) and ranked from the maximum mean to the minimum mean. E.g. sT1 of OSL@strand length of 15 cm is the maximum mean value, and @strand length of 10 cm and 5 cm are not significant.

ลักษณะการวิบัติของชิ้นทดสอบการดึงมีลักษณะดังนี้คือ สำหรับการดึงตามเสี้ยน ชิ้นทดสอบเกิดแนวฉีกขาดตั้งฉากแนวแรง ถ้าสังเกตจากผิวของชิ้นทดสอบแนวฉีกขาดจะเกิดบริเวณใกล้กับแนวรอยต่อของแถบไม้บริเวณกึ่งกลางชิ้นทดสอบแสดงดังรูป Fig.4.2(a) แต่สำหรับการดึงตั้งฉากเสี้ยน แนวฉีกขาดเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางชิ้นทดสอบและไม่ขึ้นอยู่กับแนวรอยต่อของแถบไม้ แสดงดังรูป Fig.4.2(b)



(a) (b)

Fig.4.2 Failure mode of tension test (a) parallel to grain (b) perpendicular to grain

ความแข็งแรงดึงจำเพาะตามเสี้ยนเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้นดังรูป Fig.4.3 ความแข็งแรงดึงจำเพาะตั้งฉากเสี้ยนมีค่าลดลงเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้นดังรูป Fig.4.4 ส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นการดึงจำเพาะตามเสี้ยนมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้น และโมดูลัสยืดหยุ่นการดึงจำเพาะตั้งฉากเสี้ยนมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้น แสดงไว้ในรูป Fig.4.5 และ Fig.4.6 ตามลำดับ

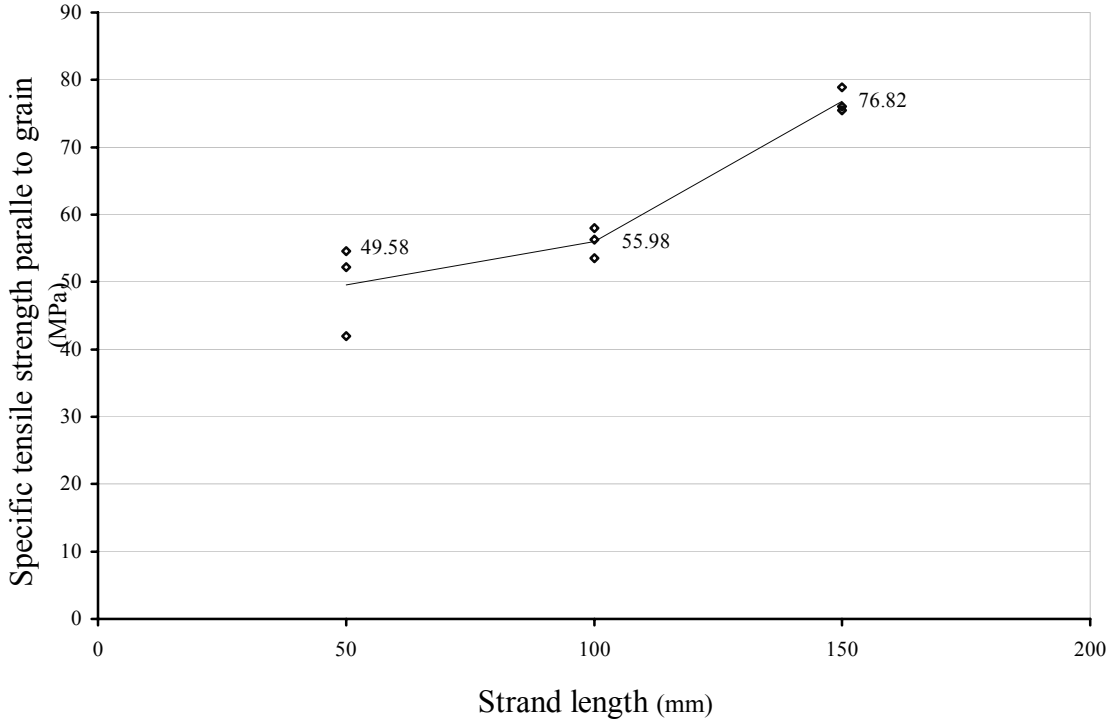


Fig.4.3 Specific tensile strength parallel to grain vs. strand length

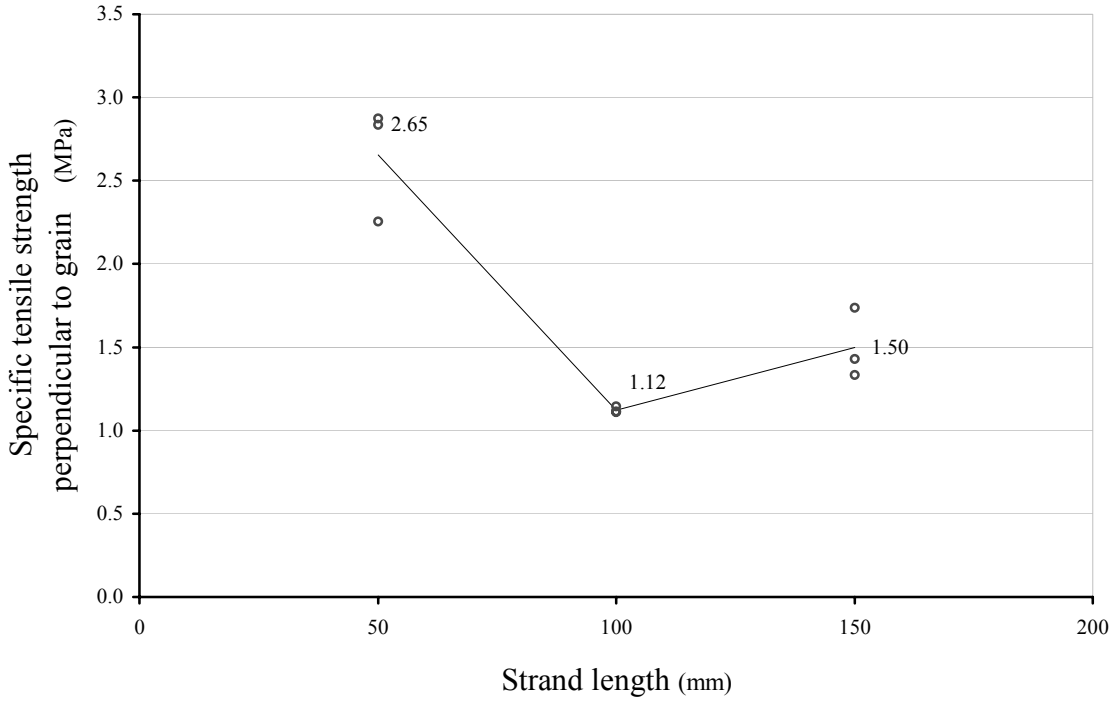


Fig.4.4 Specific tensile strength perpendicular to grain vs. strand length

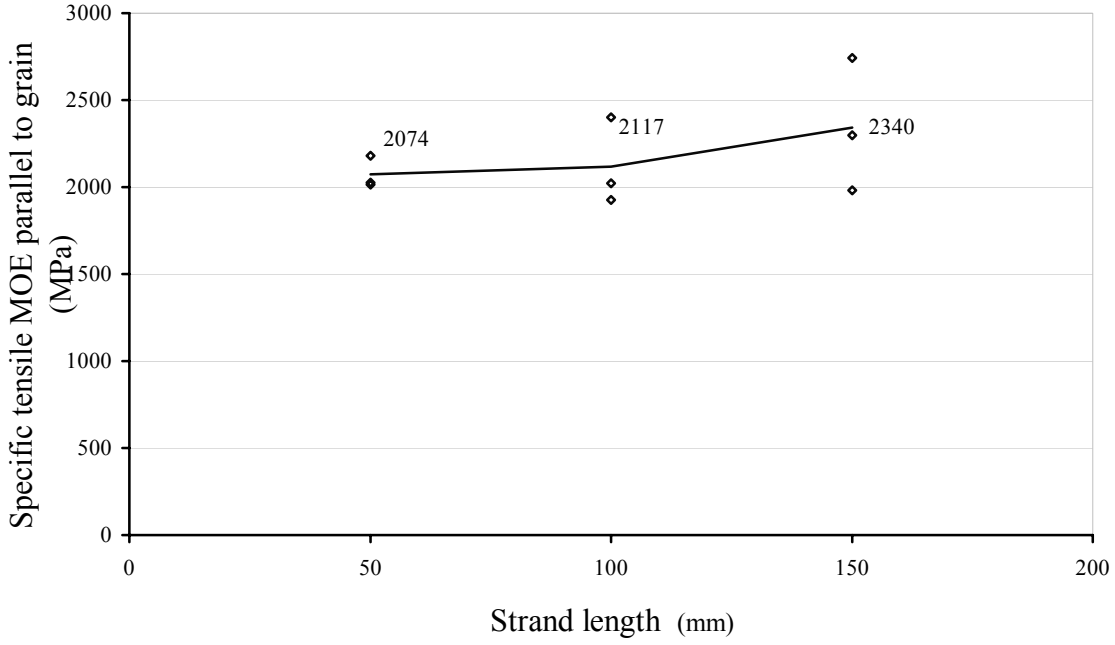


Fig.4.5 Specific tensile modulus of elasticity parallel to grain vs. strand length

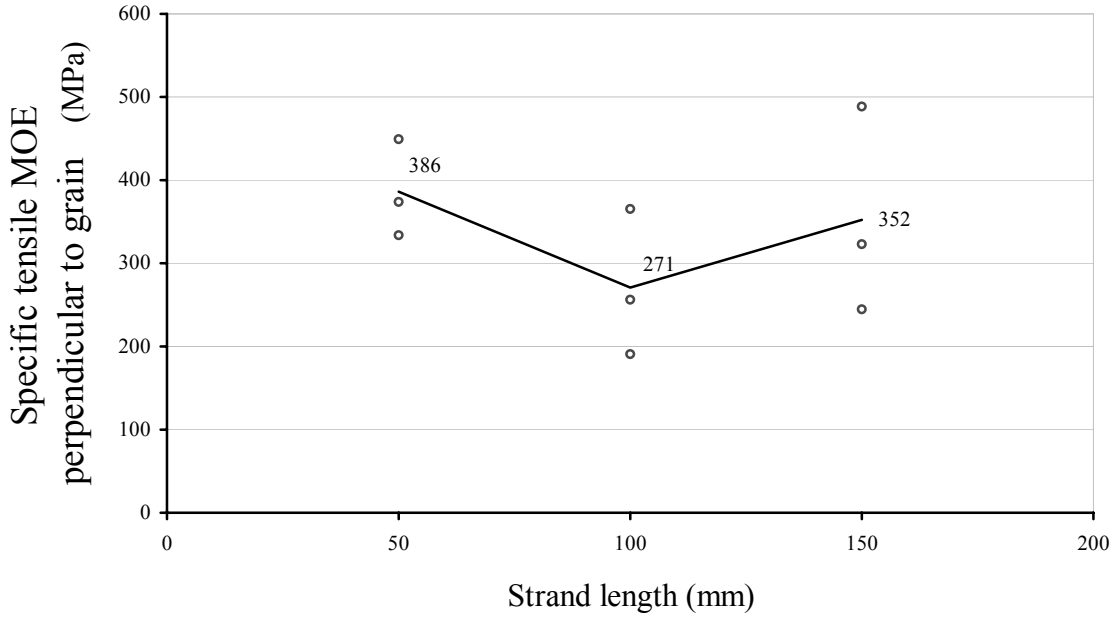


Fig.4.6 Specific tensile modulus of elasticity perpendicular to grain vs. strand length

4.3.2 <u>การทดสอบการอัด</u>

ชิ้นทดสอบเรียงแถบไม้เป็นมุม 0° (Type 0) ทดสอบในทิศทางตามเสี้ยนและตั้งฉากเสี้ยนที่ความยาวต่างๆ กัน 3 ระดับ ความถ่วงจำเพาะชิ้นทดสอบเฉลี่ยเท่ากับ 0.775 ปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากัย 8.22% สัมประสิทธ์ความแปรปรวนมีค่าต่ำกว่าของไม้จริงจาก Table 4.1 (18% ตามแนวเสี้ยน และ 28% ตั้งฉษกเสี้ยน) ผลการทดสอบการอัดแสดงดัง Table 4.4

Table 4.4 Results of OSL type 0 in compression test

Specimen	SG	MC (%)	Compressive Strength (MPa)	MOE (GPa)	Specific Compressive Strength (MPa)	Specific MOE (MPa)
Parallel to Grain						
Type 0 V-Pa	0.76	8.36	37.84	4.34	49.65	5692
(%CV)	(1.46)	(1.41)	(1.83)	(8.22)	(0.51)	(7.82)
Type 0 X-Pa	0.76	8.31	40.30	4.60	52.74	6036
(%CV)	(5.73)	(2.73)	(3.62)	(3.24)	(3.31)	(8.68)
Type 0 XV-Pa	0.78	8.14	45.83	4.87	58.36	6193
(%CV)	(6.61)	(3.74)	(15.15)	(18.76)	(9.00)	(12.41)
Perpendicular to Grain						
Type 0 V-Pe	0.76	8.38	10.33	246	13.50	324
(%CV)	(8.25)	(1.53)	(27.26)	(14.08)	(20.15)	(6.99)
Type 0 X-Pe	0.76	8.27	9.99	239	13.03	315
(%CV)	(6.27)	(1.87)	(24.52)	(0.23)	(18.03)	(6.21)
Type 0 XV-Pe	0.83	7.87	13.23	287	15.78	340
(%CV)	(10.68)	(10.92)	(30.83)	(39.54)	(19.57)	(28.59)

ความแข็งแรงอัดจำเพาะตามเสี้ยน (specific compressive strength parallel to grain) มีค่ามากกว่าในทิศตั้งฉากเสี้ยน (perpendicular to grain) โดยฉลี่ยประมาณ 4 เท่า ซึ่งก็เป็นสมบัติของไม้โดยทั่วไป โมดูลัสยืดหยุ่นอัดจำเพาะตามเสี้ยน (specific compressive modulus of elasticity parallel to grain) มีค่ามากกว่าในทิศทางตั้งฉากเสี้ยนโดยเฉลี่ยประมาณ 18 เท่า

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนตาม Table 4.5 แสดงให้เห็นว่า ความยาวแถบไม้มีผลต่อความแข็งแรงอัดจำเพาะตามเสี้ยนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อความแข็งแรงอัดจำเพาะตั้งฉากเสี้ยน และความยาวแถบไม้ไม่มีผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นอัดจำเพาะทั้งในแนวตามเสี้ยนและตั้งฉนกเสี้ยน ความแข็งแรงอัดจำเพาะมีความแตกต่างกันทั้ง 3 ระดับความยาวโดยเรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้คือ 15 เซนติเมตร 10 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ

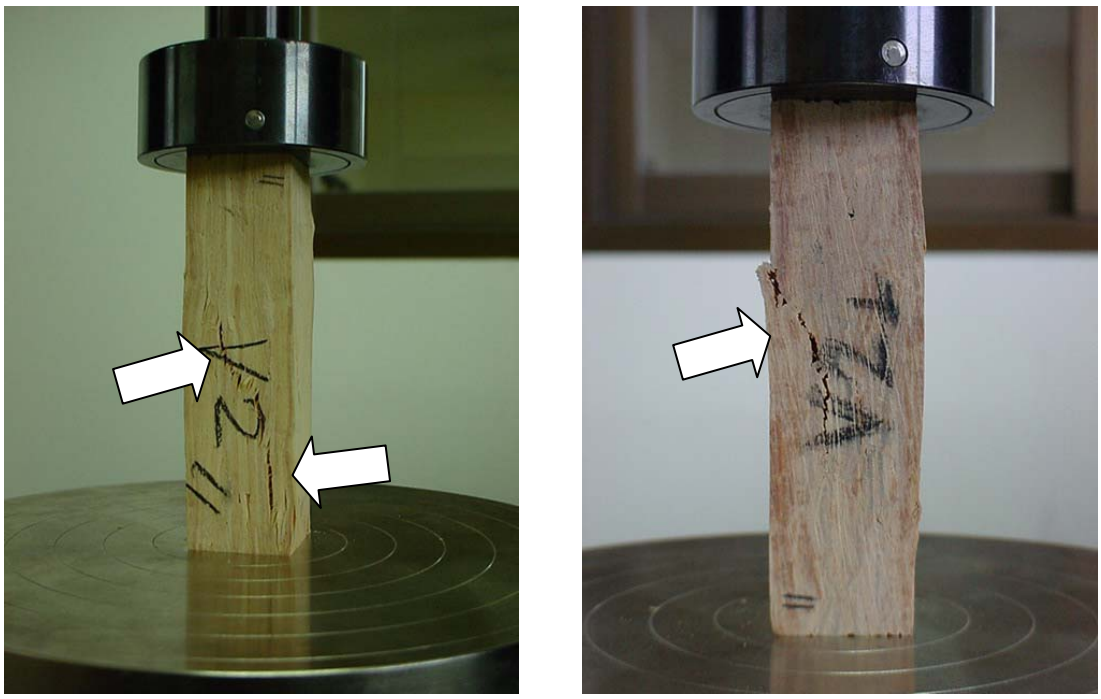
Table 4.5 ANOVA of compression test

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F-ratio
Specific tensile strength parallel to grain : sT_1				
SSTr (Strand Length)	2	117.00	58.50	5.720*
SSE	6	61.37	10.23	
SST	8	178.37		
Grouping by DMRT[1] XV[a] X[ab] V[b]				
Specific tensile strength perpendicular to grain : sT_2				
SSTr (Strand Length)	2	12.98	6.487	0.867
SSE	6	44.88	7.480	
SST	8	57.86		
Grouping by DMRT ----------				
Specific tensile MOE parallel to grain : sE_1^T				
SSTr (Strand Length)	2	393863	196931	0.555
SSE	6	2127653	354608	
SST	8	2521516		
Grouping by DMRT[1] ----------				
Specific tensile MOE perpendicular to grain : sE_2^T				
SSTr (Strand Length)	2	984	492	0.143
SSE	6	20716	3453	
SST	8	21700		
Grouping by DMRT[1] ----------				

*Significant ($\alpha = 0.05$)

[1] The same letter (a or b) is the same group ($\alpha = 0.05$) and ranked from the maximum mean to minimum mean.

