

คอมโพสิตไม้พอลิเมอร์จากไม้พญาสัตบรรณ
และพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวิธีไม่ใช้ความดัน

WOOD-POLYMER COMPOSITES FROM WHITE CHEESEWOOD
AND POLY (METHYL METHACRYLATE) BY NON-PRESSURE TREATMENT

อลงกรณ์ ศิลปชำนาญ

ALONGKORN SILAPACHAMNAN

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1318-0

คอมโพสิตไม้พอลิเมอร์จากไม้พญาสัตบรรณ
และพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวิธีไม่ใช้ความดัน

WOOD-POLYMER COMPOSITIES FROM WHITE CHEESEWOOD
AND POLY(METHYL METHACRYLATE) BY NON-PRESSURE TREATMENT

อลงกรณ์ ศิลปชำนาญ
ALONGKORN SILAPACHAMNAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1318-6

WOOD-POLYMER COMPOSITIES FROM WHITE CHEESEWOOD
AND POLY(METHYL METHACRYLATE) BY NON-PRESSURE TREATMENT

ALONGKORN SILAPACHAMNAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-15-1318-6

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์

คอมโพสิตไม้พอลิเมอร์จากไม้พญาสัตบรรณ และ
พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวิธีไม่ใช้ความดัน

นักศึกษา

นายอลงกรณ์ ศิลปชำนาญ

รหัสประจำตัว

44065613

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

พ.ศ.

2547

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

นายวรธรรม ชุ่มจิตติชัย

บทคัดย่อ

ไม้พญาสัตบรรณ (*Alstonia scholaris* R. Br.) หรือไม้ตีนเป็ด เป็นไม้ที่มีการส่งเสริมให้มีการปลูกเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากไม้พญาสัตบรรณเป็นไม้ที่มีเนื้ออ่อนสีสวยงาม สามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็วเหมาะสมในการนำไปใช้ทดแทนไม้ชนิดอื่น รวมทั้งมีประโยชน์ในการนำมาผลิตเครื่องใช้ต่างๆ แต่ไม้ชนิดนี้มีข้อเสียคือ มีความทนทานต่อเชื้อราต่ำทำให้มีสีไม่สวย ผุง่าย และยังมีความแข็งแรงต่ำ งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์จากไม้พญาสัตบรรณและเมทิลเมทาคริเลตเพื่อปรับปรุงคุณภาพและสมบัติให้ดีขึ้น โดยเชื่อมซบเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์เข้าในไม้โดยไม่ใช้ความดัน แล้วทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันให้เป็นพอลิเมอร์อยู่ในโครงสร้างไม้ตัวอย่างไม้ถูกเชื่อมซบมอนอเมอร์เป็นเวลา 1 3 5 7 24 30 และ 48 ชั่วโมง เพื่อหาเวลาที่มอนอเมอร์เข้าไปอยู่ในไม้ได้สูงสุด จากนั้นนำไม้ที่ได้มาแช่ในตัวริเริ่มปฏิกิริยาของสารละลายเบนโซิลเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนักเป็นเวลา 5 วัน นำไม้ที่ได้มาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยใช้ตู้อบความร้อน ที่อุณหภูมิ 90 120 และ 150 °C เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง คอมโพสิตไม้พอลิเมอร์ที่เตรียมได้นำไปศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา และหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ในเนื้อไม้

ผลการวิจัยพบว่า ไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาดเล็กมีการเชื่อมซบมอนอเมอร์ได้ดีกว่าไม้ขนาดใหญ่ และทิศทางการเชื่อมซบในแนวตั้งให้ค่าปริมาณมอนอเมอร์ในเนื้อไม้สูงกว่าในทิศแนวนอนเล็กน้อย น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการพอลิเมอไรเซชัน น้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนักที่ได้มีค่าอยู่ช่วง 99,000 – 120,000 กรัมต่อโมล สมบัติทางกายภาพของคอมโพสิต ได้แก่ ความหนาแน่นอบแห้ง และเสถียรภาพทางรูปร่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการรวมตัวเชิงปริมาตรและการดูดซึมน้ำของคอมโพสิตต่ำกว่าไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุง ความทนทานต่อการสลายตัวทางความร้อนของคอมโพสิตในส่วน

วัสดุภาคไม้พญาสัตบรรณ มีแนวโน้มของอุณหภูมิสลายตัวเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตทุกค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากสถานการณ์วิทยาพบว่า ไม้พญาสัตบรรณมีโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมากเมื่อปรับปรุงสมบัติแล้วจะพบส่วนของวัสดุภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลต มีการกระจายตัวอยู่ในช่องว่างของเซลล์อย่างไม่ต่อเนื่อง การกระจายตัวของความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ในไม้มีแนวโน้มลดลงเมื่อความลึกและปริมาณความชื้นในไม้เพิ่มขึ้น โดยไม้ในด้านยาวมีค่าสูงกว่าในด้านรัศมีและด้านสัมผัสในทุกๆ ปริมาณความชื้นและเวลาในการแพร่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ของไม้ในด้านยาวมีค่าสูงกว่าในด้านรัศมีและด้านสัมผัสตามลำดับ

Thesis Title	Wood–Polymer Composites from White Cheesewood and Poly(methyl methacrylate) by Non-Pressure Treatment
Student	Mr. Alongkorn Silapachamnan
Student ID	44065613
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Ittipol Jangchud
Thesis Co-advisor	Mr. Woratham Oonjittichai

ABSTRACT

White cheesewood (*Alstonia scholaris* R. Br.) is an interesting tree in forestry and drawn much attention recently. It has been promoted to grow due to high growth rate and suitable for forestation. Due to its attractive color and low density, the wood has high potential to be used in wood production. However, it has some drawbacks including poor resistance to fungi and low stiffness. In this research work, wood-polymer composites (WPC) were studied for quality improvement of the wood. Methyl methacrylate (MMA) monomer was used as the monomer to polymerize in wood structures. First, wood samples were immersed into the MMA monomer for 1, 3, 5, 7, 24, 30, and 48 hours to find maximum monomer loading (% ML) time. The samples were left to soak in 0.5 % (w/w) solution of benzoyl peroxide initiator for 5 days. The monomer then was polymerized by placing the specimens in a hot oven at 90, 120, 150 °C for 1, 2, 3, and 4 hours. The wood-polymer composites were characterized for mechanical, physical, thermal and morphological properties. Diffusion coefficients of the monomer mixed an indicator were calculated.

It were found that %ML was increased as increasing the immersed time. Also %ML in the wood immersed in perpendicular direction was slightly higher than that immersed in parallel direction. From GPC result, it was revealed that molecular weight (about 99,000-120,000 g/mol) of PMMA extracted from the WPC increased with polymerization time. Physical properties of the WPC, such as oven-dry density and dimensional stability were improved with increasing %PL. It was found that rates of volumetric swelling and water absorption of WPC were lower than those of the untreated wood. By

studied thermal properties of the WPC, higher decomposition temperature of the wood phase was found. The higher the %PL, the higher the temperature. All of mechanical properties of the treated wood were surpassed those of the untreated one. By studied morphology using SEM, it was confirmed that white cheesewood is a highly porous material. By treating the wood, it was found that PMMA replaced vacancy in wood cell lumens. Indicator concentration decreased when wood thickness and moisture content were increased. Monomer immersion in longitudinal direction yielded higher concentration profile than radial and tangential directions in all moisture contents and times. Longitudinal diffusion coefficient was higher than radial and tangential diffusion coefficients.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยนี้บรรลุและสำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำและสิ่งสอนต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่ผู้จัดทำ ทั้งจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อธิพิณ แจ่มชัด ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจสอบแก้ไข เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณวราธรรม ชูนจิตติชัย นักวิชาการป่าไม้ 8ว. อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมในงานวิจัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ในงานวิจัย อีกทั้งให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างมาก และขอบคุณเจ้าหน้าที่ พนักงาน และลูกจ้างของสถานอุตสาหกรรมการผลิตทดแทนไม้และกาวติดไม้ สำนักวิจัยการจัดการป่าไม้และผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และจัดเตรียมไม้พญาสัตบรรณที่ใช้ในการทดลองให้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ท่านคณะกรรมการทุกท่าน อันประกอบด้วย ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรีชญาวารการ ผศ.ดร.ภัทธวูธ มนต์วิเศษ และ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ที่ให้คำชี้แนะและกรุณาตรวจทานแก้ไขงานวิจัยให้ถูกต้อง เพื่อความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบริษัท Pan Asia Industrials Co., Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์เมทิลเมทาคริลิตมอนอเมอร์ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือไมโครโทม (Microtome)

ขอขอบพระคุณ คุณครู อาจารย์ และผู้ชี้แนะแนวทางทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิทยาการวิชาความรู้อันนำมาซึ่งภูมิปัญญา ที่นำมาใช้วิเคราะห์และเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเป็นผลสำเร็จ

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี ที่คอยติดต่อประสานงาน ให้สำเร็จไปได้ด้วยดีทุกท่าน พี่ๆ ที่คอยเป็นที่ปรึกษาสำรอง และคอยสอนใช้เครื่องมือวิเคราะห์ และบุคคลอื่นๆ ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ทางผู้จัดทำขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณบิดรมารดา และบุพการีทุกท่าน ที่ให้กำลังทรัพย์และกำลังใจ ในการศึกษาเล่าเรียนตลอดมา “เป้าหมายยังอีกไกล ช้าหน่อยแต่ต้องไปให้ถึง”

อลงกรณ์ ศิลปชำนาญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัยและแรงจูงใจในการทำวิจัย.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการซึมซับและการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ (Impregnation and polymerization process).....	4
2.1.1 ลักษณะและโครงสร้างของไม้.....	4
2.1.2 ชนิดและความเข้มข้นของมอนอเมอร์.....	5
2.1.3 สภาวะในการทำให้เกิดการซึมซับ.....	7
2.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยกลไกปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ	10
2.2.1 ปฏิกิริยาการเติมด้วยอนุมูลอิสระ	11
2.2.2 มอนอเมอร์สำหรับพอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ.....	12
2.2.3 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ	12
2.3 ลักษณะโครงสร้างของไม้ (Wood anatomy).....	16
2.3.1 การเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์	18
2.3.2 ลักษณะของโครงสร้างไม้ที่มีต่อสมบัติของไม้	20
2.4 ไม้พญาสัตบรรณ หรือไม้ตีนเป็ด	22
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้พญาสัตบรรณ	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การใช้ประโยชน์และคุณภาพเนื้อไม้พญาสัตบรรณ	23
2.5 เสถียรภาพของรูปร่างในการใช้งานของไม้	24
2.5.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบ (Characterization)	25
2.6 การแพร่ในไม้ (Diffusion in wood)	33
2.6.1 การแพร่ของตัวถูกละลายเข้าสู่ไม้ที่อิมมัลชันด้วยตัวทำละลาย	34
2.6.2 การแพร่โดยอาศัยโครงสร้างที่เป็นช่องว่างภายในไม้.....	35
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3 วิธีการทดลอง.....	43
3.3.1 ตัวอย่างไม้.....	43
3.3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีต่อกระบวนการซึมซับมอนอเมอร์เข้าในเนื้อไม้.....	43
3.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีต่อกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์.....	44
3.3.4 ศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิผิวกับภายในเนื้อไม้ในการพอลิเมอ- ไรเซชัน.....	45
3.3.5 ศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค GPC.....	46
3.3.6 ศึกษาการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้.....	47
3.3.7 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล.....	51
3.3.7.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	51
3.3.7.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลบางประการ.....	53
3.3.8 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์.....	58
3.3.9 ศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์.....	58
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	59
4.1 ปัจจัยที่มีต่อกระบวนการซึมซับมอนอเมอร์เข้าในเนื้อไม้.....	59
4.2 ปัจจัยที่มีต่อกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้.....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค GPC.....	74
4.4 การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेटในไม้.....	76
4.4.1 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของอินดิเคเตอร์.....	77
4.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेटในไม้.....	82
4.5 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์.....	89
4.5.1 สมบัติทางกายภาพ.....	90
4.5.2 สมบัติเชิงกล.....	96
4.6 สัณฐานวิทยา (Morphology).	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	103
5.1.1 ปัจจัยที่มีต่อกระบวนการซึมซับมอนอเมอร์เข้าในเนื้อไม้.....	103
5.1.2 ปัจจัยที่มีต่อกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้.....	103
5.1.3 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์.....	104
5.1.4 การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेटในไม้.....	104
5.1.5 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์.....	104
5.1.6 สัณฐานวิทยา.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	105
เอกสารอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก. การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेटในเนื้อไม้.....	110
ภาคผนวก ข. TGA เทอร์โมกราฟีวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน.....	116
ภาคผนวก ค. สัณฐานวิทยาของไม้พญาสัตบรรณและคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	124

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงปัจจัยที่พิจารณาการเลือกชนิดของมอนอเมอร์และสมบัติของพอลิเมอร์.....	6
2.2 แสดงสมบัติบางประการของมอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมซัพ.....	6
2.3 แสดงสมบัติบางประการของมอนอเมอร์ผสม ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมซัพโดยใช้รังสีพลังงานสูงในการพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	7
2.4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของกระบวนการเชื่อมซัพแบบต่างๆ.....	9
2.5 แสดงตัวอย่างของมอนอเมอร์สำหรับพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ.....	12
2.6 แสดงตัวอย่างและชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา.....	13
2.7 แสดงขนาดขององค์ประกอบในส่วนต่างๆ ของโครงสร้างผนังเซลล์ของไม้ปลายฤดู.....	17
2.8 แสดงขนาดของเส้นใยในเนื้อไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกันและคุณสมบัติทางกายวิภาค.....	24
2.9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน.....	24
3.1 แสดงมาตรฐานการทดสอบไม้ ตามมาตรฐาน ISO.....	53
4.1 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุบางชนิด.....	70
4.2 แสดงค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยจำนวน (Mn) โดยน้ำหนัก (Mw) และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ของเมทิลเมทาคริเลตพอลิเมอร์ที่สกัดจากคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ.....	74
4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ที่สภาวะต่างๆ.....	84
4.4 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ด้วยการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก (TGA) อัตราให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min.....	94
ก.1 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่เวลาการแพร่ 2 วัน.....	111
ก.2 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่เวลาการแพร่ 4 วัน.....	112
ก.3 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่เวลาการแพร่ 6 วัน.....	113
ก.4 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่เวลาการแพร่ 8 วัน.....	114
ก.5 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่เวลาการแพร่ 10 วัน.....	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูป SEM แสดงลักษณะของพิตส่วนที่เป็นกระพี้ (Sapwood) และแก่น (Heartwood) ของไม้ <i>Pinus palustis</i>	5
2.2 แสดงเครื่องมือการซึ่มซั่มมอนอเมอร์ด้วยความดันอย่างง่าย	8
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความดันในกระบวนการซึ่มซั่มแบบต่างๆ.....	10
2.4 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการพอลิเมอไรเซชันมอนอเมอร์ด้วยรังสีพลังงานสูง.....	15
2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างของไม้ จากภาคตัดขวาง.....	16
2.6 แสดงการจัดเรียงตัวของเซลล์ลูโลส.....	17
2.7 แสดงลักษณะของพิต (Pit) แบบต่างๆ.....	19
2.8 แสดงลักษณะของทราคีดในส่วนที่เป็นไม้ต้นฤดู (Earlywood) และส่วนไม้ปลายฤดู (Latewood)	20
2.9 แสดงลักษณะการแตกหักของไม้เนื่องจากแรงดัดสถิตย.....	21
2.10 แสดงลักษณะลำต้น พูพอน และใบของต้นพญาสัตบรรณ.....	23
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงด้วยความร้อน เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพต่อรูปร่างให้มีการบวมตัวลดลง 10 25 และ 40 เปอร์เซ็นต์	29
2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์หมู่อะซิทธิล กับค่าการลดลงของการบวมตัว หรือการหดตัวของแผ่นไม้บางประกอบ (Veneer) ของไม้ ชนิดต่างๆ	30
2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันไอสัมพันธ์ กับค่าการลดลงของการบวมตัว หรือการหดตัวของไม้สน เมื่อใช้สารละลายน้ำตาลที่มีชนิด และความเข้มข้นต่างกัน	31
2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณเรซินในเนื้อไม้ กับค่าการลดลงของการบวมตัวหรือการหดตัวของไม้ Sitka spruce เมื่อใช้สารละลายฟีนอลฟอร์มอลดีไฮด์เรซิน และยูเรียฟอร์มอลดีไฮด์เรซิน ในการปรับปรุงสมบัติความมีเสถียรภาพทางรูปร่าง	32
3.1 แสดงการจัดวางไม้ในการซึ่มซั่มมอนอเมอร์ ที่ซึ่มซั่มในแนวนอน (Parallel) และซึ่มซั่มในแนวตั้ง (Perpendicular)	44
3.2 แสดงลักษณะตัวอย่างชิ้นไม้ที่ใช้ทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิผิว กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ในการพอลิเมอไรเซชัน.....	45
3.3 แสดงการจัดชุดสกัดพอลิเมอร์ออกจากคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เพื่อศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แสดงทิศทางการไหลของ ของไหลในด้านต่างๆ ในโครงสร้างไม้.....	48
3.5 แสดงเครื่องซีมซึบน้ำยาด้วยความดัน (Vacuum-pressure treatment).....	49
3.6 แสดงค่า Denominator ในวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยวิธีของ Egner's method.....	50
3.7 แสดงค่า Numerator ในวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ด้วยวิธีของ Egner's method.....	51
3.8 แสดงเครื่องมือการทดสอบสมบัติการดัดสถิตย์ (Static bending) ของไม้ตัวอย่าง.....	54
3.9 แสดงเครื่องมือการทดสอบสมบัติการอัดตั้งฉากเส้น (Compression perpendicular to grain)	55
3.10 แสดงเครื่องมือการทดสอบสมบัติการเฉือนตามแนวเส้น (Shear along the grain).....	56
3.11 แสดงเครื่องมือการทดสอบสมบัติความแข็งสถิตย์ (Hardness) ของไม้ตัวอย่าง	57
4.1 แสดงค่าร้อยละของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ที่แห้งในอากาศ เมื่อขนาดของไม้และเวลาในการซีมซึบต่างกัน.....	59
4.2 แสดงค่าร้อยละของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ที่แห้งในอากาศ (Air-dry) ขนาด 2x2x30 เซนติเมตร เมื่อเวลาและทิศทางของการซีมซึบต่างกัน.....	60
4.3 แสดงแบบจำลองการซีมซึบมอนอเมอร์ของไม้ในทิศทางต่างกันภายในโครงสร้างไม้.....	61
4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส.....	62
4.5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส.....	62
4.6 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส.....	63
4.7 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ที่เวลา และขนาดของไม้ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส.....	63
4.8 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ที่เวลา และขนาดของไม้ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส.....	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เวลา และขนาดของไม้ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส.....	64
4.10 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	66
4.11 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาด 2x2x6 เซนติเมตร ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	67
4.12 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาด 2x2x30 เซนติเมตร ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	67
4.13 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไม้ที่มีขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ที่เวลา และอุณหภูมิต่างๆ.....	68
4.14 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไม้ที่มีขนาด 2x2x6 เซนติเมตร ที่เวลา และอุณหภูมิต่างๆ.....	68
4.15 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไม้ที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตร ที่เวลา และอุณหภูมิต่างๆ.....	69
4.16 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 90 °C ณ เวลาต่างๆ.....	71
4.17 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวไม้ (T_1) กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (T_2) ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 90 °C ณ เวลาต่างๆ.....	71
4.18 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 120°C ณ เวลาต่างๆ.....	72
4.19 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวไม้ (T_1) กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (T_2) ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 120 °C ณ เวลาต่างๆ.....	72
4.20 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 150 °C ณ เวลาต่างๆ.....	73
4.21 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวไม้ (T_1) กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (T_2) ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 150 °C ณ เวลาต่างๆ	73

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากเครื่องเจลาเพอมีเอเบิลโครมาโทกราฟี ในการวิเคราะห์ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์.....	75
4.23 แสดงลักษณะของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาด 20 เมส ที่นำมาสกัด วัฏภาค PMMA ออกด้วยตัวทำละลายไซลีน เพื่อวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล ของพอลิเมอร์ ที่สภาวะในการพอลิเมโรเซชันต่างๆ กัน.....	75
4.24 แสดงลักษณะของชิ้นไม้พญาสัตบรรณขนาด 3.5x3.5x0.3 เซนติเมตร ที่ใช้ในการ ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่.....	76
4.25 แสดงลักษณะของชิ้นไม้พญาสัตบรรณที่ตัดย่อยแล้ว ก่อนนำไปสกัดเอาอินดิเคเตอร์ ออกจากไม้ด้วยเอทานอล.....	76
4.26 แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ของสารละลายที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำ ละลายเอทานอล.....	77
4.27 สารละลายอินดิเคเตอร์ในเอทานอล ที่ใช้วัดค่าดูดกลืนแสง เพื่อหาค่าความเข้มข้น ของอินดิเคเตอร์ ที่สภาวะต่างๆ	78
4.28 แสดงแบบจำลองทั่วไป ของการไหลภายในของไม้ในทิศทางต่างๆ กัน.....	79
4.29 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ที่ระยะความลึก เวลาในการแพร่ และด้านในการแพร่ต่างๆ กัน เมื่อไม้มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์.....	80
4.30 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ที่ระยะความลึก เวลาในการแพร่ และ ด้านในการแพร่ต่างๆ กัน เมื่อไม้มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์.....	81
4.31 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ที่ระยะความลึก เวลาในการแพร่ และ ด้านในการแพร่ต่างๆ กัน เมื่อไม้มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์.....	82
4.32 แสดงค่า Denominator ของการทดสอบการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทา- ครีเลตในไม้ที่มีปริมาณความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ ในด้านรัศมี.....	83
4.33 แสดงค่า Numerator ของการทดสอบการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาครีเลต ในไม้ที่มีปริมาณความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ ในด้านรัศมี.....	83
4.34 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาครีเลตในไม้พญา- สัตบรรณที่มีความชื้น 0 % ในด้านรัศมี ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ.....	86

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 0 % ในด้านสัมผัสที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ.....	86
4.36 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 0 % ในด้านยาว ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ.....	87
4.37 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 12 % ในด้านรัศมี ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ.....	87
4.38 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 12 % ในด้านสัมผัส ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ.....	88
4.39 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 12 % ในด้านยาว ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ.....	88
4.40 แสดงลักษณะของไม้พญาสัตบรรณขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา ก่อนปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล.....	89
4.41 แสดงลักษณะของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่ได้หลังจากการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลแล้ว.....	89
4.42 แสดงค่าความหนาแน่นของไม้พญาสัตบรรณและคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างกัน.....	90
4.43 แสดงค่าการบวมตัวเชิงปริมาตร (Volumetric swelling) ของไม้พญาสัตบรรณและคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่เวลาต่างๆ.....	91
4.44 แสดงค่าการบวมตัวเชิงปริมาตร (Volumetric swelling) ของไม้พญาสัตบรรณและคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ ที่เวลาทดสอบเท่ากับ 168 ชั่วโมง.....	91
4.45 แสดงค่าการดูดซับน้ำ (Water absorption) ของไม้พญาสัตบรรณ และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่เวลาต่างๆ.....	92
4.46 แสดงค่าการดูดซับน้ำ (Water absorption) ของไม้พญาสัตบรรณ และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ ที่เวลาทดสอบเท่ากับ 168 ชั่วโมง.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ของไม้พญาสัตบรรณ และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก (TGA)95	95
4.48 แสดงเดอริเวทีฟเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ของไม้พญาสัตบรรณและคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆกัน ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก (TGA)96	96
4.49 แสดงค่ามอดุลัสแตกกร้าว (Modulus of rupture , MOR) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน.....96	96
4.50 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic , MOE) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน.....97	97
4.51 แสดงลักษณะการแตกหักของชิ้นไม้ทดสอบค่าความแข็งแรงโค้งงอของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติ.....97	97
4.52 แสดงลักษณะการแตกหักของชิ้นไม้ทดสอบค่าความแข็งแรงโค้งงอ ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์.....98	98
4.53 แสดงความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยน (Compressive stress perpendicular to grain) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน.....99	99
4.54 แสดงค่าความแข็งสถิตย์ (Static hardness) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน.....99	99
4.55 แสดงค่าความเค้นเฉือนตามแนวเสี้ยน (Shear stress parallel to grain) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน.....100	100
4.56 แสดงสัณฐานวิทยาของไม้พญาสัตบรรณด้านยาว (Longitudinal) ของไม้พญาสัตบรรณก่อนปรับปรุงสมบัติที่กำลังขยาย 50 เท่า และ 400 เท่า.....101	101
4.57 แสดงสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ด้านยาว (Longitudinal) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้เท่ากับ 20% กำลังขยาย 50 เท่า และ 400 เท่า.....102	102
ข.1 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ของไม้พญาสัตบรรณก่อนปรับปรุงสมบัติ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก117	117

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.2 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ของคอมโพสิตไม้พญา- สัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 20 % ด้วยเทคนิควิเคราะห์ทางความร้อน โดยการชั่งน้ำหนัก.....	117
ข.3 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ของคอมโพสิตไม้พญา- สัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 38 % ด้วยเทคนิควิเคราะห์ทางความร้อน โดยการชั่งน้ำหนัก.....	118
ข.4 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่สกัดจากคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 38 % ด้วยเทค- นิกการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก.....	118
ค.1 แสดงสัญญาณวิทยาของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติในด้านยาว.....	120
ค.2 แสดงสัญญาณวิทยาของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติในด้านรัศมี.....	120
ค.3 แสดงสัญญาณวิทยาของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติด้านสัมผัส.....	121
ค.4 แสดงสัญญาณวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณในด้านยาว (Longitudinal) ที่มี ปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 20 %	121
ค.5 แสดงสัญญาณวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณในด้านสัมผัส (Tangential) ที่มี ปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 20 %	122
ค.6 แสดงสัญญาณวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณในด้านยาว (Longitudinal) ที่มี ปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 30 %	122
ค.7 แสดงสัญญาณวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณในด้านรัศมี (Radial) ที่มีปริมาณ พอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 30 %	123
ค.8 แสดงสัญญาณวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณในด้านสัมผัส (Tangential) ที่มี ปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 30 %.....	123

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

WPC	Wood-polymer composites
MMA	Methyl methacrylate
PMMA	Poly(methyl methacrylate)
% ML	Monomer loading percentage
% PL	Polymer loading percentage
ΔT	Temperature different between surface and inside
GPC	Gel permeation chromatograph
THF	Tetrahydrofuran
Mn	Number average molecular weight
Mw	Weight average molecular weight
MWD	Molecular weight distribution
UV-VIS	Ultraviolet-visible spectrophotometer
λ_{\max}	Maximum absorption wave length
D	Diffusion coefficient
ρ	Density
% MC	Moisture content percentage
% VS	Volumetric swelling percentage
% WA	Water absorption percentage
FSP	Fiber saturation point
TGA	Thermogravimetric analyzer
MOE	Modulus of elasticity
MOR	Modulus of rupture
σ_{\perp}	Compression stress perpendicular to grain
τ	Ultimate shearing stress parallel to grain
H	Hardness
SEM	Scanning electron microscope

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัยและแรงจูงใจในการทำวิจัย

ไม้เป็นผลผลิตที่ได้จากทรัพยากรป่าไม้ซึ่งเป็นทรัพยากรที่หมดสิ้นไปได้ ที่ถูกนำมาใช้ประดิษฐ์เป็นสิ่งของเครื่องอำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์มาเป็นเวลาช้านาน เนื่องจากไม้มีลักษณะที่สวยงามตามธรรมชาติของลายไม้ซึ่งเกิดจากการตัดผ่าไม้ในทิศทางและรูปแบบที่ต่างกัน แต่ไม้ก็ยังมีข้อเสียหลายประการ เช่น สามารถดูดซับน้ำหรือความชื้นสูง มีความทนทานต่อเชื้อราและแมลงต่างๆ เช่น ปลวก ได้ต่ำ มีความแข็งแรงต่ำในไม้บางชนิด และเมื่อไม้อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีน้ำหรือไอน้ำปริมาณมากจะทำให้เสถียรภาพของรูปร่างของไม้สูญเสียไป ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงข้อด้อยเหล่านี้ เพื่อให้ไม้มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดีเหมาะสมคุ้มค่าต่อการนำไม้นั้นๆ มาผลิตเป็นสิ่งของเครื่องใช้

พอลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดหนึ่งซึ่งมีความหลากหลายของชนิดและสมบัติให้เลือกใช้ อีกทั้งมีราคาค่อนข้างถูก จึงเป็นตัวเลือกที่สำคัญในการนำมาปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของไม้ข้างต้น พอลิเมอร์เป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของสารตั้งต้นที่เรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomer) ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถเกิดการแทรกซึมเข้ายังช่องว่างหรือเซลล์ภายในเนื้อไม้ได้ การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ที่อยู่ในเนื้อไม้ทำได้หลายวิธี เช่น การฉายรังสี (Radiation polymerization) การใช้ความร้อน (Thermal polymerization) ฯลฯ แต่ละวิธีนี้มีหลักที่คล้ายกัน คือ การทำให้มอนอเมอร์หรือตัวริเริ่มปฏิกิริยาเกิดไอออนในเซชัน (Ionization) หรือเกิดการแตกสลายของพันธะเคมีแล้วก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) เพื่อริเริ่มปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ขึ้นในช่องว่างภายในเนื้อไม้ซึ่งทำให้ได้วัสดุประกอบที่เรียกว่า “คอมโพสิตไม้พอลิเมอร์” (Wood-polymer composites, WPC) ที่มีความสวยงามตามลักษณะที่เกิดจากลวดลายของไม้ มีความแข็งแรง ความทนทานต่อเชื้อราและแมลงกัดกิน เช่น ปลวก เพิ่มขึ้น

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพไม้พญาสัตบรรณ (*Alstonia scholaris* R. Br.) หรือไม้ตีนเป็ด (White cheesewood) ให้มีสมบัติที่ดีขึ้นทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล โดยการซึมซับของมอนอเมอร์ ได้แก่ เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate, MMA) โดยไม่ใช้ความดันเป็นเวลาต่างๆ เนื่องจากเมทิลเมทาคริเลตมีข้อดี คือ เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ง่าย มีราคาไม่แพง เป็นมอนอเมอร์ที่ความดันไอ (Vapor pressure) สูงทำให้เกิดการซึมซับในไม้ได้ดี เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นพอลิเมอร์แล้วไม่ทำให้สีที่สวยงามของไม้พญาสัตบรรณ

เปลี่ยนแปลงมากนัก และมีความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Heat of polymerization) ไม่สูงมากโดยมีค่าประมาณ 130 kcal/kg [1] ไม้ที่นำมาศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพได้แก่ ไม้พญาสัตบรรณหรือไม้ตีนเป็ด (*Alstonia scholaris* R. Br.) เนื่องจากไม้พญาสัตบรรณเป็นไม้ที่มีการเจริญเติบโตให้เนื้อไม้ได้อย่างรวดเร็ว และได้รับการส่งเสริมให้ปลูกเพื่อนำมาใช้เป็นไม้ทดแทนไม้ประเภทอื่น โดยลักษณะของไม้พญาสัตบรรณมีสีนวลสวยงาม เนื้อไม้เบา มีความหนาแน่นต่ำ แสดงว่ามีความเป็นรูพรุนของไม้สูง การอาบน้ำยาทำได้ง่าย จากการศึกษาความยากง่ายในการอาบน้ำยาของไม้ชนิดต่างๆ ของพจน์ อนุวงศ์ และคณะ [2] เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการอาบน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้ของไม้แต่ละชนิด โดยการซึมซับน้ำยาครีโอสเตตผสมกับน้ำมันดีเซลด้วยความดัน แล้วตรวจสอบความลึกของน้ำยาในเนื้อไม้ พบว่าไม้ตีนเป็ด มีความสามารถในการอาบน้ำยาอยู่ในระดับชั้นที่ 1 ซึ่งแสดงว่าสามารถอาบน้ำยาได้ง่ายมาก เมื่อตรวจสอบความลึกของน้ำยาในเนื้อไม้พบว่าน้ำยาสามารถเข้าไปอยู่ในเนื้อไม้ได้อย่างเต็ม แต่เนื่องจากลักษณะของไม้พญาสัตบรรณที่มีความเป็นรูพรุนสูงทำให้ ความแข็งแรงต่ำ และไม้ทนต่อการขีดข่วน แรงกดทับ เหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญที่งานวิจัยนี้เลือกศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของไม้ชนิดนี้

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการซึมซับมอนอเมอร์ ได้แก่ เมทิลเมทาคริเลต (MMA) เข้าในเนื้อไม้พญาสัตบรรณ
2. ศึกษาผลของปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของไม้
3. ศึกษาปัจจัยที่มีต่อกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้
4. ศึกษาการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ในเนื้อไม้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาปัจจัยที่มีต่อกระบวนการซึมซับ ได้แก่ ขนาดของไม้ ระยะเวลา และทิศทางในการซึมซับมอนอเมอร์
2. ศึกษาปัจจัยที่มีต่อกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการพอลิเมอไรเซชัน
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์ โดยสมบัติทางกายภาพที่ศึกษาได้แก่ การบวมตัวเชิงปริมาตร (Volumetric swelling) การดูดซับน้ำ (Water absorption) ความหนาแน่นอบแห้ง (Oven-dry density) และสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าการดัดสถิตย์ (Static bending) การอัดตั้งฉากเสี้ยน (Compression

perpendicular to grain) การเฉือนตามแนวเส้น (Shear along the grain) และ ความแข็งสถิตย์ (Static hardness)

4. ศึกษาสัณฐานวิทยาของไม้พญาสัตบรรณก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติ
5. หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่ สภาวะต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. หาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์ ที่มีสมบัติที่ดีขึ้น
2. สามารถทำให้ไม้พญาสัตบรรณมีมูลค่าเพิ่มขึ้น และสามารถนำมาผลิตเป็นเครื่องใช้ที่มีสมบัติดีขึ้น
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของไม้ชนิดอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการซึมซับและการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์

(Impregnation and polymerization process)

กระบวนการซึมซับและการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ภายในโครงสร้างของไม้ เริ่มมีการศึกษาเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1961 ณ ประเทศสหรัฐอเมริกา [1] ซึ่งกระบวนการดังกล่าวก่อให้เกิดวัสดุประกอบหรือคอมโพสิต (Composites) ระหว่างไม้กับพอลิเมอร์ในโครงสร้างไม้ ซึ่งมีชื่อเรียกทั่วไปว่า คอมโพสิตไม้พอลิเมอร์ (Wood-polymer composites, WPC) กระบวนการนี้ยังเป็นการปรับปรุงสมบัติบางประการทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของไม้ให้ดีขึ้นด้วย เช่น ความแข็ง (Hardness) ความหนาแน่น (Density) และความมีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimensional stability) ปัจจัยที่มีต่อกระบวนการซึมซับและการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ สามารถแบ่งออกอย่างกว้างได้ คือ ลักษณะและโครงสร้างของไม้ ชนิดและความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่ใช้ และสภาวะในการทำให้เกิดการซึมซับ

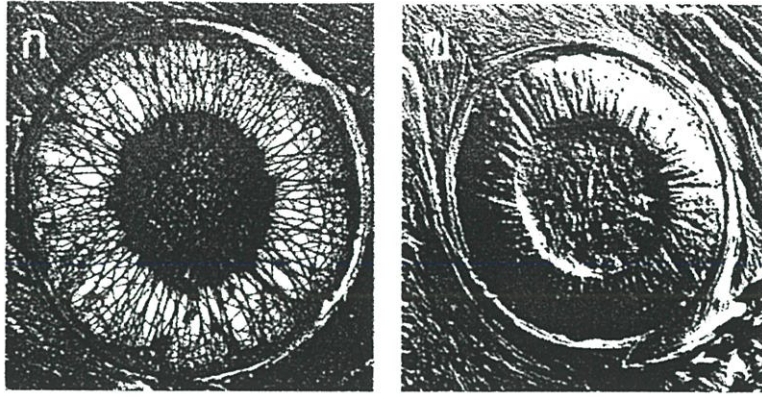
2.1.1 ลักษณะและโครงสร้างของไม้ [3]

โครงสร้างและองค์ประกอบของไม้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดความสามารถในการซึมซับหรือการแพร่ผ่านของของไหลเข้าไปสู่ช่องว่างภายในเนื้อไม้ โดยไม้ที่มีลักษณะที่มีรูพรุนมาก (High porosity) จะมีความสามารถในการเกิดการซึมซับได้มาก แต่ในบางครั้งอาจมีความสามารถต่ำก็ได้ ซึ่งขึ้นกับปัจจัยอื่นอีก เช่น ปริมาณของเนื้อไม้อ่อน (Softwood or Gymnosperms) และไม้แข็ง (Hardwood or Angiosperms) ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันซึ่งมีอิทธิพลต่อการซึมซับและแพร่ของของไหลเข้าสู่ไม้

2.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพของไม้อ่อน (Anatomy of gymnosperms)

เซลล์ของเนื้อไม้บริเวณนี้ค่อนข้างมีความคล้ายคลึงกันทั้งหมด ประกอบไปด้วยเซลล์ 2 ชนิด ได้แก่ ทราคีตตามยาว (Longitudinal tracheid) และเซลล์รังสี (Ray cell) โดยทราคีตตามยาวเป็นเซลล์ส่วนใหญ่มีสูงถึง 90 % ของบริเวณไม้อ่อน มีลักษณะเป็นท่อกลวงหัวท้ายปิดจัดเรียงตัวในแนวยาวขนานลำต้น โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเซลล์ประมาณ 100-250 เท่า ทราคีตตามยาวนี้ทำหน้าที่เป็นเซลล์ที่ใช้ในการลำเลียง และค้ำจุนลำต้น

การเชื่อมโยงและถ่ายเทของของไหลระหว่างทราคีตตามยาวสามารถทำได้โดยการเชื่อมต่อทางช่องพิท (Pit) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไป ลักษณะของพิทในสภาวะหายใจและไม่หายใจ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูป SEM แสดงลักษณะของพิตส่วนที่เป็นกระพี้ (Sapwood) และแก่น (Heartwood) ของไม้ *Pinus palustris* (ก) กระพี้ไม้สภาวะไม่หายใจ และ (ข) กระพี้ไม้สภาวะหายใจ [4]

เมื่อไม้อยู่ในสภาวะหายใจ (Aspirate) ประสิทธิภาพในการไหลผ่านของของไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการแพร่ผ่านของของไหลกับส่วนที่เป็นกระพี้ (Sapwood) พบว่าไม้ในส่วนกระพี้จะมีการแพร่ผ่านได้ดีกว่าแก่นไม้ (Heartwood) เนื่องจากบริเวณของแก่นไม้จะมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่ระเหยได้อยู่เป็นจำนวนมาก [4]

2.1.1.2 ลักษณะทางกายภาพของไม้แข็ง (Anatomy of angiosperms)

ลักษณะโครงสร้างของไม้แข็งจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าส่วนของไม้อ่อน ซึ่งในไม้แข็งจะมีส่วนที่เรียกว่า เวสเซล (Vessel) ซึ่งมีลักษณะเป็นพอร์ (Pore) ในขณะที่ไม้อ่อนจะไม่มี ในส่วนของไม้แข็งจะประกอบไปด้วยเซลล์ไม้ ที่เป็นเซลล์ตามยาว (Longitudinal cell) ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์ลำเลียง (Conducting tissue) เซลล์ค้ำจุน (Supporting tissue) และเซลล์สะสม (Storage or Parenchymatous tissue) ซึ่งจะมีปริมาณที่มากกว่าชนิดที่พบในไม้อ่อน

เวสเซลที่พบในไม้แข็งประกอบขึ้นจากเซลล์รูปร่างคล้ายท่อหลายท่อมาเรียงซ้อนกันในแนวยาว เมื่อเริ่มต้นจะมีผนังเซลล์ที่กันแต่ท่อแยกกันอยู่ แต่เมื่อเซลล์เกิดการเจริญเติบโตเต็มที่แล้วผนังเซลล์เหล่านั้นจะเปิดเป็นช่องทำให้เกิดช่องที่เรียกว่า เพอร์ฟอเรชัน (Perforation) ซึ่งทำให้แต่ละเวสเซลเกิดการเชื่อมต่อถึงกันได้ ซึ่งลักษณะของเพอร์ฟอเรชัน สามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์

2.1.2 ชนิดและความเข้มข้นของมอนอเมอร์

มอนอเมอร์ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการซึมซับและปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายในโครงสร้างของไม้ได้นั้น ต้องมีสมบัติบางประการ เช่น ความหนืดที่ต่ำ มีขนาดโมเลกุลไม่ใหญ่มาก ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งที่เกิดผ่านปฏิกิริยาแบบควบแน่น (Condensation) หรือแบบเติม (Addition)

ตัวอย่างของมอนอเมอร์ดังกล่าวได้แก่ เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate) สไตรีน-อะคริไลไดไนไตรล์ (Styrene-acrylonitrile) ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl chloride) ฟีนอลฟอร์มอลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde) หรือจะเป็นมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ เป็นที่น่าสังเกตว่ามอนอเมอร์ที่สามารถนำมาใช้นั้นสามารถใช้ได้ทั้งระบบมอนอเมอร์ชนิดเดียว หรือเป็นแบบมอนอเมอร์ผสม (Monomer mixture) ก็ได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้สมบัติตรงตามความต้องการ ปัจจัยที่พิจารณาในการเลือกชนิดของมอนอเมอร์ที่นำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมซิปและพอลิเมอร์เชชัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปัจจัยที่ควรพิจารณาการเลือกชนิดของมอนอเมอร์และสมบัติของพอลิเมอร์ [1]

สมบัติของมอนอเมอร์	สมบัติของพอลิเมอร์
ราคา	ความเหนียว
ความเหมาะสมในการใช้งาน	ความแข็ง
ปริมาณรังสี หรือตัวเร่งปฏิกิริยา	ความยืดหยุ่น
ความร้อนจากการเกิดพอลิเมอร์	ความต้านทานต่อสภาพอากาศ
ความเป็นพิษ	ความทนทานต่อน้ำและเปลวไฟ
ความสามารถในการระเหย	ความสามารถในการละลายในมอนอเมอร์
ความหนืด	ความต้านทานต่อสารเคมี

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติบางประการของมอนอเมอร์ที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมซิป [1]

ชนิดของมอนอเมอร์	จุดเดือด (°C)	ความร้อนจากการเกิดพอลิเมอร์ (kcal/kg)	ความหนืด (kP at 30 °C)	สมบัติของพอลิเมอร์
Vinyl chloride	-14	270	-	แข็ง, เหนียว
Styrene	145	168	55	แข็ง, เปราะ
Methyl methacrylate	100	130	143	แข็ง, เหนียว
Ethyl acrylate	99.5	186	700	อ่อนนุ่มคล้ายยาง
Acrylonitrile	77.3	326	-	แข็ง
Vinylacetate	72.5	250	1240	อ่อนนุ่ม
Butadiene	-4.5	-330	26	อ่อนนุ่มคล้ายยาง
Isoprene	34	263	11	อ่อนนุ่มคล้ายยาง
Unsat. Polyester	-	70-100	-	แข็ง, เหนียว

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติบางประการของมอนอเมอร์ผสมที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการซึมซับ โดยใช้รังสีพลังงานสูงในการพอลิเมอไรเซชัน [1]

ระบบมอนอเมอร์ผสม	สมบัติของพอลิเมอร์ผสม	ระดับรังสีที่ต้องการ (Mrad)
Vinyl chloride – Vinyl acetate (80:20)	แข็ง , เหนียว , ต้านทานต่อสารเคมี	1.5
Acrylonitrile – Styrene (40:60)	แข็ง , เหนียว	2.5
Polyester – Styrene (50:50)	แข็ง , เหนียว	1.2
Methymethacrylate – Styrene (50:50)	แข็ง , เหนียว	1.2

2.1.3 สภาพะในการทำให้เกิดการซึมซับ [5]

กระบวนการซึมซับมอนอเมอร์เป็นกระบวนการที่ทำให้มอนอเมอร์เกิดการแทรกซึมเข้าสู่เนื้อไม้หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีลักษณะที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน โดยมอนอเมอร์จะเข้าไปแทนที่ส่วนที่เป็นอากาศที่อยู่ในช่องว่างภายในไม้ กระบวนการซึมซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ได้แก่

2.1.3.1 กระบวนการซึมซับด้วยความดันแบบเต็มเซลล์ (Full cell impregnation)

กระบวนการดังกล่าวโดยทั่วไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

- การทำสุญญากาศครั้งแรก (First vacuum or evacuation)
- การซึมซับด้วยความดัน (Pressure impregnation)
- การทำสุญญากาศครั้งสุดท้าย (Final vacuum or kickback)

1. การทำสุญญากาศครั้งแรก (First vacuum or evacuation)

การทำให้เป็นสุญญากาศในขั้นแรกเป็นการกระทำเพื่อทำให้สารโมเลกุลเล็กๆ เช่น ไอน้ำ หรือสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่าย ที่อยู่ภายในช่องว่างภายในเนื้อไม้หลุดออกมาแล้วเหลือเป็นช่องว่างไว้ เมื่อทำการซึมซับมอนอเมอร์ด้วยความดันจะทำให้เกิดการแทรกตัวของมอนอเมอร์เกิดได้ดีขึ้น

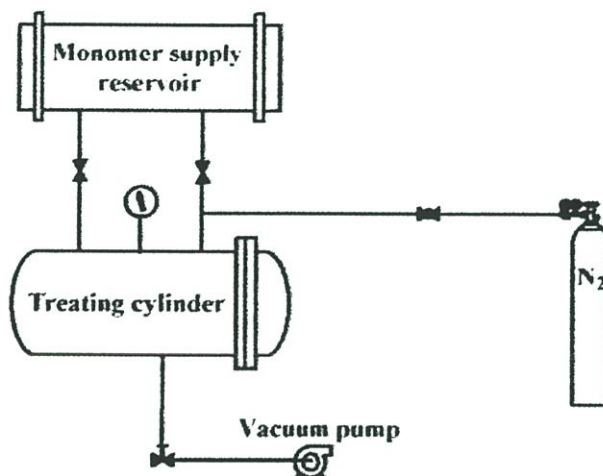
2. การซึมซับด้วยความดัน (Pressure impregnation)

หลังจากทำสุญญากาศในขั้นตอนแรกแล้วจึงเติมมอนอเมอร์เข้าไปยังถังปฏิกรณ์ (Treating cylinder) จากนั้นเพิ่มความดันโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน หลังจากเพิ่มความดันแล้วต้องควบคุมความดันให้คงที่อยู่ตลอดเวลาตามเวลาที่กำหนด ระยะเวลาในการซึมซับความดันเพื่อให้เกิดการซึมซับของมอนอเมอร์ขึ้นอยู่กับ ความหนืดของมอนอเมอร์ ความยาว ความหนาของไม้ ความหนาแน่นของไม้ และค่าเปอร์เซ็นต์ของพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ที่ต้องการ

