

การศึกษาความผันแปรของความหนาแน่น สมบัติเส้นใย และอัตราส่วนของชนิดเซลล์ ของไม้ตีนเป็ด

Study on Variation of Basic Density, Fiber Properties and Proportion of Cell Types of *Alstonia scholaris* R. Br.

คำนำ

วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษของประเทศไทย เดิมทีเป็นพืชที่ได้จากการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ชานอ้อย ตลอดจนปอและไผ่ ต่อมาเกิดการขาดแคลนวัตถุดิบสำหรับผลิตเยื่อกระดาษจึงมีการปลูกไม้โตเร็วคือ ไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูลูเลนซิส มาทดแทนพืชที่ได้จากการเกษตรดังกล่าว ซึ่งไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูลูเลนซิส ก็ได้รับความนิยมส่งเสริมให้มีการปลูกจากทั้งภาครัฐและเอกชน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเยื่อเคมีทำเป็นกระดาษพิมพ์เขียนและเยื่อเพื่อการส่งออก สามารถเพิ่มรายได้ให้กับประเทศ แต่เนื่องจากการปลูกไม้ยูคาลิปตัสเพียงชนิดเดียวในพื้นที่บริเวณกว้างทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โรคและแมลง ประกอบกับในขณะนี้เกิดการขาดแคลนไม้ยูคาลิปตัส จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาหาแหล่งวัตถุดิบเส้นใยอื่น ๆ เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษในประเทศไทย

ไม้ตีนเป็ด (*Alstonia scholaris* R. Br.) เป็นไม้โตเร็วชนิดหนึ่งที่ได้รับการส่งเสริมให้มีการปลูกกันอย่างกว้างขวาง สามารถพบได้ในทุกภาคของประเทศไทย แต่ในปัจจุบันข้อมูลเกี่ยวกับการศึกษาไม้ตีนเป็ดเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเยื่อกระดาษยังมีน้อยมาก ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไม้ตีนเป็ดเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ โดยจะศึกษาความหนาแน่นของเนื้อไม้ สมบัติของเส้นใย และอัตราส่วนของชนิดเซลล์ เพื่อใช้พิจารณาความเหมาะสม และความเป็นไปได้ของไม้ตีนเป็ด สำหรับใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษได้ดีหรือไม่เพียงใด และเพื่อเป็นข้อมูลในการนำไม้ตีนเป็ดไปใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความหนาแน่น สมบัติเส้นใย และอัตราส่วนของชนิดเซลล์ของไม้ต้นเปิดที่ระดับความสูงเพียงอก ที่แปรผันตามอิทธิพลของอายุไม้ ระหว่างต้นที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น สมบัติเส้นใย และอัตราส่วนของชนิดเซลล์ของไม้ต้นเปิด
3. เพื่อศึกษาองค์ประกอบความแปรปรวนของทุกลักษณะ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยครั้งนี้คือ

1. ทำให้ทราบความหนาแน่น สมบัติเส้นใย และอัตราส่วนของชนิดเซลล์ของไม้ต้นเปิดที่ระดับความสูงเพียงอก เพื่อจะได้นำไปพิจารณาการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษได้อย่างเหมาะสม
2. ข้อมูลที่ได้สามารถช่วยในการตัดสินใจของภาครัฐและเอกชนที่จะส่งเสริมให้มีการปลูกไม้ต้นเปิด เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเยื่อกระดาษต่อไป
3. ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัยระดับสูงต่อไป

การตรวจเอกสาร

ลักษณะทั่วไปของไม้ตีนเป็ด

ไม้ตีนเป็ด มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Alstonia scholaris* R. Br. จัดอยู่ในวงศ์ Apocynaceae โดยมีชื่อพื้นเมืองเรียกแตกต่างกัน เช่น พญาสัตบรรณ สัตตบรรณ หัสบัน จะบัน และปะชา (รัชชชัย, 2518) อีกทั้งมีชื่อทางการค้า เช่น white cheese-wood, shaitan wood, devil tree (กิด, 2527) และมีชื่อพ้อง ได้แก่ *Echites scholaris* L., *Tabernaemontana alternifolia* Burm. และ *Echites pala* Ham. (วรรณกรรม และคณะ, 2546)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ไม้ตีนเป็ดมีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ดังต่อไปนี้ (รัชชชัย, 2518)

ลำต้น เป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่สูงถึง 35 เมตร เปลือกมีสีเทา รอยแตกสีขาว เปลือกค่อนข้างหนาแต่เปราะหักง่าย

ใบ แต่ละวงมีจำนวน 4-7 ใบ ใบเป็นรูปมนแกมรูปบรรทัด หรือมนแกมรูปไข่กลับ ปลายใบมักแหลมเป็นติ่งเล็กน้อย ฐานใบสอบเข้าหากันเป็นรูปลิ้น ขอบใบเรียบ

ดอก ดอกมีขนาดเล็ก สีเขียวออกขาวหรือเขียวอมเหลือง ออกเป็นกลุ่มอยู่ในซอก ซึ่งแยกกิ่งก้านออกจากจุดเดียวกัน ดอกเริ่มบานระหว่างเดือนตุลาคมถึงธันวาคม และเริ่มติดฝักเดือนมกราคม

ฝัก มีลักษณะกลมยาวเรียวและห้อยลงสู่พื้นดิน มีขนาดวัดผ่าศูนย์กลาง 2-5 มิลลิเมตร

เมล็ด เป็นทรงบรรทัดแคบๆ ยาวประมาณ 7 มิลลิเมตร มีขนยาวอ่อนนุ่มติดอยู่เป็นกระจุกที่ปลายทั้งสองข้าง

การกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติ

ไม้ดินเป็ดมีเขตการกระจายพันธุ์ทั่วทุกภาคของประเทศไทย มักขึ้นกระจายอยู่ห่างๆ กัน ไม่พบอยู่รวมกันเป็นกลุ่มเป็นก้อน มีการกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำ ในป่าธรรมชาติมักพบอยู่ในบริเวณป่าที่ราบ ป่าพงและริมลำห้วย ขึ้นอยู่ตามริมห้วยในป่าเบญจพรรณของทางภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ไม่พบไม้ดินเป็ดในป่าเต็งรังหรือบริเวณป่าที่สูง ในป่าดงดิบทางภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงใต้ จะขึ้นทั่วไปตามชายป่าพรุ และในป่าที่ลุ่มตั้งแต่ระดับน้ำทะเลปานกลางถึง 1,000 เมตร ในต่างประเทศพบที่อินเดีย จีนตอนใต้ อินโดนีเซีย มาเลเซีย และรัฐควีนแลนด์ในประเทศออสเตรเลีย (ส่วนปลูกป่าภาคเอกชน, 2544)

ลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้

วิรัช และ ดำรง (2517) ได้บรรยายลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้ดินเป็ดดังต่อไปนี้

วงปี เห็นไม่ชัด

ท่อน้ำ (vessel) ท่อน้ำมีขนาดความกว้างและความยาวเฉลี่ยประมาณ 190 และ 642 ไมครอน ตามลำดับ การกระจายของท่อน้ำเป็นแบบกระจัดกระจาย (diffuse-porous wood) ส่วนใหญ่เป็นท่อน้ำแฝด 2 - 5 เซลล์ มีท่อน้ำเดี่ยวปนอยู่บ้าง ภายในท่อน้ำบางท่อมีทาลโลซิส (tylosis) มีแผ่นเปอร์ฟอเรชัน (perforation) เป็นแบบรูเดี่ยว

พาเรนไคมา (parenchyma) มีทั้งแบบติดท่อน้ำ (paratracheal parenchyma) และแบบไม่ติดท่อน้ำ (apotracheal parenchyma) ที่อยู่ติดท่อน้ำจะล้อมท่อน้ำเป็นแถบแคบๆ กว้าง 1-4 เซลล์ ภายในเซลล์บางเซลล์จะมีผลึกอยู่ด้วย

เซลล์รัศมี (radial cell) มีความกว้าง 60 ไมครอน มีความสูงตั้งแต่ 180-720 ไมครอน เป็นเซลล์แถวเดียวซึ่งมีอยู่น้อย ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ตั้งทั้งหมด

เส้นใย (fiber) มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 1,630 ไมครอน ความกว้างประมาณ 27 ไมครอน และผนังเส้นใยหนาประมาณ 4 ไมครอน

สมบัติทางกายภาพของไม้ดินเปิด

เนื้อไม้ดินเปิดมีลักษณะเป็นมัน ไม่มีกลิ่น มีรสขม สีขาวอมเหลืองอ่อนถึงน้ำตาลจางๆ น้ำหนักเบา เสี้ยนตรง เนื้อไม้ค่อนข้างละเอียด ไซกบดบแต่งง่าย (วิรัช และ ดำรง, 2517) เนื้อไม้มีสมบัติทางกายภาพดังนี้คือ ปริมาณความชื้น 12 เปอร์เซ็นต์ ความถ่วงจำเพาะ 0.4 ความแข็งแรงในการดัด 428 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความแข็งแรงในการบีบ 311 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความแข็งแรงในการเชิด 79 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความคู้ 55,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความเหนียวจากการเคาะ 1.23 กิโลกรัม - เมตร ความแข็ง 207 กิโลกรัม และความทนทานจากการทดลองปักดิน 1.4 (0.8-2) ปี (ส่วนปลูกป่าภาคเอกชน, 2544)

สมบัติทางเคมีของไม้ดินเปิด

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของไม้ดินเปิดมีดังนี้คือ ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส 69.35 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเซลลูโลส (क्रोซซ์และบีแวน) 53.51 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณลิกนิน 31.72 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเพนโทแซน 13.15 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณการละลายใน 1 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 13.99 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณการละลายในน้ำร้อน 5.55 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณการละลายในแอลกอฮอล์ - เบนซิน 4.01 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณการละลายในน้ำเย็น 3.99 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณจีเถ้า 1.24 เปอร์เซ็นต์ (ส่วนปลูกป่าภาคเอกชน, 2544)

การใช้ประโยชน์

เนื้อไม้มีสีขาวอมเหลืองเหมาะสำหรับใช้ก่อสร้างภายใน ทำเครื่องใช้ต่างๆ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ หีบใส่ของ ฝักมีด ดินสอ ลักษณะของเนื้อไม้เบาสามารถทำไม้จิ้มฟันและง่ายต่อการอาบน้ำยา นอกจากนี้ส่วนต่าง ๆ ของไม้ดินเปิดยังสามารถเป็นสมุนไพรได้อีกด้วย เช่น เปลือกใช้แก้ไอ แก้ท้องเสีย รักษาเบาหวาน หรือใบอ่อนใช้ชงดื่ม รักษาโรคตับปิดลักเปิด (ส่วนปลูกป่าภาคเอกชน, 2544)

ความหนาแน่นของเนื้อไม้

ความหนาแน่น (density) เป็นอัตราส่วนของมวลสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ในทางอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษสามารถหาความหนาแน่นได้จากเนื้อไม้ (wood) และชิ้นไม้สับ (chips) ซึ่งอยู่ในรูปของ basic density คือน้ำหนักอบแห้งต่อปริมาตรสด มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1994)

โดยทั่วไปจะใช้ความหนาแน่นในการพิจารณาคุณภาพของเนื้อไม้ ซึ่งไม้แต่ละชนิดจะมีความหนาแน่นแตกต่างกันไป เช่น ในไม้ใบกว้างความผันแปรของความหนาแน่นมาจากความกว้างของเวสเซล (vessel diameter) และความถี่ของเวสเซล (vessel frequency) โดยพบว่าค่าที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นเป็นส่วนกลับของความหนาแน่นของเนื้อไม้คือ เมื่อความกว้างและความถี่ของเวสเซลมากจะทำให้ความหนาแน่นของเนื้อไม้ลดลง (Barnett and Jeronimidis, 2003)

ผลของความหนาแน่นของเนื้อไม้ต่อการผลิตเยื่อกระดาษ

ความหนาแน่นของเนื้อไม้มีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจต่อการผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งจะใช้คำนวณค่าใช้จ่ายจากการขนส่งไม้ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษให้กับโรงงาน รวมถึงผลผลิตของเยื่อกระดาษต่อการต้มเยื่อในแต่ละครั้ง ไม้ที่มีความหนาแน่นสูงจะให้ผลผลิตเยื่อกระดาษต่อการต้มเยื่อหนึ่งครั้งสูงกว่าไม้ที่มีความหนาแน่นต่ำ และพบว่าความหนาแน่นของเนื้อไม้มากกว่า 0.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีผลทำให้ผลผลิตเยื่อที่ได้ลดลง (Clark, 1978) ส่วนไม้ที่มีความหนาแน่นต่ำจะใช้สารเคมีในการต้มเยื่อน้อยกว่า (Little *et al.*, 2003) รวมถึงสามารถต้มเยื่อและฟอกเยื่อได้ง่ายกว่าไม้ที่มีความหนาแน่นสูง (Stephenson, 1950) เนื่องจากไม้ที่มีความหนาแน่นต่ำจะดูดซับน้ำและสารเคมีได้ง่ายกว่าขณะทำการต้มเยื่อ โดยไม้ที่ใช้ผลิตเยื่อกระดาษจะมีความหนาแน่นของเนื้อไม้อยู่ระหว่าง 330 - 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Hakkila, 1999)

ผลของความหนาแน่นของเนื้อไม้ต่อสมบัติของเยื่อกระดาษ

ความหนาแน่นของเนื้อไม้มีความสำคัญต่อสมบัติของเยื่อกระดาษที่ได้กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของไม้เพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงของแผ่นทดสอบลดลง โดยพบว่าความหนาแน่นของเนื้อไม้ตั้งแต่ 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะให้กระดาษที่มีความต้านทานต่อแรงดันทะลุ

(bursting strength) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความทนทานต่อการหักพับ (folding endurance) ลดลง เนื่องจากไม้ที่มีความหนาแน่นสูงจะมีผนังของเส้นใยที่หนาและหยาบ ผนังของเส้นใยจึงยุบตัวลงได้ยากจนไม่สามารถประสานตัวกันได้ขณะฟอร์มแผ่นกระดาษ (Little *et al.*, 2003)

Wimmer *et al.* (2002) ได้ศึกษาความหนาแน่นของไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus globulus*) อายุ 8 ปี พบว่า ความหนาแน่นของเนื้อไม้สามารถใช้ทำนายสมบัติของแผ่นทดสอบได้ (handsheet properties) โดยเฉพาะคุณสมบัติเกี่ยวกับความฟู (bulk) และความพรุนของกระดาษ (air permeance) โดยไม้ที่มีความหนาแน่นสูงจะให้กระดาษที่มีความฟูและความพรุนสูง

Malan and Arbuthnot (1995) ได้ศึกษาความหนาแน่นของไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus grandis*) ในแอฟริกาใต้ พบว่า ความหนาแน่นของไม้ยูคาลิปตัสที่ 0.500 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จะให้กระดาษที่มีความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (tear resistance) สูงสุด

สมบัติเส้นใยของไม้

โครงสร้างของเนื้อไม้ ประกอบด้วยเซลล์หลายชนิดแตกต่างกันไปตามลักษณะการเรียงตัวทางกายภาพ และปัจจัยอื่น เช่น ประเภทของไม้ใบกว้างหรือไม้ใบแคบ ชนิดของไม้ และสถานะของการเจริญเติบโต เป็นต้น โครงสร้างของไม้ใบกว้างมีความซับซ้อนกว่าไม้ใบแคบ ซึ่งประกอบด้วยเส้นใย เทรทิด เวสเซล เรย์พาร์เนไคมา และพาร์เนไคมาตามยาว และโครงสร้างของไม้ใบแคบประกอบด้วยเทรทิด เรย์พาร์เนไคมา และเรย์เทรทิด เป็นสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ลักษณะโครงสร้างที่สำคัญของไม้ใบกว้างและใบแคบ

ชนิดของเซลล์	ความยาว (มิลลิเมตร)	ความกว้าง (ไมครอน)	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
ไม้ใบแคบ			
เทรทิด	1.4 – 6.0	20 – 50	90
เรย์เทรทิด	0.01– 0.16	2 – 50	< 5
เรย์พาร์เนไคมา			< 10
เซลล์รอบท่อตามยาว			< 1
ไม้ใบกว้าง			
เส้นใย	0.4 – 1.6	10 – 40	55
เวสเซล	0.2 – 0.6	10 – 300	30
พาร์เนไคมาตามยาว	< 0.1	< 30	< 5
เรย์พาร์เนไคมา			15

ที่มา: Barnett and Jeronimidis (2003)

ตารางที่ 2 สมบัติของเชื้อไม้ในอเมริกาเหนือ

ชนิดของไม้	ความยาวของเส้นใย (มิลลิเมตร)	ความกว้างของเส้นใย (ไมครอน)	ความหนาของผนังเส้นใย (ไมครอน) EW-LW	ความหนาของเส้นใย (มิลลิกรัมต่อ 100 เมตร)
Birch	1.8	20 – 36	3 – 4	5 - 8
Red gum	1.7	20 – 40	5 – 7	8 - 10
Black spruce	3.5	25 – 30	3 – 4 (70%) 6 – 7 (30%)	14 - 19
Red cedar	3.5	30 – 40	2 – 3	15 - 17
Southern pine	4.6	35 – 45	2 – 5 (50%) 8 – 11 (50%)	20 - 30
Douglas fir	3.9	35 – 45	2 – 4 (60%) 7 – 9 (40%)	25 - 32
Redwood	6.1	50 – 65	3 – 4	25 – 35

หมายเหตุ EW = earlywood,

LW = latewood

ที่มา : Smook (1997)

ความยาวของเส้นใย

ไม้ใบแคบ (softwoods) ส่วนใหญ่มีความยาวของเส้นใย 2.5 - 7 มิลลิเมตร และมีค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใย 3 - 3.6 มิลลิเมตร ยกเว้นในไม้ใบแคบบางชนิดที่มีเส้นใยยาวมากคือ Douglas fir 3.9 มิลลิเมตร slash pines 4.6 - 4.9 มิลลิเมตร western larch 5 มิลลิเมตร sugar pine และ sitka spruce 5.9 มิลลิเมตร baldcypress 6.2 มิลลิเมตร และ redwood 7 มิลลิเมตร ส่วนในไม้ใบกว้าง (hardwoods) มีความยาวเส้นใย 0.9 - 1.5 มิลลิเมตร (Biermann, 1993)

จากการศึกษาของ Panshin *et al.* (1964) พบว่า เทรคีดของไม้สน และเส้นใยของไม้ใบกว้างมีความยาวของเซลล์ในส่วนของเนื้อไม้ปลายฤดูมากกว่าเนื้อไม้ต้นฤดู และความยาวของเส้นใยในวงปีแรกหรือบริเวณใกล้ใจไม้ พบว่ามีเส้นใยสั้นมาก ในไม้ใบแคบและไม้ใบกว้างมีความยาวเส้นใยบริเวณใกล้ใจไม้ประมาณ 0.5 - 1.5 และ 0.1 - 1.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นความยาวของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากใจไม้ไปยังเปลือกไม้ (Panshin *et al.*, 1964; Tsoumis, 1991)

ความกว้างของเส้นใย

เป็นส่วนความกว้างที่เกิดจากการรวมของความหนาของผนังเส้นใยสองด้านกับความกว้างของลูเมนของเส้นใย โดยไม้ใบแคบจะมีความกว้างของเส้นใย 25 - 60 ไมครอน (Biermann, 1993) และจากการศึกษาของ Clark (1978) พบว่า ไม้ใบกว้างมีความกว้างของเส้นใย 7 - 15 ไมครอน

จากการศึกษาในไม้ pines, redwood และ poplars พบว่า ความกว้างของเทรคิหรือความกว้างของเส้นใย อาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อห่างจากใจไม้ออกไปยังเปลือกไม้ (Tsoumis, 1991) และจากการศึกษาของ Taylor (1975) พบว่า เมื่อไม้ sycamore มีอายุเพิ่มขึ้น จะมีความกว้างของเส้นใยเพิ่มขึ้น

ความกว้างของลูเมน

การที่ความกว้างของลูเมนน้อยจะทำให้มีความหนาของผนังเส้นใยมาก จึงทำให้บดเคี้ยวได้ยาก เช่น เส้นใยฝ้าย (cotton fibers) ที่มีความกว้างของเส้นใยประมาณ 10 - 40 ไมครอน แต่มีความกว้างของลูเมนเล็กมากและมีลักษณะแบน รวมถึงป่าน esparto ที่มีความหนาของผนังเส้นใย 6 - 10 ไมครอน และลูเมนมีลักษณะกลม (Clark, 1978)