ลักษณะการวิบัติของการทดสอบการอัดในทิศตามเสี้ยน ชิ้นทดสอบเกิดการปริออกทางด้านข้างก่อนการยุบตัว แม้ว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับไม้จริงหรือสูงกว่า แต่ค่าที่ได้จากการทดสอบของโอเอสแอลน่าจะสูงกว่านี้ถ้าการวิบัติเกิดในลักษณะยุบตัวทั้งหน้าตัดแทนที่จะปริออกทางด้านข้าง ดังแสดงไว้ใน Fig.4.7



a) b)

Fig.4.7 Failure mode in compression test
a) parallel to grain
b) perpendicular to grain

ความแข็งแรงอัดจำเพาะตามเสี้ยนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงอัดจำเพาะตั้งฉากกับเสี้ยนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้น โมดูลัสยืดหยุ่นการอัดจำเพาะตามเสี้ยนและตั้งกับฉากเสี้ยนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงอัดจำเพาะเฉลี่ยที่ความยาวแถบไม้ต่าง ๆ แสดงไว้ในรูป Fig.4.8 Fig.4.9 Fig.4.10 และ Fig.4.11

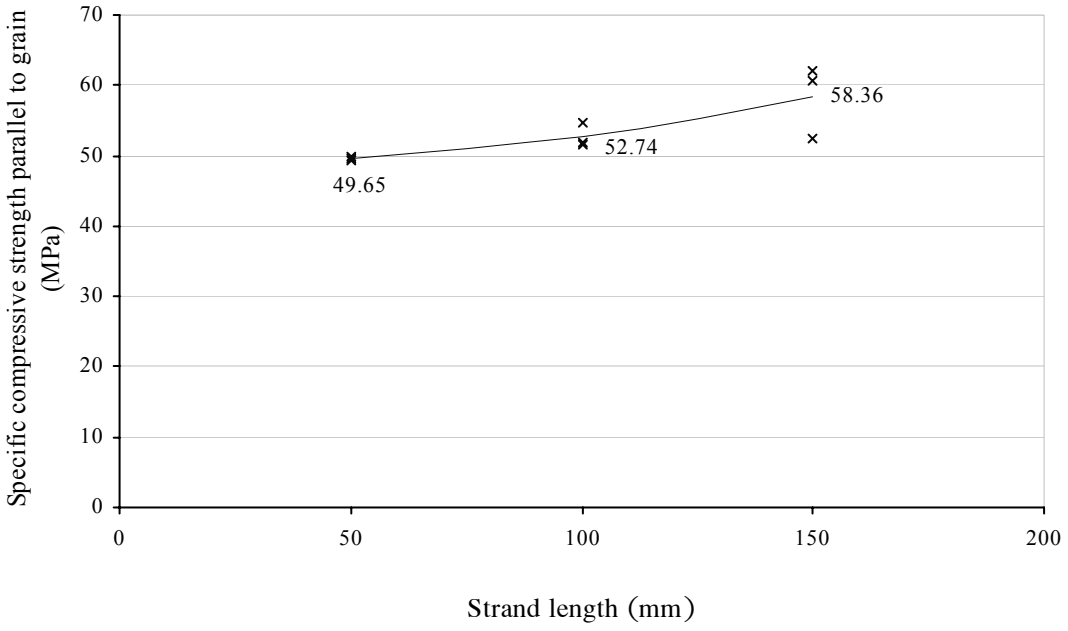


Fig.4.8 Specific compressive strength parallel to grain vs. strand length

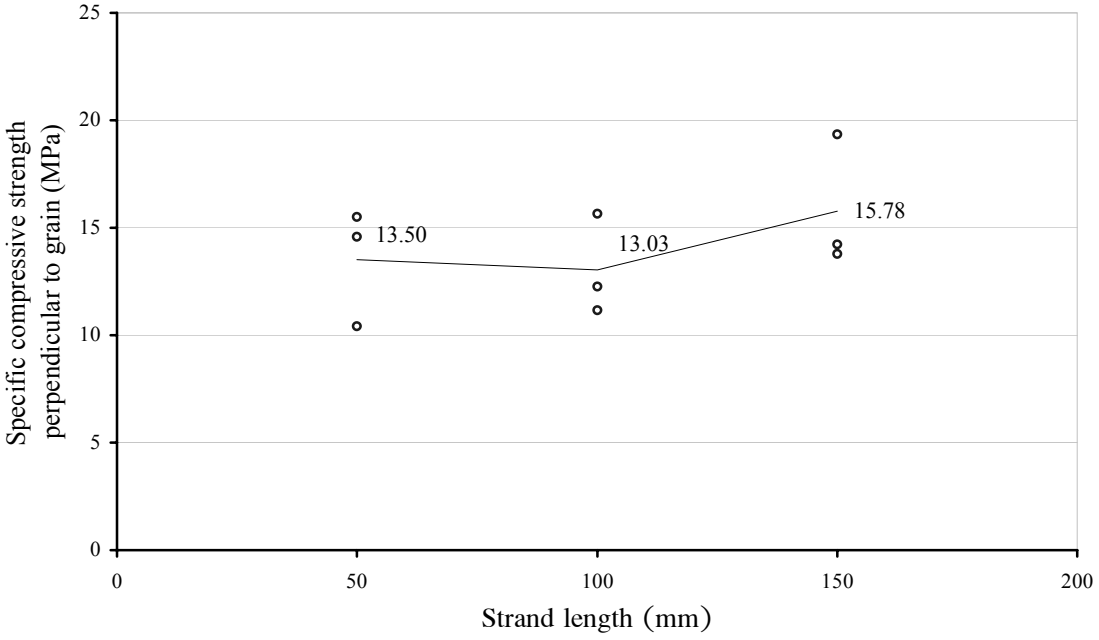


Fig.4.9 Specific compressive strength perpendicular to grain vs. strand length

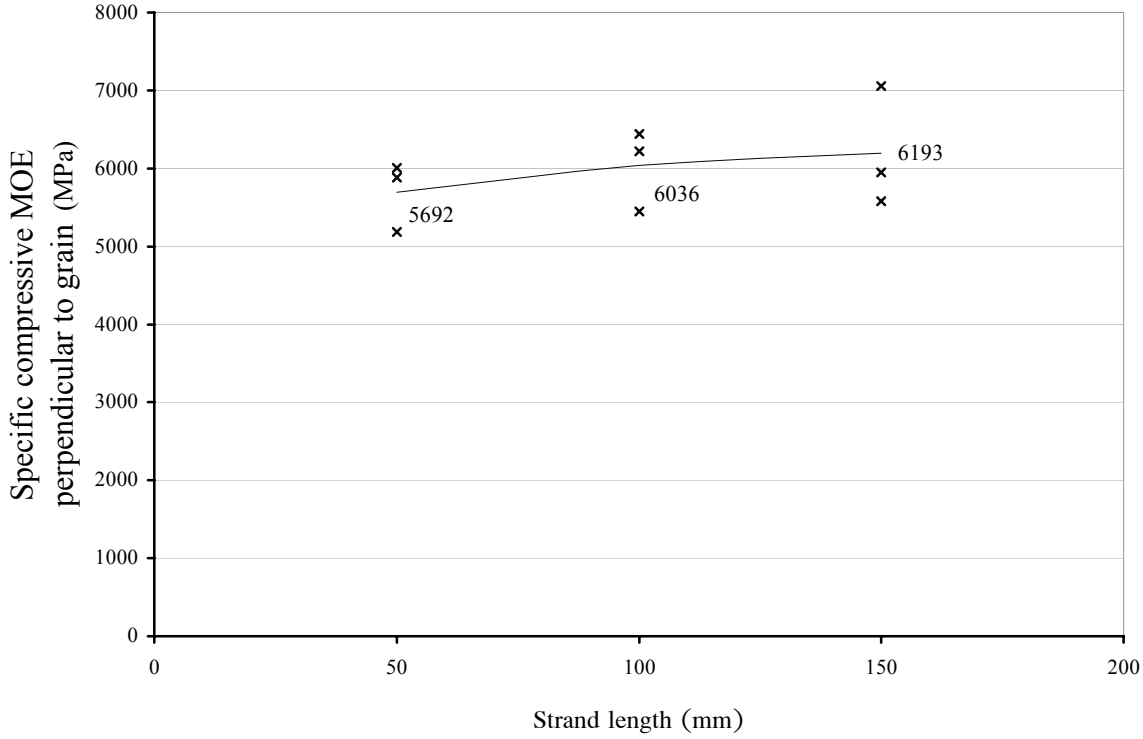


Fig.4.10 Specific compressive modulus of elasticity parallel to grain vs. strand length

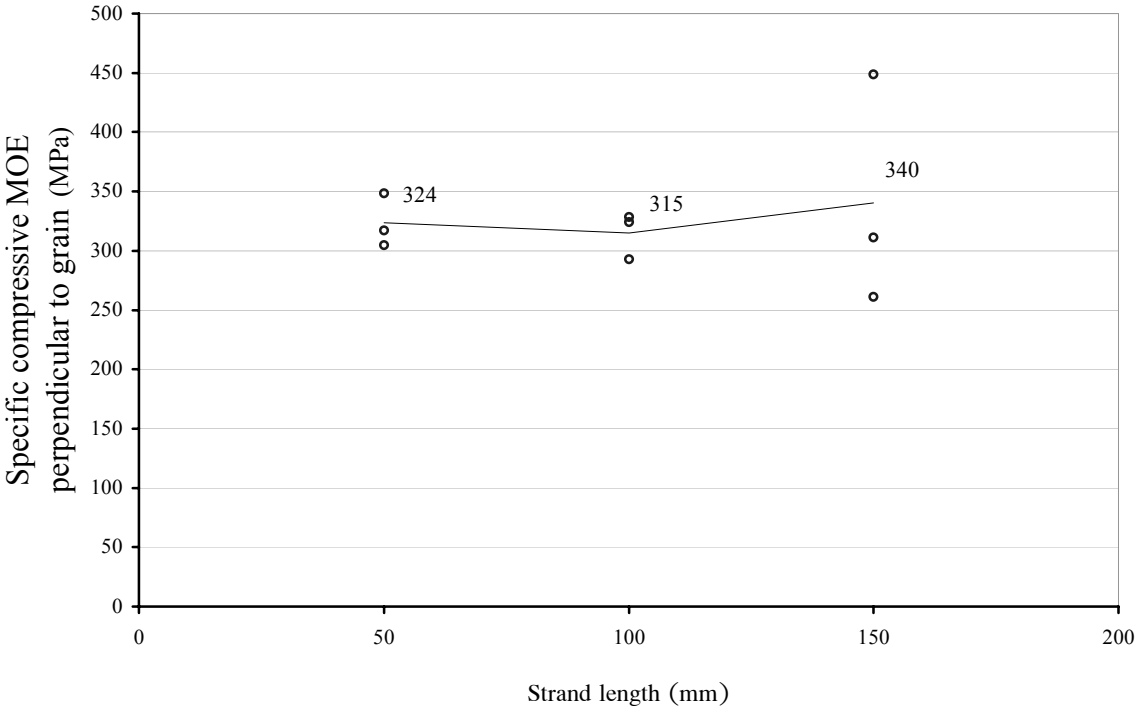
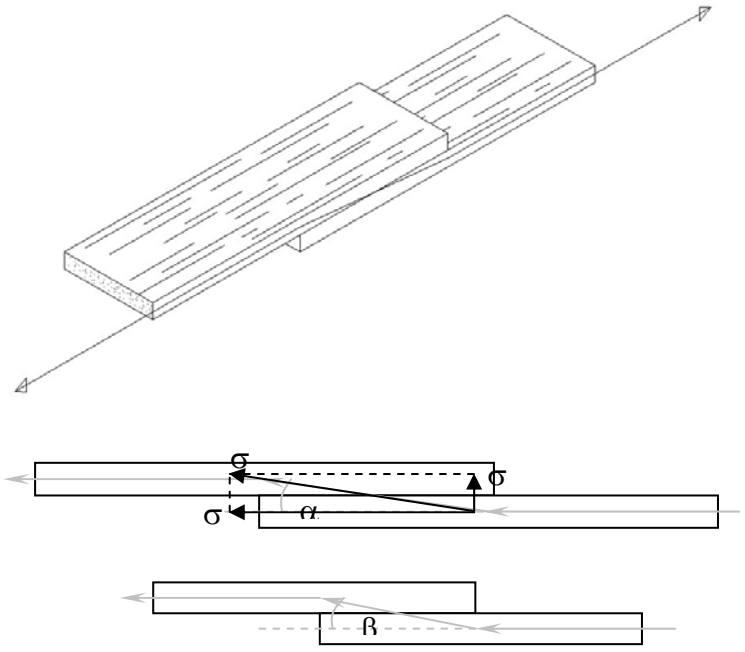


Fig.4.11 Specific compressive modulus of elasticity perpendicular to grain vs. strand length

เมื่อพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในแกนหลักของโอเอสแอล มุมถ่ายทอดความเค้นมีผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้น ณ แนวเชื่อมติดของแถบไม้ 2 ชิ้น (Barnes, 2001) และช่องว่าง (voids) ที่เกิดในเนื้อโอเอสแอลก็มีผลต่อโอกาสที่จะเกิดการวิบัติ เนื่องจากความยาวแถบไม้เป็นตัวหนึ่งที่ควบคุมมุมถ่ายทอดความเค้นและปริมาณช่องว่างในโอเอสแอล ทำให้โอเอสแอลที่มีความยาวแถบไม้ต่างกันจึงมีค่าความแข็งแรงดึงและการอัดที่แตกต่างกัน