3. การทำสุญญากาศครั้งสุดท้าย (Final vacuum or kickback)

การลดความดันลงจนกระทั่งความดันภายในเป็นสุญญากาศในช่วงทำขั้นนี้ เพื่อดึงส่วนที่เป็นอากาศและมอนอเมอร์หรือสารปรับปรุงคุณภาพไม้ส่วนเกินออกจากไม้ และทำให้ผิวไม้สะอาดขึ้น

อุปกรณ์ที่ใช้ในการซึมซับมอนอเมอร์ด้วยความดันอย่างง่าย แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องมือการซึมซับมอนอเมอร์ด้วยความดันอย่างง่าย [1]

จากรูปที่ 2.2 อุปกรณ์ต่างๆ ประกอบด้วย

- ถังปฏิกรณ์ (Treating cylinder) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาว 60 นิ้วและหนา 0.25 นิ้ว ทำด้วยสแตนเลส (Stainless steel) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้บรรจุไม้ที่ต้องการทำการซึมซับมอนอเมอร์ โดยปลายด้านหนึ่งปิดและอีกด้านหนึ่งสามารถเปิดได้
- ถังนำส่งมอนอเมอร์ (Monomer supply reservoir) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาว 60 นิ้วและหนา 0.5 นิ้ว ทำด้วยเหล็กมดำ (Black iron) เป็นที่บรรจุมอนอเมอร์ที่ใช้ในการซึมซับ โดยส่วนของ Monomer supply reservoir กับ Treating cylinder มีท่อต่อเชื่อมถึงกันโดยมีวาล์ว (Valve) ควบคุมการปิดเปิด
- บั้มสุญญากาศ (Vacuum pump) ใช้ในการทำสุญญากาศให้เกิดขึ้นภายใน Treating cylinder โดยมีมาโนมิเตอร์ (Manometer) เป็นอุปกรณ์ในการอ่านค่าความดัน

2.1.3.2 กระบวนการซึมซับด้วยความดันแบบเซลล์ว่าง (Empty cell impregnation)

กระบวนการดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

- การซึมซับด้วยความดัน (Pressure impregnation)
- การทำสุญญากาศครั้งสุดท้าย (Final vacuum or kickback)

กระบวนการซึมซับด้วยความดันแบบเซลล์ว่าง เป็นกระบวนการปรับปรุงสมบัติของไม้ที่นิยมใช้กับสารปรับปรุงคุณภาพไม้ (Wood preservative) ที่มีความหนืดสูง เช่น น้ำยาครีโอไลต์ (Creosote) เพนตะคลอโรฟีนอลในน้ำมัน (Pentachlorophenol in heavy oil) กระบวนการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่

1. Lowry method สารปรับปรุงคุณภาพไม้ถูกเติมเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่ความดันบรรยากาศ แล้วเพิ่มความดันภายในถังปฏิกรณ์ตามระยะเวลา จากนั้นลดความดันลงจนกระทั่งความดันภายในเป็นสุญญากาศ เพื่อดึงส่วนที่เป็นอากาศและสารปรับปรุงคุณภาพส่วนเกินออกจากไม้ ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า “Kickback” กระบวนการซึมซับแบบ Lowry แสดงได้ดังรูปที่ 2.3(ข)

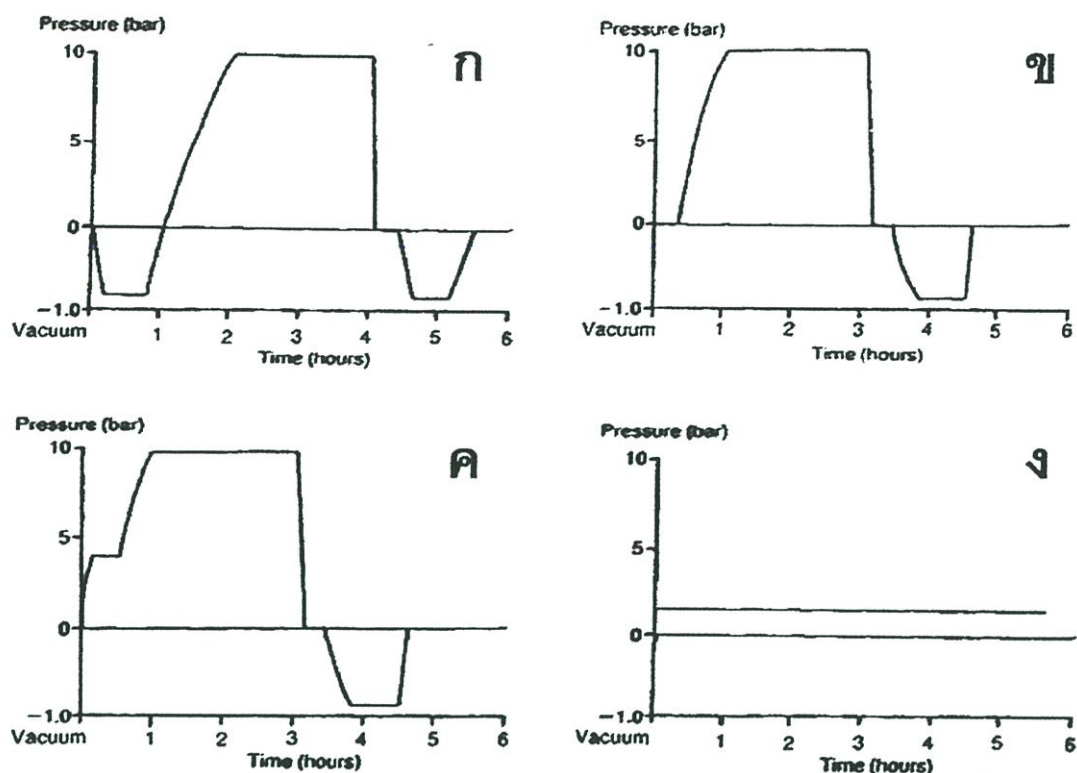
2. Roping method วิธีนี้ต่างจากการซึมซับแบบ Lowry คือ ในช่วงแรกจะเพิ่มความดันภายในถังปฏิกรณ์ก่อน เพื่อให้อากาศภายในไม้เกิดการอัดตัวในรูปอากาศในไม้ (Air trap) จากนั้นจึงเติมสารปรับปรุงคุณภาพไม้เข้าสู่ถังปฏิกรณ์แล้วเพิ่มความดันขึ้นตามระยะเวลา แล้วจึงลดความดันลงจนกระทั่งความดันภายในเป็นสุญญากาศอีกครั้งในช่วงสุดท้าย รูปกระบวนการซึมซับแบบ Roping แสดงได้ดังรูปที่ 2.3(ค)

2.1.3.3 กระบวนการซึมซับโดยไม่ใช้ความดัน (Non-pressure treatment)

กระบวนการซึมซับโดยไม่ใช้ความดันเพื่อปรับปรุงสมบัติของไม้ แสดงดังรูปที่ 2.3(ง) ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและอุปกรณ์ไม่ซับซ้อนทำให้สามารถทำได้ง่าย ตัวอย่างของการปรับปรุงคุณภาพไม้ด้วยวิธีนี้ ได้แก่ การทาด้วยแปรง (Brushing) การพ่น (Spray) และ การจุ่ม (Dip) กระบวนการดังกล่าวสารปรับปรุงคุณภาพจะเกิดการซึมซับที่บริเวณพื้นผิวของไม้ โดยปริมาณของสารปรับปรุงคุณภาพที่ถูกซึมซับขึ้นกับเวลาและขนาดของไม้ที่เกิดการซึมซับ

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของกระบวนการซึมซับแบบต่างๆ

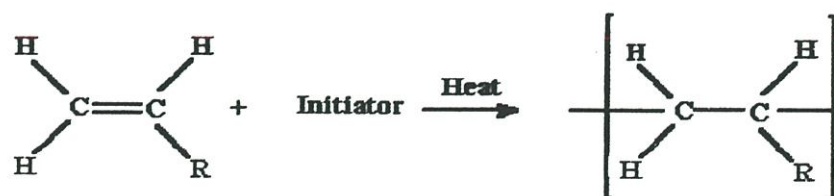
ปัจจัย	รูปแบบกระบวนการซึมซับ		
	แบบเต็มเซลล์	แบบเซลล์ว่าง	แบบไม่ใช้ความดัน
ความสามารถในการซึมซับ	ดีมาก	ดี	ต่ำ
ความสม่ำเสมอของการซึมซับ	ดี	ดี	ต่ำ
ระยะเวลาที่ใช้ในการซึมซับ	น้อย	น้อย	มาก
ความซับซ้อนของเครื่องมือ	ปานกลาง	ปานกลาง	น้อย



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความดันในกระบวนการซีมซีบแบบต่างๆ (ก) ซีมซีบด้วยความดันแบบเต็มเซลล์ (ข) ซีมซีบด้วยความดันแบบเซลล์ว่างแบบ Lowry (ค) ซีมซีบด้วยความดันแบบเซลล์ว่างแบบ Ruping และ (ง) ซีมซีบแบบไม่ใช้ความดัน [5]

2.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยกลไกปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ [6]

พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์โดยอาศัยกลไกปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ (Free radical addition polymerization) สามารถทำได้โดยการใช้สารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำพันธะคู่ของมอนอเมอร์ให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด สมการปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเติมโดยใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยอนุมูลอิสระ แสดงได้ดังนี้



2.2.1 ปฏิกิริยาการเติมด้วยอนุมูลอิสระ

ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยปฏิกิริยาการเติมด้วยอนุมูลอิสระ แบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน

- ขั้นเริ่มสายโซ่ (Chain Initiation) ขั้นตอนนี้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เกิดการสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) จะทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของมอนอเมอร์ เกิดเป็นปลายสายโซ่ที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ ดังสมการ



- ขั้นแผ่ขยายสายโซ่ (Propagation) มอนอเมอร์จะเข้าทำปฏิกิริยากับปลายสายโซ่ที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ ทำให้เกิดการแผ่ขยายของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง ในเวลาอันรวดเร็ว

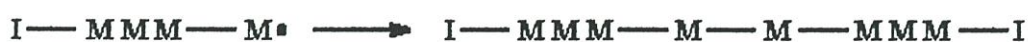


- ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (Termination) เป็นขั้นตอนที่สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการหยุดการแผ่ขยายของสายโซ่ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการรวมกันของโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวสองโมเลกุล ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1. การสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบรวมกัน (Combination) ซึ่งการรวมกันของโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวสองโมเลกุลแบบนี้ มีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์สายโซ่นั้นสูงมาก ๆ
2. การสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบถ่ายโอน (Disproportionation) ขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบนี้ จะเกิดการถ่ายโอนอะตอม เช่น ไฮโดรเจนอะตอม จากอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์หนึ่งไปยังพอลิเมอร์สายโซ่หนึ่ง ซึ่งจะทำให้สายโซ่เกิดการสิ้นสุดปฏิกิริยาโดยที่สายโซ่หนึ่งเกิดเป็นพันธะคู่ และอีกสายโซ่หนึ่งเป็นพันธะเดี่ยว น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีค่าต่ำกว่าการสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบรวมกัน

สมการที่แสดงการเกิดการสิ้นสุดปฏิกิริยาทั้งสองแบบสามารถแสดงได้ดังนี้

Combination



Disproportionation



นอกจากปฏิกิริยาทั้ง 3 ขั้นตอนดังกล่าวแล้ว ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระ ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ด้วย เช่น ปฏิกิริยาการถ่ายโอนสายโซ่ (Chain transfer reaction) ให้กับโมเลกุลอื่น เช่น ตัวทำละลาย ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ

2.2.2 มอนอเมอร์สำหรับพอลิเมโรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ

มอนอเมอร์ที่สามารถใช้กับการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกปฏิกิริยาแบบเติมด้วยอนุมูลอิสระได้นั้น มอนอเมอร์จะต้องมีพันธะที่ไม่อิ่มตัว เช่น พันธะคู่ ในโครงสร้างเพื่อให้เกิดการริเริ่มปฏิกิริยาด้วยอนุมูลอิสระ (Free radicals) จากตัวริเริ่มปฏิกิริยาได้ง่าย ซึ่งเรียกมอนอเมอร์กลุ่มนี้ว่า ไวนิลมอนอเมอร์ ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่างของมอนอเมอร์สำหรับพอลิเมโรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ [6]

มอนอเมอร์	โครงสร้างของมอนอเมอร์	พอลิเมอร์ที่ได้
Ethylene	$CH_2=CH_2$	Polyethylene
Propylene	$CH_2=CHCH_3$	Polypropylene
1,3 butadiene	$CH_2=CH-CH=CH_2$	Polybutadiene
Styrene	$CH_2=CHC_6H_5$	Polystyrene
Vinyl chloride	$CH_2=CHCl$	Polyvinyl chloride

2.2.3 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมโรเซชันด้วยอนุมูลอิสระ

สารที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมโรเซชันด้วยอนุมูลอิสระสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.6 แต่สิ่งที่เหมือนกันของตัวริเริ่มปฏิกิริยาก็คือ เมื่อเกิดการสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระหรืออิเล็กตรอนเดี่ยวขึ้น เพื่อไปริเริ่มปฏิกิริยากับพันธะคู่ของมอนอเมอร์ นอกจากตัวริเริ่มที่เป็นสารเคมีแล้วยังมีพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นได้อีก เช่น ความร้อน แสงอัลตราไวโอเล็ต หรือรังสีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา หรือเป็นพวกพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพลังงานดังกล่าวจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นได้

ตารางที่ 2.6 แสดงตัวอย่างและชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา [6]

ชนิดของตัวริเริ่ม	ตัวอย่างตัวริเริ่ม
Peroxide and Hydroperoxide	Benzoyl peroxide , Dicumyl peroxide
Redox	Persulfate + Reducing agent
Azo	2,2-Azobis-(2-ethylbutyronitrile)
Organometallic	Silver alkyls
อื่นๆ	Heat , Radiation , X-ray

2.2.3.1 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดริเริ่มด้วยความร้อน

สารเคมีที่ใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ชนิดนี้ การสลายตัวเพื่อให้อนุมูลอิสระจะเกิดขึ้น เมื่อได้รับความร้อนจนสารมีอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งเป็นอุณหภูมิสลายตัวของสารนั้น โดยอุณหภูมิในการสลายตัวของตัวริเริ่มควรเป็นอุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิการเกิดพอลิเมอร์ เพื่อให้พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ตัวอย่างของตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดริเริ่มด้วยความร้อน เช่น สารประเภทเอโซ (Azo) เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) และโลหะอัลคิล (Metal alkyls)

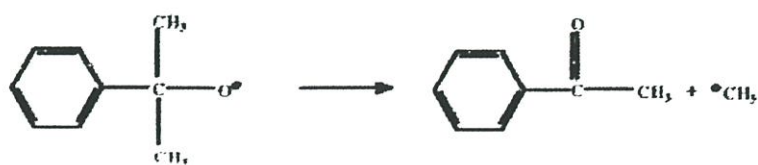
1. ไฮโดรเปอร์ออกไซด์

สารประเภทนี้จัดเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เป็นเปอร์ออกไซด์ ตัวอย่างเช่น Cumyl hydroperoxide โดยมีการสลายตัวด้วยความร้อนใน 2 ขั้นตอน ในขั้นแรก Cumylhydroperoxide จะสลายตัวให้อนุมูลอิสระของ Cumyloxy กับ Hydroxy ซึ่งอนุมูลอิสระทั้งสองสามารถใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาได้ ในขั้นที่สอง Cumyloxy อาจเกิดการสลายตัวต่อไปเกิดเป็นสารประกอบคีโตน (Ketone) กับอนุมูลอิสระของเมทิล (Methyl radical) ดังสมการ



Cumylhydroperoxide

Cumyloxy radical

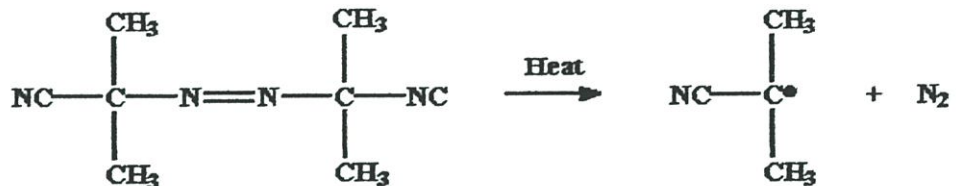


Cumyloxy radical

Methyl radical

2. เอโซ

สารประกอบเอโซที่นิยมใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ คือ เอโซบิส-บิวไทโรไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile : AIBN) จะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจนและอนุมูลอิสระ 2 โมเลกุล ซึ่งทำหน้าที่ในการริเริ่มปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ สมการการสลายตัวแสดงได้ดังนี้



การพอลิเมอร์เซชันมอนอเมอร์ที่อยู่ในเนื้อไม้โดยใช้ความร้อนและตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) จำเป็นที่จะต้องให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเกิดการแทรกซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อไม้ด้วย ซึ่งอาจทำได้โดยการแช่ไม้ลงในสารละลายของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็นเวลานาน เมื่อตัวริเริ่มปฏิกิริยาได้ซึมซับอยู่ในเนื้อไม้แล้วจึงให้ความร้อนเพื่อทำให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่อยู่ในเนื้อไม้เกิดการแตกตัวออกเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) แล้วริเริ่มการเกิดเป็นพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ที่อยู่ในเนื้อไม้ ปริมาณของตัวริเริ่มที่แตกตัวออกเป็นอนุมูลอิสระภายในเนื้อไม้จะส่งผลถึงน้ำหนักโมเลกุลและอัตราเร็วในการเกิดเป็นพอลิเมอร์

2.2.3.2 การริเริ่มปฏิกิริยาชนิดริเริ่มด้วยรังสีพลังงานสูง

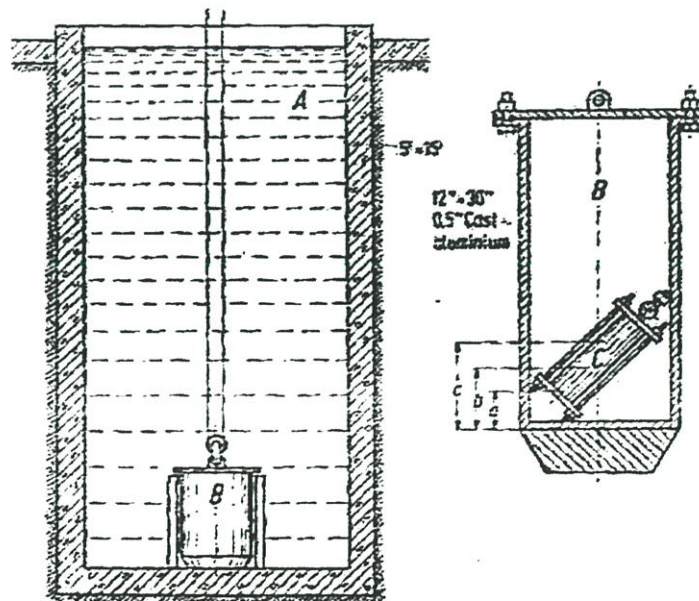
รังสีพลังงานสูงใช้ในการเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนที่ตำแหน่งพันธะคู่ของมอนอเมอร์เกิดการแตกสลายออกเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งเกิดเนื่องจากอิเล็กตรอนเกิดการดูดกลืนพลังงานที่ได้รับจากรังสีพลังงานสูงด้วยปริมาณที่เหมาะสม ทำให้เกิดการแตกออกของพันธะไพ (π-bond) ที่ตำแหน่งพันธะคู่ ตัวอย่างของรังสีพลังงานสูงที่นิยมใช้ ได้แก่ รังสีเอกซ์ (X-ray) รังสีแกมมา (Gamma ray) อนุภาคแอลฟา (Alpha particle) อิเล็กตรอนพลังงานสูง และแหล่งพลังงานอื่นๆ กลไกการริเริ่มปฏิกิริยายังไม่เป็นที่ชัดเจนนัก เนื่องจากการใช้รังสีพลังงานสูงอาจทำให้เกิดอนุภาคของไฮดรอกซิล รวบรวมกับอนุมูลอิสระด้วย

การพอลิเมอร์เซชันของมอนอเมอร์ภายในเนื้อไม้ด้วยรังสีพลังงานสูง เป็นกระบวนการที่นำไม้ที่ได้ผ่านการซึมซับด้วยมอนอเมอร์แล้วไปฉายรังสีที่มีพลังงานสูงเพื่อให้เกิดการทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อไม้ได้ดี ซึ่งแหล่งกำเนิดที่ใช้อาจเป็น โคบอลต์-60 (Cobalt-60) การใช้รังสีที่มีพลังงานสูงในการทำให้เกิดพอลิเมอร์ต้องคำนึงถึง ปริมาณการให้รังสี (Gamma ray dose) ซึ่งการ

เลือกใช้ปริมาณรังสีเท่าใดนั้น ขึ้นองศาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization) ที่ต้องการ ชนิดของมอนอเมอร์ และอัตราการให้รังสี (Dose rate) ตัวอย่างเช่น

- การเชื่อมขั้วมอนอเมอร์ของไม้เมเปิล (Maple) ด้วยเมทิลเมทาคริเลต (MMA) ใช้อัตราการให้รังสีที่ดีที่สุดคือ 40,000 rad/hr และใช้ปริมาณการให้รังสี 0.6 Mrad [1]
- การเชื่อมขั้วมอนอเมอร์ของไม้เมเปิล (Maple) ด้วย 60% สไตรีน กับ 40% อะคริโลไนไตรล์จะใช้อัตราการให้รังสีที่ดีที่สุดคือ 1.1×10^5 rad/hr และใช้ปริมาณการให้รังสี 2.6 Mrad [1]

จากตัวอย่างทั้งสองพบว่าอัตราการให้รังสี (Dose rate) มีค่าแตกต่างกัน เมื่อใช้มอนอเมอร์ที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากความสามารถในการเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์แต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยปกติแล้วปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในเนื้อไม้เพิ่มสูงขึ้น เช่น การพอลิเมอร์ไรเซชันของเมทิลเมทาคริเลต (MMA) ในไม้สน (Pine) ก่อให้เกิดความร้อนขึ้น 13 kcal/mole ซึ่งทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 200 °F [1] ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกใช้ปริมาณการให้รังสี และอัตราการให้รังสี ที่เหมาะสมกับชนิดของมอนอเมอร์ ชนิดของไม้ และปริมาณองศาการเกิดพอลิเมอร์ที่ต้องการ

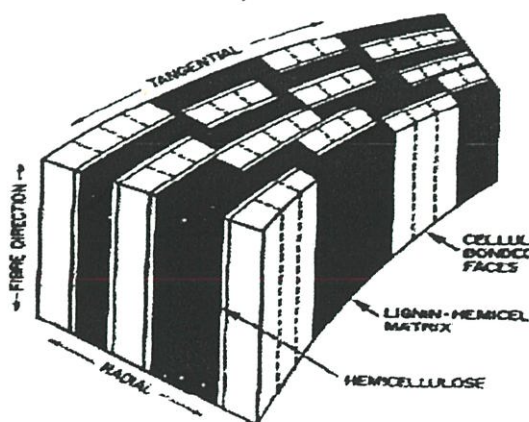


รูปที่ 2.4 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการพอลิเมอร์ไรเซชันมอนอเมอร์ด้วยรังสีพลังงานสูง (Radiation polymerization) [7]

2.3 ลักษณะโครงสร้างของไม้ (Wood Anatomy) [8]

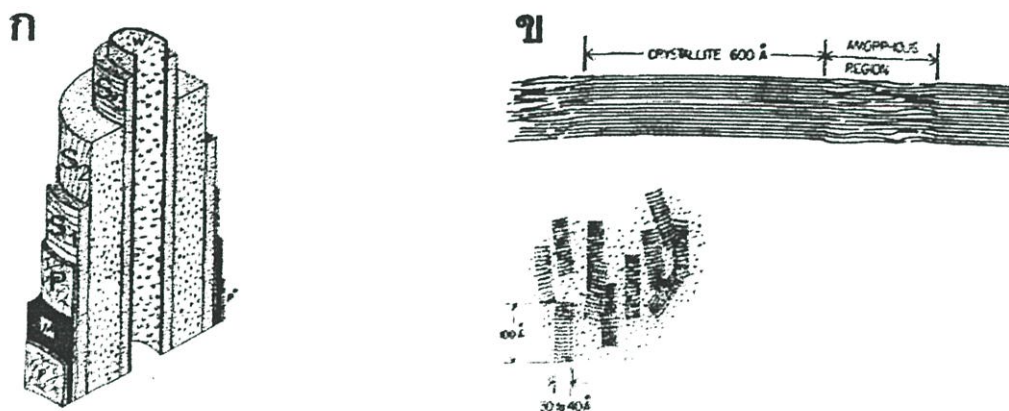
ไม้เป็นสารอินทรีย์สารที่เกิดขึ้นจากการเจริญเติบโตของพืชบางชนิด โดยมีส่วนประกอบที่อยู่ร่วมกันหลายชนิดทำให้ไม้มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป องค์ประกอบของเนื้อไม้ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยสารสองชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งทำหน้าที่แตกต่างกัน เซลลูโลสจะเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ที่ทำหน้าที่เสริมแรง หรือค้ำจุนลำต้นของต้นไม้ และลิกนินจะมีอยู่มากในระหว่างเซลล์ต่อเซลล์ โดยทำหน้าที่เชื่อมประสานเซลล์ต่างๆ ให้ยึดติดอยู่ด้วยกัน ไม้ทั่วไปจะมีปริมาณของเซลลูโลสต่อลิกนินในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 นอกจากเซลลูโลสและลิกนินแล้วยังอาจมีสารอื่นๆ แทรกอยู่ในเซลล์หรือช่องว่างระหว่างเซลล์ของเนื้อไม้อีก ซึ่งสารเหล่านี้จะมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น สี กลิ่น ความทนทานของไม้ ที่ต่างกัน

ลักษณะและโครงสร้างของไม้สามารถศึกษาได้จากกล้องขยาย ที่มีกำลังขยายประมาณ 250 เท่า เพื่อตรวจสอบดูลักษณะและการจัดเรียงตัวของเซลล์ไม้ ซึ่งพบว่าเซลล์ไม้มีลักษณะที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิงทั้งด้านขนาดและรูปร่าง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 พวกคือ เซลล์ไม้ (Wood cell) เป็นเซลล์ที่มีการจัดเรียงตัวของเซลล์ไปในทิศทางตามความยาวของลำต้น และเซลล์รังสี (Ray cell) มีการจัดเรียงตัวของเซลล์ไปตามขวางตามแนวรัศมีของลำต้น นอกจากนั้นยังสามารถแบ่งเซลล์ตามหน้าที่ได้เป็น เซลล์ที่ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและแร่ธาตุ (Conducting tissue) ซึ่งจะมีขนาดเซลล์ที่ใหญ่และมีผนังบาง เซลล์ที่ให้ความแข็งแรงหรือเซลล์ค้ำจุน (Supporting tissue) เป็นเซลล์ที่มีผนังหนาเพื่อทำให้เกิดความแข็งแรง และเซลล์ที่ทำหน้าที่เก็บและสะสมอาหาร (Storage or Parenchymatous tissue) เซลล์จะมีรูปร่างลักษณะคล้ายอิฐและมีผนังเซลล์ที่บาง โดยปกติเซลล์ไม้แต่ละเซลล์จะมีโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันโดยมีสารที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานแต่ละเซลล์ให้ยึดติดกันได้และเกิดเป็นแถบเยื่อประสาน (Middle lamellar) ขึ้น โดยยังมีผนังเซลล์ของแต่ละเซลล์เป็นส่วนที่แสดงขอบเขตของแต่ละเซลล์



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างของไม้ จากภาคตัดขวาง [4]

ผนังเซลล์นั้นสามารถแบ่งออกตามลักษณะของการเกิดขึ้นได้เป็น 2 อย่างคือ ผนังเซลล์เดิมหรือผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary wall) เป็นผนังเซลล์ที่เกิดขึ้นมาพร้อมกับการแบ่งตัวของแม่เซลล์ และผนังเซลล์ที่มีการเกิดเพิ่มขึ้นมาภายหลังหรือผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary wall) ซึ่งผนังเซลล์ส่วนนี้สามารถแบ่งแยกออกได้เป็นชั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) โดยพบว่าผนังเซลล์แต่ละชั้นจะมีลักษณะการจัดเรียงของเซลลูโลสและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ผนังเซลล์ (Cell wall) เป็นส่วนประกอบที่เกิดจากเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเกิดจากหน่วยโมเลกุลของกลูโคส (Glucose) จำนวนมากมาเรียงต่อกันเป็นสายโซ่จำนวนมากและมีความเป็นระเบียบสูง โดยส่วนของเซลลูโลสที่เป็นระเบียบเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความแข็งแรงของไม้ การจัดเรียงตัวและโครงสร้างของเซลลูโลสแสดงได้ดังรูปที่ 2.6(ข)



รูปที่ 2.6 แสดงการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส (ก) ที่ประกอบเป็นผนังเซลล์ที่เป็นชั้นๆ ของโครงสร้างผนังเซลล์ในแต่ละชั้น และ (ข) ที่เป็นระเบียบ [4]

ตารางที่ 2.7 แสดงขนาดขององค์ประกอบในส่วนต่างๆ ของโครงสร้างผนังเซลล์ของไม้ปลายฤดู [4]

องค์ประกอบ	ขนาด (ไมครอน)
Tracheid length	3,500
Tracheid diameter	33
Tracheid lumen diameter	20-30
Thickness, Primary wall, P	0.1
Thickness, S ₁ layer, latewood	1
Thickness, S ₂ layer, latewood	4-10
Thickness, S ₃ layer, latewood	1

2.3.1 การเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเซลล์แต่ละเซลล์มีโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันโดยมีสารที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานแต่ละเซลล์ให้อยู่ติดกันได้และเกิดเป็นแถบเยื่อประสาน (Middle lamellar) ขึ้น โดยยังมีผนังเซลล์ของแต่ละเซลล์เป็นส่วนของที่แสดงขอบเขตของแต่ละเซลล์ แต่อย่างไรก็ดีเซลล์ทุกเซลล์จะมีช่องทางที่สามารถทำให้เกิดการถ่ายเทสารอาหาร น้ำ และอากาศภายในอย่างทั่วถึงกัน ลักษณะการเชื่อมต่อภายในเซลล์นั้นสามารถแบ่งออกได้กว้างเป็น 2 แบบ คือ แบบเพอร์ฟอเรชัน (Perforation) หรือ แบบร่อง และการเชื่อมโยงผ่านพิต (Pit) หรือ แบบรู

1. แบบเพอร์ฟอเรชัน (Perforation)

ลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์แบบนี้เกิดขึ้นเนื่องจากเซลล์มีลักษณะเป็นช่องเปิดตลอดที่บริเวณหัวท้ายของเซลล์ ซึ่งทำให้แต่ละเซลล์มีการเชื่อมต่อกันเป็นช่องเดียวตลอด ในต้นไม้ใบกว้างจะเรียกลักษณะของเพอร์ฟอเรชันแบบนี้ว่า เวสเซล (Vessel) โดยลักษณะของร่องจะพบได้ในต้นไม้ใบกว้างเท่านั้น ซึ่งบริเวณของหัวและท้ายของเซลล์สองเซลล์ที่อยู่ติดกันจะมีแผ่นร่อง (Perforation plate) ที่เปิดเข้าหากันและแผ่นร่องจะมีหลายลักษณะทำให้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

- แผ่นร่องเดี่ยว (Simple perforation plate) มีลักษณะแผ่นที่มีร่องเพียงร่องเดียว
- แผ่นร่องร่วม (Multiple perforation plate) เป็นแผ่นร่องที่มีร่องหลายร่องบนแผ่นร่องแผ่นเดียว เช่น แผ่นร่องบันได (Scalariform perforation plate) ซึ่งจะมีส่วนของผนังเซลล์บางส่วนทำให้เกิดเป็นขั้นบันไดหรือบาร์ (Bar)
- แผ่นร่องพรุน (Foraminate perforation plate) แผ่นร่องแบบนี้มีลักษณะเป็นรูกลมหลายรู บนแผ่นร่องเดี่ยว

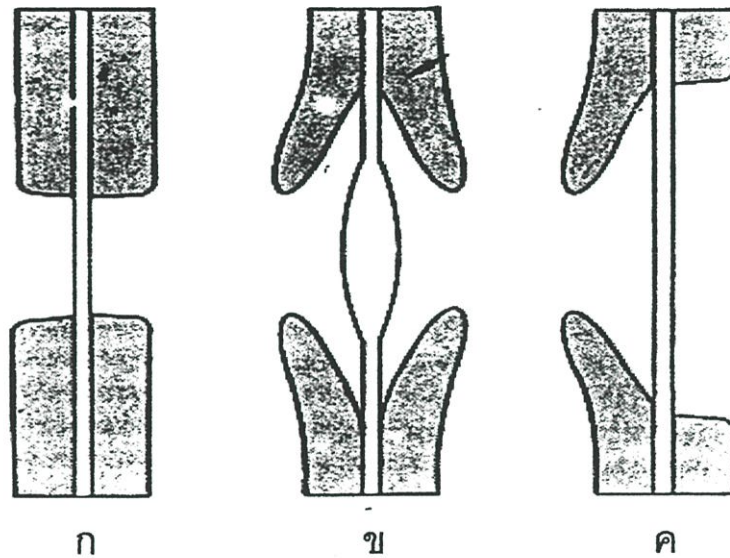
2. แบบพิต (Pit)

การเชื่อมต่อระหว่างเซลล์แบบพิต จะแตกต่างกับแบบเพอร์ฟอเรชัน คือ แบบพิตจะมีส่วนที่เชื่อมต่อกันเฉพาะส่วนที่เป็นผนังเซลล์ที่มีการเกิดเพิ่มขึ้นมาภายหลัง (Secondary wall) เท่านั้น โดยส่วนของผนังเดิมกับแถบเยื่อประสานจะเรียกรวมกันว่า เยื่อชั้นรู (Pit membrane) ลักษณะของช่องพิต สามารถแบ่งออกได้เป็น

- พิตแบบธรรมดา (Simple pit pair) เป็นพิตที่มีลักษณะของช่องรูและขนาดของรูที่สม่ำเสมอจากเยื่อชั้นรูมาจนถึงช่องเซลล์ ลักษณะของรูธรรมดาจะพบมากในส่วนของเซลล์สะสม และเซลล์ค้ำจุน ที่อยู่ในไม้เนื้อแข็ง แสดงดังรูปที่ 2.7(ก)
- พิตรูขอบคู่ (Bordered pit pair) เป็นพิตที่มีช่องรูขนาดเล็กลงอย่างรวดเร็วก่อนที่จะถึงช่องเซลล์ลักษณะของพิตรูขอบคู่สามารถแบ่งเป็นส่วนต่างๆ ออกได้อีก คือ ส่วน

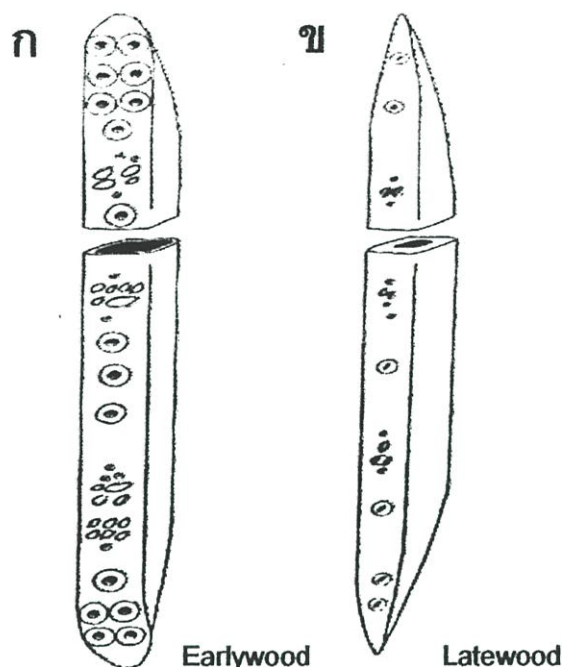
Chamber ซึ่งเป็นช่องรูส่วนที่อยู่ระหว่างเยื่อชั้นพิทกับส่วนของช่องทางที่แคบที่สุด และช่องที่เปิดเข้าสู่เซลล์ และ Aperture ซึ่งเป็นส่วนที่เปิดเข้าสู่ช่องเซลล์ แสดงดังรูปที่ 2.7(ข)

- พิทรูขอบเดี่ยว (Haft-bordered pit pair) มีลักษณะคล้ายกับพิทรูขอบคู่แต่จะมีส่วนของผนังเซลล์เดิมนูนออกมาเพียงข้างเดียว โดยอีกด้านหนึ่งจะมีลักษณะขอบที่ติดกับช่องเซลล์เป็นแบบพิทรูธรรมดา แสดงดังรูปที่ 2.7(ค)



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของพิท (Pit) แบบต่างๆ (ก) พิทแบบธรรมดา (ข) พิทรูขอบคู่ และ (ค) พิทรูขอบเดี่ยว [4]

โดยทั่วไปแล้วพิทรูขอบคู่และพิทรูขอบเดี่ยวเป็นลักษณะที่สำคัญของเซลล์ลำเลียงทั่วไป เซลล์ที่มีพิทลักษณะนี้นอกจากส่วนของเวสเซล (Vessel) แล้วมักเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ทราคีต (Tracheids) ซึ่งในไม้อ่อน (Soft wood) เซลล์ที่ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและค้ำจุนจะเป็นส่วนของเซลล์ที่เป็นทราคีตทั้งหมด แต่ในไม้แข็ง (Hard wood) บางชนิดอาจจะมีส่วนของทราคีตอยู่เพื่อใช้เป็นเซลล์ลำเลียงอยู่บ้าง ลักษณะของทราคีตแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



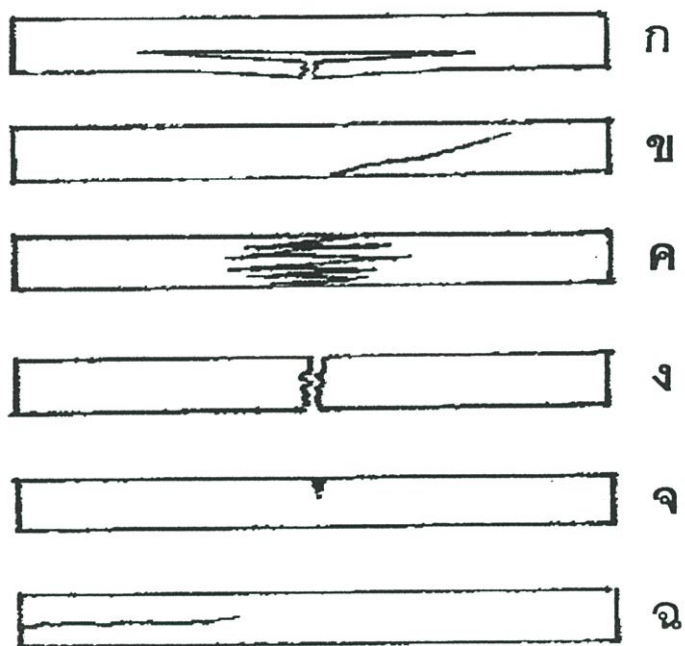
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของทราเคิดในส่วนที่เป็น (ก) ไม้ต้นฤดู (Earlywood) และ (ข) ไม้ปลายฤดู (Latewood) [4]

2.3.2 ลักษณะของโครงสร้างไม้ที่มีต่อสมบัติของไม้ [9]

ความสามารถในการรับแรงที่กระทำจากภายนอกของไม้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ด้านที่ใช้รับแรง โครงสร้างไม้ทางกายวิภาคของไม้ เช่น ลักษณะของตำหนิ (Defect) ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยไม้ (Grain direction) ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อสมบัติเชิงกลของไม้ เมื่อพิจารณาลักษณะของแรงภายนอกที่กระทำต่อไม้ในการทดสอบต่างๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะ ได้แก่

1. แรงดึง (Tension) เป็นแรงที่ทำให้ไม้เกิดการยืดยาวออกหรือแยกออกจากกัน
2. แรงอัด (Compression) เป็นแรงกระทำที่ทำให้ไม้ในบริเวณที่รับแรงเกิดการลดลงของปริมาตรหรือหดตัว
3. แรงเฉือน (Shear) แรงที่กระทำจะทำให้ไม้เกิดการเลื่อนไถลหรือแยกออกจากกันตามแนวเส้นใยหรือขวางแนวเส้นใย
4. แรงดัด (Bending) เป็นการกระทำของแรงภายนอกต่อชิ้นไม้ที่ทำให้เกิดแรงกระทำในรูปแบบของแรงดึงในบริเวณด้านล่างของไม้ เกิดแรงอัดที่ส่วนบนของชิ้นไม้ และเกิดแรงเฉือนขนานเส้นใยที่บริเวณตรงแนวแกนกลาง

สมบัติเชิงกลของไม้ในการทดสอบการดัดสถิตย์ (Static bending) มีประโยชน์มาก ในการนำไม้ไปใช้เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่มีการโค้งงอ เช่น คาน (Beam) จันทัน (Rafter) แปะ (Purlin) ตง (Joist) เป็นต้น ดังนั้นความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบการดัดสถิตย์จึงมีความสำคัญค่อนข้างมากในการนำไม้มาใช้ในการออกแบบโครงสร้าง ลักษณะการแตกหักเสียหายของไม้ (Failure) ในการทดสอบการดัดสถิตย์ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งเกิดจากลักษณะของเส้นไม้ที่ต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการแตกหักของไม้เนื่องจากลักษณะของเส้นไม้ที่ต่างกันจากแรงดัดสถิตย์ [9]

- การแตกหักด้วยแรงดึงโดยตรง (Simple-tension failure) การเสียหายของไม้จะเกิดขึ้นในบริเวณด้านล่าง ซึ่งเกิดจากแรงดึงขนานเส้นเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีแรงอื่นๆ ร่วมด้วย การแตกหักแบบนี้มักเกิดกับไม้ที่มีลักษณะของเส้นตรง ที่ผึ่งหรืออบแห้งแล้ว ลักษณะการแตกหักเป็นดังรูปที่ 2.9(ก)

- การแตกหักด้วยแรงดึงขวางเส้น (Cross-grain tension failure) ไม้จะเกิดการแตกหักตามแนวเส้น เนื่องจากแรงดึงตั้งฉากเส้นผสมกับแรงเฉือนขนานเส้น เมื่อไม้เกิดการแตกหักในลักษณะนี้ค่าสมบัติที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนสูงหรือไม่มีค่า แสดงดังรูปที่ 2.9(ข)

- การแตกหักด้วยแรงดึงเส้นประสาท (Splintering-tension failure) การแตกหักของไม้เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงขนานเส้น โดยเริ่มจากบริเวณด้านล่างของไม้ ซึ่งลักษณะการเสียหายของเซลล์ไม้ยังประสานกันอยู่และไม้ทั้งสองส่วนยังไม่หลุดแยกออกจากกัน แสดงให้เห็นว่าเป็นไม้ที่มีความเหนียว ลักษณะการแตกหักแสดงดังรูปที่ 2.9(ค)

- การแตกหักด้วยแรงดึงเส้นเปราะ (Brash-tension failure) ไม้จะเกิดการเสียหายจากแรงดึง โดยมีลักษณะของแนวการแตกหักที่มีผิวหน้าเรียบและขาดแยกออกจากกันทันที และไม่มีเสียงของการเริ่มการแตกหักก่อน แสดงให้เห็นว่าไม้มีความเปราะ แสดงดังรูปที่ 2.9(ง)

- การแตกหักด้วยแรงอัด (Compression failure) ไม้จะเกิดการยุบตัวในบริเวณด้านบนที่ได้รับแรงกดอัด เนื่องจากไม้มีความต้านทานแรงอัดได้ต่ำ หรือเกิดในไม้ที่มีความชื้นสูง ลักษณะการแตกหักเป็นดังรูปที่ 2.9(จ)

- การแตกหักด้วยแรงเฉือนตามแนวนอน (Horizontal-shear failure) การแตกหักแบบนี้เกิดขึ้นกับไม้ที่ทดสอบมีช่วงระยะห่างระหว่างฐานรอง (Span) สั้นและมีความลึกมาก (หรือมีอัตราส่วน Span/Depth ที่ต่ำ) แสดงได้ดังรูปที่ 2.9(ฉ)

2.4 ไม้พญาสัตบรรณ หรือไม้ตีนเป็ด (*Alstonia scholaris* R. Br.) [10]

ไม้พญาสัตบรรณหรือไม้ตีนเป็ด (White cheesewood) เป็นไม้พื้นบ้านของไทย จัดอยู่ในวงศ์ Apocynaceae พันธุ์ไม้วงศ์นี้มีทั้ง ไม้ยืนต้น ไม้พุ่ม ไม้ล้มลุก และจำนวนมากที่เป็นเถา กระจายพันธุ์อยู่ในเขตร้อนทั่วโลก และเป็นไม้ประดับที่นิยมปลูกกันมาก เช่น ยี่โถ จำปา เพี้ยฝรั่ง เป็นต้น ลักษณะเด่นของพันธุ์ไม้วงศ์นี้ สังเกตได้ง่ายจากน้ำยางสีขาว ใบเป็นแบบขึ้นตรงกันข้าม หรือเป็นวงรอบ กิ่งดอกตูม ซึ่งมีกลีบดอกเวียนซ้อนทับไปทางเดียวกัน ผลเป็นฝักคู่เชื่อมติดกับฐาน ไม้พญาสัตบรรณเป็นไม้โตเร็วชนิดหนึ่งและเนื้อไม้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ประกอบกับเป็นไม้ที่ไม่ทิ้งใบทำให้พื้นที่เขียวชะอุ่ม ดินชุ่มชื้น จึงสามารถนำไปปลูกเพื่อช่วยฟื้นฟูลิ่งแวดล้อมได้ดี ทั้งยังมีแนวทางที่น่าสนใจสำหรับผู้ที่ปลูกเพื่อหวังผลทางเศรษฐกิจได้ เพราะไม้พญาสัตบรรณสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการดินผลิตสอ

ไม้พญาสัตบรรณเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ สูง 35-40 เมตรเรือนยอดของต้นเล็กรูปเจดีย์ ต้นใหญ่เรือนยอดค่อนข้างแบน โคนต้นมักจะเป็นพุ่มพองลำต้นเป็นร่องตามยาว เปลือกมีสีเทาหรือเทาอมเหลือง หรืออาจมีสีน้ำตาลถึงน้ำตาลแดง มีลักษณะค่อนข้างหนาแต่เปราะ เรียบหรือแตกเป็นร่อง เปลือกชั้นในมีสีน้ำตาลและมีน้ำยางสีขาว



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะลำต้น พูพอน และใบของต้นพญาสัตบรรณ [10]