ความหนาของผนังเส้นใย

จากการศึกษาของ Tsoumis (1991) พบว่า ความหนาของผนังเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากใจไม้ออกไปยังเปลือกไม้ โดยความหนาของผนังเส้นใยในส่วนของเนื้อไม้ต้นฤดูจะเพิ่มขึ้นทีละน้อยตามอายุของเนื้อไม้ ในขณะที่ความหนาของผนังเส้นใยในส่วนของเนื้อไม้ปลายฤดูจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

Clark (1978) กล่าวว่า ความหนาของผนังเส้นใยมีผลต่อการบดเคี้ยว เส้นใยจากไม้ใบแคบในส่วนของเนื้อไม้ต้นฤดูจะมีผนังบางกว่าเนื้อไม้ปลายฤดู เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ที่มีความหนาของผนังเซลล์มาก เช่น เส้นใยฝ้ายและป่าน esparto กับไม้ที่มีผนังเส้นใยบาง เช่น ไม้ northern spruce และไม้ western hemlock พบว่า ไม้ northern spruce และไม้ western hemlock จะผลิตกระดาษที่มีความแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อแรงดันทะลุมากกว่า แต่ก็ทำให้ความ

ด้านทานต่อแรงฉีกขาดของกระดาดลดลง ส่วนเส้นใยฝ้ายและป่าน esparto เส้นใยไม่ถูกตัดให้สั้นลงได้ง่าย เส้นใยจึงมีความแข็งแรง และสามารถด้านทานต่อแรงฉีกขาดได้ดีกว่า

ผลของสมบัติเส้นใยต่อการผลิตและสมบัติของเยื่อกระดาษ

ความยาวของเส้นใย ความยาวของเส้นใยมีความสำคัญกับสมบัติของกระดาษ โดยเฉพาะความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (tearing resistance) (สุพิชญ์, 2530; Tsoumis, 1991) นอกจากนี้ ความยาวของเส้นใยยังมีความสำคัญต่อสมบัติอื่น ๆ ของกระดาษคือ ความยาวของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น สามารถช่วยให้กระดาษมีความต้านทานต่อแรงดันทะลุ ความต้านทานต่อแรงดึง และความทนทานต่อการหักพับดีขึ้นเพียงเล็กน้อย (สุพิชญ์, 2530) แต่ถ้าเส้นใยยาวเกินไปจะทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ ทำให้เนื้อกระดาษหยาบและไม่สม่ำเสมอ (สุพิชญ์, 2530; Dean, 1995) และเส้นใยที่ยาวมีโอกาสดูดซับระหว่างช่องว่างของตะแกรงคัดขนาดเยื่อได้ง่าย เป็นผลให้ได้ผลผลิตเยื่อลดลง (Clark, 1978)

ความกว้างของเส้นใย ใช้ศึกษาในลักษณะของอัตราส่วนระหว่างความยาวของเส้นใยต่อความกว้างของเส้นใย ที่เรียกว่า Slenderness ratio จากการศึกษาของ Ona *et al.* (2001) พบว่า ไม้ *E. camaldulensis* อายุ 14 ปี มีความกว้างของเส้นใยและความหนาของผนังเส้นใยน้อยเพียงพอที่จะทำให้เส้นใยเกิดความยืดหยุ่นและสามารถประสานกับเซลล์อื่น ๆ ได้ แต่ก็ทำให้ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดลดลง

ความหนาของผนังเส้นใย เส้นใยผนังบางจะให้เนื้อกระดาษที่มีความแน่นและสม่ำเสมอกว่าเส้นใยผนังหนา เนื่องจากเส้นใยผนังบางจะยุบตัวลงได้ง่าย ทำให้ฟอร์มเป็นแผ่นกระดาษได้ดีกว่าเส้นใยผนังหนา ซึ่งมีลักษณะของเส้นใยที่แข็งทื่อกว่า ทำให้ได้เนื้อกระดาษที่หยาบและมีความแข็งแรงต่ำ แต่มีความฟูของกระดาษมากกว่า (McIntosh, 1970) อย่างไรก็ตามเส้นใยผนังหนาก็ช่วยให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษดีขึ้น แต่ก็ทำให้ความต้านทานต่อแรงดันทะลุ ความต้านทานต่อแรงดึง และความทนทานต่อการหักพับของกระดาษลดลง (Higham, 1968; Clark, 1978; Bowyer *et al.*, 2003) นอกจากนี้การเพิ่มความหนาของผนังเซลล์จะทำให้บดเยื่อได้ยากขึ้น (Clark, 1978)

ความหยาบของเส้นใย คือน้ำหนักของเส้นใยต่อความยาวของเส้นใย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อความยาว 100 เมตร ความหยาบของเส้นใยในไม้ใบแคบและไม้ใบกว้างมีความแตกต่างกันดัง

แสดงในตารางที่ 2 พบว่า ไม้ใบแคบมีความหยาบของเส้นใยมากกว่าไม้ใบกว้าง เนื่องจากไม้ใบแคบมีเส้นใยที่ยาวและมีผนังหนากว่าไม้ใบกว้าง เส้นใยจึงยุบตัวลงได้ยากและประสานตัวกันไม่ดี จึงทำให้ผิวหน้าของกระดาษมีความเรียบน้อย แต่มีส่วนช่วยให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้น (Smook, 1997) หลังจากขั้นตอนของการบดเยื่อ เส้นใยจะมีความหยาบลดลง เนื่องจากเส้นใยเกิดการการแตกแขนง (fibrillation) (Casey, 1960) นอกจากนี้ความหยาบของเส้นใยก็มีความสำคัญกับการผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical pulping) คือเส้นใยที่มีความหยาบมากจะมีค่าอัตราการระบายน้ำ (drainage) ออกจากเยื่อ การยอมให้อากาศและของเหลวผ่านแผ่นกระดาษ (air and liquid permeability) สูง (Clark, 1978)

อัตราส่วนของชนิดเซลล์

Casey (1980) กล่าวว่า ในไม้ใบกว้างและไม้ใบแคบจะพบอัตราส่วนของชนิดเซลล์ต่างกัน โดยในไม้ใบแคบ พบว่ามีอัตราส่วนของเทรคีด (tracheids) ค่อนข้างสูงคือ พบมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อัตราส่วนของเรย์เซลล์ (ray cells) พบน้อยคือ น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเป็นเรย์พาเรนไคมา (ray parenchyma) หรือเรย์เทรคีด (ray tracheids) เมื่อเปรียบเทียบกับเทรคีด เรย์เซลล์จะมีขนาดสั้นกว่า และยังพบเซลล์ที่ล้อมรอบท่ออย่างตามยาว (epithelial cells) ในอัตราส่วนน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถพบเซลล์ชนิดนี้ได้ ในไม้ larch, pine, spruce และ Douglas fir เป็นต้น ส่วนไม้ใบกว้างจะมีอัตราส่วนของเส้นใยมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ โดยไม้ใบกว้างมีเส้นใยอยู่ 3 ชนิดด้วยกันดังนี้คือ tracheids, fiber – tracheids และ libriform fibers โดยมี libriform fibers เป็นชนิดหลัก นอกจากเส้นใยแล้วยังพบเวสเซลในอัตราส่วนน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขนาดและจำนวนของเวสเซลขึ้นอยู่กับสภาวะของการเจริญเติบโตของไม้ และพบเรย์เซลล์ในอัตราส่วน 5-35 เปอร์เซ็นต์ เช่น ในไม้ red oak และไม้ poplar พบว่ามีอัตราส่วนของเรย์เซลล์ 20 และ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น โดยตัวอย่างของอัตราส่วนของชนิดเซลล์ในไม้ใบแคบและไม้ใบกว้างได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของชนิดเซลล์ของไม้ spruce และ birch

ชนิดไม้	เส้นใย (เปอร์เซ็นต์)		เวสเซล (เปอร์เซ็นต์)		พารენไคมา (เปอร์เซ็นต์)	
	โดยน้ำหนัก	โดยปริมาตร	โดยน้ำหนัก	โดยปริมาตร	โดยน้ำหนัก	โดยปริมาตร
spruce	99	95	-	-	1	5
birch	86	65	9	25	5	10

ที่มา : Smook (1997)

จากการศึกษาของ Taylor and Wooten (1973) พบว่า การเพิ่มของอัตราส่วนของเซลล์ชนิดหนึ่ง มีผลทำให้อัตราส่วนของเซลล์ชนิดอื่นลดลงอย่างน้อยหนึ่งชนิดเซลล์ในไม้ทุกชนิด โดยอัตราส่วนของเส้นใยและอัตราส่วนของเวสเซล มีความผันแปรมากกว่าอัตราส่วนของเรย์พารเนไคมา อัตราส่วนของเส้นใยและอัตราส่วนของเวสเซลมีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นตามอายุของไม้ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของเรย์พารเนไคมามีแนวโน้มค่อนข้างคงที่

จากการศึกษาของ Taylor (1975) พบว่า ไม้ black willow มีอัตราส่วนของเวสเซลเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากใจไม้ออกไปยังเปลือกไม้ และมีอัตราส่วนของเรย์พารเนไคมาก่อนข้างคงที่ตลอดทั้งต้น ส่วนบริเวณที่มีการเจริญเติบโตช้าจะมีอัตราส่วนของเวสเซลที่สูง

จากการศึกษาของ Kroll *et al.* (1992) พบว่า ไม้ balsam poplar จำนวน 10 ต้น มีอัตราส่วนของเส้นใย และเรย์พารเนไคมาเฉลี่ยรวมกัน 68 เปอร์เซ็นต์ (มีอัตราส่วนของเรย์พารเนไคมาอยู่ 3 เปอร์เซ็นต์) และมีอัตราส่วนของเวสเซล 32.2 เปอร์เซ็นต์

ผลของอัตราส่วนของชนิดเซลล์ต่อการผลิตและสมบัติของเยื่อกระดาษ

ไม้ที่มีอัตราส่วนของเส้นใยมากจะให้ผลผลิตเยื่อและความแข็งแรงของเยื่อกระดาษที่สูง ส่วนไม้ที่มีอัตราส่วนของพารเนไคมามากจะให้เยื่อกระดาษที่มีความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากพารเนไคมาจะไปขวางการประสานตัวระหว่างเส้นใย (Horn and Setterholm, 1990) นอกจากนี้ยังเชื่อว่า อัตราส่วนของเรย์พารเนไคมา และอัตราส่วนของพารเนไคมาตามยาวจะมีผลกระทบต่อความ

แข็งแรงของกระดูกที่ได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากทั้งเรย์พาร์เนโคมาและพาร์เนโคมาตามยาวมีผนังเซลล์ที่บางและมีขนาดสั้น (Ona *et al.*, 2001)

ไม้ที่มีอัตราส่วนของเวสเซลมากจะมีปัญหาเกี่ยวกับการพื้ของกระดูก (Bowyer *et al.*, 2003) เพราะเวสเซลไม่สามารถประสานตัวกับเส้นใยในขณะพื้ ทำให้เวสเซลแยกตัวหลุดออกจากผิวหน้าของกระดูก จึงเกิดตำหนิบนผิวหน้าของกระดูกขึ้น (Ohshima *et al.*, 2004) การที่มีอัตราส่วนของเส้นใยน้อย แต่อัตราส่วนของเวสเซลมาก จะทำให้ความแน่นของกระดูกลดลง นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ผลผลิตเชื้อที่ได้ลดลง (สุพิชญ์, 2530)

Tsoumis (1991) กล่าวว่า ถ้าอัตราส่วนของพาร์เนโคมาสูง จะมีผลเสียต่อความต้านทานต่อแรงดันทะลุ และความต้านทานต่อแรงดึงของกระดูก ส่วนอัตราส่วนของเวสเซล พบว่าไม่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงของกระดูก

การคำนวณค่าความเหมาะสม (derived values) ในการทำเชื้อกระดูก เช่น Runkel ratio, Flexibility coefficient และ Slenderness ratio สามารถคำนวณได้จากความยาวของเส้นใย ความกว้างของเส้นใย ความกว้างของลูเมน และความหนาของผนังเส้นใย จากสูตรต่อไปนี้ (Ona *et al.*, 2001)

$$\begin{aligned}\text{Runkel ratio} &= 2w/l \\ \text{Flexibility coefficient} &= 1/D \\ \text{Slenderness ratio} &= L/D\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{โดย} \quad w &= \text{ความหนาของผนังเส้นใย (ไมครอน)} \\ l &= \text{ความกว้างของลูเมน (ไมครอน)} \\ L &= \text{ความยาวของเส้นใย (มิลลิเมตร)} \\ D &= \text{ความกว้างของเส้นใย (ไมครอน)}\end{aligned}$$

Runkel ratio ใช้ทำนายความเหมาะสมของเส้นใยในการผลิตเยื่อกระดาษ ถ้า Runkel ratio น้อยกว่า 1 แสดงว่าเส้นใยนั้นมีความเหมาะสมในการผลิตเยื่อกระดาษ

Flexibility coefficient ใช้วัดความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดันทะลุและความทนทานต่อการหักพับของกระดาษ ถ้ามีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าเส้นใยนั้นจะให้เยื่อกระดาษที่มีความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดันทะลุและความทนทานต่อการหักพับสูง

Slenderness ratio ใช้วัดความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ ถ้าค่านี้มากกว่า 75 แสดงว่าเส้นใยนั้นจะให้เยื่อกระดาษที่มีความต้านทานต่อแรงฉีกขาดสูง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัตถุดิบ

ไม้ตีนเป็ด (*Alstonia scholaris* R. Br.) อายุ 5 7 และ 9 ปี จากตำบลห้วยยาง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง ขึ้นอายุละ 2 ต้น

อุปกรณ์และสารเคมี

- กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง
- เครื่อง MORFI LABO (LB-01)
- sliding microtome
- microtome blades
- แผ่นสไลด์
- กรดอะซิติก เข้มข้น 99.9 เปอร์เซ็นต์ เกรด A.R.
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์ เกรด A.R.
- เอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์
- เอทิลแอลกอฮอล์ 99 เปอร์เซ็นต์ (absolute alcohol)
- เฮมาทอกซาลิน 1 เปอร์เซ็นต์
- มอร์แดนท์ (mordant)
- ซาฟรานีน (safranin)
- เปอร์เม้าท์ (permount)
- safranin O
- chlorazol black E

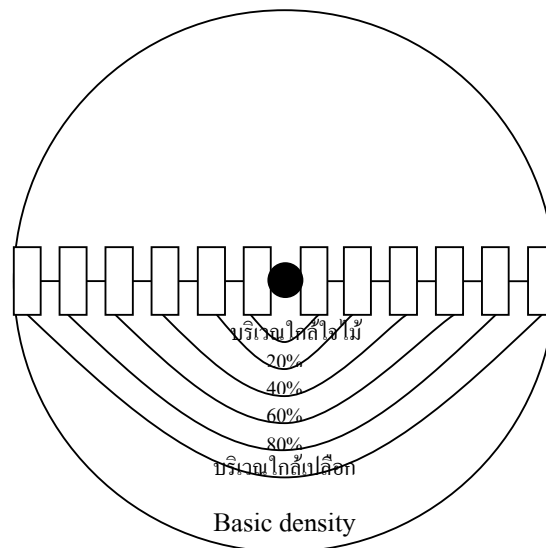
วิธีการ

การเก็บตัวอย่างไม้

สุ่มเลือกไม้ต้นเป็ดลักษณะลำต้นเปลาตรงอายุ 5 7 และ 9 ปี มาชั้นอายุละ 2 ต้น ทำการวัดความเจริญเติบโตที่ความสูงระดับอกของทุกต้น

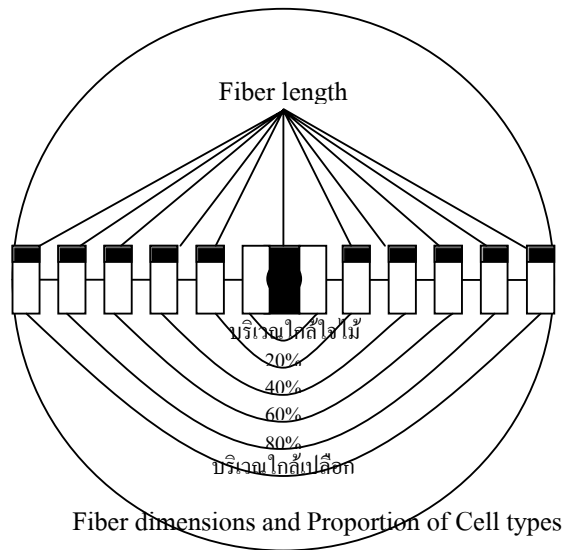
การเตรียมชิ้นไม้ทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทดลองกับเนื้อไม้ต้นเป็ดที่ระดับความสูงเพียงอก (1.30 เมตร) โดยจะทำการตัดตัวอย่างไม้ที่ระดับความสูงเพียงอกออกเป็นแวนหนาประมาณ 1 นิ้ว จำนวน 3 แวน แวนที่ 1 ใช้หาความหนาแน่นของเนื้อไม้ แวนที่ 2 ใช้หาขนาดของเส้นใย ได้แก่ ความยาวของเส้นใย ความกว้างของเส้นใย ความกว้างของลูเมน ความหนาของผนังเส้นใย และอัตราส่วนของชนิดเซลล์ ได้แก่ อัตราส่วนของเส้นใย อัตราส่วนของเวสเซลล์ อัตราส่วนของเรย์พาราเรโนไมมา และอัตราส่วนของพาราเรโนไมตามยาว แวนที่ 3 ใช้หาความหยาบของเส้นใย โดยจะวัดความยาวจากใจไม้ไปยังเปลือกไม้ทั้ง 2 ด้าน ซึ่งมีใจไม้เป็นจุดศูนย์กลาง (ความยาวที่วัดได้นั้นคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์) ทำการกำหนดจุดตัดที่ตำแหน่ง 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวที่วัดได้นั้น ดังแสดงในภาพที่ 1 - 3



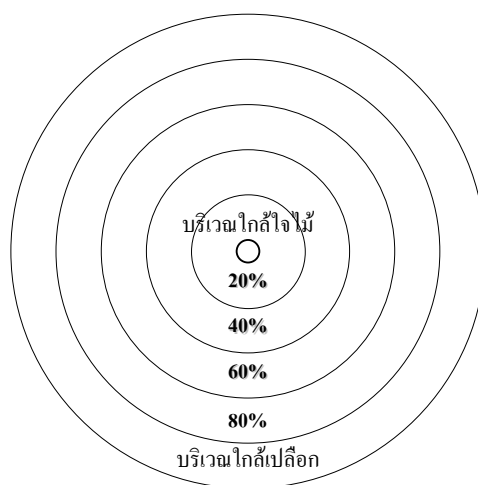
แผ่นที่ 1

ภาพที่ 1 แสดงตำแหน่งของชิ้นไม้ที่ใช้ในการหาความหนาแน่นของเนื้อไม้



แผ่นที่ 2

ภาพที่ 2 แสดงตำแหน่งของชิ้นไม้ที่ใช้ในการหาขนาดของเส้นใย และอัตราส่วนชนิดของเซลล์



แวนที่ 3

ภาพที่ 3 แสดงตำแหน่งของชั้นไม้ที่ใช้ในการหาความหยาบของเส้นใย

การหาความหนาแน่นของเนื้อไม้

นำชั้นไม้ที่ตัดตามภาพที่ 1 มาชั่งหาน้ำหนักสด (น้ำหนักละเอียด 0.001 กรัม) จากนั้นนำชั้นไม้ใส่ลงในถุงพลาสติกที่ใส่น้ำไว้แล้ว (ระวังอย่าให้ชั้นไม้ลอยพื้นผิวน้ำ) ทำการมัดปากถุงพลาสติกให้แน่น ใช้เวลาแช่ชั้นไม้ 1 - 2 วัน เพื่อให้ชั้นไม้อิ่มตัว (สังเกตจากชั้นไม้จะจมน้ำ) จากนั้นนำชั้นไม้ออกจากถุงพลาสติกแล้วใช้ผ้าสะอาดซับน้ำออกจากชั้นไม้ ทำการชั่งน้ำหนักสดของชั้นไม้ (green weight) และหาปริมาตรของไม้ (green volume) โดยการแทนที่น้ำ จากนั้นนำชั้นไม้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักของไม้จะคงที่ เพื่อหาน้ำหนักอบแห้ง (dry weight) โดยจะคำนวณความหนาแน่นของเนื้อไม้จากสูตรต่อไปนี้ (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1994)