มุมถ่ายทอดความเค้นเกิดจากการยึดติดกันของแถบไม้ 2 ชิ้น ถ้าสมมติให้การกระจายตัวของแถบไม้สม่ำเสมอ แนวยึดติดระหว่างแถบไม้ 2 ชิ้นที่จะมีความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวแถบไม้ตาม Fig.4.12 ถ้าแถบไม้ในโอเอสแอลมีความหนาเท่ากัน มุมถ่ายทอดความเค้นสำหรับแถบไม้ที่ยาวมากกว่าจะให้มุมน้อยกว่า ($\hat{\alpha} < \hat{\beta}$) เมื่อออกแรงดึงโอเอสแอลในทิศตามยาวของแถบไม้เกิดความเค้น (σ) ผ่านจากแถบไม้หนึ่งไปยังแถบไม้หนึ่งตามมุมถ่ายทอดความเค้น แยกองค์ประกอบความเค้นออกเป็น 2 แนวที่ตั้งฉากกันโดยแนวหนึ่งมีทิศตามเสี้ยนหรือตามยาวแถบไม้ (σ_1) และอีกแนวหนึ่งตั้งฉากเสี้ยนหรือตั้งฉากแถบไม้ (σ_3) เนื่องจากแถบไม้มีความแข็งแรงดึงตั้งฉากเสี้ยนน้อยมากจึงต้องพิจารณาความเค้นดึงตั้งฉากเสี้ยนเป็นหลัก เมื่อมุมถ่ายทอดความเค้นยิ่งมากองค์ประกอบความเค้นตั้งฉนกเสี้ยนก็มากขึ้นทำให้เกิดความเสียหายก่อน โอเอสแอลที่มีมุมถ่ายทอดความเค้นที่มากกว่าจึงรับความเค้นดึงได้น้อยกว่าและนี่เองที่เป็นสาเหตุให้โอเอสแอลที่แถบไม้ยาวน้อยกว่ามีความแข็งแรงดึงน้อยกว่า ผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถเห็นได้จากการทดสอบการดึงในหัวข้อ 4.3.1



$\hat{\alpha} < \hat{\beta}$

Fig.4.12 Comparison of stress transfer angles of 2 strand length of OSL when stress is on longitudinal direction of strand

สำหรับการอัดตามเสี้ยน ความเค้นที่เกิดขึ้นเป็นความเค้นอัดทั้งหมดในแนวตั้งฉากและแนวตามเสี้ยน ($-\sigma_3$ และ $-\sigma_1$ ตามลำดับ) ความแข็งแรงอัดในแนวตั้งฉษกก็มีค่าน้อยกว่าในแนวตามเสี้ยนเช่นเดียวกับการดึง นอกจากนั้นยังมีโอกาสเกิด induced tensile stress ในแนวตั้งฉากเสี้ยนอันเนื่องมาจากผลของอัตราส่วนพัวส์ซองซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการวิบัติเพราะไม้ยางพาราทนการดึงตั้งฉษกเสี้ยนต่ำมาก ดังนั้นผลที่ได้ก็มีลักษณะเช่นเดียวกับการดึงคือโอเอสแอลที่แถบไม้ยาวน้อยกว่ามีควาแข็งแรงอัดน้อยกว่า

แต่สำหรับการดึงและการอัดตั้งฉากเสี้ยน ความเค้นที่ผ่านตามความกว้างแถบไม้จะอยู่ในระนาบ xz ส่วนเสี้นไม้อยู่ในแกน y ตาม Fig.4.13 ดังนั้นมุมที่ความเค้นกระทำกับเสี้ยนจึงเท่ากับ 90° เสมอ เนื่องจากแนวตามยาวของแถบไม้จะอยู่ในแนวตามเสี้ยนเสมอ นอกจากนั้นความกว้างแถบไม้ซึ่งเป็นตัวกำหนดความยาวของแนวยึดติดหรือก็คือเป็นตัวกำหนดมุมถ่ายทอดความเค้นเมื่อรับการดึงหรือการอัดตั้งฉษกเสี้ยนจึงไม่มีผลต่อมุมที่ความเค้นกระทำต่อเสี้ยนไม้ด้วย ความยาวและความกว้างแถบไม้จึงไม่มีผลต่อความแข็งแรงในทิศทางตั้งฉากเสี้ยนในแง่ของการถ่ายทอดความเค้น แต่จะมีผลในแง่ของจำนวนและลักษณะช่องว่าที่เกิดขึ้นในเนื้อโอเอสแอล

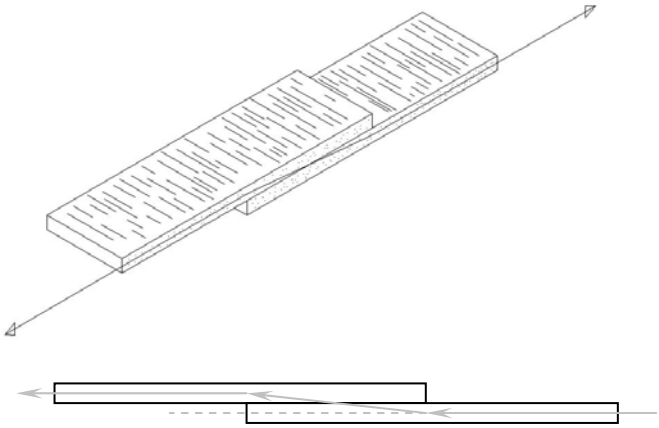


Fig.4.13 Stress transfer angle with 90° to grain direction when stress is in transverse direction.

ช่องว่าง (voids) เกิดขึ้นในโอเอสแอลบริเวณปลายของแถบไม้แสดงไว้ใน Fig.4.14 เช่นเดียวกับช่องว่าที่เกิดจากการเรียงตัวไม่สมบูรณ์แบบของแถบไม้เกิดการเหลื่อมกันระหวั้นดัง Fig.4.15 ซึ่งในความเป็นจริงมีโอกาสเกิดขึ้นมากกว่า (Fig.4.16) แถบไม้ยิ่งสั้นก็จะมีโอกาสเกิดช่องว่างมากขึ้น (Fig.2.17) นอกจากนั้นแถบไม้ยิ่งหนาช่องว่างก็จะยิ่งใหญ่ขึ้น เมื่อรับความเค้นรอยแตกร้าวจะเริ่มจากช่องว่างเหล่านี้ ช่องว่างยิ่งมากเท่าไรโอกาสเกิดการวิบัติก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งผลของช่องว่างและผลของมุมถ่ายทอดความเค้นจึงส่งผลต่อความแข็งแรงดึงและอัดตามเสี้ยนกล่าวคือ เมื่อแถบไม้ยาวขึ้น (มุมถ่ายทอดความเค้นและช่องว่างลดลง) ความแข็งแรงก็เพิ่มขึ้น แต่สำหรับผลการทดสอบความแข็งแรงดึงและอัดตั้งฉากเสี้ยนให้ค่าความแข็งแรงที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติไม่ได้มีผลมาจากมุมถ่ายทอดความเค้นแต่น่าจะมีสาเหตุ

มาจากช่องว่างที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบนั้นเอง การลดช่องว่างสามารถทำได้โดยลดความหนาของแถบไม้ลง แถบไม้ที่ใช้ในการทำวิจัยนี้หนาประมาณ 1 มิลลิเมตรแต่ในภาคอุตาสาหกรรมสามารถทำให้บางได้ถึง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งคาดว่าน่าจะลดปัญหาเรื่องช่องว่างนี้ได้อย่างมากแม้ว่าจะใช้แถบไม้ที่สั้นก็ตาม

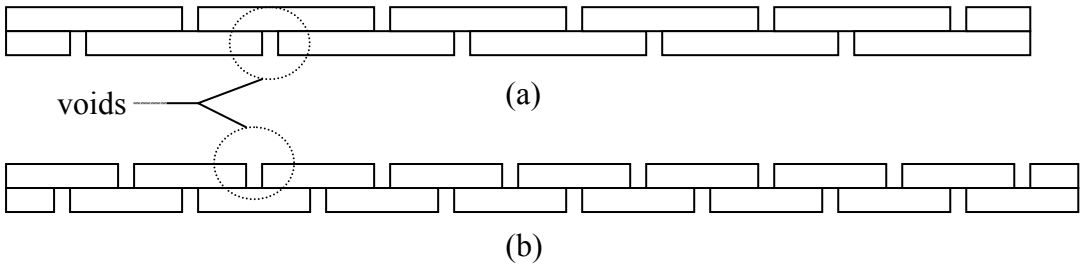


Fig.4.14 Model of voids in OSL as difference strand length.

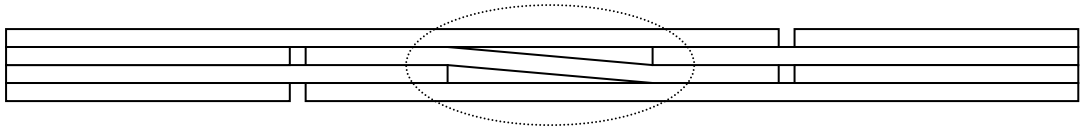


Fig.4.15 Model of voids in OSL as strand overlap between layers

Fig.4.16 Voids in OSL manufactured in laboratory

Fig.4.17 Numbers of voids in OSL (shown in black points) comparing between 3 strand length (a) 15 cm (b) 10 cm (c) 5 cm.

ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงอัดของโอเอสแอลที่ทำขึ้นในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับไม้ยางพาราจริงแสดงไว้ใน Table 4.6 เมื่อเปรียบเทียบที่ความถ่วงจำเพาะ 0.7 (สมมติให้สมบัติเชิงกลมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความถ่วงจำเพาะ) ความแข็งแรงดึงของโอเอสแอลมีค่าต่ำกว่าของไม้จริง นอกเหนือจากผลที่เกิดจากมุมถ่ายทอดความเค้นที่ไม่เป็นศูนย์ของโอเอสแอลแล้ว อาจมีสาเหตุเนื่องจากโอเอสแอลเป็นไม้ประกอบจึงมีช่องว่างเกิดขึ้นมากกว่าไม้จริง เมื่อรับแรงดึงโอกาสที่จะเกิดการฉีกโดยเริ่มจากช่องว่างจึงมีมาก ดังจะเห็นได้ชัดเจนในโอเอสแอลที่ทำจากแถบไม้ที่สั้นกว่าโอกาสที่จะเกิดช่องว่างย่อมมีมากกว่า ความแข็งแรงดึงจึงน้อยกว่า ความแข็งแรงอัดของโอเอสแอลก็มีค่าต่ำกว่ากับไม้จริง ถึงแม้ว่าเมื่อรับแรงอัดช่องว่างไม่ฉีกออกจากกันดังที่เกิดในการรับแรงดึง แต่ผลกระทบของมุมถ่ายทอดความเค้นและการโป่งออกในแนวตั้งฉากเสี้ยนทำให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าไม้จริง และเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงของโอเอสแอลจะสูงขึ้น นั่นคือถ้าแถบไม้ยาวมาก ๆความแข็งแรงของโอเอสแอลอาจเทียบเท่าได้กับไม้จริง

Table 4.6 Strength of rubber wood (solid wood) and average strength of OSL with different strand lengths (SG = 0.7)

Mechanical property	Symbol (unit)	Solid wood	OSL @ 5 cm	OSL @ 10 cm	OSL @ 15 cm
Tensile strength parallel to grain	T_1 (MPa)	50.91[1]	34.07	39.19	53.77
Tensile strength perpendicular to grain	T_2 (MPa)	2.80[2]	1.86	0.78	1.05
Compressive strength parallel to grain	C_1 (MPa)	–52.67[1]	–34.76	–36.92	–40.82
Compressive strength perpendicular to grain	C_2 (MPa)	–11.87[3]	–9.45	–9.21	–11.05

[1] Puajindanetr, S and Wisuttipaet, S. 2003.
[2] Chunwarin, 1980
[3] Kasemset *et al*., 2000

ถ้าใช้แนวความคิดของบาร์นส์ (Barns, 2001) ที่ดัดแปลงสมการแบบอย่างของแฮนคินสัน และเป็นสมการที่ใช้เฉพาะไม้ประกอบที่เรียงแถบไม้ตามแนวยาวเท่านั้น เมื่อสมมติให้การกระจายตัวของแถบไม้สม่ำเสมอ แนวยึดติดของแถบไม้ 2 ชิ้นจึงมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวแถบไม้ (l/2) มุมถ่ายทอดความเค้นจึงเท่ากับ $\arctan(2d_b/l)$ ความแข็งแรงของโอเอสแอลจึงแสดงได้ดังสมการ

$$F2 = \frac{F1 \times Q}{F1 \times \sin^n(\arctan(2d_b / l)) + Q \times \cos^n(\arctan(2d_b / l))} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.7)$$

เมื่อ F2 เป็นความแข็งแรงของโอเอสแอล

F1 เป็นความแข็งแรงของไม้ยางพาราจริง ใช้ค่าจากตาราง 4

Q สมมติให้มีค่าเป็น 1/20 ของ F1

d_b เป็นความหนาของแถบไม้มีค่าเท่ากับ 1 mm

l เป็นความยาวแถบไม้ซึ่งมี 3 ความยาวดังได้กล่าวไว้แล้วคือ 50 100 และ 150 mm

n เป็นเลขชี้กำลังของฟังค์ชันไซน์และโคไซน์ เป็นค่าจากการทดสอบ

ค่าความแข็งแรง F1 ที่แทนลงในสมการสำหรับความแข็งแรงดึงเป็นค่าของไม้ยางพาราจริงซึ่งให้ผลการทำนายที่ค่อนข้างดี เมื่อดูจากค่าสัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด (Coefficient of determination : R^2) สูงถึง 0.83 ที่ n = 1.25 ในขณะที่ความแข็งแรงอัดได้ค่าสัมประสิทธิ์แห่งการกำหนดเท่ากับ 0.96 ที่ n = 1.00 แสดงไว้ใน Fig.4.18 และ Fig.4.19

โอเอสแอลที่ทำขึ้นในห้องปฏิบัติการมีความหนาประมาณ 1 mm ดังนั้นแกนนอนของกราฟใน Fig.4.18 และ Fig.4.19 อาจแทนได้เป็น “อัตราส่วนชลูด” (Slenderness ratio : $\zeta = l/d_b$) ซึ่งเป็นปริมาณไร้หน่วยของไม้ประกอบโอเอสแอล นั่นคือความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงอัดตามเสี้ยนของโอเอสแอลที่ทำจากแถบไม้ยางพาราที่ความยาวและความหนาใด ๆ สามารถทำทายได้โดยปริมาณไร้หน่วย “อัตราส่วนชลูด” นี้ สมการสำหรับทำนายความแข็งแรงสำหรับโอเอสแอลที่เรียงแถบไม้เป็น 0° จะได้ดังสมการ 4.8 และ 4.9

ความแข็งแรงดึง $T_{OSL} = T_{SW} \cdot \left(\frac{1}{20 \cdot \sin^{1.25}(\arctan(2/\zeta)) + \cos^{1.25}(\arctan(2/\zeta))} \right)$ (4.8)

ความแข็งแรงอัด $C_{OSL} = C_{SW} \cdot \left(\frac{1}{20 \cdot \sin(\arctan(2/\zeta)) + \cos(\arctan(2/\zeta))} \right)$ (4.9)

แนวโน้มของเส้นกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้นความแข็งแรงของโอเอสแอลจะเข้าใกล้ค่าของไม้จริงมากขึ้นจนมีค่าเท่ากับไม้จริงที่อัตราส่วนชลูดเป็น ∞ เมื่อพิจารณาการเตรียมแถบไม้ในระดับอุตสาหกรรมที่สามารถทำแถบไม้ที่มีความหนาเพียง 0.3 – 0.5 มิลลิเมตรเท่านั้น ในขณะที่ความยาวแถบไม้อยู่ที่ประมาณ 100 – 200 มิลลิเมตร นั่นคืออัตราส่วนชลูดของแถบไม้ที่ทำได้จริงมีค่ามากถึง 200 – 400 ความแข็งแรงโอเอสแอลที่ทำได้ในระดับอุตสาหกรรมต้องมีความแข็งแรงมากกว่าที่ทำได้ในห้องปฏิบัติการอย่างนานอน โดยเมื่อพิจารณาจากสมการ 4.8 และ 4.9 แล้ว ถ้าอัตราส่วนชลูด ζ มีค่ามาก ๆจำทำให้ค่าในวงเล็บเป็น 1.0 จึงได้ว่า $T_{OSL} = T_1$ และ $C_{OSL} = C_1$ หรือความแข็งแรงดึงและอัดของโอเอสแอลเทียบเท่าได้กับค่าของไม้จริงนั่นเอง การเลือกใช้ความยาวเพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุดตามทฤษฎีจึงควรเลือกใช้แถบไม้ให้มีความยาวและความบางมากที่สุดเท่าที่จะมาได้ แต่ก็มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับความยาวของแถบไม้ที่ความหนาประมาณ 0.7 มิลลิเมตร (บางกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้) ความยาวแถบไม้ 100 มิลลิเมตร ($\zeta = 143$) 200 มิลลิเมตร ($\zeta = 286$) และ 300 มิลลิเมตร ($\zeta = 429$) (Meyers, 2001) พบว่าความแข็งแรงของโอเอสแอลที่มีอัตราส่วนเรียง $\zeta = 143$ มีความแข็วแรงเท่ากับโอเอสแอลที่มีอัตราส่วนชลูด $\zeta = 286$ และ $\zeta = 429$ ดังนั้นความยาวที่เลือกใช้ในระดับ