2.4.1 ลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้พญาสัตบรรณ [11]

ไม้พญาสัตบรรณมีสีเนื้อไม้สีขาวอมเหลืองอ่อน เนื้อไม้เป็นมัน มีลักษณะของเส้นใยที่ตรง เนื้อไม้ละเอียด มีความหนาแน่นต่ำอยู่ในช่วง $0.32-0.42 \text{ g/cm}^3$ มีรูพรุนสูงโดยมีการกระจายตัวของขนาดของเวสเซล (Vessel) หรือพอร์ (Pore) ที่มีขนาด 50-130 ไมครอนในด้านสัมผัส โดยขนาดของเวสเซลจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อระยะห่างจากใจไม้ (Pith) เพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยของไม้พญาสัตบรรณในไม้ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ความสูงเพียงออกน้อยกว่า 5 นิ้ว 5-10 นิ้วและมากกว่า 10 นิ้ว แสดงดังตารางที่ 2.8

2.4.2 การใช้ประโยชน์และคุณภาพเนื้อไม้พญาสัตบรรณ

ไม้ต้นเปิดเป็นไม้ที่มีประโยชน์หลายอย่าง เนื้อไม้มีสีขาวอมเหลืองเหมาะสมสำหรับใช้ก่อสร้างภายในทำเครื่องใช้ต่าง ๆ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ หีบใส่ของ ฝักมิด ดินสอ ลักษณะของเนื้อไม้เบา ยังเหมาะในการทำลูกทูนอวน หีบใส่ใบชา ของเล่นสำหรับเด็กและสามารถทำไม้จิ้มฟันได้ เพราะมีลักษณะเช่นเดียวกับไม้ทุ่งฟ้า แต่เนื้อไม้เป็นไม้ที่เหิดราทำลายไม้และเหิดราย้อมสีชอบ ทำให้ไม้ยุ่ง่ายขึ้นราสีดำเร็ว ความทนทานตามธรรมชาติของไม้ ตั้งแต่ 0.8-2 ปี เฉลี่ยประมาณ 1.4 ปี [10]

นอกจากนี้ไม้ต้นเปิดยังเป็นพืชสมุนไพรอีกด้วย โดยส่วนต่าง ๆ ของต้นเปิดมีสรรพคุณทางยาได้ เช่น เปลือก ใ้แก่ใ้ ขั้บระดู ขั้บพยาธิ ขั้บน้ำเหลืองเสีย ขั้บน้ำนมรักษามาลาเรีย รักษาเบาหวาน ยาง จากต้น อุดฟัน แก้ปวดฟัน แก้แผลอักเสบหยุดหูดหูแก้ปวด ใบอ่อนใช้ขังติ่ม รักษาโรคลักปิดลักเปิด แก้ไข้หวัด

ตารางที่ 2.8 แสดงขนาดของเส้นใยในเนื้อไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกันและคุณสมบัติทางกายวิภาค [11]

สมบัติของเส้นใย	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (นิ้ว)			CV (%)
	< 5	5 – 10	> 10	
ความยาว (mm)	1.3271	1.2371	1.5643	7.24
ความกว้าง (mm)	0.0334	0.0324	0.0344	3.90
ความกว้างลูเมน (mm)	0.0238	0.0234	0.0246	5.92
ความหนาผนังเซลล์ (mm)	0.0048	0.0045	0.0050	5.93
Runkel ratio	0.41	0.39	0.40	9.75
Flexibility coefficient	0.71	0.72	0.71	2.82
Slenderness ratio	39.70	38.16	45.47	3.29
Wall fraction (%)	28.84	27.89	28.58	6.94

ตารางที่ 2.9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน [11]

องค์ประกอบทางเคมี	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (นิ้ว)		
	< 5	5 – 10	> 10
เซลลูโลส	48.53	45.73	47.90
ลิกนิน	26.18	26.80	26.77
ไฮโลเซลลูโลส	62.00	59.59	62.80
เพนโตซาน	9.91	9.66	10.23
เถ้า	1.31	1.03	0.88
ปริมาณสารที่ละลายในแอลกอฮอล์-เบนซีน	3.71	3.56	1.97
ปริมาณสารที่ละลายในน้ำร้อน	5.81	8.52	6.07
ปริมาณสารที่ละลายใน 1 % โซเดียมไฮดรอกไซด์	15.60	16.38	15.38
ปริมาณสารแทรกในเนื้อไม้	10.60	13.03	10.17

2.5 เสถียรภาพของรูปร่างในการใช้งานของไม้ [12]

มีวิธีการต่างๆ มากมายที่นำมาใช้ในการลดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไม้ อันเนื่องมาจากการสัมผัสกับน้ำหรือความชื้น (Moisture) ซึ่งวิธีต่างๆ นั้นได้แก่ การเชื่อมโยงระหว่างชั้นแบบสลับ (Cross lamination) การเคลือบวัสดุที่ต้านทานต่อน้ำ (Water-resistant coating)

การลดของความสามารถการชอบน้ำของผนังเซลล์ (Hygroscopicity reduction) การเชื่อมโยง (Crosslinking) และการทำให้เนื้อไม้แน่นขึ้น (Bulking treatment) ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนั้นต้องมีการศึกษาและพัฒนาให้ดีขึ้นในอนาคต

รูปร่างและขนาดของไม้ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้อย่างมากเมื่อไม้นั้นอยู่ในสภาวะที่มีน้ำหรือไอน้ำมากๆ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำสามารถแทรกซึมเข้าสู่เซลล์ของไม้ ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่ได้ดี เมื่อน้ำแทรกตัวเข้าสู่เซลล์ของไม้แล้วจะมีผลทำให้เซลล์ของไม้เกิดการบวมตัว (Swelling) ซึ่งจะเพิ่มปริมาตรของไม้เป็นสัดส่วนกับปริมาณน้ำที่สามารถแทรกตัวในเซลล์ได้ การบวมตัวและการแทรกตัวของน้ำเข้าสู่เซลล์จะมีค่าคงที่ เมื่อผนังเซลล์ของไม้ อิ่มตัวไปด้วยน้ำแล้ว ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดหมาด (Fiber saturation point, FPS) และปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเนื้อไม้สามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่ไม้ชิ้นนั้นๆ อยู่ ดังนั้นความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของไม้จึงสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมปริมาณการดูดซับน้ำของเซลล์ในไม้ได้

2.5.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบ (Characterization)

ในการศึกษาความมีเสถียรภาพด้านรูปร่างของไม้ อันเป็นผลเนื่องจากความชื้นนั้น สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าทางสถิติบางค่าเช่น ประสิทธิภาพการต่อต้านการหดตัว (Antishrink efficiency , ASE) ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัว (Swelling percent) ค่าประสิทธิภาพความเสถียรภาพด้านรูปร่าง (Dimensional stability efficiency) ค่าประสิทธิภาพการต่อต้านการบวมตัว (Antiswelling efficiency) และค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของการบวมตัว (Percent reduction in swelling , R) ค่าต่างๆ นี้สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

1. สัมประสิทธิ์การบวมตัวเชิงปริมาตร (Volumetric swelling coefficient , S)

$$S = \frac{(V_2 - V_1) \times 100}{V_1} \quad (2.1)$$

เมื่อ S คือ สัมประสิทธิ์การบวมตัวเชิงปริมาตร

V_1 คือ ปริมาตรของไม้ที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Green state)

V_2 คือ ปริมาตรของไม้ที่สภาวะอบแห้งจนปราศจากน้ำ (Oven-dry state)

2. ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของการบวมตัว (Percent reduction in swelling , R)

$$R = \frac{(S_2 - S_1) \times 100}{S_1} \quad (2.2)$$

เมื่อ	R	คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของการบวมตัว
	S ₁	คือ สัมประสิทธิ์การบวมตัวเชิงปริมาตร ของไม้ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (Untreated wood)
	S ₂	คือ สัมประสิทธิ์การบวมตัวเชิงปริมาตรของไม้ที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว (Treated wood)

ดังที่กล่าวแล้วข้างต้นว่าวิธีการปรับปรุงสมบัติทางด้านเสถียรภาพต่อรูปร่างของไม้สามารถทำได้หลากหลายวิธี ซึ่งอาจแบ่งแยกออกได้เป็นประเภทได้ เช่น การปรับปรุงทางกายภาพของไม้ (Physical treatment) หรือการปรับปรุงโดยใช้สารเคมี (Chemical treatment) การปรับปรุงด้านพื้นผิวและการแทรกซึมโดยสารเคลือบผิว (Surface or penetrating with coating agent) การเกิดพันธะเคมีหรืออาจไม่เกิดพันธะเคมี นอกจากการแบ่งแยกเป็นประเภทต่างๆ ข้างต้นแล้วยังมีนักวิทยาศาสตร์บางท่านเสนอวิธีการแบ่งแยกประเภทของการปรับปรุงสมบัติของไม้อีกแบบ

Stamm [3] แยกประเภทการปรับปรุงสมบัติของไม้ออกเป็น 5 วิธี ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ลดปริมาณและอัตราเร็วของการซึมซับไอน้ำหรือของเหลว (Vapor or Liquid uptake) เข้าสู่เซลล์ของไม้ คือ

1. การเชื่อมโยงระหว่างชั้นแบบสลับ (Cross lamination)

ในการแปรรูปไม้เป็นท่อนั้น เมื่อพิจารณาด้านต่างๆ ของไม้ท่อนั้น พบว่าสามารถแบ่งเป็นด้านได้ทั้งหมด 3 ด้าน คือ ด้านรัศมี (Radial) ด้านสัมผัส (Tangential) และด้านยาว (Longitudinal) โดยปกติแล้วการบวมตัวของไม้ในแต่ละด้านจะเกิดขึ้นในด้านรัศมีและด้านสัมผัสมากกว่าที่จะเกิดขึ้นในด้านยาวประมาณ 30-100 เท่า ในการเชื่อมโยงระหว่างชั้นโดยมากจะพิจารณาถึงผลิตภัณฑ์ไม้ที่เป็นลักษณะของแผ่นไม้ประกอบของวีเนียร์ (Veneers) ที่มีการยึดติดระหว่างชั้นด้วยกาวในแนวขนานกับเส้นไม้ (Perpendicular to grain) ทำให้ความเสถียรภาพของรูปร่างของไม้ประกอบประเภทนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของการยึดติดที่รอยต่อระหว่างชั้นของกาว (Glue) ซึ่งโดยมากแล้วในด้านความหนาของแผ่นไม้ประกอบ จะเกิดการบวมตัวทางด้านความหนา (Thickness swelling) มากกว่าในอีกสองทิศทาง

2. การเคลือบวัสดุที่ต้านทานต่อน้ำ (Water-resistant coating)

การเคลือบสารป้องกันน้ำ (Water-repellent coating) สามารถใช้ได้ทั้งที่เป็นแบบเคลือบภายนอก (External) บนผิวของผลิตภัณฑ์ไม้ หรือเคลือบภายใน (Internal) ของไม้ก็ได้ ซึ่งการเคลือบแบบภายในสารเคมีจะเคลือบบริเวณผนังเซลล์ที่เป็นช่องว่างภายในเนื้อไม้ (Lumen walls) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นการเคลือบแบบภายในหรือภายนอกจะเป็นการลดอัตราเร็วในการซึมซับน้ำ

เข้าสู่เซลล์ของไม้ได้เป็นอย่างมาก ในการวัดอัตราเร็วในการขับน้ำเข้าสู่เซลล์ของไม้สามารถหาได้จาก ค่าประสิทธิภาพในการกีดกันน้ำ (Moisture excluding effective , MEE)

ค่าประสิทธิภาพในการกีดกันน้ำ (Moisture excluding effective , MEE)

$$MEE = \frac{(W_2 - W_1) \times 100}{W_1} \quad (2.3)$$

เมื่อ MEE คือ ค่าประสิทธิภาพในการกีดกันน้ำ

W_1 คือ น้ำหนักของไม้ที่ทำการเคลือบ (Coated sample) ซึ่งเก็บไว้ที่สภาวะ 25 °C ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ 97% เป็นเวลา 7 วัน

W_2 คือ น้ำหนักของไม้ที่ไม่ได้เคลือบ (Uncoated sample) ซึ่งเก็บไว้ที่สภาวะ 25 °C ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ 97% เป็นเวลา 7 วัน

ในการทำให้สารเคลือบต่างๆ เกิดการซึมซับเข้าไปยังช่องว่างของไม้ (Lumen wall) จะทำให้เกิดเป็นการเคลือบแบบภายในซึ่งการซึมซับนี้จะมีข้อจำกัดอยู่ที่ขนาดของไม้ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทำโดยการตัดไม้ให้มีขนาด 1.5x0.25x8 นิ้ว (RxTxL) เก็บตัวอย่างไม้ไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ที่ 65% จุ่มขึ้นตัวอย่างลงในสารขับไล่น้ำ (Water repellent) เป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไปเก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65% นำขึ้นไม้ตัวอย่างแช่ลงในน้ำเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นวัดขนาดของด้านสัมผัส แล้วนำมาคำนวณความสามารถในการขับไล่น้ำ

ความสามารถในการขับไล่น้ำ (Water repellency , WR)

$$WR = \frac{(T_1 - T_2) \times 100}{T_1} \quad (2.4)$$

เมื่อ WR คือ ความสามารถในการขับไล่น้ำ

T_1 คือ การบวมตัวของด้านสัมผัสของไม้ที่ไม่ได้จุ่มสารขับไล่น้ำ หลังแช่น้ำเป็นเวลา 30 นาที

T_2 คือ การบวมตัวของด้านสัมผัสของไม้ที่ได้จุ่มสารขับไล่น้ำ หลังแช่น้ำเป็นเวลา 30 นาที

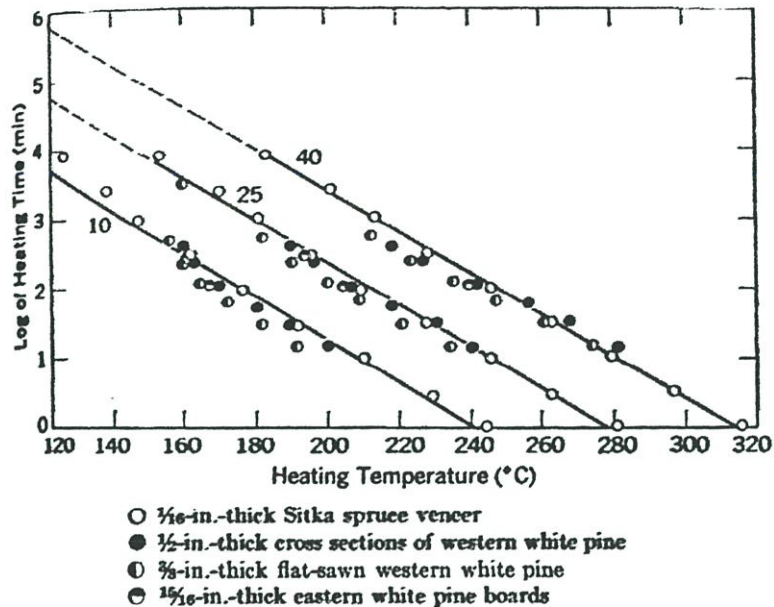
ค่า WR จะมีค่าอยู่ในช่วง 40-60% ซึ่งไม้ในเขตร้อน (Tropical wood) จะมีค่าที่สูงกว่า เนื่องจากส่วนของแวกซ์ในไม้มีโอกาสหลุดและถูกสกัดออกไปได้ง่ายและมากกว่า

นอกจากส่วนของแวกซ์ ที่มีอยู่ในเซลล์ของไม้โดยตามธรรมชาติแล้ว การซึมซับมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดการบวมตัว (Nonswelling monomer) แล้วทำการพอลิเมอไรเซชันภายในโครงสร้างของไม้ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งของการเคลือบผิวแบบภายใน ตัวอย่างเช่น ซีมซ์บเมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate) เข้าไปยังช่องว่างภายในเซลล์ของไม้แล้วพอลิเมอไรเซชัน จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของการบวมตัว (Percent reduction in swelling , R) มีค่าเพียง 10-20%

3. การลดความสามารถการชอบน้ำของผนังเซลล์ (Hygroscopicity reduction)

การลดลงของอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเซลล์ของไม้กับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งเป็นพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซี (Hydroxy group) ขององค์ประกอบของเซลล์ไม้ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) กับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งการลดอันตรกิริยานี้สามารถทำได้โดยการลดจำนวนหมู่ไฮดรอกซีที่ผนังเซลล์ของไม้ลง โดยการซึมซับของมอนอเมอร์เข้าไปยังช่องว่างในไม้แล้วพอลิเมอไรเซชันให้เป็นพอลิเมอร์ ซึ่งจะช่วยลดการบวมตัวของไม้ได้ นอกจากนั้นการเติมสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซีที่ผนังเซลล์ของไม้ก็เป็น การช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการบวมตัวได้อีกวิธีหนึ่ง

นอกจากการใช้สารเคมีเพื่อลดพันธะไฮโดรเจนแล้ว การปรับปรุงไม้ด้วยความร้อน (Heat treatment) ก็สามารถลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างผนังเซลล์กับโมเลกุลของน้ำได้เช่นกัน ซึ่งการปรับปรุงด้วยความร้อนจะทำให้เกิดการสูญเสียโมเลกุลของน้ำ อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันเองของหมู่ไฮดรอกซี (Hydroxy) ของโครงสร้างไม้ การปรับปรุงโดยการให้ความร้อนแก่ไม้ที่อุณหภูมิ 230 °C ต้องทำในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนในเวลาสั้นๆ เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของการบวมตัว (R) มีค่าประมาณ 40% ซึ่งการใช้อุณหภูมิต่ำแต่ใช้เวลานานก็ให้ผลเช่นเดียวกัน แต่การปรับปรุงโดยใช้ความร้อนจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของไม้ได้ โดยพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิ 320 °C เป็นเวลา 1 นาที หรือ ใช้อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 1 สัปดาห์เพื่อให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของการบวมตัว (R) มีค่าประมาณ 40% จะทำให้ค่าความแข็ง ลดลง 21 % ความเหนียวลดลง 40 % และความต้านทานการขีดถูลดลง 90 % แต่การปรับปรุงด้วยวิธีนี้ถือเป็นวิธีที่ง่ายและมีต้นทุนที่ต่ำที่ใช้ในทางการค้า



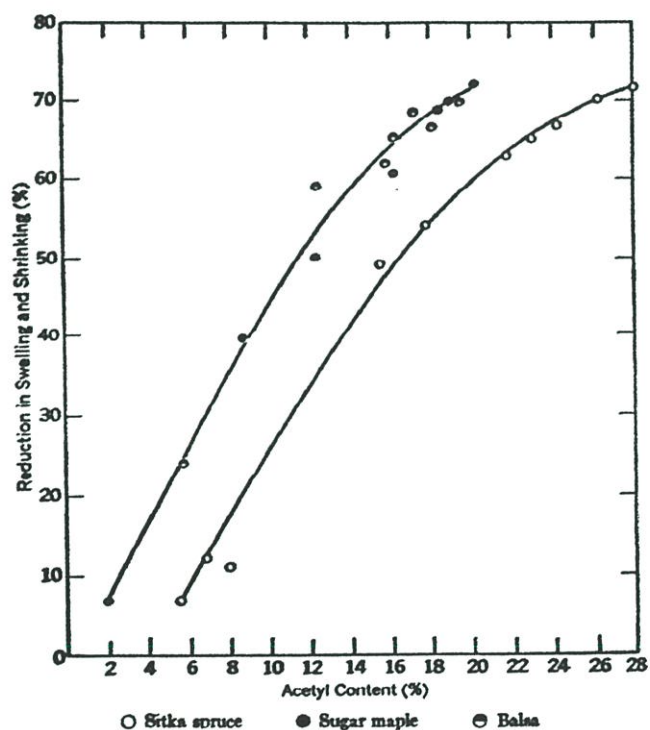
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงด้วยความร้อน เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพต่อรูปร่างให้มีการบวมตัวลดลง 10 25 และ 40 เปอร์เซ็นต์ [3]

4. การเชื่อมโยง (Crosslinking)

การเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของไม้ โดยมากจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากหมู่ไฮดรอกซีของผนังเซลล์ ซึ่งอาจเชื่อมโยงภายในสายโซ่เส้นเดียวกัน (Intramolecular crosslink) หรือต่างสายโซ่ (Intermolecular crosslink) หมู่ไฮดรอกซีดังกล่าวสามารถพบได้จากสายโซ่ของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) รวมถึงพอลิเมอร์บางชนิด โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน การเกิดการเชื่อมโยงนั้นในปฏิกิริยาจำเป็นต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด (Acid catalyst) ร่วมอยู่ด้วย เมื่อเกิดการเชื่อมโยงแล้วจะมีผลทำให้ความเสถียรภาพด้านรูปร่างสูงมาก โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์พอลิเมอร์ในไม้ (Weight percent gain, WPG) = 3.1% จะให้ค่า R = 47% และที่ WPG = 5.5% ค่า R = 60% แต่ถ้าค่า WPG = 7% ค่า R = 90%

แต่การเชื่อมโยงก็มีผลทำให้สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) บางประการลดลง เช่น การซึมซับไม้ด้วยฟอร์มอลดีไฮด์ (Formaldehyde) ทำให้ค่า Toughness และ Abrasion resistance ลดลงอย่างมาก ค่า Crushing strength และ Bending strength ลดลงประมาณ 20% เมื่อเทียบกับไม้ที่ไม่ผ่านการซึมซับ ส่วนค่า Impact bending strength ลดลงมากกว่า 50% ซึ่งการลดลงของสมบัติเชิงกลดังกล่าวอาจเป็นไปได้ว่าในการเชื่อมโยงซึ่งต้องใช้กรด

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กรดอาจทำให้สายโซ่ของเซลลูโลสเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งทำให้สายโซ่ขาดสั้นลงความสามารถในการรับแรงจึงลดลง และเมื่อพิจารณาค่า Impact bending strength แสดงว่าไม้ที่ทำการซึมซับด้วยฟอร์มาดีไฮด์มีความเปราะมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของส่วนที่เป็นสะพานเชื่อมโยง (Crosslink bridge) มีโครงสร้างที่สั้น (-O-C-O-) ทำให้มีความยืดหยุ่นต่ำ ในการปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่น (Flexibility) สามารถทำได้โดยการเลือกใช้มอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ และต้องมีจำนวนคาร์บอนอะตอมระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ค่อนข้างยาว เช่น 4-10 คาร์บอนอะตอม ตัวอย่างของมอนอเมอร์ชนิดนี้เช่น อีพอกไซด์ (Epoxyde) หรือ ไอโซไซยาเนต (Isocyanate) ซึ่งการใช้มอนอเมอร์ประเภทนี้จะเป็นการช่วยลดการสูญเสียสมบัติเชิงกลให้น้อยลง โดยที่ยังได้สมบัติเสถียรภาพทางรูปร่างเหมือนเดิม



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์หมู่อะซิติกกับค่าการลดลงของการบวมตัวหรือการหดตัวของแผ่นไม้บางประกอบ (Veneer) ของไม้ ชนิดต่างๆ [3]

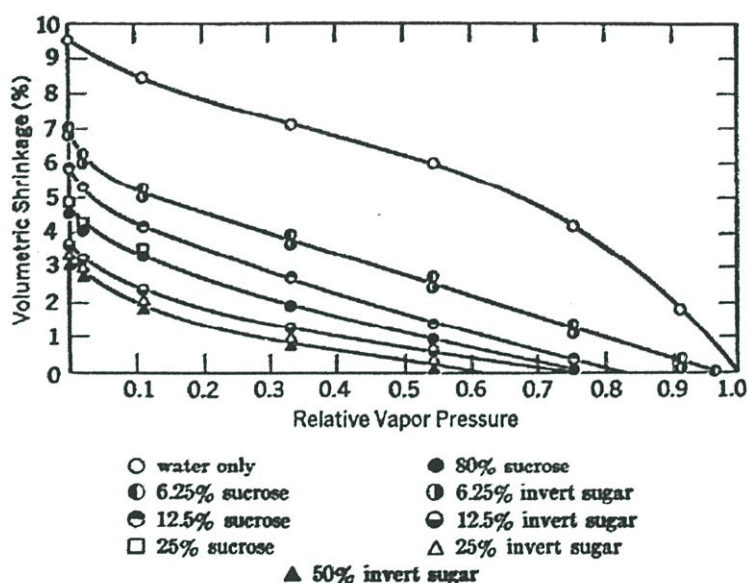
5. การทำให้เนื้อไม้แน่นขึ้น (Bulking treatment)

การปรับปรุงเสถียรภาพด้านรูปร่างของไม้ ด้วยวิธีนี้แบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ

- 5.1 Nonbonded-Leachable
- 5.2 Nonbonded-Nonleachable
- 5.3 Bonded-Nonleachable

5.1 Nonbonded-Leachable

การปรับปรุงโดยใช้สารเคมีที่ไม่เกิดพันธะเคมีกับผนังเซลล์ของไม้ เมื่อสารเคมีชนิดนี้เข้าอยู่ในช่องว่างภายในเนื้อไม้จนเต็มแล้ว จะทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกเข้าภายในเซลล์หรือระเหยออกจากเซลล์ไม่ได้เนื่องจากสารเหล่านี้จะทำให้ค่าความดันไอของน้ำที่อยู่ในเนื้อไม้ลดลง เมื่อไม่เกิดการถ่ายเทโมเลกุลของน้ำจึงทำให้ไม้ไม่เกิดการบวมตัวหรือหดตัวซึ่งก่อให้เกิดความมีเสถียรภาพทางรูปร่าง แต่สารเคมีประเภทนี้สามารถถูกชะล้างออกได้โดยน้ำได้ง่ายจึงต้องมีการเคลือบผิวภายนอกของไม้อีกครั้ง ตัวอย่างสารเคมีประเภทนี้ เช่น สารละลายน้ำตาลเกลือของโลหะต่างๆ พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol ,PEG) โดย PEG1000 ให้ค่า $R = 80\%$



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันไอสัมพันธ์กับค่าการลดลงของการบวมตัวหรือการหดตัวของไม้สน เมื่อใช้สารละลายน้ำตาลที่มีชนิดและความเข้มข้นต่างกัน [3]

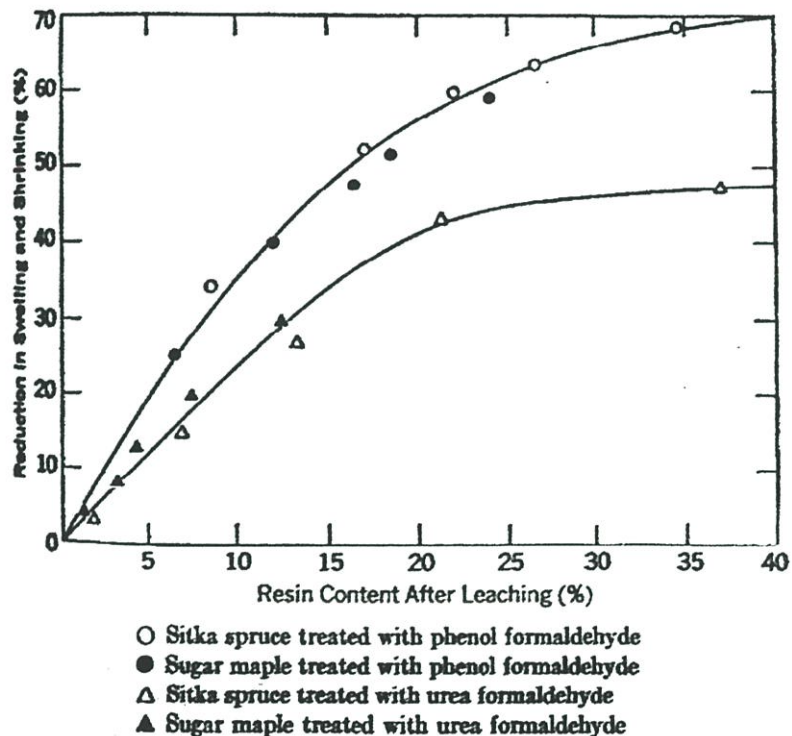
5.2 Nonbonded-Nonleachable

ตัวอย่างของสารเคมีประเภทนี้เช่น เรซินของฟีนอลฟอร์มอลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde) ซึ่งเป็นสารเคมีที่เมื่อเข้าอยู่ในเนื้อไม้แล้ว สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ด้วยความร้อน โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วไม่สามารถถูกชะล้างออกได้ ทำให้น้ำไม่สามารถแทรกเข้าภายในเซลล์ได้กระบวนการประเภทนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

- Impreg เป็นการซึมซับเรซินด้วยความดันแล้วทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยความร้อน โดยไม่ใช้ความดันร่วมด้วยในขณะที่พอลิเมอไรเซชัน ไม้ที่ได้จะให้ค่า $R = 60 - 70\%$

- Compreg เป็นการซึมซับเรซินด้วยความดันแล้วทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยความร้อน โดยใช้ความดันร่วมด้วยในขณะที่พอลิเมอไรเซชัน ซึ่งไม้ที่ได้จะให้ค่า $R = 95\%$

จะเห็นได้ว่ากระบวนการแบบ Compreg จะให้ไม้ที่มีการต้านทานการบวมตัวสูงกว่า หรือมีการบวมตัวต่อน้ำต่ำกว่าแบบ Impreg แสดงว่ากระบวนการแบบ Compreg ให้ไม้ที่มีเสถียรภาพทางรูปร่างสูงกว่า



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณเรซินในเนื้อไม้ กับค่าการลดลงของการบวมตัวหรือการหดตัวของไม้ Sitka spruce เมื่อใช้สารละลายฟีนอลฟอร์มอลดีไฮด์เรซิน และยูเรียฟอร์มอลดีไฮด์เรซิน ในการปรับปรุงสมบัติความมีเสถียรภาพทางรูปร่าง [3]

5.3 Bonded-Nonleachable

สารเคมีประเภทนี้จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ฟังก์ชันของผนังเซลล์เกิดเป็นพันธะเคมี (Chemical bond) ทำให้ไม้ไม่สามารถชะล้างออกมาได้ สารประเภทนี้ได้แก่ สารประเภทแอนไฮไดรด์ (Anhydride) อีพอกไซด์ (Epoxy) ไอโซไซยาเนต (Isocyanate) โดยปกติจะให้ค่า $R = 70-75\%$ และให้ปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ประมาณ 20-30 %

2.6 การแพร่ในไม้ (Diffusion in wood) [4]

การแพร่ (Diffusion) คือ ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของมวลสารในบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นของสารนั้นต่ำกว่าโดยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งทั้งสองบริเวณมีความเข้มข้นเท่ากัน ซึ่งเมื่อเกิดการแพร่ขึ้นแล้วทำให้ค่าเอนโทรปี (Entropy) ของระบบสูงขึ้น ในวัสดุที่มีความเป็นรูพรุน เช่น ไม้ การแพร่ของสารที่เกิดขึ้นโดยมากจะเกิดขึ้นเนื่องจาก ก๊าซ ไอน้ำ น้ำภายในเซลล์ หรือสารอื่นๆ ที่แพร่เข้าสู่เซลล์ โดยการแพร่นั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากช่องว่างภายในไม้ (Void structure) ซึ่งการแพร่ของของเหลวภายในไม้ส่วนมากจะเกิดผ่านกลไกของแรงคาพิลลารี (Capillary force) การอธิบายการแพร่ของของเหลวสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปทั่วไป โดยใช้กฎการแพร่ของฟิค (Fick's law)

1. กฎการแพร่ข้อที่หนึ่งของฟิค (Fick's first law of diffusion)

$$\frac{dm}{dt} = -D \frac{dc}{dx} dy . dz \quad (2.5)$$

จากสมการดังกล่าว แสดงถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของมวลของสารเทียบกับเวลา (dm/dt) ซึ่งมีค่าแปรผันตามอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ตำแหน่งต่างๆ ในทิศทางในแนวแกน X หรือ dc/dx โดยที่ตำแหน่งนั้นๆ จะมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $dy . dz$ และมีความสัมพันธ์ของการแพร่ (Diffusion coefficient, D) เป็นค่าคงที่

เมื่อควบคุมให้ความเข้มข้นของสารที่เกิดการแพร่ในบริเวณต่างๆ ของไม้มีค่าคงที่ จะทำให้ค่าการกระจายตัวของความเข้มข้น (Concentration gradient) มีค่าเท่ากันตลอดทั่วทั้งชิ้นไม้ อันเป็นผลเนื่องจากการแพร่มีค่าคงที่ ซึ่งสภาวะที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว จะเรียกว่าสภาวะคงที่ (Steady state condition) โดยที่สภาวะนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลของสารภายในไม้ จะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{m}{t} = D \cdot A \frac{(C_1 - C_2)}{(X_1 - X_2)} \quad (2.6)$$

เมื่อ	m/t	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลของสารภายในไม้
	D	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของไม้ในทิศตั้งฉากกับการแพร่ หรือการไหล
	X_1, X_2	คือ	ระยะทางจากจุดเริ่มต้นของการไหลมายังตำแหน่งใดๆ
	C_1, C_2	คือ	ความเข้มข้นของสารที่สภาวะสมดุลในตำแหน่งต่างๆ

2. กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law of diffusion)

ในการแพร่ของของเหลวเข้าสู่ไม้หรือการสูญเสียออกจากไม้ที่มีการกระจายตัวของความเข้มข้นของสารที่เกิดการแพร่ที่ระยะความลึกต่างๆ ไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเวลาในการแพร่ ทำให้การไหลภายในไม้ไม่สม่ำเสมอ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถหาได้ดังกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค

$$\frac{dc}{dt} = D \cdot \frac{d^2c}{dx^2} \quad (2.7)$$

จากความสัมพันธ์ของอัตราในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเทียบกับเวลา (dc/dt) ในทิศทางของการแพร่ตามแกน X จะแปรผันตามอนุพันธ์อันดับที่สองของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของเหลวเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของไม้ ตามแกน X

กฎการแพร่ข้อที่สองของ Fick เป็นความสัมพันธ์ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ในสภาวะที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลง (Unsteady state condition) ของความเข้มข้นที่ไม่สม่ำเสมอของไม้ ที่ขึ้นกับเวลาในการแพร่ หรืออุณหภูมิในการทดสอบ

2.6.1 การแพร่ของตัวถูกละลายเข้าสู่ไม้ที่อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลาย

(Diffusion of solute into solvent-saturated wood)

การแพร่แบบนี้เป็นการแพร่ที่ไม่มีการอิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลาย ตัวอย่างเช่นการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้าไปยังไม้ที่มีการอิ่มตัวไปด้วยน้ำ ซึ่งเมื่อเกิดการแพร่แล้วขนาดของไม้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่ต้องนำมาพิจารณาได้ แต่การตรวจหาค่าอัตราการแพร่ของสารนั้นจะต้องพิจารณาถึงทิศทางของการเกิดการแพร่ของสารด้วย ตัวอย่างเช่น

การหาค่าอัตราการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้าสู่ไม้สปรูซ (Spruce) ที่ถูกทำให้อิ่มตัวไปด้วยน้ำ (Water-saturated) โดยการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป ในการศึกษาการแพร่ของสารละลายนั้นจะศึกษาถึงทิศทางของการแพร่ในทิศทางขนานเส้นใย (Fiber direction) และทิศทางขวางเส้นใย (Across the fiber) ขนาดของไม้ที่นำมาศึกษามีขนาดในช่วง 0.17 – 20 เซนติเมตร โดยที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างกัน และได้ผ่านการอบแห้ง (Oven dry) จนมีน้ำหนักคงที่ประมาณ 2.75 กรัมเท่ากันทุกชิ้น ตัวอย่างไม้ที่ถูกทำให้อิ่มตัวไปด้วยน้ำจะนำไปจุ่ม (Immerse) ลงในสารละลายทั้งสองที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนข้างต้น โดยความเข้มข้นของสารละลายสามารถหาได้จากการหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical conductivity)

เมื่อสารละลายเกิดการแพร่เข้าไปในไม้ จะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกลดลง ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะลดลงเมื่อเวลามากขึ้น ผลการทดลองที่ได้เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เกิดการแพร่เพื่อให้ความเข้มข้นภายนอกลดลงครั้งหนึ่งกับอัตราส่วนของความยาวของไม้ต่อพื้นที่หน้าตัดของไม้ พบว่าเมื่อไม้มีความยาวเป็น 3 เท่าของพื้นที่หน้าตัดจะใช้เวลาในการแพร่มากขึ้นอย่างมากโดยมีแนวโน้มเดียวกันทั้งที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แต่เมื่อใช้ไม้ที่มีขนาดเดียวกันจะพบว่าอัตราเร็วในการแพร่ของสารในทิศทางที่ขนานเส้นใยจะมีค่ามากกว่าในแนวขวางเส้นใยประมาณ 3 เท่า และผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแพร่โดยที่อุณหภูมิ 20 และ 70 °C พบว่า เวลาที่เกิดการแพร่เพื่อให้ความเข้มข้นภายนอกลดลงครั้งหนึ่งมีค่าเป็น 5.7 และ 3.7 ชั่วโมงในกรณีที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และมีค่าเป็น 2.75 และ 1.1 ชั่วโมง เมื่อใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเป็นผลเนื่องจากอัตราการแพร่ของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มากกว่าโซเดียมไอออน (Na^+) และเมื่อศึกษาการแพร่โดยใช้ไม้ที่มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ (Cubic) และเปลี่ยนไปใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ผนังเซลล์เกิดการบวมตัวอย่างมาก พบว่า การแพร่ในทิศทางขวางเส้นใยมีค่ามากกว่าการแพร่ในทิศตามเส้นใย (Longitudinal)

2.6.2 การแพร่โดยอาศัยโครงสร้างที่เป็นช่องว่างภายในไม้

(Diffusion through the void structure of wood)

การแพร่โดยอาศัยส่วนที่เป็นช่องว่างภายในไม้ โดยมากจะเกี่ยวข้องกับการแพร่ของก๊าซ ในที่นี้จึงจะกล่าวถึงการแพร่ของก๊าซที่เกิดขึ้นภายในไม้แห้ง (Oven dry) ในการศึกษาการแพร่ของก๊าซนั้น สามารถนำไปศึกษาการเชื่อมต่อกันของโครงสร้างไม้ (Intercommunicating structure) ระหว่างช่องพิท (Pits) กับส่วนของไม้อ่อน (Softwood) ตัวอย่างของการศึกษาดังนี้

การศึกษาการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านโครงสร้างของไม้ Sitka spruce ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.365 ในทิศทางการแพร่ทั้งในด้านตั้งฉากกับเส้นใย (Tangential) และขนานกับแนวเส้นใย (Longitudinal) ภายใต้สภาวะคงที่ ตัวอย่างไม้บางหรือวีเนียร์ (Veneer) ที่ใช้มีขนาดความหนา 1/32 หรือ 1/10 นิ้ว และขนาดกว้างxยาว เท่ากับ 1x1 เซนติเมตร การทดสอบการแพร่ทำโดยนำไม้ตัวอย่างที่เตรียมไว้ปิดปลายด้านหนึ่งของท่อที่มีการไหลผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกด้านหนึ่งของแผ่นไม้ตัวอย่างจะประกอบไปด้วยหลอดที่สามารถดูดซับ (Absorption tube) ก๊าซที่แพร่ผ่านทะลุออกมาได้ ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านออกมาได้จะหาได้จากการชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของ Absorption tube ที่เพิ่มขึ้น และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านออกมาเทียบกับเวลา ก็คือค่าอัตราการแพร่ผ่าน (Rate of diffusion) โดยที่อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองจะต้องมีค่าคงที่และเหมาะสม ซึ่งถ้าทิศทางการแพร่ตั้งฉากกับแนวเส้นใย โดยพื้นที่การแพร่ผ่านของแผ่นไม้เท่ากับ 19.6 cm²

อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 90 ml/min แต่ถ้าพื้นที่การแพร่ผ่านของแผ่นไม้เท่ากับ 2.83 cm² อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องมีค่าเท่ากับ 120 ml/min เพื่อให้อัตราการไหลของก๊าซอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state of flow) จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ไม้บางที่มีความหนา 1/32 นิ้วจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่อยู่ในช่วง $7.2 \times 10^{-5} - 7.6 \times 10^{-5}$ cm²/sec เมื่อศึกษาผลของปริมาณความดันไอของน้ำ (Water vapor pressure) ที่มีอยู่ในไม้บางที่ทดสอบ (มีค่าต่ำมาก) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) พบว่าเมื่อความดันไอของน้ำในแผ่นไม้บางมีค่ามากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความชื้นในไม้จะทำให้ส่วนของช่องพิท (Pits) อยู่ในสภาวะที่สามารถเกิดการแพร่ผ่านได้ดีขึ้นทำให้ก๊าซมีการแพร่ผ่านขึ้นไม้ได้มากขึ้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- พจน อนุวงศ์ และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาความยากง่ายในการอาบน้ำยาของไม้ชนิดต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการทำการอาบน้ำยาของไม้แต่ละชนิดว่าไม้ชนิดใดจะทำการอาบน้ำยาป้องกันรักษาเนื้อไม้ได้ยากง่ายเพียงใด โดยทำการซึมน้ำยาครีโอลิโตนผสมกับน้ำมันดีเซล ในอัตราส่วน 50:50 โดยปริมาตร แล้วตรวจสอบความลึกของน้ำยาในเนื้อไม้ พบว่าไม้ตีนเป็ด (*Alstonia scholaris*) มีความสามารถในการอาบน้ำยาอยู่ในระดับชั้นที่ 1 ซึ่งแสดงว่าสามารถอาบน้ำยาได้ง่ายมาก ทำให้เมื่อตรวจสอบความลึกของน้ำยาในเนื้อไม้พบว่าน้ำยาสามารถเข้าไปอยู่ในเนื้อไม้ได้อย่างเต็ม
- Paul R. Blankenhorn [13] และคณะศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลบางประการของ Bark board ที่ปรับปรุงด้วยเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (MMA) และอีพอกซี (Epoxy) ด้วยวิธีการซึมน้ำยาด้วยความดันแบบเต็มเซลล์ สมบัติเชิงกลที่ศึกษา ได้แก่ สมบัติต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) และสมบัติการโค้งงอ (Flexural properties) ของไม้ก่อนและหลังการซึมน้ำยาด้วยความดัน สภาวะที่ใช้ในการซึมน้ำยาเป็นดังนี้ ทำสุญญากาศครั้งแรกที่ 0.027 kPa ซึมน้ำยาด้วยความดันที่ 1379 kPa เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำ Bark board ที่ได้ไปพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 20 และ 24 ชั่วโมง แต่ในกรณีของอีพอกซีหลังจากซึมน้ำยาแล้วให้ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (เพื่อให้เปลี่ยนสภาพเป็น B-stage) แล้วนำไปพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนผสมของเรซินที่ใช้ในการซึมน้ำยาด้วยความดัน ได้แก่ Methyl methacrylate – Trimethylol propane trimethylate – Azo (MMA:TMPTMA: AZO) ในอัตราส่วน 100:10:0.5 โดยน้ำหนักเรซิน และสูตรผสมของอีพอกซีที่ศึกษา ได้แก่ EPON 828[®] - Styrene oxide – N,N-diethyl-

1,3 propanediamine (Epoxy:SO:DEAPA) เป็น 100:25:12.06 โดยน้ำหนักเรซิน จากการทดลองพบว่าเมื่อความหนาแน่นของไม้แห้งก่อนซึบ (Oven dry density) มีค่าสูงขึ้น จะทำให้เปอร์เซ็นต์การแทรกซึมของเรซินในเนื้อไม้ (Polymer loading) จะมีค่าลดลง และยังพบอีกว่า MMA มีความสามารถในการแทรกซึมของเรซินในเนื้อไม้สูงกว่าอีพอกซีในกรณีที่ไม้มีความหนาแน่นของไม้อบแห้งมากกว่า เนื่องจากขนาดโมเลกุลของ MMA เล็กกว่า อีพอกซี การทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic, MOE) และ Crushing strength ทั้งในการวัดแบบซึบและแบบโค้งงอพบว่า ไม้ที่ไม่ได้ซึบเรซินจะมีค่าต่ำกว่าไม้ที่ซึบเรซินด้วย MMA และ Epoxy ตามลำดับ

- M. Kemal Yalinkilic และคณะ [14] ทำการศึกษาการติดตามปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของ ไวนิลมอนอเมอร์ ในกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้านทานการติดไฟและความทนทานต่อจุลินทรีย์ของไม้ด้วยกรดบอริก (Boric acid) โดยการซึบไม้ไวนิลมอนอเมอร์ด้วยความดันแบบเต็มเซลล์ เพื่อลดการชะล้างของกรดบอริกออกจากเนื้อไม้ ทำได้โดยการซึบสไตรีนมอนอเมอร์และเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์เข้าไปยังเนื้อไม้ที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติแล้วด้วยกรดบอริกเข้มข้น 1 % โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ VAZO (a-a'-Azobis-isobutyronitrile) และ Benzoyl peroxide สภาวะที่ใช้ในการซึบเรซินคือ ทำสุญญากาศครั้งแรก 15 นาที จากนั้นซึบความดันพร้อมกับเรซินอีก 15 นาที แล้วให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 60 และ 90 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วศึกษาการชะล้างของกรดบอริกจากไม้ และ ความมีเสถียรภาพรูปร่างของไม้ จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการซึบไม้ไวนิลมอนอเมอร์ด้วยความดันเข้าไปยังเนื้อไม้แล้วให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน จะทำให้ความเสถียรต่อรูปร่าง (Dimension stability) ของไม้มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงค่าความต้านทานการบวมตัวของไม้ (ASE) ในแนวรัศมีของไม้ที่ทำการซึบเรซินจะมีค่ามากกว่าไม้ที่ไม่ได้ซึบเรซิน นอกจากนั้นยังทำให้อัตราเร็วในการชะล้างของกรดบอริกออกจากเนื้อไม้มีค่าลดลง เนื่องจากไม้ที่ซึบเรซินมีค่าการดูดซับความชื้น (WHC) ที่ต่ำกว่าไม้ที่ไม่ได้ซึบเรซิน
- W. Dale Ellis [15] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติความมีเสถียรภาพต่อรูปร่างของไม้ที่มีต่อความชื้น โดยการซึบมอนอเมอร์ เข้าไปยังเนื้อไม้แล้วทำการพอลิเมอร์ไรเซชัน ไม้ตัวอย่างที่ใช้ได้แก่ เมเปิล โอ๊ค และ ไม้สน ประเภทของมอนอเมอร์ที่ใช้ได้แก่ Acrylic และ Methacrylic โดยใช้ไม้ขนาด 2.5x2.5x0.6 เซนติเมตร (RxTxL) สภาวะในการซึบความดัน ทำสุญญากาศที่ 0.7-1.3 kPa เป็นเวลา 30 นาที เติมนอนอเมอร์เข้าไปยังถังซึบความดันจนท่วมไม้ แซ่ทิ้งไว้ที่ความดันบรรยากาศที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ คือ 4 วัน 20 °C , 24 ชั่วโมง