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของเนื้อไม้} &= \frac{\text{dry weight} \times \text{density of water}}{\text{green volume}} \\ (\text{กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}) & \end{aligned}$$

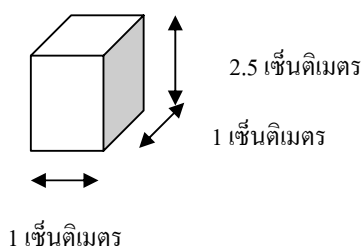
โดยที่

$$\begin{aligned} \text{dry weight} &= \text{น้ำหนักสดของชิ้นไม้ที่แช่น้ำจนอิ่มตัว (กรัม)} \\ \text{green volume} &= \text{ปริมาตรของชิ้นไม้ที่แช่น้ำจนอิ่มตัว (fully swollen) โดยการแทนที่น้ำ (กรัม)} \\ \text{density of water} &= 1,000 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

การตัดตัวอย่างทางหน้าตัดและการเตรียมสไลด์ถาวร

1. นำชิ้นไม้ที่ตัดตามภาพที่ 2 (ในส่วนของชิ้นไม้ที่ใช้หาขนาดของเส้นใยและอัตราส่วนของเส้นใย) มาทำการแทนที่อากาศภายในชิ้นไม้ด้วยน้ำ โดยนำไปดม้มน้ำให้เดือดประมาณ 20 นาที จนกระทั่งชิ้นไม้จม จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น (ขณะดม้มน้ำควรเอาตะแกรง หรือแผ่นโลหะทับแบ่งไม้ไว้เพื่อป้องกันไม่ให้แท่งไม้ ลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำ และดูดอากาศกลับเข้าไปข้างในชิ้นไม้อีก)

2. ใช้มีดตัดชิ้นไม้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ชิ้นไม้ที่ได้จะมีขนาดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร และสูง 2.5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงลักษณะของชิ้นไม้ที่เตรียมเพื่อใช้กับ sliding microtome

3. ใช้ sliding microtome ตัดแต่งผิวหน้าของชิ้นไม้ให้เรียบก่อนทำการตัดจริงโดยชิ้นบางที่ได้จะมีความหนาของประมาณ 20 ไมครอน (ขณะทำการตัด อย่าปล่อยให้ชิ้นไม้แห้ง ต้องใช้ฟู่กัน จุ่มน้ำทาเสมอ และใช้น้ำทาใบมีดก่อนตัดชิ้นบางทุกครั้ง เพื่อลดความฝึกระหว่างชิ้นไม้และใบมีด)

หยด mordant (ferric alum 2 - 4 เปอร์เซ็นต์) ลงไป ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ชั้นบางติดสี ย้อมดีขึ้นไป จากนั้นใช้ปิเปตดูด mordant ออก แล้วล้างด้วยน้ำ 2 ครั้ง

4. เจือจาง hematoxylin เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำ (15 หยด ต่อ น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร) จากนั้นหยดลงบนชั้นบาง ใช้เวลาประมาณ 1 นาที เพื่อให้สามารถเห็นความแตกต่างของเซลล์ได้ชัดเจนขึ้น ใช้ปิเปตดูด hematoxylin ออก แล้วล้างด้วยน้ำ 2 ครั้ง

5. ย้อมสีชั้นบางด้วย safranin เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ในน้ำเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้ชั้นบางติดสี จากนั้นใช้ปิเปตดูด safranin ออก แล้วล้างด้วยน้ำ 1 ครั้ง

6. หยดโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ในน้ำ ทิ้งไว้ 15 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำ 1 - 2 ครั้ง

7. ทำการไล่น้ำออกจากชั้นบาง (dehydration) โดยแช่ชั้นบางลงในแอลกอฮอล์ ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ตามลำดับคือ แอลกอฮอล์เข้มข้น 10, 20, 30, 50, 70, 95 เปอร์เซ็นต์ (2 ครั้ง) และตามด้วย absolute alcohol เป็นลำดับสุดท้าย

8. ทำการไล่แอลกอฮอล์ออกจากชั้นไม้ โดยแช่ชั้นบางใน xylene สักครู่ จากนั้นทำการแช่ต่อใน xylene ใหม่อีก 2 ครั้ง

9. ทำการติดชั้นบางบนแผ่นสไลด์แบบถาวร โดยใช้ฟุ้งกันเชื้อชั้นบางที่แช่อยู่ใน xylene มาวางตรงกลางสไลด์ และหยด permount 2 - 3 หยด ปิดด้วยโคฟเวอร์กลาส ทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง เพื่อให้ permount เข้าไปแทนที่ xylene ในชั้นบาง

10. ใช้ไม้หนีบที่ทำจากไม้หนีบระหว่างโคฟเวอร์กลาส และแผ่นสไลด์ โดยใช้ถุงพลาสติกครอบไว้ เพื่อให้ permount ติดไม้หนีบ และจะได้ชั้นบางที่ราบเรียบ นำแผ่นสไลด์ไปอบในตู้อบอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน จน permount แห้ง

11. นำแผ่นสไลด์ไปอบในตู้อบอุณหภูมิประมาณ 60 - 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 - 3 วัน จน permount แห้ง นำออกจากตู้อบ ทิ้งให้เย็น แล้วใช้มีดโกนขูด permount ที่แห้ง ซึ่งอยู่นอก

โพลีเมอร์กลาสออก ทำความสะอาดแผ่นสไลด์ โดยใช้ผ้าชุบ xylene เล็กน้อย เช็ดลงบนแผ่นสไลด์ และโพลีเมอร์กลาส (ระวังอย่าให้ xylene เปียกที่ขอบของโพลีเมอร์กลาส)

12. ติดกระดาษสำหรับบรรยายแผ่นสไลด์ด้านซ้ายมือ

การเตรียมสไลด์ถาวรของเส้นใย

1. นำชิ้นไม้ที่ตัดตามภาพที่ 2 (ในส่วนของชิ้นไม้ที่ใช้หาความยาวของเส้นใย) มาขอยให้มีขนาดเท่าก้านไม้ขีด จากนั้นนำมาใส่ในหลอดทดลอง เติมกรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ กรดอะซิติก (อัตราส่วน 1:1) ลงไปจนท่วมชิ้นไม้
2. ใช้ปากคีบคีบกระดาษฟอยล์ใส่ลงไปในหลอดทดลอง ให้กระดาษฟอยล์สัมผัสกับชิ้นไม้ เพื่อช่วยกีดกันไม่ให้ชิ้นไม้ลอยขึ้นมาขณะทำการต้ม และใช้กระดาษฟอยล์ปิดปากหลอดทดลองอย่างหลวมๆ เพื่อให้ไอน้ำที่ระเหยขึ้นมาไหลย้อนกลับลงไปในหลอดทดลอง
3. นำหลอดทดลองมาใส่ในบีกเกอร์ที่ตั้งอยู่บนเตา (hot plate) จากนั้นเทน้ำลงในบีกเกอร์ โดยให้ระดับน้ำในบีกเกอร์สูงกว่าสารละลายกรดที่อยู่ในหลอดทดลอง ทำการเปิดเตาให้น้ำในบีกเกอร์เดือด จับเวลาที่ใช้ในการต้มประมาณ 3 ชั่วโมง จนกระทั่งได้ชิ้นไม้ที่มีสีขาว (ระหว่างต้มชิ้นไม้ ต้องระวังระดับน้ำในบีกเกอร์ ไม้ให้ต่ำกว่าสารละลายกรดที่อยู่ในหลอดทดลอง)
4. ปิดเตาและปล่อยให้หลอดทดลองเย็นลง ค่อย ๆ เทสารละลายออกจากหลอดทดลอง แล้วใช้กระบอกน้ำ ฉีดน้ำล้างหลอดทดลองและชิ้นไม้ 2 - 3 ครั้ง (ระวังอย่าฉีดน้ำโดนชิ้นไม้โดยตรง เนื่องจากชิ้นไม้ที่ผ่านการต้มจะยุ่ยง่าย) ครั้งสุดท้ายค่อย ๆ เทชิ้นไม้ใส่ในตะแกรง แล้วใช้ปลายพู่กัน ค่อย ๆ ป้ายชิ้นไม้ใส่ลงในขวดที่ใช้เก็บตัวอย่าง
5. ล้างชิ้นไม้สีขาวขึ้นมา 1 ชิ้น ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำลงไปแล้วเขย่าให้ชิ้นไม้สีขาวกระจายแตกออกเป็นเส้นใยเดี่ยว ๆ ทำการเจือจางเส้นใยในน้ำ ให้มีระดับความเข้มข้นที่พอเหมาะสำหรับนำไปทำสไลด์ถาวร

6. เปิดเครื่อง slide warmer ให้ทำงาน โดยตั้งอุณหภูมิประมาณ 90 - 95 องศาเซลเซียส ทำการเขย่าหลอดทดลอง เพื่อให้เส้นใยกระจายตัว แล้วใช้หลอดพลาสติกดูดเส้นใย หยดลงบนแผ่นสไลด์ที่ล้างทำความสะอาดไขมันออกแล้ว และทิ้งให้เส้นใยแห้งบน

7. หยดสีย้อม chlorazol black E เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ในแอลกอฮอล์ เข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ ให้ท่วมเส้นใยที่อยู่บนแผ่นสไลด์ แล้วทิ้งให้สีย้อมแห้ง

8. นำแผ่นสไลด์มาจุ่มในบีกเกอร์ เพื่อล้างสีย้อมออกจากเส้นใย โดยค่อย ๆ จุ่มขึ้นลงอย่างช้า ๆ (อย่าจุ่มขึ้นลงแรงและเร็วเกินไป เพราะจะทำให้เส้นใยหลุดออกจากแผ่นสไลด์ได้) ล้างจนกระทั่งสีย้อมออกจากสไลด์ทั้งหมด จากนั้นใช้ผ้าสะอาดเช็ดได้แผ่นสไลด์ให้แห้ง แล้วนำแผ่นสไลด์มาวางลงบน slide warmer รอจนกระทั่งแผ่นสไลด์แห้ง จากนั้นทิ้งให้แผ่นสไลด์เย็น

9. หยด xylene 1 - 2 หยด ลงบนแผ่นสไลด์แล้วนำไปวางบน slide warmer จนกระทั่ง xylene แห้ง

10. หยด permount 2 - 3 หยด ลงบนแผ่นสไลด์ และค่อย ๆ ปิดด้วยโคฟเวอร์กลาส ทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นสไลด์ไปอบในตู้อบอุณหภูมิประมาณ 60 - 65 องศาเซลเซียส โดยไม่ต้องใช้ไม้หนีบ เป็นเวลา 2 - 3 วัน จน permount แห้ง

11. นำแผ่นสไลด์ออกจากตู้อบ ทิ้งให้เย็น แล้วใช้มีดโกนขูด permount ที่แห้งซึ่งอยู่นอกโคฟเวอร์กลาสออก ทำความสะอาดแผ่นสไลด์ โดยใช้ผ้าชุบ xylene เล็กน้อย เช็ดลงบนแผ่นสไลด์ และโคฟเวอร์กลาส (ระวังอย่าให้ xylene เปียกที่ขอบของโคฟเวอร์กลาส)

12. ดัดกระดาษสำหรับบรรยายแผ่นสไลด์ด้านซ้ายมือ

การวัดขนาดของเส้นใย

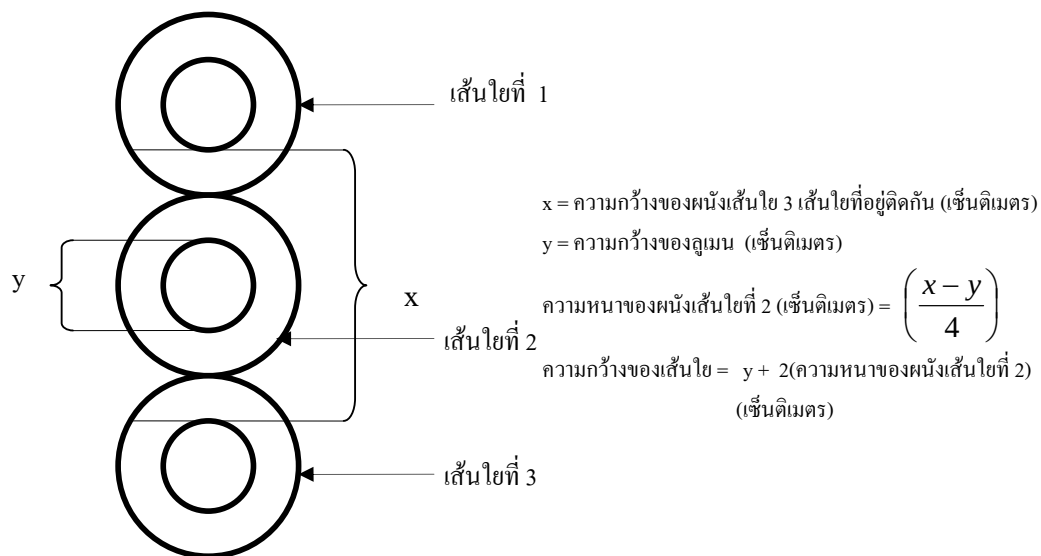
การวัดความยาวของเส้นใย เนื่องจากความยาวของเส้นใยมีความผันแปรสูง ดังนั้นการที่จะให้ได้ค่าความยาวของเส้นใยที่เป็นตัวแทนนั้น ทุกขั้นตอนจะต้องทำแบบสุ่ม โดยเริ่มจากการสุ่มหยิบชิ้นไม้สีขาวที่อยู่ในขวดเก็บตัวอย่างขึ้นมา 1 ชิ้น ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำลงไปแล้วเขย่าให้ชิ้นไม้สีขาวกระจาย แยกออกเป็นเส้นใยเดี่ยว ๆ จากนั้นใช้หลอดพลาสติกดูดเส้นใย หยดลงบนแผ่นสไลด์ที่ล้างไขมันออกอย่างดีแล้ว เพื่อไม่ให้เส้นใยอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม จากนั้นใช้ไฟฟ้าเวอร์กลาสปิดทับ นำไปวัดความยาวของเส้นใยโดยการฉายขึ้นจอโทรทัศน์ โดยใช้กำลังขยายของกล้อง 10 เท่า ใช้ไม้บรรทัดวัดความยาวของเส้นใย (หน่วยความยาวเป็นเซนติเมตร) โดยเลือกวัดเส้นใยที่มีลักษณะสมบูรณ์ คือเส้นใยที่มีลักษณะหัวแหลมท้ายแหลม ทำการเคลื่อนแผ่นสไลด์เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่จะวัด โดยวัดความยาวของเส้นใยทั้งสิ้นจำนวน 100 ตัวอย่าง หลังจากวัดความยาวของเส้นใยครบ 100 ตัวอย่างแล้ว นำค่าความยาวของเส้นใยที่วัดได้จากไม้บรรทัด มาเปรียบเทียบกับค่าความยาวที่แท้จริงจาก stage micrometer (โดยความยาวของ stage micrometer 1 มิลลิเมตร เท่ากับความยาวของเส้นใยที่วัดโดยใช้ไม้บรรทัด 17 เซนติเมตร)

การวัดความกว้างของเส้นใย ความกว้างของลูเมน และความหนาของผนังเส้นใย นำสไลด์ของชิ้นไม้ทางด้านหน้าตัด มาวัดความกว้างของเส้นใย ความกว้างของลูเมน และความหนาของผนังเส้นใยโดยการฉายขึ้นจอโทรทัศน์ ใช้กำลังขยายของกล้อง 100 เท่า โดยใช้ไม้บรรทัดวัดเส้นใย 3 เส้นที่มีความสมบูรณ์ ที่อยู่ติดกันตามแนวรัศมี (หน่วยเป็นเซนติเมตร) ดังแสดงในภาพที่ 5 ทำการวัดทั้งสิ้นจำนวน 100 ตัวอย่าง โดยเคลื่อนแผ่นสไลด์เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่จะวัด หลังจากวัดครบ 100 ตัวอย่างแล้ว นำค่าความกว้างของเส้นใย ความกว้างของลูเมน และความหนาของผนังเส้นใยที่วัดได้จากไม้บรรทัด มาเปรียบเทียบกับค่าความยาวที่แท้จริงจาก stage micrometer (โดยความยาวของ stage micrometer 0.1 มิลลิเมตร เท่ากับความยาวของไม้บรรทัด 20 เซนติเมตร)

การหาอัตราส่วนของชนิดเซลล์

นำสไลด์ของชิ้นไม้ทางด้านหน้าตัดมาถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังการขยายสูง โดยให้ภาพที่ออกมามีกำลังขยายเป็น 100 เท่าของ stage micrometer จากนั้นใช้ dot grid ขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร (มีจำนวน 10,000 จุด) ซึ่งคิดเป็นพื้นที่จริง 1 ตารางมิลลิเมตร เป็นตัวแทนวัดอัตราส่วนของชนิดเซลล์ โดยวัดทุก ๆ 20 เปอร์เซ็นต์ ของขนาด

ตัวอย่าง อัตราส่วนของเส้นใยจะหักออกจากพื้นที่ของอัตราส่วนของเวสเซลและอัตราส่วนของพารენไคมา (เรียพารენไคมาและพารენไคมาตามยาว)



ภาพที่ 5 แสดงการวัดความกว้างของเส้นใย ความกว้างของลูเมน และความหนาของผนังเส้นใย
ที่มา: Hiller (1964)

การหาความหยาบของเส้นใย

1. นำเนื้อไม้ที่ได้จากการตัดในภาพที่ 3 มาซอยให้มีขนาดเท่ากันไม้ขีด จากนั้นนำมาใส่ในขวดรูปชมพู่ และเติมกรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกรดอะซิติก (อัตราส่วน 1:1) ลงไปจนท่วมชิ้นไม้

2. ใช้ปากคีบคีบกระดาษฟอยล์ใส่ลงไปในหลอดทดลอง ให้กระดาษฟอยล์สัมผัสกับชิ้นไม้เพื่อช่วยกดชิ้นไม้ไม่ให้ลอยขึ้นมาขณะทำการต้ม และใช้กระดาษฟอยล์ปิดปากหลอดทดลองอย่างหลวม ๆ เพื่อให้ไอน้ำที่ระเหยขึ้นมาไหลย้อนกลับลงไปในขวดรูปชมพู่

3. นำขวดรูปชมพู่มาใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 75 - 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง จนกระทั่งชิ้นไม้ในขวดรูปชมพู่มีสีขาว

4. ล้างชิ้นไม้ที่ได้จากข้อที่ 3 ให้สะอาด แล้วจึงนำไปใส่ถุงผ้าเพื่อปิ่นให้แห้ง

5. นำเยื่อที่ได้จากข้อที่ 4 มาจำนวน 3 กรัมแห้ง ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ทำการเติมน้ำกลั่นประมาณ 400 มิลลิลิตร ลงไป ใช้เครื่อง hand mixer ปั่นจนน้ำเยื่อมีการกระจายตัวดี จากนั้นนำน้ำเยื่อไปหาความหนืดของเส้นใยด้วยเครื่อง MORFI LABO (LB-01) ต่อไป

การวางแผนการทดลอง

ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มซ้อน 3 ชั้น (3 - stages nested design) โดยมีปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ อายุของไม้ (age) ต้นไม้ (tree) และตำแหน่งจากใจไม้ไปยังเปลือกไม้ (position)

การวิเคราะห์หาสหสัมพันธ์ของตัวแปรทุกลักษณะ

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation analysis) เป็นการวัดระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัว และทดสอบว่าตัวแปรคู่หนึ่งมีความสัมพันธ์กันอย่างน้อยสำคัญทางสถิติหรือไม่ และมีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด โดยไม่สนใจว่าตัวแปรใดเป็นตัวแปรอิสระหรือตัวแปรตาม

ระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient : r) ซึ่งอาจมีเครื่องหมายเป็นบวกหรือลบก็ได้ ถ้ามีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าตัวแปรทั้งสองตัวนั้นมีความสัมพันธ์เชิงบวก กล่าวคือ ถ้าตัวแปรหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวแปรอีกตัวก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าค่า r เป็นเครื่องหมายลบ แสดงว่าตัวแปรทั้งสองตัวนั้นมีความสัมพันธ์กันเชิงลบ กล่าวคือ ถ้าตัวแปรหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวแปรอีกตัวหนึ่งจะมีค่าลดลง ถ้าค่า r เท่ากับศูนย์ หมายความว่าตัวแปรทั้งสองตัวนั้นไม่มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นต่อกันเลย ถ้าค่า r เข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าตัวแปรทั้งสองตัวนั้นมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก ถ้าค่า r เข้าใกล้หนึ่ง แสดงว่าตัวแปรทั้งสองตัวนั้นมีความสัมพันธ์กันมาก และถ้าค่า r เท่ากับหนึ่ง แสดงว่าตัวแปรทั้งสองตัวนั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์