อุตสาหกรรมอาจจะให้แถบไม้มีความยาวเพียง 150 มิลลิเมตรก็เพียงพอ ส่วนความหนาควรจะต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร นอกจากนั้นความยาวแถบไม้ที่เลือกใช้สำหรับผลิตโอเอสแอลยังถูกกำหนดด้วยปัจจัยอื่น ๆ เช่น การบิดงอของแถบไม้เมื่อแถบไม้ยาวมาก ๆ เป็นต้น แถบไม้ที่ยาวมาก ๆ นอกจากจะทำให้โอเอสแอลมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับไม้จริงแล้วยังน่าจะช่วยให้การเรียงมุมแถบไม้ด้วยเครื่องจักรเป็นไปได้อย่างแม่นยำอีกด้วย

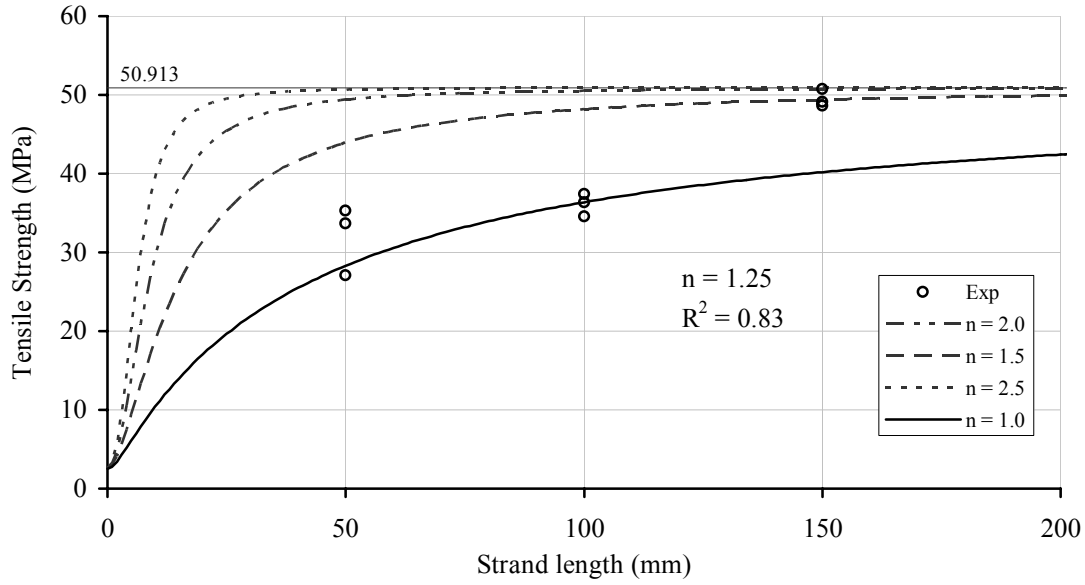


Fig.4.18 Modified Hankinson's formula as different order "n" for predicting tensile strength parallel to grain of OSL made from rubber wood with SG = 0.7, 1 mm of strand length

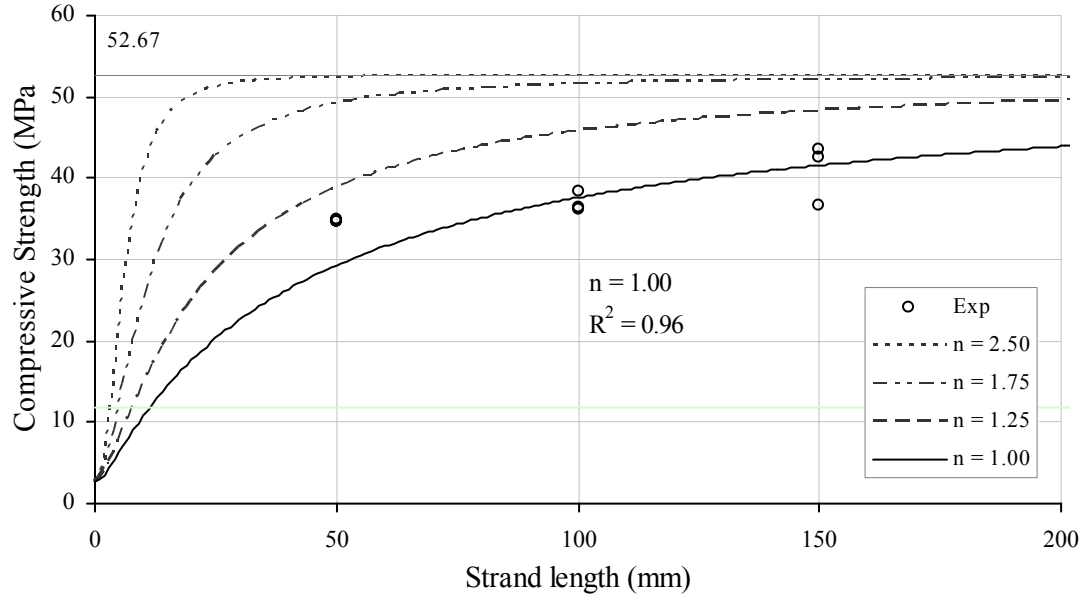


Fig.4.19 Modified Hankinson's formula as different order "n" for predicting compressive strength parallel to grain of OSL made from rubber wood with SG = 0.7, 1 mm of strand length

4.3.3 <u>การทดสอบการดัดสถิตย์</u>

ผลการทดสอบแสดงใน Table 4.7 ความถ่วงจำเพาะโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.77 ปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 7.85% สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนมีค่าต่ำกว่าของไม้จริง (16% สำหรับความเค้นสูงสุด (MOR) และ 22% สำหรับโมดูลัสยืดหยุ่น(MOE))

Table 4.7 Results of static bending test

Specimen	SG	MC (%)	MOR (MPa)	MOE (GPa)	Specific MOR (MPa)	Specific MOE (GPa)
Type 0-V	0.76	8.38	64.58	8.47	84.59	11.09
(%CV)	(4.51)	(1.92)	(1.99)	(4.29)	(4.08)	(0.28)
Type 0-X	0.70	8.34	63.56	8.40	90.88	11.99
(%CV)	(3.44)	(0.63)	(11.54)	(7.58)	(13.04)	(6.83)
Type 0-XV	0.72	8.41	71.14	9.45	99.23	13.19
(%CV)	(6.42)	(0.54)	(11.95)	(8.09)	(9.51)	(7.12)
Type I-V	0.75	7.61	52.10	4.58	69.57	6.11
(%CV)	(2.80)	(8.91)	(5.98)	(5.25)	(3.37)	(2.49)
Type I-X	0.82	7.54	62.16	5.73	75.46	6.94
(%CV)	(8.34)	(0.83)	(10.56)	(16.64)	(3.27)	(9.96)
Type I-XV	0.84	7.39	77.29	6.50	92.48	7.77
(%CV)	(2.39)	(1.74)	(5.29)	(8.64)	(2.95)	(7.64)
Type II-V	0.73	7.91	46.76	4.57	64.19	6.28
(%CV)	(3.48)	(3.53)	(11.53)	(8.75)	(8.26)	(5.91)
Type II-X	0.82	7.58	68.31	5.69	83.52	6.95
(%CV)	(2.52)	(1.58)	(16.75)	(8.19)	(18.22)	(9.02)
Type II-XV	0.77	7.49	68.77	5.90	89.13	7.64
(%CV)	(2.73)	(0.21)	(9.29)	(3.94)	(11.76)	(5.54)

ความแข็งแรงดัดจำเพาะของ Type I และ Type II มีค่าน้อยกว่า Typr 0 ประมาณ 10%-25% โมดูลัสยืดหยุ่นดัดจำเพาะมีค่าน้อยกว่า 50 % แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Type I และ Type II ทั้งความแข็งแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดมีค่าไม่แต่กต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เหตุผลของความไม่แตกต่างกันนั้นเนื่องจากชั้นที่อยู่บริเวณกึ่งกลางมีความอ่อนไหวต่อมุมที่เปลี่ยนไปจากจุดออกแบบน้อยมาก (บทที่ 2 หัวข้อ 2.5.2) เมื่อชั้นที่อยู่ผิวนอกมีมุมไม่แตกต่างกันมากนัก ความแข็งแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดจึงมีค่าไม่ต่างกัน

Table 4.8 ANOVA of static bending test

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F-ratio
Specific modulus of rupture : sMOR				
SSTr	8	2650	331	
Length	2	1703	852	14.04**
Orientation	2	725	363	5.98**
Length&Orientation	4	222	56	0.92
SSE	18	1092	61	
SST	26	3743		
Grouping by DMRT Length[1] XV[a] X[b] V[c] Orientation[1] (Type 0)[a] (Type I)[b] (Type II)[c]				
Specific modulus of elasticity in bending : sMOE				
SSTr (Strand Length)	8	37.42		
Length	2	9.50	4.75	22.99**
Orientation	2	27.59	13.79	66.77**
Length&Orientation	4	0.33	0.08	0.401
SSE	18	3.72	0.21	
SST	26	41.14		
Grouping by DMRT Length[2] XV[a] X[b] V[c] Orientation[1] (Type 0)[a] (Type I)[b] (Type II)[c]				

**Highly significant ($\alpha = 0.01$)

[1] The same letter is the same group with $\alpha = 0.01$, ranking from max. to min. mean.

[2] The same letter is the same group with $\alpha = 0.05$, ranking from max. to min. mean.

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จาก Table 4.8 แสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของความยาวแถบไม้มีผลต่อความแข็งแรงดัดจำเพาะและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($\alpha = 0.01$) อิทธิพลของการเรียงมุมมีผลต่อความแข็งแรงดัดจำเพาะและโมดูลัสความยืดหยุ่นดัดจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($\alpha = 0.01$) และไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างความยาวแถบไม้และการเรียงมุม ความแข็งแรงดัดจำเพาะและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดจำเพาะมีความแตกต่างกันทั้ง 3 ระดับความยาวแถบไม้ เรียงจากมากไปหาน้อยคือ 15 เซนติเมตร 10 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้น โอเอสแอล Type 0 ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงสัดและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดสูงกว่าโอเอสแอล Type I และ Type II แสดงดัง Fig.4.20 และ Fig.4.21

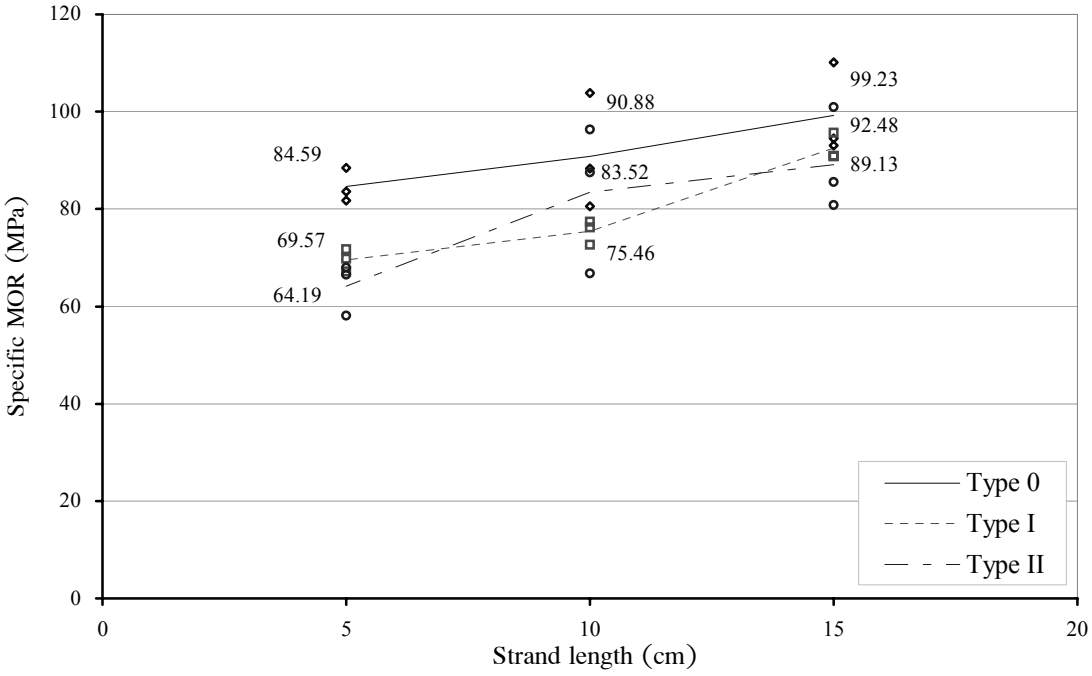


Fig.4.20 Specific MOR vs. strand length for different orientation of OSL

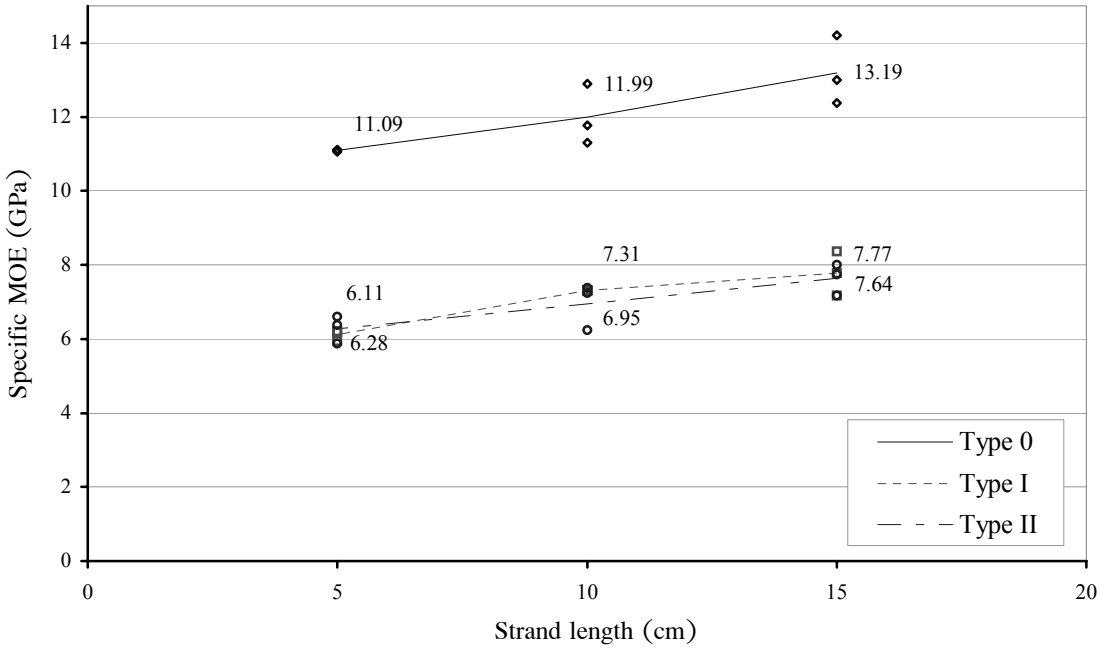


Fig.4.21 Specific bending MOE vs. strand length for different orientation of OSL

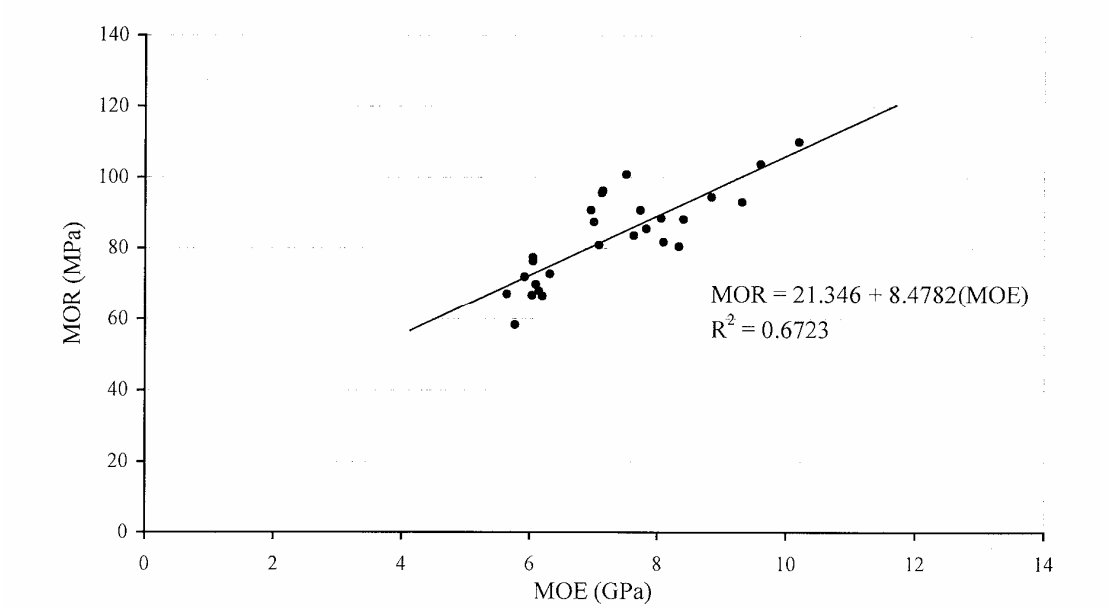


Fig.4.22 Modulus of rupture (MOR) vs. Modulus of elasticity (MOE) in bending

Table 4.9 Regression analysis of MOR and MOE in bending

The regression equation is y = 21.3 + 8.48x				
Predictor	Coef	S.D.		
Constant	21.346	8.764		
X	8.478	1.184		
S_e = 7.593	R-sq = 67.2%	r-sq(adj) = 65.9%		
Analysis of Variance				
Source	DF	SS	MS	F
Pr				
Regression	1	2956.9	2956.9	51.28
0.000				
Error	25	1441.5	57.7	
Total	26	4398.4		