60 °C , 24 ชั่วโมง 105 °C เมื่อครบตามเวลาแล้วนำไม้ที่ได้มาแช่สารละลายของ 2,2-Azobis-(2-ethylbutyronitrile) เป็นเวลา 7 วัน แล้วนำไปพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 15 นาที จากการศึกษาพบว่า ปริมาณพอลิเมอร์ในไม้ (Polymer loading) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ถ้ามอนอเมอร์มีเข้มข้นมากจะให้ค่าปริมาณพอลิเมอร์ในไม้มากขึ้น โดยที่เมทิลเมทาคริเลตให้ปริมาณพอลิเมอร์ในไม้ ประมาณ 40-50 % และเมื่อไม้มีปริมาณพอลิเมอร์ในไม้ มากขึ้นทำให้ไม้มีค่าการบวมตัว (Swelling) ลดลงแสดงว่าไม้มีเสถียรภาพทางรูปร่างดีขึ้น

- W. Dale Ellis และ J. L. O'dell [16] ปรับปรุงสมบัติความมีเสถียรภาพต่อรูปร่างของไม้ที่มีต่อไอน้ำหรือน้ำ และความแข็ง (Hardness) โดยการทำให้เป็นวัสดุประกอบระหว่างไม้กับพอลิเมอร์ (WPC) ไม้ตัวอย่างที่ใช้ได้แก่ แก่ เมเปิล โอ๊ค และ ไม้สน โดยใช้ไม้ขนาด 2.5x2.5x0.6 เซนติเมตร ให้เกิดการซึมซับมอนอเมอร์ต่างๆ ได้แก่ Hexanediol diacrylate, Hydroxyethyl methacrylate, Hexamethylene diisocyanate และ Maleic anhydride แล้วทำการพอลิเมอไรเซชันโดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ 2,2-Azobis-(2-ethylbutyronitrile) เข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ สภาวะในการซึมซับทำโดย ลดความดันลงที่ -90 kPa เป็นเวลา 30 นาที เติมนอนอเมอร์เข้าไปยังถึงซึมซับความดันจนท่วมไม้ แซ่ทิ้งไว้ที่ความดันบรรยากาศที่เวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 22 °C แล้วนำออกมาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 120 °C ด้วยความดัน 68.9 kPa (10 lb/in²) ผลการทดลองพบว่าไม้ที่ปรับปรุงด้วยการซึมซับมอนอเมอร์แล้ว จะมีอัตราการดูดซับน้ำต่ำกว่าไม้ที่ไม่ได้ปรับปรุงในช่วงแรก แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นไม้ที่ได้ปรับปรุงจะมีการดูดซับน้ำได้เท่ากับไม้ที่ไม่ได้ปรับปรุง และไม้ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย HDDA-HBMA-DesN 75 ในอัตราส่วน 1:2:1 จะให้ไม้ที่มีอัตราการดูดซับน้ำต่ำที่สุด การทดสอบค่าความแข็งของไม้พบว่าไม้ที่ปรับปรุงสมบัติจะให้ความแข็งที่เพิ่มขึ้น และความแข็งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่าวิภาคของพอลิเมอร์มีการยึดเกาะที่ดีกับวิภาคของไม้
- K. M. Idriss Ali และคณะ [17] ศึกษาผลของสารเติมแต่งชนิดใหม่ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์ที่ได้ทำการแช่เรซินของไม้ 2 ชนิด ได้แก่ Kadom และ มะม่วง (Mango) โดยการแช่ไว้ใน MMA แล้วทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยรังสีแกมมา จาก Co-60 ที่ความเข้ม 3 Mrad ด้วยอัตรา 0.8 Mrad/h ขนาดของไม้ที่ทดสอบโดยการแช่ 11x1x0.2 เซนติเมตร และศึกษาผลของสารเชื่อมโยงได้แก่ NVP TPGDA TMPTA และสารเติมแต่ง (ตัวเร่งปฏิกิริยา) คือ 0.1 % H₂SO₄ Urea และ Copper โดยสูตรผสมของเรซินประกอบด้วย MMA:MeOH ในอัตราส่วนโดยปริมาตร คือ 10 30 50 70 90 และ 100 จากการทดลองพบว่าที่ทุกอัตราส่วน

ผสมและทุกสูตรของไม้ Kadom จะเกิดการแทรกซึมของ MMA ได้ดีกว่า ไม้มะม่วง ทำให้มีค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading ,% PL) สูงกว่า เนื่องจากไม้ Kadom มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรผสมที่เติมสารเติมแต่งกับไม้ได้เติมสารเติมแต่ง พบว่าสูตรผสมที่เติมสารเติมแต่งมีค่า % PL สูงขึ้น โดยเมื่อใช้ 0.1 % H_2SO_4 เป็นสารเติมแต่งค่า % PL สูงขึ้นเล็กน้อย แต่ค่า Tensile strength จะมีค่าที่ลดลง เมื่อใช้ Urea เป็นสารเติมแต่งค่า % PL และ Tensile strength จะมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ 0.1 % H_2SO_4

- F. Thewander และคณะ [18] ศึกษากระบวนการป้องกันการเสียหายของผนังเซลล์ของไม้ เนื่องจากกระบวนการซึมซับด้วยความดัน (Impregnation) โดยการเปรียบเทียบระหว่างไม้ที่นำไปแช่น้ำแล้วนำมาอบแห้ง (Green) กับไม้ที่แช่น้ำแล้วนำมาซึมซับด้วยกลีเซอรอลด้วยความดัน (Green/impreg) แล้วนำมาอบแห้ง โดยศึกษาผลที่มีต่อสมบัติความแข็งแรงดึงของไม้ พบว่าไม้ที่แช่น้ำแล้วนำมาอบแห้งมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่า และเมื่อศึกษาลักษณะของการแตกหัก พบว่าไม้เกิดการเสียหายของผนังเซลล์ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในเนื้อไม้ (Moisture content) ในกระบวนการอบแห้งทำให้ไม้มีลักษณะของการแตกหักเป็นแบบเปราะ (Brittle) ในขณะที่ไม้ที่แช่น้ำแล้วนำมาซึมซับด้วยกลีเซอรอลจะมีการสูญเสียความชื้นในเนื้อไม้ต่ำ เนื่องจากกลีเซอรอลจะเกิดการแทนที่ความชื้นที่หายไปขณะอบแห้งจึงทำให้มีการเสียหายแบบเหนียว (Toughness)
- B. Meyer และคณะ [19] ศึกษาการปลดปล่อยฟอร์มอลดีไฮด์ออกจากตัวอย่างไม้ 5 ชนิดหลังจากทำการซึมซับได้แก่ Beech, Douglas-fir, Oak, Spruce และ Pine โดยหาปริมาณของฟอร์มอลดีไฮด์ที่ปลดปล่อยออกมาจากไม้ก่อนอบแห้ง (Green state) ซึ่งมีปริมาณความชื้นในเนื้อไม้มากกว่าหลังอบแห้ง (Dry state) พบว่า ปริมาณฟอร์มอลดีไฮด์ที่ปลดปล่อยออกมาจากไม้ก่อนอบแห้งในไม้ Oak มีปริมาณ 9 ppb ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงที่สุดและเมื่อเทียบกับไม้ชนิดอื่นๆ การปลดปล่อยของไม้หลังอบแห้งพบว่าไม้ Beech มีปริมาณต่ำที่สุดคือ 2 ppb ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าไม้ที่ผ่านการอบแห้งก่อนที่จะนำไปซึมซับด้วยฟอร์มอลดีไฮด์ (Dry state) จะมีการปลดปล่อยที่สูงกว่าไม้ที่ไม่ได้ทำการอบแห้ง (Green state) ยกเว้นไม้ Oak
- L. Wallstrom และคณะ [20] ศึกษาการกระจายตัวของสารเคมีได้แก่ Potassium glycerate และ Silver nitrate ในผนังเซลล์ของไม้ที่ทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงกับไม้ที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง ผลจากการศึกษาด้วย TEM พบว่าไม้ที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้งก่อนจะมีการกระจายตัว

ของซิลเวอร์ไอออน ในผนังเซลล์ที่ตำแหน่งต่างๆ มีความสม่ำเสมอมากกว่าเมื่อเทียบกับไม้ที่ทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง เนื่องจากไม้ที่ทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะเกิดการเสียสภาพของผนังเซลล์ ทำให้การกระจายตัวของสารเคมีไม่สม่ำเสมอเพราะเกิดการขัดขวางจากผนังเซลล์ ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอคาดว่าจะมีผลทำให้ความเสถียรต่อรูป ร้างลดลง

- M. H. Alma และคณะ [21] ศึกษาการเตรียมและตรวจวิเคราะห์คอมโพสิตระหว่างไม้บดกับ ฟีนอลโดยมีกรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของฟีนอล ซึ่งทำการ ศึกษา ถึงผลของอัตราส่วนของฟีนอลต่อปริมาณไม้ และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ จาก การศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนของฟีนอลต่อปริมาณไม้เพิ่มมากขึ้นฟีนอลจะเกิดปฏิกิริยากับ ส่วนของไม้ได้มากขึ้น โดยที่อัตราส่วนของฟีนอลต่อปริมาณไม้ เท่ากับ 4 จะให้ค่า Combined phenol สูงถึง 152 % ซึ่งให้ผลที่มีแนวโน้มเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของกรดไฮโดร- คลอริก พิจารณาผลของอัตราส่วนของฟีนอลต่อปริมาณไม้ที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลของฟีนอล เรซินที่ได้ พบว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้นซึ่งให้ผลที่เหมือนกับ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก
- Jong B. Ra [22] ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโบรอนในไม้สน (*Pinus spp.*) ปัจจุบันที่มีผลต่อการแพร่ (Diffusion) ที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณความชื้นในไม้ อุณหภูมิที่ใช้ในการ แพร่ และสภาวะของการแพร่ โดยควบคุมทิศทางการแพร่ของโบรอนให้เกิดขึ้นเพียงทิศทาง ใดทิศทางหนึ่งเท่านั้นซึ่ง ทิศทางหรือแนวในการแพร่ได้แก่ ทิศตามแนวเส้นใย (Longitudinal) แนวสัมผัสหรือตั้งฉากกับเส้นใย (Tangential) และในแนวรัศมี (Radial) สารละลายโบรอนที่ ใช้ในการศึกษาอยู่ในรูปของไดโซเดียมออกเตตาไฮดรเตตระไฮเดรต (Disodium octaborate tetrahydrate , DOT) ที่มีความเข้มข้น 25 % และไม้ที่ใช้มีขนาด 5x5x5 เซนติเมตรที่ผ่านการ อบแห้งจนมีน้ำหนักคงที่ ซึ่งจะมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.53-0.58 ปัจจุบันที่ศึกษาได้ แก่ ปริมาณความชื้นในไม้ 70 90 และ 110 % อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ 50 และ 90 °C เวลาในการแพร่ เข้าสู่ไม้ 0 1 4 9 16 และ 25 วัน และวิธีที่ใช้ในการแพร่ซึ่งประกอบด้วย การแพร่ชั้นตอนเดียว และการแพร่สองชั้นตอน วิธีการทดลองนำไม้ตัวอย่างขนาด 5x5x5 เซนติเมตร มาทำให้เกิดการซึมซับด้วยความดัน (Impregnation) ด้วยน้ำ นำมาเคลือบด้วย ยางซิลิโคน (Silicone rubber) เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นภายในไม้ ไม้ที่ได้นำมาเก็บใน ตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100 % (Relative humidity) เป็นเวลา 5 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 30 °C เพื่อให้ความชื้นภายในไม้มีค่าสม่ำเสมอทั่วกันทั้งชิ้น การแพร่ชั้น

ตอนเดียวทำโดยการตัดผิวหน้าของไม้ออกด้านหนึ่ง (โดยขึ้นอยู่กับทิศทางที่จะศึกษาการแพร่) แล้วจุ่มลงในสารละลายโบรอนตามเวลาที่กำหนด เมื่อครบตามเวลา นำชิ้นไม้ขึ้นมาตัดให้มีขนาด 0.4 เซนติเมตรแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วจึงนำไปอบให้แห้งจนกระทั่งน้ำหนักไม้คงที่ ไม้ตัวอย่างอบแห้งแล้วนำมาบดให้มีขนาด 20 เมช (mesh) หรือ 850 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโบรอนด้วยวิธีการไทเทรต ตามวิธีของ AWPA A2-95 จากการศึกษาพบว่าอัตราการแพร่ของโบรอนมีค่ามากขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการแพร่ในทุกทิศทางของการแพร่ เมื่อแนวการแพร่ของโบรอนอยู่ในแนวเส้นใย (Longitudinal) อัตราเร็วในการแพร่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นในไม้ และในแนวรัศมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นในไม้มีค่ามากกว่า 70 % แต่ในแนวเส้นสัมผัสความชื้นในเนื้อไม้ในช่วงที่ศึกษา (70-110 %) จะไม่มีผลต่ออัตราการแพร่ ผลเนื่องจากอุณหภูมิพบว่าอัตราการแพร่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และการทดสอบการแพร่โดยการจุ่มสองขั้นตอน ทำให้อัตราการแพร่ในแนวสัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่แนวเส้นใยและแนวรัศมีค่าจะเปลี่ยนแปลงไม่มาก เมื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นของโบรอนในไม้ที่สภาวะต่างๆ เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในแนวเส้นใยมีค่าสูงที่สุด และในแนวสัมผัสจะให้ค่าต่ำสุด โดยที่สัมประสิทธิ์การแพร่ในแนวเส้นใยจะมีค่าประมาณ 10-20 เท่าของด้านรัศมี และด้านรัศมีจะมีค่ามากกว่าด้านสัมผัส 2-4 เท่า

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เมทิลเมทาคริเลต มอนอเมอร์ (Methyl methacrylate monomer, MMA) เกรดการค้า บริษัท Pan Asia Industrial
2. เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fluka
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เข้มข้น 10 % บริษัท Fluka
4. โซเดียมซัลเฟตที่ปราศจากน้ำ (Sodium sulfate anhydrous) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fluka
5. ไซลีน (Xylene) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fluka
6. เอทานอล (Ethanol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fluka
7. เตตระไฮโดรฟิวแรน (Tetrahydrofuran , THF) เกรด HPLC บริษัท Fluka
8. สีนินดิเคเตอร์ 9955TP Light blue บริษัท Resin Art
9. ไม้พญาสัตบรรณ (*Alstonia scholaris* R. Br.) จากสวนป่าธรรมชาติ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ตู้อบความร้อน (Hot oven) รุ่น Model 17 Thelco บริษัท Precision Scientific
2. แผ่นอะลูมิเนียมฟอยด์ (Aluminium foil)
3. แท่นให้ความร้อนแบบหูลุม (Heating mantle)
4. ชุดสกัดซอกเลต (Soxhlet extractor)
5. ชุดสกัดแบบรีฟลักซ์ (Reflux extractor)
6. เครื่องเจลเพอเมชันโครมาโตกราฟี (Gel permeation chromatograph : GPC) รุ่น Water 150-C บริษัท Millipore
7. เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) รุ่น UV-160 บริษัท Shimadzu
8. เครื่องทดสอบอนุภาคประสงค์ (Universal tester) LLOYD รุ่น LR 30K บริษัท LLOYD Instrument
9. เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก (Thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Pyris 1 TGA บริษัท Perkin Elmer
10. เครื่องซึบชั้นน้ำยาด้วยความดัน (Vacuum-pressure treatment)

11. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) รุ่น DP-71 Type K บริษัท แสงไทยมิเตอร์
12. เครื่องสแกนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning electron microscope , SEM)
รุ่น Leo 1455VP บริษัท Leo Electron Microscopy Ltd.
13. เครื่องไมโครโทม (Microtome) รุ่น Leitz 1400

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ตัวอย่างไม้

- ตัวอย่างไม้ที่ใช้ในการศึกษามีด้วยกัน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ขนาด 2x2x6 เซนติเมตร และขนาด 2x2x30 เซนติเมตร
- โดยอยู่ในสภาวะแห้งในอากาศ (Air dry) ซึ่งมีปริมาณความชื้นอยู่ในเนื้อไม้ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์

3.3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีต่อกระบวนการซึมซับมอนอเมอร์เข้าในเนื้อไม้

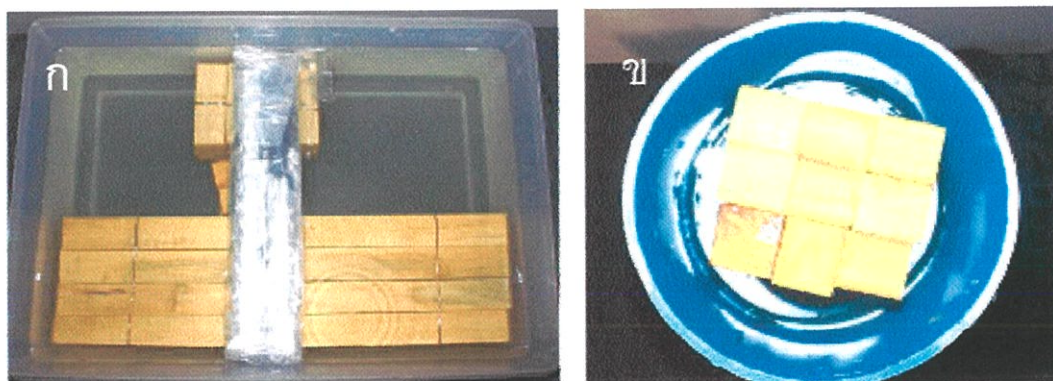
3.3.2.1 การซึมซับไม้แห้งในอากาศโดยไม่ใช้ความดัน

- นำไม้ตัวอย่างทั้ง 3 ขนาดมาวัดขนาดทั้ง 3 ด้าน คือ ด้านรัศมี (R) ด้านสัมผัส (T) และด้านยาว (L) พร้อมกับชั่งน้ำหนัก
- เติมน้ำเกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ในภาชนะสำหรับซึมซับมอนอเมอร์ โดยซึมซับตัวอย่างไม้ในแนวขนาน (Parallel) และแนวตั้ง (Perpendicular) ดังรูปที่ 3.1 เป็นเวลา 1 2 3 5 7 24 30 และ 48 ชั่วโมง
- เมื่อครบตามกำหนดเวลาต่างๆ นำไม้ออกมาชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ (% Monomer loading , % ML)

ร้อยละของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้

$$\% \text{ ML} = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100 \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- % ML คือ ค่าร้อยละของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ (Monomer loading percentage)
 - m_1 คือ น้ำหนักของไม้ก่อนการซึมซับด้วยมอนอเมอร์
 - m_2 คือ น้ำหนักของไม้หลังการซึมซับด้วยมอนอเมอร์ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 3.1 แสดงการจัดวางไม้ในการซึมซับมอนอเมอร์ (ก) ซึมซับในแนวนอน (Parallel) และ (ข) ซึมซับในแนวตั้ง (Perpendicular)

3.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีต่อกระบวนการการเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้

- นำไม้ที่มีปริมาณมอนอเมอร์ในเนื้อไม้สูงสุด (ซึ่งได้จากข้อ 3.3.1 และ 3.3.2) แช่ลงในสารละลายเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ในมอนอเมอร์ เข้มข้น 0.5 % w/w เป็นเวลา 5 วัน
- เมื่อครบกำหนด ชั่งน้ำหนักของไม้เพื่อหาค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion)
- นำไม้ที่ได้ทั้งหมดทั้ง 3 ขนาดห่อด้วยแผ่นอะลูมิเนียม นำเข้าอบเพื่อทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 90 120 และ 150 °C เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง
- นำไม้ที่ผ่านการพอลิเมอร์ไรเซชันแล้ว มาระเหยเพื่อเอามอนอเมอร์ที่เหลือออก
- อบแห้งไม้ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 105±5 °C จนกระทั่งไม้มีน้ำหนักคงที่ นำออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณค่าร้อยละของพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading, %PL)

ร้อยละของพอลิเมอร์ในเนื้อไม้

$$\% \text{ PL} = \frac{(m_2 - m_1) \times 100}{m_1} \quad (3.2)$$

- เมื่อ % PL คือ ค่าร้อยละของพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading percentage)
- m_1 คือ น้ำหนักของไม้ก่อนการปรับปรุงที่สภาวะอบแห้ง (Oven dry state)
- m_2 คือ น้ำหนักของไม้หลังการซึมซับด้วยมอนอเมอร์ แล้วพอลิเมอร์ไรเซชันให้เป็นพอลิเมอร์

3.3.4 ศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิผิวกับภายในเนื้อไม้ในการพอลิเมอไรเซชัน

- นำตัวอย่างไม้ขนาดได้แก่ ขนาด 2x2x2, 2x2x6 และขนาด 2x2x30 เซนติเมตร ขนาดละ 2 ชิ้น มาเจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2
- ตั้งอุณหภูมิตู้อบที่ 90 120 และ 150 °C วัดค่าอุณหภูมิโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ
- วัดอุณหภูมิที่ผิวของไม้บันทึกค่าเป็นอุณหภูมิที่ผิว (T_1) และอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (T_2)
- นำไม้ห่อด้วยแผ่นอะลูมิเนียมเนยมใส่ตู้อบพร้อมทั้งสอดสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ของเครื่องวัดอุณหภูมิเข้ายังรูที่เจาะไว้ ปิดรูด้วยยางซิลิโคน (Silicone rubber)
- บันทึกค่าอุณหภูมิ (T_1) และ (T_2) เพื่อคำนวณหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับภายในเนื้อไม้ (ΔT) ที่เวลาต่างๆ

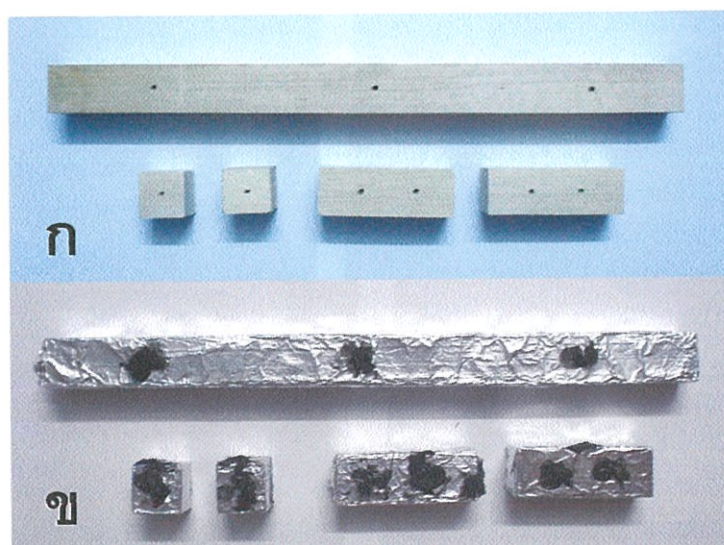
ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับภายในเนื้อไม้

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (3.3)$$

เมื่อ ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับภายในเนื้อไม้ (°C)

T_1 คือ อุณหภูมิที่ผิว (°C)

T_2 คือ อุณหภูมิที่ภายในเนื้อไม้ (°C)

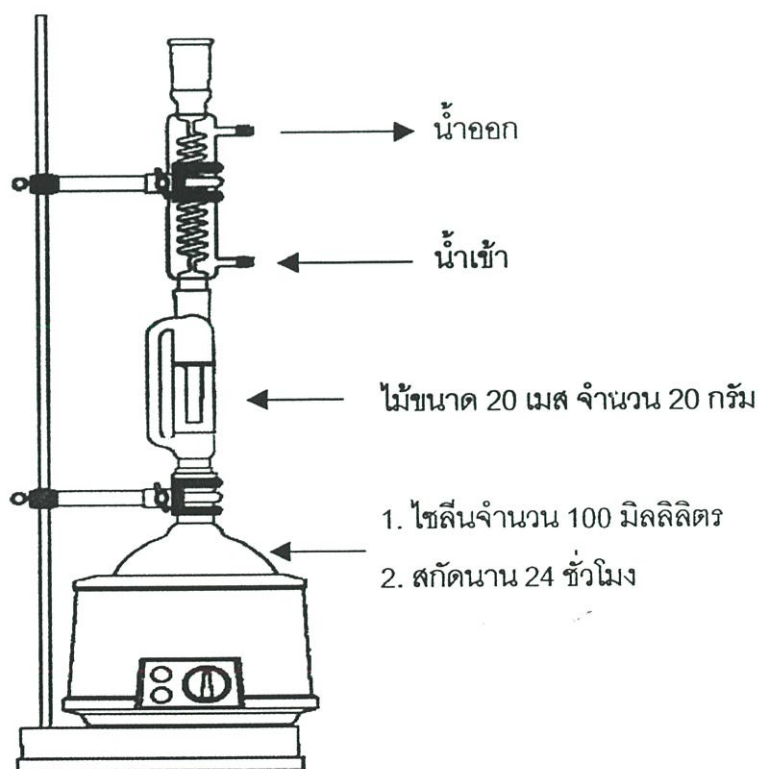


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะตัวอย่างชิ้นไม้ที่ใช้ทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิผิวกับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ในการพอลิเมอไรเซชัน (ก) ไม้ก่อนทดสอบ และ (ข) ไม้หลังการทดสอบ

3.3.5 ศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค GPC

3.3.5.1 การสกัดพอลิเมอร์ออกจากเนื้อไม้โดยใช้ตัวทำละลาย

- ใช้ไม้ตัวอย่างขนาด 2x2x6 เซนติเมตรที่ได้จากการพอลิเมอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิ 90 120 และ 150 °C เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง (จากข้อ 3.3.3) มาบดย่อยโดยใช้เครื่องบดไม้
- นำผงไม้ที่ได้มาบดแยกด้วยตะแกรงที่มีขนาด 20 เมช (mesh) เพื่อใช้ในการสกัด แล้วนำผงไม้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ชั่งน้ำหนักผงไม้ที่แยกได้จำนวน 20 กรัม บรรจุในทิมเบิล (Timble)
- เติมน้ำจำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
- จัดชุดสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้ซอกเล็ต (Soxhlet) ดังรูปที่ 3.3
- โดยสกัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดแล้วนำพอลิเมอร์ในขวดก้นกลมมากรองโดยชุดลดความดัน
- นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 ± 5 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อระเหยโซลีนออกจากพอลิเมอร์



รูปที่ 3.3 แสดงการจัดชุดสกัดพอลิเมอร์ออกจากคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่ผ่านปฏิกิริยาพอลิ-
เมอไรเซชัน ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เพื่อศึกษาการกระจายน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์

3.3.5.2 ศึกษาการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

- เตรียมสารละลายพอลิเมอร์ที่ต้องการวิเคราะห์เข้มข้น 1 % น้ำหนักโดยปริมาตร ในเตตระไฮโดรฟิวแรน
- ใช้เครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี (GPC) ที่มีคอลัมน์เป็น Water Styragel™ (HT6E) ของบริษัท Millipore ใช้วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลในช่วง 3,500-1,000,000
- ตั้งสภาวะเครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโตกราฟี ในการวิเคราะห์ดังนี้

สารละลาย	: เตตระไฮโดรฟิวแรน (THF)
อุณหภูมิ Detector	: 45 °C
อุณหภูมิ Injector	: 45 °C
อุณหภูมิ Column	: 35 °C
อัตราการไหล	: 0.3 ml/min
เวลาในการวิเคราะห์	: 1 ชั่วโมง
Detector	: Reflective index detector

3.3.6 ศึกษาการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेटในไม้พญาสัตบรรณ

1. ผลของเวลาที่มีต่อการแพร่
2. ผลของด้านต่างๆ ของไม้
3. ผลของความชื้นที่อยู่ในไม้

3.3.6.1 ตัวอย่างไม้

- ตัดไม้ในสภาวะแห้งในอากาศ (Air-dry) ที่มีความชื้นประมาณ 12 % ให้มีขนาด 3.5x3.5x3.5 เซนติเมตร กำหนดด้านทั้งสามด้าน ได้แก่ ด้านรัศมี (R) ด้านสัมผัส (T) และด้านยาว (L)
- ใช้ยางซิลิโคน (Silicone rubber) เคลือบบนชิ้นไม้ทั้ง 6 ด้าน เพื่อควบคุมปริมาณความชื้นในไม้ให้คงที่ แล้วนำไปอบเพื่อให้ยางซิลิโคนเกิดการคงรูป
- ชั่งน้ำหนักไม้ทุกๆ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ไม้มีปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ที่ต้องการ
- เก็บชิ้นไม้ที่มีปริมาณความชื้นต่างๆ ไว้รวมกันเป็นเวลา 3 สัปดาห์ เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของความชื้นในไม้อย่างสม่ำเสมอ

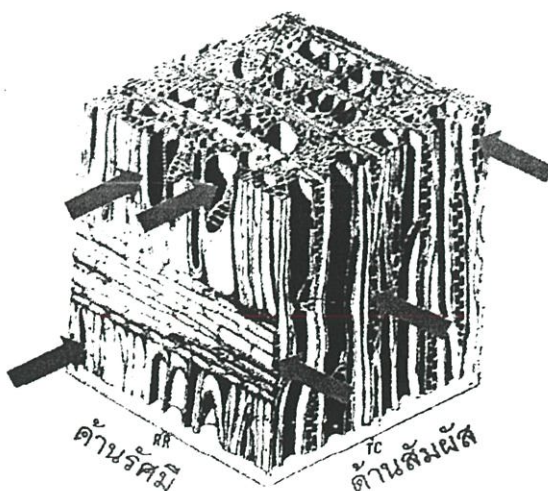
3.3.6.2 ศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेट

- นำไม้ที่มีปริมาณความชื้นคงที่แล้วจากตอนที่ 3.3.6.1 ในแต่ละด้าน จำนวนด้านละ 2 ชิ้น (ความชื้นประมาณ 12 %)

- ลอกยางซิลิโคนที่ด้านยาว (L) ออกเพียงหนึ่งด้าน แซ่ขึ้นไม้ลงในสารละลายสีที่เป็นอินดิเคเตอร์ (9955TP Light blue) เข้มข้น 1 % w/v ในอัตราส่วน 10 : 1000 น้ำหนักโดยปริมาตรของเมทิลเมทาคริเลต เป็นเวลา 0 2 4 6 8 และ 10 วัน ที่ความดันบรรยากาศ
- เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นไม้มาตัดที่ระยะต่างๆ โดยให้ไม้มีความหนาขึ้นละ 0.3 เซนติเมตร (จะได้ไม้ที่ระยะความลึก 0-2.4 เซนติเมตร)
- ชิ้นไม้ที่ตัดออกมาได้ที่ระยะต่างกัน ไปสกัดสีที่เป็นอินดิเคเตอร์ออกด้วยเอทานอล จำนวน 25 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- สารละลายสีที่เป็นอินดิเคเตอร์ที่สกัดได้ นำไปวัดหาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ช่วงความยาวคลื่น 250 – 760 nm
- คำนวณหาปริมาณอินดิเคเตอร์ ที่เกิดการแพร่เข้าสู่ไม้ได้เป็นเวลาและระยะต่างกัน
- เปลี่ยนด้านการลอกยางซิลิโคนออก เพื่อศึกษามลของด้านของไม้ที่มีต่อการแพร่

3.3.6.3 ศึกษาผลของด้านต่างๆ ที่มีต่อการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในเนื้อไม้

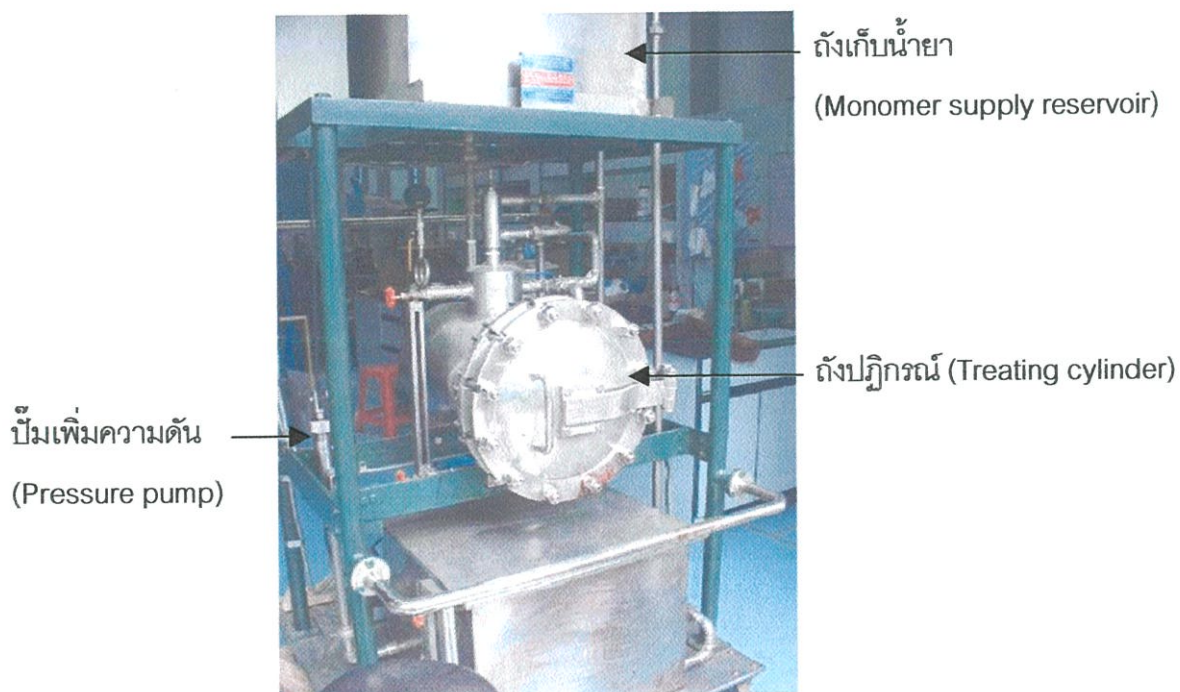
- ทำการทดลองตามข้อ 3.3.6.2 แต่เปลี่ยนด้านของการลอกยางซิลิโคนออก ดังนี้
 1. ศึกษาการแพร่ในด้านยาว (Longitudinal) ลอกลอกยางซิลิโคนในด้านยาว
 2. ศึกษาการแพร่ในด้านรัศมี (Radial) ให้ลอกยางซิลิโคนในด้านสัมผัส
 3. ศึกษาการแพร่ในด้านสัมผัส (Tangential) ลอกยางซิลิโคนในด้านรัศมีออก
- การลอกยางซิลิโคนออกให้ลอกออกเพียงด้านเดียว โดยอีก 5 ด้านที่เหลือยังมีการเคลือบด้วยยางซิลิโคนอยู่



รูปที่ 3.4 แสดงทิศทางการไหล (Flow direction) ของของไหลในด้านต่างๆ ในโครงสร้างไม้ [4]

3.3.6.4 ศึกษาผลของความชื้นในไม้ที่มีต่อการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในเนื้อไม้

- ตัดไม้ขนาด 3.5x3.5x3.5 เซนติเมตร กำหนดด้านทั้งสามด้าน พร้อมชั่งน้ำหนัก นำไม้ใส่ในเครื่องซึมน้ำยาด้วยความดัน ดังรูปที่ 3.5
- ลดความดันลงกระทั่งถึง 60 cmHg เป็นเวลา 30 นาที ค่อยๆ เปิดน้ำให้ไหลเข้าสู่ถึงปฏิกรณ์ (Treating cylinder) เพิ่มความดันจนถึง 150 lb_f/in² นาน 2 ชั่วโมง
- ลดความดันที่ 60 cmHg เป็นเวลา 30 นาทีอีกครั้ง
- นำไม้ออกจากถังปฏิกรณ์ ชั่งน้ำหนักไม้ เพื่อหาปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ แล้วนำไปเคลือบด้วยยางซิลิโคนทั้ง 6 ด้านชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (เพื่อหาปริมาณยางซิลิโคน)
- ไม้ที่เคลือบแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C จน ไม้มีปริมาณความชื้น 0 12 และ 30 เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับน้ำหนักแห้ง)
- เมื่อได้ไม้ที่มีปริมาณความชื้นที่ต้องการแล้ว นำไม้แต่ละความชื้นมาเก็บไว้รวมกัน เพื่อให้ความชื้นกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นไม้เป็นเวลา 3 สัปดาห์
- ศึกษาการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลต ดังข้อ 3.3.6.2



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องซึมน้ำยาด้วยความดัน (Vacuum-pressure treatment)

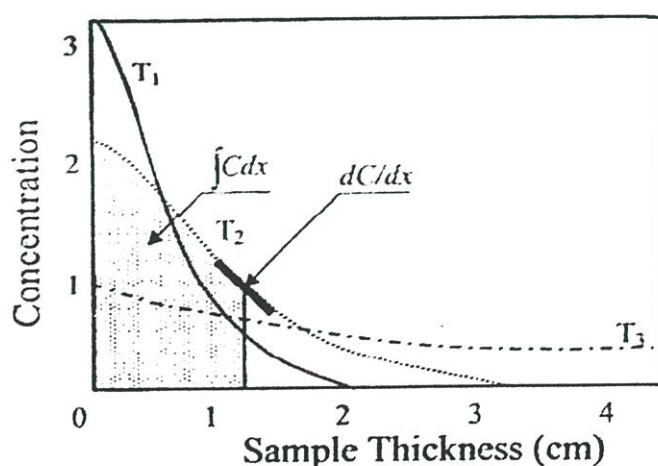
3.3.6.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลิต

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ในงานวิจัยนี้ เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อยู่ในสถานะที่มีความไม่สม่ำเสมอของความเข้มข้น ที่ระยะความลึกต่างๆ ตามเวลาในการแพร่ หรือสถานะไม่สมดุล (Unsteady state condition) ตามกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามวิธีการของ Egner's method for solves Fick's 2nd law [19] ดังสมการที่ 3.4

$$D = \frac{\frac{\partial (\int C dx)}{\partial t}}{\frac{\partial C}{\partial x}} \quad (3.4)$$

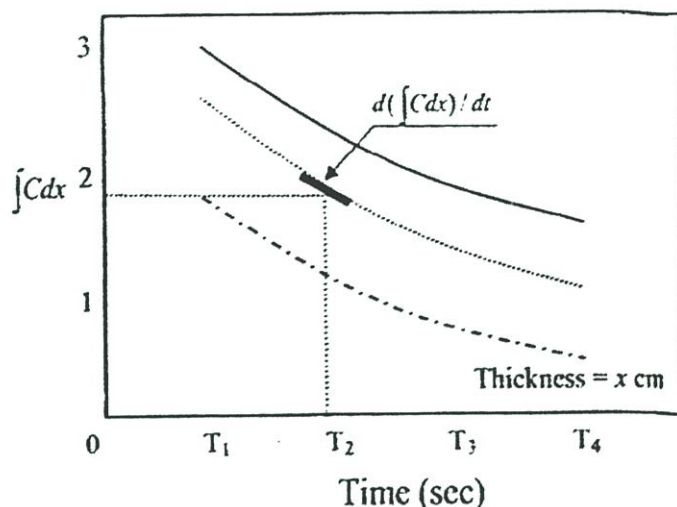
โดยมีขั้นตอนในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นดังนี้

1. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับระยะความลึกในการแพร่ จากนั้นหาสมการเส้นแนวโน้มของข้อมูล (Fitting curve)
2. หาค่าอินทิกรัล (Integral) ของสมการเส้นแนวโน้มความเข้มข้นที่ระยะต่างๆ หรือค่า $\int C dx$ ดังรูปที่ 3.6
3. หาค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเทียบกับระยะความลึกต่างๆ หรือค่า $\partial C / \partial x$



รูปที่ 3.6 แสดงค่า Denominator ในวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยวิธีการของ Egner's method [22]

4. หลังจากได้ค่าอินทิกรัล (Integral) ในข้อที่ 2 แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินทิกรัลกับเวลาที่การแพร่
5. หาค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ระยะต่างๆ เทียบกับเวลา หรือ $\frac{d(\int Cdx)}{dt}$ ดังรูปที่ 3.7 นำค่า Denominator และ Numerator แทนค่าในสมการที่ 3.4



รูปที่ 3.7 แสดงค่า Numerator ในวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ด้วยวิธีการของ Egner's method [22]

3.3.7 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

3.3.7.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

1. การบวมตัวเชิงปริมาตร (Volumetric swelling)

- ใช้ไม้ตัวอย่างขนาด 2x2x2 เซนติเมตรที่สภาวะแห้งในอากาศ (Air-dry) และไม้ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ กัน อย่างน้อย 5 ซีน
- วัดขนาดทั้ง 3 ด้านพร้อมกับชั่งน้ำหนัก
- นำไม้ทั้งหมดมาแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 2 3 5 24 30 48 72 96 120 144 และ 168 ชั่วโมง โดยวัดขนาดทั้งสามด้านพร้อมชั่งน้ำหนัก เพื่อหาค่าการบวมตัวเชิงปริมาตรและค่าการดูดซับน้ำที่เวลาต่างๆ

ค่าการบวมตัวเชิงปริมาตร

$$\% \text{ Volumetric swelling} = \frac{(V_2 - V_1) \times 100}{V_1} \quad (3.5)$$

เมื่อ Volumetric swelling คือ ค่าการบวมตัวเชิงปริมาตร
 V_1 คือ ปริมาตรของไม้ก่อนการทดสอบ (ที่เวลา 0 ชั่วโมง)
 V_2 คือ ปริมาตรของไม้หลังการทดสอบที่เวลาต่างๆ

ค่าการดูดซับน้ำ

$$\% \text{ Water absorption} = \frac{(m_2 - m_1) \times 100}{m_1} \quad (3.6)$$

เมื่อ Water absorption คือ ค่าการดูดซับน้ำของไม้
 m_1 คือ น้ำหนักของไม้ก่อนการทดสอบ (ที่เวลา 0 ชั่วโมง)
 m_2 คือ น้ำหนักของไม้หลังการทดสอบที่เวลาต่างๆ

2. ความหนาแน่นอบแห้ง (Oven-dry density)

- ใช้ไม้ตัวอย่างขนาด 2x2x2 เซนติเมตรที่สภาวะอบแห้ง (Oven-dry) และไม้ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ กัน อย่างน้อย 5 ชั้น
- วัดขนาดทั้ง 3 ด้านพร้อมกับชั่งน้ำหนัก
- คำนวณหาค่าความหนาแน่นอบแห้ง

ความหนาแน่นอบแห้ง

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.7)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นอบแห้งของไม้

- m คือ น้ำหนักของไม้ที่สภาวะอบแห้ง (Oven-dry state)
 V คือ ปริมาตรของไม้ที่สภาวะอบแห้ง (Oven-dry state)

3. ปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ (Moisture content)

- ใช้ไม้ตัวอย่างขนาด 2x2x2 เซนติเมตรที่สภาวะแห้งในอากาศ (Air-dry) จำนวน 10 ท่อน ชั่งน้ำหนัก
- นำไม้ทั้งหมดเข้าอบที่อุณหภูมิ 100 ± 5 °C จนกระทั่งน้ำหนักของไม้คงที่
- คำนวณค่าปริมาณความชื้นจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

ปริมาณความชื้นของไม้

$$\% \text{ MC} = \frac{(m_1 - m_2) \times 100}{m_2} \quad (3.8)$$

- เมื่อ MC คือ ค่าความชื้นของไม้ (Moisture content)
 m_1 คือ น้ำหนักของไม้ก่อนอบแห้ง
 m_2 คือ น้ำหนักของไม้หลังอบแห้ง

3.3.7.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลบางประการ

การทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การทดสอบด้วยไม้ที่มีขนาดเล็ก และการทดสอบที่ใช้ไม้ขนาดใหญ่ที่ใช้สำหรับงานโครงสร้าง โดยมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ISO (International Standard Organization) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กรมป่าไม้ใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบไม้ โดยไม้ตัวอย่างจะมีขนาดเล็ก

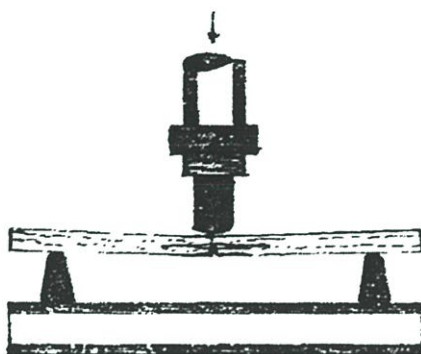
ตารางที่ 3.1 แสดงมาตรฐานการทดสอบไม้ ตามมาตรฐาน ISO

การทดสอบ	มาตรฐาน ISO	ชื่อมาตรฐานการทดสอบ
การดัดสติติย์	ISO 3349	Determination of modulus of elasticity in static bending
การอัดตั้งฉากเสี้ยน	ISO 3132	Testing in compression perpendicular to grain
การเฉือนตามแนวเสี้ยน	ISO 3347	Determination of ultimate shearing stress parallel to grain
ความแข็งสติติย์	ISO 3350	Determination of static hardness

1. การดัดสถิตย์

(Determination of modulus of elasticity in static bending : ISO 3349)

- ใช้ไม้ตัวอย่างขนาด 2x2x30 เซนติเมตร ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ กัน จากวิธีการข้างต้น อย่างน้อย 5 ชิ้น
- วางไม้ตัวอย่างบนฐานรองซึ่งวางกัน 28 เซนติเมตร โดยให้ด้านรัศมีของไม้เป็นด้านรับน้ำหนัก โดยอัตราเร็วในการเสียรูปเป็น 0.254 cm/min บันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการเสียรูปไว้เป็นระยะๆ
- ค่าที่ได้เป็นค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (MOE) และมอดุลัสแตกหัก (MOR)



รูปที่ 3.8 แสดงเครื่องมือการทดสอบสมบัติการดัดสถิตย์ (Static bending) ของไม้ตัวอย่าง [23]

มอดุลัสยืดหยุ่น (MOE)

$$MOE = \frac{P_{PL} \cdot L^3}{4D \cdot B \cdot H^3} \quad (3.9)$$

เมื่อ	MOE	คือ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของไม้ (Modulus of elasticity)
	P_{PL}	คือ ค่าน้ำหนักกดสูงสุดในช่วงความสัมพันธ์ของแรงกับการเสียรูปเป็นแบบเชิงเส้น (Proportional limit) ในหน่วย นิวตัน (N)
	B	คือ ความหนาของไม้ตัวอย่าง ในหน่วย มิลลิเมตร (mm)
	D	คือ ค่าการเสียรูปที่ช่วงของการได้สัดส่วน (mm)
	H	คือ ความหนาของไม้ตัวอย่าง ในหน่วย มิลลิเมตร (mm)
	L	คือ ความกว้างของฐานที่รองรับไม้ในส่วนที่ได้รับแรง (Span) ในหน่วย มิลลิเมตร

มอดุลัสแตกร้าว (MOR)