เมื่อต้องการทราบระดับความสัมพันธ์และทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเชิงปริมาณ โดยไม่สนใจที่จะควบคุมอิทธิพลของตัวแปรอื่น ถ้าตัวแปรที่ต้องการหาความสัมพันธ์เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ และต้องการทดสอบว่าตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันหรือไม่ ดังนั้นจะใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's coefficients)

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบกลุ่มซ้อน 3 ชั้น ซึ่งมีแบบหุ่นทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + T_{j/i} + P_{k/ij} + \epsilon_{l/ijk} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

เมื่อ

$$\begin{array}{ll} Y_{ijkl} &= \text{ค่าสังเกตจากตัวอย่างที่ } l \text{ ที่ซ้อนอยู่ในระดับที่ } k \text{ ของปัจจัย } P \\ &\quad \text{ระดับที่ } j \text{ ของปัจจัย } T \text{ และระดับที่ } i \text{ ของปัจจัย } A \\ \mu &= \text{ค่าเฉลี่ยรวม} \\ A_i &= \text{อิทธิพลของอายุไม้} \\ T_{j/i} &= \text{อิทธิพลของไม้ต่างต้นที่อายุเดียวกัน} \\ P_{k/ij} &= \text{อิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในไม้ต้นเดียวกัน} \\ &\quad \text{ในอายุเดียวกัน} \\ \epsilon_{l/ijk} &= \text{ความผันแปรของตัวอย่างในแต่ละระดับของตำแหน่งจากใจไม้} \\ &\quad \text{ไปเปลือกไม้ภายในไม้ต้นเดียวกันในอายุเดียวกัน} \end{array}$$

การวิเคราะห์หาสหสัมพันธ์ของตัวแปรทุกลักษณะ ต้องทำการจัดอิทธิพลอายุของไม้ ไม้ต่างต้นที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในไม้ต้นเดียวกันในอายุเดียวกันออกไปจากค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองเสียก่อน โดยค่าที่ได้เป็นค่าที่ปรับแก้แล้ว เรียกว่า $Y(\text{adjust})$ โดยค่า $Y(\text{adjust})$ จะแสดงในรูปของสมการต่อไปนี้

$$Y_{ijkl} - A_i - T_{j/i} - P_{k/ij} = \mu + \epsilon_{l/ijk} = Y(\text{adjust})$$

โดย

$Y(\text{adjust})$	=	ค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองที่ปรับแก้แล้ว
Y_{ijkl}	=	ค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองที่ยังไม่ได้ปรับแก้
A_i	=	ค่าเฉลี่ยของในแต่ละอายุ - ค่าเฉลี่ยรวม
T_j/i	=	ค่าเฉลี่ยของต้นในแต่ละอายุ - ค่าเฉลี่ยของในแต่ละอายุ
P_k/ij	=	ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งในแต่ละต้นในแต่ละอายุ - ค่าเฉลี่ยของต้น ในแต่ละอายุ

ผลและการวิจารณ์

ความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิด

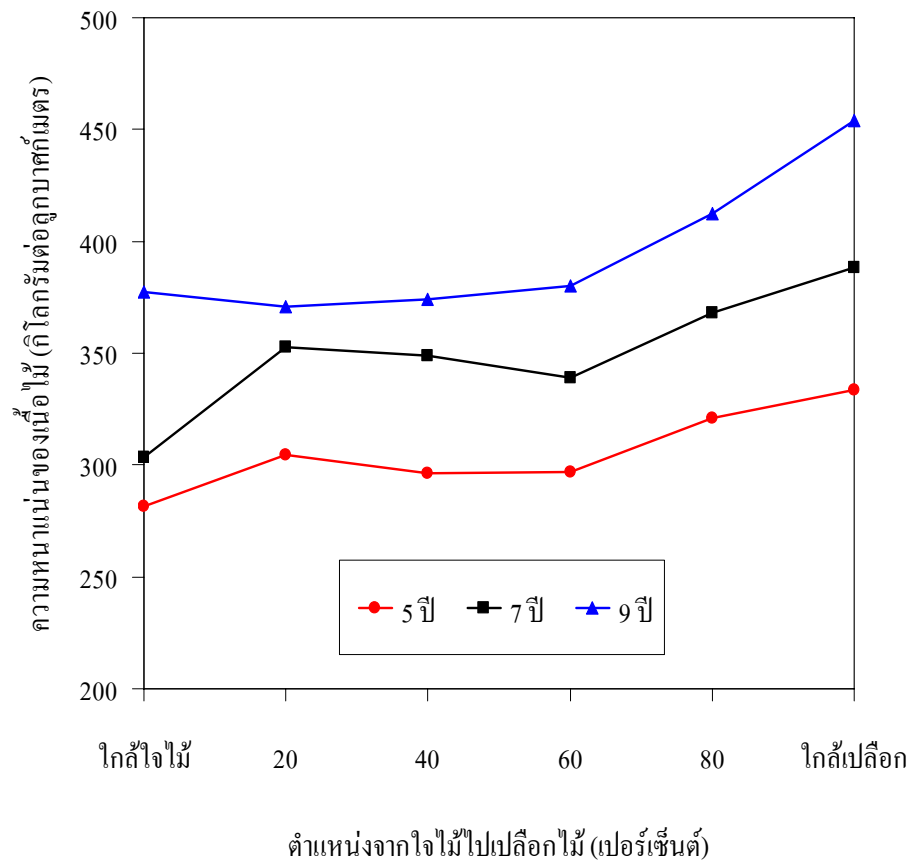
จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ที่มีผลต่อความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 6 พบว่า ความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 305.62, 350.18 และ 394.86 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไม้ดินเปิดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงน้อยกว่า 5 นิ้ว 5 - 10 นิ้ว และมากกว่า 10 นิ้ว ซึ่งมีความหนาแน่นของเนื้อไม้เฉลี่ยเท่ากับ 319.00, 328.50 และ 339.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (วรรณธรรม และคณะ, 2546) นอกจากนี้ยังมีค่าใกล้เคียงกับเนื้อไม้ส่วนกิ่งของไม้ดินเปิดที่ศึกษาโดยรุ่งฤดี (ม.ป.ป.) ที่มีค่าหนาแน่นของเนื้อไม้เท่ากับ 390.00 - 400.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 1 พบว่า อายุของไม้ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิด ($P > 0.05$)

จากการศึกษาอิทธิพลของไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน ที่มีผลต่อความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิดได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 7 พบว่า ความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิดต้นที่ 1 และ 2 ในไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 280.00 331.24, 357.92 342.44, 399.77 และ 389.95 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไม้ดินเปิดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงน้อยกว่า 5 นิ้ว 5 - 10 นิ้ว และมากกว่า 10 นิ้วที่มีความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิดต้นที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 285.00 281.50 364.50, 291.50 308.00 343.00 และ 337.00 321.5 357.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (วรรณธรรม และคณะ, 2546) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 1 พบว่า ไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกันมีผลต่อความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

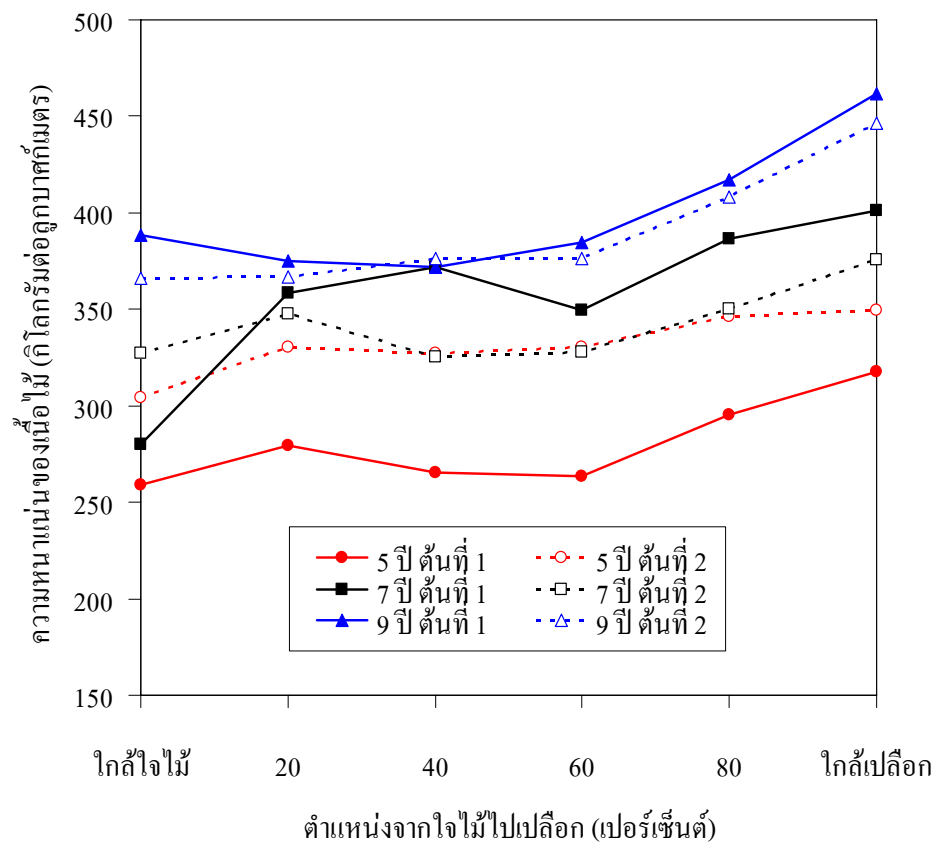
จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกัน ที่มีผลต่อความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 1 พบว่า ตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันมีผลต่อความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$) โดยพบว่า ความหนาแน่นของเนื้อไม้มีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากใจไม้ออกไปยังเปลือกไม้ โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับไม้ดินเปิดที่ศึกษาโดย วรรณธรรม และคณะ (2546)

ตารางที่ 4 ความหนาแน่นของเนื้อไม้ดินเป็ดเฉลี่ย

อายุ (ปี)	ต้นที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)						ความหนาแน่นของเนื้อไม้ เฉลี่ย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	
		ใกล้ใจไม้	20	40	60	80	ใกล้เปลือก		
5	1	258.84	279.17	265.31	263.57	295.56	317.52	280.00	305.62
	2	304.11	330.22	327.38	330.13	346.09	349.48	331.24	
7	1	280.28	358.35	371.96	349.70	386.30	400.93	357.92	350.18
	2	326.96	347.55	325.57	329.18	349.89	375.47	342.44	
9	1	388.45	375.25	371.76	384.39	417.04	461.71	399.77	394.86
	2	366.10	366.53	376.49	376.21	408.08	446.30	389.95	



ภาพที่ 6 กราฟแสดงอายุของไม้ที่มีผลต่อความหนาแน่นของไม้ต้นเปิด



ภาพที่ 7 กราฟแสดงไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายใน
ต้นเดียวกันที่มีผลต่อความหนาแน่นของไม้ต้นเปิด

สมบัติเส้นใยของไม้ดินเปิด

การศึกษาสมบัติเส้นใยของไม้ดินเปิด ซึ่งประกอบด้วย ความยาวของเส้นใย ความกว้างของเส้นใย ความกว้างของลูเมน ความหนาของผนังเส้นใย และความหยาบของเส้นใย ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 5 - 10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ได้แสดงในตารางผนวกที่ 2 - 5 และภาพที่ 8 - 16 เป็นกราฟแสดงอายุของเนื้อไม้ ไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ ภายในต้นเดียวกันในอายุเดียวกันที่มีต่อสมบัติเส้นใยของไม้ดินเปิด สมบัติเส้นใยเหล่านี้จะนำมาคำนวณค่าความเหมาะสม (derived values) ในการทำเยื่อและกระดาษ เช่น Runkel ratio, Flexibility coefficient และ Slenderness ratio ต่อไป

ความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิด

จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ ที่มีผลต่อความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6 และภาพที่ 8 พบว่า ความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.33, 1.27 และ 1.28 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความยาวของเส้นใยอยู่ในช่วงของเส้นใยไม้ใบกว้างทั่วไป คือ 0.90 - 1.50 มิลลิเมตร (Biermann, 1996) และมีความยาวของเส้นใยใกล้เคียงกับไม้ดินเปิดที่ศึกษาโดยวรรณกรรม และคณะ (2546) ที่พบว่า ไม้ดินเปิดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงออกน้อยกว่า 5 นิ้ว 5 - 10 นิ้ว และมากกว่า 10 นิ้ว มีความยาวของเส้นใยเฉลี่ยเท่ากับ 1.21, 1.31 และ 1.63 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่ไม้ดินเปิดที่ได้จากการทดลองมีความยาวของเส้นใยสั้นกว่าไม้ดินเปิดในส่วนของกิ่งที่ศึกษาโดยรุ่งฤดี (ม.ป.ป.) ซึ่งมีความยาวของเส้นใย 1.65 - 1.78 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัส พบว่า ไม้ดินเปิดอายุ 5 ปี ที่ได้จากการทดลองมีเส้นใยยาวกว่าไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่ศึกษาโดย สาวิตรี (2538) และทัศนีย์ และคณะ (2538) และไม้ *E. camaldulensis* และ *E. globulus* อายุ 14 ปี (Ona et al., 2001) ที่มีความยาวของเส้นใยเฉลี่ยเท่ากับ 1.10, 1.23, 0.67 และ 0.92 มิลลิเมตร ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 2 พบว่า อายุของไม้ไม่มีผลต่อความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิด ($P > 0.05$)

จากการศึกษาอิทธิพลของไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน ที่มีผลต่อความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6 และภาพที่ 9 พบว่า ความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิดต้นที่ 1 และ 2 ในไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.28 1.38, 1.31 1.24, 1.28 และ 1.29 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไม้ดินเปิดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียง

ออกน้อยกว่า 5 นิ้ว 5 - 10 นิ้ว และมากกว่า 10 นิ้วที่มีความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิดต้นที่ 1 2 และ 3 เท่ากับ 1.12 1.33 1.25, 1.18 1.38 1.130 และ 1.57 1.54 1.65 มิลลิเมตร ตามลำดับ (วรรณธรรม และคณะ, 2546) เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ *E. camaldulensis* และ *E. globulus* อายุ 14 ปี ต้นที่ 1 และ 2 (Ona *et al.*, 2001) ที่มีว่ความยาวของเส้นใยเท่ากับ 0.68 0.66 และ 0.94 0.89 มิลลิเมตร จะเห็นว่าไม้ดินเปิดที่ได้จากการทดลองมีความผันแปรของความยาวของเส้นใยไม่มากนัก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 2 พบว่า ไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกันไม่มีผลต่อความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิด ($P > 0.05$)

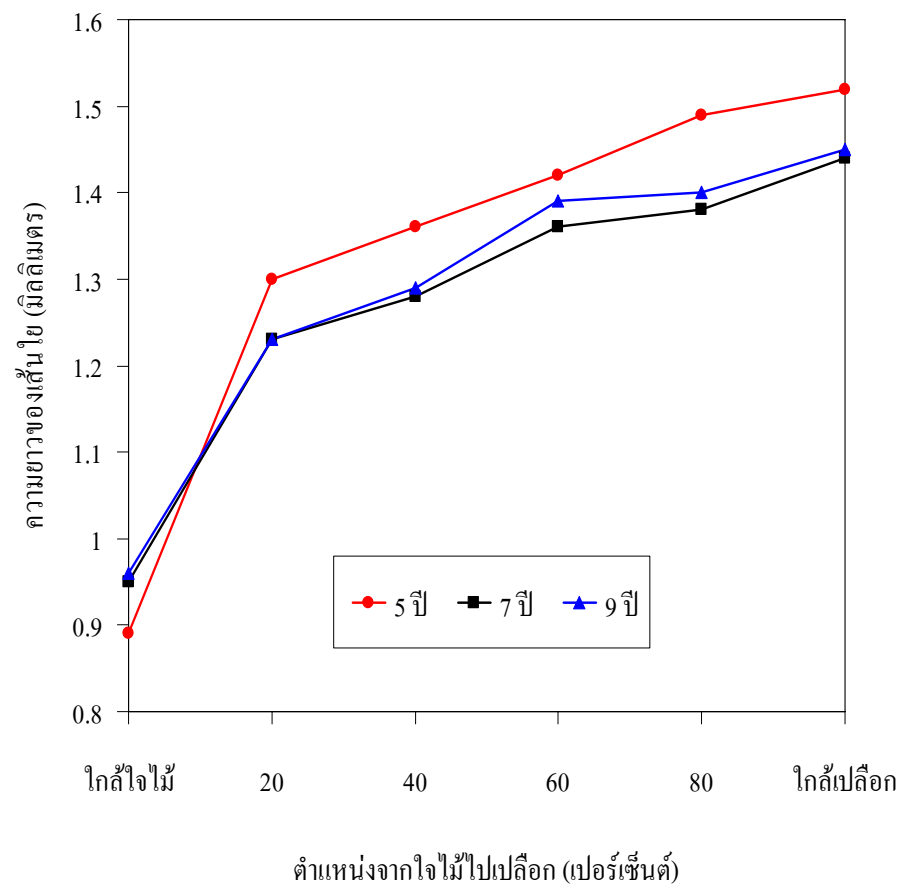
จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกัน ที่มีผลต่อความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6 และภาพที่ 9 พบว่า ความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิดมีลักษณะเพิ่มขึ้นจากใจไม้ไปยังเปลือกไม้ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับไม้ดินเปิดที่ศึกษาโดย วรรณธรรม และคณะ (2546) และพบว่าบริเวณใกล้ใจไม้จะมีความยาวของเส้นใยสั้นที่สุด ส่วนบริเวณใกล้เปลือกไม้จะมีความยาวของเส้นใยยาวที่สุด ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 2 พบว่า ตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันมีผลต่อความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

ตารางที่ 5 สมบัติเส้นใยของไม้ต้นเบ็ดอายุ 5 7 และ 9 ปี

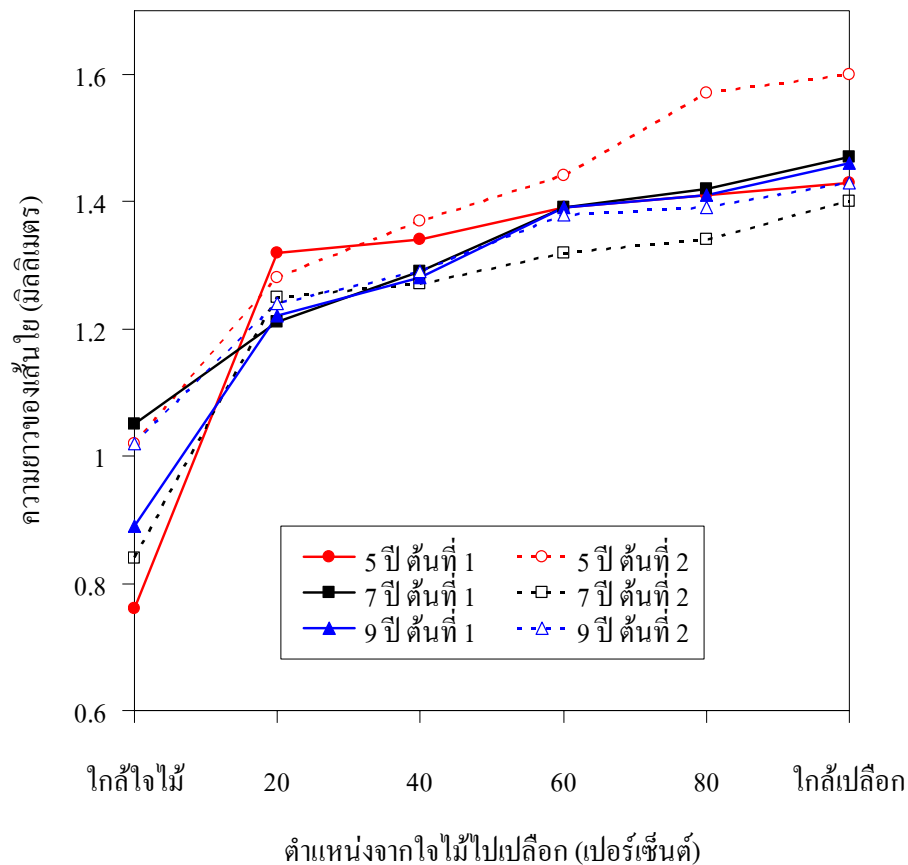
สมบัติเส้นใย	5 ปี			7 ปี			9 ปี		
	ต้น 1	ต้น 2	เฉลี่ย	ต้น 1	ต้น 2	เฉลี่ย	ต้น 1	ต้น 2	เฉลี่ย
ความยาวของเส้นใย (มิลลิเมตร)	1.28	1.38	1.33	1.31	1.24	1.27	1.28	1.29	1.29
ความกว้างของเส้นใย (ไมครอน)	30.79	30.39	30.59	28.30	32.06	30.18	29.03	9.98	29.50
ความกว้างของลูเมน (ไมครอน)	27.26	26.34	26.80	23.47	27.15	25.31	23.88	24.79	24.33
ความหนาของผนังเส้นใย (ไมครอน)	3.53	4.06	3.79	4.84	4.92	4.88	5.16	5.20	5.18