เมื่อเขียนกราผระหว่างความแข็งแรงดัดหรือโมดูลัสแตกร้าว (MOR) และโมดูลัสยืดหยุ่นดัด (MOE) จะได้ว่า โมดูลัสแตกร้าวและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Pr < 0.0001) ตาม Fig.4.22 ผลวิเคราะห์ทางสถิติแสดงดัง Table 4.9 ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error of estimates) มีค่าน่อยมาก เพียง 7.59 และสัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด R^2 = 0.672

ลักษณะการวิบัติของโอเอสแอลเมื่อออกแรงกดที่กึ่งกลางคานทำให้เกิดโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในแนวนอน โมเมนต์จะทำให้เกิดความเค้นอัดบริเวณผิวด้านบนและเกิดความเค้นดึงบริเวณผิวด้านล่าง เนื่องจากโอเอสแอลรับแรงกดตั้งฉากกับผิวด้านบน การปริออกทางด้านตั้งฉากเสี้ยนเหมือนกับที่เกิดกับชิ้นทดสอบรับแรงกด (หัวข้อ 4.3.2) จึงไม่เกิดขึ้น ผิวด้านล่างที่รับความเค้นดึงจึงเกิดการวิบัติก่อนเสมอดังแสดงใน Fig.4.23 และยังมีชิ้นทดสอบบางชิ้นเมื่อเกิดการวิบัติที่ผิวด้านล่างแล้วก็เกิดการวิบัติเนื่องจากเรงเฉือนในแนวนอนบริเวณแกนกลางทันทีดัง Fig.4.24 (ในการทดสอบโมเมนต์ดัดนั้นความเค้นเฉือนสูงสุดเกิดในแนวนอนบริเวณกึ่งกลาง)

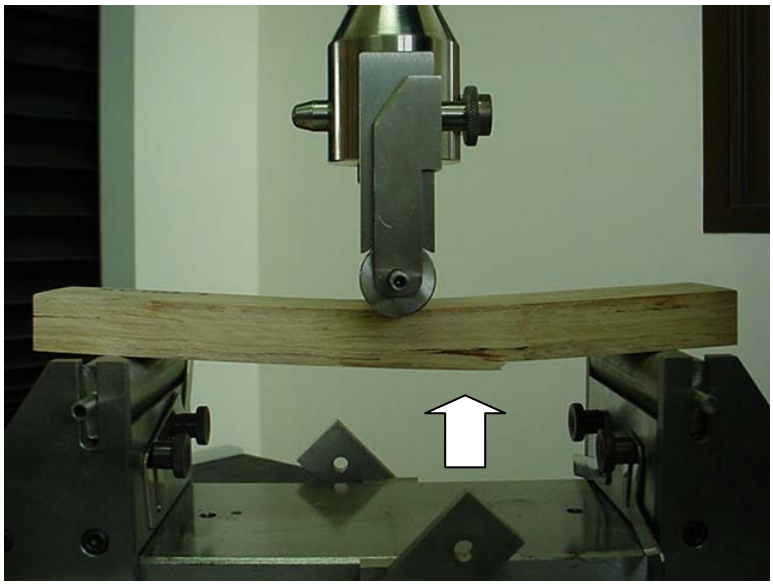


Fig.4.23 Tension failure mode on the bottom surface of OSL in static bending test.

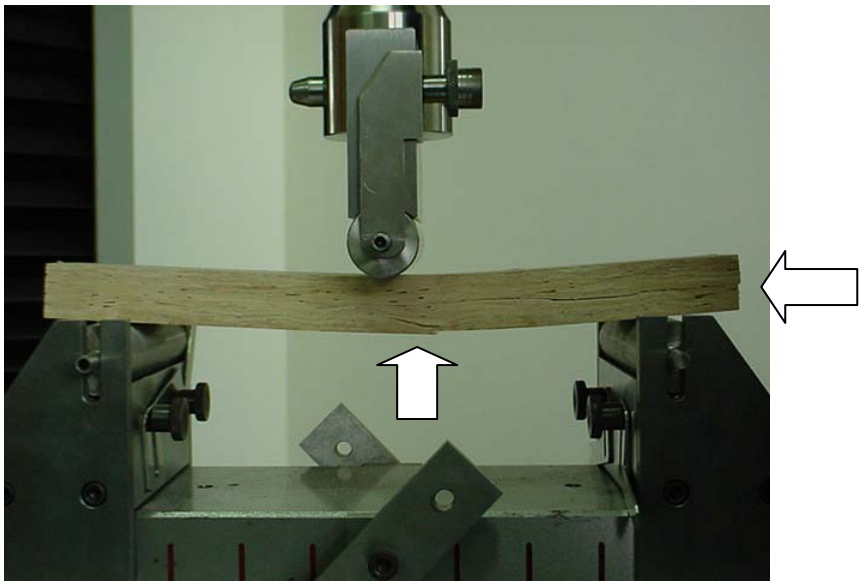


Fig.4.24 Tension failure mode on the bottom surface and shear failure mode in the middle of OSL in static bending test.

โมเมนต์ดัดทำให้เกิดความเค้นดึงและความเค้นอัด แม้ว่าแถบไม้จะเรียงตัวเป็นมุมเท่าไหร่ก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาในแกนหลังของแถบไม้ในแต่ละชั้นการเรียง (แกนตามเสี้ยนคือแกน x และแกนตั้งฉากเสี้ยนคือแกน y จาก Fig.4.12) ความยาวแถบไม้จึงมีผลต่อความแข็งแรงดัดเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในการทดสอบการดึงและการอัด การยึดติดกันของแถบไม้ทีให้เกิดมุมถ่ายทอดความเค้นและช่องว่างที่ปลายแถบไม้ แถบไม้ที่ยาวมากขึ้นทำให้มุมถ่ายทอดความเค้นลดลง องค์ประกอบความเค้นในแนวตั้งฉากเสี้ยน (แกน z จาก Fig.4.12) ที่ทำให้เกิดการวิบัติมีค่าน้อยลง โอเอสแอลสามารถรับความเค้นได้มากขึ้นจึงทำให้รับโมเมนต์ดัดได้มากขึ้น และความยาวแถบไม้ที่เพิ่มขึ้นยังทำให้เกิดช่องว่างน้อยลง (จาก Fig.4.14 – 4.17) โอกาสที่จะเกิดการวิบัติจากช่องว่างเหล่านี้ก็น้อยลง โมเมนต์ดัดที่รับได้จึงมากขึ้นเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้น

โมดูลัสยืดหยุ่นของโอเอสแอลซึ่งเป็นไม้ประกอบขึ้นอยู่กับทิศทางเช่นเดียวกับไม้ที่เป็นวัสดุออร์โธทรอปิค (Barnes, 2000) เมื่อมุมแถบไม้เบี่ยงจากแนวตามยาวของคาน โมดูลัสยืดหยุ่นจึงมีค่าน้อยลง ทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นของโอเอาแอลแบบ I และแบบ II มีค่าน้อยกว่าแบบ 0

นอกจากนั้นสมการดัดแปลงของบาร์นส์ (Barnes, 2001) ยังให้ผลการคำนวณที่ดีเลิศสำหรับโอเอสแอลแบบ 0 เมื่อรับโมเมนต์ดัดอีกด้วย ดังแสดงใน Fig.4.25 และ Fig.4.26 เปรียบเทียบที่ความถ่วงจำเพาะ 0.7 โดยโมดูลัสยืดหยุ่นการดัดได้ $R^2 = 0.92$ ที่ $n = 0.95$ ส่วนความแข็งแรงดัดได้ $R^2 = 0.89$ ที่ $n = 1.00$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความแข็งแรงของไม้จริง $MOE_{SW} = 9.42$ GPa และ $MOR_{SW} = 95.45$ MPa ตามลำดับ ความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการ 4.10 และ 4.11

โมดูลัสยืดหยุ่นดัด

$$MOE_{OSL} = MOE_{SW} \cdot \left(\frac{1}{20 \cdot \sin^{0.95}(\arctan(2/\zeta)) + \cos^{0.95}(\arctan(2/\zeta))} \right) \qquad (4.10)$$

ความแข็งแรงดัด

$$MOR_{OSL} = MOR_{SW} \cdot \left(\frac{1}{20 \cdot \sin(\arctan(2/\zeta)) + \cos(\arctan(2/\zeta))} \right) \qquad (4.11)$$

เช่นเดียวกับการทดสอบการดึงและการอัด สมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนชลูดยิ่งมาก ความแข็งแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดกูจะเข้าใกล้ค่าของไม้ยาวพาราจริงมากขึ้นจนเทียบได้กับไม้ยางจริงที่อัตราส่วนเรียงเป็นอนันต์ แต่ในภาคอุตสาหกรรมที่อัตราส่วนชลูดประมาณ 250 (ความหนาประมาณ 0.6 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 150 มิลลิเมตร) ความแข็งแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดจะมีค่าเท่ากับ 86% ของไม้ยางพาราจริง

ความแข็งแรงดัดของโอเอสแอลแบบ 0 สูงกว่าแบบ I และแบบ II ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับทางทฤษฎีที่ได้ทำนายไว้ จึงต้องมาพิจารณาอิทธิพลของข้อมูลพื้นฐานของการคำนวณได้แก่ ความแข็งแรงดึงและอัด โมดูลัสยืดหยุ่นดึงและอัด และจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

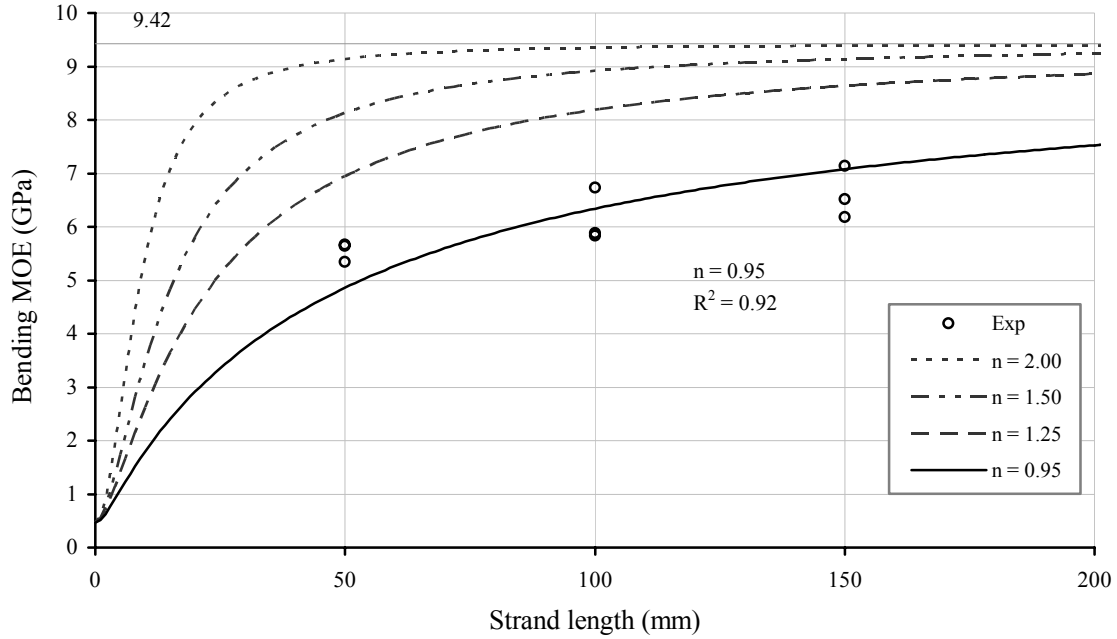


Fig.4.25 Modified Hankinson"s formula as different order "n" for predicting bending MOE parallel to grain of OSL from rubberwood with SG = 0.7, 1 mm of strand thickness

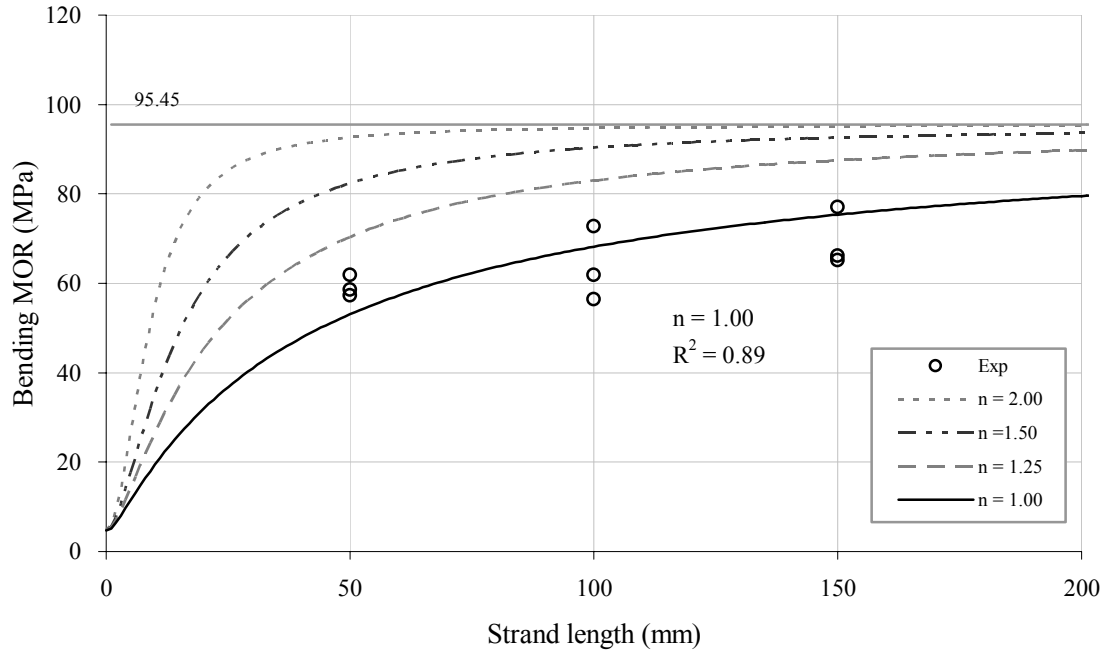


Fig.4.26 Modified Hankinson"s formula as different order "n" for predicting bending MOR parallel to grain of OSL from rubberwood with SG = 0.7, 1 mm of strand thickness