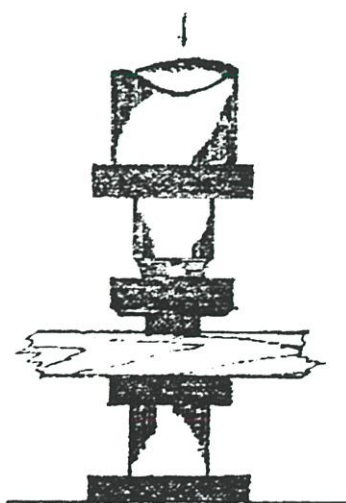
$$\text{MOR} = \frac{3 P_{\max} \cdot L}{2 B \cdot H^2} \quad (3.10)$$

เมื่อ	MOR	คือ	ค่ามอดุลัสแตกร้าวของไม้ (Modulus of rupture)
	P_{\max}	คือ	ค่าน้ำหนักกดสูงสุด ในหน่วย นิวตัน (N)
	B	คือ	ความกว้างของไม้ตัวอย่าง ในหน่วย มิลลิเมตร (mm)
	H	คือ	ความหนาของไม้ตัวอย่าง ในหน่วย มิลลิเมตร (mm)
	L	คือ	ความกว้างของฐานที่รองไม้ในส่วนที่ได้รับแรง (Span) ในหน่วย มิลลิเมตร

2. การอัดตั้งฉากเสี้ยน

(Testing in compression perpendicular to grain : ISO 3132)

- ใช้ตัวอย่างไม้ขนาด 2x2x6 เซนติเมตร ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างกัน อย่างน้อย 5 ชิ้น
- วางตัวอย่างไม้เข้ายั้งเครื่องทดสอบ นำแผ่นเหล็กขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร วางบนชิ้นไม้ดังรูปที่ 3.9 ให้อัตราเร็วในการเสียรูปเป็น 0.061 cm/min บันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการเสียรูปไว้เป็นระยะๆ จนตัวอย่างไม้ถูกแผ่นเหล็กกดยุบไป 2.5 มิลลิเมตร
- ค่าที่ได้เป็นค่าความเค้นสูงสุดจากการอัดตั้งฉากเสี้ยน



รูปที่ 3.9 แสดงการทดสอบสมบัติการอัดตั้งฉากเสี้ยน (Compression perpendicular to grain)

ความเค้นสูงสุดจากการอัดตั้งฉากเสี้ยน

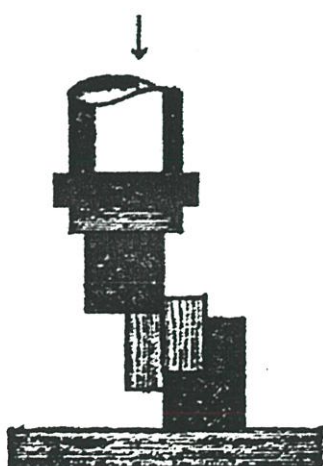
$$\sigma_{\perp} = \frac{P_{\max}}{A \cdot L} \quad (3.11)$$

- เมื่อ σ_{\perp} คือ ค่าความเค้นสูงสุดจากการอัดตั้งฉากเสี้ยน (Maximum stress)
 P คือ ค่าน้ำหนักกดสูงสุด ในช่วงความสัมพันธ์ของแรงกับการเสียรูปเป็นแบบเชิงเส้น (Proportional limit) ในหน่วย นิวตัน (N)
 A คือ ความกว้างของหน้าสัมผัสแรงกดของไม้ ในหน่วย มิลลิเมตร (mm)
 L คือ ความกว้างของแผ่นโลหะที่ใช้กด ในหน่วย มิลลิเมตร (mm)

3. การเฉือนตามแนวเสี้ยน

(Determination of ultimate shearing stress parallel to grain : ISO 3347)

- ใช้ตัวอย่างไม้ขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ที่มีปริมาณพอลิเมอร์อยู่ในเนื้อไม้ต่างกัน อย่างน้อย 5 ชิ้น
- วางตัวอย่างไม้เข้ายังเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3.10 โดยให้อัตราเร็วในการเสียรูปเท่ากับ 0.061 cm/min บันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการเสียรูปไว้เป็นระยะๆ จนกระทั่งไม้หัก คำนวณหาค่าความเค้นเฉือนสูงสุด



รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องมือการทดสอบสมบัติการเฉือนตามแนวเสี้ยน (Shear along the grain)

[23]

ความเค้นเฉือนสูงสุด

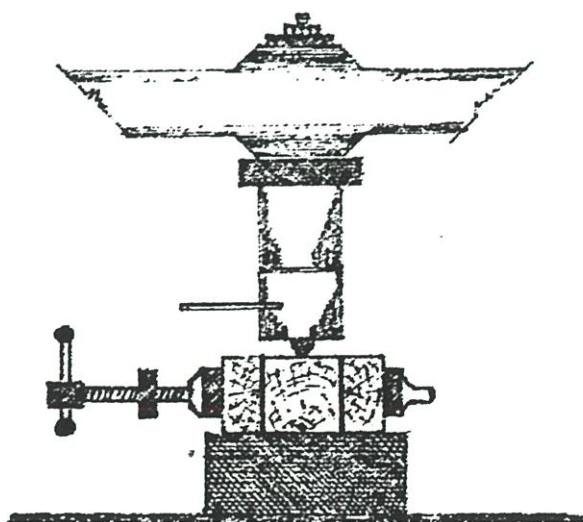
$$\tau = \frac{P_{\max}}{B \cdot L} \quad (3.12)$$

เมื่อ	τ	คือ ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของไม้ (Maximum shear stress)
	P_{\max}	คือ ค่าน้ำหนักกดสูงสุด ในช่วงของการแตกหัก (Breaking load) ในหน่วย นิวตัน (N)
	B	คือ ความหนาของไม้ตัวอย่าง ในหน่วย มิลลิเมตร (mm)
	L	คือ ความกว้างของไม้ในส่วนที่ได้รับแรง ในหน่วย มิลลิเมตร (mm)

4. ความแข็งสถิตย์

(Determination of static hardness : ISO 3350)

- ใช้ตัวอย่างไม้ขนาด 2x2x6 เซนติเมตร ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในไม้ต่างๆ กัน อย่างน้อย 5 ชั้น จากวิธีการข้างต้น
- นำไม้ตัวอย่างเข้ายังเครื่องทดสอบ กดด้วยหัวกดทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.20 มิลลิเมตร จนกระทั่งหัวกดจมลงในเนื้อไม้ได้ครึ่งลูก หรือ 5.64 มิลลิเมตร
- ค่าน้ำหนักที่ใช้ในการกดหัวกด บันทึกเป็นค่าความแข็งสถิตย์ในหน่วย นิวตัน



รูปที่ 3.11 แสดงเครื่องมือการทดสอบสมบัติความแข็ง (Hardness) ของไม้ตัวอย่าง [23]

ความแข็งสถิตย์

$$H = K \cdot P \quad (3.13)$$

- เมื่อ H คือ ค่าความแข็งสถิตย์ (Static hardness) ในหน่วยนิวตัน (N)
 P คือ ค่าน้ำหนักกดสูงสุด ในหน่วยนิวตัน (N)
 K คือ สัมประสิทธิ์ของการกดน้ำหนักลงในไม้
 มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อกดหัวกดลงในไม้ลึกลง 5.64 มิลลิเมตร
 มีค่าเท่ากับ 1.33 เมื่อกดหัวกดลงในไม้ลึกลง 2.82 มิลลิเมตร

3.3.8 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์

- เตรียมชิ้นไม้พญาสัตบรรณขนาด 2x2x6 เซนติเมตร ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ กัน จำนวน 3 ชิ้น
- ตัดย่อยให้มีขนาดเล็กลง แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดไม้
- นำมาร้อนแยกให้มีขนาด 20 เมส (Mesh)
- ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA โดยให้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min (อุณหภูมิทดสอบอยู่ในช่วง 50-700 °C)

3.3.9 ศึกษาพื้นฐานวิทยาของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์

- เตรียมชิ้นตัวอย่างจากไม้ที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ขนาด 2x2x30 เซนติเมตร ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 20 และ 30 %
- ตัดย่อยตัวอย่างไม้ให้มีขนาดลดลงเป็น 1x1x30 เซนติเมตร
- ตัดไม้ที่ตำแหน่ง 12 เซนติเมตร (วัดจากปลายไม้เข้าสู่จุดกึ่งกลาง)
- นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปตรวจสอบพื้นฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ ในด้านยาว ด้านรัศมี และด้านสัมผัส

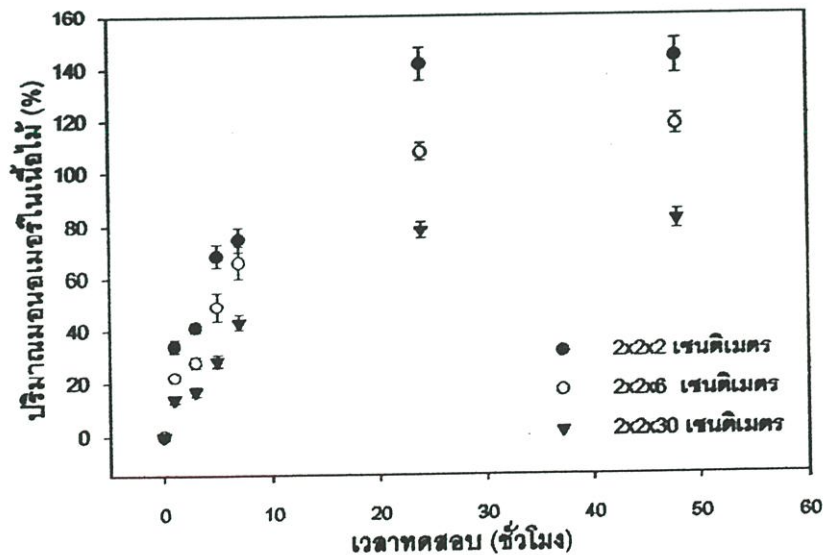
บทที่ 4

ผลการทดลอง

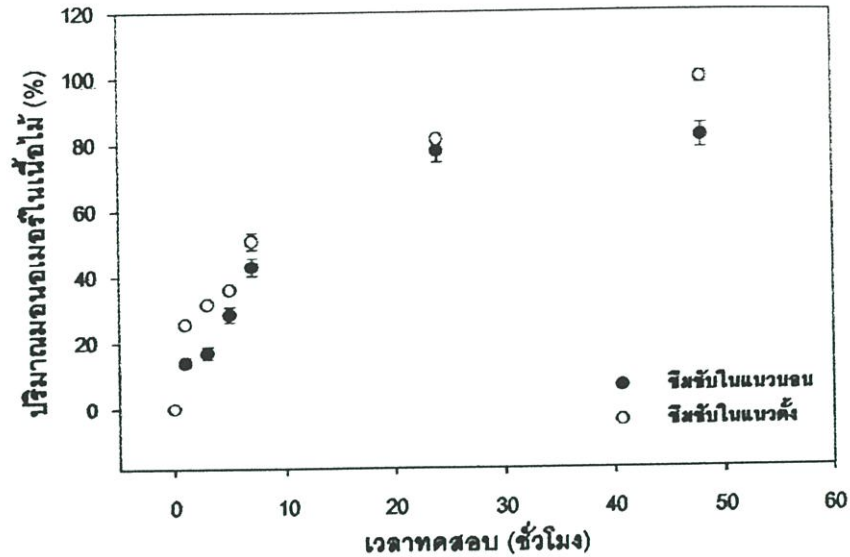
งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติไม้พญาสัตบรรณโดยการซึมซับเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ที่เวลาและทิศทางการซึมซับต่างกันโดยไม่ใช้ความดัน ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ทำให้ได้วัสดุประกอบคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ (Wood polymer composite, WPC) จากนั้นศึกษาผลของปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล รวมถึงสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตที่ได้ ศึกษาการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในเนื้อไม้ด้วยวิธีของ Egner (Egner's method) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีที่ทำหน้าเป็นอินดิเคเตอร์ (Indicator) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) ของอินดิเคเตอร์ในมอนอเมอร์ในไม้ที่มีสภาวะการแพร่ต่างกัน สามารถแสดงผลงานวิจัยได้ดังนี้

4.1 ปัจจัยที่มีต่อกระบวนการซึมซับมอนอเมอร์เข้าไปในเนื้อไม้

ทำการทดลองโดยการซึมซับมอนอเมอร์เข้าไปในเนื้อไม้ที่แห้งในอากาศ (Air dry) มีความชื้นในเนื้อไม้ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของไม้ที่ใช้ ได้แก่ ขนาด 2x2x2, 2x2x6 และ 2x2x30 เซนติเมตร ที่มีทิศทางการซึมซับในแนวนอน (Parallel) และแนวตั้ง (Perpendicular) ที่เวลา 0-48 ชั่วโมง โดยไม่ใช้ความดัน แล้วคำนวณหาค่าร้อยละของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ (Monomer loading percentage, % ML) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงค่าร้อยละของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ที่แห้งในอากาศ เมื่อขนาดของไม้และเวลาในการซึมซับในแนวนอนต่างกัน

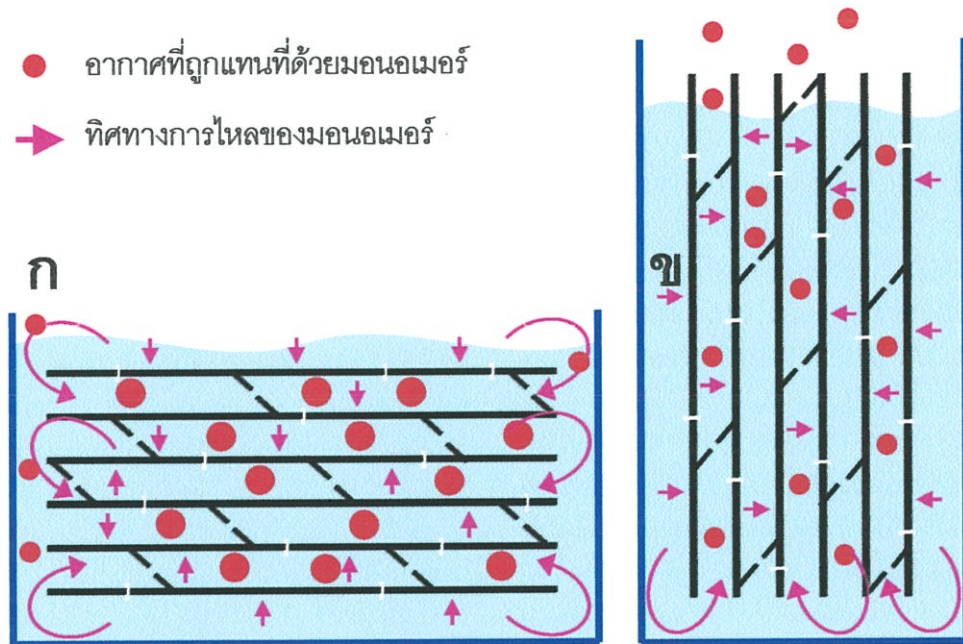


รูปที่ 4.2 แสดงค่าร้อยละของมอโนเมอร์ในเนื้อไม้ที่แห้งในอากาศ (Air dry) ขนาด 2x2x30 เซนติเมตร เมื่อเวลาและทิศทางของการซึมซับต่างกัน ● จัดวางไม้ในแนวนอน ○ จัดวางไม้ในแนวตั้ง

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบการซึมซับมอโนเมอร์ของไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาดต่างกัน พบว่าปริมาณมอโนเมอร์ในเนื้อไม้มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งแล้วมีแนวโน้มคงที่ ที่เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง โดยไม้ที่มีขนาดเล็กเกิดการซึมซับมอโนเมอร์ได้สูงที่สุดในเวลาทดสอบ 48 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของเนื้อไม้พญาสัตบรรณที่มีความหนาแน่นต่ำ (ประมาณ 0.348 g/cm^3) มีโครงสร้างของเซลล์ที่มีรูพรุนมาก และมีการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์อย่างทั่วถึง เมื่อเกิดการซึมซับมอโนเมอร์จะเกิดการถ่ายเทของมอโนเมอร์และอากาศที่อยู่ภายในช่องเซลล์จากเซลล์หนึ่งไปสู่อีกเซลล์หนึ่งอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการซึมซับของมอโนเมอร์เข้าแทนที่อากาศที่อยู่ในเนื้อไม้ ดังนั้นในไม้ขนาด 2x2x2 เซนติเมตร เมื่อเกิดการซึมซับแล้วมอโนเมอร์จะเข้าแทนที่อากาศที่อยู่ภายในเนื้อไม้ได้อย่างสมบูรณ์ โดยคาดว่าอากาศที่อยู่ภายในเนื้อไม้จะถูกไล่ออกจากเนื้อไม้ได้มากที่สุด ในขณะที่ไม้ที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตร เมื่อเกิดการแทนที่อากาศโดยมอโนเมอร์แล้ว ฟองอากาศบางส่วน อาจจะถูกปิดกั้นอยู่ภายในโครงสร้างไม้โดยมอโนเมอร์ ซึ่งเกิดเป็นลักษณะของฟองอากาศในเนื้อไม้ (Air trap) ทำให้บริเวณนี้ไม่สามารถเกิดการซึมซับของมอโนเมอร์ได้อีก ดังแบบจำลองของการซึมซับมอโนเมอร์ในแนวนอนในรูปที่ 4.3(ก)

ผลของทิศทางการจัดวางไม้เพื่อให้เกิดการซึมซับมอโนเมอร์ พบว่า ไม้ที่มีแนวการซึมซับในแนวตั้งให้ค่า % ML สูงกว่าการจัดวางไม้ในแนวนอนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากไม้ที่มีทิศทางการ

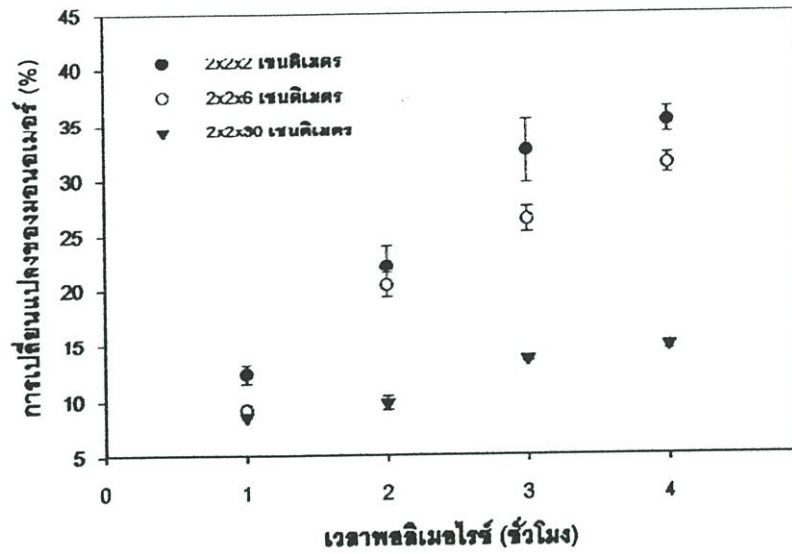
ซึมซับในแนวตั้งเมื่อเกิดการซึมซับมอนอเมอร์ ฟองอากาศที่มีความหนาแน่นต่ำกว่ามอนอเมอร์จะเกิดการลอยตัวสูงขึ้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นค่า % ML ในทิศทางของการซึมซับมอนอเมอร์ของไม้ที่จัดวางไม้ให้อยู่ในแนวตั้งจึงมีค่าสูงกว่าค่าในแนวนอนเพียงเล็กน้อย ดังแบบจำลองของการซึมซับมอนอเมอร์ในแนวตั้งในรูปที่ 4.3(ข)



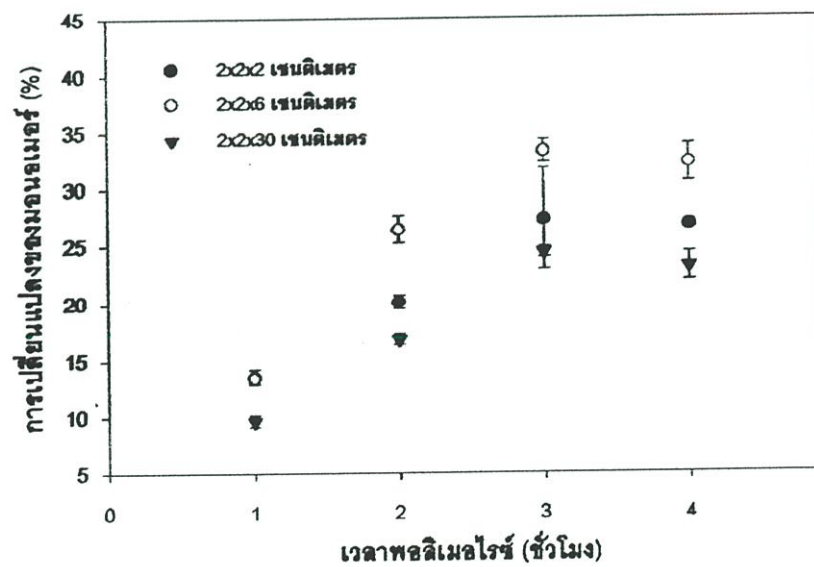
รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองการซึมซับมอนอเมอร์ของไม้ในทิศทางต่างกันภายในโครงสร้างไม้
(ก) ซึมซับในแนวนอน (Parallel) และ (ข) ซึมซับในแนวตั้ง (Perpendicular)

4.2 ปัจจัยที่มีต่อกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้

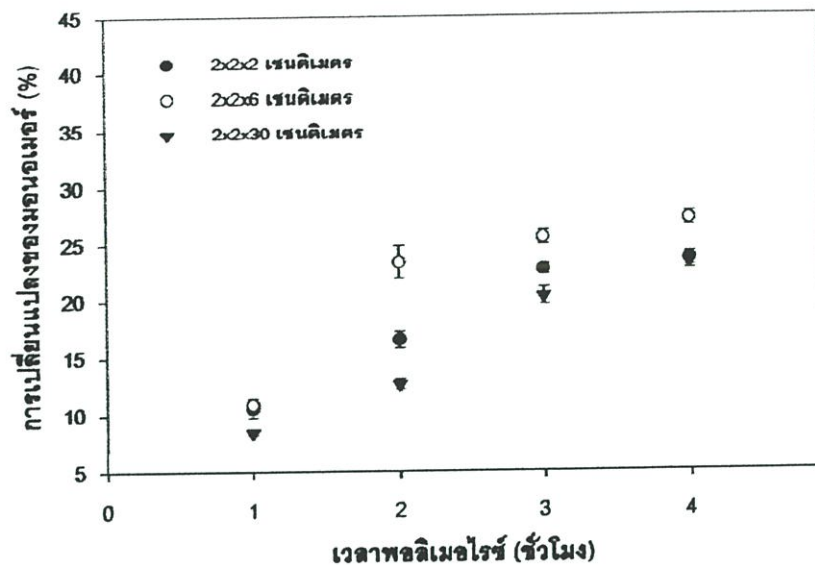
ทำการทดลองโดยนำไม้พญาสัตบรรณที่ผ่านการซึมซับมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เข้าอบในตู้อบความร้อน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ หาค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) และค่าปริมาณของพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 - 4.9



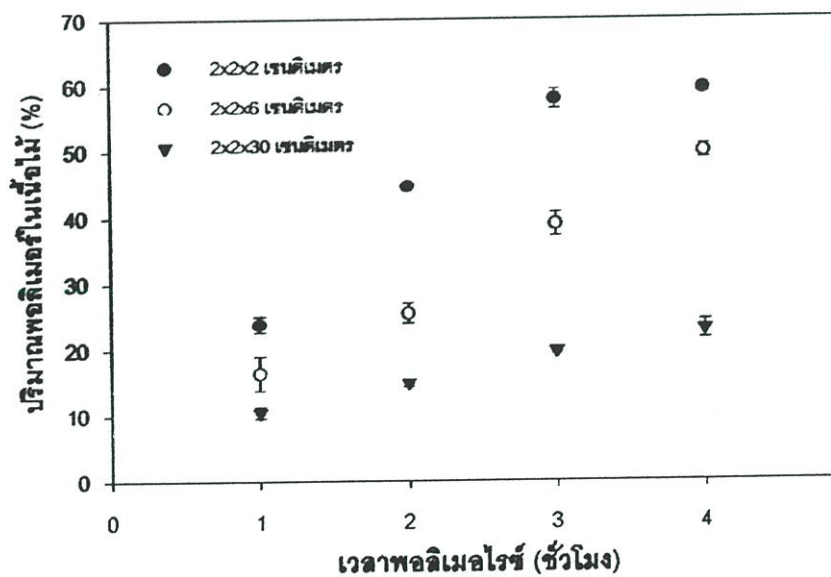
รูปที่ 4.4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส



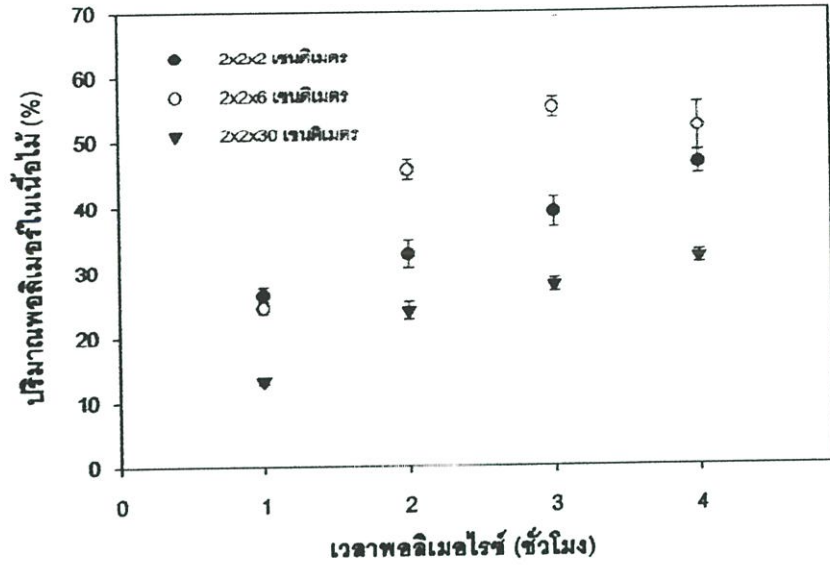
รูปที่ 4.5 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



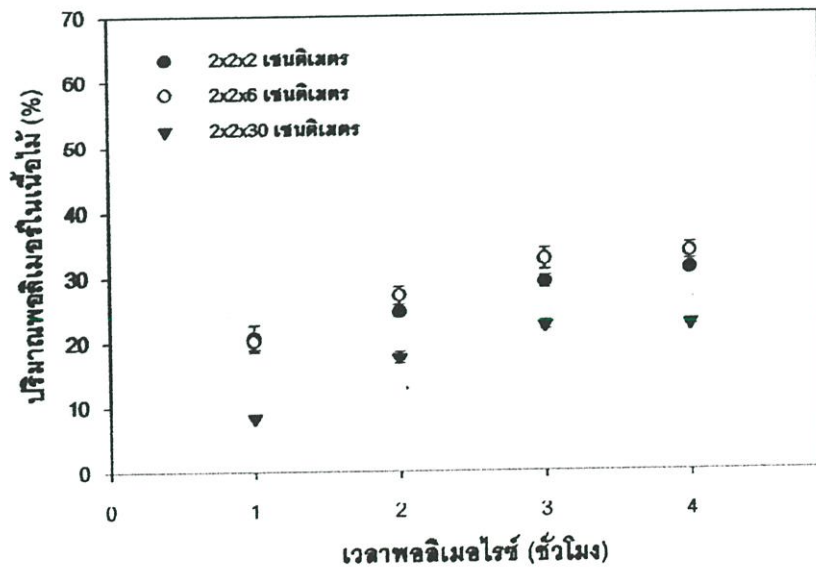
รูปที่ 4.6 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เวลา และขนาดของไม้ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เวลา และขนาดของไม้ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เวลา และขนาดของไม้ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) และปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) ของไม้ทั้ง 3 ขนาดที่อุณหภูมิต่างๆ ในรูปที่ 4.4-4.9 และ 4.10-4.15 พบว่า เมื่อเวลาในการพอลิเมโรเซชันเพิ่มขึ้น ทั้ง 2 ค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

พิจารณาที่ 90 °C พบว่า ทั้งค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ และปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาพอลิเมโรเซชัน โดยไม้ที่มีขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ให้ค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับไม้อีกสองขนาด เนื่องจากไม้เป็นวัสดุที่มีการนำความร้อนได้ต่ำ การถ่ายเทความร้อนจากผิวภายนอกเข้าสู่ภายในทำได้ช้า ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวภายนอกและภายในมีค่าสูงในไม้ขนาด 2x2x30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.17 มีผลทำให้การสลายตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นไม้ที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตร จึงให้ค่าทั้ง 2 ที่ต่ำมาก

พิจารณาที่ 120 °C พบว่าไม้ที่มีขนาด 2x2x6 เซนติเมตรให้ค่าทั้ง 2 ค่าสูงกว่าไม้ที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานภายนอกให้มากขึ้น ดังนั้นไม้จะได้รับพลังงานที่สูงและเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากผิวเข้าสู่ภายใน เพื่อริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมโรเซชันได้ดีขึ้น ในขณะที่ไม้ที่มีขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ซึ่งได้รับพลังงานอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้มอนอเมอร์ที่อยู่ภายในเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วเช่นกัน ค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ และปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ จึงมีค่าลดลง ในขณะที่ไม้ที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตรมีค่าทั้ง 2 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

พิจารณาที่ 150 °C พบว่า ไม้ที่มีขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ให้ค่าทั้ง 2 ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 90 °C ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากการระเหยของมอนอเมอร์อย่างรวดเร็วจนทำให้มีค่าใกล้เคียงกับไม้ที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตร ในขณะที่เดียวกันไม้ขนาด 2x2x6 เซนติเมตรก็มีแนวโน้มของค่าที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 90 และ 120 °C

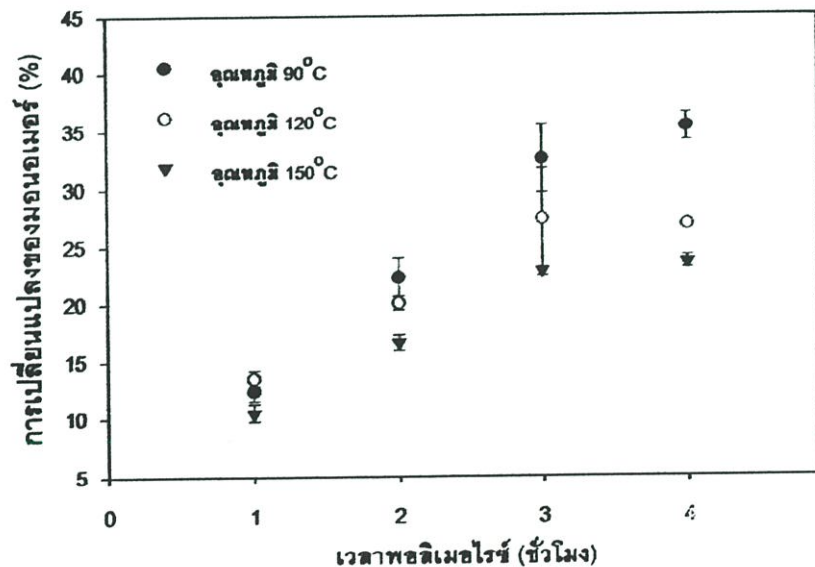
จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ และปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ ได้ดังนี้

1. อุณหภูมิในการพอลิเมโรเซชัน ดังที่กล่าวมาแล้วว่าไม้เป็นวัสดุที่มีการนำความร้อนต่ำ มีการส่งผ่านความร้อนได้ช้าทำให้เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากภายนอก จะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอก จนกระทั่งถึงเวลาหนึ่งซึ่งอุณหภูมิทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งในกรณีนี้เมื่ออุณหภูมิภายในต่ำจะเป็นผลทำให้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทำงานได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาจากที่เวลาในการพอลิเมโรเซชันที่ 1 ชั่วโมงของทุกๆ อุณหภูมิ จะพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ และปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ มีค่าใกล้เคียงกัน

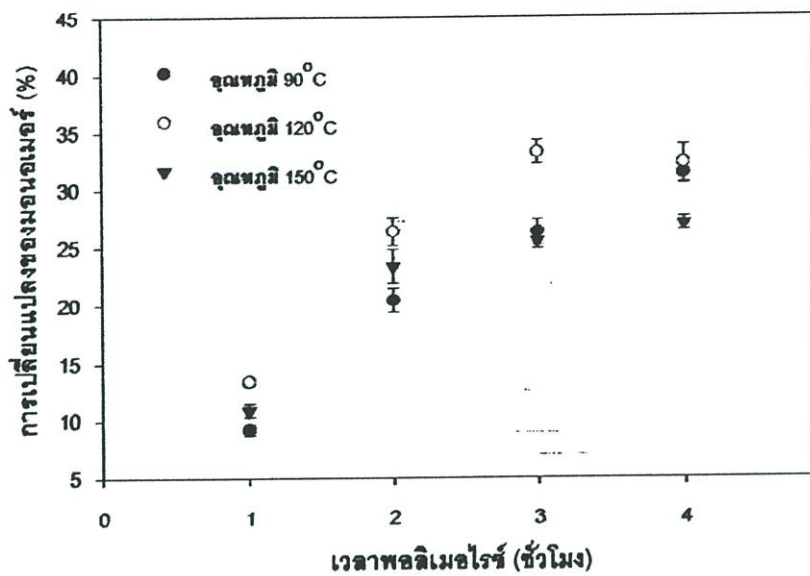
และมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมาก ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นการระเหยของมอนอเมอร์จะเกิดได้มากขึ้น

2. เวลาในการพอลิเมอไรเซชัน เมื่อเวลาในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้นทั้งค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ และปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ของไม้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจะเพิ่มอย่างมาก และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือคงที่เมื่อเวลาพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 3 ชั่วโมง

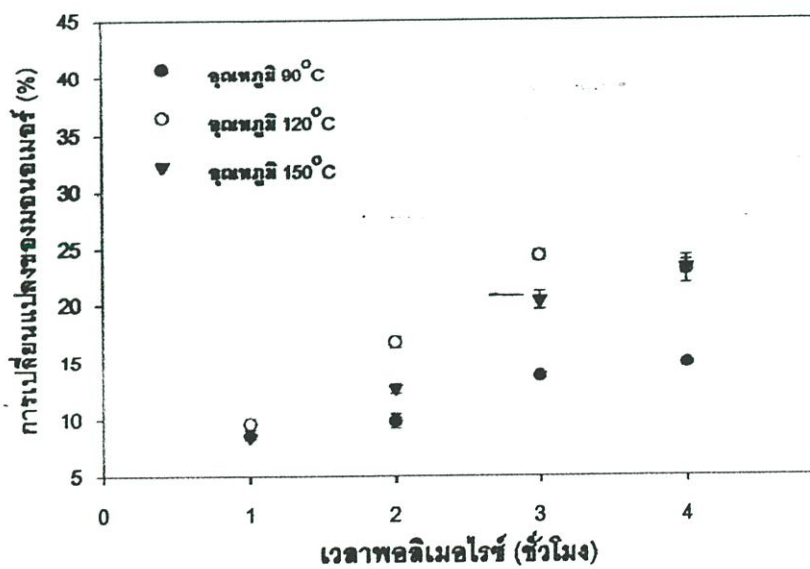
3. การระเหยของมอนอเมอร์ เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์มีอุณหภูมิจุดเดือดประมาณ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1] อีกทั้งเป็นมอนอเมอร์ที่มีความดันไอสูงสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น อัตราการระเหยของมอนอเมอร์จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยพิจารณาจากที่อุณหภูมิ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ และปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ของไม้จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า



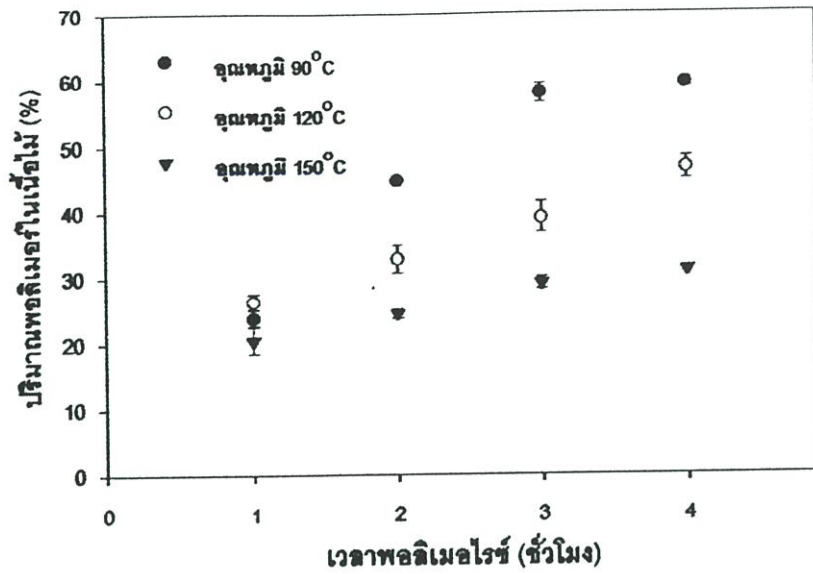
รูปที่ 4.10 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาด $2 \times 2 \times 2$ เซนติเมตร ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ



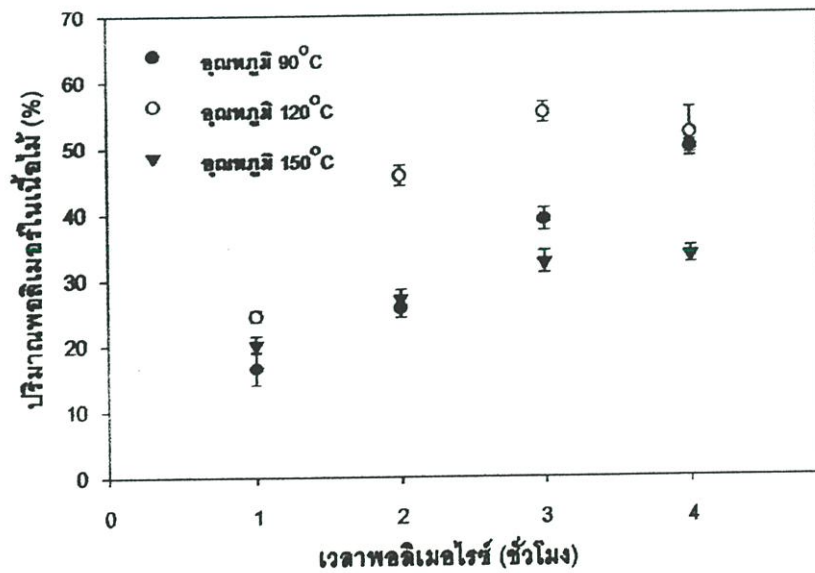
รูปที่ 4.11 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาด 2x2x6 เซนติเมตร ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ



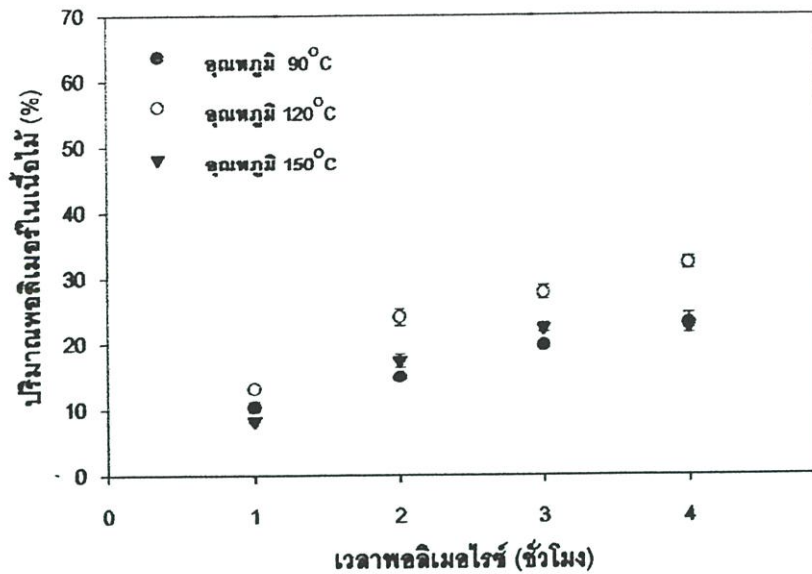
รูปที่ 4.12 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) ของไม้ขนาด 2x2x30 เซนติเมตร ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.13 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไม้ที่มีขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ที่เวลา และอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.14 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไม้ที่มีขนาด 2x2x6 เซนติเมตร ที่เวลา และอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.15 แสดงค่าปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (Polymer loading) หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไม้ที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตร ที่เวลา และอุณหภูมิต่างๆ

เมื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวไม้กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (ΔT) ที่ใช้ในการพอลิเมอไรเซชัน ในรูปที่ 4.16-4.21 พบว่า เมื่อเวลาในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่ โดยไม้ที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตร การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ มีค่าต่ำกว่าไม้ที่มีขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ประมาณ 10-15 °C เนื่องจากโครงสร้างของไม้ที่มีช่องว่างของเซลล์ หรือ เวสเซล (Vessel) ที่ยาวต่อเนื่องกันตลอด ทำให้เกิดลักษณะที่เป็นฉนวนความร้อน โดยในไม้ที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตร บริเวณของส่วนที่เป็นช่องว่างของเซลล์หรือฉนวนความร้อนนั้นจะยาวต่อเนื่องมากกว่าไม้ที่มีขนาด 2x2x6 และ 2x2x2 เซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้การนำความร้อนผ่านแนวเส้นใยหรือด้านยาว (Longitudinal) ซึ่งมีค่ามากกว่าการนำความร้อนผ่านในด้านรัศมี (Radial) และด้านสัมผัส (Tangential) ทำได้ยากกว่าไม้ที่มีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity, K) ของไม้ในทิศทางต่างๆ จากตารางที่ 4.1 จะทราบความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนในด้านยาวและด้านสัมผัสของไม้ [24] เป็นดังสมการที่ 4.1

$$K_L = 2.5 K_T \quad (4.1)$$

เมื่อ K_L คือ ค่าการนำความร้อนในด้านยาวของไม้ (Longitudinal thermal conductivity)

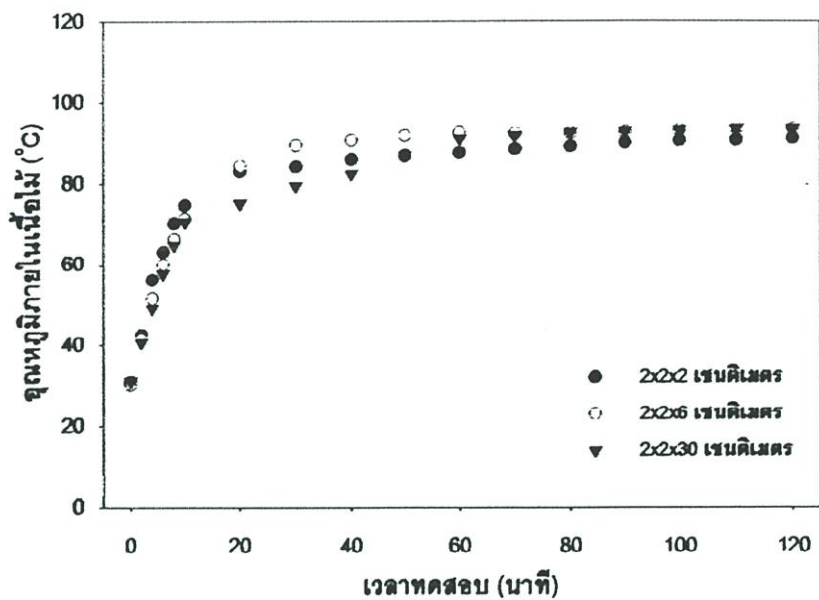
K_T คือ ค่าการนำความร้อนในด้านสัมผัสของไม้ (Tangential thermal conductivity)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุบางชนิด [24]

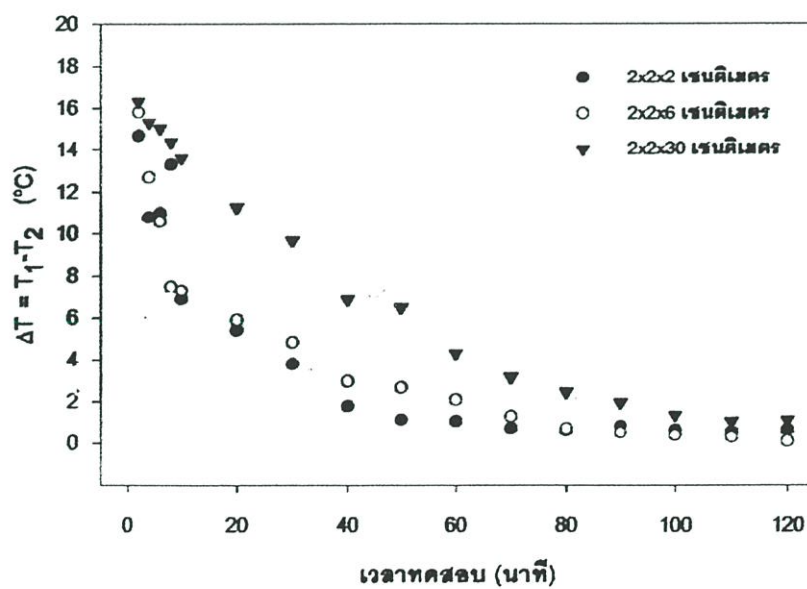
ชนิดของวัสดุ	ค่าการนำความร้อน (K . cal / cm . °C .sec)
อากาศ	0.57×10^{-4}
น้ำ	14×10^{-4}
ไม้ (ด้านสัมผัส)	$1 - 5 \times 10^{-4}$
ไม้ (ด้านยาว)	$2.5 - 12.5 \times 10^{-4}$
ทองแดง	9200×10^{-4}
คอนกรีต	20×10^{-4}
พอลิเมทิลเมทาคริลิต	1.2×10^{-4} [25]

ผลจากการศึกษาความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวไม้กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (ΔT) พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิมิมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงเวลาหนึ่งอุณหภูมิภายในเนื้อไม้และภายนอกจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่ออุณหภูมิในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า ΔT มีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้คล้ายกับเหตุผลข้างต้น คือ ในไม้ที่มีขนาดเล็ก จะมีส่วนที่มีลักษณะของฉนวนความร้อน (ช่องว่างของเซลล์) ในเนื้อไม้้น้อยกว่าในไม้ที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งในไม้ที่มีขนาดเล็กสามารถเกิดการนำความร้อนผ่านแนวเส้นใย ได้ดีกว่าในไม้ที่มีขนาดใหญ่เมื่อใช้เวลาทดสอบเท่ากัน