ตารางที่ 6 ความยาวของเส้นใยของไม้ดินเป็ดเฉลี่ยจากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง

อายุ (ปี)	ต้นที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)						ความยาวของเส้นใยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	
		โกสัใจไม้	20	40	60	80	โกสัปลือก		
5	1	0.76	1.32	1.34	1.39	1.41	1.43	1.28	1.33
	2	1.02	1.28	1.37	1.44	1.57	1.60	1.38	
7	1	1.05	1.21	1.29	1.39	1.42	1.47	1.31	1.27
	2	0.84	1.25	1.27	1.32	1.34	1.40	1.24	
9	1	0.89	1.22	1.28	1.39	1.41	1.46	1.28	1.28
	2	1.02	1.24	1.29	1.38	1.39	1.43	1.29	



ภาพที่ 8 กราฟแสดงอายุของไม้ที่มีผลต่อความยาวของเส้นใยของไม้ต้นเบ็ด



ภาพที่ 9 กราฟแสดงไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม่ไปเปลือกไม้ภายใน ต้นเดียวกันที่มีผลต่อความยาวของเส้นใยของไม้ต้นเปิด

ความกว้างของเส้นใยของไม้ต้นเปิด

จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ ที่มีผลต่อความกว้างของเส้นใยของไม้ต้นเปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 และ 7 และภาพที่ 10 พบว่า ความกว้างของเส้นใยของไม้ต้นเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.59, 30.18 และ 29.50 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งมีความกว้างของเส้นใยน้อยกว่าไม้ต้นเปิดที่ศึกษาโดย วรธรรม และคณะ (2546) และรุ่งฤดี (ม.ป.ป.) ที่ มีความกว้างของเส้นใย 32.40 - 34.40 และ 36.00 - 37.00 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัส พบว่า ไม้ต้นเปิดอายุ 5 ปี ที่ได้จากการทดลองมีเส้นใยกว้างกว่าไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่ศึกษาโดย สาวิตรี (2538) และทัศนีย์ และคณะ (2538) และไม้ *E. camaldulensis* และ *E. globulus* อายุ 14 ปี (Ona et al., 2001) ที่มีความกว้างของเส้นใยเฉลี่ยเท่ากับ

20.00, 20.60, 12.20 และ 15.60 ไมครอน ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 3 พบว่า อายุของไม้ไม่มีผลต่อความกว้างของเส้นใยของไม้ดินเปิด ($P > 0.05$)

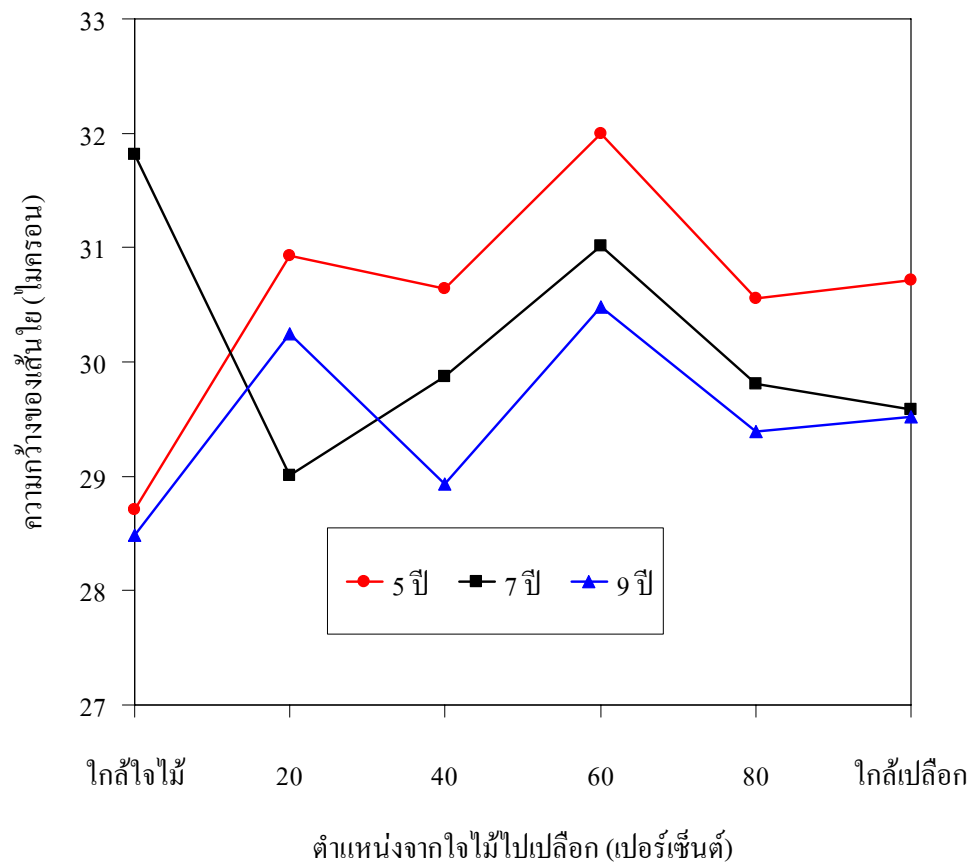
จากการศึกษาอิทธิพลของไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน ที่มีผลต่อความกว้างของเส้นใยของไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 และ 7 และภาพที่ 11 พบว่า ความกว้างของเส้นใยของไม้ดินเปิดต้นที่ 1 และ 2 ในไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.79 30.39, 28.30 32.06, 29.03 และ 29.98 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ *E. camaldulensis* และ *E. globulus* อายุ 14 ปี ต้นที่ 1 และ 2 (Ona *et al.*, 2001) ที่มีว่าความกว้างของเส้นใยเท่ากับ 12.40 12.10 และ 15.80 15.10 ไมครอน ตามลำดับ จะเห็นว่าไม้ดินเปิดที่ได้จากการทดลองมีความผันแปรของความกว้างของเส้นใยมากกว่า สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 3 ที่พบว่าไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกันมีผลต่อความกว้างของเส้นใยของไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกัน ที่มีผลต่อความกว้างของเส้นใยของไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 11 พบว่า ความกว้างของเส้นใยมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันและไม่คงที่ ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ในเนื้อไม้วิทยุหนุม โดยบริเวณใกล้ใจไม้ พบว่า มีความกว้างของเส้นใยน้อยที่สุด ส่วนตำแหน่งที่ 60 เปอร์เซ็นต์จากใจไม้ไปเปลือกไม้จะมีความกว้างของเส้นใยมากที่สุด ความกว้างของเส้นใยของไม้ดินเปิดที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับความกว้างของเส้นใยในไม้ pines, redwood และ poplars ที่ศึกษาโดย Tsoumis (1991) ที่พบว่า ความกว้างของเส้นใยอาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อห่างจากใจไม้ออกไป ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 3 พบว่า ตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันไม่มีผลต่อความกว้างของเส้นใย ($P > 0.05$)

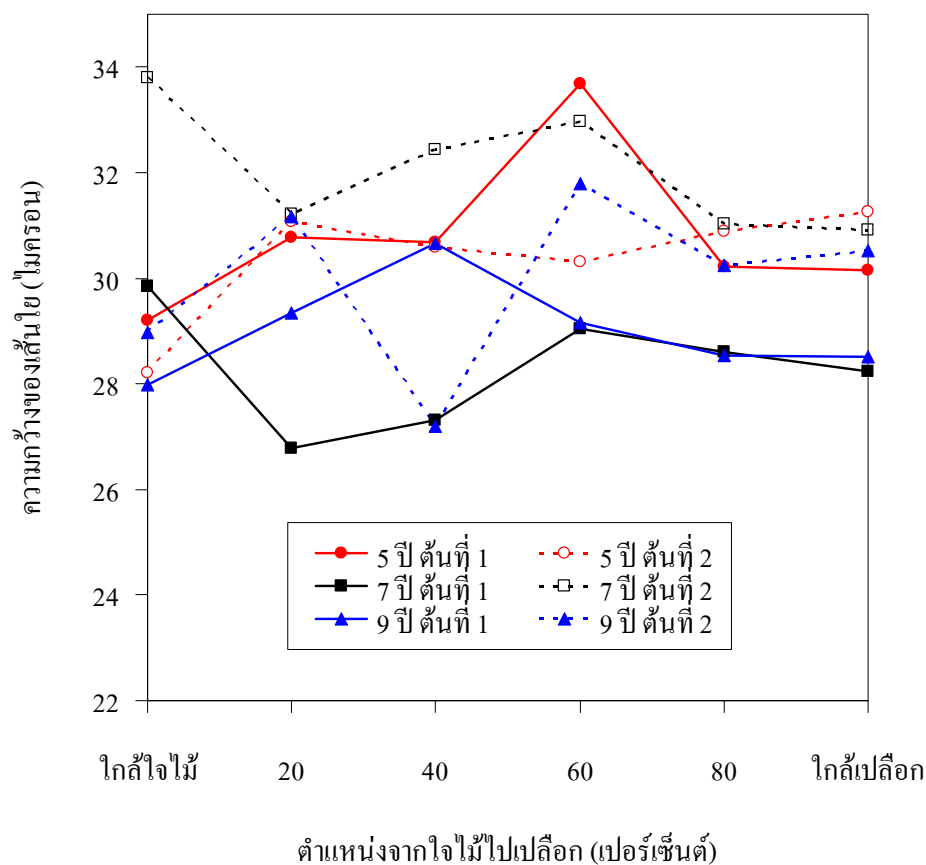
ตารางที่ 7 ความกว้างของเส้นใยของไม้ดินเป็ดเฉลี่ยจากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง

อายุ (ปี)	ต้นที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)						ความกว้างของเส้นใย เฉลี่ย (ไมครอน)

		ใกล้ใจไม้	20	40	60	80	ใกล้เปลือก	
5	1	29.21	30.77	30.68	33.68	30.21	30.16	30.59
	2	28.20	31.08	30.59	30.31	30.90	31.26	
7	1	29.84	26.79	27.30	29.05	28.60	28.23	30.18
	2	33.79	31.22	32.44	32.97	31.02	30.92	
9	1	27.99	29.34	30.65	29.15	28.53	28.52	29.50
	2	28.97	31.16	27.20	31.80	30.25	30.52	



ภาพที่ 10 กราฟแสดงอายุของไม้ที่มีผลต่อความกว้างของลำไม้ของไม้ต้นแปด



ภาพที่ 11 กราฟแสดงไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันที่มีผลต่อความกว้างของเส้นใบของไม้ต้นเปิด

ความกว้างของลูเมนของไม้ต้นเปิด

จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ ที่มีผลต่อความกว้างของลูเมนของไม้ต้นเปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 และ 8 และภาพที่ 12 พบว่า ความกว้างของลูเมนของไม้ต้นเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.80, 25.31 และ 24.33 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งมีความกว้างของลูเมนใกล้เคียงกับไม้ต้นเปิดที่ศึกษาโดย วรธรรม และคณะ (2546) และรุ่งฤดี (ม.ป.ป.) ที่มีความกว้างของลูเมนเฉลี่ยเท่ากับ 23.4 - 24.6 และ 24.00 - 26.00 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัส พบว่าไม้ต้นเปิดอายุ 5 ปี ที่ได้จากการทดลองมีความกว้างของลูเมนมากกว่าไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่ศึกษาโดย สาวตรี (2538) และทัศนีย์ และคณะ (2538) และไม้ *E. camaldulensis* และ *E. globulus* อายุ 14 ปี (Ona et al., 2001) ที่มีความกว้างของลูเมนเฉลี่ย

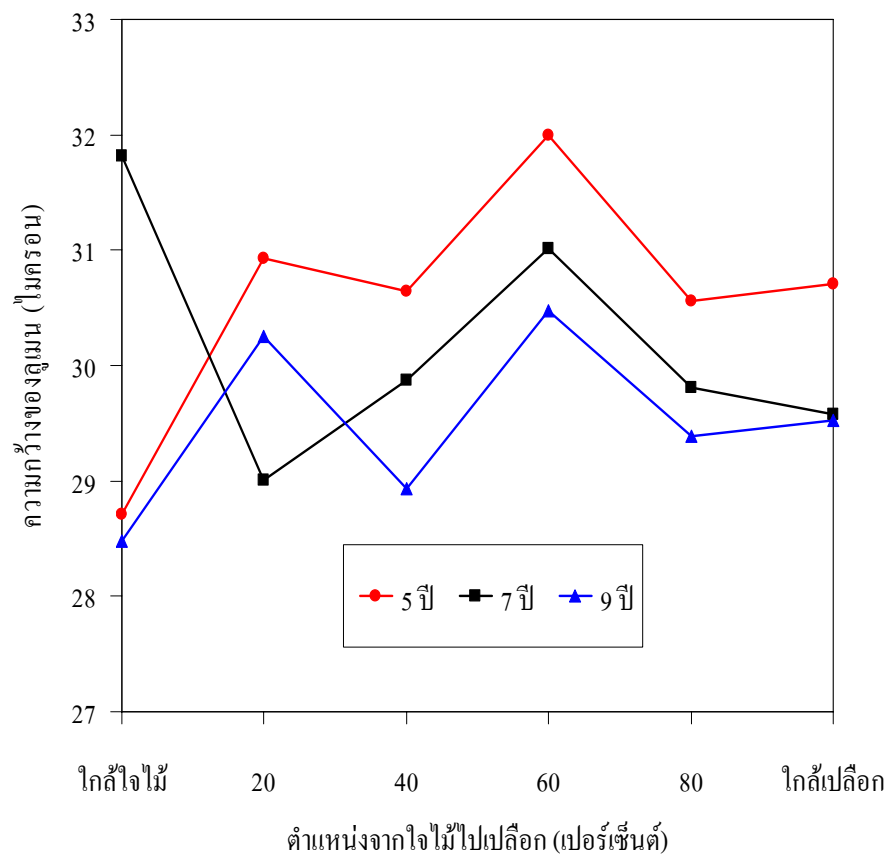
เท่ากับ 7.60, 16.00, 8.23 และ 10.28 ไมครอน ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตาราง
ผนวกที่ 4 พบว่าอายุของไม้ไม่มีผลต่อความกว้างของลูเมน ($P > 0.05$)

จากการศึกษาอิทธิพลของไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน ที่มีผลต่อความกว้างของลูเมนของไม้
ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 และ 8 และภาพที่ 13 พบว่า ความกว้างของลูเมนของไม้ดินเปิด
ต้นที่ 1 และ 2 ในไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.26 26.34, 23.47 27.15, 23.88
และ 24.79 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ *E. camaldulensis* และ *E. globulus* อายุ 14
ปี ต้นที่ 1 และ 2 (Ona *et al.*, 2001) ที่มีว่าความกว้างของลูเมนเท่ากับ 7.90 8.63 และ 10.22 10.40
ไมครอน ตามลำดับ จะเห็นว่าไม้ดินเปิดที่ได้จากการทดลอง มีความผันแปรของความกว้าง
ของลูเมนมากกว่า สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 4 ที่พบว่า ไม้ต่างต้นที่
อายุเดียวกันมีผลต่อความกว้างของลูเมนของไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

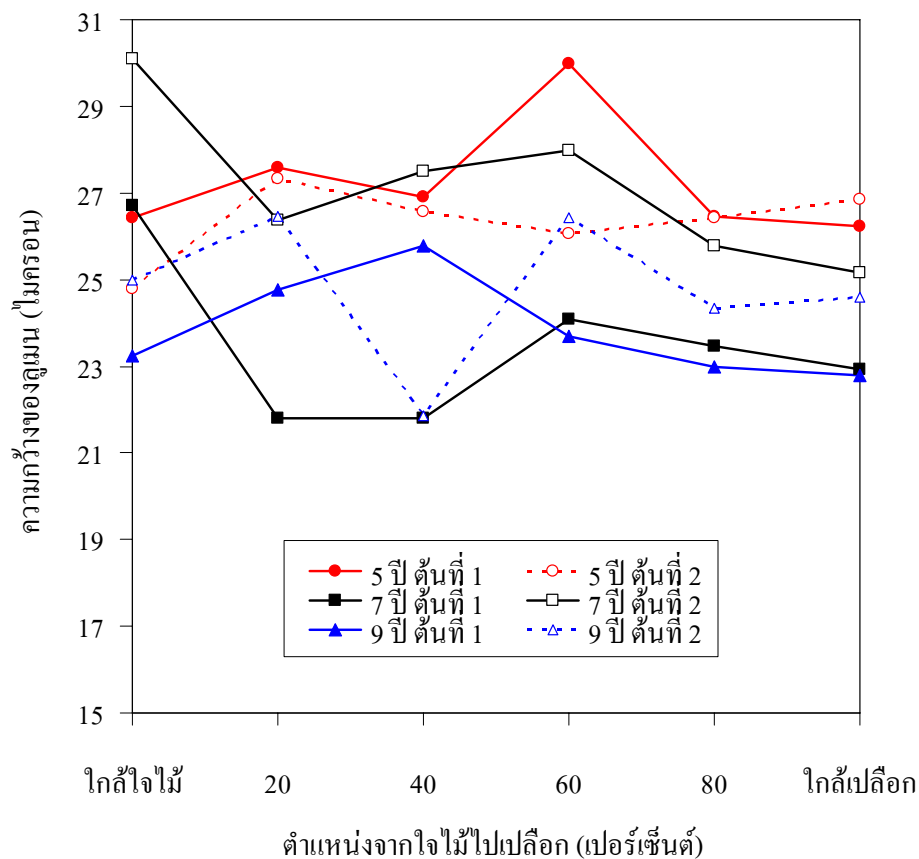
จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกัน ที่มีผลต่อ
ความกว้างของลูเมนของไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 13 พบว่า ความกว้าง
ของลูเมนของไม้ดินเปิดมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไม่คงที่ เช่นเดียวกับความกว้างของเส้น
ใย ซึ่งสามารถพบได้ในไม้ยวบหนุ่มที่ต้องมีการเจริญเติบโตต่อไปอีก และผลการวิเคราะห์ทางสถิติ
ในตารางผนวกที่ 4 พบว่า ตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันไม่มีผลต่อความกว้าง
ของลูเมนของไม้ดินเปิด ($P > 0.05$)

ตารางที่ 8 ความกว้างของดูเมนของไม้ต้นเปิดเฉลี่ยจากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง

อายุ (ปี)	ต้นที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)						ความกว้างของดูเมนเฉลี่ย (ไมครอน)	
		ใกล้ใจไม้	20	40	60	80	ใกล้เปลือก		
5	1	26.44	27.58	26.90	29.98	26.45	26.22	27.26	26.80
	2	24.78	27.33	26.56	26.06	26.42	26.86	26.34	
7	1	26.72	21.79	21.81	24.10	23.47	22.93	23.47	25.31
	2	30.10	26.36	27.49	27.98	25.77	25.17	27.15	
9	1	23.24	24.76	25.78	23.68	23.00	22.79	23.88	24.33
	2	25.00	26.46	21.87	26.43	24.35	24.60	24.79	



ภาพที่ 12 กราฟแสดงอายุของไม้ที่มีผลต่อความกว้างของลูเมนของไม้ต้นเปิด



ภาพที่ 13 กราฟแสดงไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายใน
ต้นเดียวกันที่มีผลต่อความกว้างของลูเมนของไม้ดินเปิด

ความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเปิด

จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ ที่มีผลต่อความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 และ 9 และภาพที่ 14 พบว่า ความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.79, 4.88 และ 5.18 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งมีความหนาของผนังเส้นใยใกล้เคียงกับไม้ดินเปิดที่ศึกษาโดย วรธรรม และคณะ (2546) และรุ่งฤดี (ม.ป.ป.) ที่มีความหนาของผนังเส้นใยเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 - 5.00 และ 4.70 - 5.40 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัส พบว่า ไม้ดินเปิดอายุ 5 ปี ที่ได้จากการทดลองมีความหนาของผนังเส้นใยน้อยกว่าไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่ศึกษาโดย สาวิตรี (2538) คือ 6.2 ไมครอน และมากกว่าไม้ยูคาลิปตัสอายุ 5 ปี ที่ศึกษาโดย และทัศนีย์ และคณะ (2538) คือ 2.3 ไมครอน เช่นเดียวกับไม้ *E. camaldulensis* และ *E. globulus* อายุ 14 ปี (Ona et al., 2001) ที่มี

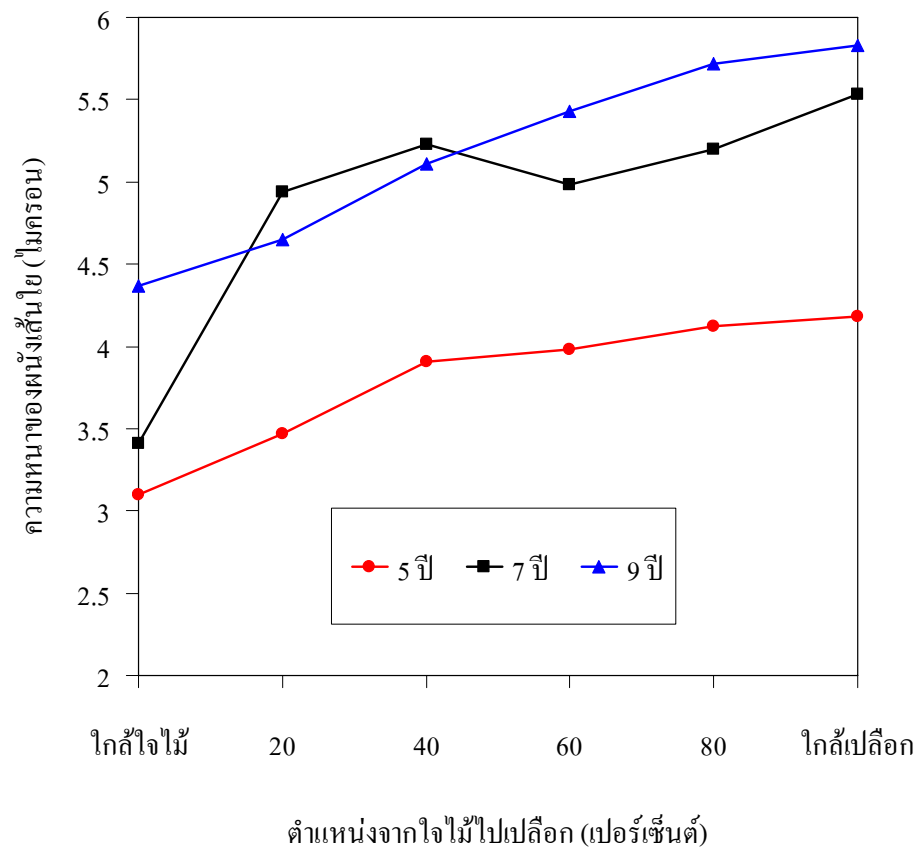
ความหนาของผนังเส้นใยเฉลี่ยเท่ากับ 1.72 และ 1.99 ไมครอน ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 5 พบว่า อายุของไม้มีผลต่อความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเป็ดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

จากการศึกษาอิทธิพลของไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน ที่มีผลต่อความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเป็ดได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 และ 9 และภาพที่ 15 พบว่า ความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเป็ดต้นที่ 1 และ 2 ในไม้ดินเป็ดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.53 4.06, 4.84 4.92, 5.16 และ 5.20 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ *E. camaldulensis* และ *E. globulus* อายุ 14 ปี ต้นที่ 1 และ 2 (Ona *et al.*, 2001) ที่มีความหนาของผนังเส้นใยเท่ากับ 1.88 1.53 และ 2.08 1.83 ไมครอน จะเห็นว่าไม้ดินเป็ดที่ได้จากการทดลองมีความผันแปรของความหนาของผนังเส้นใยไม่มากนักเช่นเดียวกับไม้ยูคาลิปตัส สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 5 ที่พบว่า ไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกันไม่มีผลต่อความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเป็ด ($P > 0.05$)

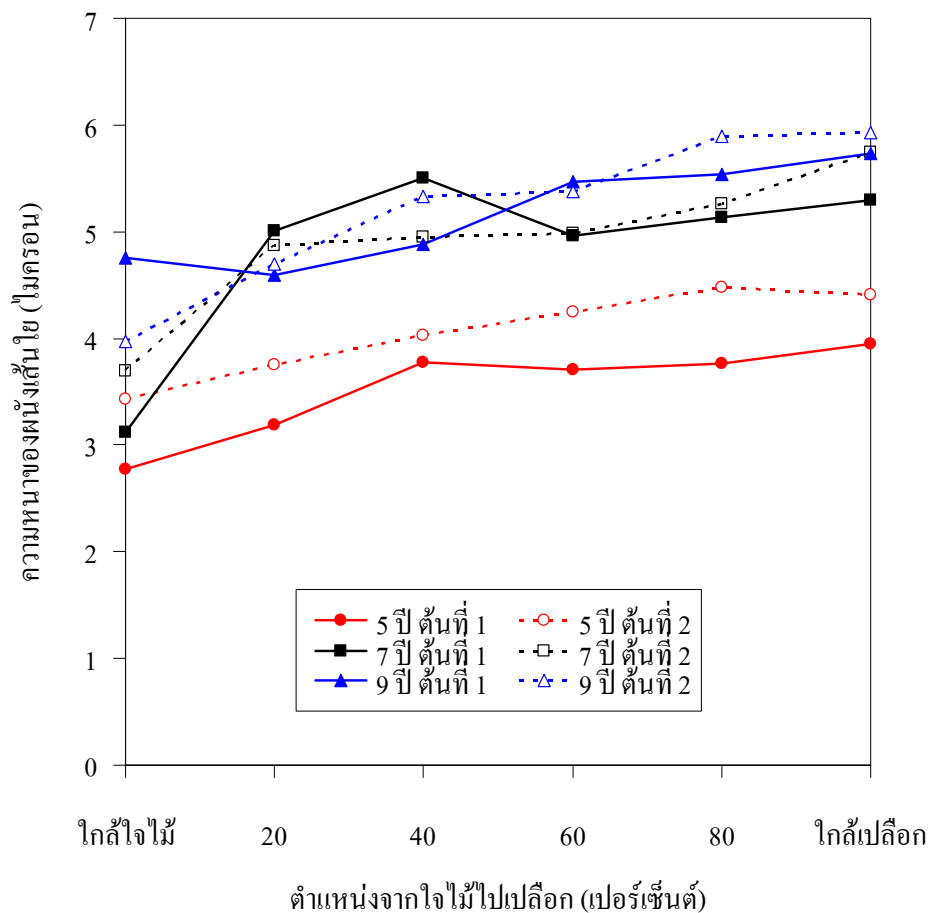
จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกัน ที่มีผลต่อความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเป็ด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 9 และภาพที่ 15 พบว่า ความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเป็ดมีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากใจไม้ไปเปลือกไม้ เหมือนกับไม้ poplars (Tsoumis, 1991) และผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 5 พบว่า ตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันมีผลต่อความหนาของผนังเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

ตารางที่ 9 ความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเป็ดเฉลี่ยจากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์
กำลังขยายสูง

อายุ (ปี)	ต้นไม้ที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)						ความหนาของผนังเส้นใย เฉลี่ย (ไมครอน)	
		ใกล้ใจไม้	20	40	60	80	ใกล้เปลือก		
5	1	2.77	3.19	3.78	3.71	3.76	3.95	3.53	3.79
	2	3.43	3.75	4.03	4.25	4.48	4.41	4.06	
7	1	3.12	5.01	5.50	4.96	5.13	5.30	4.84	4.88
	2	3.70	4.87	4.95	4.99	5.26	5.75	4.92	
9	1	4.76	4.59	4.88	5.47	5.54	5.73	5.16	5.18
	2	3.97	4.70	5.33	5.38	5.90	5.93	5.20	



ภาพที่ 14 กราฟแสดงอายุของไม้ที่มีผลต่อความหนาของผนังเส้นใยของไม้ต้นเป็ด



ภาพที่ 15 กราฟแสดงไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายใน
ต้นเดียวกันที่มีผลต่อความหนาของผนังเส้นใยของไม้ดินเปิด

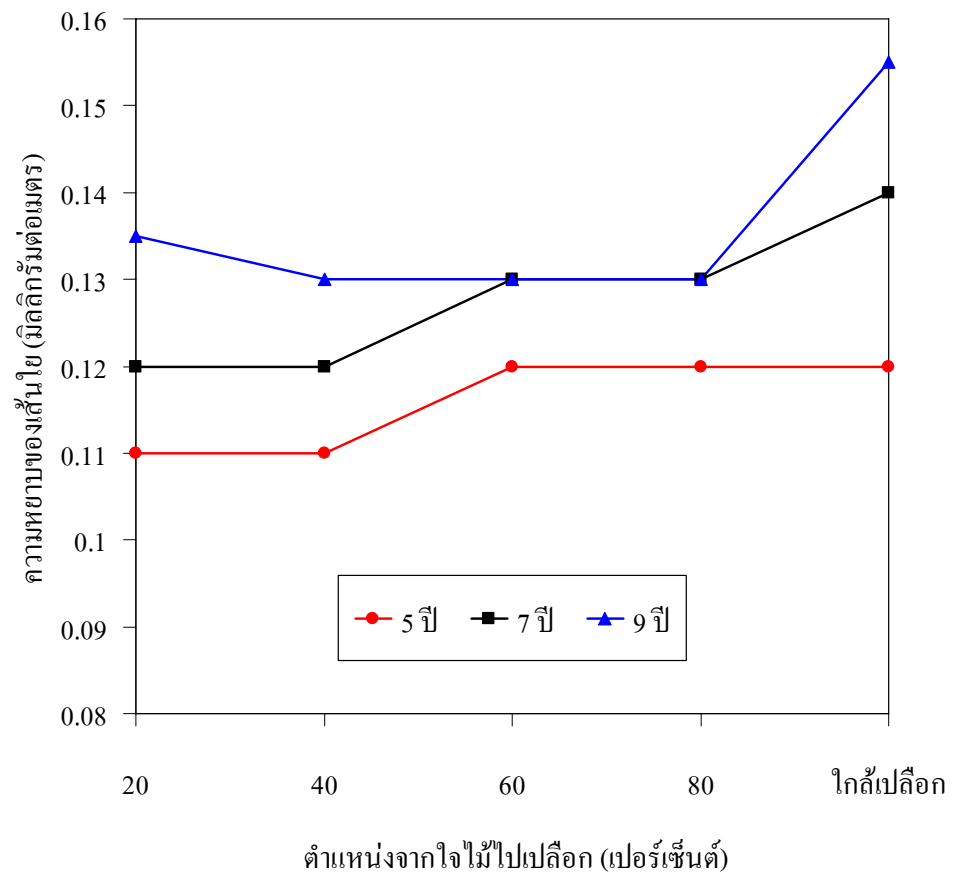
ความหนาของเส้นใยของไม้ดินเปิด

จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ ที่มีผลต่อความหนาของเส้นใยด้วยเครื่อง MORFI LABO (LB-01) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 10 และภาพที่ 16 พบว่า ความหนาของเส้นใยของไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.12, 0.13 และ 0.14 มิลลิกรัมต่อเมตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ *E. camaldulensis* อายุ 4 - 8 ปี ที่มีความหนาของเส้นใย 0.043 - 0.050 มิลลิกรัมต่อเมตร (Pisuttipished *et al.*, 2003) จะเห็นว่าไม้ดินเปิดที่ได้จากการทดลองมีความหนาของเส้นใยมากกว่า

ตารางที่ 10 ความหยาบของเส้นใยของไม้ดินเป็ดเฉลี่ยจากการวัดด้วยเครื่อง MORFI LABO
(LB-01)

อายุ (ปี)	วัดครั้งที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)					ความหยาบของเส้นใยเฉลี่ย	
		โกสัใจไม้	20	40	60	80	โกสัเปลือก	(มิลลิกรัมต่อเมตร)
5	1	-	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
	2	-	-	-	-	-	-	
7	1	-	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.13
	2	-	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	
9	1	-	0.14	0.13	0.13	0.13	0.16	0.14
	2	-	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	

หมายเหตุ : - ไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากตัวอย่างไม้เพียงพอ



ภาพที่ 16 กราฟแสดงอายุของไม้ และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันที่มีผลต่อความหนาแน่นของเส้นใยของไม้ต้นเปิด

อัตราส่วนของชนิดเซลล์ของไม้ดินเปิด

การศึกษาอัตราส่วนของชนิดเซลล์ของไม้ดินเปิด ประกอบด้วยอัตราส่วนของเส้นใย อัตราส่วนของเวสเซลล์ อัตราส่วนของเรย์พาราเนไคมา และอัตราส่วนของพาราเนไคมาตามยาว ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 11 - 15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติได้แสดงไว้ในตารางผนวกที่ 6 - 9 และภาพที่ 17 - 25 เป็นกราฟแสดงอายุของเนื้อไม้ ตำแหน่งต่างๆ ภายในต้นเดียวกัน และต่างต้นกัน ที่มีผลต่ออัตราส่วนของชนิดเซลล์ต่างๆ

อัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิด

จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ ที่มีผลต่ออัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิดด้วยการนับ dot grid ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และ 12 และภาพที่ 17 และ 18 พบว่า ไม้ดินเปิดมีอัตราส่วนของเส้นใยมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของชนิดเซลล์อื่น ๆ โดยไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีอัตราส่วนของเส้นใยเฉลี่ยเท่ากับ 52.22, 52.01 และ 46.29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งพบได้ในไม้ใบกว้างทั่วไปที่มีอัตราส่วนของเส้นใยประมาณ 15 - 60 เปอร์เซ็นต์ (Bowyer *et al.*, 2003) จากการศึกษาของรุ่งฤดี (ม.ป.ป.) ที่ทดลองหาอัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิดในส่วนของกิ่งตรงเนื้อไม้บริเวณใกล้เปลือกไม้ พบว่า มีอัตราส่วนของเส้นใยมากกว่าไม้ดินเปิดที่ได้จากการทดลอง โดยมีอัตราส่วนของเส้นใย 61.33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัส พบว่า อัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิดที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าไม้ *E. camaldulensis* อายุ 4 - 8 ปี ที่ศึกษาโดย Pisuttipished *et al.* (2003) และไม้ *E. globulus* อายุ 14 ปี ที่ศึกษาโดย Ona *et al.* (2001) ที่มีอัตราส่วนของเส้นใย 51.20 - 57.60 และ 67.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าไม้ดินเปิดอายุ 9 ปี มีอัตราส่วนของเส้นใยใกล้เคียงกับ ไม้ *E. camaldulensis* อายุ 14 ปี ที่ศึกษาโดย Ona *et al.* (2001) ที่มีอัตราส่วนของเส้นใย 49.40 เปอร์เซ็นต์ และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 6 พบว่า อายุของไม้ไม่มีผลต่ออัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิด ($P > 0.05$)

จากการศึกษาอิทธิพลของไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน ที่มีผลต่ออัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และ 12 และภาพที่ 19 พบว่า อัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิดต้นที่ 1 และ 2 ที่อายุของไม้ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.10 46.34, 54.76 49.27, 41.06 และ 51.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าไม้ดินเปิดต่างต้นกันที่อายุเดียวกันมีอัตราส่วนของเส้นใยที่ผันแปรมาก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 6 ที่พบว่า ไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกันมีผลต่ออัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$) เมื่อ

เปรียบเทียบกับอัตราส่วนของเส้นใยของไม้ *E. camaldulensis* และไม้ *E. globulus* อายุ 14 ปี พบว่า ไม้ทั้งสองชนิดมีความผันแปรของอัตราส่วนของเส้นใยน้อยกว่า โดยไม้ต้นที่ 1 และ 2 ของไม้ทั้งสองชนิดมีอัตราส่วนของเส้นใยเท่ากับ 48.50 50.60 และ 67.20 66.80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

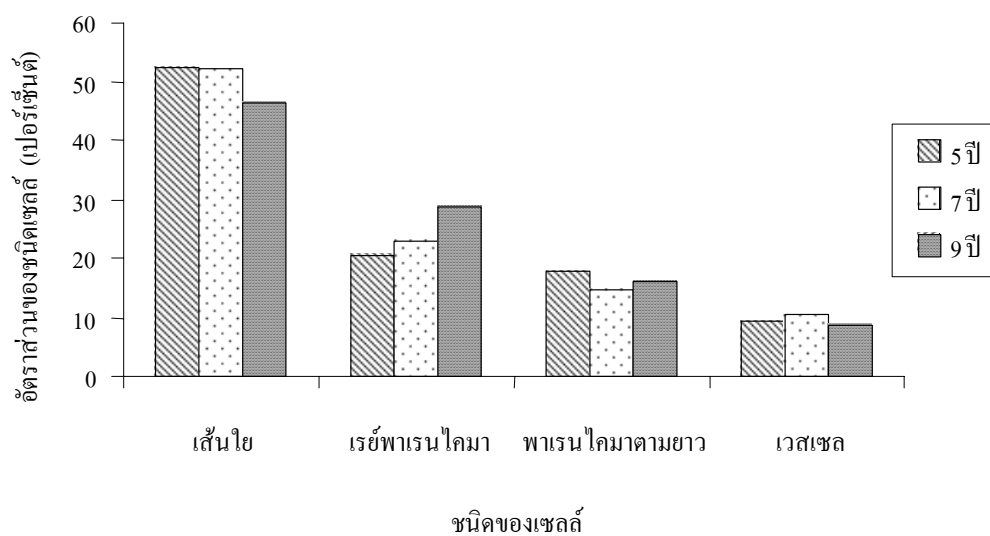
จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกัน ที่มีผลต่ออัตราส่วนของเส้นใย ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 12 และภาพที่ 19 พบว่า อัตราส่วนของเส้นใยมีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากใจไม้ไปยังเปลือกไม้ โดยตำแหน่งเนื้อไม้ใกล้เปลือกไม้มีอัตราส่วนเส้นใยมากกว่าตำแหน่งอื่น ๆ และผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 6 พบว่า ตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันมีผลต่ออัตราส่วนของเส้นใยของไม้ต้นเปื้อดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

ตารางที่ 11 อัตราส่วนของชนิดเซลล์ต่าง ๆ ของไม้ต้นเปื้อดอายุ 5 7 และ 9 ปี

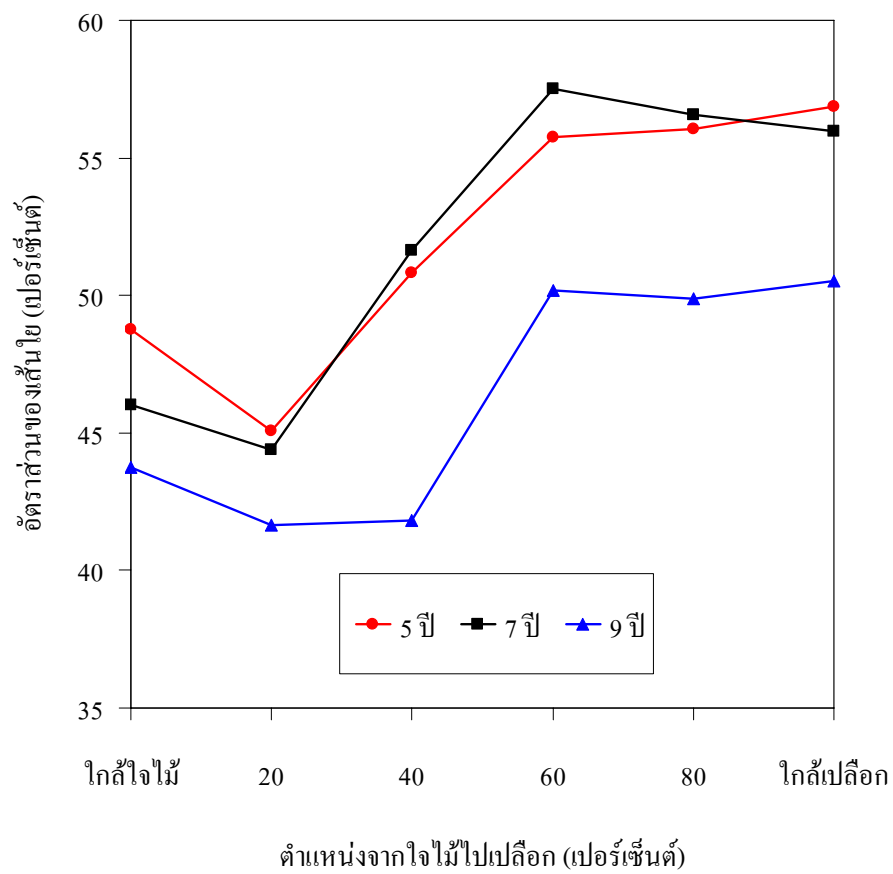
ชนิดของเซลล์ (เปอร์เซ็นต์)	5 ปี			7 ปี			9 ปี		
	ต้น 1	ต้น 2	เฉลี่ย	ต้น 1	ต้น 2	เฉลี่ย	ต้น 1	ต้น 2	เฉลี่ย
เส้นใย	58.10	46.34	52.22	54.76	49.27	52.01	41.06	51.52	46.29
เรย์พาร์เนไคมา	18.60	22.43	20.51	23.72	22.13	22.93	29.36	28.25	28.80
พาร์เนไคมาตามยาว	13.35	22.47	17.92	11.81	17.81	14.81	20.25	11.94	16.10
เวสเซล	9.96	8.79	9.37	9.73	10.98	10.35	9.33	8.31	8.82