4.4 การปรับปรุงแบบจำลอง

จากการทดสอบการดึงและการอัด พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นการดึง E^T และการอัด E^C ของโอเอสแอลที่ทำขึ้นในห้องปฏิบัติการมีค่าแตกต่างกัน ทำให้เมื่อคำนวณความเค้นตากโมเมนต์ดัดแล้วตำแหน่งของแกนสะเทินไม่อยู่ ณ กึ่งกลางหน้าตัดอีกต่อไป แต่จะเลื่อนขึ้นไปด้านบนเล็กน้อยเนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นการอัดมีค่ามากกว่าโมดูลัสการดึง โปรแกรมคำนวณการวิบัติที่ได้ทำไว้แล้วจากบทที่ 2 (กำหนดให้โมดูลัสการดึงและการอัดเท่ากันและเท่ากับไม้ยาวพาราจริง) จึงต้องเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในขั้นตอนการกำหนดสมบัติของวัสดุ โดยโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้จะเพิ่มจาก 2 ค่า (E_1, E_2) เป็น 4 ค่า คือ

E_1^T คือโมดูลัสยืดหยุ่นการดึงในทิศตามเสี้ยน

E_1^C คือโมดูลัสยืดหยุ่นการอัดในทิศตามเสี้ยน

E_2^T คือโมดูลัสยืดหยุ่นการดึงในทิศตั้งฉากกับเสี้ยน

E_2^C คือโมดูลัสยืดหยุ่นการอัดในทิศตั้งฉากกับเสี้ยน

เมื่อโมดูลัสยืดหยุ่นมี 2 ชุดคือชุดที่รับความเค้นดึง (E_1^T และ E_2^T) และชุดที่รับความเค้นอัด (E_1^C และ E_2^C) เฉพาะขั้นตอนการคำนวณความเค้นจึงเปลี่ยนไปโดยเพิ่มเติมการกำหนดตำแหน่งแกนสะเทินแสดงไว้ใน Fig.4.27 มีขั้นตอนคือสมมติตำแหน่งของแกนสะเทินขึ้นมาก่อน บริเวณเหนือแกนสะเทินใช้ E_1^C และ E_2^C เพราะรับความเค้นอัด ส่วนบริเวณใต้แกนสะเทินใช้ E_1^T และ E_2^T เพราะรับความเค้นดึง จากนั้นคำนวณความเค้นตามปกติ (Fig.2.4) และตรวจสอบตำแหน่งแกนสะเทินจากชั้นที่มีความเค้นตั้งฉากเป็นศูนย์ ($\sigma_x = 0$) แล้วนำตำแหน่งที่ได้นี้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้สมมติไว้ก่อนหน้านี้ ถ้าค่าที่ได้ไม่ตรงกันจะทำซ้ำขั้นตอนการหาคามเค้นใหม่ทั้งหมดโดยใช้ตำแหน่งแกนสะเทินที่ได้ใหม่นี้เป็นค่าเริ่มต้น จนกระทั่งความแตกต่างของแกนสะเทินที่ได้และที่สมมติไว้มีค่าเท่ากันหรืออยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้

เนื่องจากโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนพัวส์ซองเป็นค่าที่ไม่ได้ทำการวัดในงานวิจัยนี้จึงต้องประมาณค่าทั้งสองนี้จากโมปแกรมคอมคำนวณโดยจะแปรค่าทั้งสองเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสองมากที่สุดโดยค่าที่แปรไปจะอยู่ในช่วงของไม้จริงดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อสมบัติเชิงกลแต่ละตัวจากจุดออกแบบของโอเอสแอลในบทที่ 2 ที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า โมดุลัสฉ์อนมีผลต่อความแข็งแรงของโอเอสแอล แต่อัตราส่วนพัวส์ซองมีผลน้อยมาก แต่เมื่อแปรค่าทั้งสองพร้อมกันผลที่ได้กลับแสดงให้เห็นว่ามีผลต่อความแข็งแรงของโอเอสแอลอย่างมากแสดงใน Fig.4.28 และ Fig.4.29

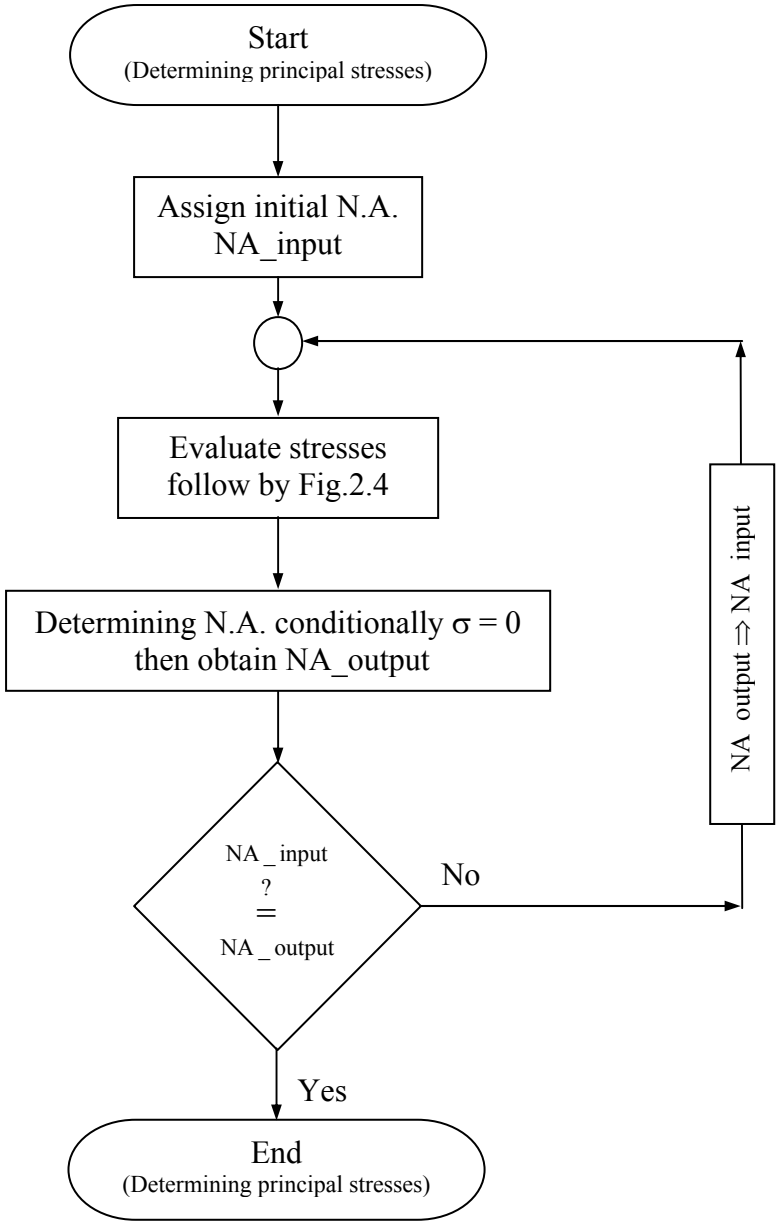


Fig.4.27 Flowchart for modification in determining principal stresses as N.A. does not concide eith the centroidal axis of the cross section because $E^T \neq E^C$

ที่อัตราส่วนพัวส์ซองคงที่จะมีค่าโมดูลัสเฉือนค่าหนึ่งที่ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงหรือในที่นี้คือโมเมนต์ดัดสูงสุดตาม Fig.4.28 อัตราส่วนพัส์ซองยิ่งมากความแข็งแรงที่ได้ก็จะยิ่งมากโดยสังเกตได้จากยอดกราฟมีค่าสูงสุดที่ $\nu_{12} = 0.60$ แต่ถ้าอัตราส่วนพัวส์ซองมีค่าสูงกว่านี้ (Fig.4.29) ก็จะได้ค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้นไปอีก แต่งานวิจัยนี้เลือกช่วงอัตราส่วนพัวส์ซองให้อยู่ในช่วงเดียวกับไม้จริงซึ่งอยู่ระหว่าง 0.2 –0.6 และโมดูลัสเฉือนก็เช่นเดียวกันจะอยู่ในช่วงของไม้จริงระหว่าง 0.03 – 0.20 เท่าของโมดูลัสยืดหยุ่นตามเสี้ยน ($\left(sE_1^T\right)_{average} = 2177$ MPa นั่นคือ 65.30 MPa < sG_{12} < 435.36 MPa) ซึ่งอยู่ในช่วงที่ครอบคลุมยอดกราฟด้วย

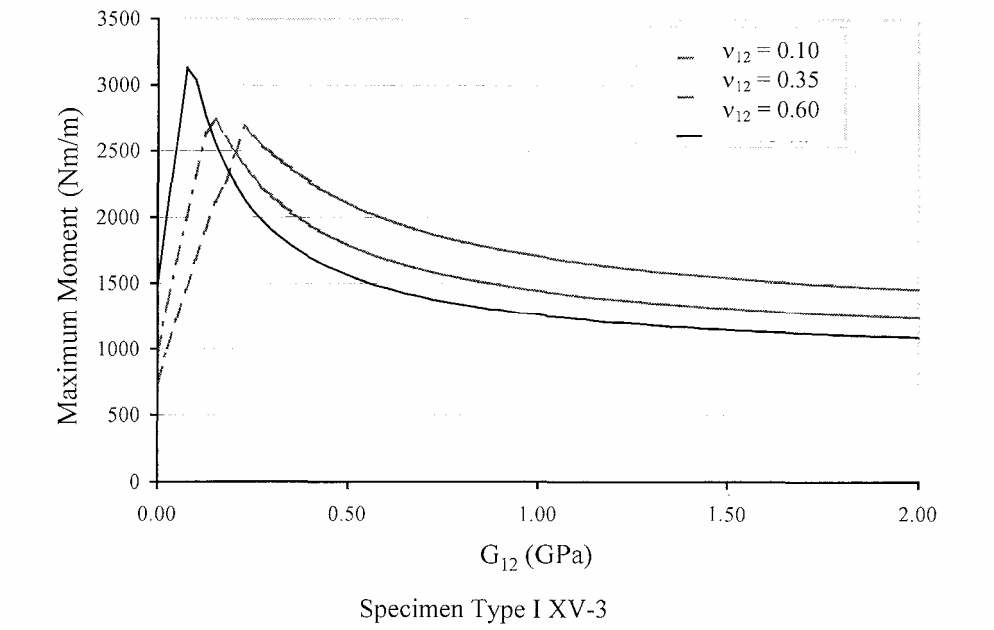


Fig.4.28 Maximum moment as a function of shear modulus (G_{12}) and Poisson's ratio (ν_{12})

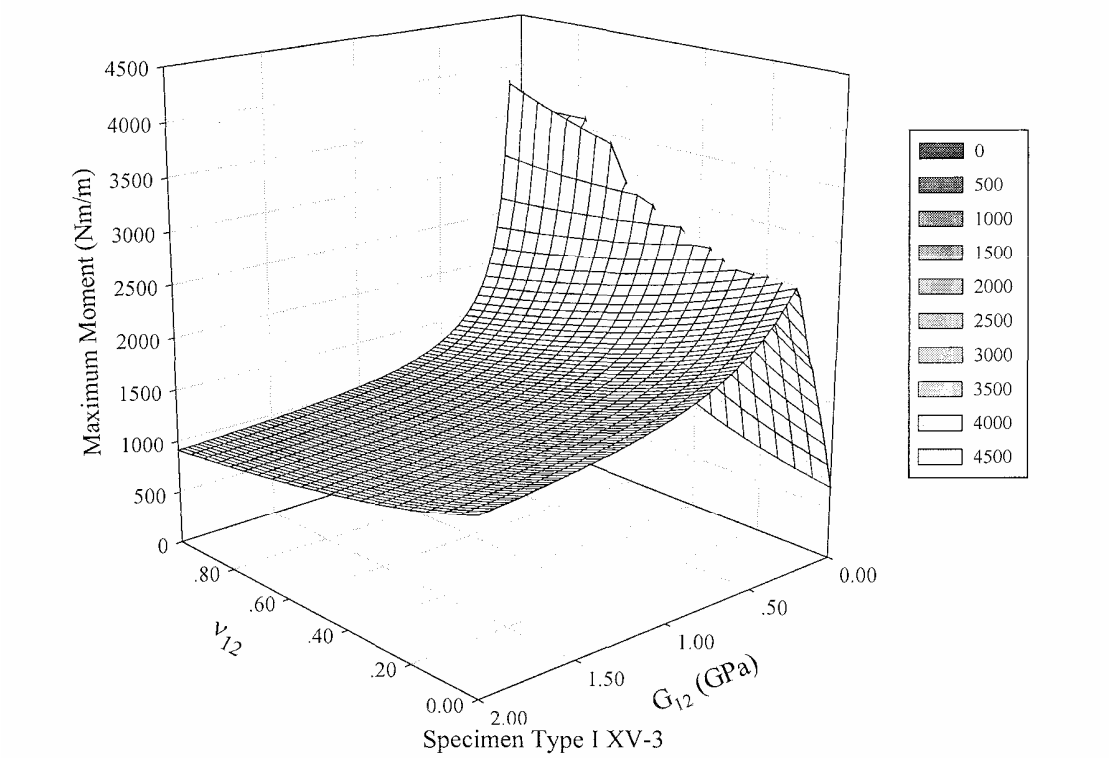


Fig.4.29 Maximum moment as a function of shear modulus (G_{12}) and Poisson's ratio (ν_{12}) in 3D-surface

เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบการดัดที่พบว่าเป็นความเสียหายเนื่องจากการดึงที่บริเวณผิวด้านล่าง เพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจริง ค่าความแข็งแรงต้านการอัดในทิศตามเสี้ยนของโอเอสแอลจึงถูกปรับให้มีค่ามากกว่าความแข็งแรงต้านการดึงมาก ๆ (ในการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ใช้ค่า 500 MPa)

สมบัติเชิงกลของโอเอสแอลถูกนำมาจากการทดสอบการดึงและการอัดทั้งหมด ยกเว้นค่าความแข็งแรงต้านการอัดในทิศทางตามสี้ยนโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนพัวส์ซองที่ต้องสมมติจากไม้จริง เนื่องจากความถ่วงจำเพาะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของโอเอสแอลด้วย ดังนั้นสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นที่จะป้อนค่าเข้าเพื่อคำนวณความแข็งแรงของโอเอสแอลจะต้องปรับค่า โดยนำสมบัติเชิงกลจำเพาะคูณด้วยความถ่วงจำเพาะก็จะได้สมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น (สมมติให้สมบัติเชิงกลมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความถ่วงจำเพาะ) สมบัติเชิงกลที่ได้จึงเป็นของแต่ละชิ้นแยกกัน ความยาวแถบไม้ที่ต่างกันก็ให้สมบัติเชิงกลที่ต่างกันด้วยจึงต้องใช้ข้อมูลเหล่านี้จากผลการทดสอบการดึงและการอัดซึ่งได้แสดงไว้แล้วใน Appendix F

ค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าโมเมนต์สูงสุดที่ชิ้นทดสอบรับได้ แล้วจึงแทนค่าในสมการ (3.2) เพื่อเปรียบเทียบเป็นค่าความเค้นสูงสุดต่อไป แม้ว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นอาจไม่ใช่ความเค้นที่คำนวณได้จากสมาร (3.2) นี้ก็ตามเพราะแกนสะเทินไม่ได้อยู่ที่แนวกึ่งกลางอีกต่อไปเมื่อโมดูลัสยืดยุ่นการดึงและการอัดมีค่าแตกต่างกัน แต่ถึงกระนั้นการเปรียบเทียบด้วยวิธีนี้ก็เป็นการง่ายที่จะนำค่าจากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของไม้จริง

ผลของโมดูลัสยืดหยุ่นของการดึงและการอัดที่ต่างกัน โมดูลัสเฉือนกับอัตราส่วนพัวส์ซอง ลักษณะการวิบัติของชิ้นทดสอบ และความถ่วงจำเพาะที่ไม่เท่ากันในแต่ละชิ้นทดสอบ สิ่งเหล่านี้จะถูกประมวล แล้วเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงที่ได้กับผลการทดสอบดังจะแสดงไว้ในหัวข้อต่อไป