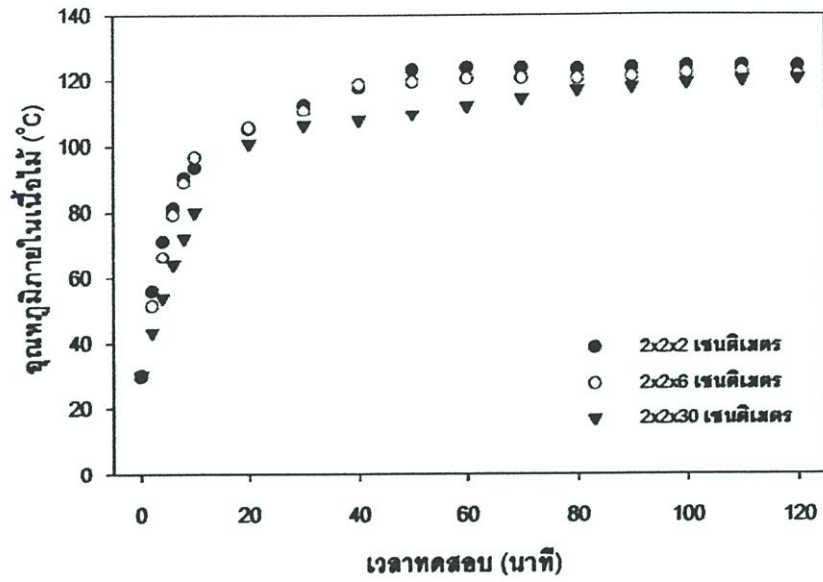
การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวไม้กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ที่เวลาและอุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันต่างๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 4.16-4.21



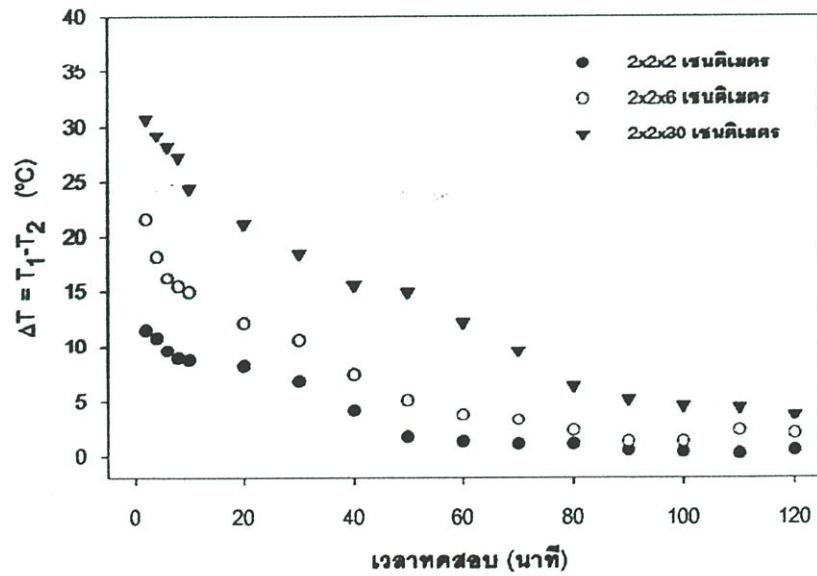
รูปที่ 4.16 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ที่อุณหภูมิพอลิเมอร์เซชันเท่ากับ 90 °C ณ เวลาต่างๆ



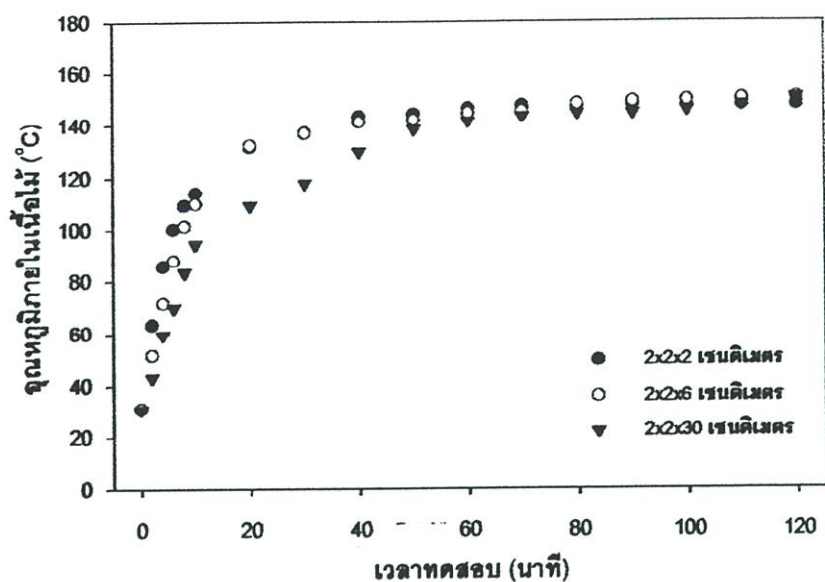
รูปที่ 4.17 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวไม้ (T_1) กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (T_2) ที่อุณหภูมิพอลิเมอร์เซชันเท่ากับ 90 °C ณ เวลาต่างๆ



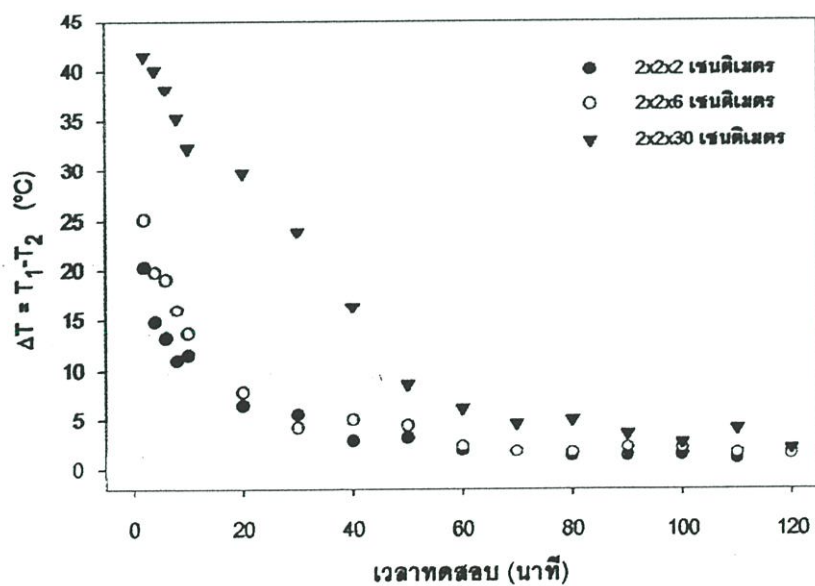
รูปที่ 4.18 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 120 °C ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.19 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวไม้ (T_1) กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (T_2) ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 120 °C ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.20 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 150 °C ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.21 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวไม้ (T_1) กับอุณหภูมิภายในเนื้อไม้ (T_2) ที่อุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันเท่ากับ 150 °C ณ เวลาต่างๆ

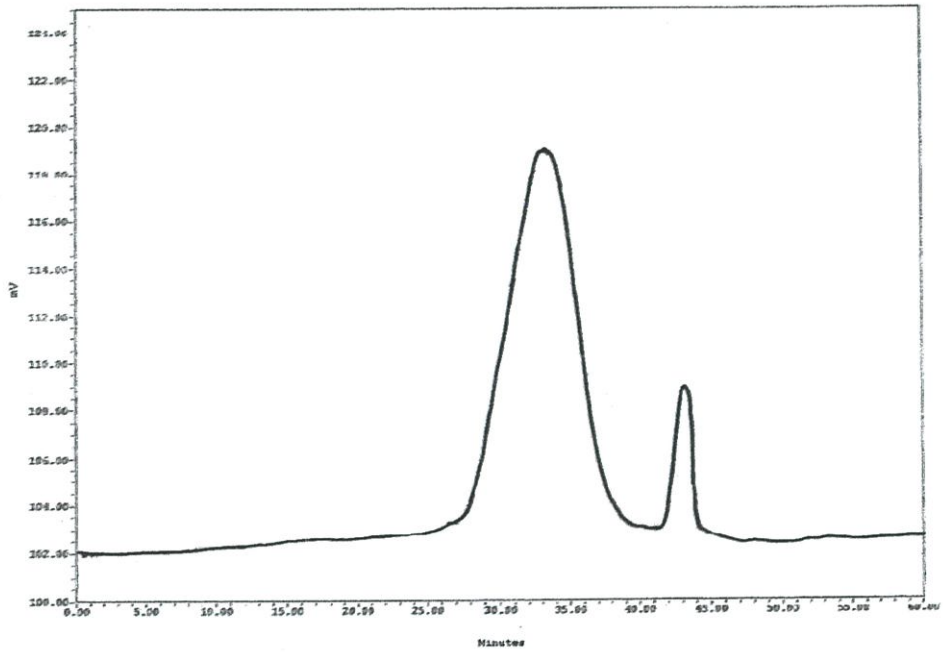
4.3 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิค GPC

ทำการทดลองโดยสกัดพอลิเมอร์ที่อยู่ในเนื้อไม้ที่ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ด้วยไซลีน แล้วเตรียมสารละลายพอลิเมอร์เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยปริมาตร ในเตตระไฮโดรฟิวแรน (THF) และตั้งสภาวะเครื่องมือทดสอบ GPC ดังหัวข้อ 3.3.5.2 ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยจำนวน (Mn) โดยน้ำหนัก (Mw) และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (MWD) ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ที่สกัดจากคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ								
	90 °C			120 °C			150 °C		
	Mn	Mw	MWD	Mn	Mw	MWD	Mn	Mw	MWD
1	28,368	99,378	3.50	28,979	93,588	3.22	31,650	119,576	3.77
2	44,486	123,756	2.78	39,386	128,548	3.26	28,482	98,886	3.47
3	42,395	117,168	2.76	30,441	97,388	3.20	16,316	56,483	3.46
4	45,882	113,080	2.46	27,413	87,823	3.20	35,700	108,699	3.04

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยจำนวน (Mn) และโดยน้ำหนัก (Mw) พบว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลของ PMMA ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าที่เพิ่มขึ้นหรือคงที่เมื่อเวลาในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากในระยะแรกปริมาณความเข้มข้นของอนุมูลอิสระจากการสลายตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และปริมาณมอนอเมอร์ที่อยู่ในเนื้อไม้มีความเข้มข้นที่สูง ดังนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน น้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนักจะมีความเพิ่มขึ้น จนกระทั่งน้ำหนักโมเลกุลมีค่าสูงสุดที่เวลาหนึ่ง ซึ่งสายโซ่ของพอลิเมอร์จะมีการขยายความยาวสายโซ่ได้น้อยลง อันเนื่องมาจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นและปริมาณของมอนอเมอร์ในช่องเซลล์ของไม้ที่เกิดปฏิกิริยามีปริมาณลดลง น้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนักจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาพอลิเมอไรเซชัน การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นส่วนของมอนอเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีความยาวมากขึ้น จึงทำให้เกิดพอลิเมอร์ที่มีความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ใกล้เคียงกันมากขึ้น การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ของพอลิเมอร์จึงมีค่าลดลง เมื่อเวลาในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น



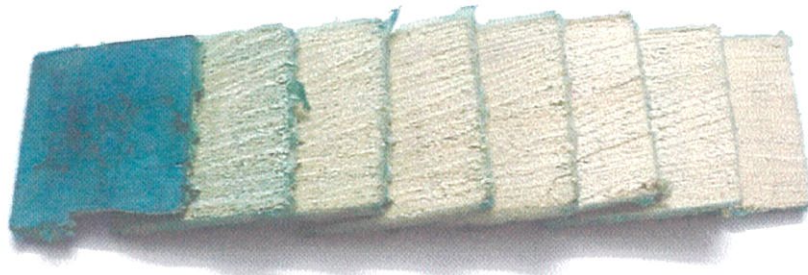
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากเครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี ในการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์



รูปที่ 4.23 ลักษณะของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาด 20 เมส ที่นำมาสกัดด้วยภาวะ PMMA ออกด้วยตัวทำละลายไคลซีน เพื่อใช้วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ที่สภาวะในการพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ กัน

4.4 การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้ (Diffusion of indicator solution in methyl methacrylate in wood)

ศึกษาการแพร่ของเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ในไม้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของมอนอเมอร์ในไม้ที่สภาวะต่างๆ เช่น ผลของเวลาที่มีต่อการแพร่ ผลของด้านต่างๆ ของไม้ และผลของความชื้นที่อยู่ในไม้ ดังหัวข้อที่ 3.3.6



ระยะความลึก 0 cm —————> 2.4 cm

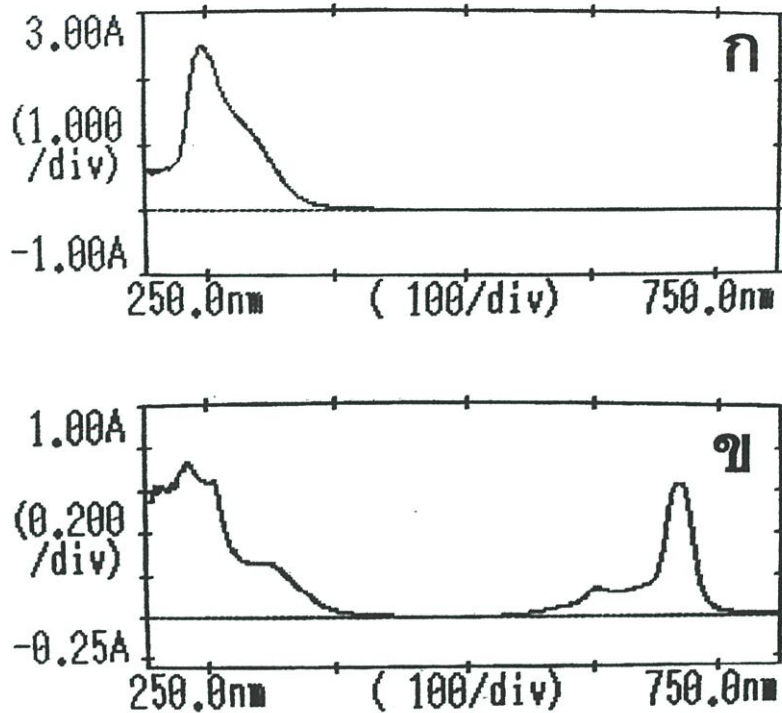
รูปที่ 4.24 แสดงลักษณะของชิ้นไม้พญาสัตบรรณขนาด 3.5x3.5x0.3 เซนติเมตร ที่ใช้ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) หลังการทดสอบแล้วตัดเป็นแผ่นที่ระยะความลึกต่างๆ



รูปที่ 4.25 แสดงลักษณะของชิ้นไม้พญาสัตบรรณที่ตัดย่อยแล้ว ก่อนนำไปสกัดเอาอินดิเคเตอร์ออกจากไม้ด้วยเอทานอล ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

4.4.1 ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของอินดิเคเตอร์

ทำการทดลองเพื่อหาค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุด (λ_{\max}) ของอินดิเคเตอร์ เพื่อใช้ในการหาปริมาณอินดิเคเตอร์ที่เกิดการแพร่เข้าสู่เนื้อไม้ ได้ผลการทดลองดังรูป 4.26



รูปที่ 4.26 แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) ของสารละลายที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล (ก) ไม้พญาสัตบรรณก่อนการทดสอบการแพร่ และ (ข) ไม้พญาสัตบรรณหลังการทดสอบการแพร่ และใช้สีเป็นอินดิเคเตอร์

จากผลการทดลอง เมื่อสแกนหาค่าความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) ในช่วง 250-750 นาโนเมตร พบว่า ในรูปที่ 4.26(ก) สารละลายเกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ $\lambda = 297$ นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงของเอทานอลและรงควัตถุ (Pigment) ที่มีสีเหลืองจากไม้พญาสัตบรรณ ในรูปที่ 4.26(ข) การดูดกลืนแสงสูงสุดเกิดที่ $\lambda = 660$ นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงของอินดิเคเตอร์ ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่โดยอาศัยปริมาณอินดิเคเตอร์ที่เกิดการแพร่เข้าสู่เนื้อไม้ โดยการสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล จึงเลือกวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น $\lambda = 660$ นาโนเมตร



(ก) เวลาทดสอบ 6 วัน ความชื้น 0 %
ด้านรัศมี ระยะความลึก 0-1.2 เซนติเมตร



(ข) เวลาทดสอบ 6 วัน ความชื้น 0 %
ด้านสัมผัส ระยะความลึก 0-1.2 เซนติเมตร



(ค) เวลาทดสอบ 6 วัน ความชื้น 0 %
ด้านยาว ระยะความลึก 0-1.2 เซนติเมตร

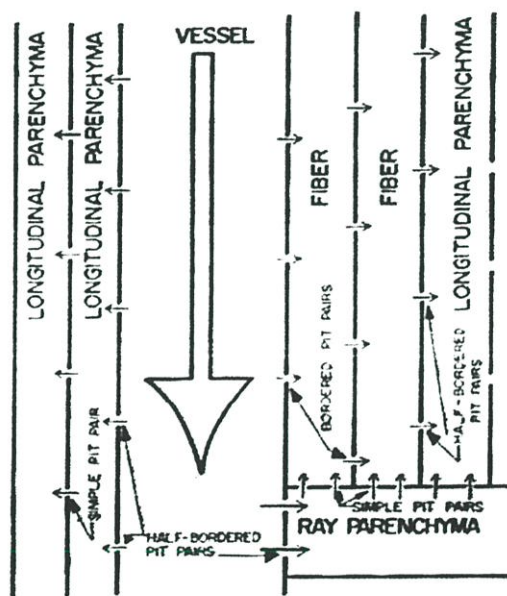
รูปที่ 4.27 สารละลายอินดิเคเตอร์ในเอทานอล ที่ใช้วัดค่าดูดกลืนแสง (Absorption) เพื่อหาค่าความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ ที่สภาวะต่างๆ

ผลที่ได้จากการทดลองหาความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ จากการแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेट ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 % (w/v) ที่ระยะความลึกเวลาที่เกิดการแพร่ และด้านในการแพร่ต่างๆ กัน เมื่อไม่มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 0 12 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.28 – 4.30 โดยพบว่าเมื่อพิจารณาแยกเป็นปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระยะความลึก จากผลการทดลองปริมาณความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์มีค่าลดลงเมื่อระยะความลึกของไม้เพิ่มขึ้น เนื่องจากในกระบวนการแพร่ความแตกต่างของความเข้มข้นเป็นปัจจัยที่สำคัญในการทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการทำให้เกิดการแพร่ ดังนั้นในไม้ที่มีระยะความลึกในเนื้อไม้มากขึ้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ในบริเวณใกล้เคียงกันจะมีค่าน้อยทำให้การแพร่ของอินดิเคเตอร์จึงเกิดขึ้นได้ช้า เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่มีความแตกต่างของความเข้มข้นสูง เช่น ที่ระยะ 0-0.3 หรือ 0.3-0.6 เซนติเมตร

2. เวลาที่เกิดการแพร่ เมื่อเวลาในการแพร่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

3. ด้านที่เกิดการแพร่ พบว่าความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ที่เกิดการแพร่ในด้านรัศมีมีค่ามากกว่าในด้านสัมผัสเพียงเล็กน้อย ในไม้ที่มีความชื้น 0 และ 12 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อไม้มีความชื้น 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ไม้ในด้านยาวให้ค่าความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์สูงสุด และมีค่ามากกว่าด้านรัศมีเล็กน้อยเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของไม้ ในด้านยาวจะมีการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ของเวสเซล (Vessel) หรือ ทราเคอิด (Tracheids) ผ่านช่องพิท (Pit) ทำให้เกิดลักษณะเป็นท่อลำเลียงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ยาวต่อเนื่องกัน จึงทำให้การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์เกิดการแพร่ได้ง่าย ในขณะที่การลำเลียงในด้านสัมผัสจะมีขนาดของช่องเซลล์ที่เกิดการแพร่ได้มีขนาดเล็กกว่าในด้านยาวมาก ดังรูปการไหลภายในไม้ในด้านต่างๆ ในรูปที่ 4.28

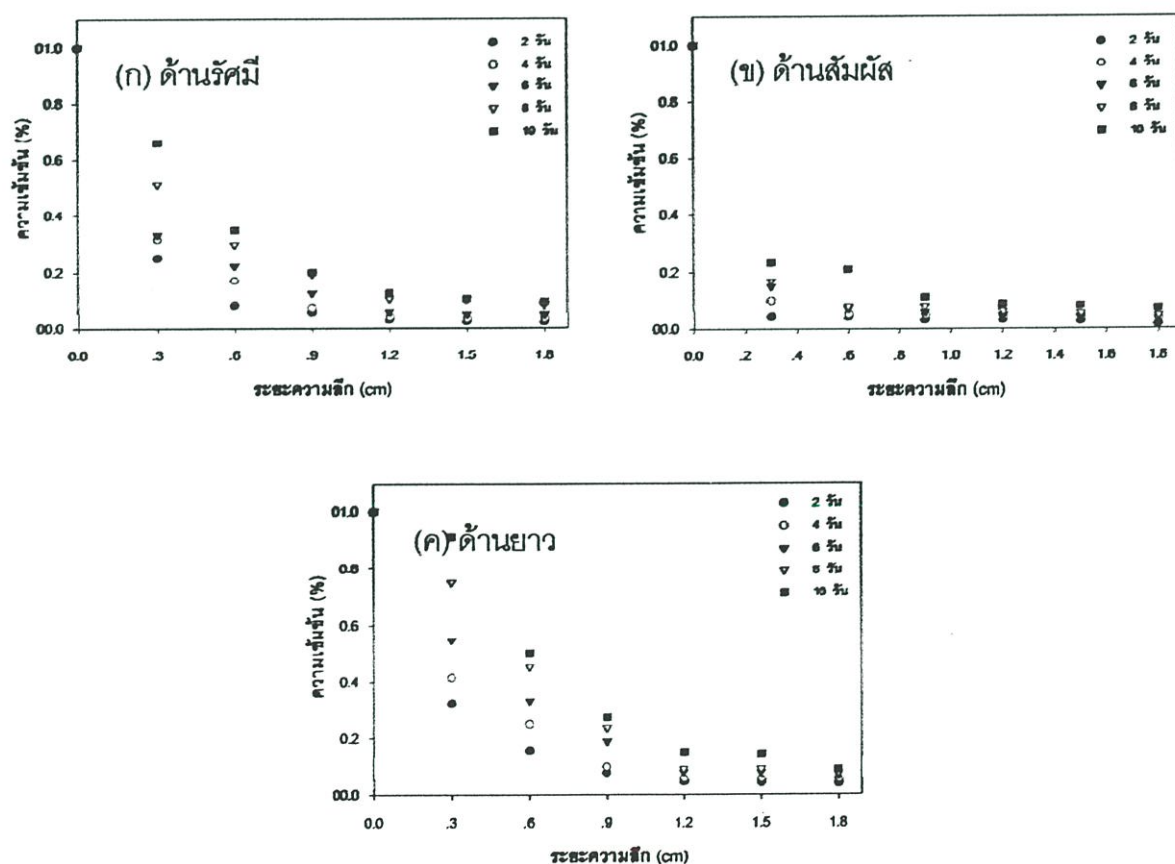


รูปที่ 4.28 แสดงแบบจำลองทั่วไป (Generalized model) ของการไหลภายในไม้ในทิศทางต่างๆ โดยขนาดของลูกศรแสดงถึงความสามารถในการไหลของของไหลในไม้ [24]

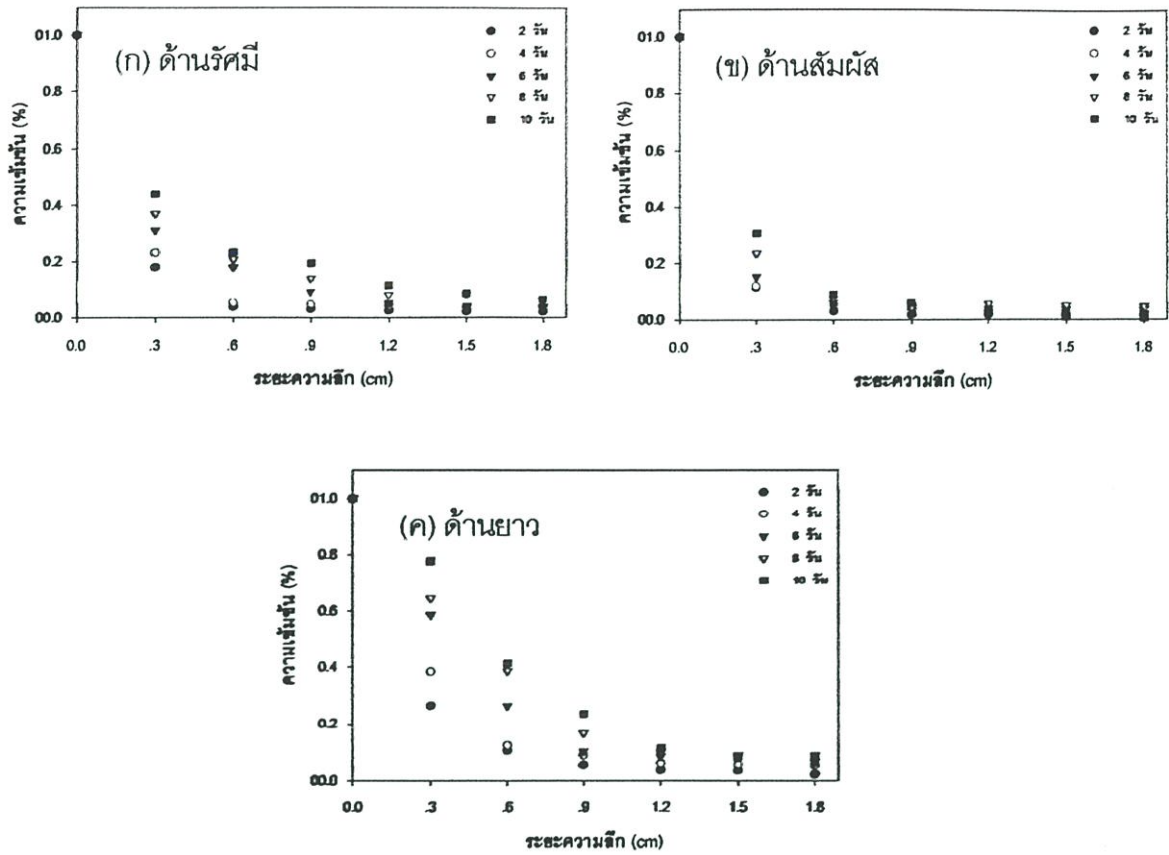
4. ปริมาณความชื้น เมื่อปริมาณความชื้นในไม้เพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้ไม้ที่มีความชื้นอยู่ใน 3 ลักษณะ ได้แก่

- ความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ หรือที่ความชื้นอบแห้ง (Oven dry state) ที่ความชื้นนี้จะพบปริมาณน้ำที่อยู่ภายในผนังเซลล์ (Hygroscopic water) น้อยมาก และจะไม่พบโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในรูปน้ำอิสระ (Free water) เมื่อทำการทดลองสารละลายของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลิตจะเกิดการแพร่เข้าสู่ช่องว่างของเซลล์ได้ง่าย

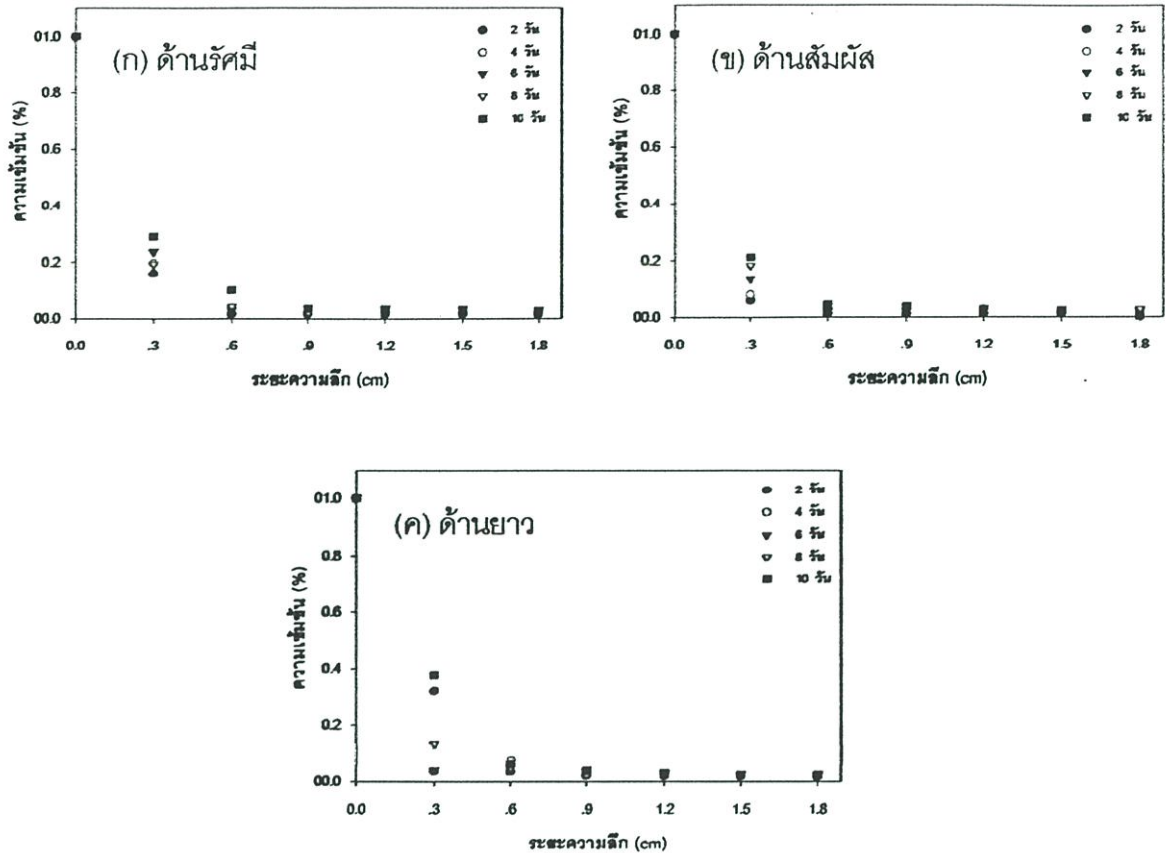
- ความชื้น 12 เปอร์เซ็นต์ หรือความชื้นที่จุดหมาด (Fiber saturation point, FSP) ที่ปริมาณความชื้นนี้ จะพบว่าส่วนของผนังเซลล์จะอึดติดไปด้วยโมเลกุลของน้ำ ในขณะที่ไม่พบส่วนที่เป็นน้ำอิสระ
- ความชื้น 30 เปอร์เซ็นต์ หรือความชื้นเหนือจุดหมาด ที่ความชื้นนี้ผนังเซลล์และช่องเซลล์ (Lumen) จะเต็มไปด้วยโมเลกุลของน้ำ ทำให้เมื่อเกิดการแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ที่มีเมทิลเมทาคริเลตเป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) และมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย (Slightly water solubility) โดยมีค่าประมาณ 1.6 g / 100g ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 20 °C [26] จึงขัดขวางการแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ โดยเมื่อพิจารณาปัจจัยเนื่องจากการบวมตัว (Swell) ของขนาดผนังเซลล์ซึ่งมีการบวมตัวเพียง 10-15 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถละเว้นปัจจัยเนื่องจากขนาดที่เพิ่มขึ้นของการบวมตัวของผนังเซลล์ออกไปได้ [4]



รูปที่ 4.29 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ที่ระยะความลึก เวลาในการแพร่ และด้านการแพร่ต่างๆ กัน เมื่อไม่มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ (ก) ด้านรัศมี (ข) ด้านสัมผัส และ (ค) ด้านยาว



รูปที่ 4.30 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ที่ระยะความลึก เวลาในการแพร่ และ ด้านในการแพร่ต่างๆ กัน เมื่อไม่มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ (ก) ด้านรัศมี (ข) ด้านสัมผัส และ (ค) ด้านยาว



รูปที่ 4.31 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ที่ระยะความลึก เวลาในการแพร่ และ ด้านในการแพร่ต่างๆ กัน เมื่อไม่มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ (ก) ด้านรัศมี (ข) ด้านสัมผัส และ (ค) ด้านยาว

4.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेटในไม้

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามวิธีการของ Egner's method for solves Fick's 2nd law โดยมีขั้นตอนการหาค่าดังหัวข้อที่ 3.3.6.5 สมการเส้นแนวโน้ม (Fit curve) ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेट เป็นดังสมการที่ 4.2

$$y = a.e^{-bx} \quad (4.2)$$

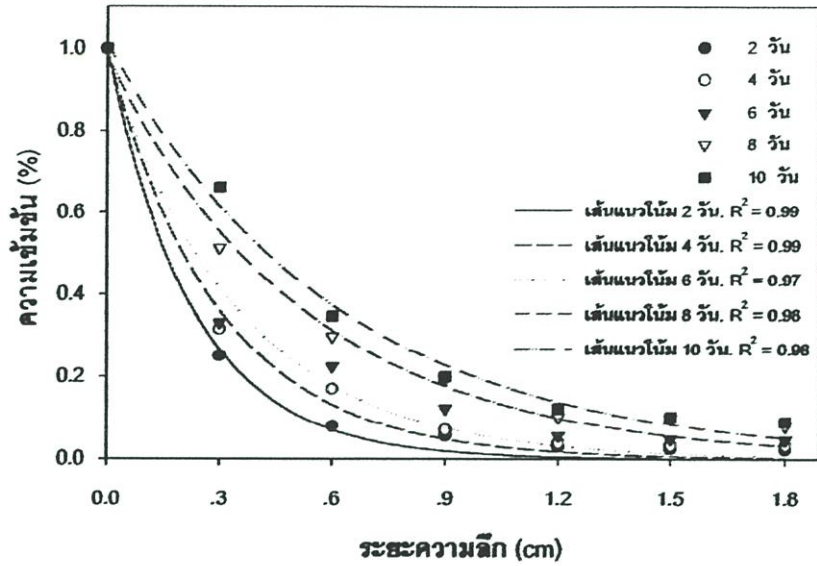
จากความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการความสัมพันธ์แบบ Exponential ที่มีค่า Coefficient of determination, $R^2 > 0.92$ แสดงว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มเป็นไปตามสมการของเส้นแนวโน้มข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้สมการดังกล่าว

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยวิธีของ Egner ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ค่า D มีค่าคงที่

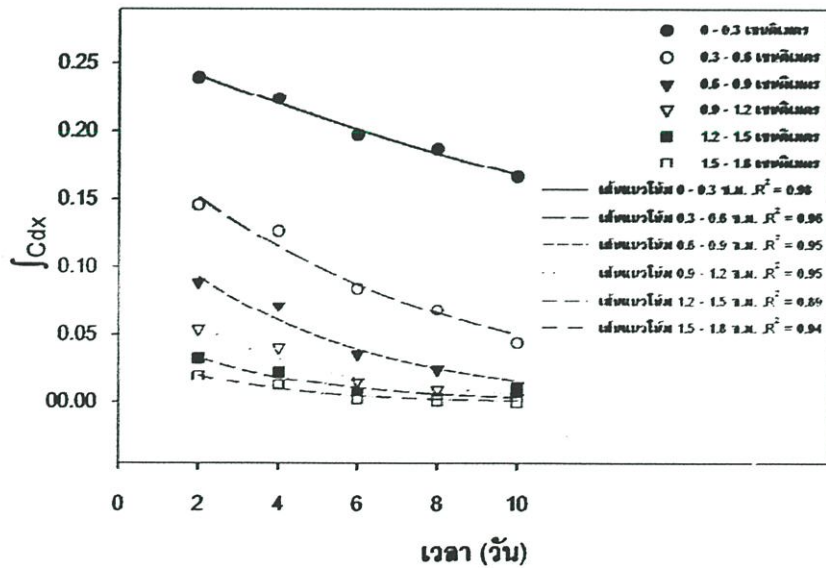
ที่ระยะความลึก และเวลาในการแพร่ต่างๆ โดยกำหนดสภาวะเป็นดังนี้

ที่สภาวะเริ่มต้น $t=0$ ความเข้มข้นเริ่มต้น $C_0 = C$ ที่ระยะลึก $X \geq 0$

ที่เวลาใดๆ $t=t$ ความเข้มข้น $C = C_t$ ที่ระยะลึก $X = X$



รูปที่ 4.32 แสดงค่า Denominator ของการทดสอบการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेट ในไม้ที่มีปริมาณความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ ในด้านรัศมี



รูปที่ 4.33 แสดงค่า Numerator ของการทดสอบการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลेट ในไม้ที่มีปริมาณความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ ในด้านรัศมี

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ที่สภาวะต่างๆ

ด้าน	ความชื้น (%)	เวลา (วัน)	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินดิเคเตอร์ ($\text{cm}^2/\text{sec} \times 10^{-7}$)					
			ระยะความลึก (เซนติเมตร)					
			0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
รำมี	0	2	6.0	2.2	3.1	2.1	1.2	-
		4	10.4	3.7	7.6	2.5	0.8	-
		6	8.9	4.7	5.6	2.8	0.8	0.5
		8	11.4	6.1	8.8	6.4	3.8	1.1
		10	14.1	13.9	4.2	9.0	6.2	2.5
	12	2	3.6	4.4	3.8	2.0	0.4	-
		4	3.2	6.1	6.3	2.1	1.1	-
		6	4.8	3.9	4.51	2.5	4.5	1.1
		8	4.2	9.2	5.9	5.2	5.2	1.4
		10	12.5	8.0	5.8	7.3	5	5.1
ส้มผีเสื้อ	0	2	0.2	0.7	-	-	-	-
		4	3.1	0.4	0.7	-	-	-
		6	4.9	1.3	1.4	0.3	5.7	-
		8	4.7	7.3	1.7	4.8	6	-
		10	1.6	6.3	2.4	3.5	3.3	-
	12	2	2.4	8.4	1.4	6.2	0.5	-
		4	3.3	8.5	6.7	2.7	0.9	-
		6	2.6	1.1	2.5	1.6	5.3	-
		8	1.7	8.8	1.2	0.4	8.2	-
		10	2.8	5.7	2.6	0.7	1.6	2.53
ยาว	0	2	7.8	3.9	5.6	5.4	3.5	3.7
		4	23.3	2.7	6.4	19.2	6.1	2.9
		6	72.8	36.2	24.8	13	13.6	9.2
		8	139.2	57.1	61.4	29.1	12.5	15.8
		10	171.6	127.1	89.4	33.4	25.4	6.1
	12	2	11.4	6.2	5.8	7.8	4.8	9.5
		4	12.2	7.8	9.8	11.4	3.1	7.3
		6	31.5	23.8	7.4	8	13.7	10.4
		8	100.4	38.6	8.5	12.6	10.4	13.8
		10	182.1	124.8	61.4	46.1	24.2	6.8

จากผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสภาวะที่มีความไม่สม่ำเสมอของความเข้มข้นที่ระยะความลึกต่างๆ ของไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 0 และ 12 % ด้วยวิธี Egner's method แสดงค่าในตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อเวลาในการแพร่เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบไม้ที่มีปริมาณความชื้น 0 % ทิศทางการแพร่ในด้านรัศมีและมีเวลาในการทดสอบ 2 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ มีค่าอยู่ในช่วง $1.2 \times 10^{-7} - 6.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ มีค่าอยู่ในช่วง $2.5 \times 10^{-7} - 14.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ที่เวลาในการแพร่ 10 วัน เนื่องจาก เมื่อเวลาในการแพร่เพิ่มขึ้นสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตจะเกิดการแพร่เข้าสู่เนื้อไม้ได้มากขึ้น ทำให้การกระจายตัวของความเข้มข้น (Gradient of concentration, ∇) หรือ ค่า dc/dx ที่ระยะต่างๆ มีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จึงมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) มีค่าลดลง ดังสมการที่ 4.3

$$D = \frac{J}{\nabla} \quad (4.3)$$

เมื่อ

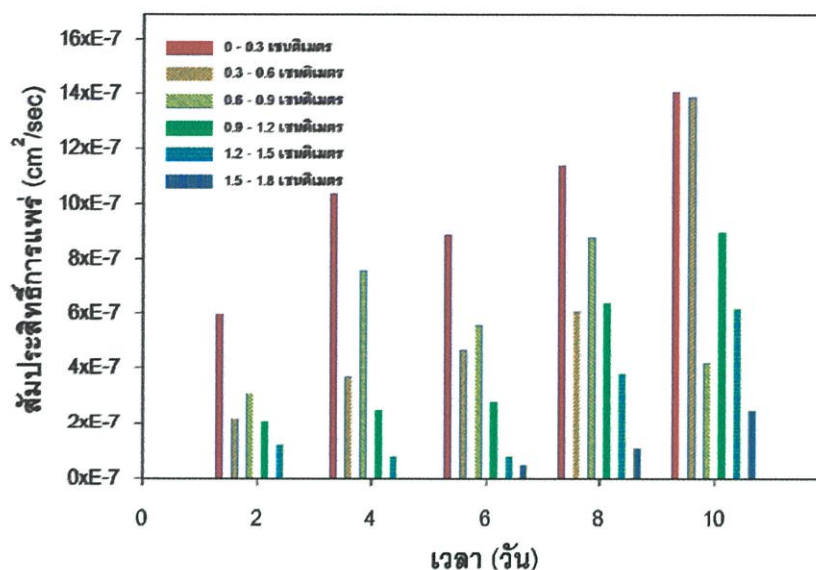
D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)

J คือ ค่าฟลักซ์ (Flux) ของการแพร่

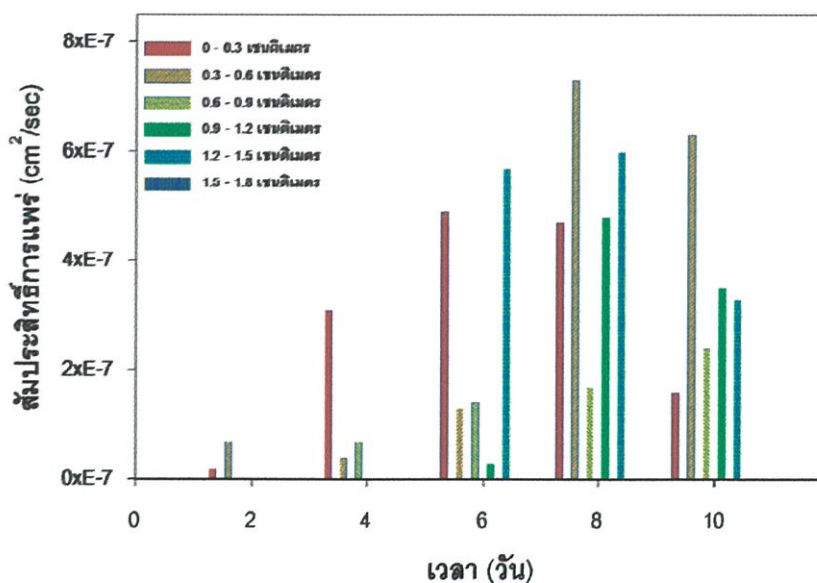
และเมื่อเปรียบเทียบผลเนื่องจากด้านที่เกิดการแพร่ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่ามากในด้านยาว (Longitudinal) โดยมีค่าอยู่ในช่วง $182.1 \times 10^{-7} - 11.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ และด้านรัศมี (Radial) มีค่าประมาณ $14.1 \times 10^{-7} - 1.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ โดยในด้านสัมผัส (Tangential) มีค่าน้อยที่สุดค่าในช่วง $8.5 \times 10^{-7} - 1.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของช่องเปิดภายในไม้ ที่มีช่องเปิดที่มีขนาดใหญ่ในทิศทางด้านยาว (Longitudinal) ทำให้เกิดการแพร่ได้ง่าย ในขณะที่การแพร่ในทิศทางด้านรัศมี (Radial) และด้านสัมผัสจะเกิดได้ยากกว่า เพราะลักษณะของช่องเปิดที่มีปริมาณน้อยและมีขนาดเล็ก

ผลเนื่องจากปริมาณความชื้นในไม้ พบว่าไม้ที่มีปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเนื้อไม้เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีแนวโน้มลดลง โดยในไม้ที่มีปริมาณความชื้น 30 % ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นเหนือจุดหมาด (FSP) สารละลายอินดิเคเตอร์จึงมีความสามารถในการแพร่เข้าสู่เนื้อไม้ได้น้อยมาก อันเนื่องมาจากความสามารถในการละลายน้ำของเมทิลเมทาคริเลตที่ต่ำ ดังรูปที่ 4.31 จึงทำให้ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ ในขณะที่ไม้ที่มีปริมาณความชื้น 0 และ 12 % ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่อยู่ในช่วง $182.1 \times 10^{-7} - 7.8 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ และ $171.6 \times 10^{-7} -$

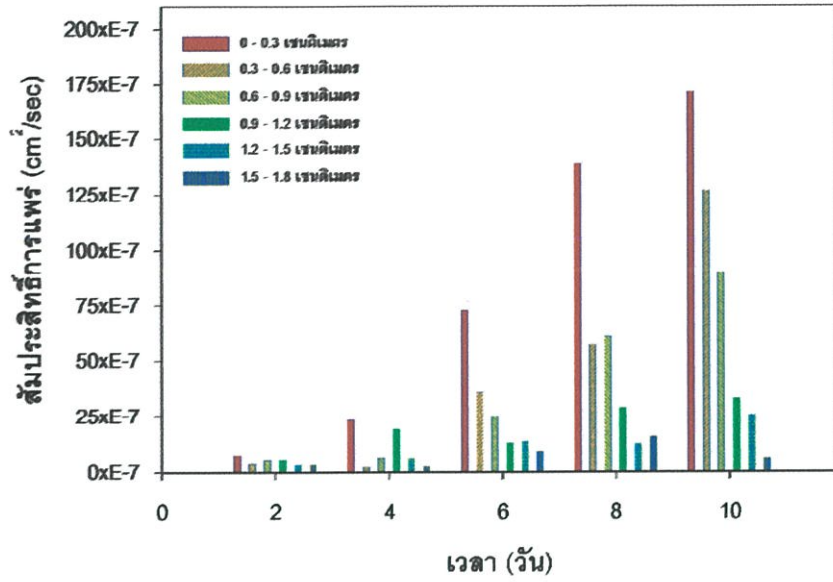
$11.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ตามลำดับโดยที่ปริมาณความชื้นเท่ากับ 0 % ให้ค่าที่สูงกว่า 12 % เพียงเล็กน้อย