ตารางที่ 12 อัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิดเฉลี่ยจากการนับด้วย dot grid

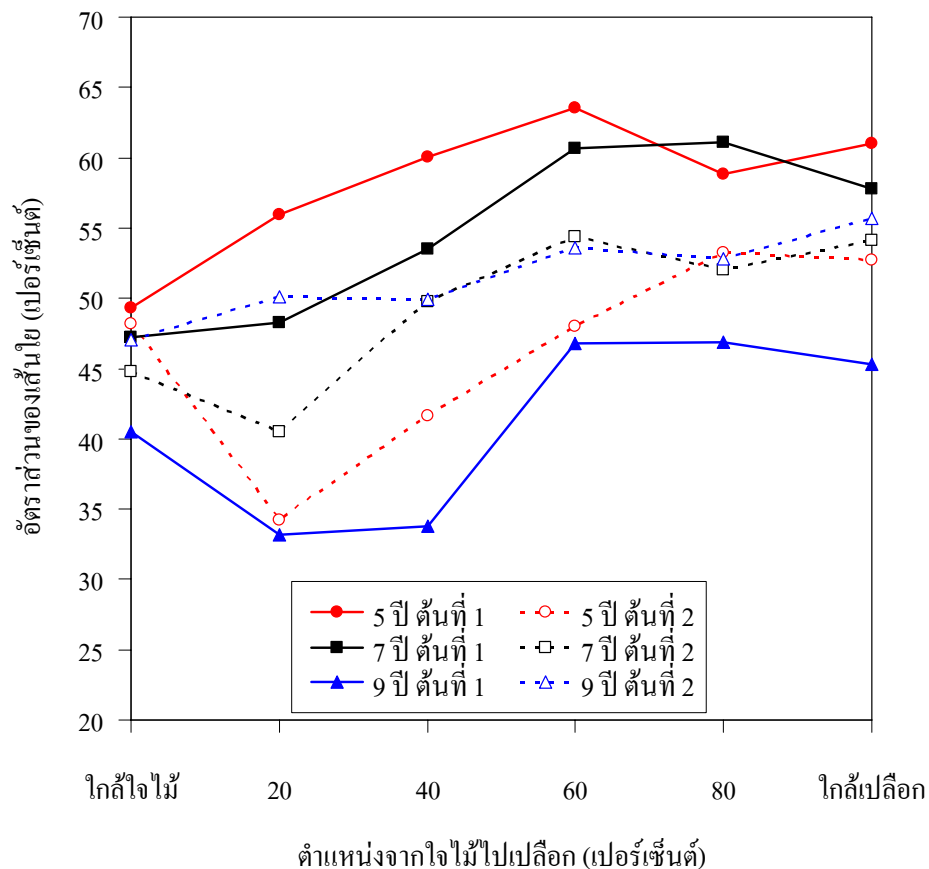
อายุ (ปี)	ต้นที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)						อัตราส่วนของเส้นใยเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)	
		ใกล้ใจไม้	20	40	60	80	ใกล้เปลือก		
5	1	49.29	55.91	60.02	63.55	58.85	60.98	58.10	52.22
	2	48.22	34.21	41.66	47.99	53.22	52.74	46.34	
7	1	47.26	48.29	53.47	60.66	61.09	57.78	54.76	52.01
	2	44.74	40.53	49.76	54.40	52.05	54.12	9.27	
9	1	40.47	33.18	33.75	46.78	46.88	45.31	41.06	46.29
	2	47.02	50.07	49.90	53.59	52.84	55.72	51.52	



ภาพที่ 17 กราฟแสดงอายุของไม้ และอัตราส่วนของชนิดเซลล์ของไม้ดินเปิด



ภาพที่ 18 กราฟแสดงอายุของไม้ที่มีผลต่ออัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิด



ภาพที่ 19 กราฟแสดงไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายใน
ต้นเดียวกันที่มีผลต่ออัตราส่วนของเส้นใยของไม้ดินเปิด

อัตราส่วนของเวสเซลของไม้ดินเปิด

จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ ที่มีผลต่ออัตราส่วนของเวสเซลของไม้ดินเปิดด้วยการนับ dot grid ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และ 13 และภาพที่ 17 และ 20 พบว่า ไม้ดินเปิดมีอัตราส่วนของเวสเซลน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของชนิดเซลล์อื่น ๆ โดยไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีอัตราส่วนของเวสเซลเฉลี่ยเท่ากับ 9.37, 10.35 และ 8.82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของเวสเซลที่ศึกษาโดยรุ่งฤดี (ม.ป.ป.) ที่มีอัตราส่วนของเวสเซล 9.93 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ *E. camaldulensis* และไม้ *E. globulus* อายุ 14 ปี ที่ศึกษาโดย Ona et al. (2001) กับไม้ *E. camaldulensis* อายุ 4 - 8 ปี ที่ศึกษาโดย Pisuttipished et al. (2003) ที่พบว่าอัตราส่วนของเวสเซล 15.90, 11.40 และ 15.40 - 21.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

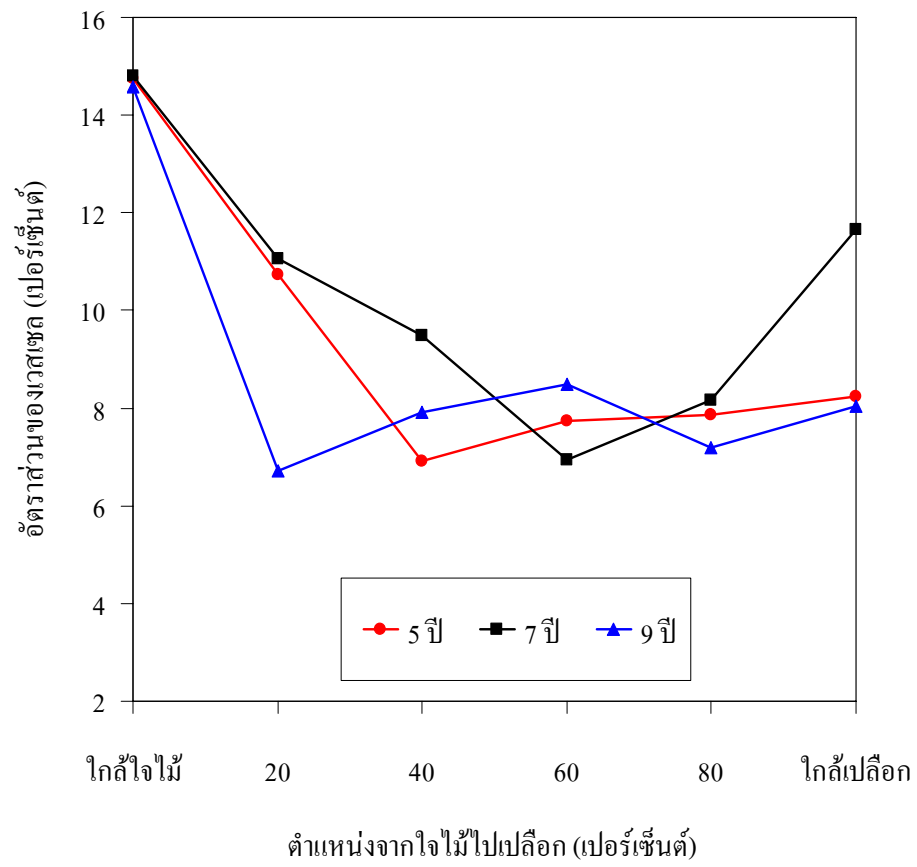
และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 7 พบว่า อายุของไม้ไม่มีผลต่ออัตราส่วนของเวสเซลของ ไม้ดินเปิด ($P > 0.05$)

จากการศึกษาอิทธิพลของไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน ที่มีผลต่ออัตราส่วนของเวสเซลของ ไม้ดินเปิดได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และ 13 และภาพที่ 21 พบว่า อัตราส่วนของเวสเซลของไม้ ดินเปิดต้นที่ 1 และ 2 ที่อายุของไม้ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.96 8.79, 9.73 10.98, 9.33 และ 8.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าไม้ดินเปิดต่างต้นที่อายุเดียวกันมีอัตราส่วนของเวสเซลที่ผัน แปรไม่มากนัก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 7 ที่พบว่าไม้ต่างต้นกันที่ อายุเดียวกันไม่มีผลต่ออัตราส่วนของเวสเซลของไม้ดินเปิด ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ อัตราส่วนของเวสเซลของไม้ *E. camaldulensis* และไม้ *E. globulus* อายุ 14 ปี พบว่า ไม้ทั้งสอง ชนิดมีอัตราส่วนของเวสเซลที่ผันแปรเหมือนกันเช่นเดียวกัน โดยไม้ต้นที่ 1 และ 2 ของไม้ทั้งสอง ชนิดมีอัตราส่วนของเวสเซลเท่ากับ 17.90 13.60 และ 11.00 12.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

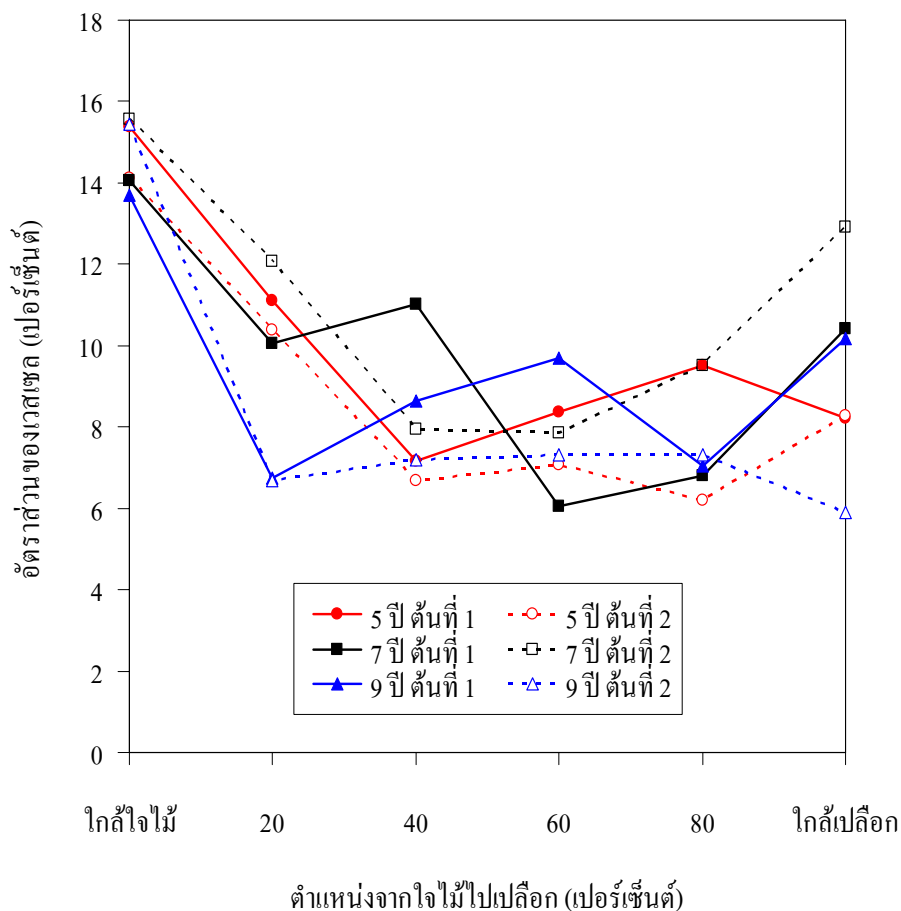
จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกัน ที่มีผลต่อ อัตราส่วนของเวสเซลของไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 13 และภาพที่ 21 พบว่า อัตราส่วน ของเวสเซลมีลักษณะลดลงเมื่อห่างจากใจไม้ จากนั้นอัตราส่วนของเวสเซลจะเริ่มคงที่ ซึ่งมี แนวโน้มเช่นเดียวกับไม้ดินเปิดที่ศึกษาโดยวรรณกรรม และคณะ (2546) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติใน ตารางผนวกที่ 7 พบว่า ตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันมีผลต่ออัตราส่วนของเวสเซลของไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

ตารางที่ 13 อัตราส่วนของเวสเซลของไม้ดินเปิดเฉลี่ยจากการนับด้วย dot grid

อายุ (ปี)	ต้นที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)					อัตราส่วนของเวสเซลเฉลี่ย		
		ใกล้ใจไม้	20	40	60	80	ใกล้เปลือก	(เปอร์เซ็นต์)	
5	1	15.38	11.10	7.15	8.38	9.52	8.23	9.96	9.37
	2	14.12	10.38	6.68	7.08	6.19	8.27	8.79	
7	1	14.05	10.06	11.01	6.04	6.79	10.40	9.73	10.35
	2	15.57	12.06	7.95	7.85	9.52	12.90	10.98	
9	1	13.70	6.74	8.64	9.69	7.05	10.18	9.33	8.82
	2	15.45	6.67	7.20	7.30	7.31	5.91	8.31	



ภาพที่ 20 กราฟแสดงอายุของไม้ที่มีผลต่ออัตราส่วนของเวสเซลของไม้ต้นเปิด



ภาพที่ 21 กราฟแสดงไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายใน
 ต้นเดียวกันที่มีผลต่ออัตราส่วนของเวสเซลของไม้ดินเปิด

อัตราส่วนของเรย์พาร์นโคมาของไม้ดินเปิด

จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ ที่มีผลต่ออัตราส่วนของเรย์พาร์นโคมาของไม้ดินเปิด ด้วยการนับ dot grid ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และ 14 และภาพที่ 17 และ 22 พบว่า ไม้ดินเปิด มีอัตราส่วนของเรย์พาร์นโคมาลดลงมาจากอัตราส่วนของเส้นใย โดยไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีอัตราส่วนของเรย์พาร์นโคมาเฉลี่ยเท่ากับ 20.51, 22.93 และ 28.80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถพบได้ในไม้ใบกว้างทั่วไปที่มีอัตราส่วนของเรย์พาร์นโคมา 5 - 30 เปอร์เซ็นต์ (Bowyer *et al.*, 2003) และจากการศึกษาของรุ่งฤดี (ม.ป.ป.) พบว่า ไม้ดินเปิดมีอัตราส่วนของเรย์พาร์นโคมาเท่ากับ 17.01 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าอัตราส่วนของเรย์พาร์นโคมาของไม้ดินเปิดที่ได้จากการ

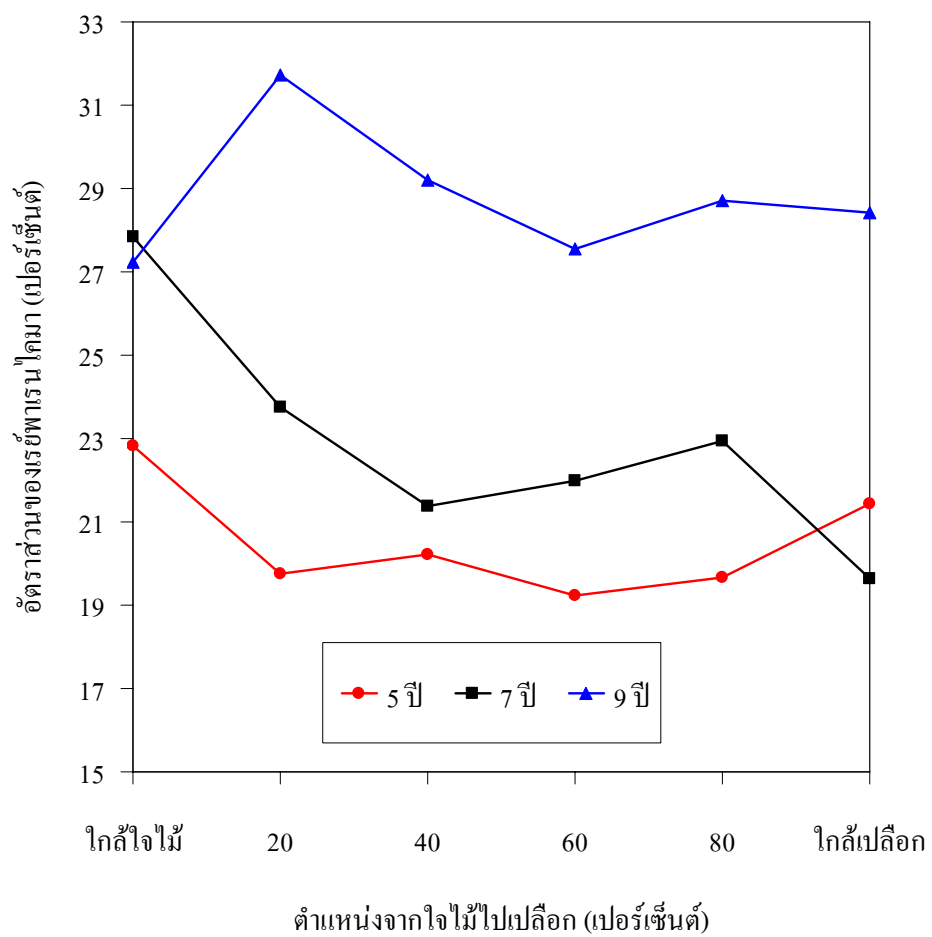
ทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัส พบว่า ไม้ดินเปิดที่ได้จากการทดลอง มีอัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมาใกล้เคียงกับไม้ *E. camaldulensis* อายุ 14 ปี และมีอัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมา มากกว่าไม้ *E. globulus* อายุ 14 ปี ที่ศึกษาโดย Ona *et al.* (2001) ที่มีอัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมา เท่ากับ 20.60 และ 15.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 8 พบว่า อายุของไม้มีผลต่ออัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมาของไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

จากการศึกษาอิทธิพลของไม้ต่างต้นกัน ที่อายุเดียวกันที่มีผลต่ออัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมา ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และ 14 และภาพที่ 23 พบว่า อัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมาของไม้ดินเปิดต้นที่ 1 และ 2 ที่อายุของไม้ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.60 22.43, 23.72 22.13, 29.36 และ 28.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าอัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมาของไม้ดินเปิดต่างต้นกันที่อายุเดียวกันมีความผันแปรไม่มากนัก เช่นเดียวกับไม้ *E. camaldulensis* และไม้ *E. globulus* อายุ 14 ปี ที่ศึกษาโดย Ona *et al.* (2001) โดยไม้ต้นที่ 1 และ 2 ของไม้ทั้งสองชนิดมีอัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมาเท่ากับ 19.60 21.80 และ 16.00 14.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 8 ที่พบว่าไม้ดินเปิดต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน ไม่มีผลต่ออัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมา ($P > 0.05$)