4.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับค่าจากแบบจำลอง

การเปรียบเทียบค่าจากแบบจำลองและค่าจากการทดสอบจะเปรียบเทียบทุกแบบการเรียงโดยร้อยละความคลาดเคลื่อนคิดจาก

ร้อยละความคลาดเคลื่อนคิดจาก

$$\text{ร้อยละความคลาดเคลื่อน} = \frac{\text{ค่าจากการคำนวณ} - \text{ค่าจากการทดสอบ}}{\text{ค่าจากการทดสอบ}} \times 100 \quad \text{.....(3.7)}$$

ค่าจากการคำนวณจะใช้โมดูลัสยืดหยุ่นดึงและอัดของโอเอสแอลแบบ 0 ความถ่วงจำเพาะของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น เลือกค่าโมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนพัวส์ซองที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด และกำหนดให้การวิบัติเกิดขึ้นที่ผิวด้านล่างที่รับความเค้นดึง

4.5.1 โอเอสแอลแบบ 0 (Type 0) เรียงแถบไม้ตามยาว (0° ทุกชั้น)

Table 4.10 แสดงผลเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบและค่าจากการคำนวณความเค้นที่ได้จากการคำนวณจากเกณฑ์ความเสียหายทั้งสองให้ค่าที่ตรงกันเนื่องจากไม่มีความเค้นในแนวตั้งฉากกับเสี้ยนและความเค้นเฉือนเกิดขึ้น (เนื่องจากเรียงแถบไม้ในแนว 0° ทั้งหมด) เทอมที่เกี่ยวข้องกับความเค้นตั้งฉากเสี้ยนและความเค้นเฉือนในสมการความเสียหายของไซ-ฮิลล์จึงถูกตัดออกไป ค่าที่ได้จากการคำนวณที่นำเสนอในตารางจึงแสดงเพียงชุดเดียว

Table 4.10 Bending strength (MOR) comparison of OSL Type 0 between test and calculation

Specimen	SG	Test (MPa)	Calculation (MPa)	Error (%)
Type 0 V1	0.78	63.58	48.63	-23.52
Type 0 V2	0.79	66.03	49.40	-25.19
Type 0 V3	0.73	64.12	45.34	-29.30
Average	0.76	64.58	47.79	-26.00
Type 0 X1	0.68	60.10	48.25	-19.71
Type 0 X2	0.73	58.59	51.56	-12.01
Type 0 X3	0.69	71.98	49.14	**-31.73**
Average	0.70	63.56	49.65	-21.77
Type 0 XV1	0.76	71.95	71.22	-1.02
Type 0 XV2	0.67	62.27	62.63	**0.57**
Type 0 XV3	0.72	79.21	67.40	-14.91
Average	0.72	71.14	67.08	-5.70

ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดคือ +0.57 % เทียบกับค่าจากการทดสอบ และความคลาดเคลื่อนสูงสุดคือ –31.73 % เทียบกับค่าจากการทดสอบ ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยคือที่ความยาวแถบไม้ 5 เซนติเมตร 10 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร ความเค้นเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบและคำนวณแสดงดัง Fig.4.30

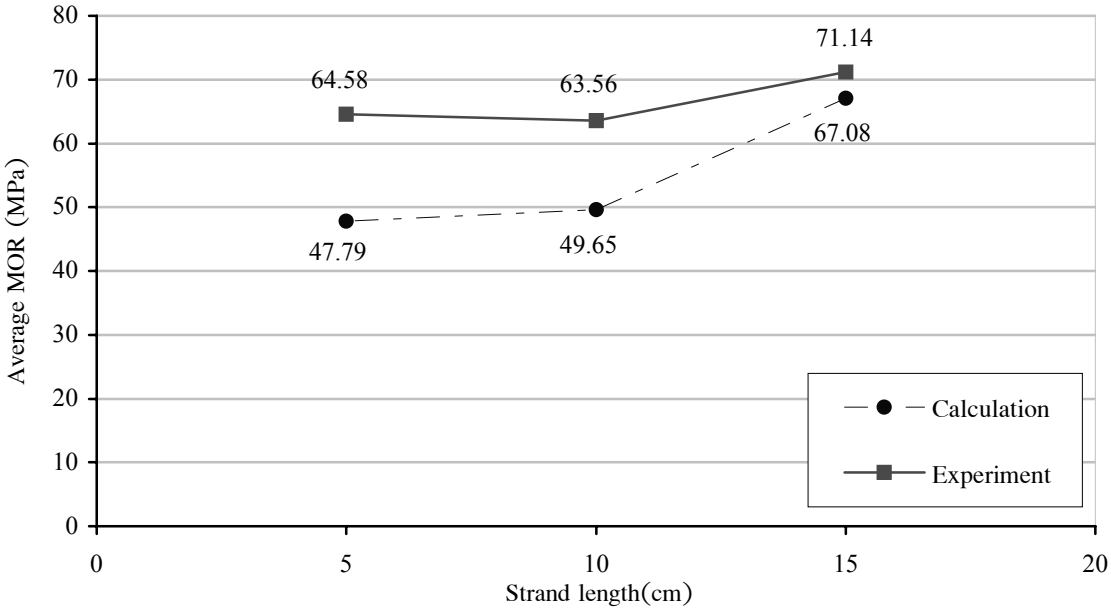


Fig.4.30 Average bending strength (MOR) comparison of OSL Type 0

ความแข็งแรงต้านการดัดของโอเอสแอลที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่าจากการทดอง อาจเป็นผลมาจากการกระจายความหนาแน่นในแนวตั้ง (Vertical Density Profile) ที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดแต่มีรูปแบบเป็นรูป Σ (Maloney, 1993; Geimer, 1985; Kollmann and Côté, 1968)

ความหนาแน่นของโอเอสแอลที่ผลิตด้วยกระบวนการทั่วไป ๆ ในอุตสาหกรรม คือ ให้ความร้อนผ่านทางแผ่นความร้อนที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นเตรียมอัดแล้วบีบอัดจนได้ความหนาที่ต้องการ แถบไม้ที่อยู่บริเวณผิวของแผ่นเตรียมอัดได้รับความร้อนก่อนอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณแกนกลางของแผ่นเตรียมอัด ผิวด้านนอกเกิดสภาพพลาสติกก่อนแกนกลาง เมื่อถูกบีบอัดขณะที่มีสภาพเป็นพลาสติก ผนังเซลล์ของแถบไม้ที่รับความเค้นอัดจะเกิดยุบตัวอย่างถาวรปิดช่องว่างภายในเซลล์ ทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น บริเวณผิวด้านนอกของแผ่นเตรียมที่เกิดการยุบตัวในระดับเซลล์ก่อนแกนกลาง แผ่นสำเร็จโอเอสแอลที่ได้มีความหนาแน่นไม่เท่ากันทั่วทั้งหน้าตัดคือที่บิรวเณด้านนอกมีความหนาแน่นสูงกว่าด้านใน และการกระจายความเค้นมีลักษณะเกือบสมมาตรกับแนวกึ่งกลาง โดยมีรูปแบบการกระจายความหนาแน่นเป็นรูป Σ ดังเช่น Fig.4.31

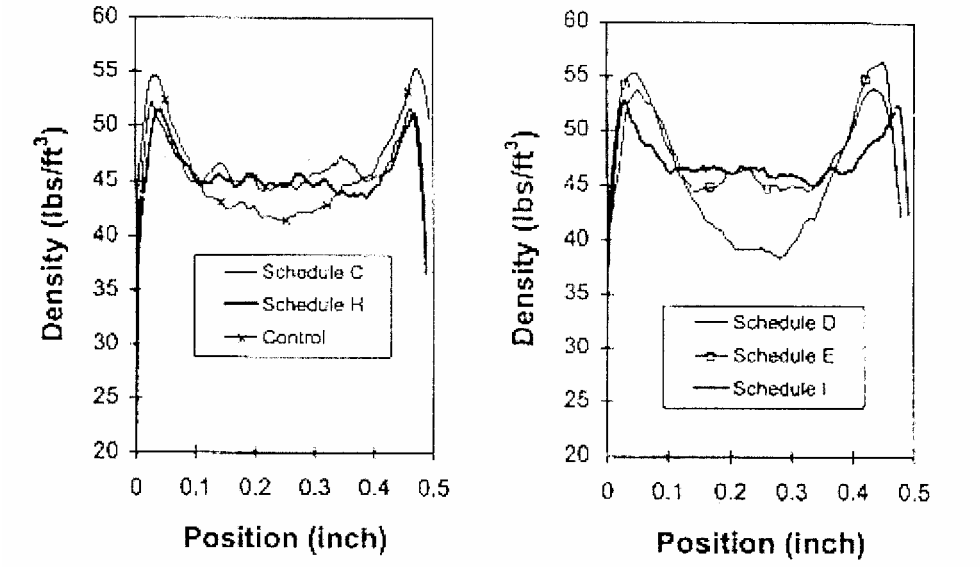


Fig.4.31 A "Σ-shape" vertical density profile through thickness (Wang, *et al.*, 2000)

ความแข็งแรงของโอเอสแอลขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความหนาแน่นยิ่งสูงความแข็งแรงก็ยิ่งสูง (Maloney, 1993) การกระจายความหนาแน่นรูป Σ ทำให้ความแข็งแรงและโมดูลัสยืดหยุ่นบริเวณผิวด้านนอกสูงกว่าแกนกลาง เมื่อรับโมเมนต์ดัดจึงมีพฤติกรรมคล้ายคานรูป I (Geimer, 1985; Kollmann and Côté, 1968) โอเอสแอลที่มีรูปแบบการกระจายความหนาแน่นเท่ากันหมดตลอดความหนาจะมีรูปแบบการกระจายความเค้นเป็นเส้นตรงดัง Fig.4.32a แต่เมื่อโอเอสแอลมีการกระจายความหนาแน่นเป็นรูป Σ ความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวด้านนอกจะสูงกว่าปกติตาม Fig.4.32b การอินทิเกรตหาโมเมนต์ลัพธ์จึงสูงกว่าปกติด้วย น้ำหนักบรรทุกที่รับได้จึงสูงกว่าปกติ

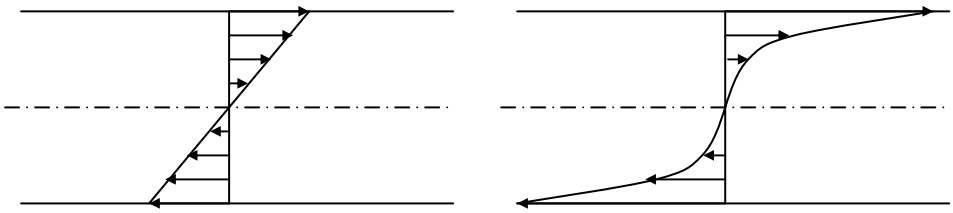


Fig.4..32 Stress profile in bending of OSL (a) with uniform VDP and (b) with "Σ-shape" VDP

แบบจำลองการหาความเค้นของโครงงานวิจัยนี้ถูกสมมติให้ความหนาแน่นเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด การคำนึงถึงผลกระทบของการกระจายความหนาแน่นน่าจะให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น

4.5.2 <u>โอเอสแอลแบบ I (Type I) และแบบ II (Type II) เรียงแถบไม้ 20 ชั้นและ 10 ชั้น</u>

ความเค้นที่ได้จากการคำนวณจากเกณฑ์ความเสียหายทั้งสองให้ค่าที่ต่างกัน โดยเกณฑ์ความเค้นสูงสุด (MSC) ให้ค่าสูงกว่าเกณฑ์ความเสียหายของไซ-ฮิลล์ (THC) เนื่องจากเกณฑ์ความเค้นสูงสุดไม่ได้คิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตามแนวเสี้ยน ความเค้นตั้งฉากเสี้ยนและความเค้นเฉือน ซึ่งต่างจากเกณฑ์ของไซ-ฮิลล์ที่คำนึงถึงปฏิสัมพันธ์นี้ ค่าอัตราส่วนพัวส์ซอง (Poisson's ratio) มีค่าเท่ากับ 0.6 และโมดูลัสเฉือน (G) ใช้ค่า 75 MPa และ 100 MPa ดังแสดงในตาราง 6

Table 4.11 MOR comparison of OSL Type I between experiment and calculation

Specimen	SG	Exp. (MPa)	ν_{12}	G (MPa)	THC		MSC	
					Cal. (MPa)	Error (%)	Cal. (MPa)	Error (%)
Type I-V-1	0.76	54.64	0.6	75	39.99	-26.82	40.91	-25.14
Type I-V-2	0.72	48.62	0.6	75	38.62	-20.58	39.50	-18.77
Type I-V-3	0.76	53.04	0.6	75	39.96	-24.65	40.88	-22.92
Average	0.75	52.10	0.6	75	39.52	-24.02	40.43	-22.28
Type I-X-1	0.80	57.93	0.6	75	46.29	**-20.09**	47.44	**-18.10**
Type I-X-2	0.90	69.73	0.6	100	53.34	-23.50	56.24	-19.34
Type I-X-3	0.77	58.83	0.6	75	45.21	-23.15	46.33	-21.25
Average	0.82	62.16	0.6	83.3	48.28	-22.25	50.00	-19.56
Type I-XV-1	0.86	81.96	0.6	100	58.78	**-28.28**	60.92	**-25.67**
Type I-XV-2	0.83	75.56	0.6	100	56.19	-25.63	60.56	-19.85
Type I-XV-3	0.82	74.35	0.6	100	54.84	-26.25	60.38	-18.79
Average	0.84	77.29	0.6	100	56.60	-26.72	60.62	-21.44

สำหรับโอเอสแอลแบบ I (เรียงแถบไม้ 20 ชั้น) ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของ THC คือ –20.09% สูงสุดคือ –28.28 % เทียบกับค่าจากการทดสอบ ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของ MSC คือ –18.10% สูงสุดคือ –25.67 % เทียบกับค่าจากการทดสอบ ค่าอัตราส่วนพัวส์ซองมีค่าเท่ากับ 0.6 และโมดูลัสเฉือน (G) ใช้ค่า 75 MPa และ 100 MPa

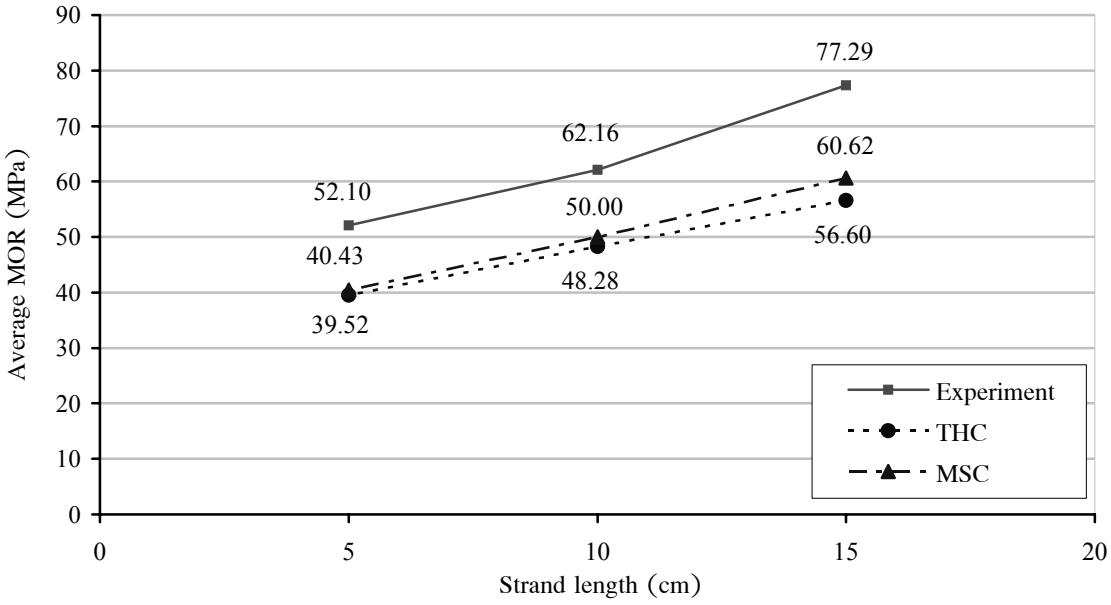


Fig.4.33 MOR of OSL Type I comparing between experiment and calculation

โมดูลัสเฉือนที่สอดคล้องกับค่าสูงสุดให้ค่าที่แตกต่างกันในแต่ละความยาวแถบไม้น่าจะมีสาเหตุมาจากความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันของชิ้นทดสอบโดยจะสังเกตเห็นว่าชิ้นทดสอบที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าค่าโมดูลัสเฉือนที่เหมาะสมก็จะมีค่าน้อยกว่าด้วยซึ่งเห็นได้ใน Table 4.11 ที่ความยาวแถบไม้ 5 เซนติเมตร ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่า 0.72 – 0.76 ใช้ค่าโมดูลัสเฉือน 75 MPa ในขณะที่ที่ความยาวแถบไม้ 15 เซนติเมตร ความถ่วงจำเพาะมากว่าคือ 0.82-0.86 ต้องใช้ค่าโมดูลัสเฉือนที่สูงกว่าคือ 100 MPa ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่างเป็นลักษณะทั่วไปของไม้ที่ความความถ่วงจำเพาะมากกว่าย่อมมีค่าโมดูลัสที่สูงกว่า