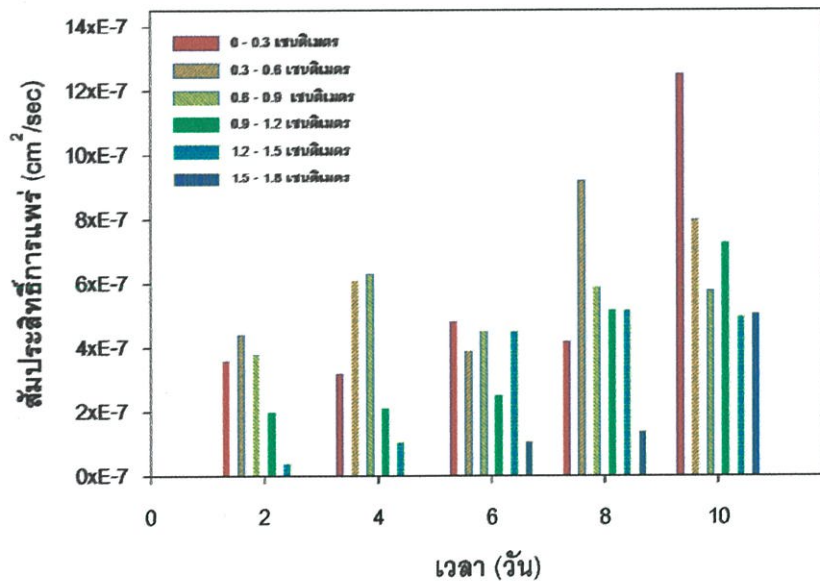
รูปที่ 4.34 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 0 % ในด้านรัศมี (Radial) ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ



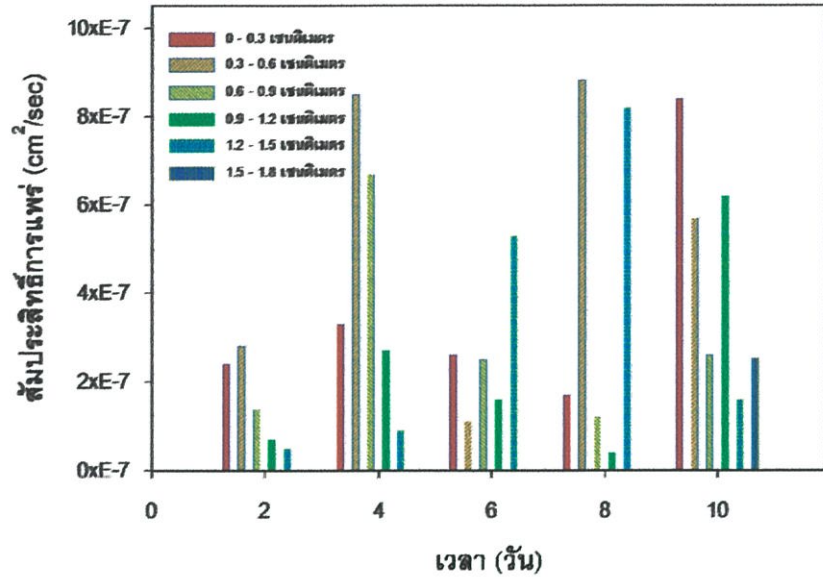
รูปที่ 4.35 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 0 % ในด้านสัมผัส (Tangential) ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ



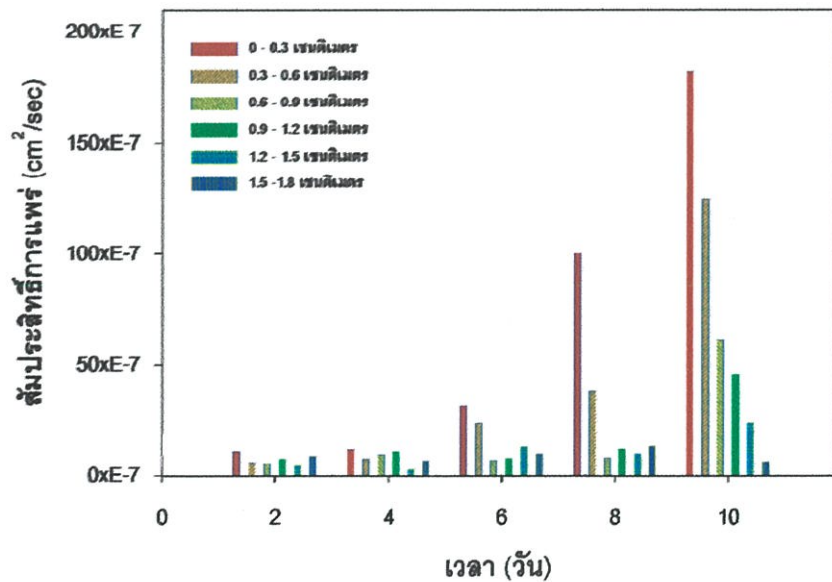
รูปที่ 4.36 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 0 % ในด้านยาว (Longitudinal) ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ



รูปที่ 4.37 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 12 % ในด้านรัศมี (Radial) ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ



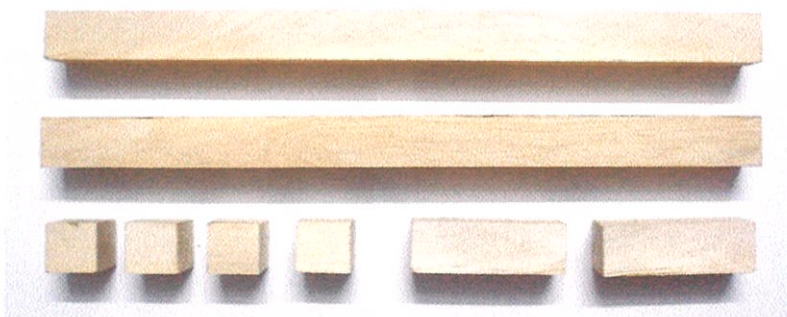
รูปที่ 4.38 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 12 % ในด้านสัมผัส (Tangential) ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ



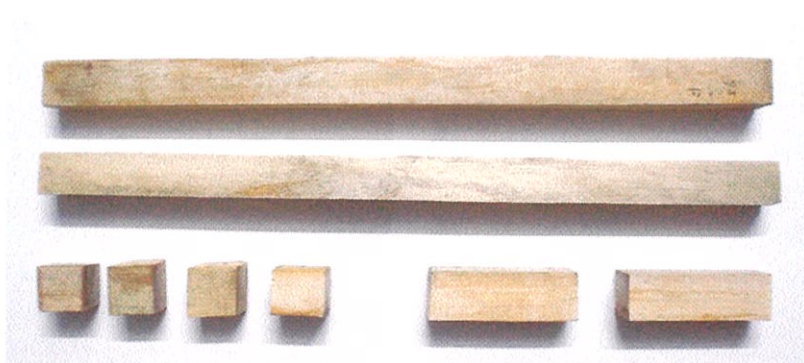
รูปที่ 4.39 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณที่มีความชื้น 12 % ในด้านยาว (Longitudinal) ที่เวลาและระยะความลึกต่างๆ

4.5 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์

ไม้พญาสัตบรรณที่นำมาใช้ในการศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล มีด้วยกัน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด 2x2x2 , 2x2x6 และ 2x2x30 เซนติเมตร โดยลักษณะของเนื้อไม้พญาสัตบรรณจากการสังเกตด้วยสายตาประสาตต่างๆ พบว่า เนื้อไม้มีสีเหลืองอ่อน มีเนื้อไม้อ่อนไม่ทนต่อการชุบซีดหรือการกัดทับ มีน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรน้อยเมื่อเทียบกับไม้ชนิดอื่นๆ ลักษณะของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติแสดงดังรูปที่ 4.40 และเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) แล้ว พบว่าเนื้อไม้มีสีเข้มขึ้นเล็กน้อยในบริเวณที่มีวิฎภาคของ PMMA กระจายตัวอยู่ เนื้อไม้มีความแข็งเพิ่มขึ้นและทนต่อการชุบซีดมากขึ้น ลักษณะของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณแสดงได้ดังรูปที่ 4.41



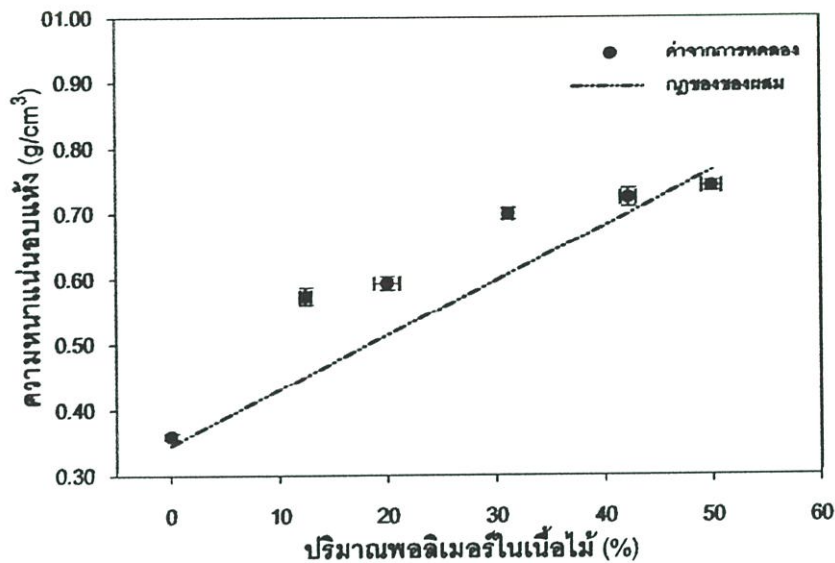
รูปที่ 4.40 แสดงลักษณะของไม้พญาสัตบรรณขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 4.41 แสดงลักษณะของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่ได้หลังจากการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

4.5.1 สมบัติทางกายภาพ

ทำการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพบางประการของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ซึ่ง ได้แก่ ความหนาแน่นอบแห้ง การบวมตัวเชิงปริมาตร การดูดซับน้ำ และสมบัติทางความร้อน ดังหัวข้อ 3.3.7.1 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.42 – 4.46



รูปที่ 4.42 แสดงค่าความหนาแน่นของไม้พญาสัตบรรณและคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างกัน

จากผลการทดลอง รูปที่ 4.42 พบว่าไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติมีความหนาแน่นอบแห้ง (Density at oven dry state) ประมาณเท่ากับ 0.348 g/cm^3 และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ประมาณ 30 % จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.68\text{--}0.78 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสรุปได้ว่า ความหนาแน่นของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้สูงขึ้นทำให้อัตราส่วนระหว่างมวลของไม้พญาสัตบรรณต่อปริมาตรให้เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นจึงแปรผันตามปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ ตามกฎของของผสม (Rule of mixture) [27]

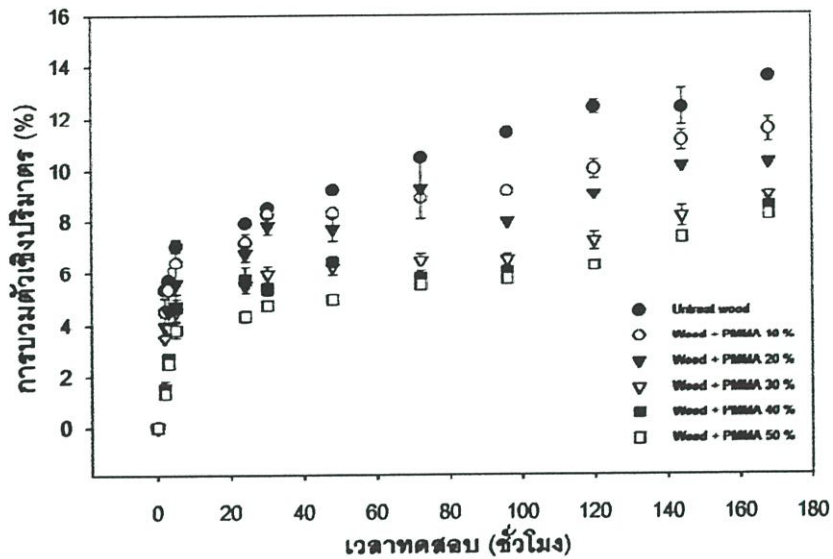
$$D_{\text{comp}} = D_w \cdot V_w + D_{\text{PMMA}} \cdot (1 - V_w) \quad (4.4)$$

เมื่อ D_{comp} คือ ความหนาแน่นของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ

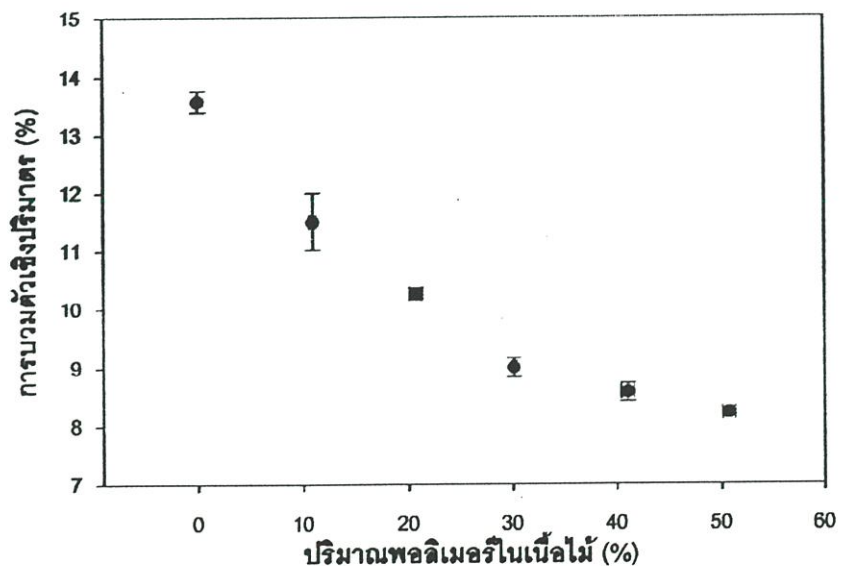
D_w คือ ความหนาแน่นของไม้พญาสัตบรรณ

V_w คือ สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของไม้พญาสัตบรรณในคอมโพสิต

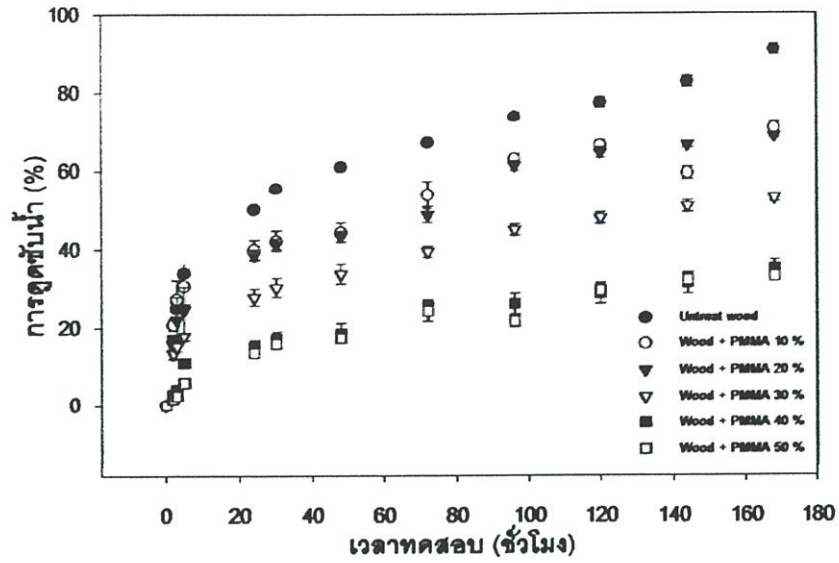
D_{PMMA} คือ ความหนาแน่นของพอลิเมทิลเมทาคริเลต เท่ากับ 1.18 g/cm^3 [25]



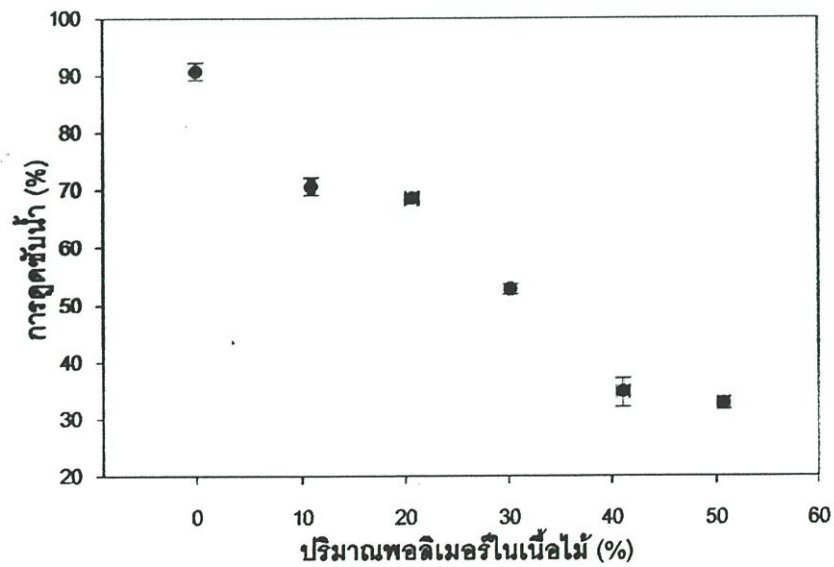
รูปที่ 4.43 แสดงค่าการบวมตัวเชิงปริมาตร (Volumetric swelling) ของไม้พญาสัตบรรณ และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.44 แสดงค่าการบวมตัวเชิงปริมาตร (Volumetric swelling) ของไม้พญาสัตบรรณ และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ ที่เวลาทดสอบเท่ากับ 168 ชั่วโมง



รูปที่ 4.45 แสดงค่าการดูดซับน้ำ (Water absorption) ของไม้พญาสัตบรรณ และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.46 แสดงค่าการดูดซับน้ำ (Water absorption) ของไม้พญาสัตบรรณ และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ ณ เวลาทดสอบเท่ากับ 168 ชั่วโมง

ผลการทดลองการบวมตัวเชิงปริมาตรและการดูดซับน้ำของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ พบว่าเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นค่าการบวมตัวเชิงปริมาตรและการดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยทั้งค่าการบวมตัวเชิงปริมาตรและการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (ประมาณ 5 ชั่วโมงแรก) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและคงที่เมื่อถึงเวลาหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาการกระจายตัวและสถานะของโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อไม้ พบว่าโมเลกุลของน้ำสามารถอยู่ได้ใน 2 รูปแบบ คือ น้ำที่มีอยู่ในผนังเซลล์ (Bound or hygroscopic water) และน้ำอิสระ (Free water) จากลักษณะการจัดเรียงตัวขององค์ประกอบของผนังเซลล์ที่แบ่งเป็นชั้นๆ ของไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6(n) และขนาดขององค์ประกอบในส่วนต่างๆ ของโครงสร้างผนังเซลล์ของไม้ในตารางที่ 2.7 พบว่าชั้นของผนังเซลล์ในส่วนที่เป็นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall, P) และผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall) แบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น ได้แก่ S_1 , S_2 และ S_3 ซึ่งผนังเซลล์ในแต่ละชั้นมีความหนาของผนังเซลล์ที่ไม่เท่ากัน โดยชั้น S_2 จะมีความหนามากที่สุดซึ่งมีค่าประมาณ 4-10 ไมครอน เมื่อเกิดการดูดซับน้ำจึงทำให้เกิดการบวมตัวของผนังเซลล์เป็นอย่างมาก โดยสามารถแยกพิจารณาค่าการดูดซับน้ำและการบวมตัวเชิงปริมาตรได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. ช่วง 0 – 24 ชั่วโมง อัตราการดูดซับน้ำและการบวมตัวเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากในช่วงนี้ปริมาณความชื้นในเนื้อไม้และผนังเซลล์มีค่าน้อย เมื่อไม้เริ่มดูดซับน้ำปริมาณน้ำส่วนใหญ่จะเข้าไปอยู่ในส่วนที่เป็นผนังเซลล์ ซึ่งมีพลังงานในการดูดซับสูงและสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเอง [4] และเมื่อปริมาณความชื้นในผนังเซลล์เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะผนังเซลล์ในชั้น S_2 ที่มีความหนาของเซลล์มากกว่าชั้นอื่นๆ จึงทำให้ผนังเซลล์จึงเกิดการบวมตัวเป็นอย่างมาก ดังนั้นทั้งค่าการดูดซับน้ำและการบวมตัวเชิงปริมาตรจึงเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกนี้

2. ช่วง 24 – 144 ชั่วโมง อัตราการดูดซับน้ำและการบวมตัวเชิงปริมาตร เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากเมื่อเวลาทดสอบมากขึ้นปริมาณความชื้นภายในผนังเซลล์ในแต่ละชั้นจะมีปริมาณมากขึ้น ทำให้พลังงานในการดูดซับน้ำของผนังเซลล์มีแนวโน้มลดลง อัตราการดูดซับน้ำและการบวมตัวเชิงปริมาตรจึงลดลง ทำให้ทั้งค่าการบวมตัวเชิงปริมาตรและการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยโมเลกุลของน้ำจะเริ่มถูกดูดซับในรูปน้ำอิสระ

3. ช่วง 144 – 168 ชั่วโมง อัตราการดูดซับน้ำ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากในช่วงแรกของการดูดซับ น้ำจะถูกดูดซับในผนังเซลล์ (Bound water) เมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้นผนังเซลล์มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ลดลง โมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับในรูปของน้ำอิสระ (Free water) ที่มีการกระจายตัวอยู่ในช่องว่างของเซลล์ หรือเวสเซล (Vessel) แทน ดังนั้นค่าการดูดซับน้ำจึงมีแนวโน้มคงที่หรือเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การดูดซับน้ำและการบวมตัวเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรก และค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงสุดท้าย ตามเหตุผลข้างต้น โดยไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงด้วย PMMA ให้ค่าที่สูงกว่าคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ และเมื่อปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าการบวมตัวเชิงปริมาตรและการดูดซับน้ำมีแนวโน้มที่ลดลง

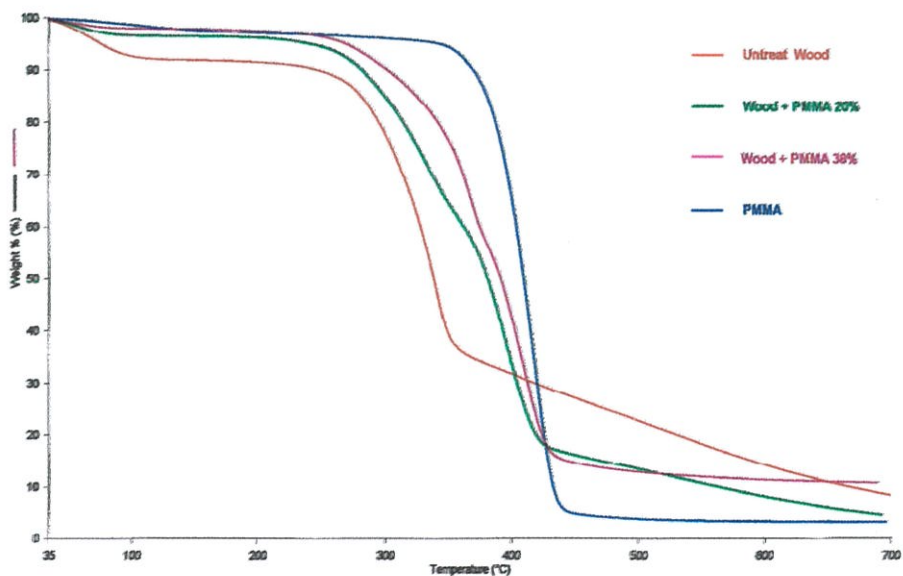
เมื่อพิจารณาการดูดซับน้ำและการบวมตัวเชิงปริมาตรเทียบกับปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ พบว่า เมื่อปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้เพิ่มขึ้นค่าสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากวัฏภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีการดูดซับน้ำที่ต่ำ อีกทั้งยังมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในช่องว่างของเซลล์ ทำให้เกิดการขัดขวางการดูดซับน้ำของผนังเซลล์และลดการดูดซับน้ำในรูปของน้ำอิสระที่บริเวณเวสเซล ค่าการดูดซับน้ำและการบวมตัวเชิงปริมาตรจึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก (TGA) อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min

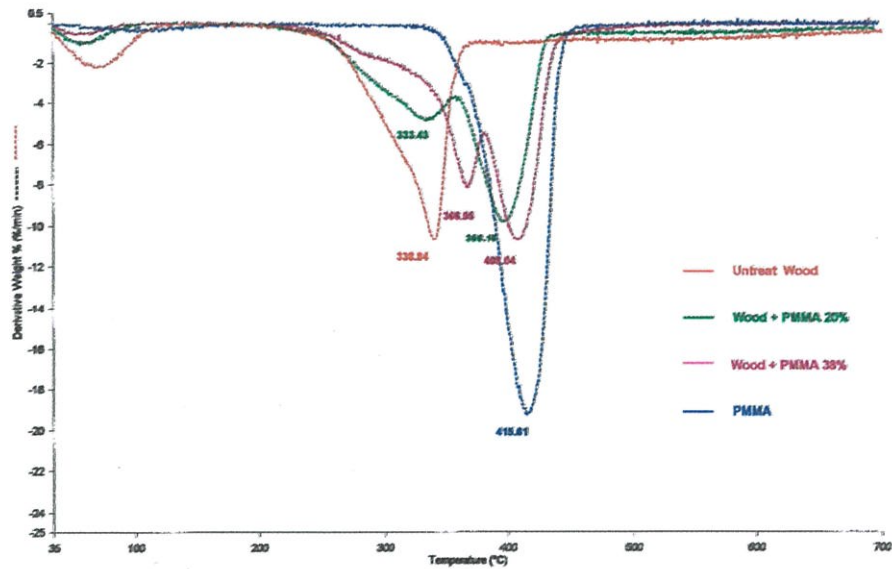
ตัวอย่างทดสอบ	ปริมาณความชื้น (%)	อุณหภูมิสลายตัวของวัฏภาค (°C)			
		ไม้พญาสัตบรรณ		พอลิเมทิลเมทาคริเลต	
		Onset	Peak	Onset	Peak
Untreat wood	9	294	339	-	-
Wood + PMMA 20 %	4	279	333	341	396
Wood + PMMA 38 %	2	316	367	376	408
PMMA	< 0.5	-	-	381	416

จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (Onset) และอุณหภูมิสลายตัว (Peak) ของวัฏภาคไม้พญาสัตบรรณในคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งวัสดูคอมโพสิตนี้ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ ได้แก่ ไม้พญาสัตบรรณที่มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวประมาณ 294 °C และพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ 381 °C ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนองค์ประกอบของ PMMA ในคอมโพสิตมากขึ้น สมบัติของคอมโพสิตที่ได้จึงมีแนวโน้มไปทาง PMMA จึงทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของไม้พญาสัตบรรณในคอมโพสิตสูงขึ้น โดยคอมโพสิตที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้เท่ากับ 38 % มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ 316 °C จากผลการทดลองข้างต้นอาจกล่าวได้ว่า วัฏภาคของ PMMA จะทำหน้าที่หน่วงหรือช่วยลดความสามารถในการนำความร้อนจากภายนอกเข้าสู่

วิทยาของไม้พญาสัตบรรณในคอมโพสิต ซึ่งเป็นผลเนื่องจากปริมาณของวิทยา PMMA ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการนำความร้อน (Conduction) จากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบคือคอมโพสิตได้ลดลง เพราะ PMMA เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการนำความร้อนได้ต่ำ จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปสู่วิทยาที่เป็นไม้พญาสัตบรรณได้ช้า ในทางกลับกันเมื่อวิทยาของ PMMA เพิ่มขึ้นความสามารถในการพาความร้อน (Convection) โดยผ่านลักษณะที่เป็นเซลล์ที่เปิด (Open cell) ของโครงสร้างไม้ทำได้ลดลง เนื่องจากลักษณะของเซลล์เปิดเชื่อมต่อกันของไม้ ทำให้เกิดการพาความร้อนจากช่องว่างของเซลล์ (Vessel) หนึ่งไปสู่ช่องเซลล์ข้างเคียงได้โดยง่าย ซึ่งเป็นผลทำให้อุณหภูมิของไม้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่คอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีวิทยาของ PMMA กระจายตัวแทนที่ช่องว่างอย่างไม่ต่อเนื่องทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นเซลล์ปิด (Close cell) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนเพราะสมบัติที่มีการนำความร้อนได้ต่ำ และยังสามารถดูดซับความร้อนที่เกิดการถ่ายเทจากไม้พญาสัตบรรณได้มาก เนื่องจากมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูง และเมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของตัวอย่างทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับ (Absorb) โมเลกุลของน้ำลดลง ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับการทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption)



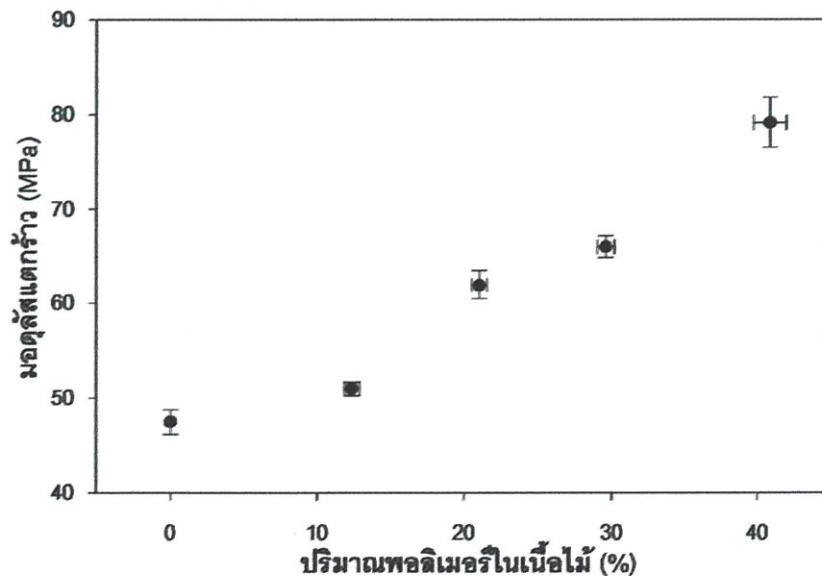
รูปที่ 4.47 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของไม้พญาสัตบรรณ และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างๆ กัน ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก (TGA)



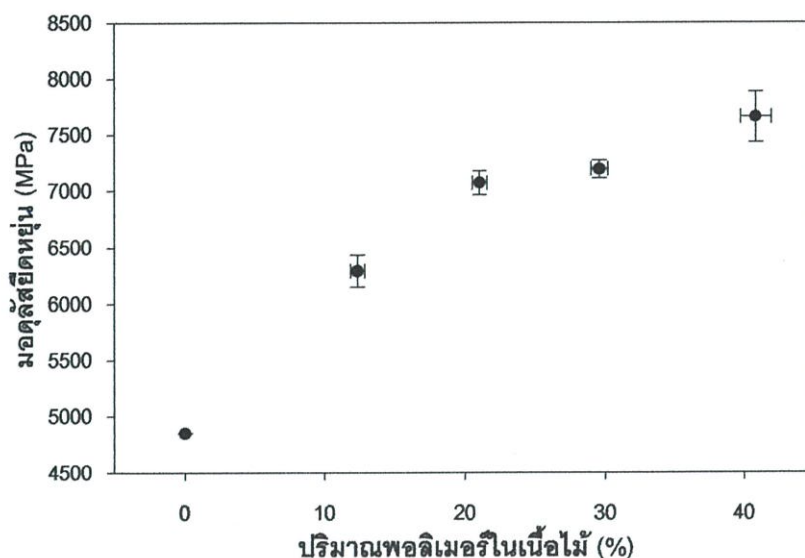
รูปที่ 4.48 แสดงเดอริเวทีฟเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของไม้พญาสัตบรรณและคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างกัน ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก (TGA)

4.5.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลบางประการของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ได้แก่ มอดุลัสแตกร้าว (MOR) มอดุลัสยืดหยุ่น (MOE) ความเค้นเฉือนตามแนวเส้นใย ความเค้นอัดตั้งฉากเส้นใย และความแข็งสถิตย์ ดังหัวข้อ 3.3.7.2 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.49 – 4.55



รูปที่ 4.49 แสดงค่ามอดุลัสแตกร้าว (Modulus of rupture, MOR) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน



รูปที่ 4.50 แสดงค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic, MOE) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน

จากผลการทดลอง พบว่า ทั้งค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (MOE) และมอดุลัสแตกหัก (MOR) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ พบว่า แรงกระทำบริเวณด้านบนติดกับหัวกดทดสอบ เป็นแรงกดอัด (Compression) ส่วนแรงกระทำบริเวณด้านล่าง เป็นแรงดึง (Tension) เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการแตกหักของชิ้นไม้ทดสอบทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติ ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.51 และ 4.52



รูปที่ 4.51 แสดงลักษณะการแตกหักของชิ้นไม้ทดสอบหาค่าการดัดสติยต์ของไม้พญาสัตบรรณ ก่อนการปรับปรุงสมบัติ

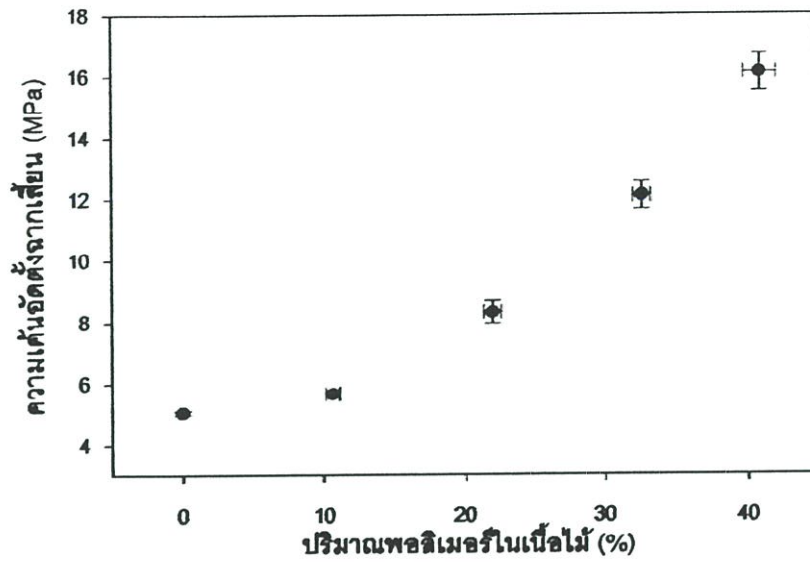
จากรูปที่ 4.51 การแตกหักของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติ แสดงให้เห็นว่าเป็นการแตกหักด้วยแรงดึงเส้นใย (Brash tension failure) ซึ่งเกิดจากสภาพไม้ที่มีความเปราะ ไม้แข็งแรง โดยไม้จะขาดจากกันเนื่องจากแรงดึงขนานเส้นใย



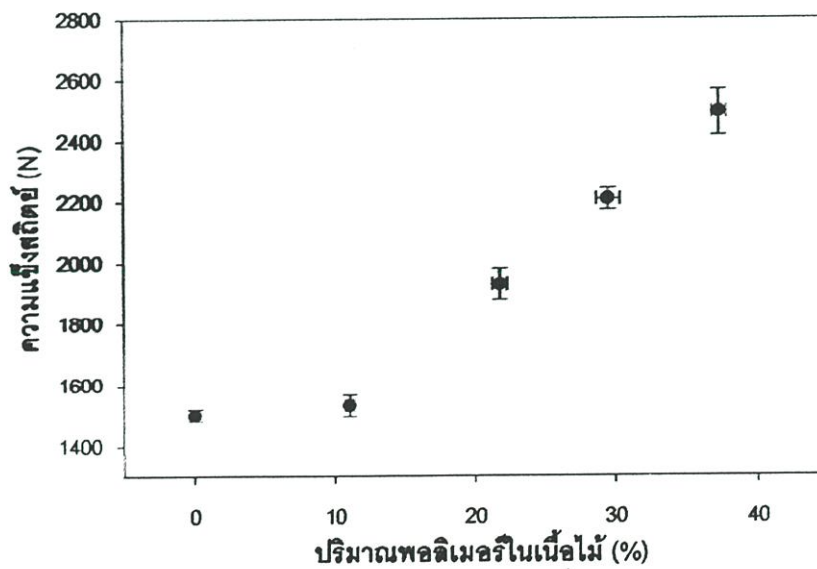
รูปที่ 4.52 แสดงลักษณะการแตกหักของชิ้นไม้ทดสอบหาค่าการดัดสถิตย์ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

ในรูปที่ 4.52 เป็นการแตกหักของไม้ตัวอย่างที่เกิดจากแรงดึงขนานเส้นใย ซึ่งเกิดจากบริเวณด้านล่างของตัวอย่าง การแตกหักเสียหายแบบนี้เรียกว่า "การแตกหักด้วยแรงดึงเส้นใยประสาน" (Splintering tension failure) ซึ่งเกิดขึ้นกับไม้ที่มีความเหนียว (Toughness)

เมื่อพิจารณาจากค่ามอดุลัสแตกกร้าว มอดุลัสยืดหยุ่น และรูปแสดงลักษณะการแตกหักของไม้พญาสัตบรรณและคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณแล้ว สรุปได้ว่าคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณมีแข็งแรงและมีความเหนียวของเนื้อไม้เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติมีลักษณะของไม้ที่มีรูพรุน (Void) มาก ความหนาแน่นต่ำ เมื่อมีแรงภายนอกกระทำในบริเวณที่เป็นรูพรุนซึ่งเป็นจุดที่มีความอ่อนแอ (Weak point) และไม่ทนทานต่อแรงกระทำจะเกิดการเสียรูป (Deformation) ก่อน ซึ่งทำให้เกิดเป็นจุดริเริ่มการเสียหายอย่างถาวร (Failure) ของโครงสร้างไม้ แต่ในวัสดุคอมโพสิตเมื่อมีวัฏภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) กระจายอยู่ในช่องว่างของเซลล์นอกจากจะช่วยลดจุดอ่อนแอของไม้พญาสัตบรรณแล้ว วัฏภาคของ PMMA ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในโครงสร้างไม้ มีลักษณะที่มีความยืดหยุ่นหรือเป็นวัสดุวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) จะทำหน้าที่รับแรงที่ถ่ายเทมาจากไม้เมื่อได้รับแรงกระทำภายนอก จึงมีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.53 แสดงค่าความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยน (Compressive stress perpendicular to grain) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน

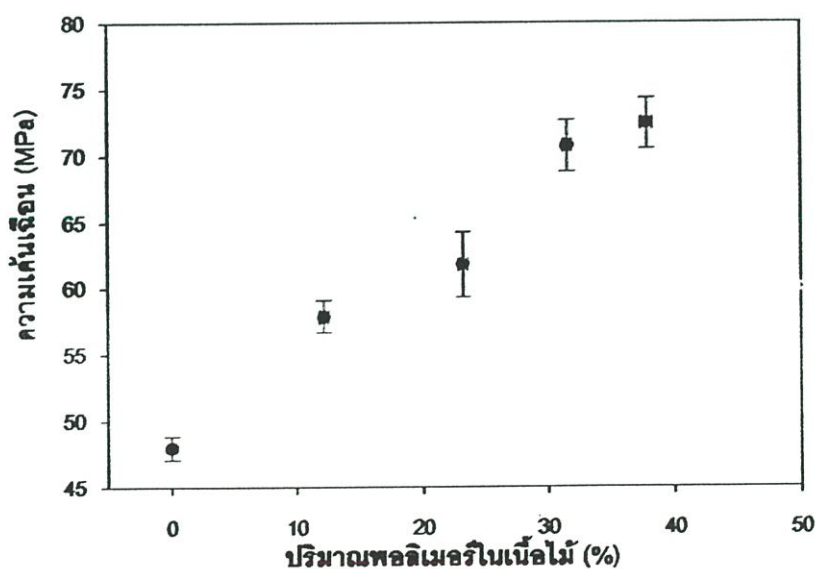


รูปที่ 4.54 แสดงค่าความแข็งสถิตย์ (Static hardness) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน

ในรูปที่ 4.53 และ 4.54 แสดงค่าความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยนและค่าความแข็งแรงสถิตย จากผลการทดลอง พบว่าค่าความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยนและค่าความแข็งแรงสถิตยมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่ำๆ และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ไม่มีปริมาณสูงๆ เนื่องจากแรงที่ใช้ในการทดสอบเป็นแรงกดอัด (Compression) กระทำต่อชิ้นตัวอย่างทดสอบ ซึ่งมีผลทำให้ความหนาแน่น (Density) ของเนื้อไม้บริเวณที่ทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงต้านต่อแรงกระทำมากขึ้น พิจารณาจากค่าความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยนและค่าความแข็งแรงสถิตย ในช่วงที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ต่างกัน ดังนี้

1. ในช่วง 0-10 % สมบัติที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากในช่วงนี้ส่วนของภูมิภาค PMMA มีปริมาณน้อย ซึ่งทำให้อัตราส่วนที่เป็นช่องว่างของเซลล์ในภูมิภาคที่เป็นไม้มีจำนวนมาก จึงไม่สามารถแสดงสมบัติของการรับและดูดซับพลังงานได้ดี เพราะมีการกระจายตัวไม่ดี

2. ช่วง 20-40 % ค่าสมบัติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากอัตราส่วนของภูมิภาค PMMA ที่มากขึ้นจะเกิดการกระจายตัว และแทนที่ส่วนที่เป็นช่องว่างของเซลล์ไม้ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความหนาแน่นต่ำ ให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมาก ความสามารถในการรับแรงกดอัดจากภายนอกจึงเพิ่มขึ้นอย่างมาก

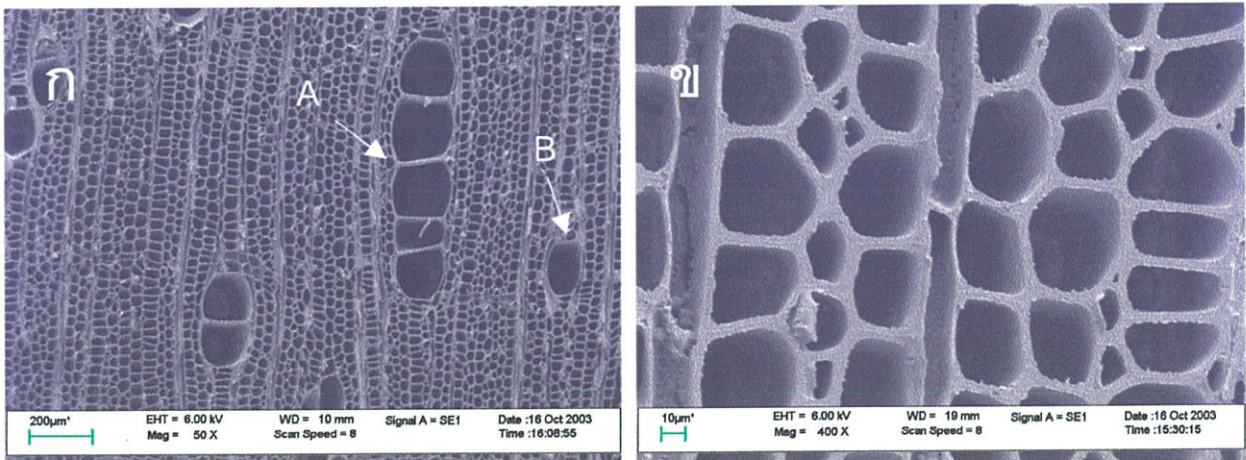


รูปที่ 4.55 แสดงค่าความเค้นเฉือนตามแนวเสี้ยน (Shear stress parallel to grain) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ต่างกัน

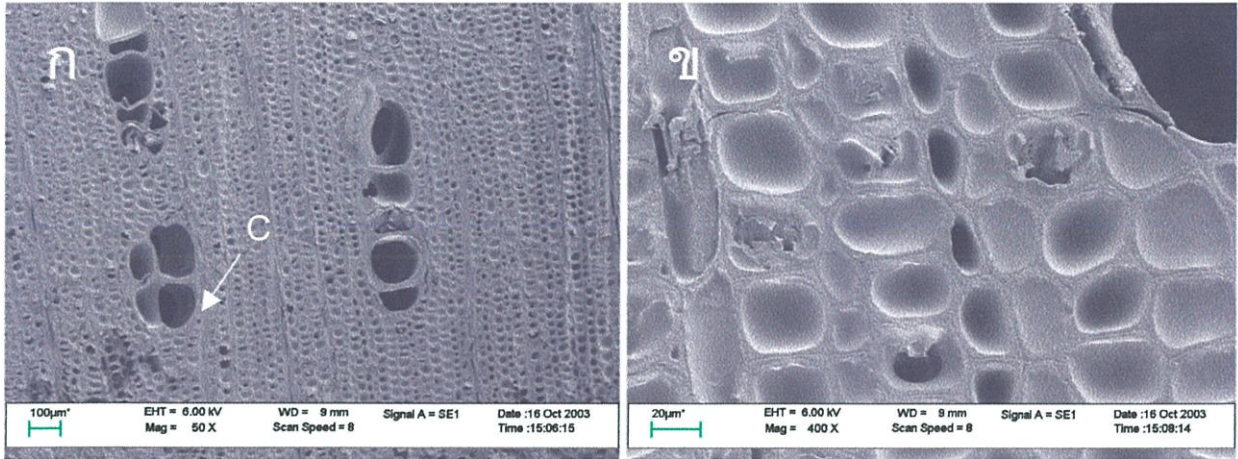
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้เพิ่มขึ้นค่าสมบัติความเค้นเฉือนตามแนวเส้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทดสอบความเค้นเฉือนตามแนวเส้นเป็นทดสอบที่ทำให้ตัวอย่างไม่เกิดการเสียหายอย่างถาวร (Failure) ของโครงสร้างไม้โดยเฉพาะที่เป็นไม้ต้นฤดู (Earlywood) และ ไม้ปลายฤดู (Latewood) ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ประกอบด้วยผนังเซลล์ที่มีความหนาและทนทานต่อแรงเฉือนได้สูง ดังนั้นเมื่อมีวิฎุภาคของ PMMA ที่กระจายตัวอยู่ในส่วนของเซลล์ทั้งสองและมีการยึดเกาะที่ดี จึงทำให้การรับและถ่ายเทแรงกระทำภายนอกได้ดี มีผลทำให้ความสามารถในการต้านทานต่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้เพิ่มขึ้น

4.6 สัณฐานวิทยา (Morphology)

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของไม้พญาสัตบรรณก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมทิลเมทาคริลเลต (PMMA) ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 20 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เตรียมตัวอย่างโดยเทคนิคการตัดตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำด้วยเครื่องไมโครทอม (Freezing microtome) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.56 และ 4.57



รูปที่ 4.56 แสดงสัณฐานวิทยาของไม้พญาสัตบรรณด้านยาว (Longitudinal) (ก) ไม้พญาสัตบรรณก่อนปรับปรุงสมบัติที่กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) ไม้พญาสัตบรรณก่อนปรับปรุงที่กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ 4.57 แสดงสัณฐานวิทยาของคอมโพลีเมอร์ไม้พญาศ์ตบรรณในด้านยาว (Longitudinal)
 (ก) คอมโพลีเมอร์ไม้พญาศ์ตบรรณ % PL = 20 ที่กำลังขยาย 50 เท่า และ (ข) คอมโพลีเมอร์ไม้พญาศ์ตบรรณ % PL = 20 ที่กำลังขยาย 400 เท่า