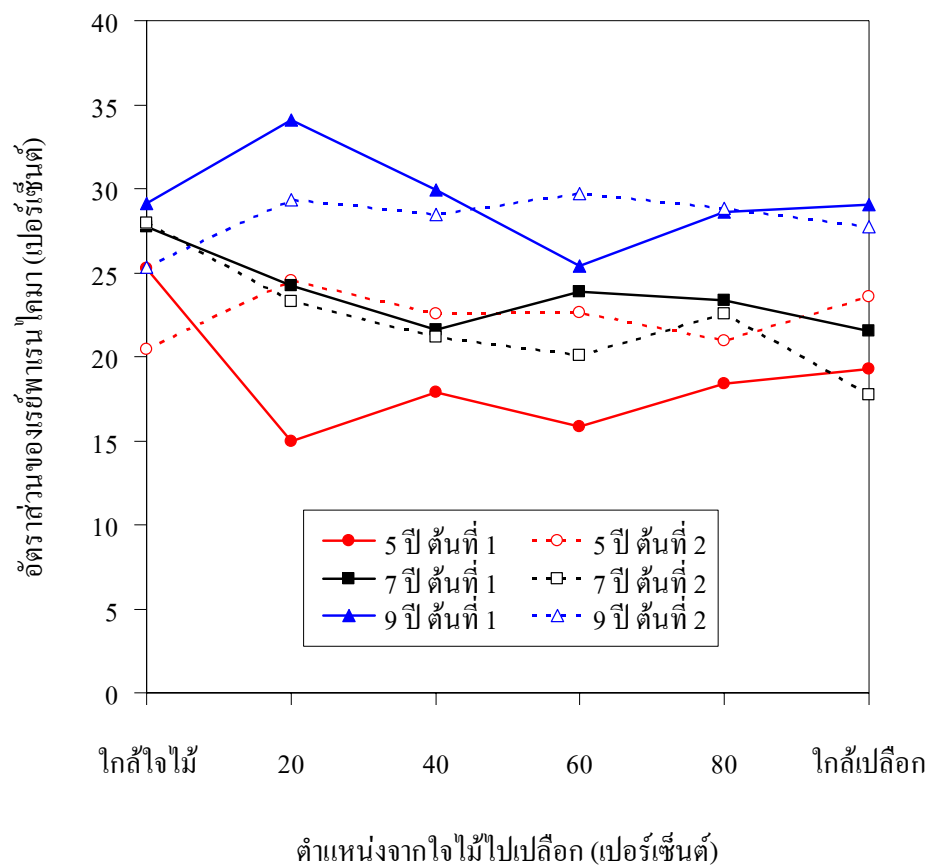
จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกัน ที่มีผลต่ออัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมาของไม้ดินเปิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 14 และภาพที่ 23 พบว่า อัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมามีลักษณะลดลงเมื่อห่างจากใจไม้ออกไป จากนั้นอัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมาจะเริ่มคงที่ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับไม้ sweetgum ที่ศึกษาโดย Ezell (1979) และไม้ *E. camaldulensis* ที่ศึกษาโดย Pisuttipished *et al.* (2003) รวมถึงไม้ดินเปิดที่ศึกษาโดย วรธรรม และคณะ (2546) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 8 พบว่า ตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันมีผลต่ออัตราส่วนของเรย์พาร์เนโคมาของไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

ตารางที่ 14 อัตราส่วนของเรย์พาร์นไคมาของไม้ดินเป็ดเฉลี่ยจากการนับด้วย dot grid

อายุ (ปี)	ต้นที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)						อัตราส่วนของเรย์พาร์นไคมาเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)	
		ใกล้ใจไม้	20	40	60	80	ใกล้เปลือก		
5	1	25.22	14.95	17.90	15.82	18.40	19.29	18.60	20.51
	2	20.42	24.53	22.52	22.61	20.92	23.58	22.43	
7	1	27.76	24.22	21.58	23.89	23.35	21.52	23.72	22.93
	2	27.93	23.30	21.17	20.06	22.55	17.77	22.13	
9	1	29.09	34.10	29.90	25.40	28.59	29.07	29.36	28.80
	2	25.36	29.34	28.48	29.70	28.85	27.74	28.25	



ภาพที่ 22 กราฟแสดงอายุของไม้ที่มีผลต่ออัตราส่วนของแร่ฟอสฟอรัสของไม้ดินเปิด



ภาพที่ 23 กราฟแสดงไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายใน
ต้นเดียวกันที่มีผลต่ออัตราส่วนของเรย์พารนโคมาของไม้ดินเปิด

อัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวของไม้ดินเปิด

จากการศึกษาอิทธิพลของอายุไม้ ที่มีผลต่ออัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวของไม้
ดินเปิดด้วยการนับ dot grid ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และ 15 และภาพที่ 17 และ 24 พบว่า ไม้
ดินเปิดมีอัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวมากเป็นอันดับสามรองจากอัตราส่วนของเส้นใยและเรย์
พารนโคมา โดยอายุของไม้ 5 7 และ 9 ปี มีอัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวเฉลี่ยเท่ากับ 17.92,
14.81 และ 16.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถพบได้ในไม้ใบกว้างทั่วไป ที่มีอัตราส่วนของ
พารนโคมาตามยาว 0 - 24 เปอร์เซ็นต์ (Bowyer *et al.*, 2003) และมีอัตราส่วนของพารนโคมา
ตามยาวมากกว่าไม้ดินเปิดที่ได้จากการศึกษาของรุ่งฤดี (ม.ป.ป.) ที่มีอัตราส่วนของพารนโคมา
ตามยาว 11.73 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัส พบว่าไม้ดินเปิดมีอัตราส่วนของพารน
โคมาตามยาวใกล้เคียงกับไม้ *E. camaldulensis* อายุ 14 ปี และมีอัตราส่วนของพารนโคมาตามยาว

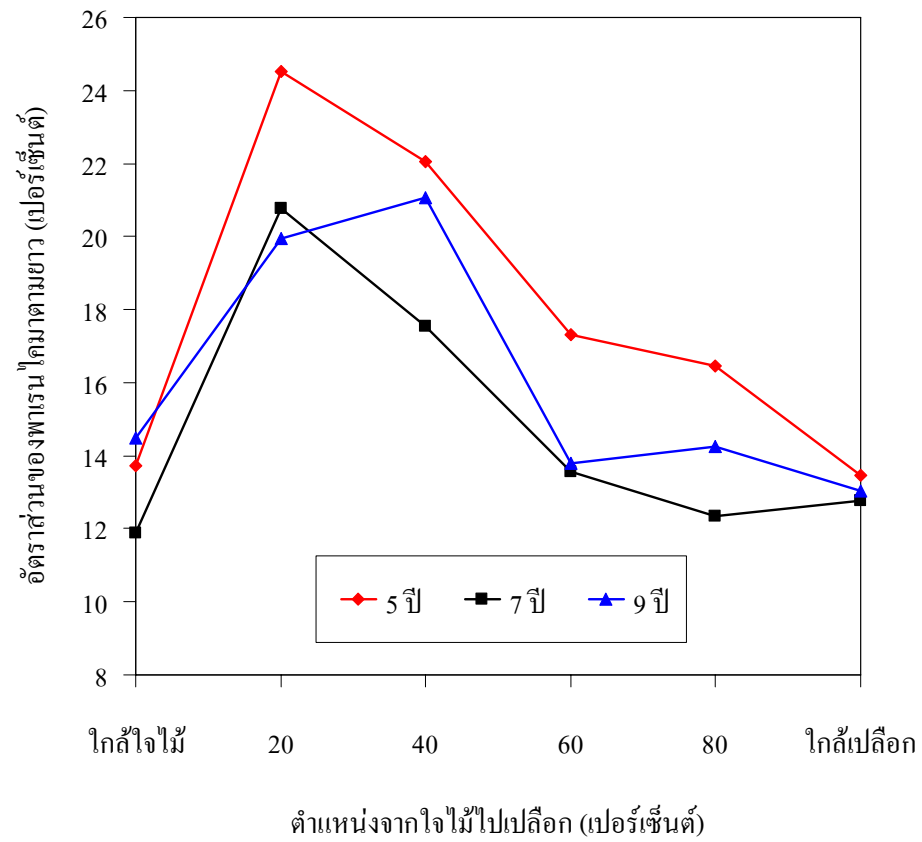
สูงกว่าไม้ *E. globulus* อายุ 14 ปี มาก โดยไม้ *E. camaldulensis* และไม้ *E. globulus* ที่ศึกษาโดย Ona *et al.* (2001) มีอัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวเท่ากับ 14.10 และ 6.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 9 พบว่า อายุของไม้ไม่มีผลต่ออัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวของไม้ดินเปิด ($P > 0.05$)

จากการศึกษาอิทธิพลของไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน ที่มีผลต่ออัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวได้ผลดังแสดงในตารางที่ 11 และ 15 และภาพที่ 25 พบว่า อัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวของไม้ดินเปิดต้นที่ 1 และ 2 ที่อายุของไม้ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.35 22.49, 11.81 17.81, 20.25 และ 11.94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าไม้ดินเปิดต่างต้นที่อายุเดียวกันมีอัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวที่ผันแปรมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 9 พบว่า ไม้ดินเปิดต่างต้นที่อายุเดียวกันมีผลต่ออัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$) ในขณะที่ไม้ต้นที่ 1 และ 2 ของไม้ *E. camaldulensis* และไม้ *E. globulus* อายุ 14 ปี มีอัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวไม่ผันแปรมากนัก คือมีค่าเท่ากับ 14.10 14.10 และ 5.80 6.80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

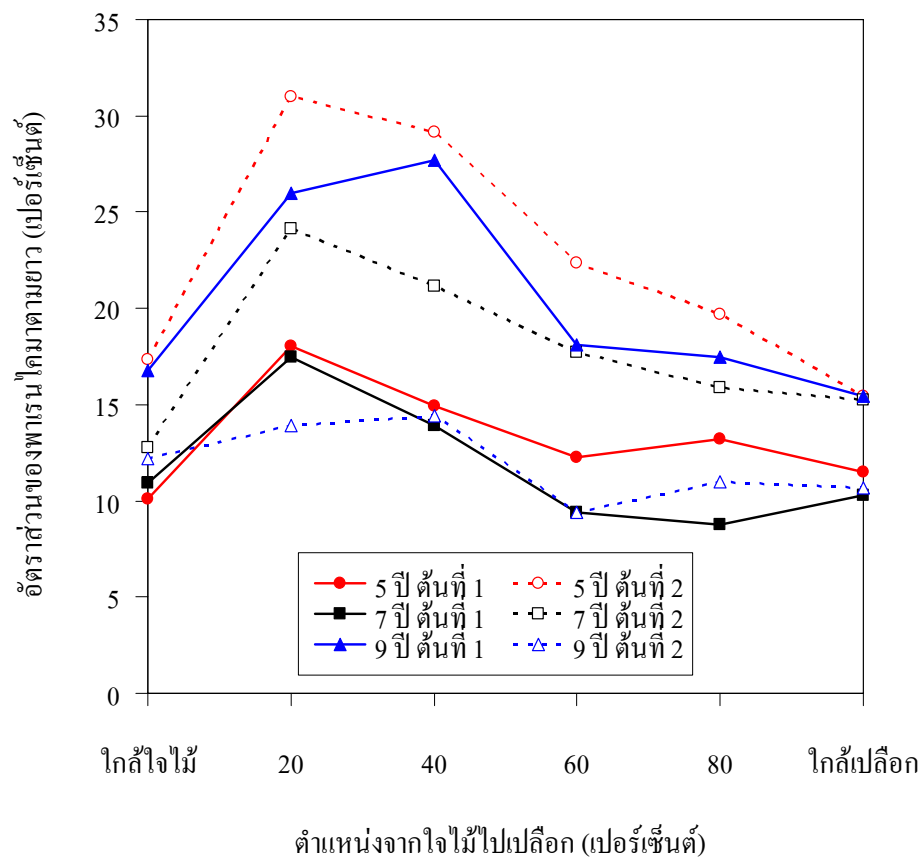
จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกัน ที่มีผลต่ออัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวได้ผลดังแสดงในตารางที่ 15 และภาพที่ 25 พบว่า อัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวมีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อห่างจากใจไม้ออกไป และผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ 9 พบว่า ตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายในต้นเดียวกันมีผลต่ออัตราส่วนของพารนโคมาตามยาวของไม้ดินเปิดอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$)

ตารางที่ 15 อัตราส่วนของพาเรนไคมาตามยาวของไม้ดินเบ็ดเฉลี่ยจากการนับด้วย dot grid

อายุ (ปี)	ต้นที่	ตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์)						อัตราส่วนของพาเรนไค- มาตามยาวเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)	
		ใกล้ใจไม้	20	40	60	80	ใกล้เปลือก		
5	1	10.11	18.05	14.93	12.26	13.24	11.51	13.35	17.92
	2	17.37	30.99	29.15	22.33	19.69	15.43	22.49	
7	1	10.95	17.44	13.94	9.41	8.79	10.30	11.81	14.81
	2	12.79	24.12	21.13	17.70	15.89	15.22	17.81	
9	1	16.75	25.98	27.71	18.13	17.50	15.45	20.25	16.10
	2	12.18	13.93	14.43	9.42	11.01	10.65	11.94	



ภาพที่ 24 กราฟแสดงอายุของไม้ที่มีผลต่ออัตราส่วนของพารนไคมาตามยาวของไม้ดินเปิด



ภาพที่ 25 กราฟแสดงไม้ต่างต้นกันที่อายุเดียวกัน และตำแหน่งจากใจไม้ไปเปลือกไม้ภายใน
ต้นเดียวกันที่มีผลต่ออัตราส่วนของพารนไคมาตามยาวของไม้ดินเปิด

ความเหมาะสมในการทำเยื่อกระดาษของไม้ดินเปิด

ลักษณะเส้นใยของไม้ดินเปิดมีขนาดความยาวตั้งแต่ 1.26 - 1.33 มิลลิเมตร มีความกว้างของเส้นใย 29.51 - 30.64 ไมครอน ความกว้างของลูเมน 24.33 - 26.90 ไมครอน และความหนาของผนังเส้นใย 3.74 - 5.19 ไมครอน เมื่อนำมาใช้พิจารณาถึงค่าความเหมาะสมในการผลิตเยื่อกระดาษ (ตารางที่ 16) ได้ผลสรุปดังนี้

1. ค่า Runkel ratio ของไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเท่ากับ 0.28, 0.39 และ 0.43 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า เยื่อจากไม้ดินเปิดสามารถใช้ทำเยื่อกระดาษได้ดี เนื่องจากมีความหนาของผนังเส้นใยบาง และความกว้างของลูเมนมาก ทำให้เส้นใยสามารถยุบตัวลงและเกิดการยึดเหนี่ยวของเส้นใย ซึ่งน่าจะมีแนวโน้มที่เส้นใยจะแนบสนิทกันดีเมื่อใช้ทำเยื่อกระดาษ

2. ค่า Flexibility coefficient ของไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเท่ากับ 0.88, 0.84 และ 0.82 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.5 แสดงว่าไม้ดินเปิด จะให้เยื่อกระดาษที่มีความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดันทะลุ และความทนทานต่อการหักพับสูง เนื่องจากมีความกว้างของลูเมนมาก และความกว้างของเส้นใยน้อย ทำให้เส้นใยมีผนังบาง และสามารถยุบตัวลงและเกิดการยึดเหนี่ยวของเส้นใย ทำให้เยื่อกระดาษมีความแข็งแรง

3. ค่า Slenderness ratio ของไม้ดินเปิดอายุ 5 7 และ 9 ปี มีค่าเท่ากับ 43.25, 42.22 และ 43.44 มีค่าน้อยกว่า 75 ซึ่งค่านี้นี้ควรจะมากกว่า 75 ขึ้นไป แสดงว่าไม้ดินเปิดจะให้เยื่อกระดาษที่มีความต้านทานต่อแรงฉีกขาดต่ำ

ตารางที่ 16 ค่าความเหมาะสม (derived value) ในการผลิตเยื่อกระดาษของไม้ดินเปิด

Derived value	5 ปี	7 ปี	9 ปี
Runkel ratio	0.28	0.39	0.43
Flexibility coefficient	0.88	0.84	0.82
Slenderness ratio	43.25	42.22	43.44

การวิเคราะห์หาสหสัมพันธ์ของตัวแปรทุกลักษณะ

ตารางที่ 17 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's coefficients) ของตัวแปรทุกลักษณะ ได้ผลดังนี้

1. ความหนาแน่นของเนื้อไม้ และความยาวของเส้นใยของไม้ดินเปิด มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2. ความกว้างของเส้นใย มีความสัมพันธ์กับความกว้างของลูเมน และอัตราส่วนของพาเรนไคมาตามยาวอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยความกว้างของเส้นใย มีความสัมพันธ์กับความกว้างของลูเมนมาก (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน เท่ากับ 0.882) และมีความสัมพันธ์รองลงมากับอัตราส่วนของพาเรนไคมาตามยาวแต่ไม่มากนัก (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน เท่ากับ -0.365)

3. ความกว้างของลูเมน มีความสัมพันธ์กับความกว้างของเส้นใย และอัตราส่วนของพาเรนไคมาตามยาวอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของเรย์พาเรนไคมาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยความกว้างของลูเมน มีความสัมพันธ์กับความกว้างของเส้นใยมก (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน เท่ากับ 0.882) และมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของเรย์พาเรนไคมา และอัตราส่วนของพาเรนไคมาตามยาวค่อนข้างน้อย (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน เท่ากับ 0.238 และ -0.365 ตามลำดับ)

4. ความหนาของผนังเส้นใย มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของเวสเซลอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของเรย์พาเรนไคมาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยความหนาของผนังเส้นใย มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของเวสเซลและอัตราส่วนของเรย์พาเรนไคมาไม่มากนัก (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน เท่ากับ 0.462 และ -0.243 ตามลำดับ)

5. อัตราส่วนของเส้นใย มีความสัมพันธ์ค่อนข้างมากกับอัตราส่วนของพาเรนไคมาตามยาว อัตราส่วนของเวสเซล และอัตราส่วนของเรย์พาเรนไคมาอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน เท่ากับ -0.659, -0.583 และ -0.5263 ตามลำดับ)

6. อัตราส่วนของเวสเซล มีความสัมพันธ์ค่อนข้างมากกับความหนาของผนังเส้นใย และอัตราส่วนของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน เท่ากับ 0.462 และ -0.583 ตามลำดับ)

7. อัตราส่วนของพารินไคมาตามยาว มีความสัมพันธ์ค่อนข้างมากกับอัตราส่วนของเส้นใย และมีความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อยกับความกว้างของเส้นใย และความกว้างของลูเมนอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน เท่ากับ -0.659, -0.365 และ -0.318 ตามลำดับ)

การวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบความแปรปรวนของตัวแปรทุกลักษณะ

ค่าองค์ประกอบความแปรปรวนที่ได้ มีประโยชน์ต่อการกำหนดขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม กล่าวคือ จะทำให้ทราบว่าควรใช้จำนวนชั้นอายุของเนื้อไม้ จำนวนต้นต่อชั้นอายุของเนื้อไม้ จำนวนตำแหน่งต่อต้น และจำนวนตัวอย่างต่อตำแหน่งเท่าไร จึงจะทำให้ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยมีค่าต่ำที่สุด โดยผลการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบความแปรปรวน (Variance component) ของตัวแปรทุกลักษณะ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 18 ดังต่อไปนี้

1. การหาความหนาแน่นของเนื้อไม้ ความหนาของผนังเส้นใย และอัตราส่วนของเรย์พารินไคมาควรเพิ่มจำนวนชั้นอายุให้มากขึ้น เนื่องจากมีค่าองค์ประกอบความแปรปรวนสูง คิดเป็น 57.53, 53.90 และ 59.26 เปอร์เซ็นต์ ของค่าองค์ประกอบความแปรปรวนทั้งหมด ตามลำดับ อีกทั้งไม้ที่นำมาทดลองนี้ โดยธรรมชาติแล้วมีความผันแปรในส่วนของอายุของเนื้อไม้มาก

2. การหาความกว้างของเส้นใย อัตราส่วนของเส้นใย และอัตราส่วนของพารินไคมาตามยาว ควรเพิ่มจำนวนต้นต่อชั้นอายุของไม้ให้มากขึ้น เนื่องจากมีค่าองค์ประกอบความแปรปรวนค่อนข้างสูง คิดเป็น 41.91, 50.39 และ 58.06 เปอร์เซ็นต์ ของค่าองค์ประกอบความแปรปรวนทั้งหมด ตามลำดับ โดยไม้ที่ใช้ทดลองในแต่ละต้นในชั้นอายุเดียวกันนั้นมีความผันแปรมาก

3. การหาความยาวของเส้นใย และอัตราส่วนของเวสเซล ควรเพิ่มจำนวนตำแหน่งต่อต้นให้มากขึ้น เนื่องจากมีค่าองค์ประกอบความแปรปรวนสูง คิดเป็น 57.57 และ 61.78 เปอร์เซ็นต์ ของค่าองค์ประกอบความแปรปรวนทั้งหมด ตามลำดับ โดยไม้ที่ใช้ทดลองมีความผันแปรของแต่ละตำแหน่งในต้นเดียวกันและในอายุเดียวกันสูง