สำหรับโอเอสแอลแบบ II (เรียงแถบไม้ 10 ชั้น) ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดโดย THC คือ –20.59% สูงสุดคือ –49.98 % เทียบกับค่าจากการทดสอบ ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดโดย MSC คือ +3.05% สูงสุดคือ –36.12 % เทียบกับค่าจากการทดสอบ ค่าอัตราส่วนพัวส์ซองมีค่าเท่ากับ 0.6 และโมดูลัสเฉือน (G) ใช้ค่า 120 MPa และ 100 MPa ดังแสดงใน Table 4.12 และ Fig.4.34 โมดูลัสเฉือนที่สอดคลองกับค่าสูงสุดสำหรับโอเอวแอลแบบ II ก็มีลักษณธเช่นเดียวกับแบบ I คือมีค่ามากขึ้นเมื่อความถ่วงจำเพาะของชิ้นทดสอบมากขึ้นโยความถ่วงจำเพาะ 0.70-0.75 ใช้ค่าโมดูลัสเฉือน 100 MPa ในขณะที่ความถ่วงจำเพาะ 0.75-0.83 ใช้ค่าโมดูลัสเฉือน 120 MPa

Table 4.12 MOR comparison of OSL Type II between experiment and calculation

Specimen	SG	Exp. (MPa)	ν_{12}	G (MPa)	THC		MSC	
					Cal. (MPa)	Error (%)	Cal. (MPa)	Error (%)
Type II-V-1	0.70	40.69	0.6	100	32.31	**-20.59**	42.11	**3.50**
Type II-V-2	0.73	48.58	0.6	100	33.72	-30.58	43.39	-10.68
Type II-V-3	0.75	51.00	0.6	100	34.58	-32.19	44.14	-13.44
Average	0.73	46.76	0.6	100	33.54	-27.79	43.21	-6.88
Type II-X-1	0.80	76.68	0.6	120	38.35	**-49.98**	49.45	-35.51
Type II-X-2	0.83	55.27	0.6	120	39.95	-27.72	51.02	-7.70
Type II-X-3	0.83	72.98	0.6	120	40.25	-44.85	51.31	-29.69
Average	0.82	68.31	0.6	120	39.52	-40.85	50.59	-24.30
Type II-XV-1	0.77	65.87	0.6	120	40.70	-38.20	49.49	-24.86
Type II-XV-2	0.75	76.09	0.6	120	39.86	-47.61	48.61	**-36.12**
Type II-XV-3	0.80	64.34	0.6	120	42.10	-34.57	50.94	-20.84
Average	0.77	68.77	0.6	120	40.89	-40.13	49.68	-27.27

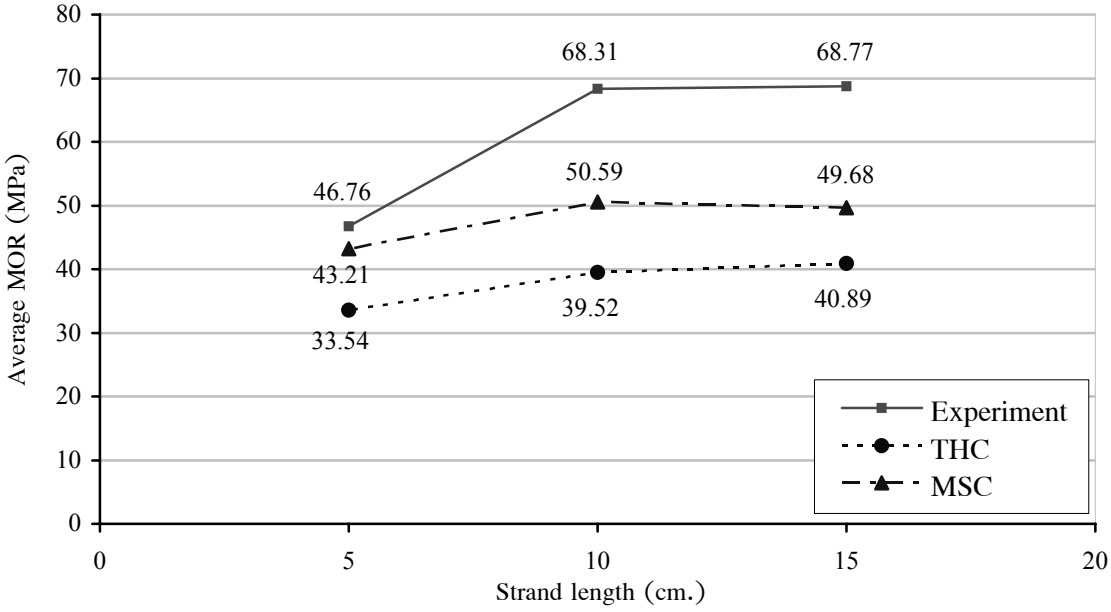


Fig.4.34 MOR of OSL Type II comparing between experiment and calculation

โมดูลัสเฉือนที่แตกต่างกันแม้ว่าความถ่วงจำเพาะของโอเอสแอลแบบ I และแบบ II เท่ากันนั้นอาจมีสาเหตุมาจากรูปแบบการกระจายความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โอเอสแอลแบบ I เรียงแถบไม้ภายในเป็นมุมต่าง ๆขณะที่แบบ II เรียงแถบไม้ภายในเป็น 0° ทั้งหมด การเหลื่อมกันของแถบไม้ในแบบ I และ แบบ II จึงแตกต่างกัน การกระจายความหนาแน่นจึงแตกต่างกัน (Lang and Wolcott, 1990) สมบัติเชิงกลเฉลี่ยทั้งหน้าตังจึงน่าจะแตกต่างกันถ้ารูปแบบการกระจายความหนาแน่นต่างกัน

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นการการคำนวณโอเอสแอลที่เรียงมุมแบบต่าง ๆ มีค่าสูง นอกจากจะมีผลมาจากการกระจายความหนาแน่นที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ4.5.1 ที่ผ่านมาซึ่งกล่าวว่าการกระจายความหน่าแน่นรูป Σ ทำให้ชิ้นทดสอบมีค่าความแข็งแรงมากกว่าที่คำนวณแล้ว ยังมีผลของความไม่แน่นอนของมุมแถบไม้ในแต่ละชั้นและความอ่อนไหวต่อโมดูลัสเฉือน-อัตราส่วนพวส์ซองด้วย

ชิ้นทดสอบมีความหนาประมาณ 20 มิลลิเมตร แบ่งออกเป็น 20 ชั้น ดังนั้นแต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ลักษณะของชิ้นทดสอบทำขึ้นมีการเหลื่อมกันระหว่างชั้นเนื่องจากความไม่เป็นระเบียบของแถบไม้ตาม Fig.4.35 ทำให้มุมแถบไม้ในชั้นนั้น ๆ ไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อมุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากจุดออกแบบในบทที่ 2 ทำให้เราทราบว่า มุมที่เปลี่ยนไปในแต่ละชั้นมีผลต่อความแข็งแรงดัดโดยชั้นที่ห่างจากแกนกลางมากเท่าใดก็จะยิ่งมีผลมากเท่านั้น และจะส่งผลให้โอเอสแอลรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยลง ซึ่งต่างจากการเรียงของโอเอสแอลแบบ 0 ที่ทุกชั้นเป็น 0° ดังนั้นแม้จะมีการเหลื่อมล้ำกันในชั้นที่ติดกันก็ไม่มีผลกระทบใด ๆทั้งสิ้นต่อค่ามุม มุมที่คลาดเคลื่อนไปเนื่องจากการเหลื่อมล้ำของชั้นจึงทำให้ความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบแตกต่างจากการคำนวณ

Fig.4.35 Overlap between layers in OSL

การเหลื่อมกันระหว่างชั้นนอกจากจะทำให้มุมแถบไม้ผิดไปจากที่ควรจะเป็นแล้ว ยังมีผลทำให้เกิดปรากฏการณ์การกระจายความเค้นเป็นรูป Σ มากขึ้นอีกด้วย เนื่องจากการเหลื่อมกันของแถบไม้ทำให้แผ่นเตรียมอัดมีความหนากว่าปกติ (Lang and Wolcott, 1990) เมื่ออัดร้อนให้ได้ความหนาที่เท่ากัน แผ่นเตรียมอัดที่มีความหนามากกว่าต้องใช้แรงอัดมากขึ้นและจะเกิดการเสียรูปที่มากกว่าแถบไม้ที่ไม่เหลื่อมกันซึ่งมีความหนาน้อยกว่า ความหนาแน่น

บริเวณที่เหลื่อมกันก็จะมากกว่าและจ่าจะส่งผลไปถึงรูปแบบการกระจายความเค้นตามความหนา ทำให้บริเวณผิวหน้ามีความหนาแน่นสูงขึ้นอีก เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นบริเวณผิวหน้า ความแข็งแรงดัดก็จะมากขึ้นตามไปด้วยดังที่ได้อธิบายไว้แล้วจากหัวข้อ 4.5.1 โอเอสแอลที่มีการเหลื่อมกันของแถบไม้ที่มากกว่าเช่น แบบ I และ แบบ II เนื่องจากการเรียงแถบไม้เป็นมุมต่าง ๆ จึงมีความหนาแน่นที่ผิวนอกสูงกว่าแบบ 0 ดังนั้นผลการทดสอบของแบบ I และ แบบ II จึงให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าด้วย

นอกจากรูปแบบการกระจายความหนาแน่นตามความหนาและการเหลื่อมกันของแถบไม้แล้ว สมบัติเชิงกลได้แก่ โมดูลัสเฉือนและอัตราส่วนพัวส์ซอง ซึ่งเมื่อสองค่านี้มีผลต่อความแข็งแรงดัดของโอเอสแอลย่างมากดังที่แสดงไว้ใน Fig.4.29 ณ บริเวณจุดยอดของกราฟความชั้นของเส้นกราฟสูงมาก นั่นคือถ้าโมดูลัสเฉือนผิดพลาดไปจากค่าจริงเพียงเล็กน้อย ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับการทำนายความแงแรงดัดของโอเอสแอลจะมีค่ามาก แบบจำลองของงานวิจัยในครั้งต่อ ๆไปจึงต้องคำนึงถึงโมดูลัสเฉือนนอกเหนือจากการกระจายความหนาแน่นของโอเอสแอลด้วย

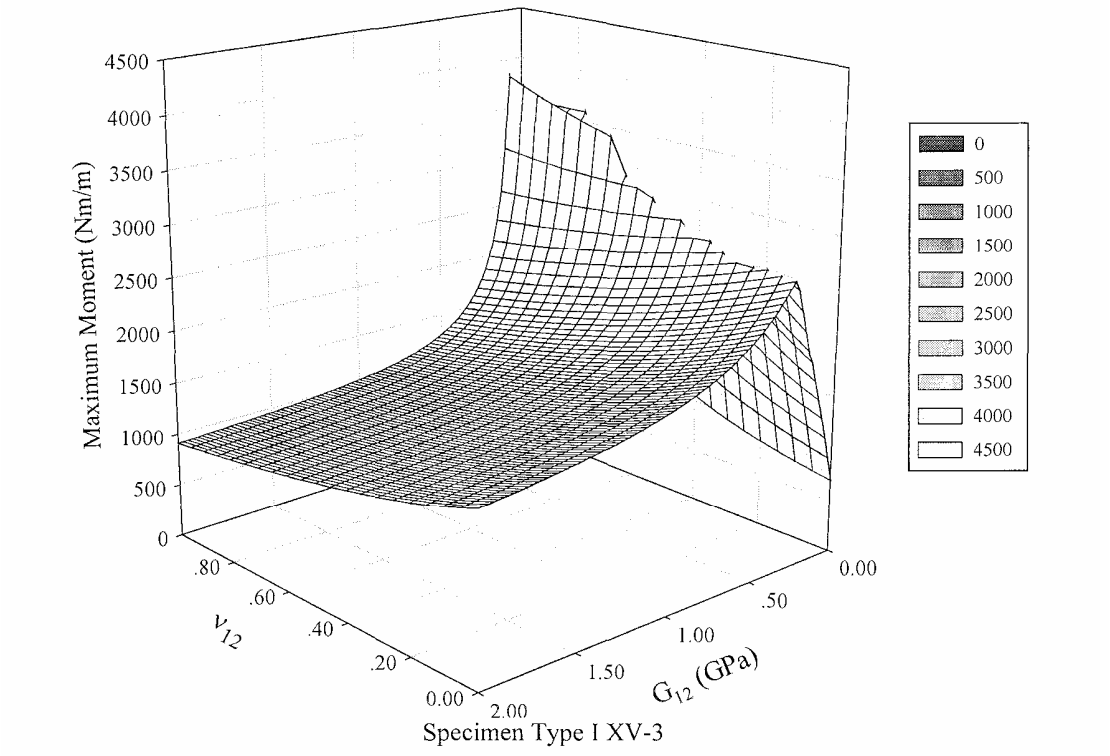


Fig.4.29 Maximum moment as a function of shear modulus (G_{12}) and Poisson's ratio (ν_{12}) in 3D-surface (repeat)

4.6. สรุป

1. ที่ความยาวแถบไม้ในช่วง 5 – 15 เซนติเมตร ความแข็งแรงในทิศทางตามเสี้ยนเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวแถบไม้เพิ่มขึ้นแต่ความยาวแถบไม้ไม่มีผลต่อโมดูลัสการดึงและการอัดในแนวตามเสี้ยน นอกจากนั้นความยาวแถบไม้ไม่มีผลต่อความแข็งแรงและโมดูลัสยืดหยุ่นในแนวตั้งฉากเสี้ยนด้วย และสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของโอเอสแอลกับความแข็งแรงของไม้ยางพาราจริงและอัตราส่วนชลูดของแถบไม้ได้

2. การเรียงตัวแถบไม้มีผลต่อความแข็งแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดของโอเอสแอล โดยโอเอสแอลแบบ 0 (เรียงตัวตามยาว 0^{o} ทุกชั้น) มีความแข็งแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดสูงสุดและการเรียงแถบไม้ในชั้นบริเวณกึ่งกลางมีผลต่อความแข็งแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นดัดของโอเอสแอลน้อยมาก

3. ค่าจากการคำนวณให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบโดยเฉพาะโอเอสแอลแบบ 0 ที่แถบไม้เรียงตัวตามยาว (0^{o} ทุกชั้น) และค่าที่ได้จากการคำนวณส่วนมากจะให้ค่าน้อยกว่าค่าจากการทดสอบซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการกระจายความหนาแน่นตามแนวดิ่งเป็นรูป Σ ทำให้คานโอเอสแอลมีพฤติกรรมคล้ายคานรูป I

4. ปัจจัยต่าง ๆได้แก่ การกระจายความหนาแน่นตามแนวดิ่ง (Vertical density profile) เป็นรูป Σ ช่องว่างในเนื้อโอเอสแอล ความอ่อนไหวของความแข็งแรงต่อโมดูลัสเฉือนและการเหลื่อมล้ำกันของแถบไม้ทำให้การคำนวณผิดพลาด