จากสัณฐานวิทยาของไม้พญาศ์ตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติในรูปที่ 4.56 พบว่าส่วนของเซลล์ที่เป็นช่องว่าง ที่เรียกว่า เวสเซล (Vessel) หรือพอร์ (Pore) มีลักษณะเป็นช่องเซลล์ที่ว่างเปล่า มีการกระจายตัวของเซลล์แบบกระจาย เมื่อพิจารณาลักษณะของพอร์แบบต่างๆ ดังลูกศรชี้ในรูป 4.56(ก) ลูกศร A แสดง ลักษณะพอร์แบบแผด (Radial multiple) ลูกศร B แสดง ลักษณะพอร์เดี่ยว (Solitary) และในรูป 4.57(ก) ลูกศร C แสดงลักษณะพอร์แบบกลุ่ม (Cluster)

รูปแสดงสัณฐานวิทยาของคอมโพลีเมอร์ไม้พญาศ์ตบรรณในรูป 4.57(ก) และ 4.57(ข) เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตส่วนของช่องเซลล์ที่ว่างเปล่าจะปรากฏว่ามีวิภาคของ PMMA กระจายอยู่ในช่องเซลล์แบบไม่ต่อเนื่อง โดยวิภาคของ PMMA มีการกระจายตัวอยู่ในช่องว่างที่มีขนาดเล็กมากกว่าในพอร์ที่มีขนาดใหญ่ ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากส่วนที่มีช่องว่างของเซลล์ที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดแรงคาพิลลารี (Capillary force) ที่ทำให้เกิดการซึมซับของมอนอเมอร์ได้น้อยกว่า ในบริเวณที่ช่องว่างของเซลล์ที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงพบส่วนที่วิภาคของ PMMA ในบริเวณที่เป็นช่องว่างของเซลล์ขนาดใหญ่ได้น้อยกว่าช่องว่างขนาดเล็ก เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ให้เป็นพอลิเมอร์

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของไม้พญาสัตบรรณ (*Alstonia scholaris* R. Br.) หรือไม้ตีนเป็ด โดยการซึมซับเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (MMA) และตัวริเริ่มปฏิกิริยาเบนโซิล-เปอร์ออกไซด์เข้ายังเนื้อไม้โดยไม่ใช้ความดัน แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยใช้ความร้อน (Thermal polymerization) ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ซึ่งทำให้ได้วัสดุคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์ (WPC) จากนั้นนำคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่ได้มาศึกษาสมบัติบางประการอันได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ อีกทั้งยังศึกษาเพื่อหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ จากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

5.1.1 ปัจจัยที่มีต่อกระบวนการซึมซับมอนอเมอร์เข้าในเนื้อไม้

ในการทดลองพบว่าไม้พญาสัตบรรณสามารถเกิดการซึมซับได้ดี โดยพบว่า เมื่อเวลาในการซึมซับเพิ่มขึ้นปริมาณมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ (% ML) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนถึงค่าหนึ่งแล้วจึงมีแนวโน้มคงที่ โดยที่เวลาการซึมซับเท่ากับ 48 ชั่วโมง ไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาด 2x2x2 เซนติเมตร ให้ปริมาณมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ สูงถึง 140 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไม้ขนาด 2x2x6 และ 2x2x30 เซนติเมตร ให้ % ML เท่ากับ 110 และ 80 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาดใหญ่ (ยาวกว่า) มีการซึมซับได้น้อยกว่าไม้ที่มีขนาดเล็ก ที่เวลาหนึ่งๆ

เมื่อเปรียบเทียบทิศทางการซึมซับของไม้พญาสัตบรรณที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตร พบว่าปริมาณของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้ที่มีการซึมซับในแนวตั้ง (Perpendicular) มีค่าสูงกว่าไม้ที่มีการซึมซับในแนวนอน (Parallel) เพียงเล็กน้อยที่เวลา 48 ชั่วโมง

5.1.2 ปัจจัยที่มีต่อกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ในเนื้อไม้

เมื่อเวลาในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์ (Monomer conversion) และปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ของไม้ทั้ง 3 ขนาดที่อุณหภูมิต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพบว่าการนำความร้อนที่ผิวภายนอกของไม้เข้าสู่ภายในเนื้อไม้จะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาในการพอลิเมอไรเซชัน ผ่านไปประมาณ 20-30 นาที ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวนอกและภายในเนื้อไม้ โดยไม้ที่มีขนาด 2x2x30 เซนติเมตร จะมีค่า ΔT

= 10-15 °C ซึ่งสภาวะที่ดีที่สุด ได้แก่ การพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง ซึ่งจะให้ปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ประมาณ 30 % ในไม้ขนาด 2x2x30 เซนติเมตร

5.1.3 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

ผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้ พบว่าค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยจำนวน (Mn) และโดยน้ำหนัก (Mw) ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ได้ จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ มีค่าที่เพิ่มขึ้นหรือคงที่เมื่อเวลาในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น โดยค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนัก (Mw) มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าอยู่ในช่วง 99,000 – 120,000 และพบว่าการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้น

5.1.4 การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณ

การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริเลตมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณความชื้นในเนื้อไม้และระยะความลึกเพิ่มขึ้น โดยไม้ที่มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 0 % เทียบกับน้ำหนักแห้งจะพบปริมาณของอินดิเคเตอร์สูงกว่าไม้ที่มีความชื้น 30 % และเมื่อเปรียบเทียบผลของด้านต่างๆ ที่เกิดการแพร่ พบว่าการแพร่ของอินดิเคเตอร์ในด้านยาวจะมีค่าใกล้เคียงกับด้านรัศมีและมีค่ามากกว่าด้านสัมผัสอย่างมาก เมื่อเวลาในการแพร่เพิ่มขึ้นจะพบปริมาณของอินดิเคเตอร์ในเนื้อไม้เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทดสอบ โดยไม้ที่มีปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเนื้อไม้เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีแนวโน้มลดลง ซึ่งในไม้ที่มีปริมาณความชื้น 30 % ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่ามากในด้านยาว (Longitudinal) โดยมีค่าอยู่ในช่วง $182.1 \times 10^{-7} - 11.4 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ และด้านรัศมี (Radial) มีค่าประมาณ $14.1 \times 10^{-7} - 1.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ โดยในด้านสัมผัส (Tangential) มีค่าน้อยที่สุดมีค่าในช่วง $8.5 \times 10^{-7} - 1.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$

5.1.5 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตไม้พอลิเมอร์

5.1.5.1 สมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่นอบแห้ง (Oven-dry density) ของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณร้อยละของพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ (% PL) โดยไม้พญาสัตบรรณมีค่าความหนาแน่นอบแห้งประมาณ 0.348 g/cm^3 และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ประมาณ 30 % จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.68-0.78 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งเมื่อปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้เพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ไม้พญาสัตบรรณมีเสถียรภาพของรูปร่าง (Dimension stability) ต่อความชื้นเพิ่มขึ้น โดยไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงมีค่าการบวมตัวเชิงปริมาตร และการดูด

ชั้นน้ำที่เวลาทดสอบ 168 ชั่วโมง ประมาณ 14 % และ 90 % ในขณะที่คอมโพสิตไม้ ulyginata ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ เท่ากับ 50 % ให้ค่าทั้งสองประมาณ 8 % และ 30 % และเมื่อทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค TGA พบว่า เมื่อปริมาณของพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ เพิ่มขึ้น แนวโน้มของอุณหภูมิสลายตัวของคอมโพสิตในส่วนภูมิภาคที่เป็นไม้ ulyginata ที่มีปริมาณพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น โดยไม้ ulyginata ที่มีอุณหภูมิสลายตัวที่ประมาณ 339 °C และคอมโพสิตไม้ ulyginata ที่มี % PL = 30 % มีอุณหภูมิสลายตัวประมาณ 367 °C

5.1.5.2 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตไม้ ulyginata ที่มีปริมาณพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า คอมโพสิตไม้ ulyginata ที่มีปริมาณพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการซึมซับและพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ที่อยู่ในเนื้อไม้

5.1.6 สันฐานวิทยา

ลักษณะสันฐานวิทยาของไม้ ulyginata ก่อนการปรับปรุงสมบัติในด้านยาว (Longitudinal) มีลักษณะของเซลล์ที่เป็นช่องว่างจำนวนมาก โดยมีการกระจายตัวของเซลล์แบบการจัดกระจายไม่สม่ำเสมอ และประกอบไปด้วยลักษณะของพอร์แบบต่างๆ เมื่อปรับปรุงสมบัติแล้วจะพบส่วนของภูมิภาคของพอลิเมทิลเมทาคริลเลต (PMMA) มีการกระจายตัวแทนที่อยู่ในช่องว่างของเซลล์ โดยมีการกระจายตัวอย่างไม่ต่อเนื่อง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการซึมซับมอนอเมอร์โดยใช้ความดันแบบเต็มเซลล์ (Full cell impregnation) ซึ่งทำให้มอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยา สามารถเข้าสู่เนื้อไม้ได้ดีกว่าการซึมซับแบบไม่ใช้ความดัน
2. ศึกษากระบวนการมอนอเมอร์ผสม เพื่อให้สามารถได้คอมโพสิตไม้ ulyginata ที่มีสมบัติที่หลากหลายและเหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้ดียิ่งขึ้น
3. ศึกษาตัวริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันชนิดรีดอกซ์ (Redox initiator) ที่สามารถริเริ่มปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้องจะช่วยลดการระเหยของมอนอเมอร์ได้
4. เลือกการปรับปรุงไม้ชนิดอื่นที่มีมูลค่าต่ำ เช่น ไม้รองผลิตภัณฑ์ (Pellet) เพื่อให้ไม้มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และพวกเห็ด รา ได้ดีขึ้น ซึ่งทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง

เอกสารอ้างอิง

1. "Impregnated Fibrous Materials" Report of a Study Group on Impregnated Fibrous Materials Organized by the International Atomic Energy Agency and Held in Bangkok, 20-24 November 1967.
2. พจน์ อนุวงศ์, "รายงานผลการทดลองความยากง่ายในการอาบน้ำยาของไม้", งานวิจัยป้องกันรักษาเนื้อไม้ กองวิจัยผลิตผลป่าไม้, กรมป่าไม้ พ.ศ. 2519.
3. Alfred J. Stamm , *Wood and Cellulose Science*. 1st Edition. New York : The Ronald Press Company. 1964.
4. John F. Siau , *Transport Process in Wood*. Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1984.
5. R. A. Eaton and M. D. C. Hale, *Wood ; Decay, pests and protection*. 1st Edition. Britain : Chapman & Hall. 1993.
6. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์, *เคมีพอลิเมอร์*. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิมพ์ครั้งที่ 2, 2541.
7. R. L. Calleton, E. T. Choong and R. C. McIlhenny, "Treatments of Southern Pine with Vinyl Chloride and Methyl Methacrylate for Radiation-Produced Wood-Plastic Combinations.", *Wood Science and Technology*, Vol. 4, 1970, pp. 216-225.
8. พงศ์ ไสโน, *ลักษณะโครงสร้างของไม้*. กรมป่าไม้, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2510.
9. บุญนำ เกี่ยวข้อง และ มยุรี ดวงเพชร, *คู่มือปฏิบัติการทดสอบเชิงกลของไม้*. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, พ.ศ. 2542.
10. *ดินเบ็ด Alstonia scholaris* R. Br. ส่วนปลูกป่าภาคเอกชน, สำนักส่งเสริมการปลูกป่า, กรมป่าไม้ พิมพ์ครั้งที่ 4 , พ.ศ. 2544.
11. วรธรรม อุจน์จิตติชัย, "รายงานการวิจัย คุณสมบัติและการใช้ประโยชน์ไม้พญาสัตบรรณ", 2546.
12. Roger M. Rowell and Robert L. Youngs, "Dimensional Stabilization of Wood in Use.", United States Department of Agriculture Forest Products Laboratory, January , 1981.
13. Paul R. Blankenhorn, Lester E. Rishel, Wayne K. Murphey and D. E. Kline, "Some Mechanical Properties of Impregnated Bark Board.", *Forest Product Journal*, Vol. 27, No. 6, 1977, pp. 31-43.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

14. M. Kemal Yalinkilic, *Forest Products Journal*, Vol.49 , No. 2.
15. W. Dale Ellis and J. L. O'Dell, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 73,1999, pp. 2493-2505.
16. W. Dale Ellis and J. L. O'Dell, "Wood-Polymer Composites Made with Monomers, Isocyanated, and Maleic Anhydride.", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 73, 1999, pp. 2493-2505.
17. K. M. Idriss Ali, and Mubarak A. Khan, "Wood-Plastic Composite with Methyl Methacrylate in Presence of Novel Additives.", *Polymer-Plastic Technology Engineering*, Vol. 33, No. 4, 1994, pp. 477-487.
18. F. Thuvander, L. Wallstrom, L. A. Berglund, and K. A. H. Lindberg , " Effects of an impregnation procedure for prevention of wood cell wall damage due to drying." *Wood Science and Technology*, Vol. 34, 2001, pp. 473-480.
19. B. Meyer, and C. Boehme, "Formaldehyde Emission from Solid Wood.", *Forest Product Journal*, Vol. 47, No. 5, 1977, pp. 45-48.
20. L. Wallstrom, and K. A. H. Lindberg, "Distribution of Added Chemicals in the Cell Walls of High Temperature Dried and Green Wood of Swedish Pine, *Pinus sylvestris*.", *Wood Science and Technology*, Vol. 34, 2000, pp. 327-336.
21. M. H. Alma, M. Yoshioka, Y. Yao, and N. Shiraishi, "Preparation and Characterization Of the Phenolated Wood using Hydrochloric Acid (HCl) as a Catalyst.", *Wood Science and Technology*, Vol. 30, 1995, pp. 39-47.
22. Jong B. Na, H. Michael Barnest, and Terrance E. Conners, "Determination of Boron Diffusion Coefficients in Wood.", *Wood and Fiber Science*, Vol. 33, No.1, 2001, pp. 90-103.
23. พงศ์ ไสโน , **กลสมบัติของไม้ไทย**. กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, พ.ศ. 2516.
24. John F. Siau, **Flow in Wood**. 1 st Edition, Syracuse University Press, New York, 1971.
25. http://www.boedeker.com/acryl_p.htm ,Boedeker Plastics, Inc. USA. 2004.
26. <http://www.cyrex.com> ,Cyro Industrial, Material safty data sheet, 2004.
27. อธิพิล แจ่มชัด, **พอลิเมอรัคคอมโพสิต**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

28. เทิด สุปรีชากร, วนศาสตร์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 3, พ.ศ. 2525.
29. วิรัช ชื่นวาริน, สมบัติทางฟิสิกส์ของเนื้อไม้. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2524.
30. มานิตย์ ช้อนสุข, "การทำไม้ยางพาราอัดพลาสติกโดยการอัดเมทิลเมตาโครเลทโมโนเมอร์แล้ว อบรังสีแกมมา" วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต แผนกวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2518.
31. Franz F. P. Kollmann, Principles of Wood Science and Technology ; I Solid Wood. 1968.
32. R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. Transport Phenomena. Wiley international Edition. Singapore : John Wiley & Sons, Inc. 1960.
33. W. Dale Ellis, "Moisture Sorption and Swelling of Wood-Polymer Composites.", *Wood and Fiber Science*, Vol. 26, No. 3, 1994, pp. 333-341.
34. J. M.G. Cowie. Polymer : Chemistry & Physics of Modern Materials. 2nd Edition. New York : Imprint of Chapman & Hall. 1997.
35. Rorger J. M. De Wiest. Flow Through Porous Media. New York : Academic Press, Inc. 1969.
36. Malcolm P. Stevens. Polymer Chemistry an Introduction. 3rd Edition. New York : Oxford University Press. 1999.
37. Gottfried W. Ehrenstein. Polymeric Materials. Munich : Hanser/Gardenr Publications, Inc. 2001.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การแพร่ของเมทิลเมทาคริเลตในไม้พญาสัตบรรณ

ภาคผนวก ข. TGA เทอร์โมกราฟีวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

ภาคผนวก ค. สันฐานวิทยาของไม้พญาสัตบรรณและคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ

ภาคผนวก ก.
การแพร่ของอินดิเคเตอร์ในเมทิลเมทาคริลเลต
ในไม้พญาสัตบรรณ

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่ระยะความลึก และมีปริมาณความชื้นต่างๆ ที่เวลาการแพร่เท่ากับ 2 วัน

ปริมาณ ความชื้น (%)	ระยะ ความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)		
		ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส	ด้านยาว
0	0	1	1	1
	0.3	0.251	0.096	0.525
	0.6	0.080	0.042	0.159
	0.9	0.056	0.031	0.081
	1.2	0.031	0.031	0.046
	1.5	0.025	0.028	0.043
	1.8	0.023	0.016	0.041
	2.1	0.019	0.016	0.038
2.4	0.018	0.016	0.028	
30	0	1	1	1
	0.3	0.159	0.014	0.324
	0.6	0.016	0.012	0.038
	0.9	0.016	0.012	0.020
	1.2	0.016	0.012	0.019
	1.5	0.016	0.012	0.017
	1.8	0.015	0.011	0.016
	2.1	0.015	0.011	0.016
2.4	0.013	0.011	0.014	
12	0	1	1	1
	0.3	0.179	0.116	0.516
	0.6	0.038	0.030	0.105
	0.9	0.032	0.026	0.055
	1.2	0.026	0.018	0.038
	1.5	0.021	0.018	0.037
	1.8	0.021	0.017	0.023
	2.1	0.019	0.016	0.019
2.4	0.018	0.014	0.008	

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่ระยะความลึกและปริมาณความชื้นต่างๆ ที่เวลาการแพร่เท่ากับ 4 วัน

ปริมาณ ความชื้น (%)	ระยะ ความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)		
		ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส	ด้านยาว
0	0	1	1	1
	0.3	0.316	0.148	0.610
	0.6	0.170	0.070	0.250
	0.9	0.071	0.050	0.102
	1.2	0.039	0.043	0.059
	1.5	0.034	0.040	0.057
	1.8	0.033	0.036	0.057
	2.1	0.031	0.025	0.053
2.4	0.027	0.022	0.044	

ปริมาณ ความชื้น (%)	ระยะ ความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)		
		ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส	ด้านยาว
12	0	1	1	1
	0.3	0.230	0.121	0.587
	0.6	0.052	0.053	0.124
	0.9	0.047	0.041	0.089
	1.2	0.042	0.040	0.077
	1.5	0.035	0.036	0.057
	1.8	0.034	0.030	0.054
	2.1	0.029	0.026	0.031
2.4	0.027	0.024	0.021	

ปริมาณ ความชื้น (%)	ระยะ ความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)		
		ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส	ด้านยาว
30	0	1	1	1
	0.3	0.183	0.040	0.197
	0.6	0.035	0.027	0.077
	0.9	0.025	0.027	0.027
	1.2	0.024	0.026	0.026
	1.5	0.023	0.022	0.024
	1.8	0.023	0.020	0.022
	2.1	0.020	0.019	0.021
2.4	0.017	0.019	0.020	

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่ระยะความลึกและปริมาณความชื้นต่างๆ ที่เวลาการแพร่เท่ากับ 6 วัน

ปริมาณความชื้น (%)	ระยะความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ (%)		ปริมาณความชื้น (%)	ระยะความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ (%)		ปริมาณความชื้น (%)	ระยะความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ (%)			
		ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส			ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส			ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส	ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส
0	0	1	1	12	0	1	1	30	0	1	1		
	0.3	0.332	0.169		0.747	0.3	0.309		0.155	0.644	0.3	0.212	0.054
	0.6	0.223	0.076		0.335	0.6	0.180		0.090	0.140	0.6	0.040	0.025
	0.9	0.123	0.057		0.190	0.9	0.095		0.051	0.103	0.9	0.039	0.024
	1.2	0.057	0.047		0.083	1.2	0.051		0.042	0.086	1.2	0.038	0.022
	1.5	0.049	0.043		0.082	1.5	0.041		0.039	0.081	1.5	0.034	0.022
	1.8	0.047	0.042		0.076	1.8	0.038		0.037	0.067	1.8	0.031	0.022
	2.1	0.044	0.035		0.056	2.1	0.034		0.035	0.064	2.1	0.026	0.021
	2.4	0.037	0.026		0.049	2.4	0.031		0.034	0.061	2.4	0.025	0.019

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่ระยะความลึกและปริมาณความชื้นต่างๆ ที่เวลาการแพร่เท่ากับ 8 วัน

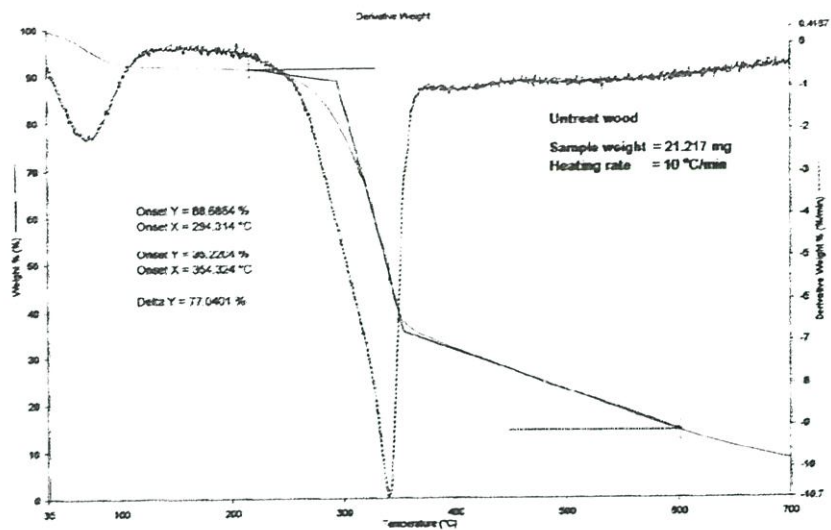
ปริมาณความชื้น (%)	ระยะความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)		
		ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส	ด้านยาว
0	0	1	1	1
	0.3	0.513	0.210	0.834
	0.6	0.298	0.069	0.454
	0.9	0.194	0.085	0.236
	1.2	0.102	0.076	0.095
	1.5	0.099	0.052	0.093
	1.8	0.081	0.046	0.082
	2.1	0.063	0.042	0.074
2.4	0.086	0.050	0.070	
30	0	1	1	1
	0.3	0.371	0.202	0.778
	0.6	0.208	0.059	0.132
	0.9	0.140	0.059	0.102
	1.2	0.083	0.057	0.100
	1.5	0.082	0.055	0.090
	1.8	0.062	0.054	0.089
	2.1	0.059	0.047	0.083
2.4	0.045	0.045	0.082	
ปริมาณความชื้น (%)	ระยะความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)		
		ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส	ด้านยาว
		1	1	1
		0.371	0.202	0.778
		0.208	0.059	0.132
		0.140	0.059	0.102
		0.083	0.057	0.100
		0.082	0.055	0.090
0.062	0.054	0.089		
0.059	0.047	0.083		
0.045	0.045	0.082		
ปริมาณความชื้น (%)	ระยะความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)		
		ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส	ด้านยาว
		1	1	1
		0.193	0.184	0.136
		0.041	0.038	0.051
		0.037	0.036	0.042
		0.034	0.029	0.028
		0.030	0.028	0.026
0.029	0.027	0.024		
0.024	0.025	0.023		
0.023	0.021	0.022		

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าความเข้มข้น (%) ของอินดิเคเตอร์ที่แพร่เข้าสู่เนื้อไม้ที่ระยะความลึกและมีความเข้มข้นต่างๆ ที่เวลาการแพร่เท่ากับ 10 วัน

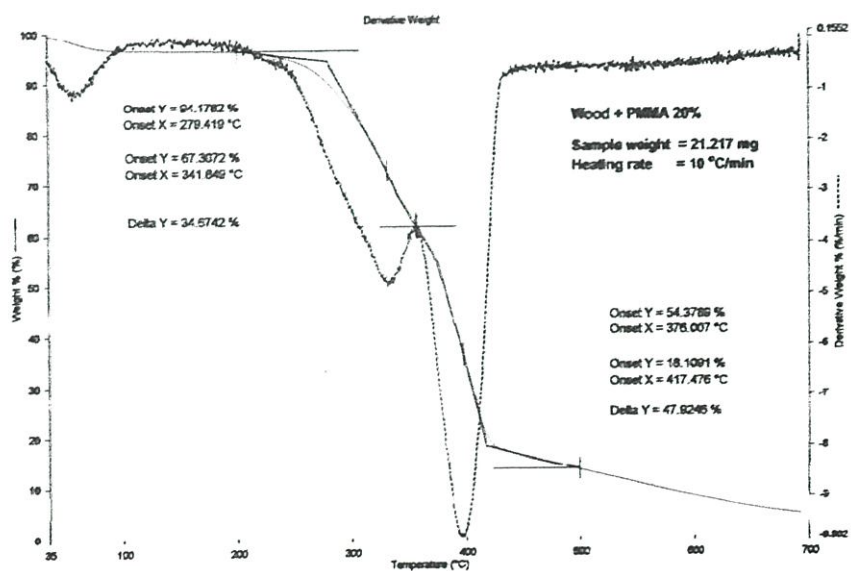
ปริมาณ ความชื้น (%)	ระยะ ความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)		ปริมาณ ความชื้น (%)	ระยะ ความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)		ปริมาณ ความชื้น (%)	ระยะ ความลึก (cm)	ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์ ในตำแหน่งที่ทดสอบ (%)	
		ด้านรัศมี	ด้านสัมผัส			ด้านยาว	ด้านรัศมี			ด้านสัมผัส	ด้านยาว
0	0	1	1	1	0	1	1	30	0	1	1
	0.3	0.661	0.235	0.911	0.3	0.439	0.211	0.624	0.3	0.291	0.063
	0.6	0.347	0.108	0.500	0.6	0.232	0.093	0.273	0.6	0.098	0.046
	0.9	0.200	0.078	0.273	0.9	0.143	0.070	0.118	0.9	0.036	0.037
	1.2	0.124	0.060	0.152	1.2	0.116	0.039	0.113	1.2	0.031	0.025
	1.5	0.102	0.053	0.145	1.5	0.087	0.034	0.109	1.5	0.024	0.022
	1.8	0.091	0.044	0.093	1.8	0.066	0.033	0.108	1.8	0.022	0.004
	2.1	0.090	0.041	0.079	2.1	0.046	0.008	0.096	2.1	0.021	0.004
	2.4	0.046	0.042	0.076	2.4	0.052	0.004	0.081	2.4	0.003	0.003

ภาคผนวก ข.

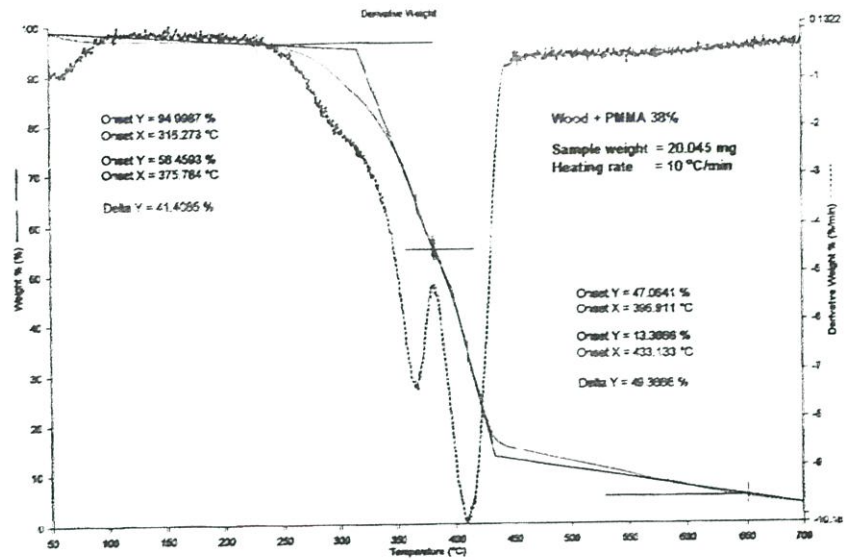
TGA เทอร์โมกราฟิวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน



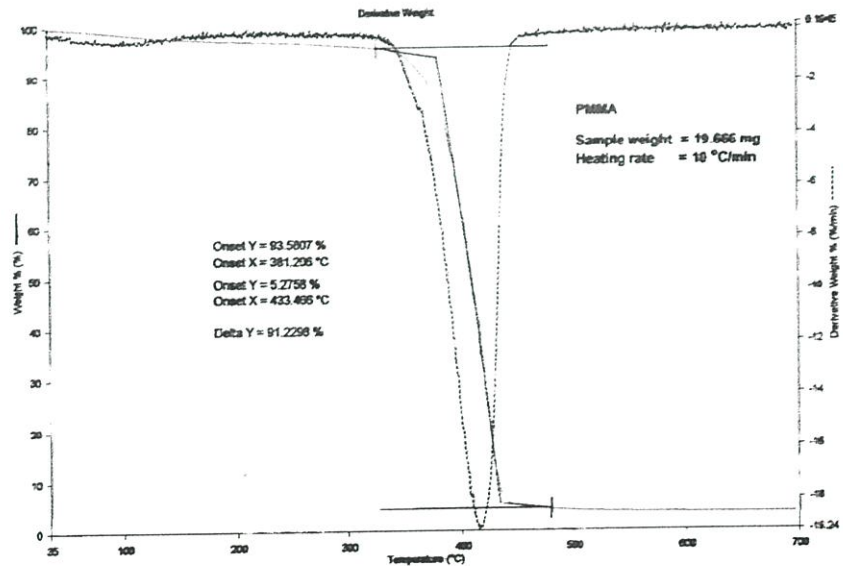
รูปที่ ข.1 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก (TGA)



รูปที่ ข.2 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 20 % ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน โดยการชั่งน้ำหนัก (TGA)



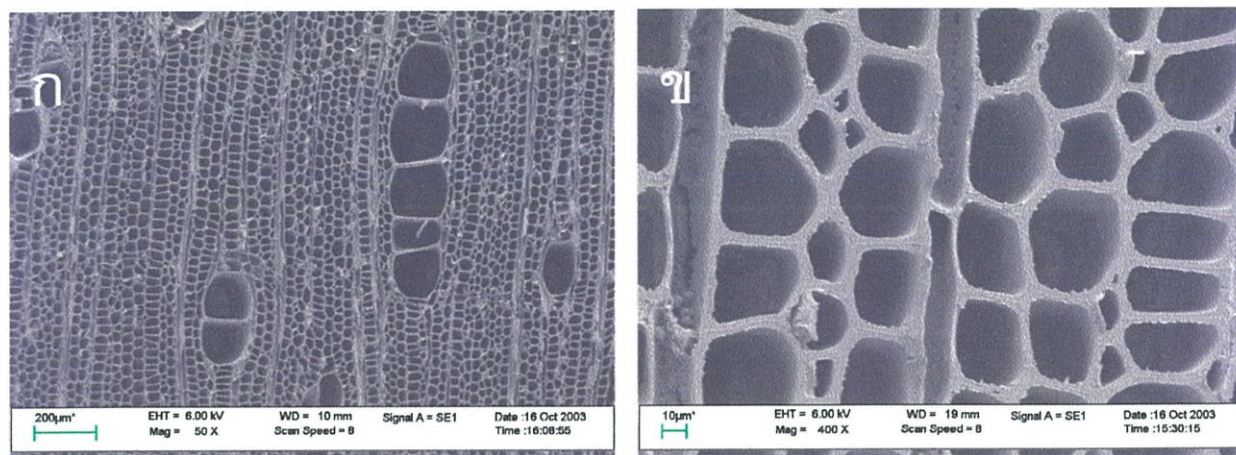
รูปที่ ข.3 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 38 % ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน โดยการชั่งน้ำหนัก (TGA)



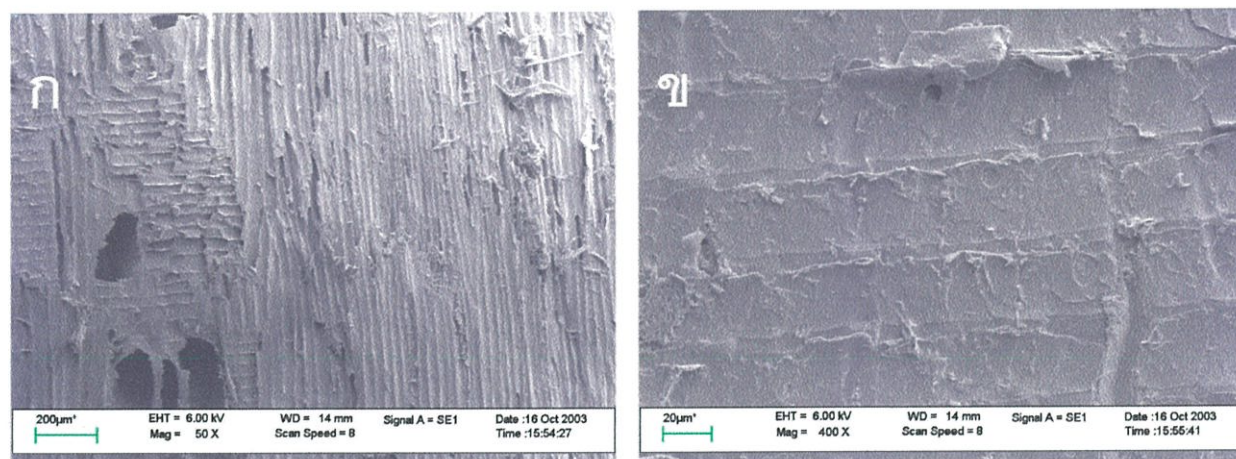
รูปที่ ข.4 แสดงเทอร์โมกราฟจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่สกัดจากคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 38 % ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยการชั่งน้ำหนัก (TGA)

ภาคผนวก ค.

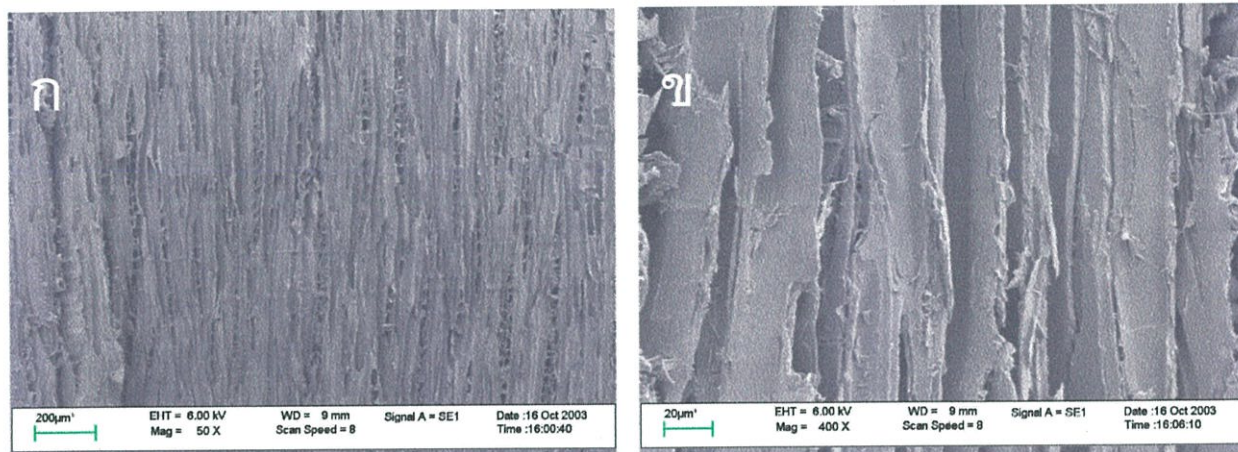
สัณฐานวิทยาของไม้พญาสัตบรรณ
และคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณ



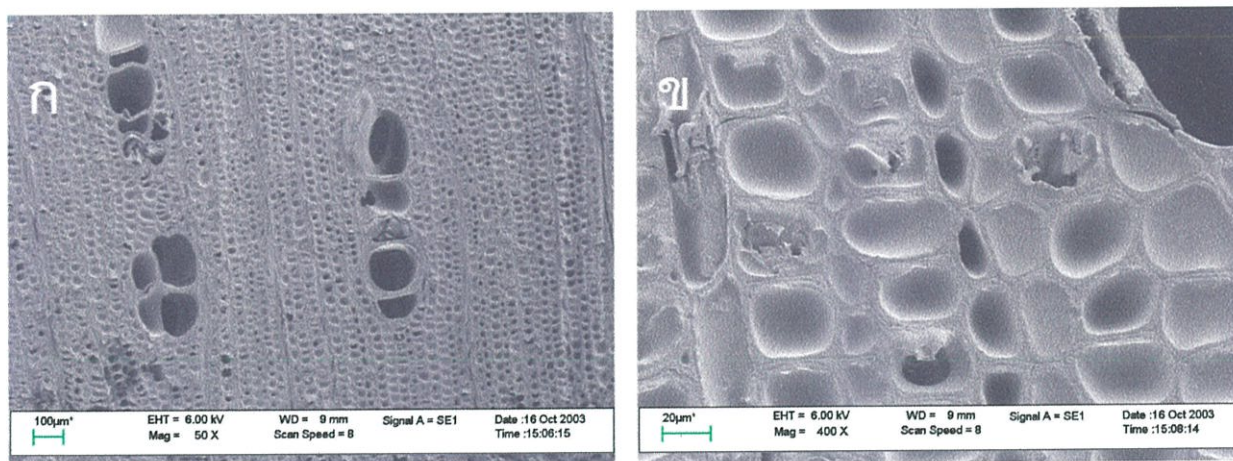
รูปที่ ค.1 แสดงสัณฐานวิทยาของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติในด้านยาว (Longitudinal) ที่กำลังขยาย ก) 50 เท่า ข) 400 เท่า



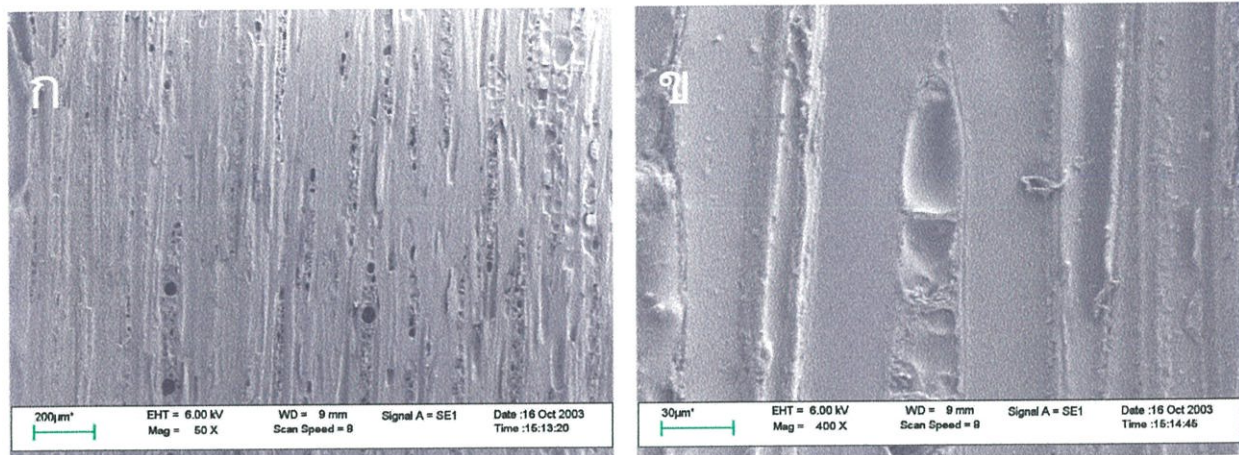
รูปที่ ค.2 แสดงสัณฐานวิทยาของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติในด้านรัศมี (Radial) ที่กำลังขยาย ก) 50 เท่า ข) 400 เท่า



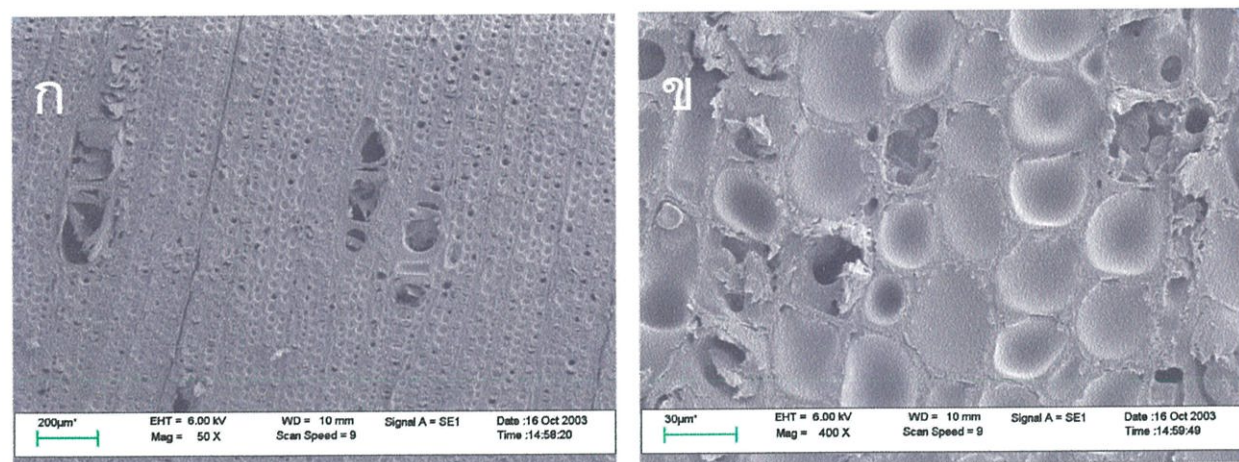
รูปที่ ค.3 แสดงลักษณะวิทยาของไม้พญาสัตบรรณก่อนการปรับปรุงสมบัติด้านสัมผัส (Tangential) ที่กำลังขยาย ก) 50 เท่า ข) 400 เท่า



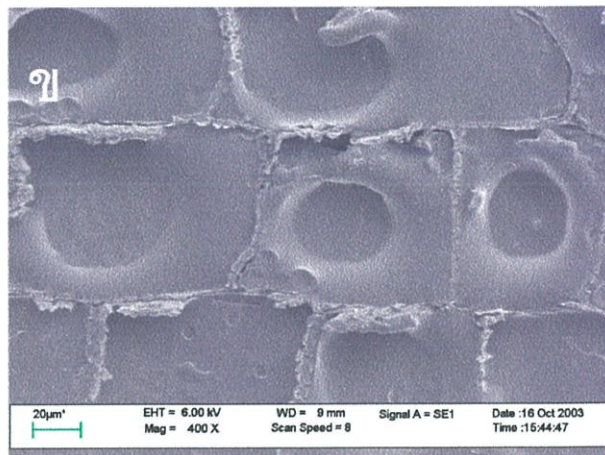
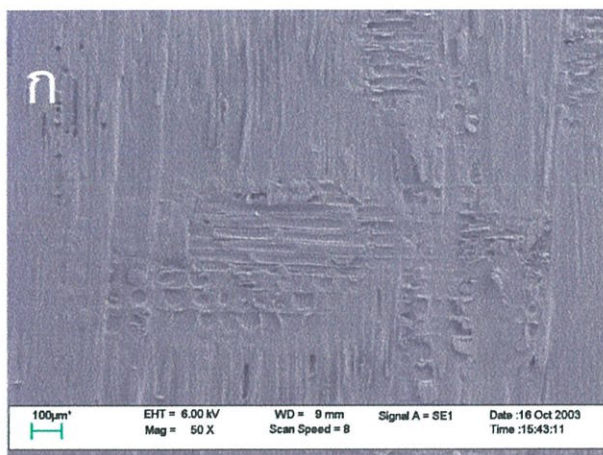
รูปที่ ค.4 แสดงลักษณะวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณในดำนยาว (Longitudinal) ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 20 % ที่กำลังขยาย ก) 50 เท่า ข) 400 เท่า



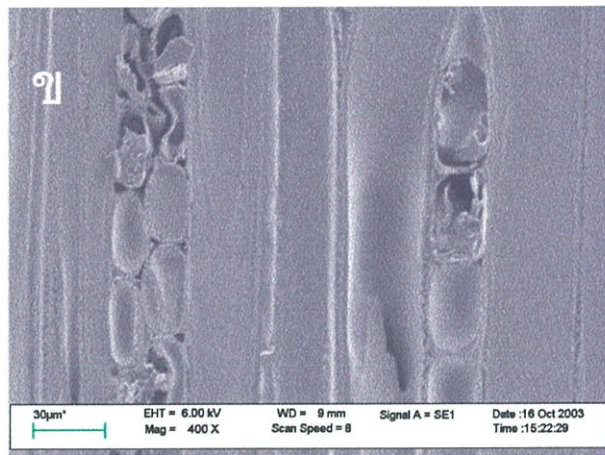
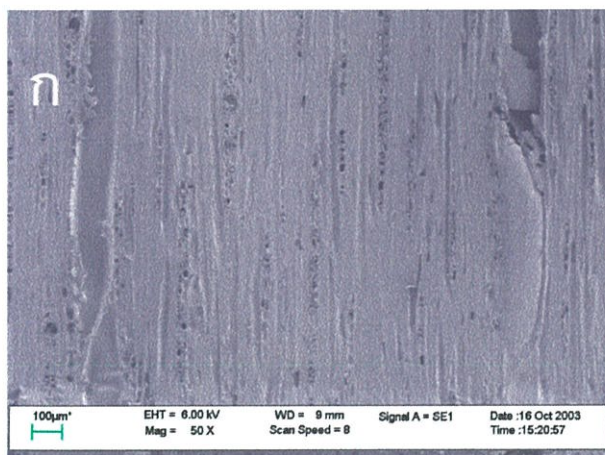
รูปที่ ค.5 แสดงลักษณะวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณด้านสัมผัส (Tangential) ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 20 % ที่กำลังขยาย ก) 50 เท่า ข) 400 เท่า



รูปที่ ค.6 แสดงลักษณะวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณในด้านยาว (Longitudinal) ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 30 % ที่กำลังขยาย ก) 50 เท่า ข) 400 เท่า



รูปที่ ค.7 แสดงลักษณะฐานวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณในด้านรัศมี (Radial) ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 30 % ที่กำลังขยาย ก) 50 เท่า ข) 400 เท่า



รูปที่ ค.8 แสดงลักษณะฐานวิทยาของคอมโพสิตไม้พญาสัตบรรณด้านสัมผัส (Tangential) ที่มีปริมาณพอลิเมอร์ในเนื้อไม้ 30 % ที่กำลังขยาย ก) 50 เท่า ข) 400 เท่า

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ – นามสกุล

วัน เดือน ปีเกิด

ที่อยู่

ประวัติการศึกษา

นายอลงกรณ์ ศิลปชำนาญ

18 ธันวาคม 2521 ที่กรุงเทพมหานคร

355/819-821 หมู่บ้านดอนเมืองพัฒนา ซอย 5 ถนนพหลโยธิน

ตำบลคูคต อำเภอ ลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12130

โทร.0-2536-6435, 0-6989-5821

2543 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง